



INFLUÊNCIA DOS PARÂMETROS DE CORTE LASER NA QUALIDADE DA SUPERFÍCIE CORTADA

IVO ALMEIDA AMARAL

julho de 2018

INFLUÊNCIA DOS PARÂMETROS DE CORTE LASER NA QUALIDADE DA SUPERFÍCIE CORTADA

Ivo Almeida Amaral

2018

Instituto Superior de Engenharia do Porto
Departamento de Engenharia Mecânica



POLITÉCNICO
DO PORTO

isep

INFLUÊNCIA DOS PARÂMETROS DE CORTE LASER NA QUALIDADE DA SUPERFÍCIE CORTADA

Ivo Almeida Amaral
1121268

Dissertação apresentada ao Instituto Superior de Engenharia do Porto para cumprimento dos requisitos necessários à obtenção do grau de Mestre em Engenharia Mecânica, realizada sob a orientação do Professor Doutor Francisco José Gomes da Silva.

2018

Instituto Superior de Engenharia do Porto
Departamento de Engenharia Mecânica



POLITÉCNICO
DO PORTO

isep

JÚRI

Presidente

Arnaldo Manuel Guedes Pinto

Professor Adjunto, Departamento de Engenharia Mecânica, Instituto Superior de Engenharia do Porto

Orientador

Francisco José Gomes da Silva

Professor Adjunto, Departamento de Engenharia Mecânica, Instituto Superior de Engenharia do Porto

Arguente

João Paulo Davim Tavares da Silva

Professor Associado com Agregação, Universidade de Aveiro

AGRADECIMENTOS

Quero começar por agradecer à administração da empresa Marsilinox - Indústria Metalúrgica, Lda., nomeadamente à Maria João Costa e ao Alexandre Gomes, pela oportunidade que me proporcionaram para poder, em contexto industrial, realizar esta dissertação. Agradeço ainda, a ajuda e o tempo prestado pelos operadores dos equipamentos e a outros colegas da empresa, sem eles a realização dos ensaios teria sido impossível.

Um agradecimento especial ao Professor Doutor Francisco José Gomes da Silva, por ter aceite orientar este trabalho, sendo sempre incansável, tanto no apoio que me deu nos momentos complicados, assim como naquilo que estava a ser bem feito.

Um agradecimento ainda, para a Engenheira Fátima Andrade, ao Professor Doutor Manuel Jorge Dores de Castro e ao Mestre Rui Rocha, por todo o apoio dado ao nível dos laboratórios.

Agradecer também, a todos os meus amigos, colegas e conhecidos, que me incentivaram e encorajaram neste objetivo importante da minha vida.

Termino, agradecendo às pessoas mais importantes da minha vida, aos meus pais, Helena Alves Almeida Amaral e José Manuel da Costa Amaral, à minha irmã, Beatriz Almeida Amaral, assim como a todos os outros membros da minha família, que estão sempre ao meu lado, nos bons e nos maus momentos.

PALAVRAS CHAVE

Qualidade da Superfície Cortada; Parâmetros de Corte Laser; Melhoria do Processo

RESUMO

Atualmente, os equipamentos de fonte laser têm um papel importante no mundo industrial. Normalmente, é com o processo de corte laser que se inicia o processo produtivo de diferentes peças que, juntamente com outros processos de fabrico, vão dar origem a produtos que fazem parte do nosso quotidiano.

Um dos principais problemas dos equipamentos destinados ao corte laser, está relacionado com a má seleção dos parâmetros de corte. O desajustamento destes parâmetros, leva a uma perda de qualidade da superfície cortada, que dificilmente volta a ser restabelecida. Esta perda de qualidade traduz-se concretamente na criação de rebarba. Este defeito, para ser contornado, faz com que as empresas comportem custos extra, ao nível de mão-de-obra e de equipamentos destinados a minimizar os níveis de rebarba.

A dissertação aqui apresentada, foi desenvolvida na empresa Marsilinox - Indústria Metalúrgica, Lda., no setor dos equipamentos de corte laser, onde foram realizados diversos cortes de amostras por corte laser. Foram ensaiadas com diferentes tipos de parâmetros de corte, em tipos de laser distintos, de diferentes tipos de material.

Foram documentados e estudados parâmetros de corte laser, dados e aspetos pertinentes verificados durante a realização dos ensaios. Posteriormente, em ambiente laboratorial, realizou-se um conjunto de procedimentos para ser possível uma análise metalográfica. Efetuaram-se ainda, medições da rebarba, análise da superfície cortada e medição de parâmetros de rugosidade de todas as amostras. Através destas análises, torna-se possível indicar o melhor conjunto de parâmetros de corte laser, para garantir a melhor qualidade da superfície cortada.

Posto isto, as empresas, assim como todos aqueles que trabalham com equipamentos de fonte laser, podem adotar os procedimentos descritos ao longo deste estudo, relativos aos parâmetros de corte laser, bem como os cuidados a ter com os componentes dos equipamentos, nomeadamente ao nível da limpeza. Só assim será possível obter-se a melhor qualidade da superfície cortada e evitar que as empresas tenham custos associados após o corte laser.

KEYWORDS

Quality of Cut Surface; Laser Cutting Parameters; Process Improvement

ABSTRACT

Currently, laser source equipment's has an important role in the industrial world. Usually, it is with laser cutting process that starts the production process of different parts, which together with other manufacturing processes will results to the products that are part of our daily lives.

One of the main troubles with laser cutting equipment, is related to the wrong indication of cutting parameters. The mismatching of these parameters, leads to a loss of quality of the cut surface, which is hardly re-established. This loss of quality is related to a burr problem. This defect, to be overcome, means that companies behave extra costs, searching more employees and equipment to minimize burr levels.

The work presented here was developed in the company designated by Marsilinox - Metal Industry, Ltd., in the sector of the laser cutting equipment's, where several samples were cut by laser cutting. They were tested with different types of cutting parameters, in different types of laser, of different types of material.

Laser cutting parameters, data and relevant aspects verified during the tests were documented and studied. Subsequently, in a laboratory environment, a set of procedures was performed to allow a metallographic analysis. Also, burr measurements, analysis of the cut surface and measurement of roughness parameters of all samples were carried out. Through these analyzes, it is possible to indicate the best set of laser cutting parameters to ensure the best quality of the cut surface.

Therefore, companies, as well as all those working with laser equipment's, can adopt the procedures described throughout this work, related with, the special attention to the indication of laser cutting parameters, as well as the care taken with the components of the equipment's, namely at the level cleaning. Only then will it be possible to obtain the best quality of the cut surface, so that companies not have associated costs after laser cutting.

LISTA DE SÍMBOLOS E ABREVIATURAS

Lista de Abreviaturas

AISI	<i>American Iron and Steel Institute</i>
ANOVA	<i>Analysis of Variance</i>
CAD	<i>Computer Aided Design</i>
CAM	<i>Computer Aided Manufacturing</i>
CEMUP	Centro de Materiais da Universidade do Porto
DEM	Departamento de Engenharia Mecânica
DOE	<i>Design of Experiments</i>
DXF	<i>Drawing Exchange Format</i>
EUA	Estados Unidos da América
IPG	<i>In-Plane-Gate (transistor)</i>
ISEP	Instituto Superior de Engenharia do Porto
SEM	<i>Scanning Electron Microscopy</i>
ZTA	Zona Termicamente Afetada
3D	Três Dimensões

Lista de Unidades

bar	Unidade de pressão
cm ³	Centímetro cúbico
g	Gramma
GPa	Giga Pascal
MPa	Mega Pascal
min	Minuto
mm	Milímetro
ms	Milisegundo
s	Segundo
W	Watt
μm	Micrómetro
°C	Graus Celsius

Lista de Símbolos

Al	Símbolo químico para o Alumínio
C	Símbolo químico para o Carbono
Cr	Símbolo químico para o Crómio
CO ₂	Dióxido de carbono
HV	Dureza Vickers
Mn	Símbolo químico para o Manganês
Mo	Símbolo químico para o Molibdénio

N	Símbolo químico para o Azoto
Nb	Símbolo químico para o Nióbio
Ni	Símbolo químico para o Níquel
P	Símbolo químico para o Fósforo
R _a	Rugosidade média aritmética
R _t	Rugosidade total
R _{max}	Rugosidade máxima
R _z	Média da distância entre picos e vales em dez pontos
R ²	Coefficiente de correlação
S	Símbolo químico para o Enxofre
Si	Símbolo químico para o Silício
S/N	Quociente Sinal-Ruído
€	Euro
%	Porcentagem

GLOSSÁRIO DE TERMOS

<i>Assembly</i>	Conjunto de operações que fazem parte de uma montagem final.
<i>Hotte</i>	Habitáculo destinado à realização de experiências químicas, para a proteção do exterior e extração de fumos.
<i>Lead time</i>	Tempo necessário para realizar uma determinada tarefa, atividade, produto ou serviço. É uma junção do tempo útil com o tempo não produtivo.
<i>Nesting</i>	Processo que conduz a um plano de corte. Um plano de corte, que contém as peças destinadas ao corte laser aglomeradas, com o objetivo de criar o mínimo desperdício na matéria-prima a cortar.
<i>Software</i>	Sequência de instruções escritas para serem interpretadas por um computador com o objetivo de executar tarefas específicas.
<i>Kaizen</i>	Palavra de origem japonesa, que se traduz como melhoria contínua. Está associada a todas as atividades dos colaboradores, com o objetivo de melhorar os processos e sistemas de trabalho.

ÍNDICE DE FIGURAS

FIGURA 1 - TECNOLOGIA LASER USADA NA ÁREA DA SAÚDE PARA O CLAREAMENTO DOS DENTES [1]	29
FIGURA 2 - TECNOLOGIA LASER USADA NA ÁREA INDUSTRIAL PARA CORTE DE CHAPA METÁLICA [2]	29
FIGURA 3 - DIFERENTES FASES DA METODOLOGIA	32
FIGURA 4 - PERCURSO HISTÓRICO DO LASER	39
FIGURA 5 - GERADOR LASER [10]	40
FIGURA 6 - FENÓMENOS DE ABSORÇÃO, EMISSÃO ESTIMULADA E EMISSÃO ESPONTÂNEA [13]	41
FIGURA 7 - SISTEMA DE FOCO [17]	42
FIGURA 8 - SISTEMA DE CORTE A LASER [20]	42
FIGURA 9 - BOCAL	43
FIGURA 10 - LENTE DE FOCO	44
FIGURA 11 - TRÊS TAMANHOS DISTINTOS DE LENTES DE FOCO	44
FIGURA 12 – VENTOSAS [MARSILINOX]	44
FIGURA 13 - MESA DE POSICIONAMENTO [MARSILINOX]	44
FIGURA 14 - ZONAS DISTINTAS APRESENTADAS APÓS O CORTE A LASER [MARSILINOX]	45
FIGURA 15 - DIAGRAMA ALUSIVO AOS DIFERENTES TIPOS DE LASERS EXISTENTES	47
FIGURA 16 - TUBO DE VIDRO DA MISTURA DE GASES [31]	48
FIGURA 17 - SISTEMA DE LASER CO ₂ [29]	49
FIGURA 18 - ESPELHOS EXISTENTES NA ENTRADA E SAÍDA DO GERADOR LASER [32]	49
FIGURA 19 - SISTEMA DE REFRIGERAÇÃO [35]	50
FIGURA 20 - CABO DE FIBRA ÓTICA DESTACADO NUM SISTEMA DE CORTE LASER DESTE TIPO [36]	51
FIGURA 21 - SISTEMA DE LASER POR FIBRA ÓTICA [29]	51
FIGURA 22 - CONSTITUIÇÃO DE UM SISTEMA DE FONTE LASER	52
FIGURA 23 - MESA MÓVEL	53
FIGURA 24 – AUTOCAD® [40]	53
FIGURA 25 - TRUTOPS BOOST® [41]	54
FIGURA 26 - TRUTOPS LASER® [42]	54
FIGURA 27 - CABEÇA DE CORTE	54
FIGURA 28 - MONITOR DE INSTRUÇÕES	54
FIGURA 29 - TUBO A SER SUBMETIDO AO CORTE	55
FIGURA 30 - ADAPTADOR PARA A CABEÇA DE CORTE	55
FIGURA 31 - CABEÇA DE SOLDADURA (1-CÂMARA DE MONOTORIZAÇÃO; 2-VIDRO DE PROTEÇÃO; 3-GÁS; 4-PROTEÇÃO ADICIONAL; 5-LENTE DE FOCO; 6-REFRIGERAÇÃO) [38]	55
FIGURA 32 – RUGOSÍMETRO [66]	66
FIGURA 33 - PERFILÓMETRO DE CONTACTO [66]	66
FIGURA 34 - DIFERENTES TIPOS DE PERFIL DO ESTADO DA SUPERFÍCIE [66]	66
FIGURA 35 - PERFIL DE RUGOSIDADE PARA IDENTIFICAÇÃO DO PARÂMETRO R _A [66]	67
FIGURA 36 - PERFIL DE RUGOSIDADE PARA IDENTIFICAÇÃO DO PARÂMETRO R _T [66]	67
FIGURA 37 - PERFIL DE RUGOSIDADE PARA IDENTIFICAÇÃO DO PARÂMETRO R _Z E R _{MAX} [66]	68
FIGURA 38 - REPRESENTAÇÃO DO SISTEMA DE VARIÁVEIS DO PROCESSO	V _i - VARIÁVEIS DE P – VARIÁVEIS DE PERTURBAÇÃO DO
CONTROLO DO PROCESSO	

PROCESSO	R – VALOR OBTIDO PARA A CARACTERÍSTICA A ESTUDAR
[68]	69
FIGURA 39 - REPRESENTAÇÃO DE UMA MATRIZ ORTOGONAL DO TIPO L8 [69]	69
FIGURA 40 - GRÁFICO DA RELAÇÃO DO QUOCIENTE S/N [70]	70
FIGURA 41 - GRÁFICO DE PROBABILIDADE NORMAL [71]	71
FIGURA 42 - ETAPAS DO PROCESSO DE ENSAIOS	77
FIGURA 43 - AMOSTRA PROJETADA PARA CORTAR NO MATERIAL AISI 316L	78
FIGURA 44 - AMOSTRA A PROJETADA PARA CORTAR NO MATERIAL ST12	78
FIGURA 45 - "TRULASER 3030 FIBER"	81
FIGURA 46 - "TRULASER 3030"	81
FIGURA 47 - ESQUEMA DA UTILIZAÇÃO DOS PARÂMETROS DE CORTE LASER	92
FIGURA 48 - MICROESTRUTURA DO St12 SEM CORTE LASER	97
FIGURA 49 - AMOSTRA DE CORTE LASER DO TIPO FIBRA ÓTICA, COM A POTÊNCIA DE RADIAÇÃO RECOMENDADA	97
FIGURA 50 - AMOSTRA DE CORTE LASER DO TIPO CO ₂ , COM A POTÊNCIA DE RADIAÇÃO DUAS VEZES REDUZIDA	98
FIGURA 51 - MICROESTRUTURA DO AISI 316L SEM CORTE LASER	99
FIGURA 52 - AMOSTRA DE CORTE LASER DO TIPO FIBRA ÓTICA, COM POTÊNCIA DE RADIAÇÃO DUAS VEZES REDUZIDA	99
FIGURA 53 - AMOSTRA DE CORTE LASER DO TIPO CO ₂ , COM POTÊNCIA DE RADIAÇÃO RECOMENDADA	100
FIGURA 54 - AMOSTRA DE CORTE LASER COM REBARBA	101
FIGURA 55 - PORMENOR DA FORMAÇÃO DA REBARBA NUMA AMOSTRA DE CORTE LASER DO TIPO FIBRA ÓTICA	102
FIGURA 56 - AMOSTRA DE CORTE LASER SEM REBARBA	103
FIGURA 57 - AMOSTRA DE AISI 316L, CORTADA NO LASER DO TIPO CO ₂ , COM PN	104
FIGURA 58 – AMOSTRA DE AISI 316L, CORTADA NO LASER DO TIPO FIBRA ÓTICA, COM PN	104
FIGURA 59 - AMOSTRA DE St12, CORTADA NO LASER DO TIPO CO ₂ , COM PN	104
FIGURA 60 - AMOSTRA DE St12, CORTADA NO LASER DO TIPO FIBRA ÓTICA, COM PN	104
FIGURA 61 - AMOSTRA DE AISI 316L, CORTADA NO LASER DO TIPO CO ₂ , COM PR	105
FIGURA 62 - AMOSTRA DE AISI 316L, CORTADA NO LASER DO TIPO FIBRA ÓTICA, COM PR	105
FIGURA 63 - AMOSTRA DE St12, CORTADA NO LASER DO TIPO CO ₂ , COM PR	105
FIGURA 64 - AMOSTRA DE St12, CORTADA NO LASER DO TIPO FIBRA ÓTICA, COM PR	105
FIGURA 65 - AMOSTRA DE AISI 316L, CORTADA NO LASER DO TIPO CO ₂ , COM PRR	106
FIGURA 66 - AMOSTRA DE AISI 316L, CORTADA NO LASER DO TIPO FIBRA ÓTICA, COM PRR	106
FIGURA 67 - AMOSTRA DE St12, CORTADA NO LASER DO TIPO CO ₂ , COM PRR	106
FIGURA 68 - AMOSTRA DE St12, CORTADA NO LASER DO TIPO FIBRA ÓTICA, COM PRR	106
FIGURA 69 - AMOSTRA DE AISI 316L, CORTADA NO LASER DO TIPO CO ₂ , COM PN E VN	107
FIGURA 70 - AMOSTRA DE St12, CORTADA NO LASER DO TIPO FIBRA ÓTICA, COM PN E VN	107
FIGURA 71 - AMOSTRA DE AISI 316L, CORTADA NO LASER DO TIPO FIBRA ÓTICA, COM PR E VN	108
FIGURA 72 - AMOSTRA DE St12, CORTADA NO LASER DO TIPO FIBRA ÓTICA, COM PRR E VN	108
FIGURA 73 - AMOSTRA DE St12, CORTADA NO LASER DO TIPO FIBRA ÓTICA, COM PN E VR	109
FIGURA 74 - AMOSTRA DE AISI 316L, CORTADA NO LASER DO TIPO CO ₂ , COM PN E VR	109

FIGURA 75 - AMOSTRA DE St12, CORTADA NO LASER DO TIPO FIBRA ÓTICA, COM PR E VR	109
FIGURA 76 - AMOSTRA DE St12, CORTADA NO LASER DO TIPO FIBRA ÓTICA, COM PRR E VR	109
FIGURA 77 - AMOSTRA DE St12, CORTADA NO LASER DO TIPO CO ₂ , COM PN E VH	110
FIGURA 78 - AMOSTRA DE St12, CORTADA NO LASER DO TIPO CO ₂ , COM PR E VH	110
FIGURA 79 - AMOSTRA DE St12, CORTADA NO LASER DO TIPO CO ₂ , COM PRR E VH	111
FIGURA 80 - AMOSTRA DE AISI 316L, CORTADA NO LASER DO TIPO FIBRA ÓTICA, COM PRR E VH	111
FIGURA 81 - AMOSTRA DE AISI 316L, CORTADA NO LASER DO TIPO FIBRA ÓTICA, COM PN, VH E PN	112
FIGURA 82 - AMOSTRA DE AISI 316L, CORTADA NO LASER DO TIPO FIBRA ÓTICA, COM PN, VH E PR	112
FIGURA 83 - AMOSTRA DE St12, CORTADA NO LASER DO TIPO CO ₂ , COM PRR, VN E PN	113
FIGURA 84 - AMOSTRA DE St12, CORTADA NO LASER DO TIPO CO ₂ , COM PRR, VN E PR	113
FIGURA 85 - AMOSTRA DE AISI 316L, CORTADA NO LASER DO TIPO CO ₂	113
FIGURA 86 - AMOSTRA DE AISI 316L, CORTADA NO LASER DO TIPO FIBRA ÓTICA	113
FIGURA 87 - AMOSTRA EM AISI 316L, CORTADA NO LASER DO TIPO FIBRA ÓTICA	115
FIGURA 88 - AMOSTRA EM AISI 316L, CORTADA NO LASER DO TIPO CO ₂	115
FIGURA 89 - AMOSTRA EM St12, CORTADA NO LASER DO TIPO FIBRA ÓTICA	116
FIGURA 90 - AMOSTRA EM St12, CORTADA NO LASER DO TIPO CO ₂	116
FIGURA 91 - AMOSTRA EM St12, CORTADA NO LASER DO TIPO FIBRA ÓTICA, COM PR, VR E PN	117
FIGURA 92 - AMOSTRA EM St12, CORTADA NO LASER DO TIPO FIBRA ÓTICA, COM PN, VN E PN	117
FIGURA 93 - AMOSTRA EM St12, CORTADA NO LASER DO TIPO CO ₂ , COM PR, VR E PN	118
FIGURA 94 - AMOSTRA EM St12, CORTADA NO LASER DO TIPO CO ₂ , COM PN, VN E PN	118
FIGURA 95 - POSIÇÃO DE UMA AMOSTRA, PARA PODER SER MEDIDA COM O RUGOSÍMETRO	119
FIGURA 96 - PERFIL R COM OS DIFERENTES PARÂMETROS DE RUGOSIDADE	119
FIGURA 97 - PERFIL R DE UMA AMOSTRA EM AISI 316L, CORTADA NO LASER DO TIPO CO ₂ , COM PN, VN, PN	120
FIGURA 98 – SUPERFÍCIE DE CORTE DE UMA AMOSTRA EM AISI 316L, CORTADA NO LASER DO TIPO CO ₂ , COM PN, VN, PN	120
FIGURA 99 - PERFIL R DE UMA AMOSTRA EM AISI 316L, CORTADA NO LASER DE FIBRA ÓTICA, COM PN, VR, PN	121
FIGURA 100 - SUPERFÍCIE DE CORTE DE UMA AMOSTRA EM AISI 316L, CORTADA NO LASER DE FIBRA ÓTICA, COM PN, VR, PN	122
FIGURA 101 - PERFIL R DE UMA AMOSTRA EM St12, CORTADA NO LASER DE FIBRA ÓTICA, COM PN, VN, PN	122
FIGURA 102 – SUPERFÍCIE DE CORTE DE UMA AMOSTRA EM St12, CORTADA NO LASER DE FIBRA ÓTICA, COM PN, VN, PN	123
FIGURA 103 - PERFIL R DE UMA AMOSTRA EM St12, CORTADA NO LASER DO TIPO CO ₂ , COM PRR, VR, PR	123
FIGURA 104 - SUPERFÍCIE DE CORTE DE UMA AMOSTRA EM St12, CORTADA NO LASER DO TIPO CO ₂ , COM PRR, VR, PR	124
FIGURA 105 - PERFIL R DE UMA AMOSTRA EM St12, CORTADA NO LASER DO TIPO CO ₂ , COM PR, VR, PN	124
FIGURA 106 – SUPERFÍCIE DE CORTE DE UMA AMOSTRA EM St12, CORTADA NO LASER DO TIPO CO ₂ , COM PR, VR, PN	125

FIGURA 107 - PERFIL R DE UMA AMOSTRA EM St12, CORTADA NO LASER DO TIPO CO ₂ , COM PR, VH, PN	126
FIGURA 108 - SUPERFÍCIE DE CORTE DE UMA AMOSTRA EM St12, CORTADA NO LASER DO TIPO CO ₂ , COM PR, VH, PN	126
FIGURA 109 - GRÁFICO DO RÁCIO S/N, DOS RESULTADOS DA REBARBA	129
FIGURA 110 - GRÁFICO DO RÁCIO S/N, DOS RESULTADOS DA RUGOSIDADE R _A	130
FIGURA 111 - GRÁFICO DO RÁCIO S/N, DOS RESULTADOS DA RUGOSIDADE R _Z	130
FIGURA 112 - GRÁFICO DO RÁCIO S/N, DOS RESULTADOS DA RUGOSIDADE R _{MAX}	131
FIGURA 113 - LINHA DE TENDÊNCIA DOS RESULTADOS DA REBARBA	132
FIGURA 114 - LINHA DE TENDÊNCIA DOS RESULTADOS DA RUGOSIDADE R _A	133
FIGURA 115 - LINHA DE TENDÊNCIA DOS RESULTADOS DA RUGOSIDADE R _Z	134
FIGURA 116 - LINHA DE TENDÊNCIA DOS RESULTADOS DA RUGOSIDADE R _{MAX}	134
FIGURA 117 - GRÁFICO DE SUPERFÍCIE DA REBARBA, COM A PRESSÃO DO GÁS E A VELOCIDADE DE CORTE	136
FIGURA 118 - GRÁFICO DE SUPERFÍCIE DA REBARBA, COM A PRESSÃO DO GÁS E A POTÊNCIA DE RADIAÇÃO	137
FIGURA 119 - GRÁFICO DE SUPERFÍCIE DE R _A , COM A PRESSÃO DO GÁS E A VELOCIDADE DE CORTE	138
FIGURA 120 - GRÁFICO DE SUPERFÍCIE DE R _A , COM A PRESSÃO DO GÁS E A POTÊNCIA DE RADIAÇÃO	139
FIGURA 121 - GRÁFICO DE SUPERFÍCIE DE R _Z E R _{MAX} , COM A POTÊNCIA DE RADIAÇÃO E VELOCIDADE DE CORTE	140
FIGURA 122 - GRÁFICO DE SUPERFÍCIE DA RZ E RMAX, COM POTÊNCIA DE RADIAÇÃO E PRESSÃO DO GÁS	140
FIGURA 123 - GRÁFICO DO RÁCIO S/N, DOS RESULTADOS DA REBARBA	142
FIGURA 124 - GRÁFICO DO RÁCIO S/N, DOS RESULTADOS DA RUGOSIDADE R _A	142
FIGURA 125 - GRÁFICO DO RÁCIO S/N, DOS RESULTADOS DA RUGOSIDADE R _Z	143
FIGURA 126 - GRÁFICO DO RÁCIO S/N, DOS RESULTADOS DA RUGOSIDADE R _{MAX}	143
FIGURA 127 - LINHA DE TENDÊNCIA DOS RESULTADOS DA REBARBA	144
FIGURA 128 - LINHA DE TENDÊNCIA DOS RESULTADOS DA RUGOSIDADE R _A	145
FIGURA 129 - LINHA DE TENDÊNCIA DOS RESULTADOS DA RUGOSIDADE R _Z	146
FIGURA 130 - LINHA DE TENDÊNCIA DOS RESULTADOS DA RUGOSIDADE R _{MAX}	147
FIGURA 131 - GRÁFICO DE SUPERFÍCIE DA REBARBA, COM A PRESSÃO DO GÁS E A VELOCIDADE DE CORTE	149
FIGURA 132 - GRÁFICO DE SUPERFÍCIE DA REBARBA, COM A PRESSÃO DO GÁS E A POTÊNCIA DE RADIAÇÃO	150
FIGURA 133 - GRÁFICO DE SUPERFÍCIE DA RUGOSIDADE, COM A VELOCIDADE DE CORTE E A PRESSÃO DO GÁS	151
FIGURA 134 - GRÁFICO DE SUPERFÍCIE DA RUGOSIDADE, COM A VELOCIDADE DE CORTE E A POTÊNCIA DE RADIAÇÃO	151
FIGURA 135 - GRÁFICO DO RÁCIO S/N, DOS RESULTADOS DA REBARBA	153
FIGURA 136 - GRÁFICO DO RÁCIO S/N, DOS RESULTADOS DA RUGOSIDADE R _A	153
FIGURA 137 - GRÁFICO DO RÁCIO S/N, DOS RESULTADOS DA RUGOSIDADE R _Z	154
FIGURA 138 - GRÁFICO DO RÁCIO S/N, DOS RESULTADOS DA RUGOSIDADE R _{MAX}	154
FIGURA 139 - LINHA DE TENDÊNCIA DOS RESULTADOS DA REBARBA	155

FIGURA 140 - LINHA DE TENDÊNCIA DOS RESULTADOS DA RUGOSIDADE R_A	156
FIGURA 141 - LINHA DE TENDÊNCIA DOS RESULTADOS DA RUGOSIDADE R_z	157
FIGURA 142 - LINHA DE TENDÊNCIA DOS RESULTADOS DA RUGOSIDADE R_{MAX}	157
FIGURA 143 - GRÁFICO DE SUPERFÍCIE DA REBARBA, COM A VELOCIDADE DE CORTE E A PRESSÃO DO GÁS	159
FIGURA 144 - GRÁFICO DE SUPERFÍCIE DA REBARBA, COM A VELOCIDADE DE CORTE E A POTÊNCIA DE RADIAÇÃO	160
FIGURA 145 - GRÁFICO DE SUPERFÍCIE DE R_A , COM A VELOCIDADE DE CORTE E A PRESSÃO DO GÁS	161
FIGURA 146 - GRÁFICO DE SUPERFÍCIE DE R_A , COM A VELOCIDADE DE CORTE E A POTÊNCIA DE RADIAÇÃO	161
FIGURA 147 - GRÁFICO DE SUPERFÍCIE DE R_z E R_{MAX} , COM A VELOCIDADE DE CORTE E A PRESSÃO DO GÁS	162
FIGURA 148 - GRÁFICO DE SUPERFÍCIE DE R_z E R_{MAX} , COM A VELOCIDADE DE CORTE E A POTÊNCIA DE RADIAÇÃO	163
FIGURA 149 - GRÁFICO DO RÁCIO S/N, DOS RESULTADOS DA REBARBA	164
FIGURA 150 - GRÁFICO DO RÁCIO S/N, DOS RESULTADOS DA RUGOSIDADE R_A	165
FIGURA 151 - GRÁFICO DO RÁCIO S/N, DOS RESULTADOS DA RUGOSIDADE R_z	165
FIGURA 152 - GRÁFICO DO RÁCIO S/N, DOS RESULTADOS DA RUGOSIDADE R_{MAX}	166
FIGURA 153 - LINHA DE TENDÊNCIA DOS RESULTADOS DA REBARBA	166
FIGURA 154 - LINHA DE TENDÊNCIA DOS RESULTADOS DA RUGOSIDADE R_A	167
FIGURA 155 - LINHA DE TENDÊNCIA DOS RESULTADOS DA RUGOSIDADE R_z	168
FIGURA 156 - LINHA DE TENDÊNCIA DOS RESULTADOS DA RUGOSIDADE R_{MAX}	169
FIGURA 157 - GRÁFICO DE SUPERFÍCIE DA REBARBA, COM A PRESSÃO DO GÁS E A VELOCIDADE DE CORTE	170
FIGURA 158 - GRÁFICO DE SUPERFÍCIE DA REBARBA, COM A PRESSÃO DO GÁS E A POTÊNCIA DE RADIAÇÃO	171
FIGURA 159 - GRÁFICO DE SUPERFÍCIE DA RUGOSIDADE, COM A VELOCIDADE DE CORTE E A PRESSÃO DO GÁS	172
FIGURA 160 - GRÁFICO DE SUPERFÍCIE DA RUGOSIDADE, COM A VELOCIDADE DE CORTE E A POTÊNCIA DE RADIAÇÃO	172
FIGURA 161 - NÚMERO DE VEZES EM QUE CADA TIPO DE PARÂMETRO DE CORTE LASER FOI ABRANGIDO PELAS MELHORES CONDIÇÕES, PARA A REBARBA	174
FIGURA 162 - NÚMERO DE VEZES EM QUE CADA TIPO DE PARÂMETRO DE CORTE LASER FOI ABRANGIDO PELAS MELHORES CONDIÇÕES, PARA A RUGOSIDADE	176

ÍNDICE DE TABELAS

TABELA 1 - NOMENCLATURA ADOTADA PARA AS AMOSTRAS DE CORTE LASER	31
TABELA 2 - QUADRO RESUMO DA EMPRESA	34
TABELA 3 - RESENHA HISTÓRICA DO PERCURSO DO LASER	37
TABELA 4 - VANTAGENS E DESVANTAGENS DO CORTE A LASER [25]	45
TABELA 5 - QUALIDADE DE CORTE CONSOANTE CADA TIPO DE MATERIAL. ADAPTADO DE [26] E [27]	46
TABELA 6 - ESTUDOS SOBRE A POTÊNCIA DA RADIAÇÃO NO CORTE LASER	56
TABELA 7 - ESTUDOS SOBRE A VELOCIDADE DE CORTE	57
TABELA 8 - ESTUDOS SOBRE O COMPRIMENTO DE ONDA	58
TABELA 9 - ESTUDOS SOBRE O DIÂMETRO DO FEIXE	58
TABELA 10 - ESTUDOS SOBRE O TIPO DE GÁS A USAR	59
TABELA 11 - ESTUDOS SOBRE A PRESSÃO DO GÁS	59
TABELA 12 - ESTUDO DO EFEITO DOS PARÂMETROS EM AMOSTRAS DE AÇO INOXIDÁVEL (AISI 304)	60
TABELA 13 - ESTUDO DO EFEITO DOS PARÂMETROS EM AMOSTRAS DE AÇO INOXIDÁVEL (AISI 304L)	62
TABELA 14 - ESTUDO DO EFEITO DOS PARÂMETROS EM AMOSTRAS DE AÇO INOXIDÁVEL (AISI 316L)	62
TABELA 15 - ESTUDO DO EFEITO DOS PARÂMETROS EM AMOSTRAS DE AÇO INOXIDÁVEL (AISI 409)	63
TABELA 16 - ESTUDO DO EFEITO DOS PARÂMETROS EM AMOSTRAS DE LIGA DE AL-CU	64
TABELA 17 - ESTUDO DO EFEITO DOS PARÂMETROS EM AMOSTRAS DE LIGA INCONEL 625	64
TABELA 18 - EXEMPLOS DE APLICAÇÃO DO MÉTODO NO ESTUDO DO CORTE LASER	72
TABELA 19 - IDENTIFICAÇÃO DO AÇO INOXIDÁVEL	79
TABELA 20 - IDENTIFICAÇÃO DO AÇO LAMINADO A FRIO	79
TABELA 21 - CARACTERÍSTICAS DO EQUIPAMENTO DE CORTE LASER DE FIBRA ÓTICA	80
TABELA 22 - CARACTERÍSTICAS DO EQUIPAMENTO DE CORTE LASER DE CO ₂	80
TABELA 23 – EQUIPAMENTOS UTILIZADOS NOS LABORATÓRIOS	82
TABELA 24 - PROGRAMAÇÃO DAS AMOSTRAS A CORTAR	84
TABELA 25 - PROCEDIMENTOS A TER EM CONTA NUM EQUIPAMENTO DE FONTE LASER	85
TABELA 26 - FASES DE LABORATÓRIO	89
TABELA 27 - ENSAIOS A REALIZAR NO EQUIPAMENTO DE FONTE LASER DE FIBRA ÓTICA, DO MATERIAL AISI 316L	93
TABELA 28 - ENSAIOS A REALIZAR NO EQUIPAMENTO DE FONTE LASER DE FIBRA ÓTICA, DO MATERIAL St12	94
TABELA 29 - ENSAIOS A REALIZAR NO EQUIPAMENTO DE FONTE LASER CO ₂ , DO MATERIAL AISI 316L	94
TABELA 30 - ENSAIOS A REALIZAR NO EQUIPAMENTO DE FONTE LASER CO ₂ , DO MATERIAL St12	95
TABELA 31 - TABELA DE CUSTOS ASSOCIADOS À ELIMINAÇÃO DA REBARBA	102
TABELA 32 - MATRIZ L18	127
TABELA 33 - VALORES DAS AMOSTRAS EM AISI 316L, CORTADAS NO LASER DO TIPO CO ₂	128
TABELA 34 - RESULTADOS ESTATÍSTICOS DOS VALORES DA REBARBA	132
TABELA 35 - RESULTADOS ESTATÍSTICOS DOS VALORES DOS RESULTADOS DA RUGOSIDADE R _A	133
TABELA 36 - RESULTADOS ESTATÍSTICOS DOS VALORES DOS RESULTADOS DA RUGOSIDADE R _Z	133
TABELA 37 - RESULTADOS ESTATÍSTICOS DOS VALORES DOS RESULTADOS DA RUGOSIDADE R _{MAX}	135
TABELA 38 – MELHORES CONDIÇÕES DE CORTE LASER, PELO MÉTODO TAGUCHI	135

TABELA 39 – MELHORES PARÂMETROS DE CORTE LASER, PELA ANÁLISE DE VARIÂNCIA	135
TABELA 40 - VALORES DAS AMOSTRAS EM AISI 316L, CORTADAS NO LASER DO TIPO FIBRA ÓTICA	141
TABELA 41 - RESULTADOS ESTATÍSTICOS DOS VALORES DOS RESULTADOS DA REBARBA	144
TABELA 42 - RESULTADOS ESTATÍSTICOS DOS VALORES DOS RESULTADOS DA RUGOSIDADE R_A	145
TABELA 43 - RESULTADOS ESTATÍSTICOS DOS VALORES DOS RESULTADOS DA RUGOSIDADE R_Z	146
TABELA 44 - RESULTADOS ESTATÍSTICOS DOS VALORES DOS RESULTADOS DA RUGOSIDADE R_{MAX}	147
TABELA 45 – MELHORES CONDIÇÕES DE CORTE, PELO MÉTODO TAGUCHI	147
TABELA 46 – MELHORES PARÂMETROS DE CORTE LASER, PELA ANÁLISE DE VARIÂNCIA	148
TABELA 47 - VALORES DAS AMOSTRAS EM St12, CORTADAS NO LASER DO TIPO CO_2	152
TABELA 48 - RESULTADOS ESTATÍSTICOS DOS VALORES DOS RESULTADOS DA REBARBA	155
TABELA 49 - RESULTADOS ESTATÍSTICOS DOS VALORES DOS RESULTADOS DA RUGOSIDADE R_A	156
TABELA 50 - RESULTADOS ESTATÍSTICOS DOS VALORES DOS RESULTADOS RUGOSIDADE R_Z	156
TABELA 51 - RESULTADOS ESTATÍSTICOS DOS VALORES DOS RESULTADOS RUGOSIDADE R_{MAX}	158
TABELA 52 – MELHORES CONDIÇÕES DE CORTE LASER, PELO MÉTODO TAGUCHI	158
TABELA 53 – MELHORES PARÂMETROS DE CORTE LASER, PELA ANÁLISE DA VARIÂNCIA	158
TABELA 54 - VALORES DAS AMOSTRAS EM AISI 316L, CORTADAS NO LASER DO TIPO FIBRA ÓTICA	163
TABELA 55 - RESULTADOS ESTATÍSTICOS DOS VALORES DOS RESULTADOS DA REBARBA	167
TABELA 56 - RESULTADOS ESTATÍSTICOS DOS VALORES DOS RESULTADOS DA RUGOSIDADE R_A	167
TABELA 57 - RESULTADOS ESTATÍSTICOS DOS VALORES DOS RESULTADOS DA RUGOSIDADE R_Z	168
TABELA 58 - RESULTADOS ESTATÍSTICOS DOS VALORES DOS RESULTADOS DA RUGOSIDADE R_{MAX}	169
TABELA 59 - MELHORES CONDIÇÕES DE CORTE LASER, PELO MÉTODO TAGUCHI	169
TABELA 60 - MELHORES PARÂMETROS DE CORTE LASER, PELA ANÁLISE DE VARIÂNCIA	170
TABELA 61 - CORRESPONDÊNCIA DAS ANÁLISES EM RELAÇÃO À REBARBA	173
TABELA 62 - CORRESPONDÊNCIA DAS ANÁLISES EM RELAÇÃO À RUGOSIDADE	175

ÍNDICE

1	INTRODUÇÃO.....	29
1.1	Enquadramento.....	29
1.2	Objetivos.....	30
1.3	Metodologia utilizada no trabalho.....	30
1.4	Estrutura da dissertação.....	33
1.5	Empresa de acolhimento.....	33
2	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	37
2.1	Lasers.....	37
2.1.1	Laser: percurso histórico.....	37
2.1.2	Princípio do processo.....	39
2.1.3	Tipos de meio de ativação.....	47
2.1.4	Equipamentos e sua versatilidade.....	52
2.2	Parâmetros do processo de corte laser.....	56
2.3	Teoria de medição de rugosidades.....	65
2.4	Teoria dos métodos Taguchi e ANOVA.....	68
2.5	Exemplos de aplicação do método Taguchi na Investigação.....	72
3	DESENVOLVIMENTO.....	77
3.1	Caso de estudo.....	77
3.2	Materiais.....	77
3.3	Meios utilizados.....	80
3.4	Métodos.....	84
3.5	Ensaio.....	92
3.6	Análise das microestruturas.....	96
3.7	Análise da superfície cortada das amostras.....	101
3.7.1	Análise da rebarba.....	101

3.7.2	Análise da largura de corte.....	115
3.7.3	Análise das estrias	117
3.8	Análise da rugosidade.....	118
3.9	Análise estatística das amostras em AISI 316L – laser de CO ₂	127
3.9.1	Método Taguchi.....	127
3.9.2	Análise da Variância (ANOVA)	131
3.10	Análise estatística das amostras em AISI 316L – laser de fibra ótica.....	141
3.10.1	Método Taguchi.....	141
3.10.2	Análise da Variância (ANOVA)	144
3.11	Análise estatística das amostras em St12 – laser CO ₂	152
3.11.1	Método Taguchi.....	152
3.11.2	Análise da Variância (ANOVA)	155
3.12	Análise estatística das amostras em St12 – laser de fibra ótica	163
3.12.1	Método Taguchi.....	163
3.12.2	Análise da Variância (ANOVA)	166
3.13	Correspondência das análises estatísticas com as restantes análises	173
4	CONCLUSÕES	179
4.1	Conclusões principais	179
4.2	Propostas para trabalhos futuros.....	180
5	BIBLIOGRAFIA E OUTRAS FONTES DE INFORMAÇÃO	183
6	ANEXOS.....	195
6.1	ANEXO A – Ficha técnica do lote do material AISI 316L.....	195
6.2	Anexo B – Ficha técnica do lote do material St12	196
6.3	Anexo C – Ficha técnica do equipamento de fonte laser de fibra ótica.....	197
6.4	Anexo D – Ficha técnica do equipamento de fonte laser de CO ₂	198

INTRODUÇÃO

1.1 ENQUADRAMENTO

1.2 OBJETIVOS

1.3 METODOLOGIA UTILIZADA NO TRABALHO

1.4 ESTRUTURA DA DISSERTAÇÃO

1.5 EMPRESA DE ACOLHIMENTO

1 INTRODUÇÃO

1.1 Enquadramento

A tecnologia laser tem um papel importante nos dias de hoje e, como tal, é solicitada em áreas importantes, destacando-se as áreas da indústria e saúde. Na área da saúde, esta tecnologia é frequentemente usada em tratamentos estéticos, como o clareamento dos dentes (ver Figura 1), já na área industrial a tecnologia laser é usada essencialmente no corte de materiais (ver Figura 2).



Figura 1 - Tecnologia laser usada na área da saúde para o clareamento dos dentes [1]



Figura 2 - Tecnologia laser usada na área industrial para corte de chapa metálica [2]

Os equipamentos de fonte laser, destacam-se na área industrial por apresentarem elevada versatilidade para a execução de diferentes produtos, com qualidade final superior a outros processos de fabrico semelhantes. Estes equipamentos, são essencialmente requisitados para o corte de chapa metálica, mas foram sofrendo sucessivas modificações, e sobretudo, evoluções ao nível do *software*, para corresponder a todas as necessidades do exigente mercado atual. A versatilidade é agora uma aposta forte das marcas que produzem este tipo de equipamentos de fonte laser, congregando na mesma máquina diferentes modos de corte e acabamento da matéria prima.

O presente trabalho congrega informação e estudos relativos aos equipamentos de corte laser, incidindo de forma mais significativa em capítulos dedicados aos parâmetros de corte. Procurou-se explorar neste trabalho as potencialidades dos equipamentos de fonte laser e de que forma as mudanças nos parâmetros de corte associados, podem alterar a qualidade da superfície de corte. Realça-se a realização em ambiente laboral de testes aos parâmetros de corte, de forma a selecionar o melhor conjunto de parâmetros, com vista a obter a melhor qualidade de superfície cortada.

1.2 Objetivos

Pretende-se com este trabalho, obter o melhor conjunto de condições de corte laser, proporcionando assim a melhor qualidade da superfície cortada, no menor tempo possível, permitindo à empresa de acolhimento ter um conhecimento detalhado das melhores opções de corte, evitando desperdícios e diminuindo o *lead time*.

Os objetivos principais passam por:

- Testar conjuntos de parâmetros de corte laser em diferentes tipos de material e em diferentes tipos de laser;
- Analisar as mudanças das microestruturas com os diferentes conjuntos de parâmetros;
- Medir e comparar o nível de rebarba nas diferentes amostras obtidas, correspondentes a diferentes conjuntos de parâmetros, e a diferentes tipos de laser;
- Medir e comparar a rugosidade das diferentes amostras;
- Analisar a superfície cortada das amostras;
- Otimizar o processo de corte laser, encontrando o melhor conjunto de parâmetros para obter os menores níveis de rebarba e rugosidade.

1.3 Metodologia utilizada no trabalho

O método de trabalho para este estudo distribui-se pelas seguintes fases e dispostas pela sequência da Figura 3:

- Pesquisa e análise de literatura científica e técnica sobre corte laser;
- Preparação das diferentes chapas metálicas para a obtenção das amostras;
- Seleção dos conjuntos de parâmetros a utilizar nos ensaios;
- Ensaios nos equipamentos de corte laser, seguindo os conjuntos de parâmetros anteriormente selecionados;
- Atribuiu-se uma nomenclatura para as amostras obtidas dos ensaios. As letras principais seguem as iniciais dos parâmetros de corte solicitados, como por exemplo: a letra inicial relativa ao parâmetro da potência da radiação é a letra P, seguida de uma letra minúscula que varia entre r (*reduced* ou inferior), n (nominal ou recomendada) ou h (*high* ou superior). Na Tabela 1 estão apresentadas as diferentes nomenclaturas adotadas neste estudo.

Tabela 1 - Nomenclatura adotada para as amostras de corte laser

Parâmetro de corte	Nomenclatura	Parâmetro de corte variável	Nomenclatura variável
Potência da radiação	P	Potência da radiação inferior	Pr
		Potência da radiação recomendada	Pn
		Potência da radiação superior	Ph
Velocidade de corte	V	Velocidade de corte inferior	Vr
		Velocidade de corte recomendada	Vn
		Velocidade de corte superior	Vh
Pressão do gás	p	Pressão do gás inferior	Pr
		Pressão do gás recomendada	Pn

- Preparação das amostras para a análise da microestrutura;
- Análise da microestrutura;
- Estudo das mudanças nas microestruturas observadas;
- Medição da rebarba e análise da superfície cortada;
- Medição da rugosidade;
- Análise dos resultados da medição da rebarba e da rugosidade;
- Análise das imagens da superfície cortada, fazendo a correspondência com os resultados das medições da rebarba e da rugosidade;
- Extração das conclusões;
- Redação da dissertação.



Figura 3 - Diferentes fases da metodologia

1.4 Estrutura da dissertação

O projeto apresentado, intitulado, “Influência dos parâmetros de corte laser na qualidade da superfície cortada”, está dividido em quatro capítulos.

O primeiro capítulo é a introdução, onde numa primeira fase se faz uma contextualização do projeto e objetivos a atingir. Ainda neste capítulo apresentam-se as linhas gerais da metodologia seguida e a apresentação da estrutura do relatório. Por fim, neste capítulo, é feita uma apresentação da empresa de acolhimento e o enquadramento do corte laser na situação da empresa.

O segundo capítulo é o enquadramento teórico. Este subdivide-se em tecnologias do corte laser, onde se apresenta o percurso histórico, o princípio do processo, bem como o modo de funcionamento e os equipamentos utilizados nos dias de hoje. Subdivide-se ainda este capítulo nos parâmetros de corte existentes, dando ênfase aos parâmetros mais importantes e com maior impacto na qualidade da superfície cortada.

No terceiro capítulo, apresenta-se o caso de estudo, descrevendo-se os materiais, métodos e meios utilizados para a concretização deste projeto. Apresentam-se também os ensaios realizados, bem como os resultados, com uma análise crítica aos mesmos.

O quarto capítulo inclui as principais conclusões retiradas dos resultados, uma descrição das limitações e obstáculos encontrados na elaboração do trabalho e sugestões de trabalho futuro.

1.5 Empresa de acolhimento

O desenvolvimento deste projeto decorreu na Marsilinox - Indústria Metalúrgica, Lda., situada em Vale de Cambra. Trata-se de uma empresa metalomecânica que tem crescido significativamente nos últimos anos, apostando na exportação, nomeadamente na área da indústria alimentar. Com um quadro de funcionários altamente qualificados e equipamentos com excelente capacidade produtiva, são os principais fatores de distinção das demais empresas concorrentes na região. Os dados principais da empresa podem ser observados no quadro resumo da Tabela 2.

A política de trabalho da empresa assenta sobre os seguintes pilares:

- Satisfação do cliente: cumpre-se escrupulosamente os requisitos dos acordos comerciais;

- Garantia da qualidade do produto e qualidade do produto final: os colaboradores do departamento de qualidade são altamente qualificados, estando constantemente sujeitos a sessões de formação e *Kaizen*;
- Segurança no trabalho: a empresa aposta nas tecnologias mais recentes, garantindo as melhores condições possíveis para todos os colaboradores, evitando o flagelo dos acidentes de trabalho.

Tabela 2 - Quadro resumo da empresa

Nome da Empresa	Marsilinox – Indústria Metalúrgica, Lda
Força laboral	54 Trabalhadores
Força laboral (licenciados)	16 Trabalhadores (9 Engenheiros Mecânicos, 1 Engenheiro Ambiental, 1 Engenheiro Industrial, 4 Economistas e 1 Comercial)
Força laboral (administradores)	2 Administradores
Turnos	6-14 h e 14-22 h
Horário de atendimento/expedição	8-12.25 h e 13.30 -17.05 h
Acessibilidades	Parque de estacionamento e zona de cargas/descargas

A Marsilinox aposta ainda na melhoria contínua do seu desempenho organizacional, como tal, possui um sistema de gestão da qualidade certificado segundo a norma NP EN ISO 9001: 2008.

Os serviços que a empresa pode oferecer são: puncionamento de chapa, corte e gravação a laser, soldadura, quinagem, esmerilamento, lavagem e polimento.

A produção da empresa inclui desde pequenas peças, até produtos de maiores dimensões, como fornos industriais e estruturas metálicas. Os seus produtos são destinados às áreas alimentar, construção civil, automóvel, eletrónica, manutenção industrial, entre outros.

A França é o principal destino dos produtos fabricados, sendo que o mercado nacional constitui também uma parte importante das vendas. Os fornos industriais produzidos são expedidos praticamente concluídos para a confeção de alimentos, enquanto a maioria dos outros produtos fabricados irão fazer parte de projetos para um *assembly* final.

REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 LASERS

2.1.1 LASER: PERCURSO HISTÓRICO

2.1.2 PRINCÍPIO DO PROCESSO

2.1.3 TIPOS DE MEIO DE ATIVAÇÃO

2.1.4 EQUIPAMENTOS E SUA VERSATILIDADE

2.2 PARÂMETROS DO PROCESSO DE CORTE LASER

2.3 TEORIA DE MEDIÇÃO DE RUGOSIDADES

2.4 TEORIA DOS MÉTODOS TAGUCHI E ANOVA

2.5 EXEMPLOS DE APLICAÇÃO DO MÉTODO TAGUCHI NA INVESTIGAÇÃO

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 Lasers

2.1.1 Laser: percurso histórico

Apresentam-se na Tabela 3 e na Figura 4, todos os dados e informações pertinentes de diferentes autores sobre o percurso histórico do laser, desde uma fase inicial com grandes dúvidas e falta de informação, até aos dias hoje, com a versatilidade atual dos equipamentos de fonte laser.

Tabela 3 - Resenha histórica do percurso do laser

Autor	Ano	Acontecimento
[3]	1916	Albert Einstein, com as leis de Max Planck e com base no teorema fundamental da teoria da mecânica do calor, desconfiava que a luz poderia ser concentrada num único raio. Com as sucessivas guerras e tempos instáveis, a teoria acabou por ficar esquecida.
[4]	1930	Começaram a ser iniciadas técnicas óticas e o conhecimento teórico para o desenvolvimento da tecnologia, no entanto, a falta de apoios para esta nova descoberta constitui um obstáculo.
[5]	1950	Charles Townes, da Universidade da Califórnia, decidiu apoiar esta nova tecnologia e conseguiu conciliar todos os conhecimentos adquiridos até então.
[5]	1951	No final do ano de 1951, Charles Townes já possuía um histórico de avanços no ramo.
[4]	1954	Charles Townes, em conjunto com o seu aluno James P. Gordon, apresentava a máquina resultante da ideia apelidada de "MASER", ou seja, "Microwave Amplification by Stimulated Emission of Radiation". Era a primeira etapa do que pretendia apresentar ao mundo num futuro próximo.
[5]	1960	O marco mais importante da história do laser, Theodore Maiman revela ao Mundo o primeiro aparelho laser desenvolvido com sucesso nos laboratórios de Hughes, nos EUA, e em que o meio ativo assentava num cristal de rubi.

[6]	1963	Kumar Patel desenvolve o primeiro laser CO ₂ , mais eficiente e menos dispendioso que o laser de rubi, tornando-se no tipo de laser mais solicitado.
[7]	1967	Já era possível este tipo de equipamento laser operar com uma potência de 1000 W. Foi também em 1967 que Peter Houldcroft testou o primeiro bocal com uma câmara pressurizada de oxigênio, fornecendo assim o gás de assistência para cortar uma chapa de aço de espessura de 1 mm.
[6]	1969	Três funcionários da empresa Boeing® concluíram que o laser CO ₂ , com a ajuda de um gás de assistência, tornava este processo num caso de sucesso no corte de materiais duros como o Titânio.
[6]	1970	Após vários estudos, o conceito de corte laser em Titânio é patenteado.
[6]	1979	A empresa italiana Prima Industrie apresentou a máquina de corte laser 3D com 5 eixos de rotação. Estimou-se, que no ano de 1980, estariam implementadas 20000 máquinas de corte a laser em todo o mundo.
[8]	2008	Como resposta ao mercado exigente que procurava novas alternativas ao já maduro processo de corte a laser CO ₂ , e sem novas evoluções, Salvagnini começou a sua investigação do processo de corte a laser com fibra ótica. Desenvolveu-se então um aparelho de fibra IPG que não exigia aquecimento, gás ou um caminho ótico.
[9]	2014	De forma a tornar ainda mais competitivo o mercado dos lasers, começaram a fazer-se estudos mais profundos relativamente a lasers de díodos. As características deste tipo de lasers permite reduzir os custos operacionais (versatilidade do comprimento de onda, vida útil deste tipo de laser é elevada, manutenção reduzida). Apesar das vantagens, as potências permitidas por este tipo de laser ainda são limitadas. No entanto, já existem estudos e equipamentos com uma capacidade competitiva considerável.

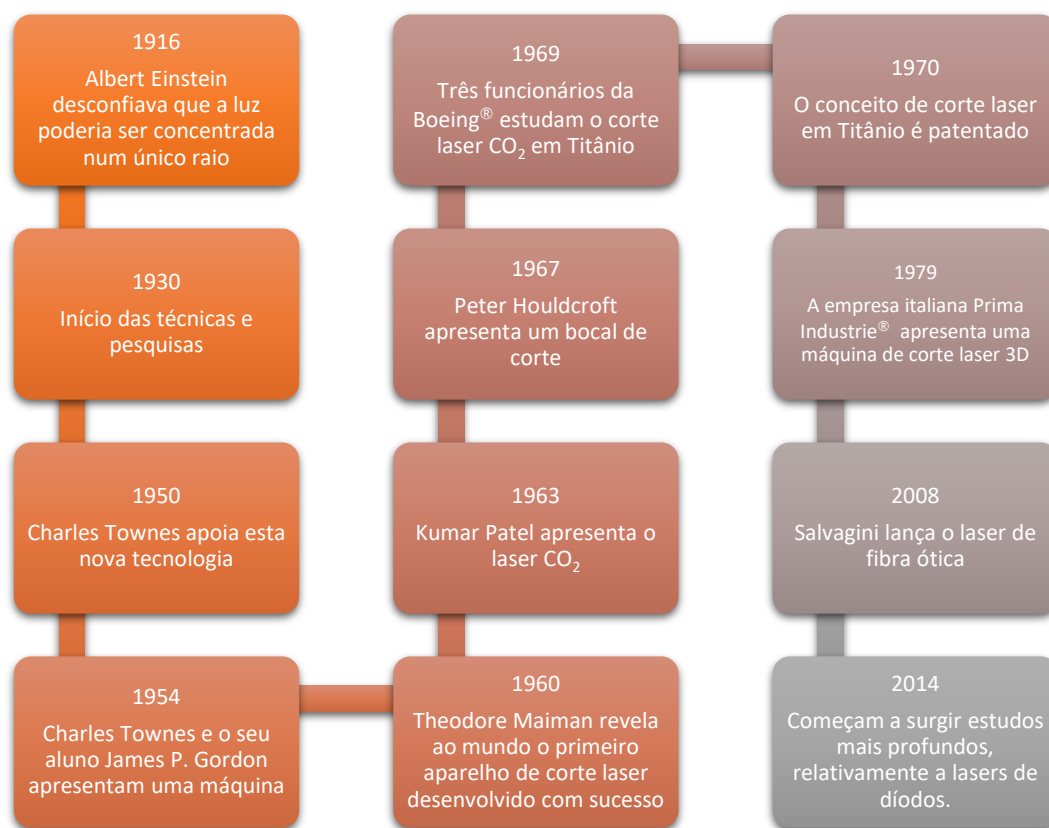


Figura 4 - Percurso histórico do laser

2.1.2 Princípio do processo

Dependendo dos requisitos de corte, do tipo de material e dimensões a cortar, do tempo de corte e da precisão, as empresas optam, frequentemente, entre as seguintes tecnologias de corte:

- Corte com jato de água;
- Corte a plasma;
- Oxicorte;
- Corte laser.

O processo de corte laser, que é o caso de estudo desta dissertação, consiste no foco de radiação num ponto preciso (ponto focal ou ponto de energia máxima), para atingir altas temperaturas, enquanto em oxicorte e corte por plasma, são queimados gases específicos, sendo que, em oxicorte se atingem temperaturas superiores devido ao uso de oxigénio como comburente e acetileno como combustível. O corte com jato de água, consiste geralmente no uso de água com abrasivo, sob pressão, para cortar matéria prima [10].

A formação do feixe laser ocorre no gerador laser (ver Figura 5). É neste componente que estão os elementos determinantes para o início do processo:

- O meio ativo (átomos ou moléculas de determinada matéria), está disposto entre dois espelhos, conforme a Figura 5;
- A fonte de excitação (responsável pela emissão de fótons).

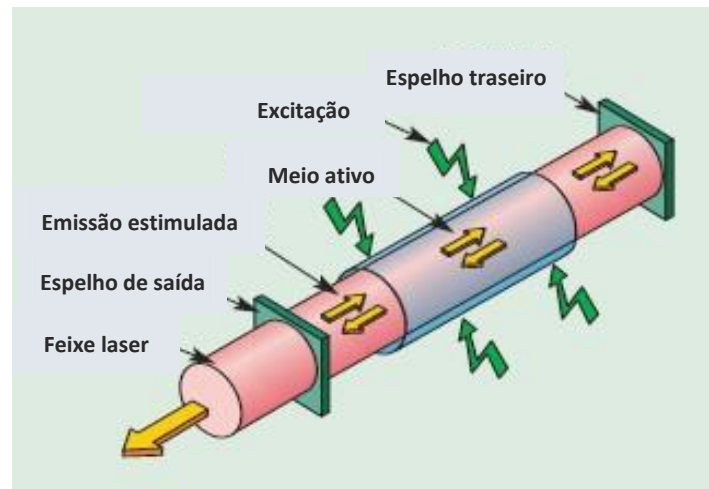


Figura 5 - Gerador laser [10]

O meio ativo é estimulado pela fonte de excitação, que executa um bombardeamento de fótons, levando a que seja libertado um fóton cada vez que um elétron é posicionado numa órbita de nível energético inferior. Isto é, quando um fóton é utilizado para provocar a excitação de um elétron localizado numa órbita de nível energético superior, de modo a que este regresse ao estado fundamental, é libertada energia sob a forma de um segundo fóton (ver Figura 6), com a mesma frequência, direção e fase do fóton incidente, transferindo assim a energia para a luz transmitida [12].

A ocorrência do fenómeno descrito anteriormente, só é possível quando a órbita de nível energético superior se encontra com um número superior de eletrões do que a órbita de nível energético imediatamente abaixo. Na fase de excitação, dá-se uma inversão na distribuição dos eletrões pelos níveis energéticos em questão e são emitidos fótons espontaneamente em todas as direções. A amplificação é posteriormente obtida, na direção do eixo de propagação do gerador laser, devido às múltiplas reflexões da luz dentro dos espelhos existentes. A inexistência destas condições, iria permitir ao meio ativo absorver a energia emitida, distribuindo eletrões apenas pelo nível energético acima, sem emissão de qualquer partícula essencial à geração do feixe laser [12].

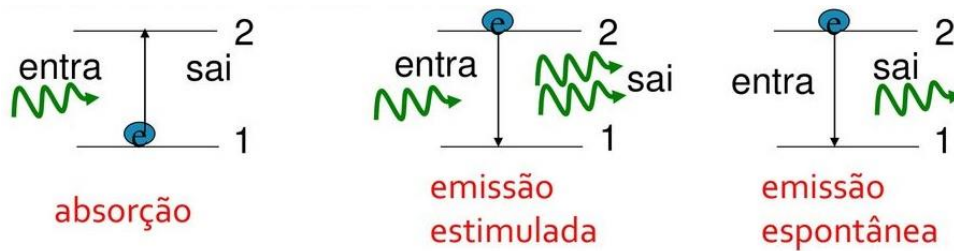


Figura 6 - Fenômenos de absorção, emissão estimulada e emissão espontânea [13]

Uma fonte de excitação deve assim, emitir radiação para o gerador laser, para que continuamente entre os espelhos, a radiação ao passar pela matéria estimuladora, atinja o estado desejado de estimulação, sendo que um espelho deve ser completamente refletor, enquanto o outro deve ser parcialmente refletor, para permitir a saída da radiação estimulada para a cabeça de foco. O método de estimulação depende do tipo de laser em causa, ou seja, depende do estado físico do material de estimulação, podendo ser sólido, líquido ou gasoso. O sistema base do processo de estimulação apresenta poucas variações, quando se comparam os diferentes tipos de laser [14].

A origem da palavra laser, acabou por ser um conjunto de termos baseados na formação do feixe laser. É um acrónimo que deriva do inglês, *Light Amplification by Stimulated Emitted Radiation*, que em português se traduz como “Amplificação da Luz através da Estimulação da Radiação Emitida”. Forma-se um feixe amplificado de radiação eletromagnética, que difere da luz comum por possuir fótons da mesma frequência, comprimento de onda, estado energético e por se propagar numa só direção. A radiação percorre o espaço como onda, mas ao encontrar matéria, tem o comportamento de partículas de energia, denominadas fótons. A luz não possui volume e os seus fótons não possuem carga. Desta forma, os fótons podem ser concentrados no mesmo ponto, sem necessidade de considerar espaço ou forças repulsivas. Já no material a cortar, existem elétrons livres que absorvem os fótons da radiação estimulada, libertando-se energia térmica que funde o material, efetuando o corte [15].

Tipicamente, o laser é focado através de uma lente convexa e um díodo emissor de laser de cor vermelha, que é usado para detetar ou definir o foco do feixe na superfície a cortar. O material é assim fundido e removido por ação de um gás de assistência. Este gás é selecionado de acordo com o material e espessura a cortar, e a distância focal depende da lente em uso [16].

Na Figura 7, apresenta-se um sistema de foco existente em qualquer máquina de corte laser, mas a arquitetura dos sistemas de corte, a gama das tecnologias e a alimentação da máquina, variam.

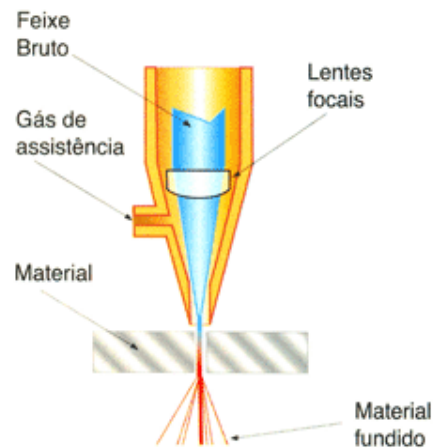


Figura 7 - Sistema de foco [17]

Constata-se, na Figura 8, que para o sistema de corte a laser estar completo, além do gerador laser, é necessário um sistema de foco para a radiação atingir a chapa, sendo que a radiação é refletida do gerador para a lente de foco por meio de um espelho de ligação na cabeça de corte. É também nesta cabeça que é injetado o gás de assistência durante o corte. Os gases de assistência fazem parte do conjunto de consumíveis da máquina, têm como função a remoção do material da fenda de corte, ainda que existam outras formas de efetuar esta remoção, como por exemplo usando vácuo. Esta opção, aumenta a flexibilidade do corte, uma vez que elimina a necessidade da existência de um bocal, quando comparado com o corte comum [18]. A última peça da cabeça de foco é o bocal (ver Figura 9), que limita a fenda de corte a nível físico. Como elemento gargalo, permite também direcionar o gás de assistência para a dita fenda, assim como a quantidade, de forma a acompanhar o fluxo de radiação [19].

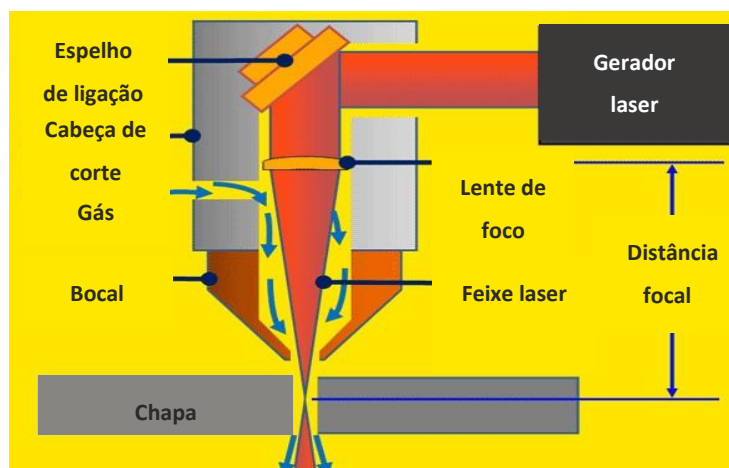


Figura 8 - Sistema de corte a laser [20]

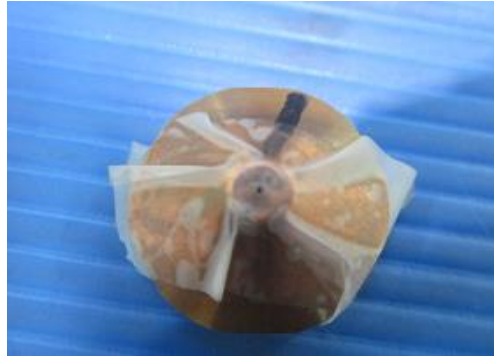


Figura 9 - Bocal

A lente de foco (ver Figura 10), é um consumível, sendo uma peça fundamental no funcionamento e na qualidade do corte laser, sendo responsável pelo foco da radiação que provoca a fenda de corte. Torna-se por isso importante ter cuidados especiais com a lente de foco, tendo em atenção as informações relativas a este componente, e que são fornecidas no arranque da máquina, assim como saber que com o funcionamento normal se produzem fumos e partículas que ressaltam durante o corte, contaminando-se a lente e podendo provocar um desalinhamento do sistema de foco do feixe, que é altamente prejudicial à qualidade de corte. Como tal, deve ser feita uma limpeza periódica [21].

As lentes de um sistema de fonte laser têm uma absorção média de radiação, que é inferior numa lente nova e limpa, relativamente às que são usadas diariamente. Para o processo de corte, é benéfica a menor absorção possível. Esta absorção deve-se ao poder anti-refletor de ambas as faces da lente, mas com o passar do tempo, a acumulação dos já mencionados resíduos aumenta esta absorção, contribuindo para o aquecimento da lente. O aquecimento provoca dilatação na lente, alterando a sua forma, e conseqüentemente, o seu índice de refração. A curvatura da lente também aumenta, elevando o índice de refração e encurtando a distância focal. Uma quantidade significativa de partículas de sujidade na lente cria pontos quentes junto das mesmas. Neste caso, o aquecimento não é homogêneo, piorando o diâmetro de foco e aumentando a fenda produzida, ou seja, aumentando o desvio da especificação. A lente considera-se inutilizável quando a informação da máquina nos indica um rendimento baixo de corte, ou quando perde qualidade de corte, ou mesmo pela experiência do operador. Normalmente, esses defeitos são visíveis a olho nu, e como já foi referido, observa-se na forma da lente e na presença de pequenos salpicos, resultante dos pontos quentes criados [22].

Podem ser usados três tamanhos de lente de foco (ver Figura 11), respetivamente para três distâncias focais diferentes. Para cada lente, é possível atingir a menor fenda de corte quando o foco definido é igual à distância focal, especialmente em chapa fina [23].

Sabe-se ainda que a fenda diminui com o aumento da distância focal, pois quanto maior for a distância da lente ao foco, mais estreito será o fluxo de radiação no foco, provocando também uma fenda de corte mais estreita e, conseqüentemente, menor desvio em relação à especificação [24].

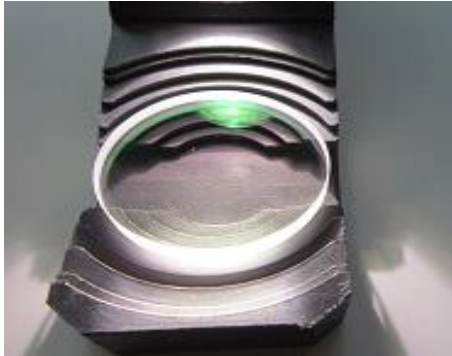


Figura 10 - Lente de foco



Figura 11 - Três tamanhos distintos de lentes de foco

Para uma máquina atual de tecnologia laser estar completa, é necessário ainda os seguintes componentes:

- A matéria a trabalhar é normalmente transportada para a mesa por meio de ventosas (ver Figura 12), uma forma que facilita o manuseamento da matéria-prima sem que ocorram danos, como riscos ou empenos, sendo também menos suscetível à ocorrência de acidentes de trabalho.
- Mesas para o posicionamento da matéria-prima (ver Figura 13), que possuem peças designadas de “garfos”, por terem forma de dentes, dispostos a uma distância fixa entre eles, que facilitam a aderência da chapa, o corte da mesma, bem como a saída das peças cortadas;



Figura 12 – Ventosas [Marsilinox]



Figura 13 - Mesa de posicionamento [Marsilinox]

Em relação à capacidade axial, o laser pode perfurar, cortar e soldar. Em perfuração a laser, facilmente se identificam três zonas de corte, sendo a superfície de perfuração a zona de formação de estrias. A saída da perfuração, é a zona de formação de escória, que forma a rebarba, e a entrada da perfuração é a zona mais afetada termicamente [22]. No corte laser, também se identificam as mesmas três zonas. Na Figura 14, apresentam-se as zonas resultantes de um corte a laser, sendo no pormenor a) a entrada do corte e a zona mais afetada termicamente, e no pormenor b) a saída do corte que formou a rebarba.

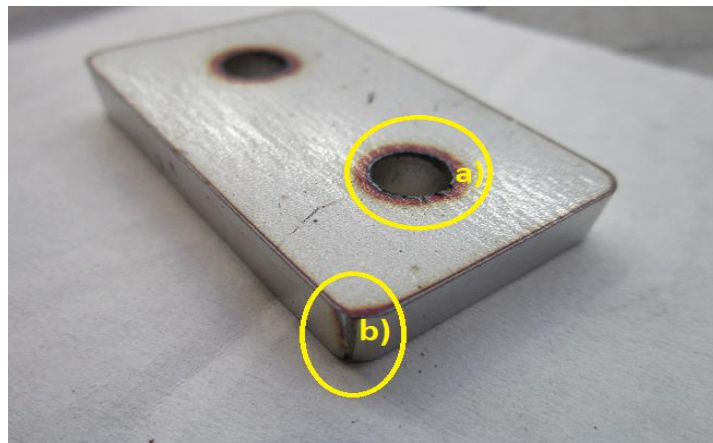


Figura 14 - Zonas distintas apresentadas após o corte a laser [Marsilinox]

Na Tabela 4, observa-se que o corte laser apresenta vantagens e desvantagens e tem diferenças em termos de desempenho, como se constata.

Tabela 4 - Vantagens e desvantagens do corte a laser [25]

Vantagens ↑	Desvantagens ↓
O corte a laser proporciona cortes retos, furações e distância entre furações com grande nível de precisão, bem como execução de formas complexas.	Alto custo inicial do equipamento.
Reduzida ZTA.	Necessidade de mão-de-obra especializada.
É um processo de fácil automatização, não requer mudanças de ferramenta de corte.	Limitações no corte de espessuras acima de 30 mm.
Não há contacto direto entre o feixe laser e a peça, não ocorrendo distorções ou desgaste.	Formação de produtos tóxicos e fumos.

Na Tabela 5 observa-se que a qualidade de corte é alterada pelo tipo e dimensões do material.

Tabela 5 - Qualidade de corte consoante cada tipo de material. Adaptado de [26] e [27]

Material	Qualidade de corte (↑-Boa; ↗-Normal; ↓-Má)	Razão
Aços Inoxidáveis	↗	O corte a laser não é aconselhável e viável para chapas mais espessas (acima dos 25 mm).
Aços não ligados	↑	As chapas deste material são facilmente cortadas se o gás de assistência for o oxigénio.
Aços ao carbono	↑	Boa qualidade de superfície, contrariamente a outros processos de corte convencionais.
Alumínio e suas ligas	↗	A espessura máxima de corte é limitada pelas características deste material. O alumínio reflete a luz e dificulta a concentração de energia.
Cobre e suas ligas	↗	O cobre é também um bom refletor de luz e, por isso, também apresenta algumas lacunas.
Titânio e suas ligas	↗	Sendo um material caro, torna-se fundamental a proteção da zona de corte com um gás inerte, para evitar a oxidação pelo ar.
Materiais não metálicos	↓	Corte de materiais não metálicos podem produzir cinzas e fumos tóxicos.

Tiram-se as seguintes conclusões, mais importantes, em relação às Tabelas 4 e 5:

- O corte laser é um processo de fabrico de precisão e rápido, comparativamente a outras tecnologias de corte;
- O corte de matéria-prima com diferentes contornos, não constituiu um obstáculo para o corte laser;
- O corte laser, quando bem automatizado, confere boa qualidade superficial aos produtos;
- O corte laser tem os melhores resultados no corte de materiais metálicos. No entanto, existem sempre recomendações no corte de espessuras mais elevadas.

2.1.3 Tipos de meio de ativação

Os lasers classificam-se quanto ao meio ativo em três famílias: lasers de estado sólido, lasers de estado gasoso e lasers de estado líquido (ver Figura 15).

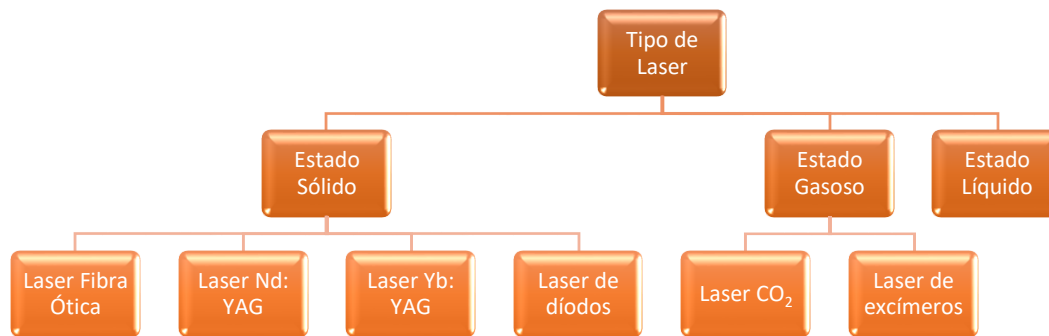


Figura 15 - Diagrama alusivo aos diferentes tipos de lasers existentes

Os lasers de estado gasoso, quando comparados com outros tipos de lasers, apresentam um sistema mais complexo: o maior número de componentes leva a que seja o tipo de laser mais caro e aqui está a principal desvantagem, comparativamente aos lasers de estado sólido.

O laser de CO₂ é um tipo de laser de estado gasoso, que tem como características principais a constituição do meio ativo, que é uma mistura de gases, e o comprimento de onda ser de 10,6 μm [28]. A formação do feixe laser faz-se segundo uma mistura de gases no gerador laser, mais especificamente num tubo de vidro (ver Figura 16), com CO₂, Hélio e por vezes Azoto, sendo que o Hélio é o gás presente em qualquer laser de estado gasoso. A molécula triatómica de CO₂ apresenta três tipos de vibrações distintas nas suas ligações covalentes, que permitem a estimulação da radiação para o estado pretendido, sendo que o tubo do gerador pode conter um eléctrodo para efetuar descargas elétricas na mistura gasosa, ou pode ser alimentado por radiação de frequência rádio [29].

Posteriormente, o feixe laser é guiado através de um sistema de espelhos até ao sistema de foco, onde ocorrerá o corte da matéria-prima (ver Figura 17).

Quanto ao modo de funcionamento, os regimes de potência de saída podem ser contínuos ou pulsados [30]:

- Modo de funcionamento contínuo: a potência de saída é constante, em regime permanente, resultado da aplicação de uma descarga de corrente elétrica constante no bombeamento do meio ativo do laser;
- Modo de funcionamento pulsado: este modo de funcionamento é regido pelos parâmetros de funcionamento da fonte de bombeamento do laser em regime pulsado. São assim definidas a duração de pulso e a frequência de pulsação, as quais definem as propriedades e capacidades de saída da potência de uma fonte laser em regime pulsado. Os valores típicos da duração de impulso situam-se entre 100 ms e 10 ms, com uma frequência de pulsação variando de 1 Hz a 100 Hz.

Na Figura 17 é possível observar a constituição típica de um laser CO₂, apresentando-se os diferentes componentes da seguinte forma [29]:

- Um gerador laser, que é comum nos diferentes tipos de laser e, como se viu anteriormente, contém um tubo de vidro onde se processa o feixe laser com a mistura dos gases;
- Espelhos e lentes responsáveis pelo guiamento e foco do feixe laser, respetivamente;
- O fole, que é responsável por proteger o feixe laser de pós e partículas indesejadas, que é acompanhado por uma proteção de gás seco ou Azoto. Ainda neste componente, o movimento da cabeça de foco provoca cargas mecânicas grandes, sendo imprescindível que o material do fole seja um elastómero, particularmente flexível e resistente.
- A cabeça de foco é também comum nos diferentes tipos de laser, destacando-se a presença da lente de foco e do gás de assistência.



Figura 16 - Tubo de vidro da mistura de gases [31]

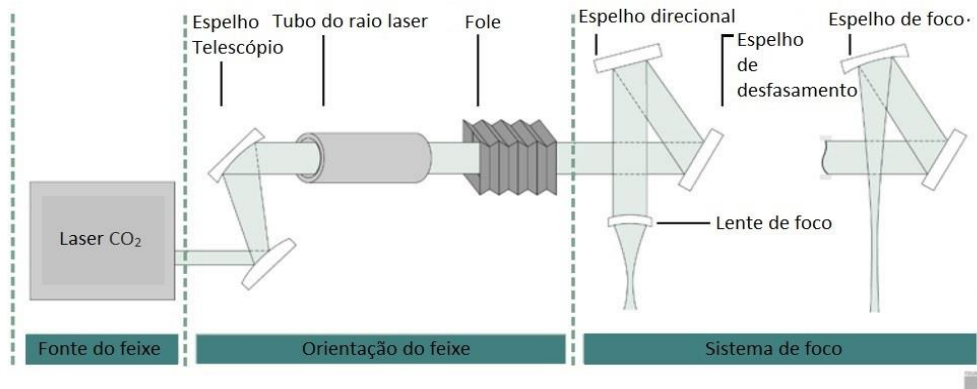


Figura 17 - Sistema de laser CO₂ [29]

Ainda no gerador laser, a radiação é direcionada por um sistema de dois espelhos (ver Figura 18), em que um é 100% refletor e o outro é apenas 70%, o que permite estimular radiação, enquanto alguma radiação é continuamente enviada para o sistema de foco para efetuar o corte. Os gases do gerador laser têm de ser continuamente substituídos, pois com a estimulação contínua, as moléculas desagregam-se. É ainda comum o tubo do gerador laser ser usado na longitudinal, no entanto, na transversal, e com impulsos de radiação (modo intermitente), é possível atingir potências mais elevadas [32].

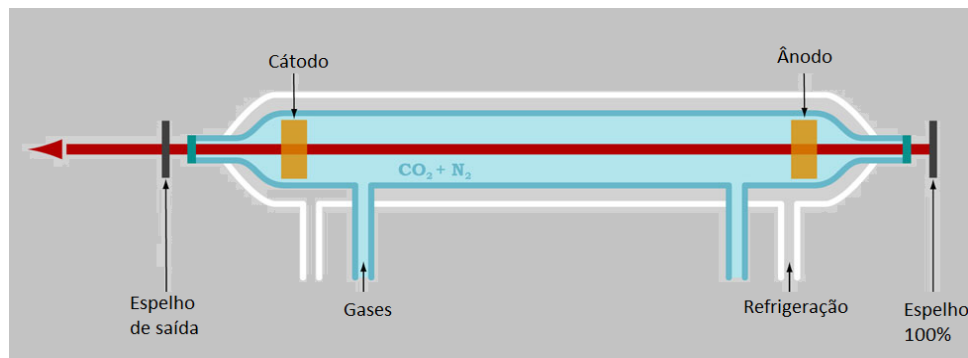


Figura 18 - Espelhos existentes na entrada e saída do gerador laser [32]

Na Figura 19, observa-se que existe um sistema de refrigeração que se destina aos átomos de Hélio mais quentes ficarem menos excitados, ao colidirem nas paredes arrefecidas habitualmente a água. A refrigeração apresenta-se como uma característica fundamental neste tipo de meio de ativação, sendo mais um componente indispensável para o seu funcionamento, aumentando também assim os custos de manutenção e do custo inicial dos equipamentos, comparativamente a outros tipos de corte a laser [34].

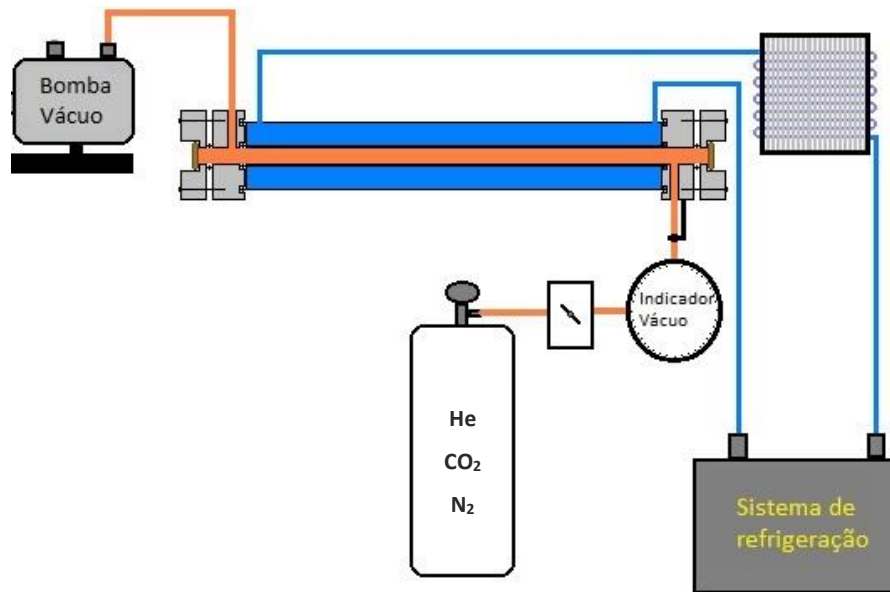


Figura 19 - Sistema de refrigeração [35]

Os lasers de estado sólido são sistemas avançados, sendo a principal alternativa aos outros tipos de corte laser, nomeadamente ao nível da precisão, qualidade da superfície cortada e velocidade de corte. Estes tipos de lasers distinguem-se desde logo pela formação do feixe laser, que é gerado pela excitação de cristais, sem a necessidade de um gás para a geração do feixe. Este último aspeto, permite que os custos deste equipamento baixem drasticamente ao nível da refrigeração [36].

No laser de fibra ótica, a geração do feixe laser ocorre através da excitação de cristais, em que as fibras são constituídas por sílica, sendo no interior dopadas com iões e com uma segunda camada envolvente que não é dopada, permitindo que a luz bombeada seja absorvida pela camada interior. A camada externa deve ser em vidro, ou material polimérico, de forma a que os índices de refração sejam os menores possível [37].

A forma como é transportado o feixe também difere dos outros tipos de corte laser. Nos lasers de fibra, o feixe é então transportado por um cabo de fibra ótica (ver Figura 20), não sendo necessária uma quantidade significativa de espelhos como se viu anteriormente nos lasers CO₂.

É importante também referir que o desempenho dos lasers de fibra ótica é mais eficaz ao cortar matéria prima com espessuras abaixo dos 5 mm, facto que se explica pelo comprimento de onda do feixe da fibra ser dez vezes menor do que o de CO₂, com um valor de 1,064 μm [29].

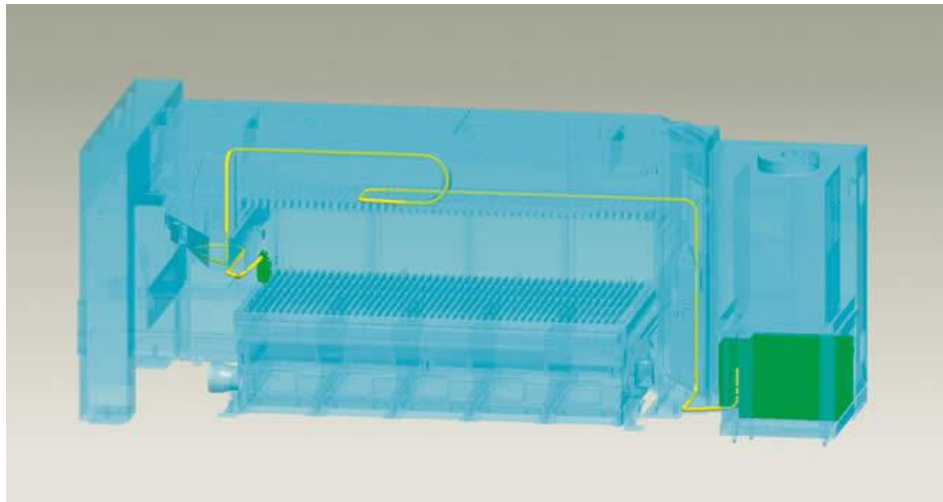


Figura 20 - Cabo de fibra ótica destacado num sistema de corte laser deste tipo [36]

Na Figura 21 é possível observar a composição típica de um laser de fibra ótica. Os componentes são os mesmos do laser CO₂, com a diferença de não possuir um sistema complexo de espelhos [29]. Apresentam-se então, os componentes:

- Um gerador laser, que é comum nos diferentes tipos de laser, com a particularidade deste tipo não conter o tubo de vidro de mistura de gases, por não ser necessário um gás para a formação do feixe laser;
- Cabo de fibra ótica, responsável pela condução do feixe laser;
- Lente de entrada e lente de foco, para a transmissão e foco do feixe laser, respetivamente;
- O fole, que desempenha as mesmas funções em todos os tipos de laser;
- A cabeça de foco, que é comum nos diferentes tipos de laser, destacando-se a presença da lente de foco e a entrada do gás de assistência.

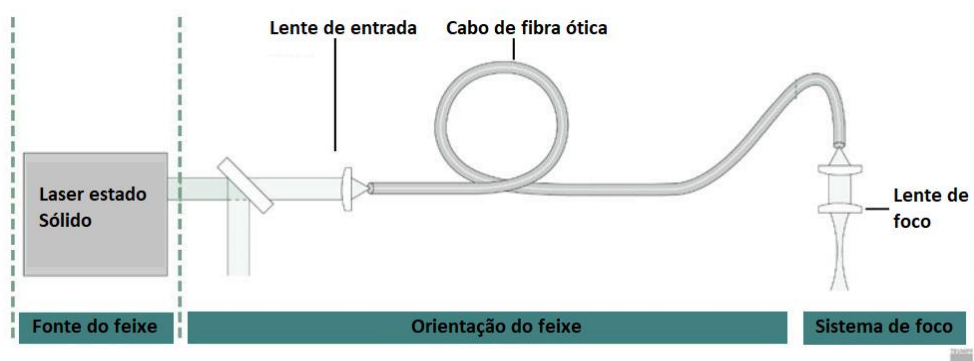


Figura 21 - Sistema de laser por fibra ótica [29]

2.1.4 Equipamentos e sua versatilidade

Viu-se, em capítulos anteriores, que para efetuar o corte, gravação ou soldadura, é essencial ter-se em conta os seguintes elementos constituintes de um sistema de fonte laser, conforme a Figura 22 [38].

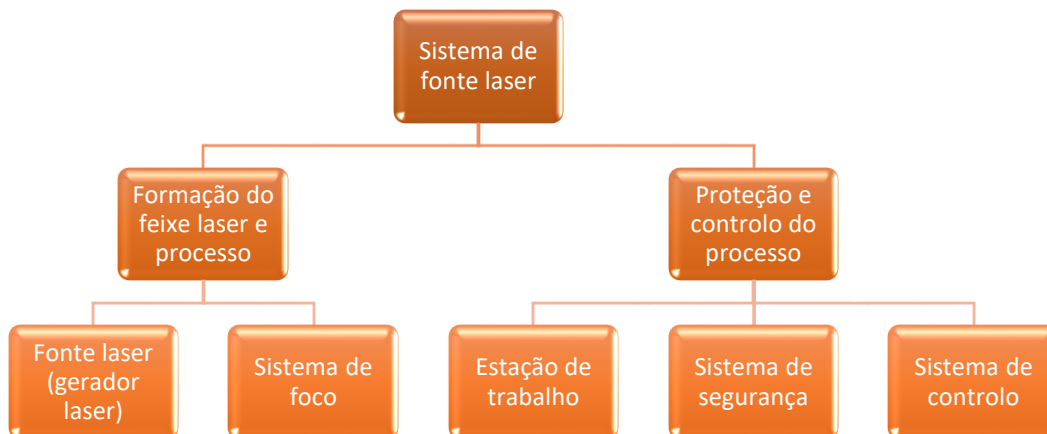


Figura 22 - Constituição de um sistema de fonte laser

A função de cada um dos constituintes apresentados na Figura 22, descrevem-se da seguinte forma:

- Fonte laser (gerador laser) – é aqui que, através do meio ativo, se gera o feixe laser. Incluiu-se ainda a unidade de refrigeração;
- Sistema de foco – refere-se à cabeça de corte, bem como às lentes de foco e orientação do feixe laser;
- Estação de trabalho – neste sector efetua-se a ação pretendida pelo laser. Esta estação serve ainda de proteção ao utilizador da máquina e ao meio envolvente, nomeadamente a exposição a radiações nocivas ao ser humano;
- Sistema de segurança – incluem-se todas as barreiras de proteção, sensores e botões de emergência. Este tipo de proteções, são essenciais na segurança e prevenção de acidentes para os utilizadores dos equipamentos, bem como todo o meio envolvente;
- Sistema de controlo – gere todos os parâmetros do sistema, bem como o movimento e ação dos componentes do equipamento. Estas ações são habitualmente controladas pelo utilizador do equipamento.

Atualmente, os equipamentos de fonte laser são maioritariamente requisitados no corte de matéria-prima 2D, podendo ser ainda usados para gravação ou soldadura. Todos estes equipamentos têm em comum um sistema de troca de mesas (ver Figura 23), com capacidade de movimentação segundo os eixos x, y e z. Estas mesas alternam entre si, enquanto uma mesa está com uma chapa a ser cortada, a outra mesa tem a chapa já cortada e com o produto pretendido obtido do corte a laser. Os eixos x e y são as coordenadas de corte, o eixo z está relacionado com a regulação da altura do bico de corte à superfície da matéria-prima, sendo que as coordenadas de deslocamento são comandadas por um sistema CAD/CAM acoplado à mesa de corte [39].

Os sistemas CAD/CAM apresentam variações consoante o tipo de equipamento, apesar da primeira fase ser comum a todos os tipos. Assim, em ambiente informático, desenvolve-se o desenho da peça planificada, normalmente com o *software* AutoCAD® (ver Figura 24). O ficheiro gerado deve ser guardado em DXF, para poder ser compatível com o modelo CAD utilizado, para posteriormente se realizar o *nesting* nas matérias-primas a cortar. Estando o *nesting* finalizado e guardado, o programador/desenhador define ainda os valores dos parâmetros de corte e o percurso a cortar, sendo que tudo aquilo que for programado, é possível, da mesma forma, ser observado no monitor de instruções do equipamento de corte a laser.



Figura 23 - Mesa móvel

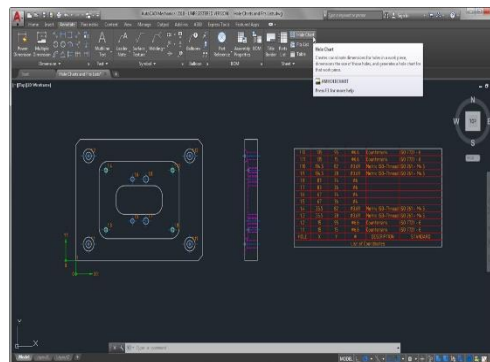


Figura 24 – AutoCAD® [40]

O tipo de CAD utilizado pela marca TRUMPF®, distribuiu-se pelo TruTops Boost® (ver Figura 25), que é o CAD mais recente e está a ser utilizado pelos equipamentos do tipo fibra ótica. Enquanto o TruTops Laser® (ver Figura 26) é o CAD dos equipamentos de corte a laser do tipo CO₂. É nestes dois tipos de CAD que se planeia o *nesting* das matérias-primas a cortar, bem como os parâmetros e percurso de corte. Esta programação é conectada com o monitor de instruções do equipamento, e o operador consegue assim visualizar da mesma forma o que se observa na Figura 25 no monitor da Figura 28.

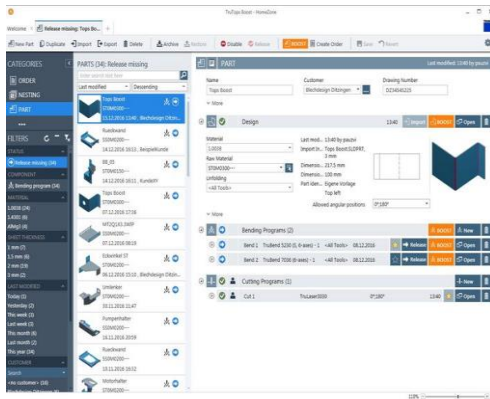


Figura 25 - TruTops Boost® [41]

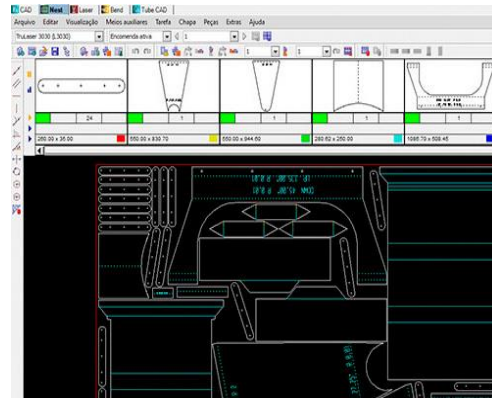


Figura 26 - TruTops Laser® [42]

Acima das mesas, está ainda o sistema de foco, componente essencial para efetuar o processo pretendido e que apresenta variações, consoante o tipo de equipamento. Dentro do sistema de foco, está a cabeça de corte (ver Figura 27) que se movimenta longitudinalmente e transversalmente. Estes movimentos são efetuados por motores elétricos e podem ser controlados por um monitor de instruções do equipamento (ver Figura 28). Neste monitor, é também possível mudar os parâmetros [39].

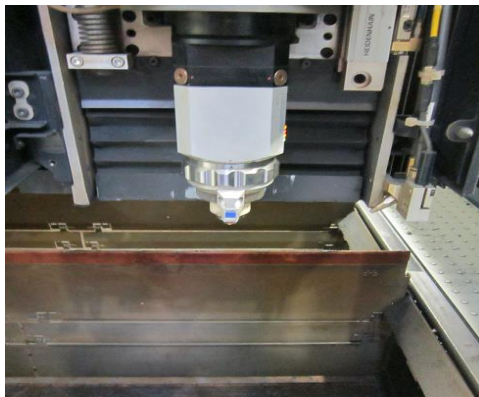


Figura 27 - Cabeça de corte



Figura 28 - Monitor de instruções

O corte 3D é outra funcionalidade deste tipo de equipamentos, conferindo aos equipamentos de fonte laser mais uma opção de utilização, para um processo de fabrico distinto. Este tipo de corte concentra-se essencialmente na criação de furações ou formas em tubos ou perfis (ver Figura 29). Devido à alta precisão do feixe laser, consegue-se cumprir com grande rigor as distâncias entre furações ou formas. Neste tipo de corte, coloca-se um adaptador na cabeça de corte (ver Figura 30), tendo como função aumentar ou diminuir de forma mais significativa a distância focal. São ainda colocados dois mordentes que podem ser versáteis no encaixe, ou mordentes singulares para cada tipo de forma [43].



Figura 29 - Tubo a ser submetido ao corte



Figura 30 - Adaptador para a cabeça de corte

A soldadura com equipamentos de fonte laser tem vindo a ser constantemente testada e cada vez mais solicitada no fabrico de produtos de alta precisão. Para este processo, existe uma cabeça de soldadura (ver Figura 31), sendo este o último componente do sistema de foco. A lente de foco, que faz o último ajuste do diâmetro focal antes de incidir na matéria-prima, possui uma proteção adicional contra os salpicos provocados pelo ar comprimido, que tem a função de proteger o vidro de proteção da lente. O gás é opcional, pois não é obrigatório estar instalado para o processo se realizar e, por fim, a câmara de monitorização, para se ter uma vista superficial do processo de criação do cordão [38].

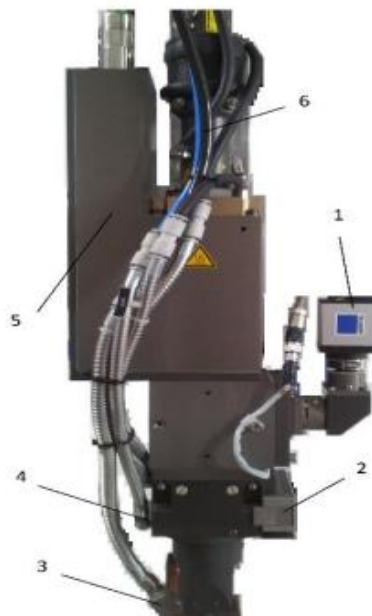


Figura 31 - Cabeça de soldadura (1-câmara de monitorização; 2-vidro de proteção; 3-gás; 4-proteção adicional; 5-lente de foco; 6-refrigeração) [38]

2.2 Parâmetros do processo de corte laser

A indicação correta dos parâmetros do processo, tem influência direta no desempenho do feixe laser. No corte laser, destacam-se os seguintes parâmetros [25]:

- Tipo de feixe laser (pulsado ou contínuo, comprimento de onda e potência da radiação);
- Ótica de focalização e diâmetro do feixe;
- Posição do ponto focal;
- Velocidade de corte;
- Gás de assistência (tipo e pressão).

Num processo de corte laser, há que ter também em atenção as variáveis que afetam o processo e que estão relacionadas com o tipo e dimensões do material, nomeadamente a espessura. Inclui-se ainda as propriedades físicas, químicas e mecânicas do material.

Os parâmetros mais relevantes apresentam-se descritos seguidamente descritos em tabelas, de acordo com estudos de diferentes autores.

Potência da radiação

Este parâmetro é responsável por determinar a densidade de energia introduzida no material. A potência da radiação tem que ser determinada tendo em conta as características do material, e assim minimizar a largura de corte e a ZTA. Na Tabela 6 estão descritos alguns estudos de diferentes autores sobre este parâmetro.

Tabela 6 - Estudos sobre a potência da radiação no corte laser

Autor	Descrição
[44]	Num aço de baixo carbono, em corte lento e com elevada potência, verifica-se uma menor ZTA. Neste caso, a fenda de corte aumenta, pois, este tipo de material é dúctil.
[45]	A largura de corte e a ZTA são menores, se for utilizada uma potência reduzida num corte rápido.
[46]	Os equipamentos de fonte laser devem atuar sempre no seu valor máximo de potência da radiação. Para o valor real da potência da radiação ser o máximo (potência de saída), e assim tirar o melhor proveito da capacidade do equipamento, o sistema ótico deve ser devidamente

	exposto a manutenção regular, para não influenciar negativamente o processo.
[47]	Uma maior densidade da potência da radiação, promove uma taxa maior de fusão ou a evaporação do material, numa fração de segundo. Este é o objetivo para não aumentar a ZTA.

Velocidade de corte

A velocidade de corte está relacionada com a potência da radiação. Se a velocidade de corte baixa, a potência a introduzir deve aumentar. No caso de a velocidade de corte ser elevada, pode não ocorrer o corte. Como tal, este parâmetro deve ser determinado experimentalmente para um dado material, associado com a potência da radiação. Na Tabela 7 estão descritos alguns estudos, de diferentes autores sobre este parâmetro.

Tabela 7 - Estudos sobre a velocidade de corte

Autor	Descrição
[48]	Num estudo experimental sobre a otimização do corte a laser auxiliado por gás em chapas de aço inoxidável de pequena espessura, concluiu-se que a máxima velocidade de corte, a uma dada potência do laser, podia ser aumentada até 15%, se os parâmetros do regime pulsado do laser fossem otimizados através de uma mudança no mecanismo de remoção de material na zona de corte, onde o processo tradicional de fusão-oxidação-ejeção fosse substituído por pequenas explosões no início de cada impulso do laser.
[18]	Tipicamente, a rebarba desaparece com o aumento da velocidade de corte.
[24]	A largura de corte e a ZTA, normalmente, diminuem com o aumento da velocidade de corte, sendo que, em espessuras superiores, obriga ao uso de mais energia para assegurar o corte, limitando os valores da velocidade.
[49]	Os valores dos parâmetros de rugosidade decrescem, quando os valores de velocidade de corte sobem.

Comprimento de onda

Os valores do comprimento de onda variam consoante o tipo de laser, estando diretamente relacionados com a forma como é excitada a fonte de luz laser. Na Tabela 8 está descrito um estudo sobre este parâmetro.

Tabela 8 - Estudos sobre o comprimento de onda

Autor	Descrição
[36]	Nos lasers CO ₂ existe uma mistura de gases, havendo estimulação elétrica, que apresenta um valor fixo de comprimento de onda de 10,6 μm. Este tipo de lasers é adequado para cortar vários tipos de material. Os lasers de fibra e cristais, apresentam um comprimento de onda de 1,064 μm. Como resultado, a intensidade é até 100 vezes maior do que nos lasers CO ₂ , com a mesma potência média emitida, até espessuras de 5 mm.
[50]	Os lasers de CO ₂ , pelo seu comprimento de onda ser de 10,6 μm, continuam a ser o tipo mais solicitado, pela gama maior de espessuras que conseguem cortar. Apesar de apresentarem menor rendimento com espessuras mais finas, são os mais versáteis.

Diâmetro do feixe

O diâmetro do feixe está essencialmente relacionado com o sistema ótico do equipamento e varia consoante o tipo. Na Tabela 9 estão descritos alguns estudos, de diferentes autores sobre este parâmetro.

Tabela 9 - Estudos sobre o diâmetro do feixe

Autor	Descrição
[51]	Num sistema ótico, é o comprimento de foco da lente utilizada que determina o diâmetro do feixe na região de trabalho.
[36]	Nos lasers de fibra, o diâmetro do feixe produzido é menor, comparativamente aos lasers CO ₂ , pois o comprimento de onda no laser de fibra é 10 vezes menor.

Tipo de gás

Normalmente, a indústria usa Oxigénio ou Azoto, sendo que para o corte de aços inoxidáveis se usa sempre o Azoto. Daí, a espessura de corte ser menor, comparativamente a outro tipo de aços. Na Tabela 10 estão descritos alguns estudos de diferentes autores sobre este parâmetro.

Tabela 10 - Estudos sobre o tipo de gás a usar

Autor	Descrição
[52]	O Oxigénio é conhecido pelas reações exotérmicas de oxidação, que fornecem energia extra ao corte. Esta oxidação é vantajosa em corte de alta espessura, já que permite substituir parte da potência requerida ao corte de espessura adicional, pela energia libertada nas reações de oxidação.
[53]	O Azoto permite uma proteção da superfície de corte a reações de oxidação a altas temperaturas. Estas mesmas reações ocorrem quando se usa o Oxigénio como gás de assistência, permitindo o corte de espessuras superiores.
[54]	A melhor qualidade da superfície de corte é atingida com o Azoto como gás assistente, bem como a menor fenda de corte.
[55]	Quando o gás auxiliar é o Oxigénio, promove uma reação exotérmica, que aumenta a eficiência térmica do corte.

Pressão do gás

Dependendo do tipo de gás, um aumento de pressão resulta numa maior remoção de material da zona de corte e, tipicamente, é superior quando se corta com Azoto, para compensar a ausência de oxidação. Em caso de corte com o Oxigénio, para além da remoção de material, o aumento da pressão aumenta também as reações de oxidação exotérmicas. Na Tabela 11 estão descritos alguns estudos de diferentes autores sobre este parâmetro.

Tabela 11 - Estudos sobre a pressão do gás

Autor	Descrição
[56]	O gás injetado pode também iniciar uma reação exotérmica com o substrato metálico, proporcionando uma fonte de calor adicional para a fusão do mesmo. Resultados teóricos e experimentais, dizem que entre 55%

	e 70% da energia total de corte é fornecida pela reação exotérmica a altas temperaturas entre o aço fundido e o Oxigênio.
[53]	O aumento da pressão do gás, no caso de corte com Oxigênio, aumenta o número de reações de oxidação a alta temperatura, o que facilita o corte, mas contribui para o aumento da ZTA. Tratando-se do Azoto, não ocorre oxidação, e mantém-se uma ZTA reduzida, no entanto, implica que o processo precise de potências superiores.
[57]	Neste estudo, para o corte de aço ferrítico e austenítico, a pressão do gás no aço ferrítico deve ser inferior, induzindo uma redução das reações de oxidação. Ainda assim, a fenda de corte é ligeiramente superior neste caso.

Foram realizados estudos por diferentes autores relativamente à influência dos parâmetros no processo de corte laser. Apresentam-se alguns estudos, com diferentes características, distribuídos pelas seguintes tabelas:

- Nas Tabelas 12, 13, 14 e 15: descrevem-se estudos com diferentes parâmetros e tipos de laser, de três tipos de aço inoxidável (AISI 304, AISI 304L, AISI 316L e AISI 409);
- Na Tabela 15: apresentam-se conclusões relativamente a estudos em liga Al-Cu;
- Na Tabela 16: apresenta-se um estudo numa liga de INCONEL 625.

Tabela 12 - Estudo do efeito dos parâmetros em amostras de aço inoxidável (AISI 304)

AISI 304			
Autor	Tipo de laser	Parâmetro testado	Resultados
[58]	Laser fibra ótica	Velocidade de corte	Para uma potência de corte de 4000 W verificou-se que para espessuras inferiores a 3 mm, consegue-se atingir velocidades de corte superiores, comparando com o laser CO ₂ .

	Laser CO ₂		Para espessuras superiores a 4 mm, o laser CO ₂ consegue aproximar-se das velocidades de corte do laser de fibra ótica.
	Laser fibra ótica	Distância focal	A distância focal relaciona-se com a largura de corte produzida. Para espessuras inferiores a 3 mm, este parâmetro não constitui uma preocupação, dado que a largura de corte não apresenta grandes variações. Para espessuras superiores a 4 mm, verificam-se variações significativas da largura de corte, relacionadas com distância focal errada e com a acumulação de calor na matéria-prima.
	Laser CO ₂		A largura de corte vai apresentando maiores discrepâncias com o aumento da espessura, e em espessuras maiores, à semelhança do laser de fibra ótica, torna-se importante aumentar a distância focal para diminuir a acumulação de calor na matéria prima.
[59]	Laser CO ₂	Potência	O estudo revelou que as alterações nos valores da potência afetam de forma mais significativa o processo de corte laser.
[60]	Laser de Nd:YAG	Diâmetro do feixe	Os objetivos principais deste trabalho foram os de determinar os intervalos ótimos de intensidade do feixe laser para diversos tipos de furação. A furação no processo de corte laser, provoca uma cratera de diâmetro superior ao diâmetro do feixe laser, devido às características explosivas do processo. O facto de o diâmetro do furo sempre aumentar com a intensidade do feixe deve-se, em parte, ao aumento do diâmetro e da divergência do feixe com o aumento da potência de pico.

Tabela 13 - Estudo do efeito dos parâmetros em amostras de aço inoxidável (AISI 304L)

AISI 304L			
Autor	Tipo de laser	Parâmetro testado	Resultados
[61]	Laser fibra ótica (pulsado)	Velocidade de corte	O estudo centrou-se na relação da velocidade de corte com a frequência de impulso. Com uma velocidade de corte baixa, e também com uma frequência de impulso baixa ou média, observa-se uma largura de corte sem grandes variações.

Tabela 14 - Estudo do efeito dos parâmetros em amostras de aço inoxidável (AISI 316L)

AISI 316L			
Autor	Tipo de laser	Parâmetro testado	Resultados
[62]	Laser de Nd:YAG	Potência da radiação	O estudo observou as variações na potência de pico, tempo do impulso e existência ou não de atmosfera protetora, em virtude da mudança dos tamanhos, formatos e profundidades em microfuros. Ao verificar as saídas dos furos, vê-se que o diâmetro de saída aumenta com a quantidade de energia do processo, exatamente o contrário do que era esperado. Observou-se ainda, que com o aumento da energia de processo, a saída do furo vai perdendo o formato circular e começa a ter expulsão de material fundido na saída. A expulsão de metal é maior em processos sem atmosfera protetora, tornando a superfície circular muito irregular.
[24]	Laser CO ₂	Velocidade de corte	Neste trabalho pretendeu-se estabelecer uma relação entre os parâmetros de corte laser, com a largura de corte e a qualidade da superfície cortada. Com velocidades de corte superiores, menor é a largura de

	<p> corte, assim como para a rugosidade média (R_a), que será tanto menor, quanto maiores forem os valores da velocidade de corte.</p>
<p>Potência da radiação</p>	<p>No mesmo estudo, a largura de corte aumenta com o aumento da potência da radiação. Mas, um aumento na potência, promove a diminuição da rugosidade média (R_a).</p>
<p>Pressão do gás</p>	<p>A pressão do gás exerce uma maior influência no parâmetro de rugosidade média (R_a). À medida que a pressão do gás vai aumentando, a rugosidade também aumenta.</p>

Tabela 15 - Estudo do efeito dos parâmetros em amostras de aço inoxidável (AISI 409)

AISI 409			
Autor	Tipo de laser	Parâmetro testado	Resultados
[63]	Laser CO ₂	Velocidade de corte	A velocidade de corte apresenta-se como o parâmetro que provoca uma maior ou menor rugosidade superficial.
		Potência	A potência é o parâmetro que provoca maiores ou menores diferenças na largura de corte.

Tabela 16 - Estudo do efeito dos parâmetros em amostras de liga de Al-Cu

Liga Al-Cu			
Autor	Tipo de laser	Parâmetro testado	Resultados
		Potência	A largura de corte apresenta menos variações com potências mais elevadas.
[64]	Laser CO ₂	Velocidade de corte	Quanto maior o valor deste parâmetro, mais rapidamente se obtém o corte. A largura de corte também irá apresentar menos variações com valores de velocidade de corte mais elevados.

Tabela 17 - Estudo do efeito dos parâmetros em amostras de liga INCONEL 625

Liga INCONEL 625			
Autor	Tipo de laser	Parâmetro testado	Resultados
[65]	Laser CO ₂	Velocidade de corte	Neste estudo, uma chapa foi primeiro quinada e só depois submetida a corte laser para a obtenção de 17 amostras (66 mm x 8 mm x 1,57 mm). A velocidade de corte foi aumentada, faseadamente, em 100 mm/min por cada corte de amostra, sendo que a potência se manteve, bem como outros parâmetros. Concluiu-se que a amostra que foi cortada com a velocidade intermédia, ou seja, a amostra número 9, era a que apresentava menor nível de rebarba.

Dos estudos apresentados nas tabelas anteriores, conclui-se que:

- O tipo de material tem um fator de impacto menor, quando se compara com a espessura do material e os parâmetros associados ao corte;

- A potência e a velocidade de corte apresentam-se como dois parâmetros preponderantes num processo de corte a laser. Estes dois parâmetros estão diretamente relacionados, independentemente do tipo de laser;
- A velocidade de corte é o parâmetro que mais influencia a rugosidade superficial;
- A potência impõe uma maior ou menor largura de corte. As discrepâncias da largura de corte correspondem a um desperdício de material;
- Estando a velocidade de corte e a potência relacionadas, é natural que quanto maior forem estes valores, menor será o tempo de corte. Contudo, este aumento não pode ser proporcionalmente igual para os dois parâmetros;
- O tipo de laser de fibra ótica apresenta o melhor desempenho no corte de chapas finas (espessuras inferiores a 4 mm);
- O tipo de laser CO₂ não consegue atingir velocidades de corte tão elevadas no corte de chapas finas, mas em chapas de espessura superior, nomeadamente para espessuras superiores a 5 mm, é o que atinge velocidades de corte mais rentáveis.

2.3 Teoria de medição de rugosidades

As superfícies apresentam irregularidades, resultantes dos processos de fabrico mais diversos. Estas irregularidades são classificadas em: desvios macro-geométricos (desvios de planeza ou ondulação) e desvios micro-geométricos (rugosidade) [66].

Os métodos de medição dos estados de superfície efetuam-se, geralmente, por apalpação ao longo de uma secção. De acordo com as dimensões das peças a controlar, podem utilizar-se instrumentos apalpadores de medição fixos ou portáteis, sendo habitual a utilização de um rugosímetro (ver Figura 32) ou de um perfilómetro de contacto (ver Figura 33). Com este tipo de equipamentos e com o auxílio de *software* informático é possível avaliar os estados de superfície, através de parâmetros de rugosidade e da análise do perfil de superfície ampliado, com anamorfose (a ampliação vertical é superior à ampliação horizontal), num plano normal à superfície a observar (ver Figura 34). A presença da anamorfose indica que estamos perante um perfil de rugosidade, enquanto a ausência deste fenómeno remete-nos para um outro perfil, que pode ser de ondulação [66].

Sendo este um estudo sobre a qualidade da superfície cortada, importa focar a atenção na rugosidade, que tem influência direta em pontos como [66]:

- Resistência ao desgaste;

- Resistência à corrosão;
- Resistência à flexão;
- Condutividade térmica;
- Aspeto estético.

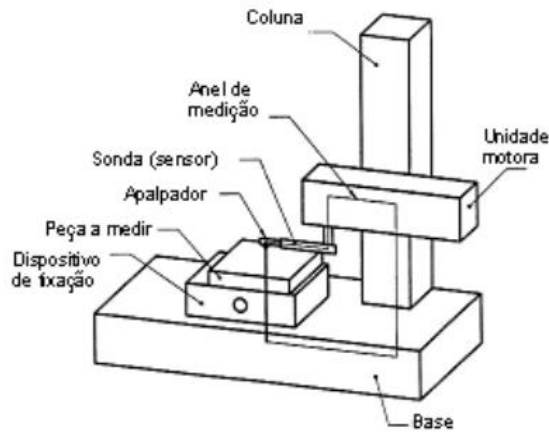


Figura 32 – Rugosímetro [66]

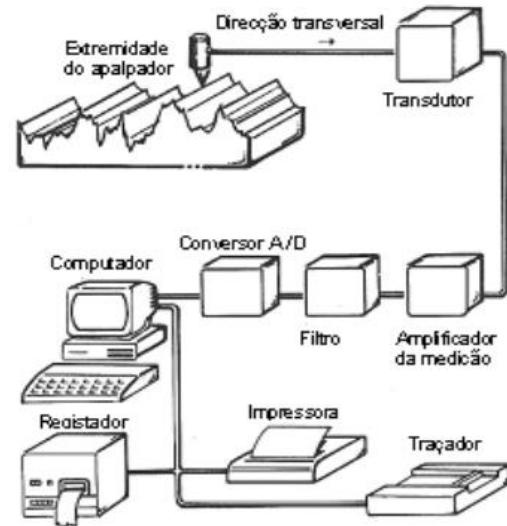


Figura 33 - Perfilômetro de contacto [66]

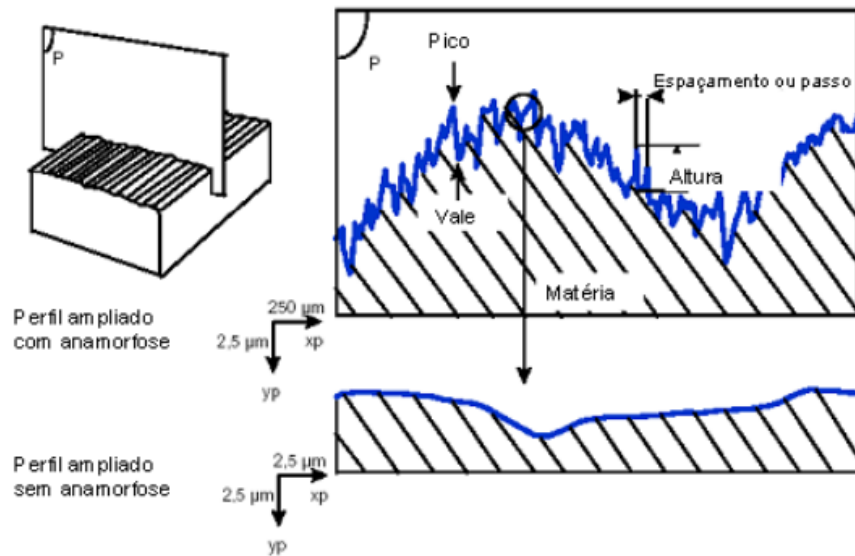


Figura 34 - Diferentes tipos de perfil do estado da superfície [66]

Com a utilização de instrumentos apalpadores, passou a ser possível a especificação de qualquer valor numérico para os diferentes parâmetros de rugosidade. Existem,

portanto, parâmetros caracterizadores do estado da superfície, relativamente à rugosidade (R), em que se destacam os seguintes [66]:

- R_a – desvio médio aritmético ou rugosidade média. Resulta da média aritmética dos valores absolutos das ordenadas do eixo $Z(x)$ (ver Figura 35). Por definição, este parâmetro não fornece nenhuma informação sobre a robustez ou fragilidade de um perfil, nem sobre a aptidão das peças para exercerem convenientemente a função para que foram projetadas, sendo pouco sensível aos valores esporádicos de amplitude máxima;

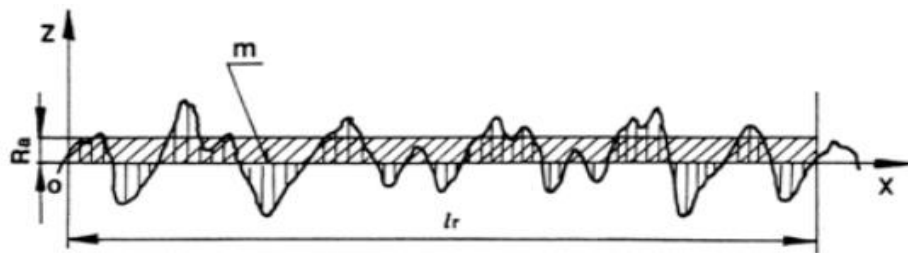


Figura 35 - Perfil de rugosidade para identificação do parâmetro R_a [66]

- R_t – altura total do perfil de rugosidade. É a soma da maior altura de pico do perfil, Z_p , com a maior das profundidades de vale do perfil, Z_v , no interior do comprimento de avaliação (ver Figura 36). Usado na maioria dos países e de fácil obtenção nos equipamentos de medição, é usado sobretudo em superfícies de vedação, superfícies de deslizamento, superfícies sujeitas a ações dinâmicas ou ligações muito solicitadas;

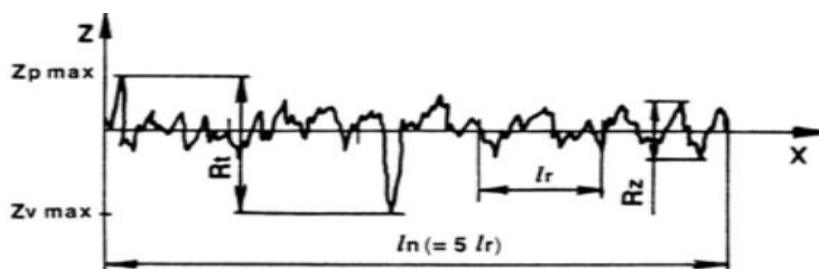


Figura 36 - Perfil de rugosidade para identificação do parâmetro R_t [66]

- R_z - média das alturas máximas do perfil de rugosidade. É a média aritmética das alturas máximas do perfil Z , medidas em cinco comprimentos de base

consecutivos (ver Figura 37). Este parâmetro de rugosidade é mais sensível às mudanças no acabamento superficial do que o parâmetro R_a , sendo um critério útil no controlo de um processo produtivo;

- R_{max} – o perfil de rugosidade para este parâmetro é analisado em conjunto com o do parâmetro R_z (ver Figura 37). Sendo a maior das alturas máximas do perfil Z , determinado pelo parâmetro de rugosidade R_z , a designar-se por R_{max} .

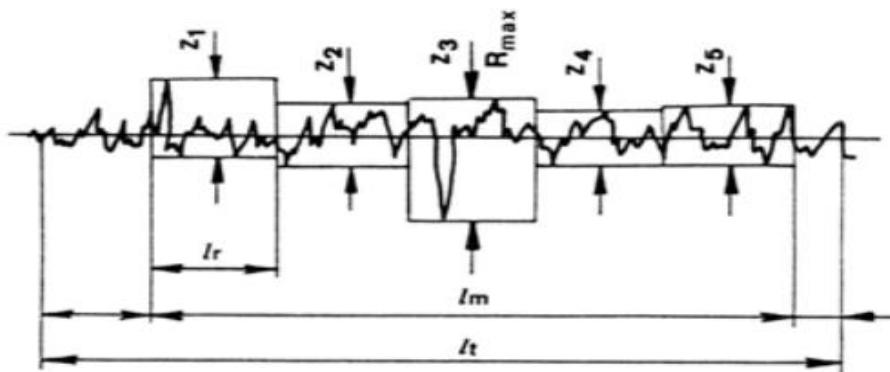


Figura 37 - Perfil de rugosidade para identificação do parâmetro R_z e R_{max} [66]

2.4 Teoria dos métodos Taguchi e ANOVA

O Método Taguchi, surgiu através do engenheiro e estatístico japonês Genichi Taguchi. Inicialmente, foi desenvolvido para melhorar a qualidade dos produtos, através do melhoramento dos processos de fabrico. O sucesso na obtenção dos resultados desejados envolve uma seleção cuidadosa dos parâmetros do processo, separando-os em variáveis de controlo, que podem ser controladas (exemplos: velocidade de corte ou potência da radiação) e variáveis de ruído, sendo perturbadoras do processo, extrínsecas ao mesmo (exemplos: vibrações dos equipamentos ou qualidade da matéria-prima) [67].

Na Figura 38, está uma representação de um sistema de variáveis do processo, em que as variáveis de controlo e de perturbação são analisadas em conjunto, mas as variáveis de controlo assumem uma importância maior, e daí estarem especificadas, de forma a poderem-se sobrepor para diminuírem as variáveis de ruído, que são extrínsecas ao processo [68].

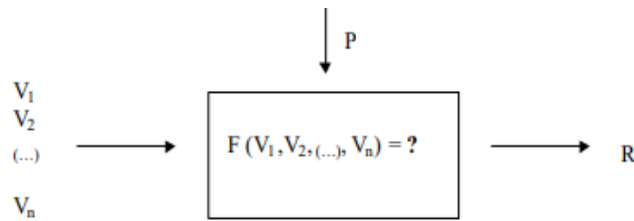


Figura 38 - Representação do sistema de variáveis do processo
 V_i - Variáveis de controlo do processo
 P - Variáveis de perturbação do processo
 R - Valor obtido para a característica a estudar [68]

Habitualmente, o método Taguchi sugere que se realize um conjunto de experiências estatisticamente planeadas, em que as variáveis de controlo do processo intervenham em níveis diferentes. É nesta fase que o método recorre ao Desenho Estatístico de Experiências, ou em inglês *Design of Experiments* (DOE). As experiências simulam condições específicas de produção sob o efeito de fontes de variação e, analisados os resultados, identificam-se quais as variáveis de controlo que mais afetam a variabilidade, bem como quais os níveis que elas devem assumir, para que essa variação seja mínima. A principal vantagem deste método, é o facto de sugerir que se realize um número de experiências consideravelmente inferior ao teoricamente previsto pelos métodos tradicionais, resultando numa redução no custo experimental [68].

Taguchi baseou-se nos princípios do desenho estatístico de experiências fatoriais e desenhou diversos conjuntos de experiências sob a forma de matrizes ortogonais, que variam consoante o número de fatores e o dos respetivos níveis envolvidos no estudo. Na Figura 39 está um exemplo de uma matriz de experiências. Caso se pretenda testar quatro fatores, cada um dos quais com dois níveis, com as diferentes combinações, conduziriam a uma matriz do tipo L8 (2^3), ou seja, 8 experiências [68].

	A	B	C	D
R-1	1	1	1	1
R-2	1	1	1	2
R-3	1	2	2	1
R-4	1	2	2	2
R-5	2	1	2	1
R-6	2	1	2	2
R-7	2	2	1	1
R-8	2	2	1	2

Figura 39 - Representação de uma matriz ortogonal do tipo L8 [69]

Atualmente, com o *software* informático disponível no mercado, torna-se possível analisar de forma expedita estas combinações de experiências. O Minitab® é um bom exemplo de utilização do DOE do método Taguchi, através da indicação das diferentes variáveis e respostas do processo, assim como a escolha adequada da matriz ortogonal, o *software* vai indicar todas as experiências a realizar, indicando ainda graficamente e estaticamente as melhores condições do processo [68].

Através da escolha do tipo de relação do quociente S/N ou Sinal-Ruído, torna-se possível indicar quais os melhores níveis das variáveis de controlo, tendo em conta o valor residual de afetação das variáveis de ruído, externas ao processo. Então este tipo de relações podem ser [68]:

- O valor-alvo é o melhor;
- O menor valor é o melhor - quanto menor, melhor;
- O maior valor é o melhor - quanto maior, melhor.

Após a indicação do tipo de relação do quociente S/N, obtém-se um gráfico como o da Figura 40. Se considerarmos para esta situação a categoria “O menor valor é o melhor”, é possível observar que em todas as variáveis é o valor número 2, que é o mais indicado para este processo, porque ao contrário do que a categoria diz, os gráficos devem ser analisados e quanto maior for o valor no eixo das abcissas, melhor será a condição do processo [68].

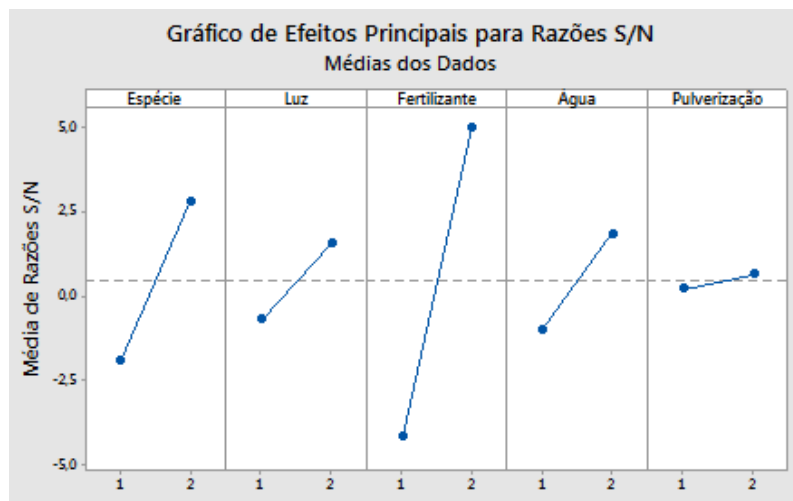


Figura 40 - Gráfico da relação do quociente S/N [70]

Após a realização e análise do conjunto de experiências selecionado, Taguchi propõe que se analise ainda os resultados, com uma Análise da Variância ou em inglês *Analysis of Variance* (ANOVA). O objetivo é perceber quais as variáveis de controlo, nos respetivos níveis, que minimizam a variabilidade e, conseqüentemente, serão as mais significativas durante o processo. Destacam-se os seguintes valores desta análise [68]:

- Valor p – probabilidade de significância, representa a probabilidade num teste de hipóteses, ou seja, quanto é que cada variável é mais ou menos significativa. Quanto menor do que 5% for o valor ($<0,05$), mais significativa é a variável de controlo do processo.
- R^2 – coeficiente de correlação, que representa a percentagem de variação na resposta. Este valor varia entre 0% a 100%. Quanto mais alto este valor, melhor o modelo de experiências se ajusta.

Na Figura 41, está um gráfico de probabilidade normal que auxilia os valores estatísticos obtidos. Neste gráfico, é possível observar através da linha normal da média dos valores obtidos, a dispersão destes resultados, verificando se existem muitos ou poucos valores distantes da linha normal [68].

Visualmente é um gráfico esclarecedor, mas a análise segundo ANOVA só fica completa com o auxílio dos valores estatísticos determinados, de R^2 e valor de p [68].

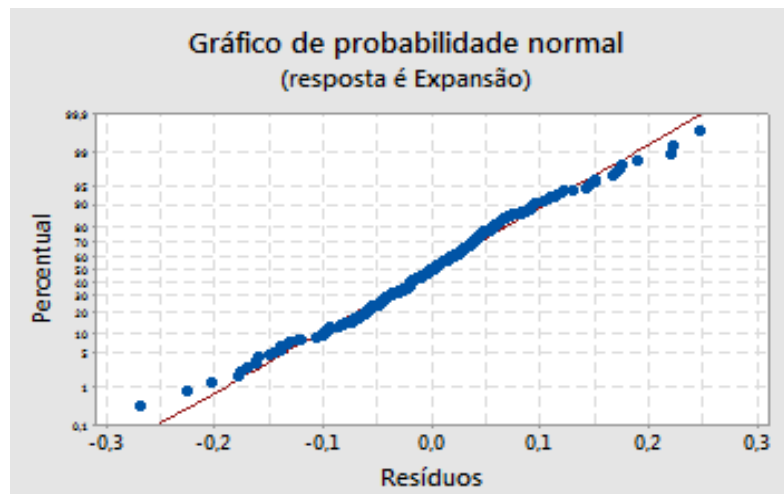


Figura 41 - Gráfico de probabilidade normal [71]

2.5 Exemplos de aplicação do método Taguchi na Investigação

Na Tabela 18 estão resumidos alguns estudos de diferentes autores, sobre a aplicação do método Taguchi no corte laser.

Tabela 18 - Exemplos de aplicação do método no estudo do corte laser

Autor	Resultados
[72]	<p>O objetivo deste estudo, passou por atingir a melhor combinação de parâmetros para a obtenção da melhor qualidade superficial, medida através de R_a, com o corte de amostras de aço macio, através de um equipamento de corte por laser pulsado do tipo Nd: YAG. As variáveis de controlo do processo foram: velocidade de corte, taxa de repetição dos impulsos e espaçamento entre impulsos. Através da análise dos gráficos S/N, ANOVA e dos valores estatísticos, concluiu-se que a velocidade de corte e a taxa de repetição dos impulsos são, a vários níveis, os parâmetros mais preponderantes para este processo. Concluiu-se ainda que quanto maior for o valor da velocidade de corte, pior será a qualidade da superfície cortada.</p>
[73]	<p>Num laser do tipo CO₂, foram cortadas amostras em AISI 304, para averiguar quais as melhores condições de corte que poderão conduzir a menor valor da rugosidade superficial. As variáveis do controlo do processo foram: velocidade de corte, potência de radiação, distância focal e pressão do gás. Foram analisados os diferentes resultados, com recurso aos gráficos e aos valores estatísticos e concluiu-se que a velocidade de corte e a potência de radiação, são os parâmetros mais preponderantes, para a obtenção da menor rugosidade na superfície cortada.</p>
[74]	<p>Para este estudo, a largura de corte e a rugosidade superficial foram as respostas obtidas, através do corte de amostras de aço macio num laser do tipo CO₂. Velocidade de corte, potência de radiação e pressão do gás, foram os parâmetros de corte laser testados, com três níveis cada um. Neste estudo, apenas foi feita uma análise com recurso aos gráficos da relação do quociente S/N. Para a rugosidade superficial, a potência da radiação e a velocidade de corte produzem menor rugosidade com valores intermédios, já a pressão do gás, deve ser a mais alta possível. Quanto à largura de corte, a potência de radiação, velocidade de corte e a pressão do gás devem apresentar valores intermédios.</p>

DESENVOLVIMENTO

3.1 CASO DE ESTUDO

3.2 MATERIAIS

3.3 MEIOS UTILIZADOS

3.4 MÉTODOS

3.5 ENSAIOS

3.6 ANÁLISE DAS MICROESTRUTURAS

3.7 ANÁLISE DA SUPERFÍCIE CORTADA DAS AMOSTRAS

3.8 ANÁLISE DA RUGOSIDADE

- 3.9 ANÁLISE ESTATÍSTICA DAS AMOSTRAS EM AISI 316L – LASER DE CO₂
- 3.10 ANÁLISE ESTATÍSTICA DAS AMOSTRAS EM AISI 316L – LASER DE FIBRA ÓTICA
- 3.11 ANÁLISE ESTATÍSTICA DAS AMOSTRAS EM St12 – LASER CO₂
- 3.12 ANÁLISE ESTATÍSTICA DAS AMOSTRAS EM St12 – LASER DE FIBRA ÓTICA
- 3.13 CORRESPONDÊNCIA DAS ANÁLISES ESTATÍSTICAS COM AS RESTANTES ANÁLISES

3 DESENVOLVIMENTO

3.1 Caso de estudo

Após um enquadramento teórico desta dissertação, importa agora passar a uma fase prática. Na Figura 42 estão detalhadas as etapas iniciais da parte prática deste estudo, que irá resultar no conjunto de ensaios para serem atingidos os objetivos deste trabalho.

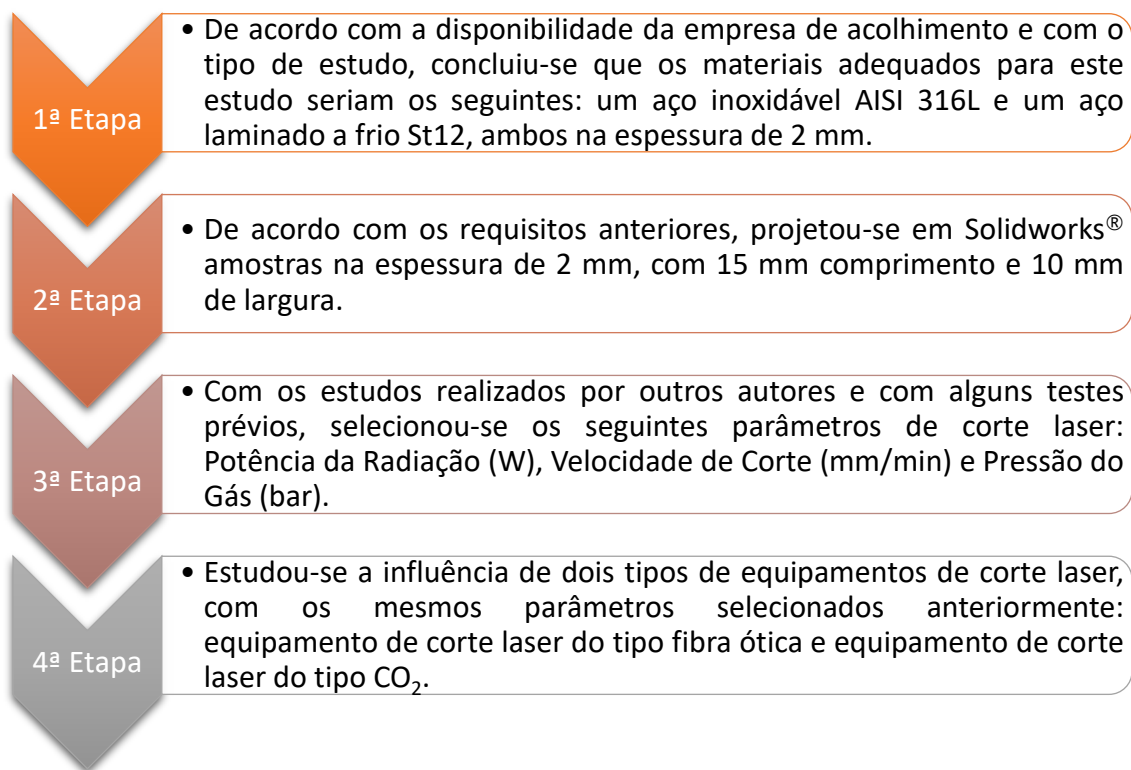


Figura 42 - Etapas do processo de ensaios

3.2 Materiais

As Figuras 43 a) e 44 a), são os desenhos 3D em Solidworks®, das amostras projetadas a cortar, em aço inoxidável AISI 316L e em aço laminado a frio St12, respetivamente.

Foram cortadas amostras em dois tipos de material, na mesma espessura, com propriedades físicas, químicas e mecânicas diferentes:

- Um aço inoxidável AISI 316L (ver Figura 43 b)), na espessura de 2 mm, que é habitualmente utilizado para o corte a laser de peças para os diversos clientes da empresa, nomeadamente da área alimentar, caracteriza-se por ter uma

resistência à corrosão superior ao aço inoxidável AISI 316 e por ter um teor de carbono inferior.

- Um aço laminado a frio St12 (ver Figura 44 b)), também na espessura de 2 mm, que é caracterizado por ser maleável, embora o encruamento resultante da redução a frio durante o processo de fabricação do material confere maior resistência mecânica ao produto final.

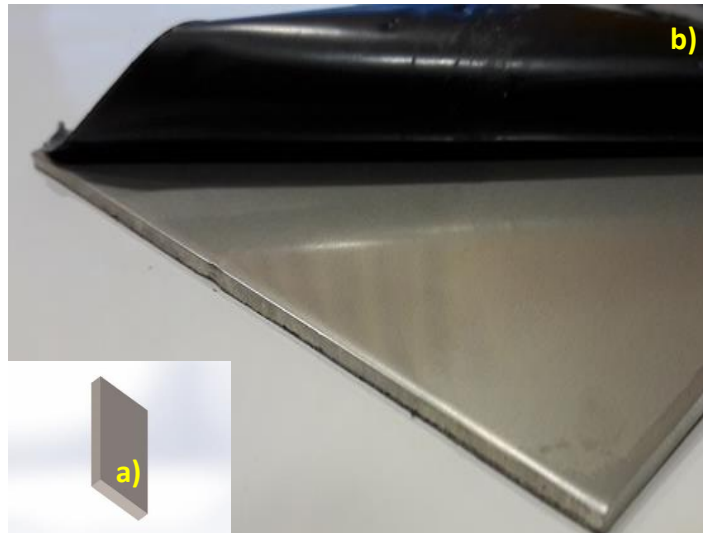


Figura 43 - Amostra projetada para cortar no material AISI 316L

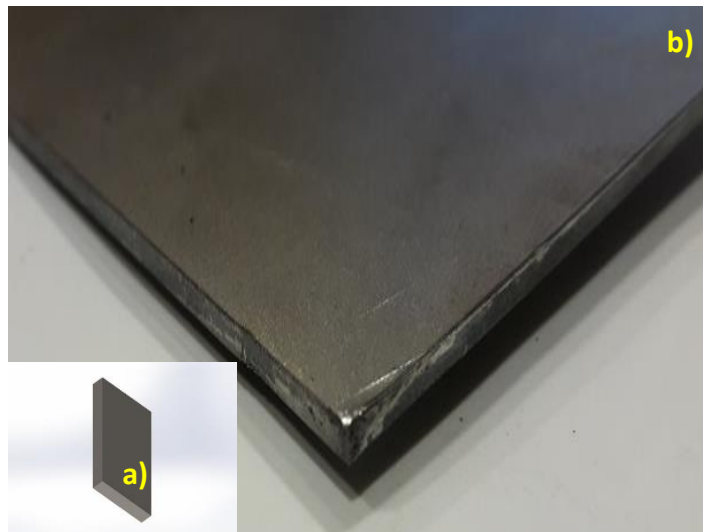


Figura 44 - Amostra a projetada para cortar no material St12

Nas Tabelas 19 e 20 apresentam-se os materiais segundo as suas principais características.

Tabela 19 - Identificação do aço inoxidável

Material (Designação)		Espessura						
AISI 316L		2 mm						
Propriedades Químicas								
Carbono (C%)	Crómio (Cr%)	Azoto (N%)	Manganês (Mn%)	Molibdénio (Mo%)	Níquel (Ni%)	Fósforo (P%)	Silício (Si%)	Enxofre (S%)
0,019	16,7	0,041	0,92	2,04	10,1	0,033	0,46	0,001
Propriedades Físicas								
Densidade (g/cm³)				Ponto de Fusão (°C)				
8				1388				
Propriedades Mecânicas								
Dureza Vickers HV		Resistência Máxima à Tração (MPa)			Módulo de Elasticidade (GPa)			
146		560			193			

Tabela 20 - Identificação do aço laminado a frio

Material (Designação)		Espessura						
St12		2 mm						
Propriedades Químicas								
Carbono (C%)	Crómio (Cr%)	Azoto (N%)	Manganês (Mn%)	Alumínio (Mo%)	Nióbio (Nb%)	Fósforo (P%)	Silício (Si%)	Enxofre (S%)
0,043	0,028	0,0029	0,21	0,044	0,0034	0,011	0,010	0,012
Propriedades Físicas								
Densidade (g/cm³)				Ponto de Fusão (°C)				
7,87				1426				
Propriedades Mecânicas								
Dureza Vickers HV		Resistência Máxima à Tração (MPa)			Módulo de Elasticidade (GPa)			
105		301			200			

3.3 Meios utilizados

Foram utilizados dois equipamentos de corte laser distintos. O tipo de laser e as características dos equipamentos apresentam diferenças significativas, que se vão notar na qualidade da superfície cortada das amostras. Nas Tabelas 21 e 22, estão especificadas as características dos equipamentos de corte laser usados durante os ensaios.

Tabela 21 - Características do equipamento de corte laser de fibra ótica

Tipo de laser	Designação do equipamento	Marca
Fibra ótica	TruLaser 3030 fiber	TRUMPF®
Potência máxima de corte (W)	Velocidade máxima de corte (mm/min)	Dimensões da mesa de corte (mm)
4000	140000	Comprimento: 3000 Largura: 1500
Descrição do equipamento		
Este tipo de laser caracteriza-se por ser mais rentável comparativamente ao equipamento do tipo CO ₂ , tanto a nível de custo inicial, bem como ao nível da manutenção. Como já foi referido em capítulos anteriores este equipamento caracteriza-se por não ter um sistema de espelhos tão complexo.		

Tabela 22 - Características do equipamento de corte laser de CO₂

Tipo de laser	Designação do equipamento	Marca
CO ₂	TruLaser 3030	TRUMPF®
Potência máxima de corte (W)	Velocidade máxima de corte (mm/min)	Dimensões da mesa de corte (mm)
3200	140000	Comprimento: 3000 Largura: 1500
Descrição do equipamento		
Neste tipo de equipamentos, o corte de espessuras superiores a 5 mm apresenta-se mais viável, dadas as características do tipo de laser, nomeadamente o facto do comprimento de onda ser dez vezes superior ao tipo de laser de fibra ótica. No entanto, o custo inicial e a manutenção deste tipo de equipamentos continuam a ser superiores.		

Apresentam-se nas Figuras 45 e 46 os equipamentos da empresa de acolhimento, utilizados nos ensaios para este estudo. Os dois equipamentos possuem aproximadamente as mesmas cotas de atravancamento, traduzindo-se em 9000 mm de comprimento, 6000 mm de largura e 2400 mm de altura.

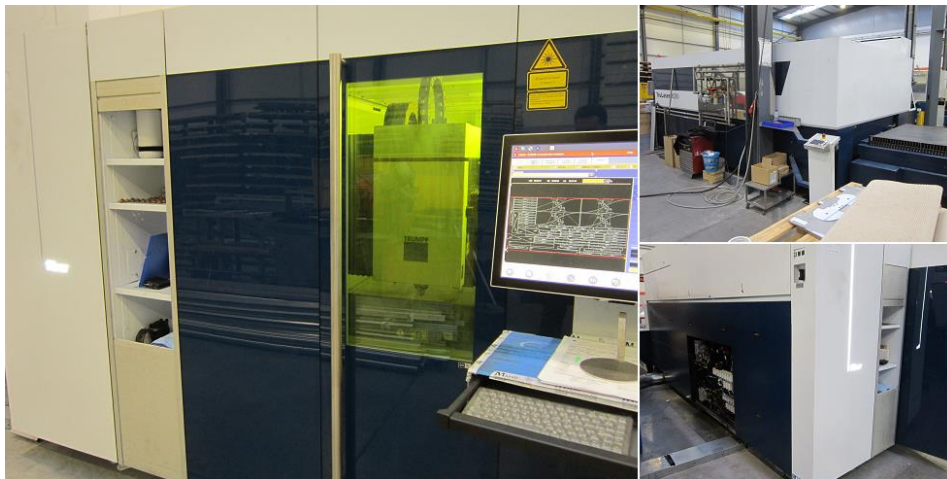


Figura 45 - "TruLaser 3030 fiber"



Figura 46 - "TruLaser 3030"

No DEM do ISEP, recorreu-se a dois laboratórios distintos. Conjuntamente com o CEMUP, foi possível completar as análises necessárias de laboratório. Foram então solicitados os seguintes laboratórios:

- Laboratório de Metalografia (ISEP);
- Laboratório de Tribologia (ISEP);
- Laboratório do SEM (CEMUP).

Na Tabela 23, estão detalhados todos os equipamentos utilizados nos laboratórios referidos nos tópicos anteriores.

Tabela 23 – Equipamentos utilizados nos laboratórios

Descrição do equipamento	Representação do equipamento
<p>No laboratório de metalografia, começou-se por utilizar lixadoras/polidoras da marca Labopol 21[®], para o lixamento e polimento das amostras dos ensaios de corte laser. Foram utilizados três tipos de lixa (220, 500 e 1000) e dois tipos de abrasivo (3 μm e 1 μm).</p>	
<p>Ainda no laboratório de metalografia, utilizou-se um microscópio da marca Olympus[®] - modelo BX52. Para a obtenção das imagens da microestrutura, o <i>software</i> informático para tratar as imagens é o Análisis[®].</p>	
<p>Por fim, no laboratório de metalografia, recorreu-se a uma <i>hotte</i> química para realizar os ataques químicos nas amostras. Os reagentes e tempos de ataque foram: Nital para as amostras de St12 durante 15 s; uma solução de ácido clorídrico com água para as amostras de AISI 316L, esta solução é aquecida e o tempo de ataque é de 20 s.</p>	

No laboratório de tribologia, usou-se um rugosímetro portátil montado numa base fixa, da marca Mahr® - modelo M2. Este rugosímetro possuiu um apalpador em diamante que regista em *software* informático, MarSurf®, o perfil de rugosidade e os valores dos diferentes parâmetros de rugosidade.



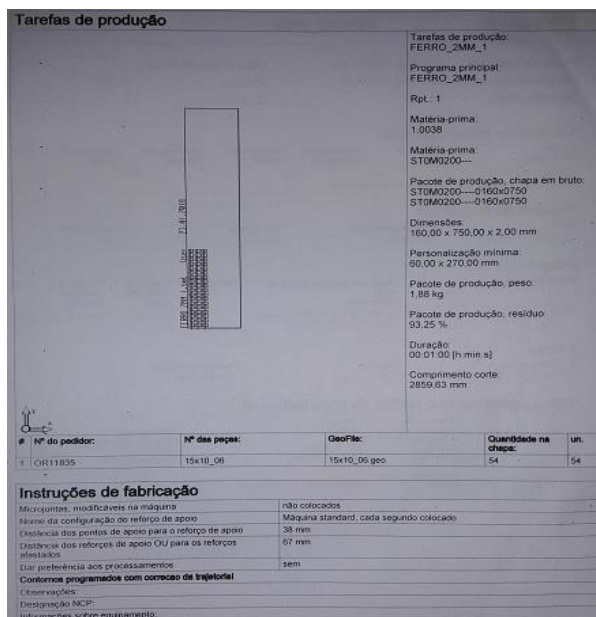

No CEMUP, recorreu-se ao SEM, da marca FEI®- modelo Quanta, para a obtenção das medições da rebarba das amostras, bem como das imagens para a análise da superfície cortada.



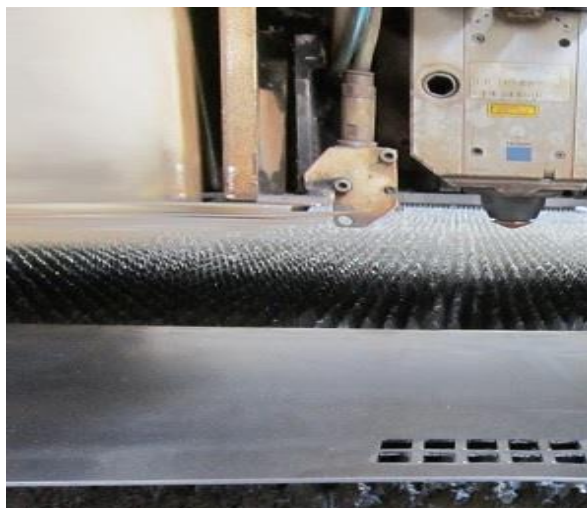
3.4 Métodos

O processo de corte laser das amostras começou por uma fase de planeamento, no departamento de programação dos equipamentos de corte laser. Diariamente, o processo começa pela programação e a execução dos planos de corte, mais especificamente com a realização do *nesting*, de forma a evitar desperdícios de matéria-prima e a posicionar as peças a cortar na melhor disposição. Na Tabela 24, estão descritas as fases de programação.

Tabela 24 - Programação das amostras a cortar

Procedimento	Representação												
<p>Os <i>software's</i> TruTops Laser[®] ou TruTops Boost[®], auxiliam no <i>nesting</i> da chapa. Neste caso de estudo, são requeridos por cada tipo de material 36 amostras e, como tal, elas apresentam-se da forma representada.</p>	 <p>The image shows a software interface for laser cutting. On the left, there is a diagram of a rectangular sheet with a grid of small rectangles (samples) arranged in a pattern. On the right, there is a text box with the following information:</p> <ul style="list-style-type: none"> Tarefas de produção: FERRO_2MM_1 Programa principal: FERRO_2MM_1 Rpt.: 1 Materia-prima: 1.0038 Materia-prima: ST0M0200--- Pacote de produção, chapa em bruto: ST0M0200---0160x0750 ST0M0200---0160x0750 Dimensões: 160,00 x 750,00 x 2,00 mm Personalização mínima: 60,00 x 270,00 mm Pacote de produção, peso: 1,88 kg Pacote de produção, residuo: 93,25 % Duração: 00:01:00 [h:min:s] Comprimento corte: 2859,63 mm <p>Below this, there is a table with the following data:</p> <table border="1"> <thead> <tr> <th>#</th> <th>Nº do pedido:</th> <th>Nº das peças:</th> <th>GeoFile:</th> <th>Quantidade na chapa:</th> <th>un.</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>1</td> <td>OR11835</td> <td>15x10_06</td> <td>15x10_06.geo</td> <td>54</td> <td>54</td> </tr> </tbody> </table> <p>At the bottom, there are 'Instruções de fabricação' (Manufacturing Instructions) with various parameters and checkboxes.</p>	#	Nº do pedido:	Nº das peças:	GeoFile:	Quantidade na chapa:	un.	1	OR11835	15x10_06	15x10_06.geo	54	54
#	Nº do pedido:	Nº das peças:	GeoFile:	Quantidade na chapa:	un.								
1	OR11835	15x10_06	15x10_06.geo	54	54								
<p>O <i>software</i> tem ligação direta com o monitor de utilização do equipamento de corte laser e visualiza-se da mesma maneira, indicando-nos ainda o percurso a cortar, bem como os restantes parâmetros.</p>	 <p>The image shows the control panel of a laser cutting machine. The central monitor displays the software interface, showing a diagram of the cutting path on a sheet of material. The interface includes various parameters and controls. The machine's control panel features a numeric keypad, function keys, and a large yellow emergency stop button.</p>												

A chapa é disposta sob os garfos da mesa móvel e as amostras são cortadas da forma como está representada no monitor.



Antes de o corte acontecer, o utilizador de uma máquina verificar em primeiro lugar o estado da lente de foco, que é o componente de ligação entre o sistema de foco e a parte física onde ocorre o corte, sendo geradas partículas e fumos que vão ser absorvidos pela lente. Na Tabela 25 é possível observar os procedimentos a tomar.

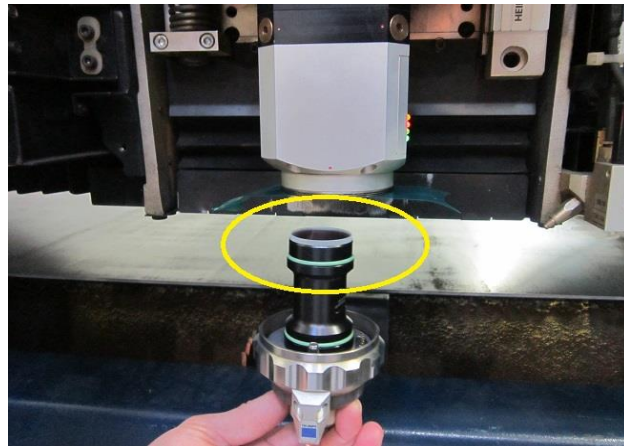
Tabela 25 - Procedimentos a ter em conta num equipamento de fonte laser

Procedimento	Representação
<p>Confere-se o estado da lente de foco no monitor do equipamento, observa-se em percentagem em que estado a lente se encontra. Abaixo da zona verde, deve-se proceder a uma limpeza da lente, de forma a evitar danos. Na figura representativa, o estado da lente está a 100%. Se tal se verificar não é necessário executar os procedimentos seguintes.</p>	

No caso de ser necessária uma limpeza, recorre-se então ao material fornecido pela marca apropriado para a situação, sendo que os componentes de limpeza são: um cotonete, uma lanterna e um líquido apropriado, podendo ainda ser usado ar para uma melhor remoção das partículas.



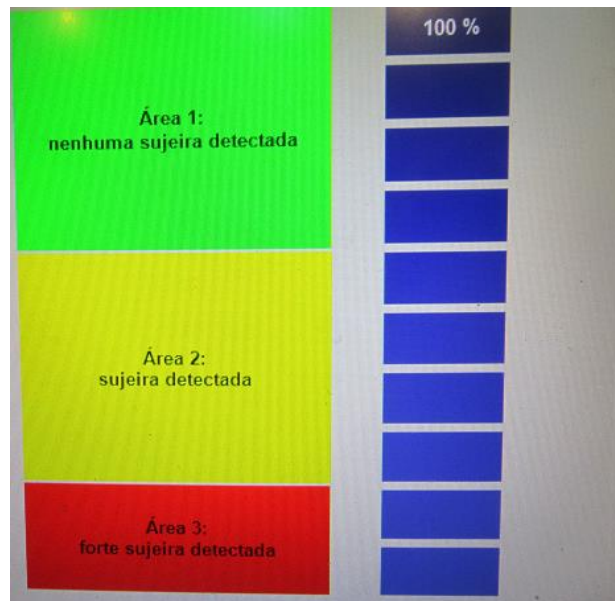
Procede-se cuidadosamente à remoção da lente de foco que se encontra disposta da forma representada, onde o conjunto correspondente ao bocal, e a lente de foco é extraída para fora da cabeça de corte.



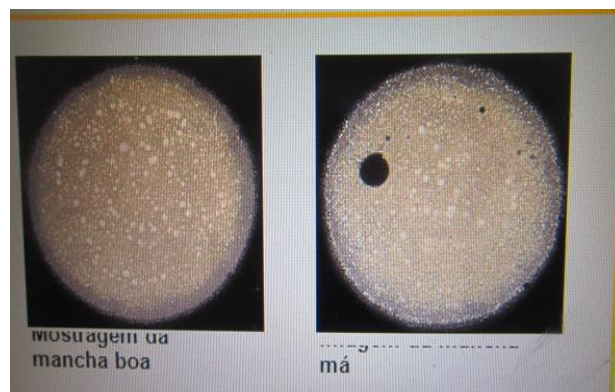
Terminada a remoção da lente de foco, coloca-se a lente sob iluminação de uma lanterna de modo a visualizar todas as partículas indesejadas. De seguida, com o auxílio de um cotonete e de líquido metanol, executa-se a limpeza. Introduce-se novamente a lente de foco da mesma forma como se retirou no conjunto do bocal e da lente, dentro da cabeça de corte.



Concluídas as etapas anteriores, é importante novamente consultar o indicador de sujidade, verificando-se o bom estado e operabilidade da lente de foco, que estando em perfeitas condições, apresenta-se na zona verde e com uma percentagem de 100% de limpeza.



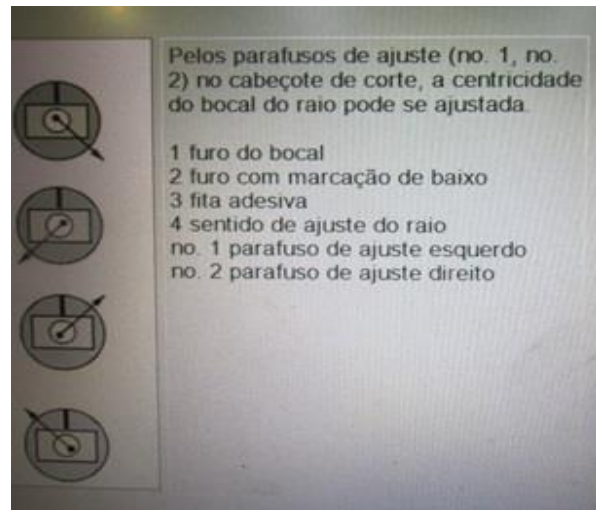
Faz-se um teste final à mancha que a lente produz, podendo surgir dois tipos de manchas, uma mancha boa livre de partículas indesejadas, já na outra mancha constata-se a presença de pontos negros, que indicam que a lente está suja ou até mesmo danificada.



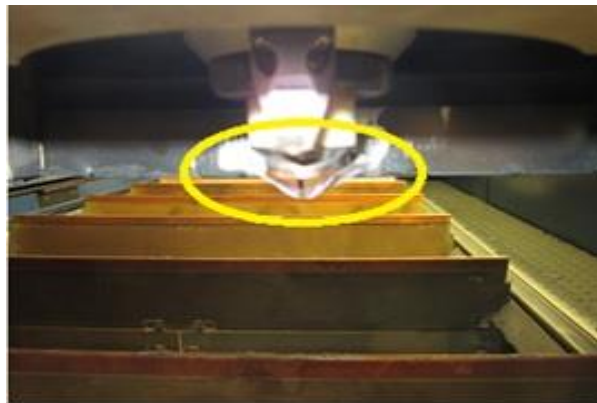
O procedimento habitual consiste em retirar o bocal e colocar papel fotográfico em zona habitual de corte que vai ser usado para produzir duas manchas repetidas. Observa-se que as duas manchas produzidas estão livres de pontos negros, indicando o bom estado e limpeza da lente.



O bocal, fazendo parte do conjunto retirado, sofre naturalmente desvios e deve ser também ele sujeito a testes de alinhamento. No monitor do equipamento, no separador do bocal, inicia-se então o teste.



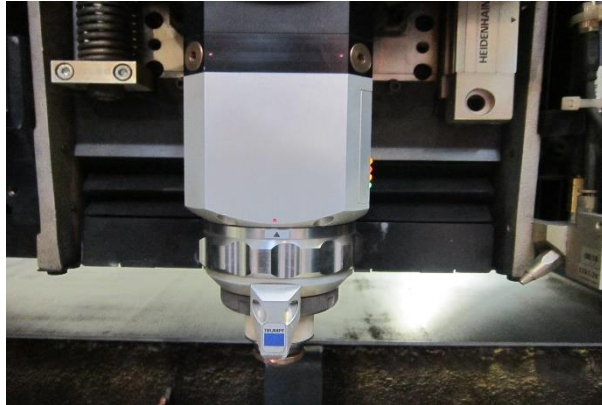
Sugere-se a colocação de fita adesiva em torno de todo o bocal e realizar-se um pequeno ponto de corte.



Realizado o pequeno ponto de corte na fita adesiva e, como apresenta dimensões dificilmente observadas a olho nu, é necessário o auxílio de uma lupa com ampliação capaz de observar a efetiva realização do corte.



Montados todos os componentes, está tudo pronto para o início do processo. As amostras são cortadas.



Após as amostras estarem cortadas, passa-se à fase das análises em laboratório. Na Tabela 26 estão descritas todas as etapas referentes a esta fase.

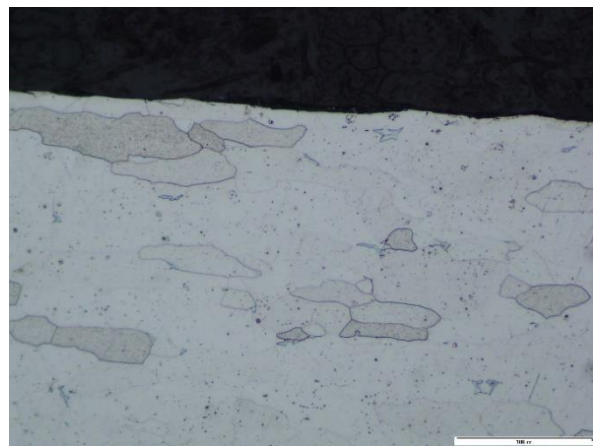
Tabela 26 - Fases de laboratório

Procedimento	Representação
<p>No laboratório de metalografia, as amostras são cortadas num disco e montadas da forma representada, para poderem ser lixadas e polidas. São montadas 3 amostras, que tenham parâmetros em comum, de forma a agilizar este processo.</p>	
<p>As amostras começam por uma fase de lixamento. São usadas três lixas distintas, com três tipos de grão (220, 500 e 1000). O tamanho do grão vai diminuindo, tornando-se menos intenso o lixamento.</p>	

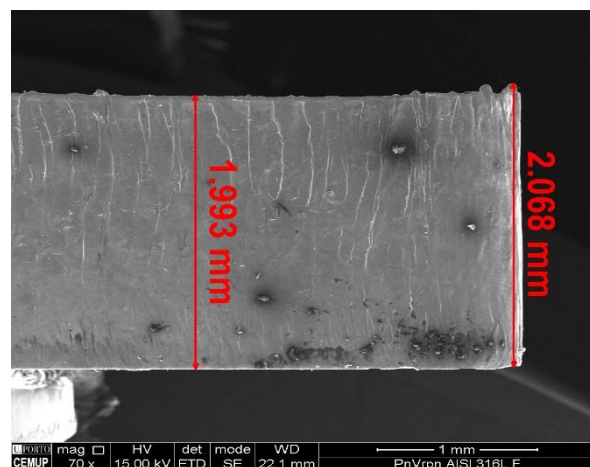
Seguidamente, as amostras após terem passado pelas fases necessárias de lixamento, executa-se o polimento. O polimento é feito em duas lixas, passando primeiro por uma lixa de 3 μm e no final por uma lixa de 1 μm .



Lixadas e polidas as amostras, as mesmas são atacadas quimicamente na *hotte* química e, de seguida, observadas no microscópio, para a obtenção das imagens das microestruturas. As amostras são analisadas e verifica-se se existem mudanças na microestrutura.



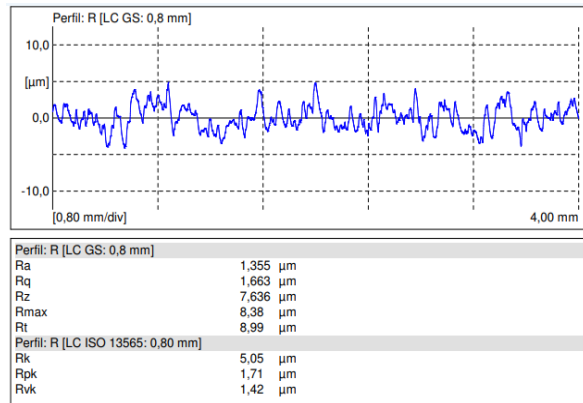
No CEMUP, mais concretamente com o SEM, mede-se o nível de rebarba de todas as amostras dos ensaios. Conforme a imagem, retira-se a medida da espessura média da amostra e a medida ao ponto mais alto acima da superfície, que criou rebarba. A diferença entre estes dois valores dá o valor do nível da rebarba.



No laboratório de tribologia, com um rugosímetro, as amostras são colocadas paralelamente ao apalpador, como está representado. O apalpador vai percorrer a espessura da amostra, onde faz cinco medições, automaticamente é feita uma média sem desvio padrão, que são os valores finais que se vão extrair.



Da medição executada anteriormente, obtém-se gráficos do perfil de rugosidade e valores dos parâmetros de rugosidade relativos a cada amostra. Extraem-se os valores principais de rugosidade R_a , R_z e R_{max} .



3.5 Ensaios

Os ensaios foram realizados no setor dos equipamentos de fonte laser, da empresa de acolhimento. As amostras foram obtidas com dois equipamentos de fonte laser distintos e dois tipos de material, como já tinha sido referido anteriormente.

Os parâmetros de corte selecionados obedeceram à tendência e aos factos já comprovados por outros autores. Foram então, escolhidos três parâmetros de corte laser, com variações de valor diferentes do recomendado pela marca do equipamento de fonte laser (ver Figura 47), neste caso a TRUMPF®.

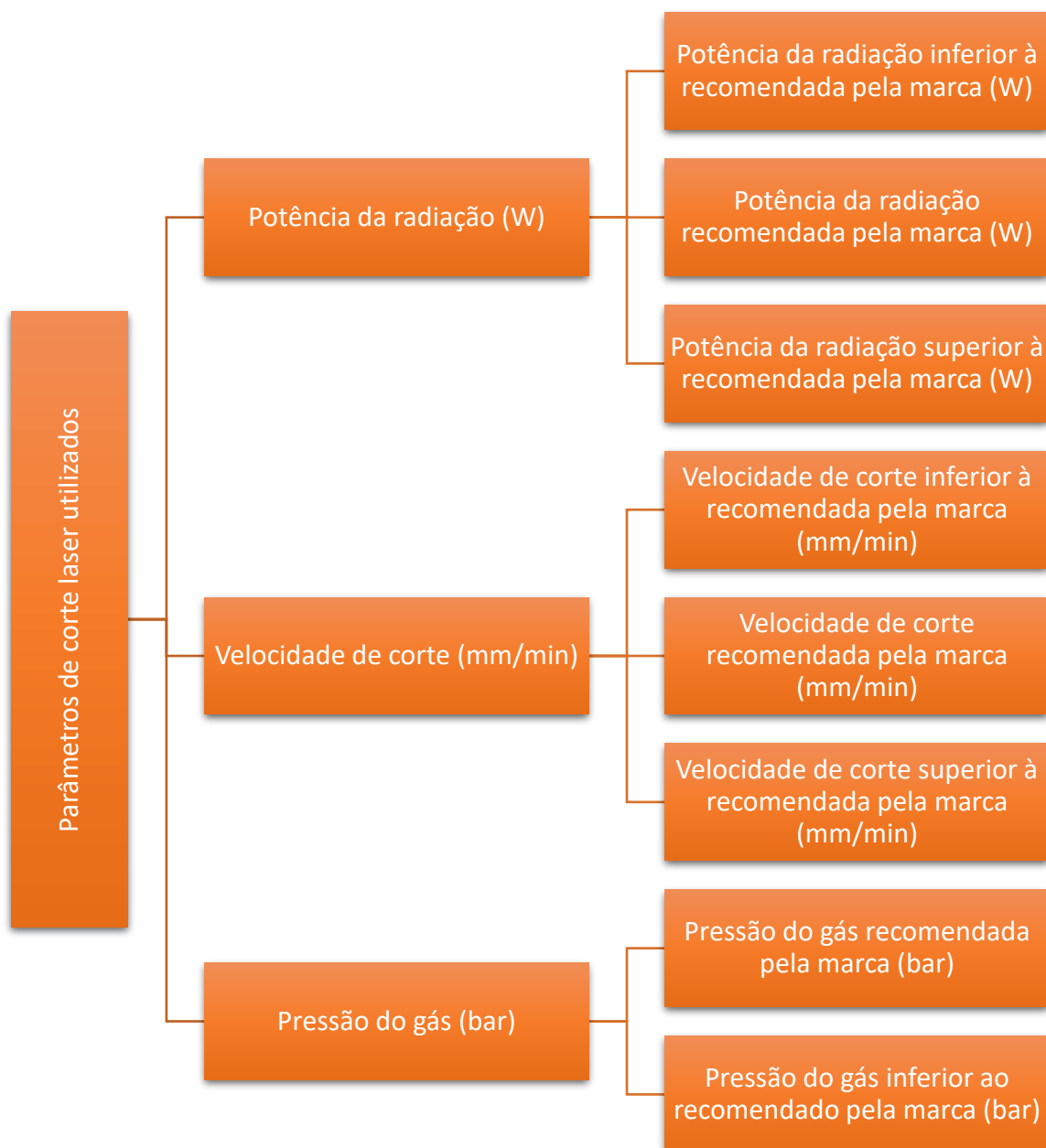


Figura 47 - Esquema da utilização dos parâmetros de corte laser

Com o conjunto de parâmetros selecionados e com as variações impostas, o plano de experiências a realizar distribui-se da forma representada pelas Tabelas 27, 28, 29 e 30.

Na Tabela 27 estão os ensaios das amostras AISI 316L no equipamento de fibra ótica. Utilizou-se uma distância focal de 7,90 mm. A potência de radiação, velocidade de corte e pressão do gás recomendadas pela marca são de: 4000 W, 20000 mm/min e 15 bar, respetivamente.

Tabela 27 - Ensaios a realizar no equipamento de fonte laser de fibra ótica, do material AISI 316L

AISI 316L (2 mm) – Equipamento de fibra ótica			
Amostra	Potência (W)	Velocidade (mm/min)	Pressão (bar)
PnVrpn	4000	10000	15
PnVnpn	4000	20000	15
PnVhpn	4000	25000	15
PrVrpn	3500	10000	15
PrVnpn	3500	20000	15
PrVhpn	3500	25000	15
PrrVrpn	1500	10000	15
PrrVnpn	1500	20000	15
PrrVhpn	1500	25000	15
PnVrpr	4000	10000	7
PnVnpr	4000	20000	7
PnVhpr	4000	25000	7
PrVrpr	3500	10000	7
PrVnpr	3500	20000	7
PrVhpr	3500	25000	7
PrrVrpr	1500	10000	7
PrrVnpr	1500	20000	7
PrrVhpr	1500	25000	7

Na Tabela 28 estão os ensaios das amostras St12 no equipamento de fibra ótica. Utilizou-se também uma distância focal de 7,90 mm. Neste caso, a potência de radiação, velocidade de corte e pressão do gás recomendadas pela marca são de: 1000 W, 5500 mm/min e 2,8 bar, respetivamente.

Tabela 28 - Ensaios a realizar no equipamento de fonte laser de fibra ótica, do material St12

St12 (2 mm) - Equipamento de fibra ótica			
Amostra	Potência (W)	Velocidade (mm/min)	Pressão (bar)
PnVrpn	1000	2500	2,8
PnVnpn	1000	5500	2,8
PnVhpn	1000	7500	2,8
PrVrpn	700	2500	2,8
PrVnpn	700	5500	2,8
PrVhpn	700	7500	2,8
PrrVrpn	300	2500	2,8
PrrVnpn	300	5500	2,8
PrrVhpn	300	7500	2,8
PnVrpr	1000	2500	1,2
PnVnpr	1000	5500	1,2
PnVhpr	1000	7500	1,2
PrVrpr	700	2500	1,2
PrVnpr	700	5500	1,2
PrVhpr	700	7500	1,2
PrrVrpr	300	2500	1,2
PrrVnpr	300	5500	1,2
PrrVhpr	300	7500	1,2

Na Tabela 29 estão os ensaios das amostras AISI 316L no equipamento de CO₂. Utilizou-se uma distância focal de 7,50 mm. Sendo que, a potência de radiação, velocidade de corte e pressão do gás recomendadas pela marca são de: 3200 W, 5300 mm/min e 15 bar, respetivamente.

Tabela 29 - Ensaios a realizar no equipamento de fonte laser CO₂, do material AISI 316L

AISI 316L (2 mm) – Equipamento de CO₂			
Amostra	Potência (W)	Velocidade (mm/min)	Pressão (bar)
PnVrpn	3200	4300	15

PnVnpn	3200	5300	15
PnVhpn	3200	6300	15
PrVrpn	3000	4300	15
PrVnpn	3000	5300	15
PrVhpn	3000	6300	15
PrrVrpn	2800	4300	15
PrrVnpn	2800	5300	15
PrrVhpn	2800	6300	15
PnVrpr	3200	4300	10
PnVnpr	3200	5300	10
PnVhpr	3200	6300	10
PrVrpr	3000	4300	10
PrVnpr	3000	5300	10
PrVhpr	3000	6300	10
PrrVrpr	2800	4300	10
PrrVnpr	2800	5300	10
PrrVhpr	2800	6300	10

Na Tabela 30 estão os ensaios das amostras St12 no equipamento de CO₂. Utilizou-se, igualmente ao caso anterior, uma distância focal de 7,50 mm. Neste caso, a potência de radiação, velocidade de corte e pressão do gás recomendadas pela marca são de: 1400 W, 5000 mm/min e 1,2 bar, respectivamente.

Tabela 30 - Ensaios a realizar no equipamento de fonte laser CO₂, do material St12

St12 (2 mm) - Equipamento de CO₂

Amostra	Potência (W)	Velocidade (mm/min)	Pressão (bar)
PnVrpn	1400	3000	1,2
PnVnpn	1400	5000	1,2
PnVhpn	1400	6500	1,2
PrVrpn	1000	3000	1,2
PrVnpn	1000	5000	1,2
PrVhpn	1000	6500	1,2
PrrVrpn	800	3000	1,2
PrrVnpn	800	5000	1,2
PrrVhpn	800	6500	1,2
PnVrpr	1400	3000	0,8
PnVnpr	1400	5000	0,8
PnVhpr	1400	6500	0,8

PrVrpr	1000	3000	0,8
PrVnpr	1000	5000	0,8
PrVhpr	1000	6500	0,8
PrrVrpr	800	3000	0,8
PrrVnpr	800	5000	0,8
PrrVhpr	800	6500	0,8

3.6 Análise das microestruturas

Após a realização dos ensaios, as amostras passaram por processos de lixamento e polimento, como foi referido anteriormente. Para observar no microscópio e assim analisar a microestrutura, nem todas as amostras foram submetidas a ataque químico, apenas aquelas que apresentavam as seguintes características:

- Amostras sujeitas aos parâmetros de corte laser com os valores de potência mais elevados e mais baixos;
- Amostras com superfície visivelmente mais degradada, com rebarba e textura mais áspera;
- O mesmo número de amostras de AISI 316L e St12, em corte laser de fibra ótica e corte laser CO₂.

Foram então selecionadas, de acordo com a nomenclatura utilizada, as seguintes amostras:

- AISI 316L – corte laser CO₂: PrrVnprn, PrrVhprn, PrrVrprn, PnVnprn, PnVhprn, PnVrprn;
- AISI 316L – corte laser de fibra ótica: PrrVnprn, PrrVhprn, PrrVrprn, PnVnprn, PnVhprn, PnVrprn;
- St12 – corte laser CO₂: PrrVnprn, PrrVhprn, PrrVrprn, PnVnprn, PnVhprn, PnVrprn;
- St12 – corte laser de fibra ótica: PrrVnprn, PrrVhprn, PrrVrprn, PnVnprn, PnVhprn, PnVrprn;

Começou-se por analisar no microscópio, a microestrutura das amostras de cada tipo de material sem o corte laser. Na Figura 48 está representada a microestrutura típica ferrítico-perlítica relativa ao material St12, destacando-se o seguinte:

- A forte presença de ferrite, através das zonas claras da imagem;
- A presença de pequenos pontos negros, que representam inclusões.

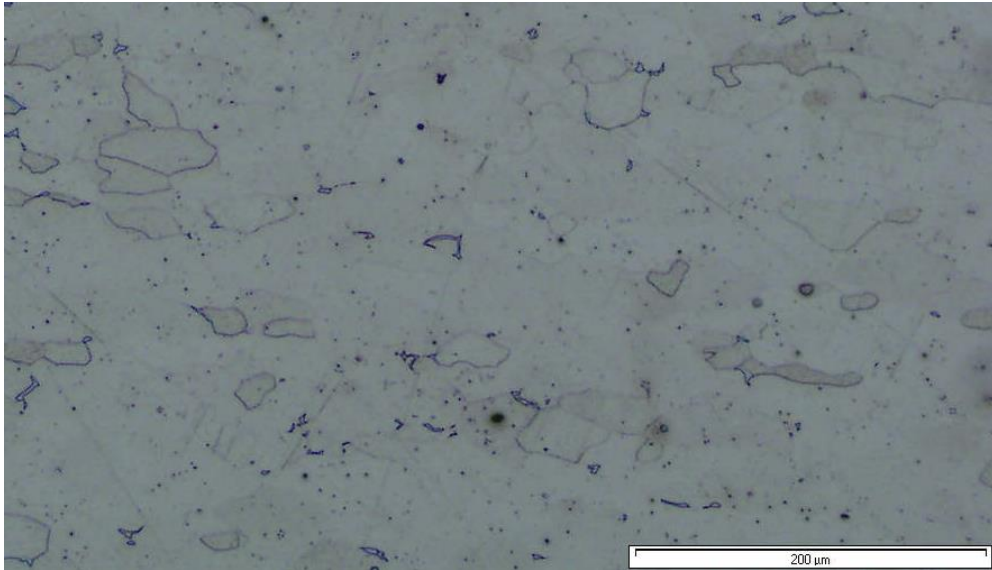


Figura 48 - Microestrutura do St12 sem corte laser

Posteriormente, analisou-se as amostras do corte laser, concluindo-se que:

- As microestruturas observadas das amostras de St12, no corte laser de fibra ótica e nos diferentes parâmetros testados, quando comparadas com a microestrutura da amostra padrão sem o corte laser, não revelam mudanças (ver Figura 49);
- Não existem mudanças na microestrutura, justificando-se pela intensidade de potência aplicada nas amostras não ter o tempo suficiente para aumentar a temperatura necessária, para promover mudanças estruturais neste aço.

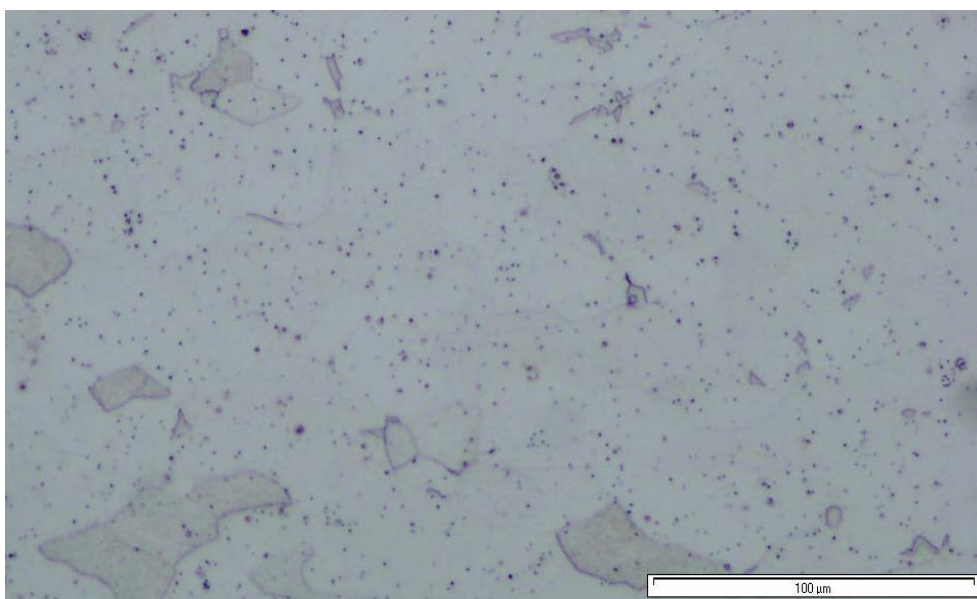


Figura 49 - Amostra de corte laser do tipo fibra ótica, com a potência de radiação recomendada

Ainda nas amostras do material St12, mas no tipo de laser CO₂, realçam-se os seguintes aspetos:

- No corte laser CO₂, nos diferentes parâmetros testados, as microestruturas das amostras observadas voltam a não apresentar diferenças, relativamente à microestrutura padrão do St12 (ver Figura 50);
- Neste caso, a potência de radiação foi diminuída duas vezes. Se no caso anterior em que a potência é a recomendada, ou seja, a mais alta de todas e não promoveu mudanças na microestrutura, nesta situação não será expectável qualquer tipo de diferença.

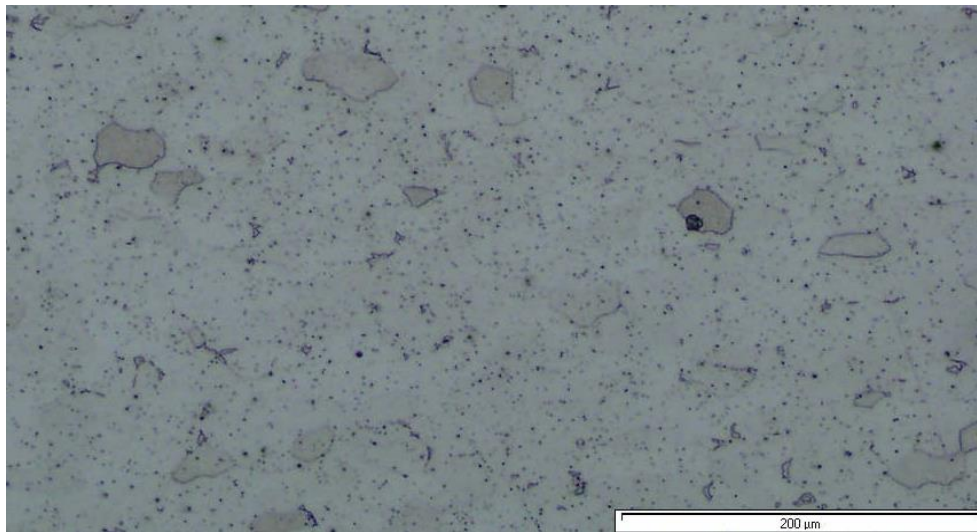


Figura 50 - Amostra de corte laser do tipo CO₂, com a potência de radiação duas vezes reduzida

Após as amostras do material St12 estarem analisadas, observou-se as amostras do material AISI 316L. A Figura 51 é a representação de uma microestrutura típica deste aço inoxidável, em que se destaca o seguinte:

- A presença de grãos com a forma de polígonos de austenite;
- ~~Uma~~ Uma microestrutura regular, mas sem ser vincadamente austenítica;
- A existência de uma pequena quantidade de ferrite (zonas mais escuras), dispersas;
- A microestrutura observada, é a típica deste tipo de aços inoxidáveis pertencentes à categoria dos aços inoxidáveis austeníticos;
- A microestrutura observada apresenta as fases bem definidas e delimitadas, que distinguem este tipo de aços inoxidáveis.

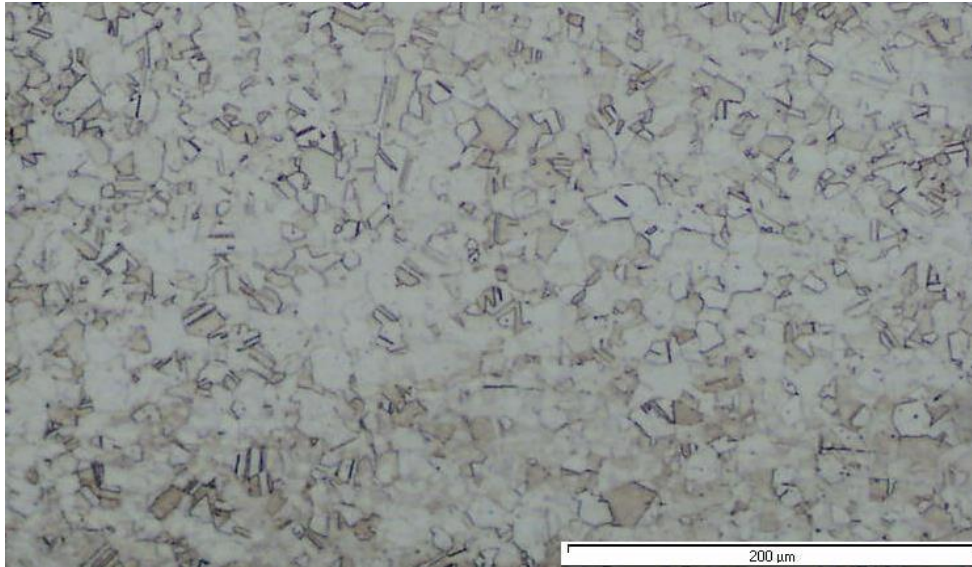


Figura 51 - Microestrutura do AISI 316L sem corte laser

De seguida, analisou-se as amostras do corte laser, concluindo-se que:

- As microestruturas observadas das amostras de AISI 316L, no corte laser de fibra ótica e nos diferentes parâmetros testados, quando comparadas com a microestrutura da amostra padrão sem o corte laser, não revelam mudanças (ver Figura 52);
- Nesta amostra, a potência utilizada foi duas vezes inferior ao recomendado pela marca. Da mesma forma ao que se observou no material de St12, neste caso não seria de esperar também alterações na microestrutura, visto que a potência é pouca e com tempo insuficiente para promover mudanças na microestrutura.

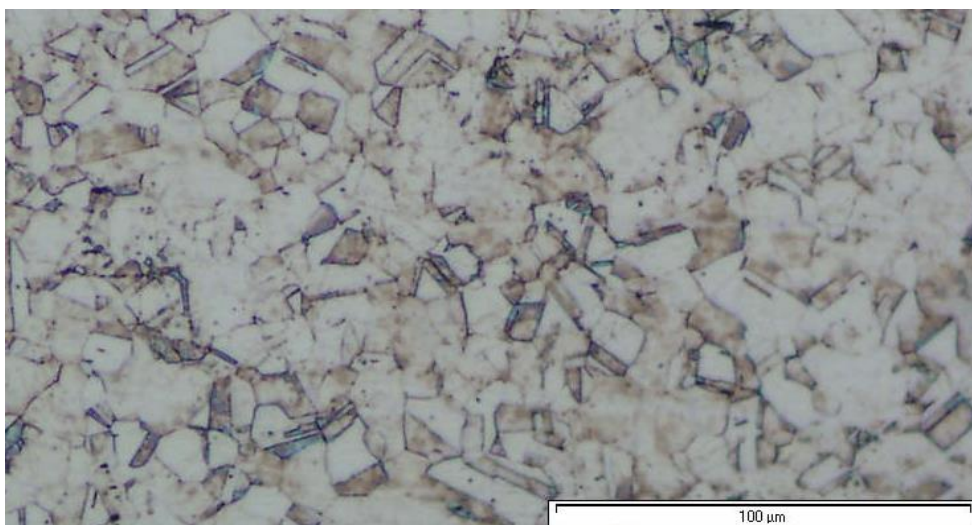


Figura 52 - Amostra de corte laser do tipo fibra ótica, com potência de radiação duas vezes reduzida

Por fim, foram analisadas as amostras do AISI 316L no tipo de laser CO₂, destacando-se o seguinte:

- No corte laser CO₂, nos diferentes parâmetros testados, as microestruturas das amostras observadas voltam a não apresentar diferenças, relativamente à microestrutura padrão (ver Figura 53);
- Neste caso, a potência de radiação é a maior, comparativamente às outras amostras. É a potência recomendada pela marca e não se regista qualquer mudança na microestrutura, o que nos indica que a temperatura não atingiu um patamar suficientemente elevado para promover mudanças ao nível da microestrutura.

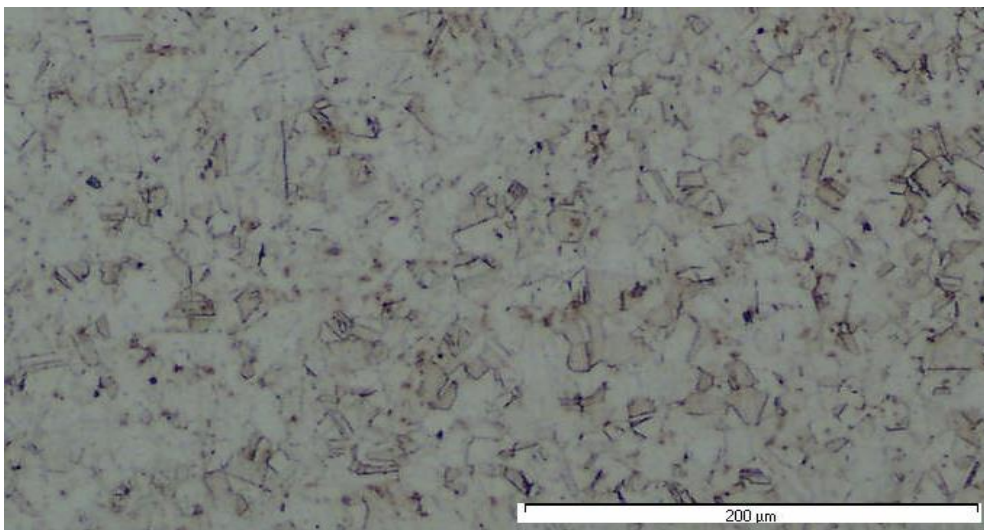


Figura 53 - Amostra de corte laser do tipo CO₂, com potência de radiação recomendada

Depois de analisadas as microestruturas dos diferentes materiais, nos vários parâmetros de corte laser e nos dois tipos de laser, concluiu-se que:

- A potência de radiação é o parâmetro mais abordado ao longo desta análise, por ser o melhor indicador da densidade de energia;
- Independentemente do tipo de material, as potências máximas disponibilizadas pelos dois tipos de laser, não são suficientes para promover mudanças nas microestruturas;
- As velocidades de corte utilizadas que, juntamente com a potência de radiação, têm de respeitar uma proporção, para que o corte seja efetuado. Neste contexto, nunca poderão ser efetuadas mudanças na microestrutura.
- Como não houve mudanças nas microestruturas nos casos das potências mais elevadas ou mais baixas, optou-se por não analisar as amostras com as potências intermédias.

3.7 Análise da superfície cortada das amostras

3.7.1 Análise da rebarba

A análise da superfície cortada das amostras, relativamente à rebarba, realizou-se com as imagens obtidas através do SEM.

A rebarba é um defeito criado nas peças durante o corte laser. Na Figura 54 apresenta-se uma amostra com este tipo de defeito, sendo visível o material que se criou para além da superfície, neste caso de baixo para cima. Designa-se rebarba como um resíduo criado na passagem do feixe laser, arrastando material que não fundiu e que se depositou nas arestas das superfícies cortadas. Esta deposição de material está representada na Figura 55, onde é possível observar os depósitos criados pelo arrastamento durante o corte laser.

Destacam-se alguns fatores, que estão diretamente relacionados com a criação da rebarba:

- A seleção incorreta dos parâmetros de corte laser;
- A falta de manutenção do equipamento de fonte laser, nomeadamente a limpeza que deve ser constante das lentes de foco;
- O mau posicionamento do sistema de foco (distância focal com valor incorreto).

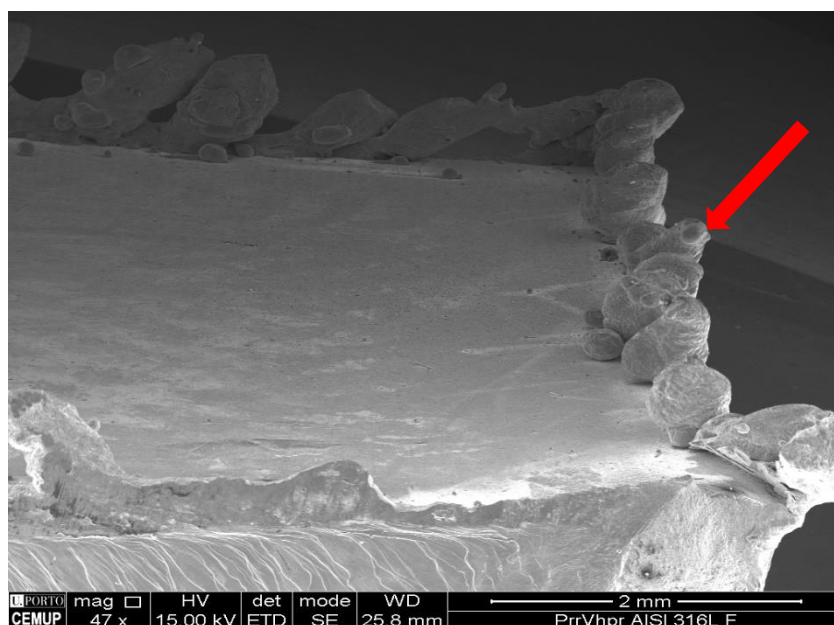


Figura 54 - Amostra de corte laser com rebarba

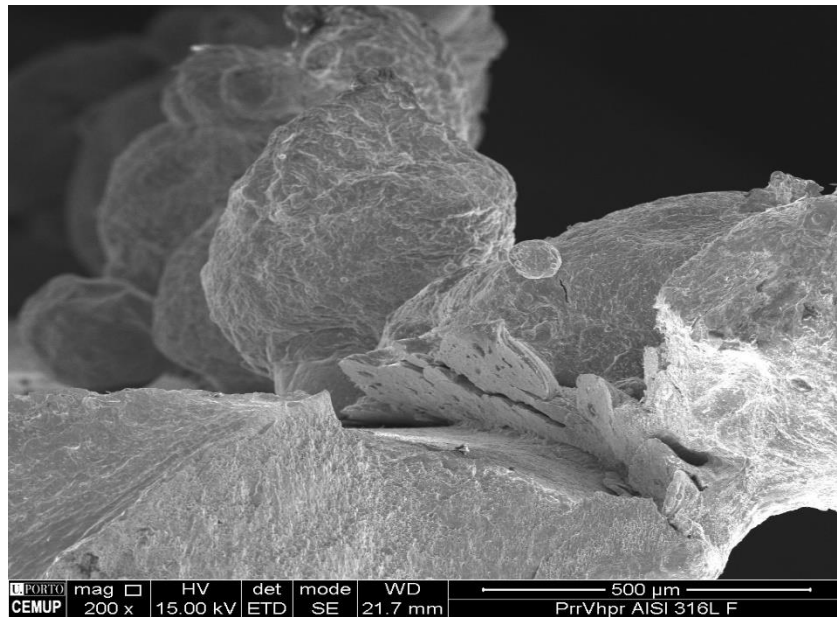


Figura 55 - Pormenor da formação da rebarba numa amostra de corte laser do tipo fibra ótica

A formação de rebarba constitui um problema para as empresas, pois envolve maiores gastos para garantir a qualidade dos produtos obtidos do corte laser. A rebarba é reprovada pela maioria dos clientes, muitos deles têm acordado que os produtos não podem ter arestas vivas, muito menos a presença de um defeito como a rebarba. Sendo a rebarba um defeito que diariamente está presente em empresas com equipamentos de fonte laser, por descuido dos operadores, as empresas acabam por recorrer a máquinas e pessoas para contornar este tipo de problema, que se traduz numa tabela adicional de custos. Na Tabela 31 está uma tabela de custos da empresa de acolhimento, para eliminar este tipo de defeito.

Tabela 31 - Tabela de custos associados à eliminação da rebarba

Quantidade de pessoas	Custos (salários)	Quantidade de máquinas	Custos (gastos de energia)	Custos totais por mês
3	600 € X 3 = 1800 €/mês	3 rebarbadoras	0,16 € X 8 h + 0,52 € = 1,8 € X 3 = 5,4 €/dia	1800 €
		1 máquina de rebarba (chapas estreitas)	0,16 € X 8 h + 0,52 € = 1,8 €/dia	(salários) + 5,4 €/dia X 23 dias úteis + 1,8 €/dia X 23 dias úteis + 1,8 €/dia X 23 dias úteis
		1 máquina de rebarba (chapas finas)	0,16 € X 8 h + 0,52 € = 1,8 €/dia	= 2007 €

Os custos detalhados na Tabela 31 podiam ser minimizados, ou até mesmo eliminados, se as empresas que trabalham com este tipo de equipamentos tomassem medidas de formação contínua para os operadores e incutissem uma conduta de consciencialização para os custos deste defeito, que estão diretamente relacionados com a seleção incorreta dos parâmetros de corte laser e da falta de cuidado com o equipamento de fonte laser.

A Figura 56 é um exemplo de uma amostra de corte laser sem formação de rebarba. Comprova-se a inexistência de rebarba, pois não se observa os resíduos de material criados de baixo para cima na superfície de corte.

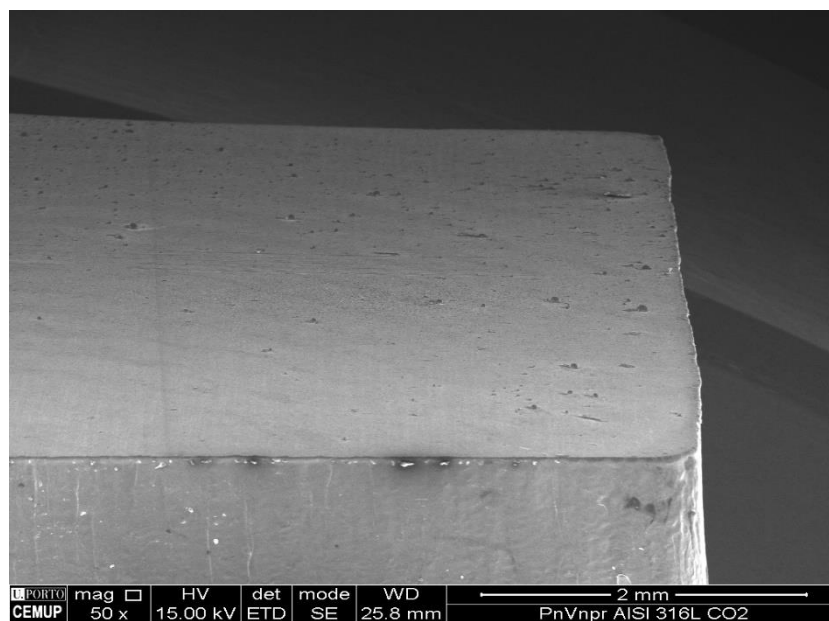


Figura 56 - Amostra de corte laser sem rebarba

Efeitos dos diferentes valores de potência da radiação

Os valores da potência de radiação variaram da seguinte forma:

- Potência de radiação recomendada pela marca (Pn);
- Potência de radiação reduzida uma vez (Pr);
- Potência de radiação reduzida duas vezes (Prr).

No momento da recolha das amostras, constatou-se uma tendência no aumento da rebarba, cada vez que se baixava a potência de radiação. Nas próximas imagens, comprova-se o aumento do defeito da rebarba, que se torna crítico quando a potência da radiação atinge níveis mais baixos.

A potência da radiação recomendada pela marca é a mais alta de todas, sendo um parâmetro que normalmente os operadores dos equipamentos não gostam de alterar.

Nas Figuras 57 e 58, apresentam-se as medições efetuadas ao nível de rebarba das amostras cortadas nos lasers do tipo CO₂ e fibra ótica, respectivamente, em AISI 316 L, com a potência de radiação recomendada (Pn). Estas amostras apresentam-se praticamente todas elas livres de rebarba, com valores baixos de nível de rebarba.

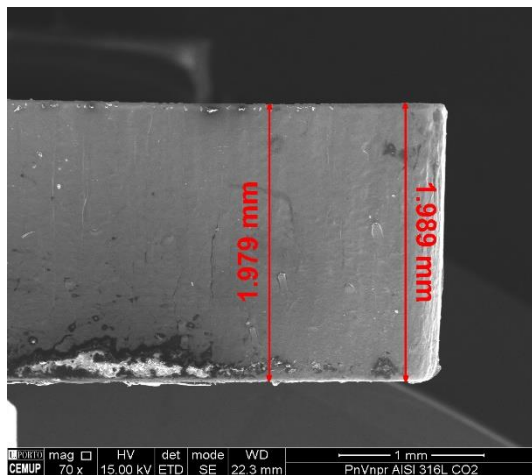


Figura 57 - Amostra de AISI 316L, cortada no laser do tipo CO₂, com Pn

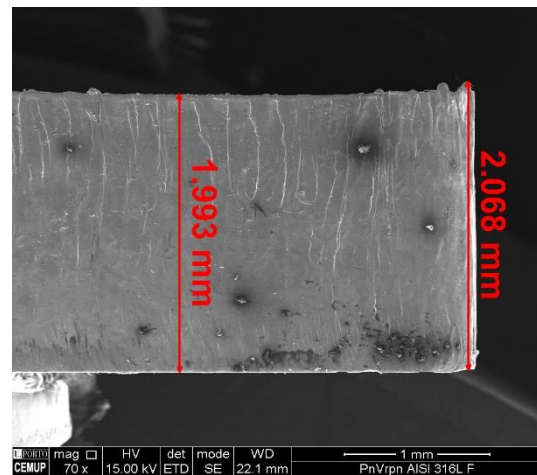


Figura 58 – Amostra de AISI 316L, cortada no laser do tipo fibra ótica, com Pn

Nas Figuras 59 e 60, apresentam-se as medições efetuadas ao nível de rebarba das amostras cortadas nos lasers do tipo CO₂ e fibra ótica, respectivamente, em St12, com a potência de radiação recomendada (Pn). As amostras com este tipo de potência, continuam a apresentar uma superfície com rebarba moderada, ou até inexistente.

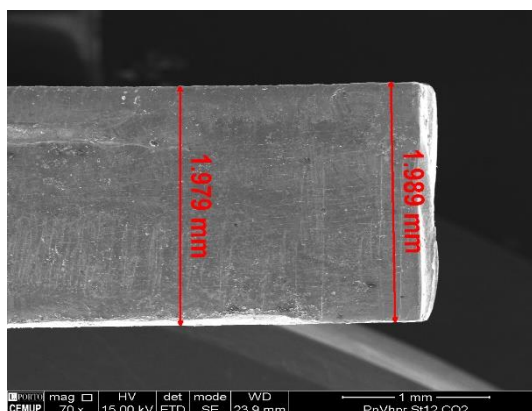


Figura 59 - Amostra de St12, cortada no laser do tipo CO₂, com Pn

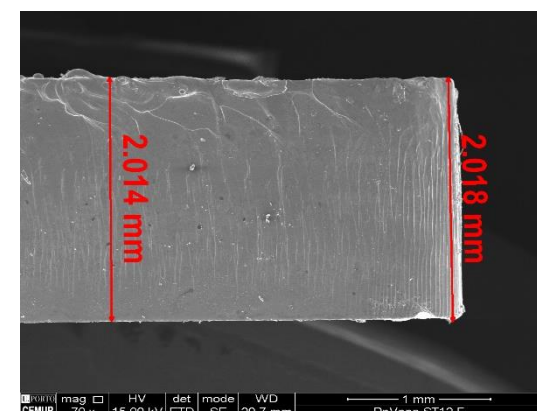


Figura 60 - Amostra de St12, cortada no laser do tipo fibra ótica, com Pn

Mudou-se a potência de radiação para um nível abaixo da potência da radiação recomendada pela marca (Pr). Nas Figuras 61 e 62, apresentam-se as medições efetuadas ao nível de rebarba das amostras cortadas nos lasers do tipo CO₂ e fibra ótica, respetivamente, em AISI 316L, com a potência reduzida uma vez (Pr). Estas amostras apresentam níveis de rebarba superiores aqueles que foram analisados com a potência da radiação recomendada (Pn).

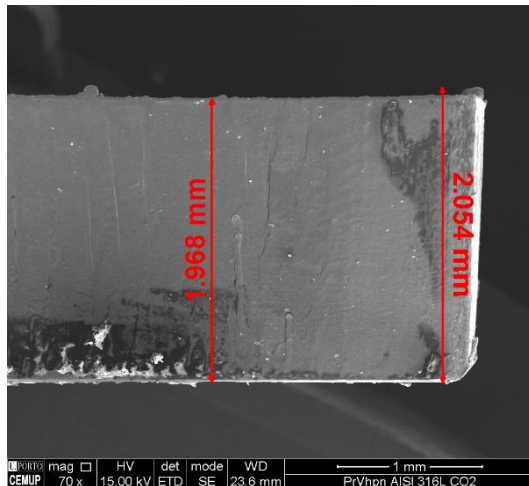


Figura 61 - Amostra de AISI 316L, cortada no laser do tipo CO₂, com Pr

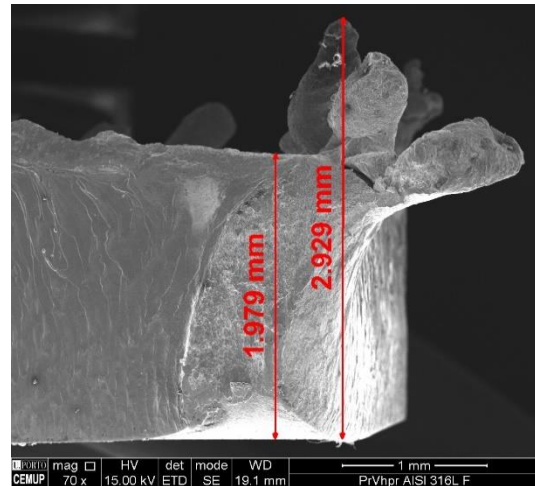


Figura 62 - Amostra de AISI 316L, cortada no laser do tipo fibra ótica, com Pr

Nas Figuras 63 e 64, apresentam-se as medições efetuadas ao nível de rebarba das amostras cortadas nos lasers do tipo CO₂ e fibra ótica, respetivamente, em St12, com a potência reduzida uma vez (Pr). Mesmo mudando de material, as amostras com este tipo de potência, continuam a apresentar um nível de rebarba considerável.

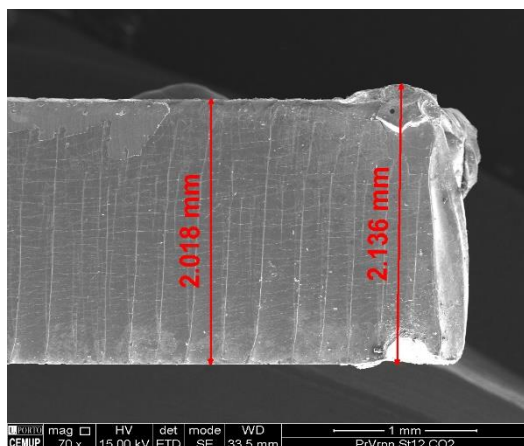


Figura 63 - Amostra de St12, cortada no laser do tipo CO₂, com Pr

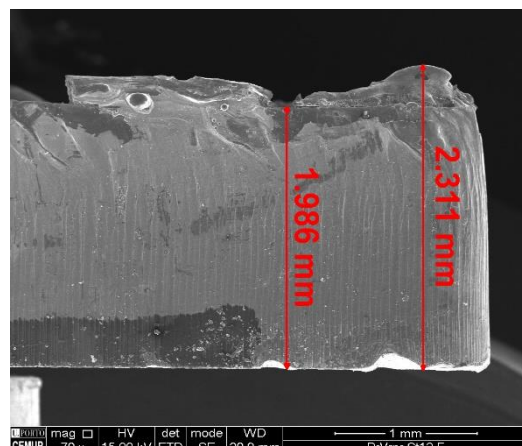


Figura 64 - Amostra de St12, cortada no laser do tipo fibra ótica, com Pr

Mudou-se, novamente a potência de radiação para um nível ainda mais abaixo da potência da radiação recomendada pela marca (Prr). Nas Figuras 65 e 66, apresentam-se as medições efetuadas ao nível de rebarba das amostras cortadas nos lasers do tipo CO₂ e fibra ótica, respectivamente, em AISI 316L, com a potência reduzida duas vezes (Prr). Estas amostras apresentam os casos mais extremos de nível de rebarba, com valores bem superiores àqueles que foram analisados com a potência da radiação recomendada (Pn) e com a potência de radiação reduzida uma vez (Pr).

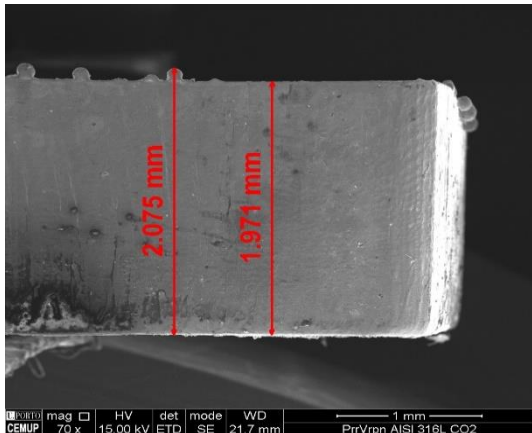


Figura 65 - Amostra de AISI 316L, cortada no laser do tipo CO₂, com Prr

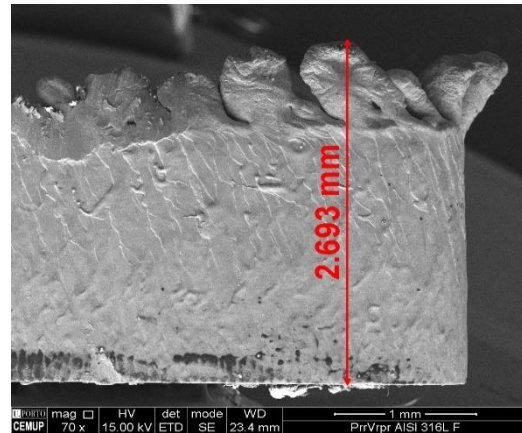


Figura 66 - Amostra de AISI 316L, cortada no laser do tipo fibra ótica, com Prr

Nas Figuras 67 e 68, apresentam-se as medições efetuadas ao nível de rebarba das amostras cortadas nos lasers do tipo CO₂ e fibra ótica, respectivamente, em St12, com a potência reduzida duas vezes (Prr). Estas amostras, com este tipo de potência, continuam a apresentar um nível de rebarba grande, com valores bem superiores àqueles que foram analisados com a potência de radiação recomendada (Pn) e mesmo com a potência de radiação reduzida uma vez (Pr).

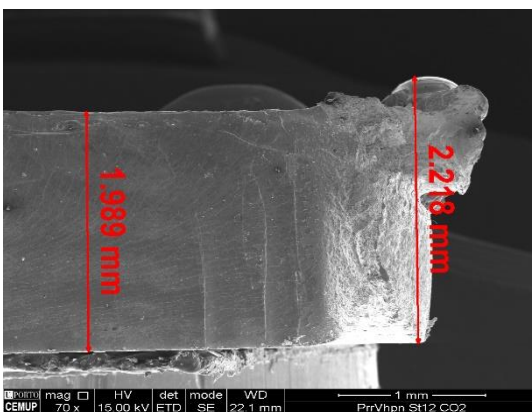


Figura 67 - Amostra de St12, cortada no laser do tipo CO₂, com Prr

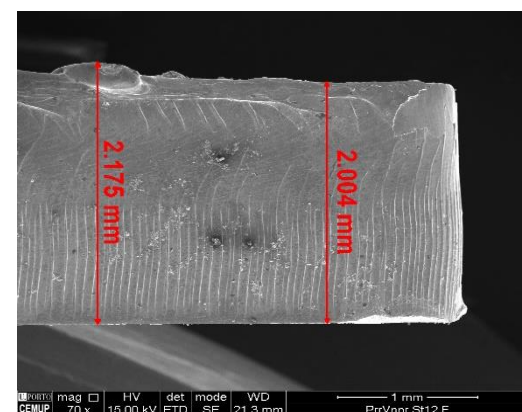


Figura 68 - Amostra de St12, cortada no laser do tipo fibra ótica, com Prr

Efeitos dos diferentes valores da velocidade de corte

Os valores da velocidade de corte variaram da seguinte forma:

- Velocidade de corte recomendada pela marca (V_n);
- Velocidade de corte mais baixa (V_r);
- Velocidade de corte mais alta (V_h).

A velocidade de corte também contribuiu para a criação de rebarba, embora neste parâmetro de corte laser não seja tão notória a diferença. As amostras terão de ser analisadas tendo em conta a potência de radiação usada, estes dois parâmetros estão diretamente relacionados, por isso não pode ser feita uma análise isolada, como foi feito anteriormente com a potência da radiação.

Apresentam-se as medições efetuadas ao nível de rebarba das amostras cortadas com a velocidade de corte recomendada (V_n) e com potência de radiação recomendada (P_n). Na Figura 69 está uma amostra de AISI 316L, cortada no laser do tipo CO₂. Já na Figura 70 está uma amostra de St12, cortada no laser do tipo fibra ótica. Nestas condições, independentemente do tipo de material e laser, as amostras apresentam um nível de rebarba mais baixo ou moderado.

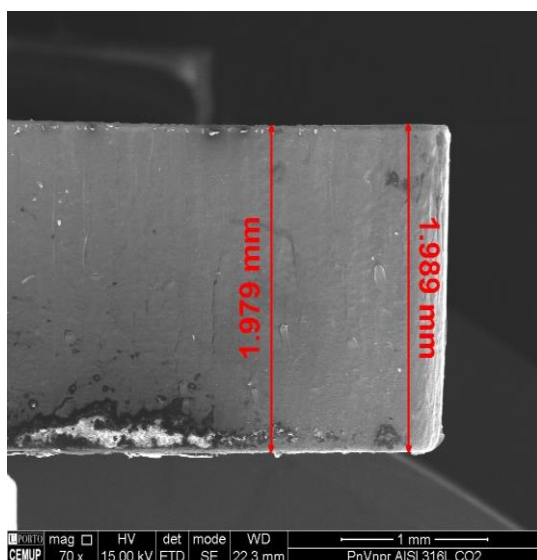


Figura 69 - Amostra de AISI 316L, cortada no laser do tipo CO₂, com P_n e V_n

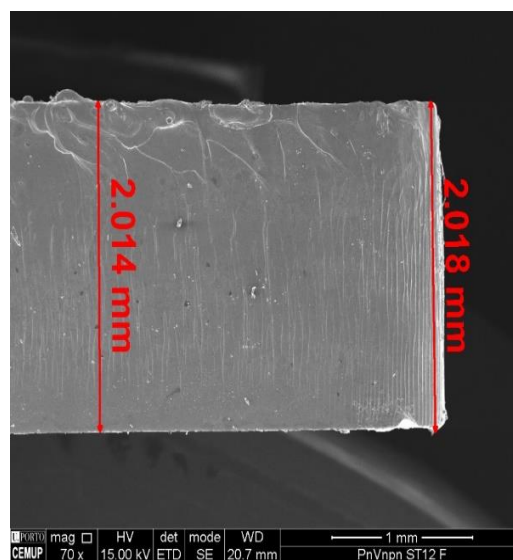


Figura 70 - Amostra de St12, cortada no laser do tipo fibra ótica, com P_n e V_n

Mantendo a velocidade recomendada (V_n), mas alterando a potência de radiação para um valor mais reduzido (P_r), o nível de rebarba aumenta. Na Figura 71, observam-se os efeitos causados por uma redução da potência (P_r), mas mantendo a velocidade

recomendada (V_n), numa amostra de AISI 316L, cortada no laser do tipo fibra ótica. Comprova-se a grande relação que existe entre estes dois parâmetros de corte laser, pois alterando um valor, o outro tem também de mudar, para as características do feixe laser se manterem.

Ainda com a velocidade recomendada (V_n), mas alterando de novo a potência da radiação para um valor ainda mais reduzido (P_{rr}), a rebarba valores superiores. Na Figura 72, observam-se os efeitos causados por uma potência reduzida duas vezes (P_{rr}), mas mantendo a velocidade recomendada (V_n), numa amostra de St12, cortada no laser do tipo fibra ótica. Em continuidade com o que se viu anteriormente, uma nova redução da potência, com a velocidade a manter-se igual, a amostra continua a patentear defeitos.



Figura 71 - Amostra de AISI 316L, cortada no laser do tipo fibra ótica, com P_r e V_n

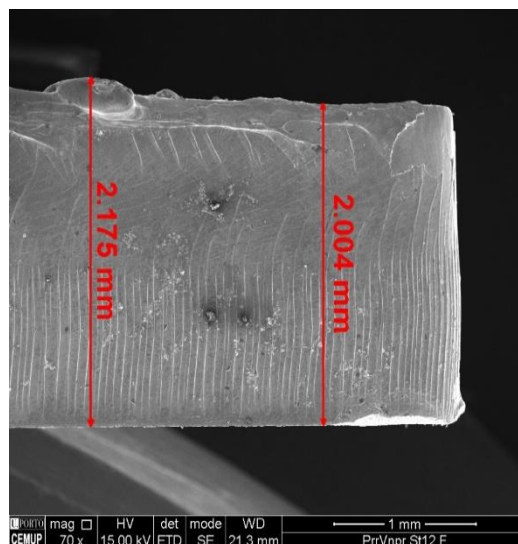


Figura 72 - Amostra de St12, cortada no laser do tipo fibra ótica, com P_{rr} e V_n

Com uma velocidade menor (V_r) e com uma potência recomendada (P_n), observa-se um nível de rebarba superior. Na Figura 73, está uma amostra em St12 cortada no laser do tipo fibra ótica. Observam-se claramente as irregularidades, causadas pelo abaixamento da velocidade de corte, provocando um arrastamento do material que danifica, neste caso, a amostra.

Na Figura 74, está outra amostra cortada com os mesmos parâmetros de corte laser, mas no material AISI 316L e no tipo de laser CO_2 , mantendo-se a tendência de aumento da rebarba.

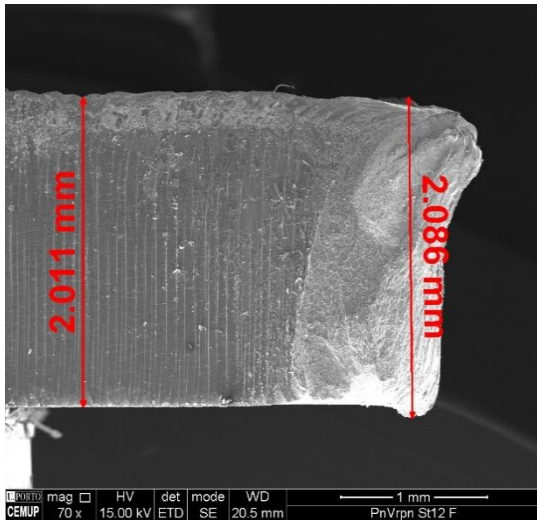


Figura 73 - Amostra de St12, cortada no laser do tipo fibra ótica, com Pn e Vr

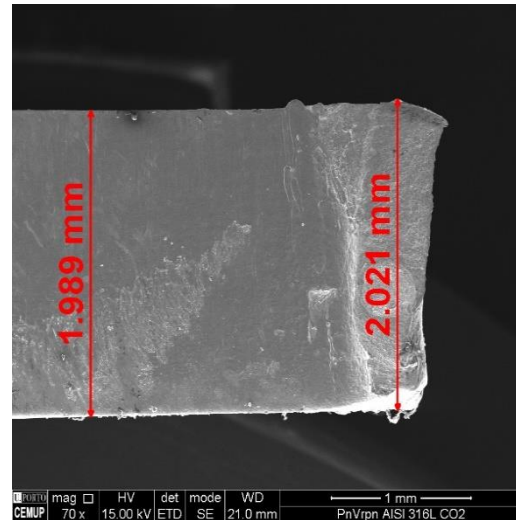


Figura 74 - Amostra de AISI 316L, cortada no laser do tipo CO₂, com Pn e Vr

Para constatar o que foi dito anteriormente, sobre a forte relação entre a potência de radiação e a velocidade de corte, na Figura 75 está representada uma amostra em St12, cortada no laser do tipo fibra ótica, com uma potência de radiação reduzida (Pr) e com a velocidade reduzida (Vr).

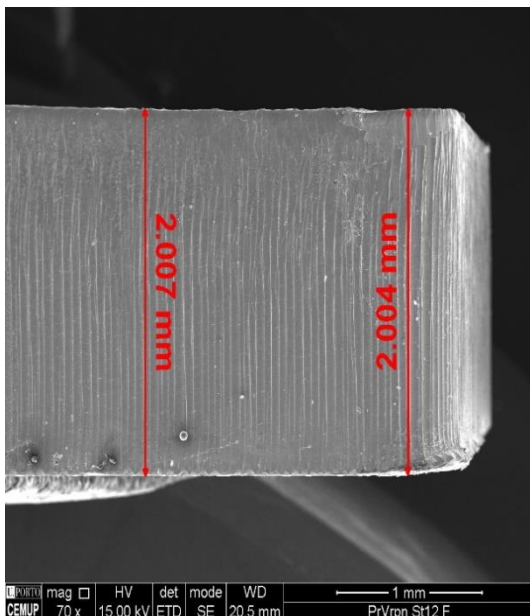


Figura 75 - Amostra de St12, cortada no laser do tipo fibra ótica, com Pr e Vr

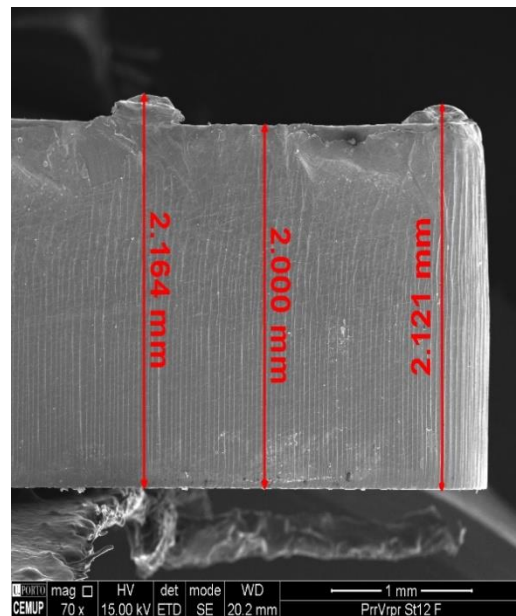


Figura 76 - Amostra de St12, cortada no laser do tipo fibra ótica, com Prr e Vr

Comprova-se que o nível de rebarba baixou relativamente ao que observa na Figura 73 com os parâmetros desproporcionais. Mas, ao baixar novamente a potência duas vezes em relação à potência de radiação recomendada (Prr), com a velocidade reduzida (Vr),

o nível de rebarba volta a aumentar (ver Figura 76), confirmando-se que estes dois parâmetros de corte laser, mantêm uma relação de proporção que não pode ser muito desajustada em termos percentuais.

Analisou-se ainda o efeito de uma velocidade superior à velocidade recomendada (Vh). Nestas condições, aumentando a velocidade de corte e não podendo aumentar mais a potência de radiação, concluiu-se que só na situação em que a potência é a maior de todas, ou seja, a recomendada (Pn), o nível de rebarba é o menor, com potências mais baixas o defeito aumenta.

Na Figura 77, apresenta-se uma amostra em St12, cortada no laser do tipo CO₂, com potência recomendada (Pn) e velocidade de corte superior à velocidade recomendada (Vh). Consta-se que o nível de rebarba é baixo.

Se a potência de radiação for reduzida (Pr) e a velocidade de corte se mantiver superior ao que é recomendado (Vh), o resultado é o representado na Figura 78. Um aumento drástico da rebarba e de imperfeições. No momento do corte, o aumento da velocidade de corte, traduz-se em falta de tempo para cortar devidamente o material.

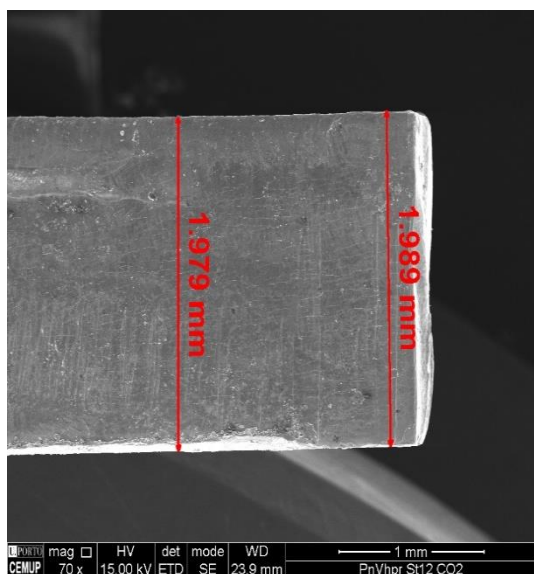


Figura 77 - Amostra de St12, cortada no laser do tipo CO₂, com Pn e Vh

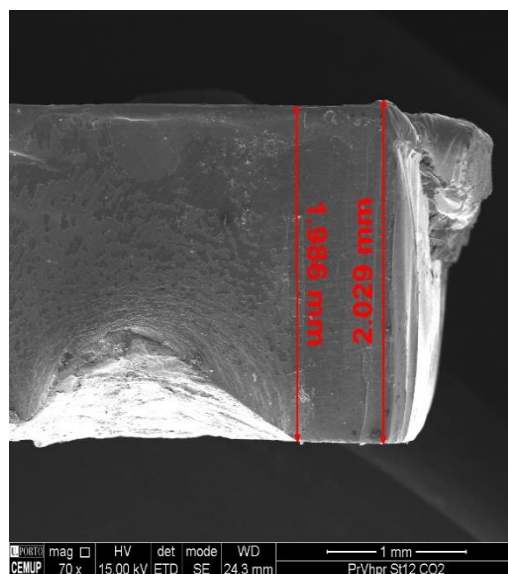


Figura 78 - Amostra de St12, cortada no laser do tipo CO₂, com Pr e Vh

Por fim, se a potência de radiação for novamente reduzida (Prr) e a velocidade de corte se mantiver superior ao que é recomendado (Vh), os níveis de rebarba aumentam, bem como o número de imperfeições. Este é o caso dos opostos, em que a potência de radiação é a mais baixa de todas (Prr) e a velocidade de corte a mais alta de todas (Vh), esta diferença de valores provoca um desfasamento grande entre o tempo de corte e qualidade do corte. Comparando os diferentes materiais e tipos de laser na Figura 79,

com uma amostra em St12 cortada no laser do tipo CO₂, e na Figura 80, uma amostra em AISI 316L cortada no laser do tipo fibra ótica, constata-se que os parâmetros de corte laser, velocidade de corte e potência de radiação, devem estar ajustados, para não provocar as imperfeições denotadas nestas amostras.

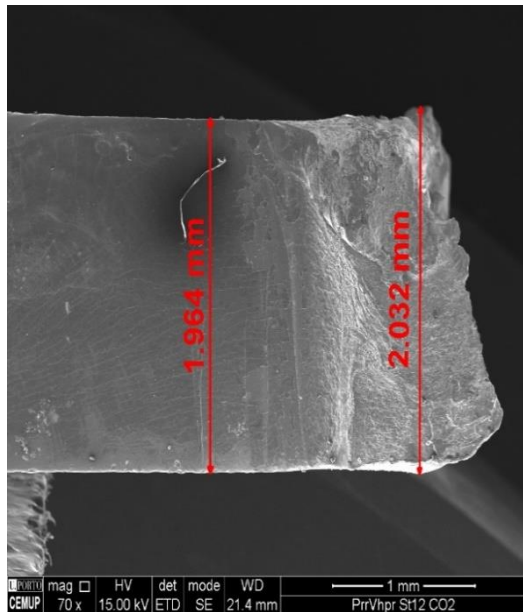


Figura 79 - Amostra de St12, cortada no laser do tipo CO₂, com Prr e Vh

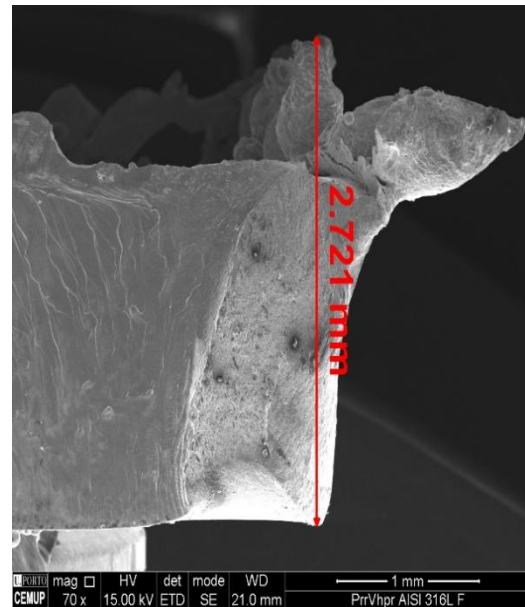


Figura 80 - Amostra de AISI 316L, cortada no laser do tipo fibra ótica, com Prr e Vh

Efeitos dos diferentes valores da pressão do gás

Os valores da pressão do gás variaram da seguinte forma:

- Pressão do gás recomendada pela marca (pn);
- Pressão do gás mais baixa (pr).

A pressão do gás é um parâmetro que controla a quantidade de gás para auxiliar no corte laser, com o objetivo de limpar os resíduos criados durante o arrastamento de material do feixe laser, minimizando também a criação de rebarba e outros defeitos que possam resultar do corte laser.

A melhor forma de analisar este parâmetro de corte laser é comparar amostras do mesmo material e tipo de laser, com pressões de gás diferentes, mas com a mesma velocidade de corte laser e potência de radiação.

Na Figura 81, observa-se uma amostra em AISI 316L, cortada no laser do tipo fibra ótica, com potência de radiação recomendada (Pn), velocidade superior (Vh) e com uma

pressão do gás recomendada (p_n). A rebarba apresenta-se moderada, mas sendo a pressão do gás um parâmetro de remoção de resíduos, o seu valor deve ser sempre o maior possível, mas nem sempre as empresas têm essa possibilidade e vêm-se obrigadas a baixar a pressão do gás para baixar custos, neste âmbito.

Na Figura 82, está outra amostra em AISI 316L e nas mesmas condições da amostra da Figura 81, mas com a pressão do gás mais baixa (p_r). Sucede que o nível de rebarba aumenta significativamente, aumentando o defeito e danificando o próprio material.

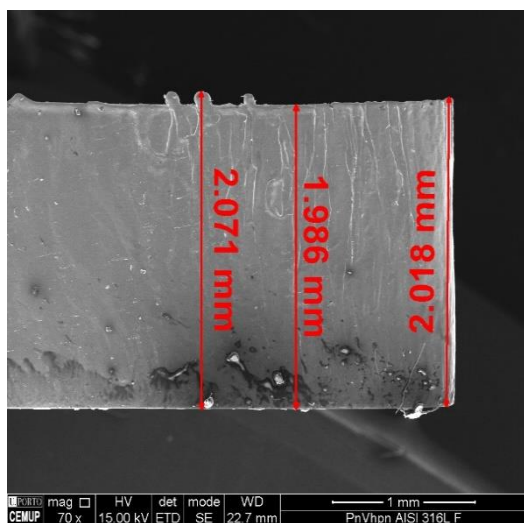


Figura 81 - Amostra de AISI 316L, cortada no laser do tipo fibra ótica, com P_n , V_h e p_n

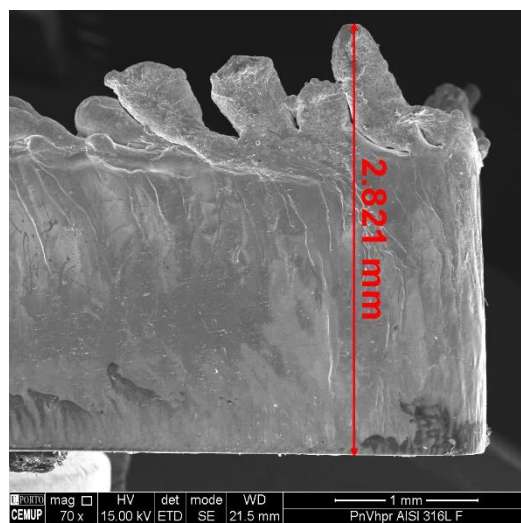


Figura 82 - Amostra de AISI 316L, cortada no laser do tipo fibra ótica, com P_n , V_h e p_r

Mudando a análise para o outro tipo de material e outro tipo de laser, para confirmar esta tendência de quanto menor for o valor da pressão do gás, maior será o nível de rebarba. Analisou-se amostras em St12, cortadas no tipo de laser CO_2 .

Na Figura 83, apresenta-se uma amostra em St12, cortada no tipo de laser CO_2 , com potência de radiação recomendada (P_{rr}), velocidade recomendada (V_n) e com uma pressão do gás recomendada (p_n). Novamente, e em consonância com o que se observou nas Figura 81, a rebarba apresenta-se moderada e, neste caso, praticamente inexistente.

Já na Figura 84, apresenta-se outra amostra em St12, cortada no tipo de laser CO_2 , com potência da radiação recomendada (P_{rr}), velocidade recomendada (V_n) e, aqui, com a pressão do gás reduzida (p_r). À semelhança do que se observou na Figura 82, um abaixamento da pressão do gás, nas mesmas condições de corte laser, traduz-se num aumento da rebarba.

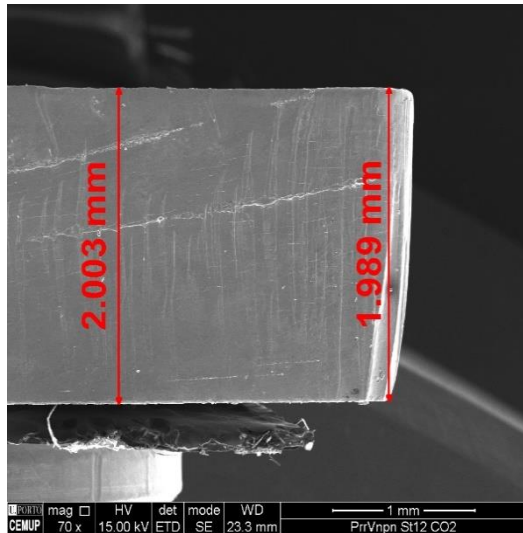


Figura 83 - Amostra de St12, cortada no laser do tipo CO₂, com Prr, Vn e pn

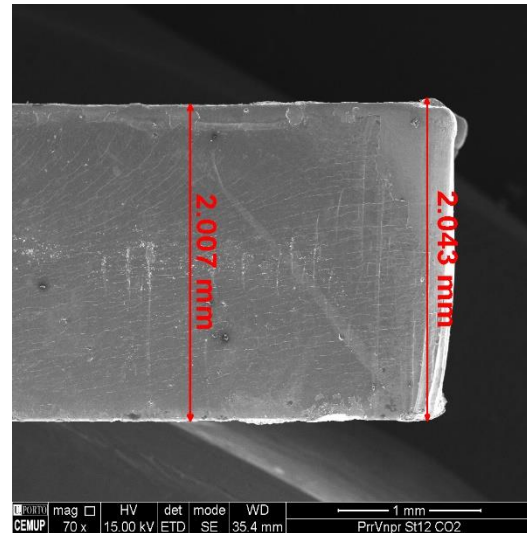


Figura 84 - Amostra de St12, cortada no laser do tipo CO₂, com Prr, Vn e pr

Efeitos dos diferentes tipos de feixe laser

Os equipamentos de fonte laser utilizados apresentam diferenças. O feixe laser do equipamento do tipo de fibra ótica caracteriza-se por atuar em modo contínuo, já o feixe laser do equipamento do tipo CO₂ é pulsado, atuando na forma de impulsos.

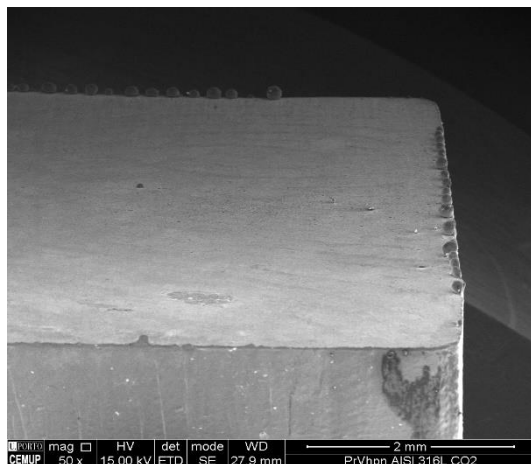


Figura 85 - Amostra de AISI 316L, cortada no laser do tipo CO₂

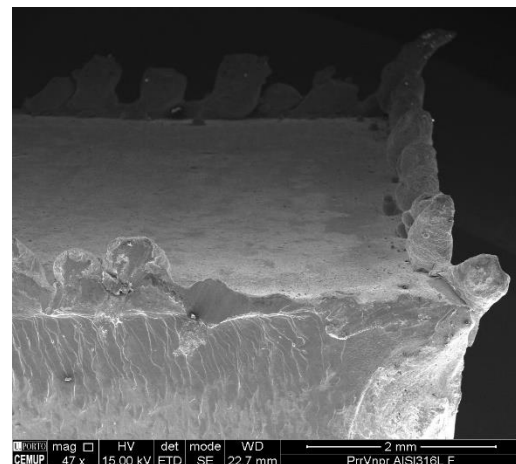


Figura 86 - Amostra de AISI 316L, cortada no laser do tipo fibra ótica

Fazendo uma análise do mesmo material, nos dois tipos de feixe laser, facilmente se detetam as diferenças. Na Figura 85, é possível ver que a rebarba não se distribui de forma uniforme, apresentando intervalos entre cada sequência de pontos de rebarba. Esta forma de distribuição da rebarba está relacionada com as características do feixe laser do equipamento do tipo CO₂, que executa o corte em modo pulsado. A energia

transferida para o material é feita por impulsos, o que se traduz em intervalos de criação de rebarba.

Já na Figura 86, a rebarba distribuiu-se uniformemente ao longo da amostra em todas as arestas de corte, não existindo intervalos entre a rebarba. No laser do tipo fibra ótica, o feixe laser atua no modo contínuo, criando um perfil de rebarba mais uniforme.

Das análises efetuadas à rebarba provocada nas amostras, concluiu-se que:

- A rebarba é um defeito criado, com origem principal na má seleção dos parâmetros de corte laser. Constitui um problema grave para os departamentos de qualidade das empresas;
- À medida que a potência de radiação foi reduzida, o nível de rebarba aumentou. O mesmo foi comprovado pela referência [47];
- Com valores da potência de radiação recomendados pela marca (P_n), a rebarba apresenta-se praticamente nula;
- Com valores da potência da radiação reduzida num nível (P_r), a rebarba começa a apresentar-se de forma mais saliente;
- Com valores relativos à potência da radiação mais baixa (P_{rr}), observaram-se os casos mais extremos de rebarba.
- A velocidade de corte é um parâmetro que tem de acompanhar as descidas ou subidas de valores da potência da radiação. São dois parâmetros de corte laser com forte interrelação.
- Com valores da velocidade de corte recomendados pela marca (V_n), as amostras com maiores níveis de rebarba são aquelas, em que as potências de radiação atingem níveis mais baixos (P_r) e (P_{rr});
- Se a velocidade corte for reduzida (V_r), a potência da radiação deve acompanhar a redução. Neste caso, se a potência reduzida num nível (P_r), é aquela que apresenta os melhores resultados;
- Se a velocidade de corte for superior ao que é recomendado pela marca (V_h), a potência da radiação com melhores resultados é aquela que está mais próxima proporcionalmente a esta velocidade, ou seja, a potência da radiação recomendada pela marca (P_n), que é a mais alta de todas. Com as outras potências, os níveis de rebarbar aumentam drasticamente. O mesmo se comprova na referência [18];
- A pressão do gás é outro parâmetro importante no controlo da rebarba, sendo responsável pela remoção dos resíduos na área onde ocorre o corte laser. Esta importância da pressão do gás também ficou patente na referência [56];

- A pressão do gás deve ser sempre a maior possível. Quanto maior o seu valor, maior será o sucesso de remoção de resíduos, evitando a formação de rebarba. Constata-se a mesma situação na referência [53];
- Nas amostras analisadas, nos casos onde a pressão do gás é reduzida (pr), são aquelas que apresentam maiores níveis de rebarba;
- As características do feixe laser interferem no modo como se distribui a rebarba ao longo das arestas de corte laser;
- No equipamento do tipo CO₂, o feixe laser atua na forma de impulsos. A distribuição da rebarba não é uniforme, apresentando-se com intervalos;
- No equipamento do tipo fibra ótica, o feixe laser é contínuo. Neste caso, ao contrário do modo pulsado, a rebarba distribui-se uniformemente.

3.7.2 Análise da largura de corte

A largura de corte ou *kerf width*, como habitualmente se utiliza na terminologia relacionada com o corte laser, significa a quantidade de material que é removido durante a passagem do feixe laser, retirando uma pequena quantidade do material a cortar. Essa quantidade de material que é retirada, é bem identificada e medida através de um ângulo criado no canto do material por onde passou o feixe laser. A largura de corte, pode ser mais ou menos perceptível, dependendo do tipo e espessura do material, bem como os parâmetros selecionados e tipo de laser.

Na Figura 87, observa-se uma amostra em AISI 316L, cortada no laser do tipo fibra ótica. Confirma-se que a largura de corte é mínima e, neste caso, sem possibilidade de ser medida.

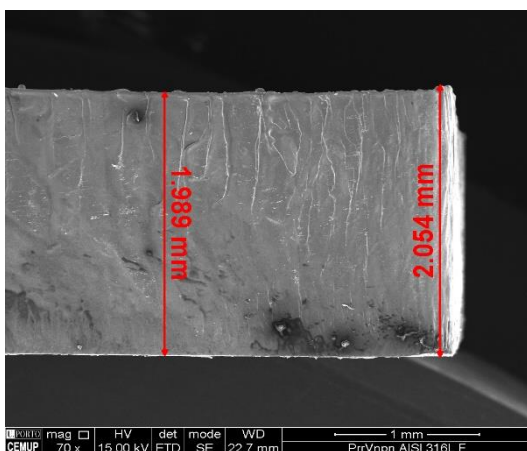


Figura 87 - Amostra em AISI 316L, cortada no laser do tipo fibra ótica

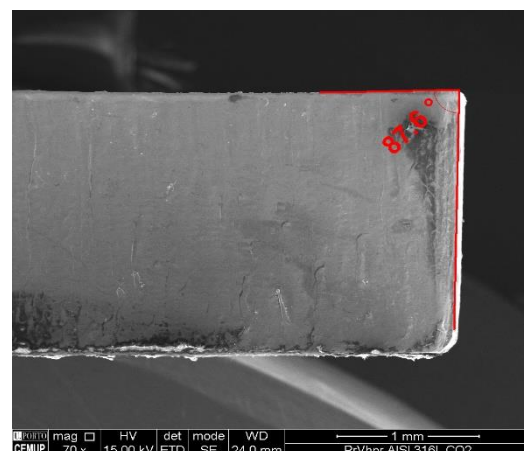


Figura 88 - Amostra em AISI 316L, cortada no laser do tipo CO₂

Já na Figura 88, apresenta-se outra amostra em St12, mas cortada no laser do tipo CO₂. A largura de corte desta amostra, está perfeitamente identificada e com a possibilidade de ser medida.

Corroborando o que foi concluído anteriormente na Figura 87, apresenta-se uma amostra noutro tipo de material, em St12, cortada no laser do tipo fibra ótica, novamente sem largura de corte. Ainda na Figura 90, perante uma amostra em St12, mas agora cortada no laser do tipo CO₂, em linha com o que aconteceu na amostra da Figura 88, consegue-se identificar a largura de corte.

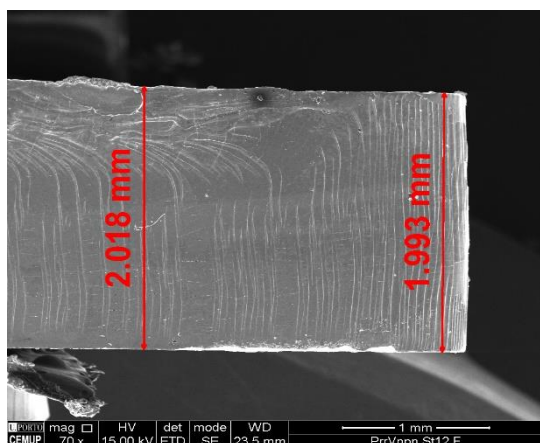


Figura 89 - Amostra em St12, cortada no laser do tipo fibra ótica

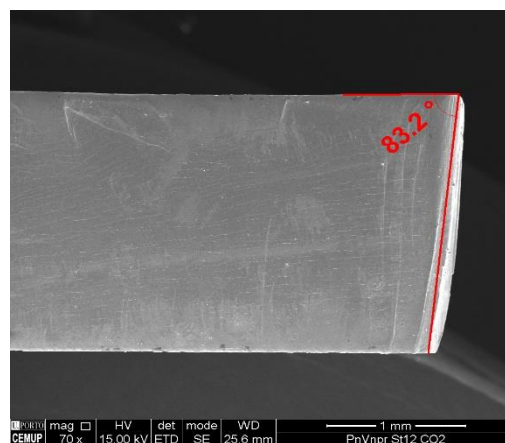


Figura 90 - Amostra em St12, cortada no laser do tipo CO₂

As larguras de corte observadas, estão relacionadas com o tipo de feixe laser. Constatou-se que todas as amostras, independentemente do tipo de material, se fossem cortadas com o tipo de laser CO₂, apresentam largura de corte.

O tipo de laser CO₂ utilizado neste estudo é pulsado. A característica deste tipo de feixe laser de transmitir a energia através de impulsos, está na origem desta falta de material, que é identificado através de um ângulo. Sendo um feixe laser de impulsos, proporciona uma largura de corte mais díspar. No canto apresenta-se um ângulo que representa o início do corte laser, tornando-se menos acentuado ao longo do tempo de corte, pelo número de impulsos já ser maior.

Nas análises efetuadas com o SEM, relativamente à largura de corte, concluiu-se que:

- As amostras cortadas no laser do tipo CO₂, apresentam uma largura de corte mais nítida, independentemente do tipo de material e possível de medir, através de um ângulo;
- As amostras cortadas no laser do tipo fibra ótica, não apresentam largura de corte que seja possível de medir, sendo praticamente inexistente;

3.7.3 Análise das estrias

As estrias são um defeito, que está relacionado com a seleção incorreta dos parâmetros de corte laser. Este tipo de defeito localiza-se na zona da espessura das peças e caracteriza-se por:

- Presença de linhas devidamente identificadas, e normalmente com um espaçamento idêntico entre elas;
- A presença destas linhas, aumenta a rugosidade das peças cortadas;
- Estas linhas são muitas das vezes visíveis a olho.

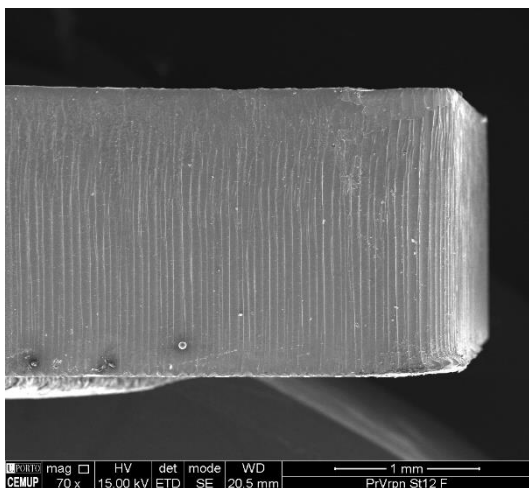


Figura 91 - Amostra em St12, cortada no laser do tipo fibra ótica, com Pr, Vr e pn

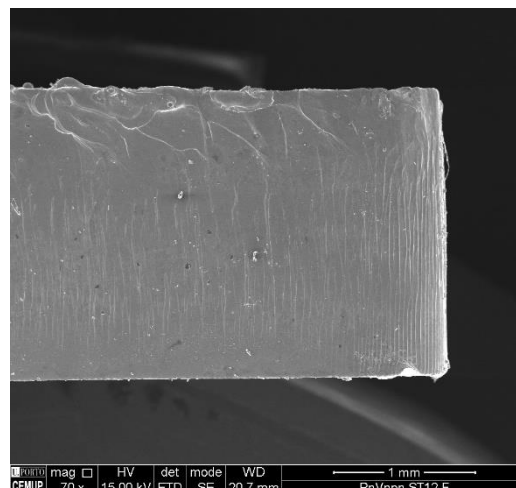


Figura 92 - Amostra em St12, cortada no laser do tipo fibra ótica, com Pn, Vn e pn

Na Figura 91, apresenta-se uma amostra em St12, cortada no laser do tipo fibra ótica. Observa-se a presença de estrias, pois os parâmetros foram alterados, para a realização dos ensaios. Assim sendo, com uma potência reduzida (Pr), velocidade reduzida (Vr) e potência recomendada (pn), o número de estrias aumenta, o que indica uma má seleção dos parâmetros de corte laser. Na Figura 92, apresenta-se outra amostra em St12, cortada no laser do tipo fibra ótica, mas com os parâmetros recomendados. Neste caso, a presença de estrias é praticamente nula, o que indica uma seleção de parâmetros mais adequados ao corte laser, sendo os indicados pela marca, representando uma qualidade de corte superior.

A mesma análise foi retirada para outras condições, mas mudando o tipo de laser, numa amostra de St12 cortada no laser do tipo CO₂ (ver Figura 93). Com os mesmos parâmetros da Figura 91, apresentam-se igualmente estrias. Constatou-se que a má seleção dos parâmetros de corte laser, independentemente do tipo de laser, resulta na presença de estrias. Na Figura 94, à semelhança do que aconteceu na amostra da Figura

92, que também é de St12 e cortada nas mesmas condições, quase não se verifica a presença de estrias.

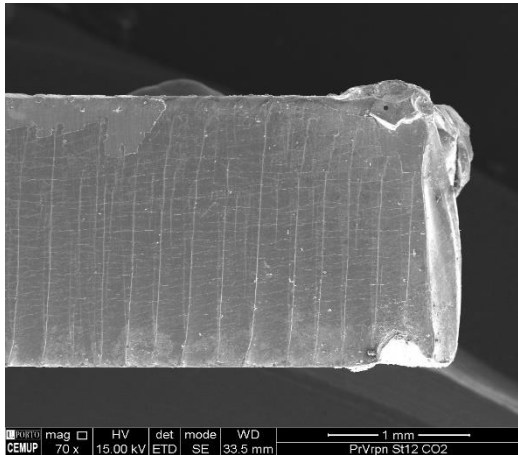


Figura 93 - Amostra em St12, cortada no laser do tipo CO₂, com Pr, Vr e pn

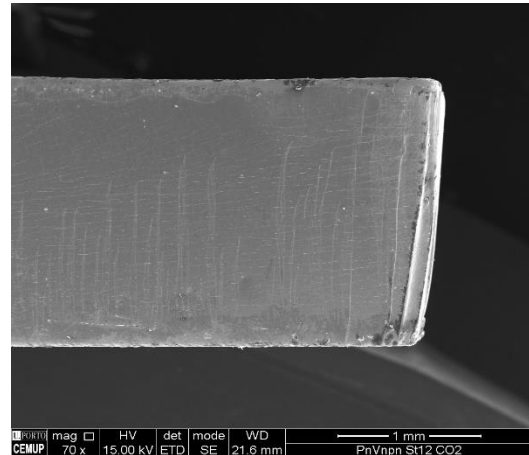


Figura 94 - Amostra em St12, cortada no laser do tipo CO₂, com Pn, Vn e pn

As amostras analisadas quanto ao nível de estrias foram apenas relativas ao St12, nos dois tipos de laser, pois nas amostras de AISI 316L não se verificou a presença de estrias. Este facto pode-se explicar pelas características do material, o St12 é um aço laminado a frio e apresenta uma dureza inferior ao AISI 316L, pelo que o feixe laser, com a má seleção dos parâmetros de corte laser, impõe com maior impacto a presença deste tipo de defeito em amostras de material mais maleável.

Das análises efetuadas, concluiu-se que:

- A má seleção dos parâmetros de corte laser nas amostras de aço St12, independentemente do tipo de laser, provoca a presença de estrias;
- As amostras em AISI 316L, não apresentaram um número significativo de estrias, facto que pode estar relacionado com a dureza do material;
- Com parâmetros recomendados pela marca, a probabilidade de presença de estrias torna-se baixa.

3.8 Análise da rugosidade

A análise à rugosidade das amostras foi efetuada através de um rugosímetro, disponibilizado pelo laboratório de tribologia, do ISEP.

Este rugosímetro possuiu um apalpador de diamante, sendo possível assim pela diferença de valores da dureza medir este tipo de amostras. As amostras são colocadas

paralelamente ao apalpador (ver Figura 95), sendo as medidas registadas através de um *software* informático designado de Marsurf®. Este *software*, fornece ainda gráficos do perfil de rugosidade ao longo do perfil. O apalpador vai percorrer a espessura das amostras, com um *cut-off* de 0,8 mm, em cinco pontos diferentes.

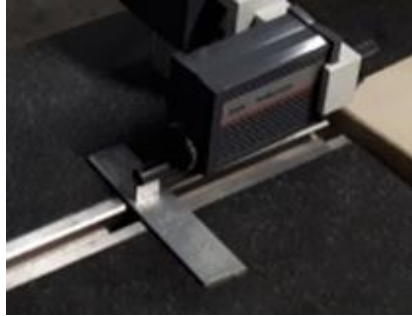


Figura 95 - Posição de uma amostra, para poder ser medida com o rugosímetro

O *software* Marsurf®, obtém os gráficos do perfil R, de cada amostra, assim como os seguintes parâmetros:

- R_a – parâmetro de rugosidade média e mais conhecido, que informa qual o nível de rugosidade. Por ser um parâmetro de fácil análise e obtenção, não faz distinção entre picos e vales;
- R_z – parâmetro de rugosidade média das alturas dos picos e vales. Este parâmetro complementa o R_a , dando uma análise mais pormenorizada e real da rugosidade da superfície;
- R_{max} – parâmetro de rugosidade máxima das alturas dos picos e vales. Este parâmetro é importante para empresas, em que um único defeito não é aceitável.

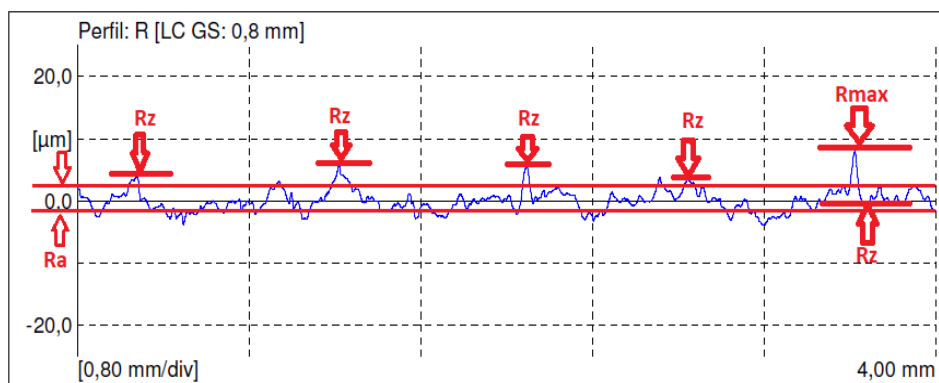


Figura 96 - Perfil R com os diferentes parâmetros de rugosidade

Na Figura 96, está uma representação dos parâmetros de rugosidade num perfil R de uma amostra analisada. Apenas com o parâmetro R_a só se mediria a rugosidade média, desprezando os picos e vales, dando pouca informação da superfície a analisar. A proximidade dos valores dos parâmetros R_z e R_{max} indica um bom acabamento superficial.

Nem todas as amostras analisadas apresentaram um perfil R regular, como o que está representado na Figura 97. As amostras que apresentam perfis de rugosidade fora do normal foram aquelas que foram submetidas aos parâmetros de corte laser mais díspares entre si, apresentando defeitos como a rebarba, estrias e perdas de material, que resultam num aumento da rugosidade.

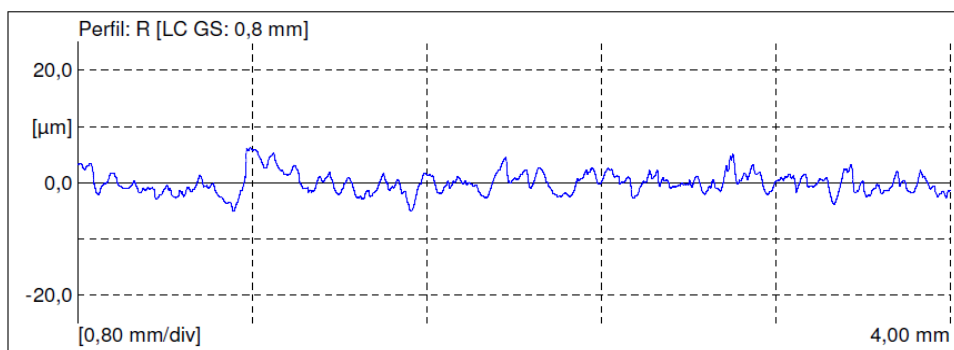


Figura 97 - Perfil R de uma amostra em AISI 316L, cortada no laser do tipo CO_2 , com Pn, Vn, pn

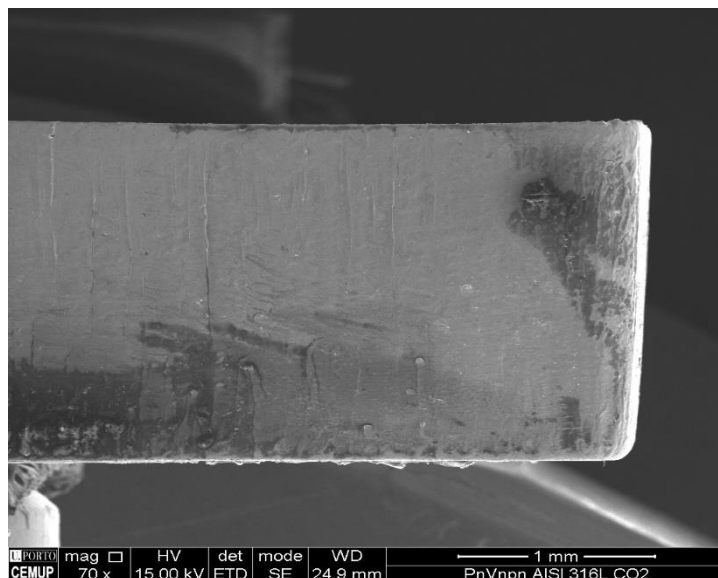


Figura 98 – Superfície de corte de uma amostra em AISI 316L, cortada no laser do tipo CO_2 , com Pn, Vn, pn

Na Figura 97, apresenta-se um perfil de rugosidades dentro do normal. Não se verificam picos de maior destaque, existindo uma distribuição equivalente de picos de rugosidade ao longo do perfil, o que indica a presença de uma superfície com baixa rugosidade, no contexto deste estudo. Os valores dos parâmetros de rugosidade foram os seguintes:

- $R_a = 1,49 \mu\text{m}$
- $R_z = 8,86 \mu\text{m}$
- $R_{\text{max}} = 11,36 \mu\text{m}$

Com este tipo de valores, pode-se estabelecer uma referência em relação às restantes amostras, visto que este perfil apresenta uma superfície livre de grandes imperfeições, sem a presença de estrias, falta de material ou rebarba na superfície de corte (ver Figura 98).

Na Figura 99 está um perfil de rugosidades, diferente daquele que se observa Figura 97. Neste perfil existe um aumento nos níveis de rugosidade, com a presença de picos de rugosidade de maior valor. Neste perfil R, os valores dos parâmetros de rugosidade foram os seguintes:

- $R_a = 2,83 \mu\text{m}$
- $R_z = 16,02 \mu\text{m}$
- $R_{\text{max}} = 20,66 \mu\text{m}$

Neste caso, comprova-se pelos valores dos parâmetros, que o acabamento de superfície desta amostra piorou. Este facto explica-se, pelo valor da velocidade de corte ter sido reduzido, o que já foi comprovado anteriormente, que a redução deste parâmetro tem um impacto negativo na superfície de corte (ver Figura 100). O perfil R da Figura 89, apresenta uma diferença de valores entre R_{max} e R_z de $2,5 \mu\text{m}$, neste perfil R a diferença é de $4,6$. O aumento desta diferença de valores, significa que a superfície tem pior acabamento. Existe também um aumento da rugosidade média (R_a).

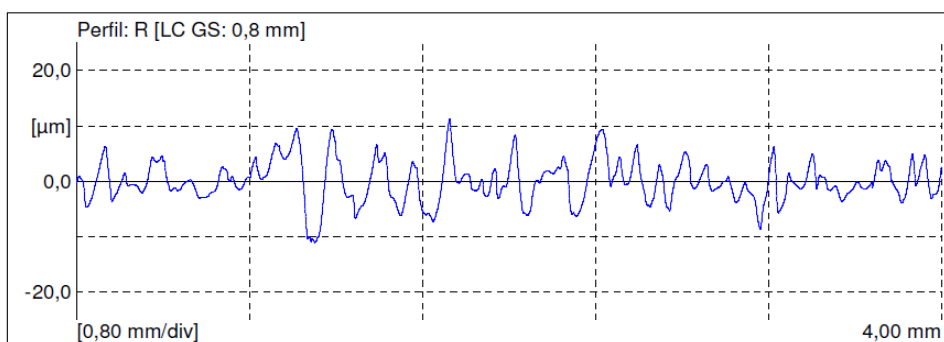


Figura 99 - Perfil R de uma amostra em AISI 316L, cortada no laser de fibra ótica, com P_n , V_r , p_n

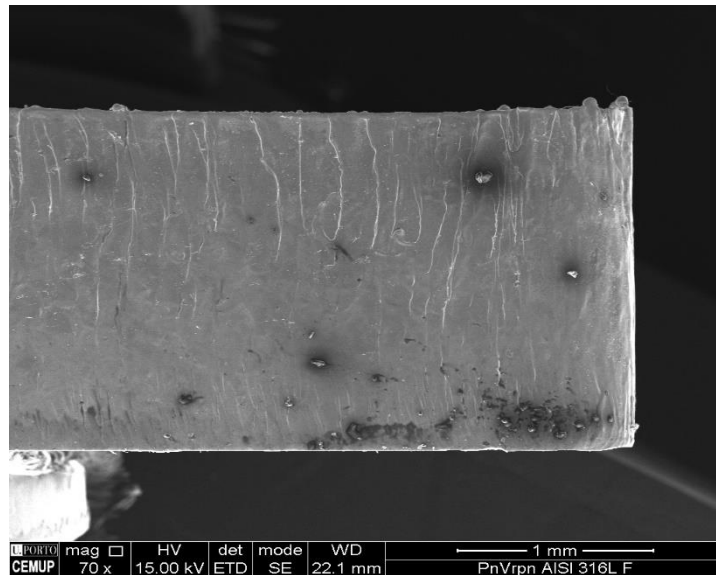


Figura 100 - Superfície de corte de uma amostra em AISI 316L, cortada no laser de fibra ótica, com Pn, Vr, pn

Foram agora analisadas as amostras de aço St12, começando também por um perfil R normal, com poucas oscilações para servir de referência. Na Figura 101, observa-se um perfil de rugosidades de uma amostra em St12, cortada no laser do tipo fibra ótica, com os parâmetros recomendados pela marca, originando um perfil de rugosidades com uma distribuição de picos uniforme. Os parâmetros de rugosidade obtidos foram os seguintes:

- $R_a = 2,38 \mu\text{m}$
- $R_z = 12,74 \mu\text{m}$
- $R_{\text{max}} = 15,07 \mu\text{m}$

O perfil R desta amostra servirá de referência para as restantes amostras deste tipo de material, pois esta amostra apresenta uma superfície de corte praticamente livre de defeitos mais significativos (ver Figura 102).

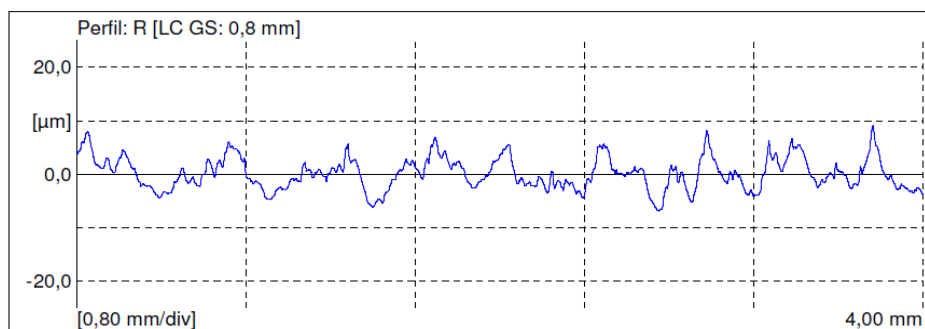


Figura 101 - Perfil R de uma amostra em St12, cortada no laser de fibra ótica, com Pn, Vn, pn

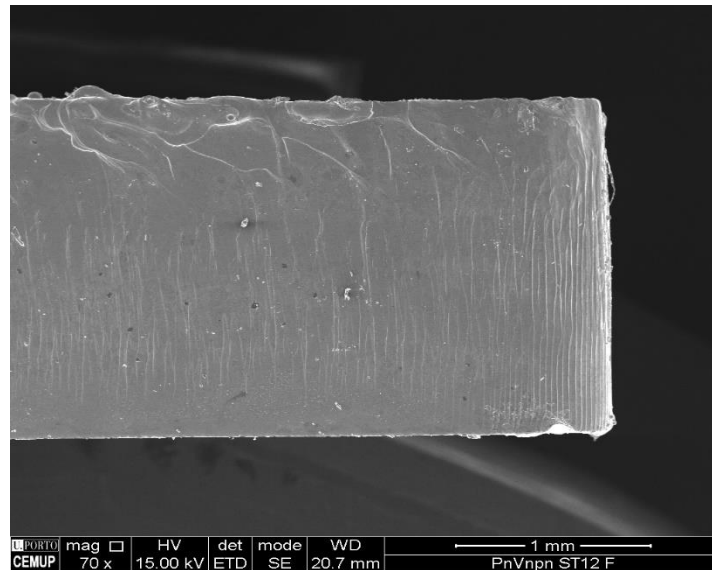


Figura 102 – Superfície de corte de uma amostra em St12, cortada no laser de fibra ótica, com Pn, Vn, pn

Na Figura 103, observa-se um perfil de rugosidades de uma amostra em St12, mas com os parâmetros reduzidos em relação ao recomendado pela marca. Obtém-se um perfil R com menos oscilações, mas com picos de maiores valores, em relação ao perfil R da Figura 101. Os parâmetros de rugosidade para esta amostra são os seguintes:

- $R_a = 3,13 \mu\text{m}$
- $R_z = 14,79 \mu\text{m}$
- $R_{\text{max}} = 17,35 \mu\text{m}$

A superfície de corte desta amostra apresenta estrias (ver Figura 104), o que se traduz num aumento da rugosidade. A rugosidade média aumentou (R_a), em relação à rugosidade de referência, assim como, a diferença entre R_{max} e R_z , passando de $2,3 \mu\text{m}$ de referência para $2,6 \mu\text{m}$. Este aumento nos parâmetros de rugosidade significa que o acabamento da superficial piorou, com estes novos parâmetros.

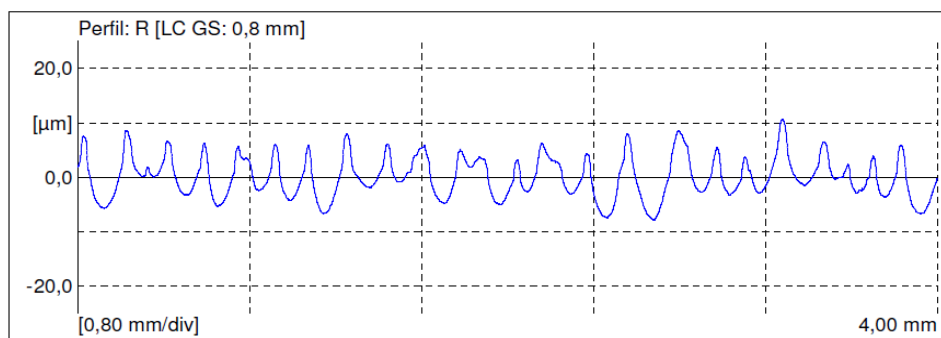


Figura 103 - Perfil R de uma amostra em St12, cortada no laser do tipo CO₂, com Prr, Vr, pr

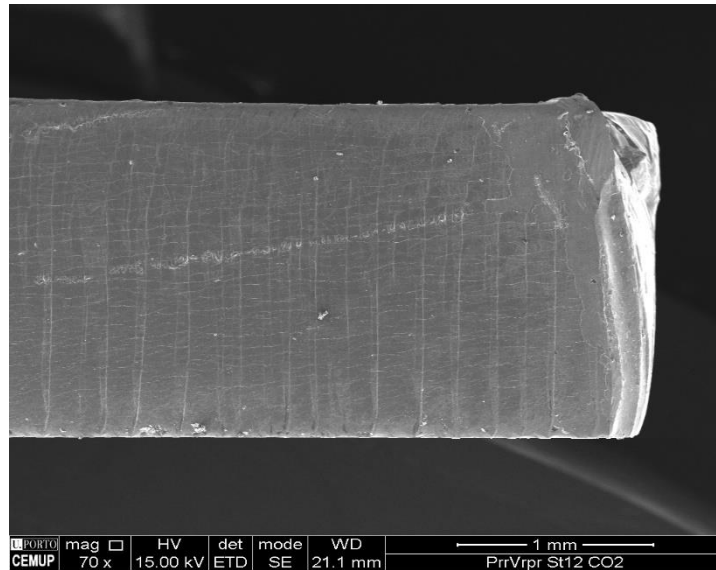


Figura 104 - Superfície de corte de uma amostra em St12, cortada no laser do tipo CO₂, com Prr, Vr, pr

Na Figura 105 está um perfil R, de uma amostra com parâmetros de corte laser bastante díspares entre si. Neste tipo de condições, os perfis de rugosidade continuam a distribuir-se com picos de grandes valores e separados por intervalos equivalentes, pela presença do defeito das estrias (ver Figura 106). Os parâmetros de rugosidade para este perfil R são os seguintes:

- $R_a = 4,23 \mu\text{m}$
- $R_z = 18,84 \mu\text{m}$
- $R_{\text{max}} = 20,23 \mu\text{m}$

A superfície de corte desta amostra apresenta muitas estrias, assim como alguma zonas com falta de material (ver Figura 106). Estes defeitos provocam um aumento drástico da rugosidade média (R_a), que é bastante superior aos outros casos analisados.

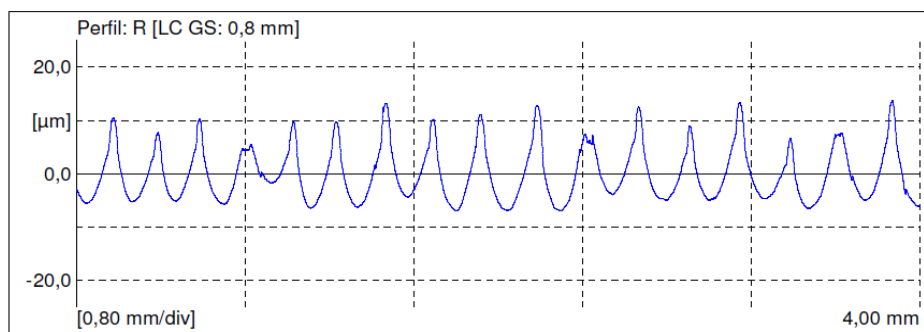


Figura 105 - Perfil R de uma amostra em St12, cortada no laser do tipo CO₂, com Pr, Vr, pn

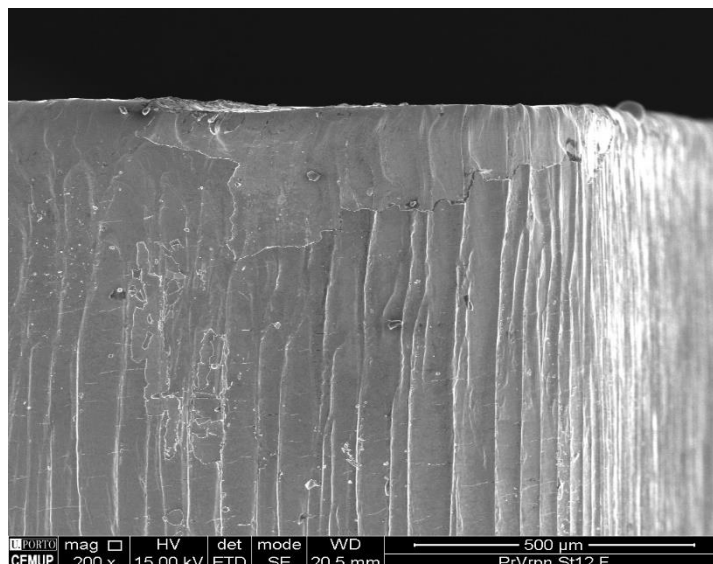


Figura 106 – Superfície de corte de uma amostra em St12, cortada no laser do tipo CO₂, com Pr, Vr, pn

Na Figura 107, apresenta-se um perfil R diferente dos analisados anteriormente. Este perfil de rugosidades é um caso particular de uma amostra em St12, cortada no laser do tipo CO₂, que foi submetida a parâmetros que variaram em sentidos opostos. A potência de radiação foi reduzida (Pr), a velocidade de corte aumentou (Vh) e a pressão do gás manteve-se como recomendado (pn). Este conjunto de parâmetros originou um perfil de rugosidades incomum, sem as habituais oscilações facilmente visíveis e com picos pouco acentuados. A não visualização dos picos e oscilações mais pequenas, deve-se também à escala ter aumentado, em consequência do pico máximo de rugosidade ter aumentado muito. Os parâmetros de rugosidade obtidos foram os seguintes:

- $R_a = 2,15 \mu\text{m}$
- $R_z = 16,44 \mu\text{m}$
- $R_{\text{max}} = 35,29 \mu\text{m}$

Só o valor da rugosidade média (R_a) se pode considerar normal. Mas, como foi descrito anteriormente, só este parâmetro de rugosidade não é suficiente para uma análise completa a um perfil R. Como tal, a diferença de valores entre R_{max} e R_z é tão grande (18,9 μm), que indicia um acabamento superficial muito mau.

Ao observar a Figura 108, é possível constatar uma superfície bastante irregular, possuindo zonas em que visualmente está boa, mas outras zonas onde a superfície se apresenta muito afetada. O pico máximo de rugosidade foi obtido numa zona onde o estado da superfície de corte estava muito mau, como o que é observado na extremidade da amostra da Figura 108.

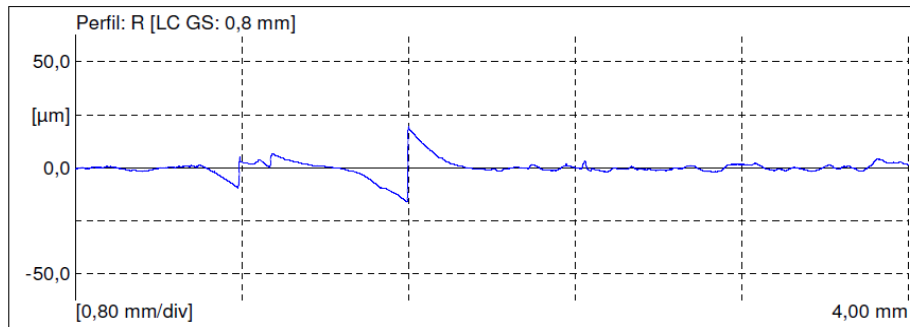


Figura 107 - Perfil R de uma amostra em St12, cortada no laser do tipo CO₂, com Pr, Vh, pn

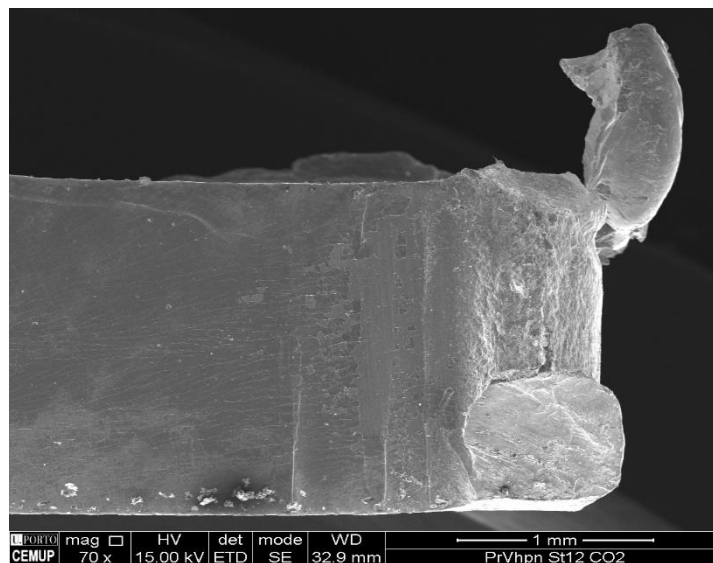


Figura 108 - Superfície de corte de uma amostra em St12, cortada no laser do tipo CO₂, com Pr, Vh, pn

Das análises de rugosidade anteriores, concluiu-se que:

- O perfil de rugosidades, ou perfil R, dá-nos graficamente uma distribuição que deve ser uniforme;
- O parâmetro de rugosidade média (R_a), não é suficiente para uma análise completa da rugosidade de uma superfície. Por isso, têm de ser incluídas as análises dos parâmetros de rugosidade média das alturas dos picos e vales (R_z) e dos parâmetros de rugosidade máxima das alturas dos picos e vales (R_{max});
- Os defeitos como as estrias, originam um perfil R com picos e vales uniformes, mas com valores de rugosidade elevados;
- Maiores valores de velocidade de corte e potência de radiação, produzem menos rugosidade. O mesmo ficou explícito nas referências [24] e [49].

3.9 Análise estatística das amostras em AISI 316L – laser de CO₂

3.9.1 Método Taguchi

A aplicação do método Taguchi nos ensaios efetuados com o *software* Minitab[®], permite a obtenção de análises gráficas e numéricas, sobre o melhor conjunto de parâmetros de corte laser, com os resultados das medições da rebarba e dos parâmetros de rugosidade.

Foram executados 18 ensaios por cada tipo de material e corte laser, para serem obtidas todas as combinações possíveis com:

- Potência de radiação a variar três vezes (Pn, Pr, Prr);
- Velocidade de corte laser a variar três vezes (Vn, Vr, Vh);
- Pressão do gás a variar duas vezes (pn e pr).

O primeiro passo a executar no Minitab[®] é a seleção da matriz a utilizar nestas análises. Na Tabela 32 está representada a matriz L18, relativa às diferentes combinações de parâmetros que foram utilizadas nos ensaios.

Tabela 32 - Matriz L18

	1	2	3	4	5	6	7	8
1	1	1	1	1	1	1	1	1
2	1	1	2	2	2	2	2	2
3	1	1	3	3	3	3	3	3
4	1	2	1	1	2	2	3	3
5	1	2	2	2	3	3	1	1
6	1	2	3	3	1	1	2	2
7	1	3	1	2	1	3	2	3
8	1	3	2	3	2	1	3	1
9	1	3	3	1	3	2	1	2
10	2	1	1	3	3	2	2	1
11	2	1	2	1	1	3	3	2
12	2	1	3	2	2	1	1	3
13	2	2	1	2	3	1	3	2
14	2	2	2	3	1	2	1	3
15	2	2	3	1	2	3	2	1
16	2	3	1	3	2	3	1	2
17	2	3	2	1	3	1	2	3
18	2	3	3	2	1	2	3	1

Trata-se agora dos dados com a entrada dos valores numa folha de Excel[®], do próprio *software*, através do DOE (*Design of Experiments*), ou em português, análise das experiências, com os diferentes valores dos parâmetros utilizados. No final deste processo, nas colunas ao lado são colocados os valores das medições da rebarba (μm) e dos parâmetros de rugosidade R_a (μm), R_z (μm) e R_{max} (μm), respetivos de cada amostra, com a diferente combinação dos valores dos parâmetros de corte laser. Na Tabela 33 estão os valores relativos às amostras em AISI 316L, cortadas no laser do tipo CO₂.

Tabela 33 - Valores das amostras em AISI 316L, cortadas no laser do tipo CO₂

AISI 316L (2 mm) – Equipamento de CO ₂							
Amostra	Potência (W)	Velocidade (mm/min)	Pressão (bar)	Rebarba (μm)	R_a (μm)	R_z (μm)	R_{max} (μm)
PnVhpn	3200	6300	15	57	1,36	7,63	8,38
PrVhpn	3000	6300	15	18	1,47	9,99	14,0
PrrVhpn	2800	6300	15	86	1,33	7,38	8,89
PnVnpr	3200	5300	15	22	1,49	8,86	11,4
PrVnpr	3000	5300	15	14	1,35	8,90	11,9
PrrVnpr	2800	5300	15	18	1,11	6,65	9,61
PnVrpn	3200	4300	15	32	1,52	8,86	11,4
PrVrpn	3000	4300	15	25	1,53	7,00	10,4
PrrVrpn	2800	4300	15	104	1,35	7,34	9,44
PnVhpr	3200	6300	10	43	2,06	13,7	20,4
PrVhpr	3000	6300	10	3	1,66	10,1	15,0
PrrVhpr	2800	6300	10	36	1,31	6,92	7,86
PnVnpr	3200	5300	10	10	1,43	8,05	9,04
PrVnpr	3000	5300	10	8	2,08	11,9	23,9
PrrVnpr	2800	5300	10	7	1,81	9,99	12,1
PnVrpr	3200	4300	10	25	1,38	7,81	11,1
PrVrpr	3000	4300	10	11	1,82	10,3	11,9
PrrVrpr	2800	4300	10	4	1,35	7,60	7,98

Na análise Taguchi do DOE existe um rácio S/N, que permite uma análise da variação de resultados, indicando o melhor conjunto de parâmetros. Este rácio diminuiu os fatores de ruído, ou seja, fatores que não são controlados, como o processo de fabrico da matéria-prima ou as imperfeições inerentes à mesma. Sendo este caso de estudo uma avaliação de qualidade, indica-se que a categoria do rácio S/N, tem de ser o “menor é o melhor”, referente ao valor do defeito que deve ser minimizado. Ao contrário da categoria que se escolhe, o maior valor do rácio S/N é o que caracteriza as melhores condições. O valor maior do rácio S/N é o valor que menos variou, relativamente ao resultado expectável, logo o mais adequado.

A Figura 109 é um gráfico do rácio S/N, que indica os melhores parâmetros relativamente aos resultados da rebarba. Constata-se que, o melhor conjunto de parâmetros de corte laser para que a rebarba seja minimizada, sendo os maiores valores na escala do rácio S/N, são:

- Pressão do gás (p_r) - 10 bar;
- Velocidade de corte (V_n) - 5300 mm/min;
- Potência de radiação reduzida uma vez (P_r) - 3000 W.

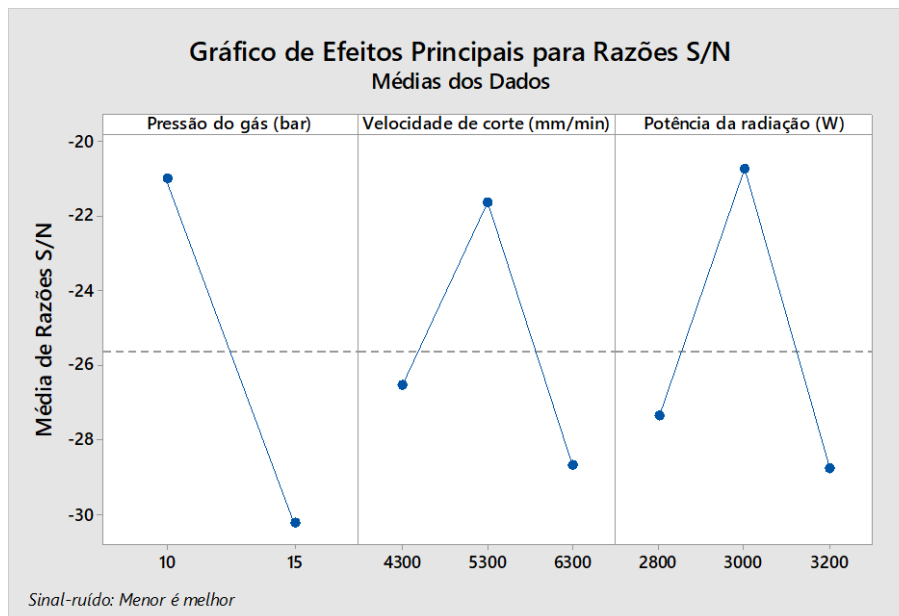


Figura 109 - Gráfico do rácio S/N, dos resultados da rebarba

Na Figura 110 está o gráfico S/N da rugosidade R_a . Neste caso, os melhores valores para uma menor rugosidade são:

- Pressão do gás (p_n) - 15 bar;
- Velocidade de corte inferior (V_r) - 4300 mm/min;
- Potência de radiação reduzida duas vezes (P_{rr}) - 2800 W.

A variação da linha de tendência da velocidade de corte estabilizou, relativamente ao gráfico da Figura 101. Isto significa, que deixou de ter um papel tão importante na criação da rugosidade R_a .

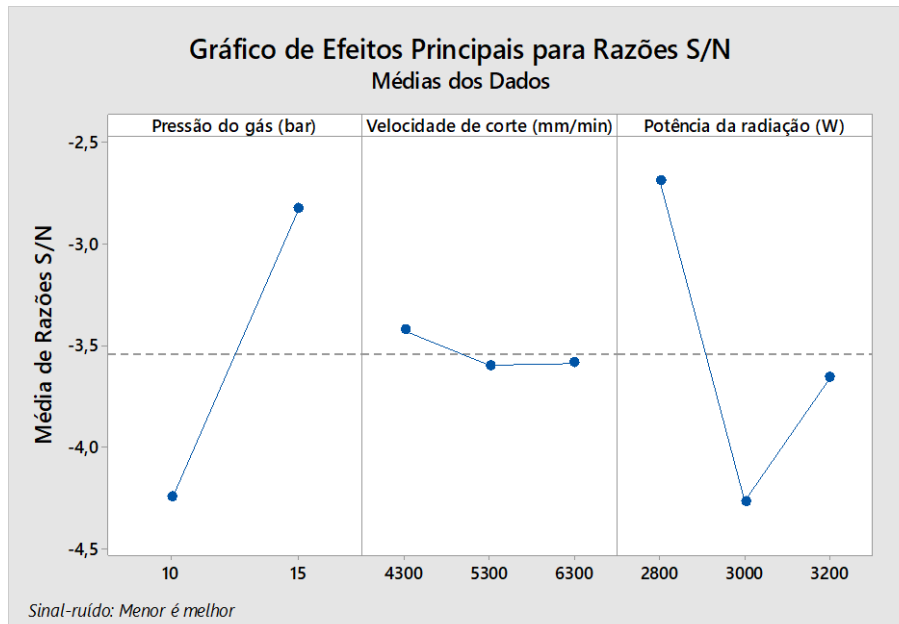


Figura 110 - Gráfico do rácio S/N, dos resultados da rugosidade R_a

Na Figura 111 está o gráfico S/N da rugosidade R_z . A variação da linha de tendência da velocidade de corte voltou a perder regularidade, significando que voltou a ter um papel importante na criação, agora da rugosidade R_z . Neste caso, os melhores valores para os parâmetros de corte laser, são os mesmos da rugosidade R_a .

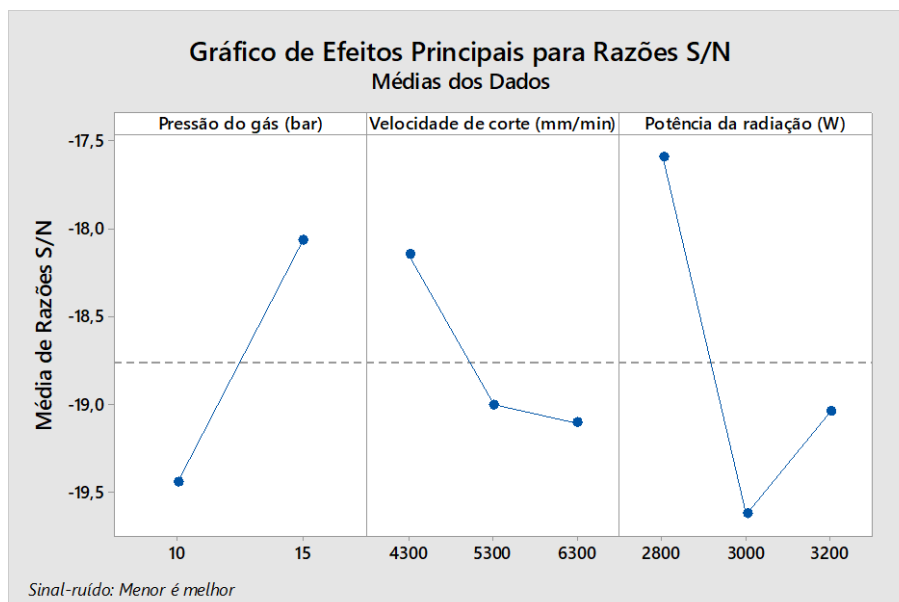


Figura 111 - Gráfico do rácio S/N, dos resultados da rugosidade R_z

Na Figura 112 está o gráfico S/N da rugosidade R_{max} . Neste caso, a variação da linha de tendência da pressão do gás perdeu inclinação, o que significa que perdeu importância relativamente aos outros parâmetros, nos resultados da rugosidade R_{max} . Ainda assim, os valores dos parâmetros de corte laser ideais são os mesmos das rugosidades R_a e R_z .

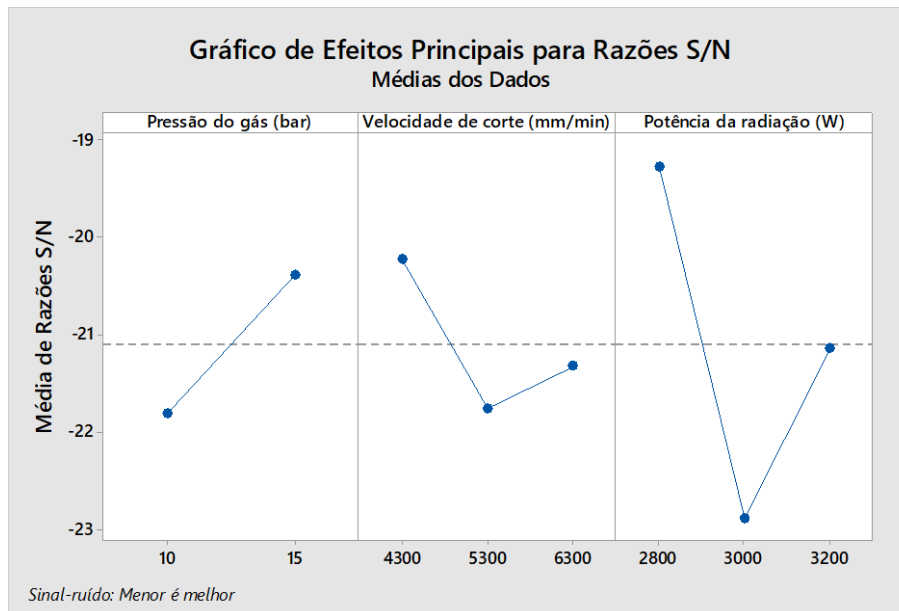


Figura 112 - Gráfico do rácio S/N, dos resultados da rugosidade R_{max}

3.9.2 Análise da Variância (ANOVA)

Com o *software* Minitab[®], é possível também obter uma análise da variância dos resultados obtidos. Esta análise permite ainda especificar a importância de cada parâmetro na criação dos resultados da rebarba e das rugosidades. Permite também analisar a dispersão dos resultados.

A ANOVA indica a percentagem de contribuição de cada parâmetro através do valor-p, ou probabilidade de significância. Quanto menor a 0,05 for o valor-p, significa que esta condição, neste caso o parâmetro de corte laser, está a contribuir com maior impacto. Ainda é possível analisar se o modelo de ensaios é o adequado, através da linha de tendência com o coeficiente de correlação (R^2), o valor situa-se entre 0 % e 100 % e quanto mais perto estiver de 100 %, mais fiável é o modelo.

Do gráfico da Figura 113, observa-se a linha de tendência dos resultados da rebarba. Alguns valores estão afastados da linha média, o que vai influenciar negativamente no valor de R^2 .

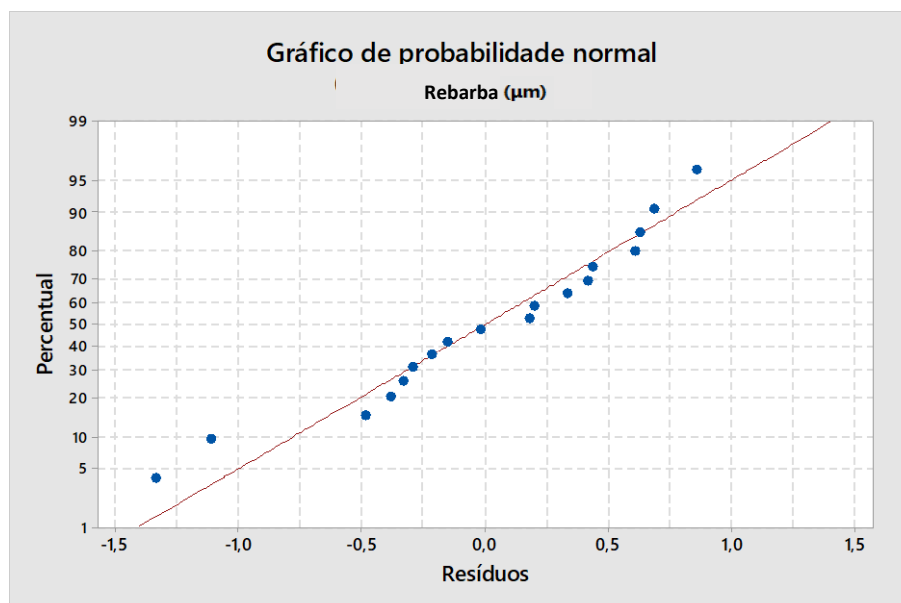


Figura 113 - Linha de tendência dos resultados da rebarba

A Tabela 34 indica que a pressão do gás é o parâmetro com maior contribuição para os resultados da rebarba, com um valor-p mais baixo, de 0,009. O valor de R^2 é de 62,03 %, o que indica que o modelo ainda pode ser melhorado, para ser considerado ideal.

Tabela 34 - Resultados estatísticos dos valores da rebarba

Parâmetro	Valor-p	R^2
Pressão do gás (bar)	0,009	62,03 %
Velocidade de corte (mm/min)	0,175	
Potência de radiação (W)	0,097	

Na Figura 114 está a linha de tendência da rugosidade R_a . Continuam a estar alguns valores afastados da linha média. Esse afastamento afeta o R^2 , que é de 49,73 %, que é cerca de metade do valor do modelo ideal que se situa nos 100 %. Um valor tão baixo de fiabilidade, pode estar relacionado com:

- Muitos resultados estarem afastados da linha média;
- Resultados muito dispersos uns dos outros;
- Na Tabela 33 é possível observar, que existe uma discrepância significativa em termos de valores, para este parâmetro de rugosidade;
- Sendo um valor de fiabilidade abaixo de 50%, também pode indicar um mau procedimento na medição deste parâmetro.

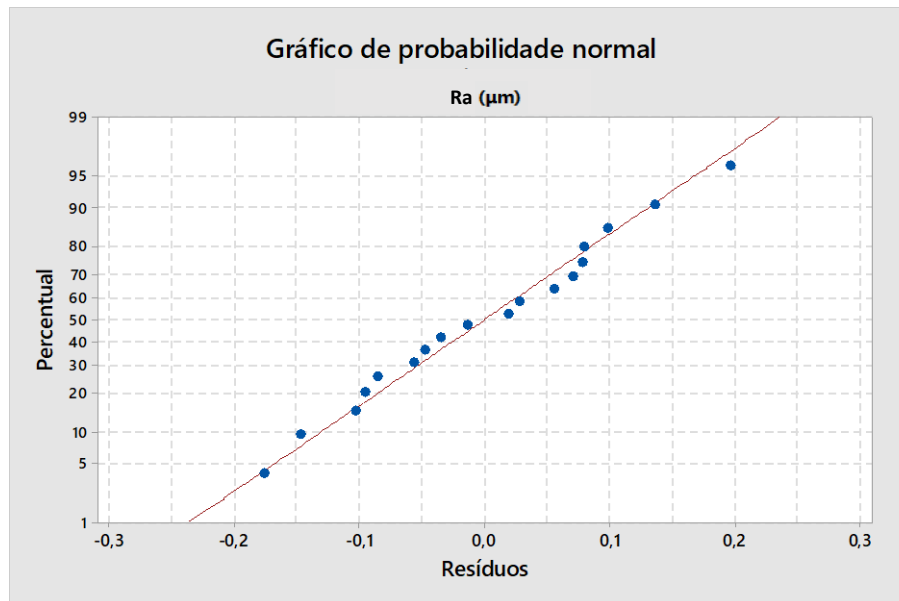


Figura 114 - Linha de tendência dos resultados da rugosidade R_a

Na Tabela 35, observa-se que o menor valor-p é o de 0,036 o que indica uma vez mais a importância da pressão do gás, mas desta vez nos resultados da rugosidade R_a .

Tabela 35 - Resultados estatísticos dos valores dos resultados da rugosidade R_a

Parâmetro	Valor-p	R^2
Pressão do gás (bar)	0,036	49,73 %
Velocidade de corte (mm/min)	0,979	
Potência de radiação (W)	0,080	

Na Figura 115 está a linha de tendência da rugosidade R_z . Continuam a estar vários valores afastados da linha média. Esse afastamento faz com que R^2 seja reduzido e perca fiabilidade, atingindo um valor de 50,25 %.

Observa-se ainda na Tabela 36 que, desta vez, o valor-p mais baixo é de 0,056, relativo à potência de radiação, o que indica que este parâmetro contribuiu de forma mais significativa para este parâmetro de rugosidade R_z .

Tabela 36 - Resultados estatísticos dos valores dos resultados da rugosidade R_z

Parâmetro	Valor-p	R^2
Pressão do gás (bar)	0,085	50,25 %
Velocidade de corte (mm/min)	0,565	
Potência de radiação (W)	0,056	

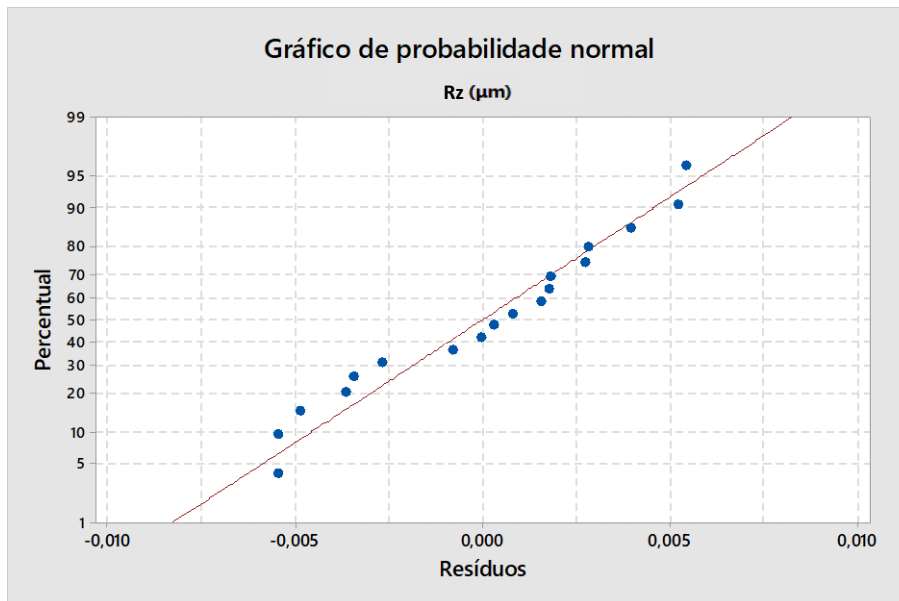


Figura 115 - Linha de tendência dos resultados da rugosidade R_z

Na Figura 116 está a linha de tendência da rugosidade R_{max} . Este é o caso em que o R^2 é o menor de todos os modelos estudados, com um valor de 48,37 %. Vários valores estão afastados da linha média, tornando este modelo o menos fiável de todos.

Observa-se ainda na Tabela 37 que, à semelhança do que aconteceu na rugosidade R_z , o valor-p mais baixo é de 0,056, relativo à potência da radiação.

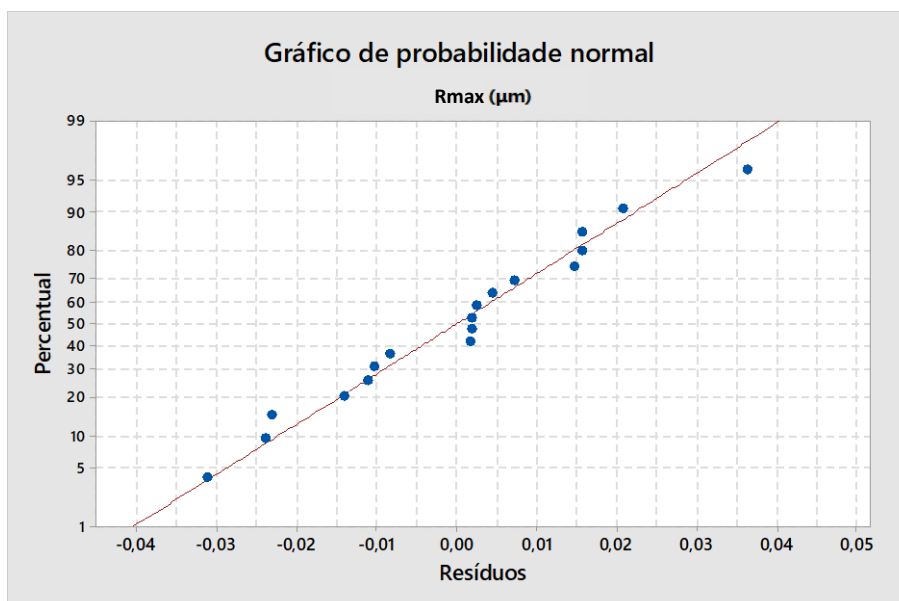


Figura 116 - Linha de tendência dos resultados da rugosidade R_{max}

Tabela 37 - Resultados estatísticos dos valores dos resultados da rugosidade R_{max}

Parâmetro	Valor-p	R^2
Pressão do gás (bar)	0,314	
Velocidade de corte (mm/min)	0,563	48,37 %
Potência de radiação (W)	0,035	

Na Tabela 38 e 39 estão as melhores condições de corte, resultantes das análises do método Taguchi e a ANOVA, respetivamente, das amostras em AISI 316L, cortadas no equipamento de laser CO_2 .

Tabela 38 – Melhores condições de corte laser, pelo método Taguchi

Método Taguchi		
Melhores condições de corte - resultados da rebarba		
Pressão do gás (bar)	Velocidade de corte (mm/min)	Potência de radiação (W)
10 (pr)	5300 (Vn)	3000 (Pr)
Melhores condições de corte - resultados da rugosidade R_a , R_z e R_{max}		
Pressão do gás (bar)	Velocidade de corte (mm/min)	Potência de radiação (W)
15 (pn)	4300 (Vr)	2800 (Prr)

Tabela 39 – Melhores parâmetros de corte laser, pela análise de variância

ANOVA
Parâmetro de corte mais significativo - resultados da rebarba
Pressão do gás (bar)
Parâmetro de corte mais significativo - resultados da rugosidade R_a
Pressão do gás (bar)
Parâmetro de corte mais significativo - resultados da rugosidade R_z e R_{max}
Potência de radiação (W)

O *software* Minitab[®], fornece-nos ainda gráficos de superfície 3D. Este tipo de gráficos complementam as análises Taguchi e ANOVA, pois, indicam-nos visualmente os picos máximos e mínimos de defeitos (rebarba e parâmetros de rugosidade), numa superfície

deformada, para os diferentes valores dos parâmetros de corte laser. No gráfico de superfície são inseridas três variáveis:

- No eixo Z, a resposta em função dos valores nos eixos X e Y;
- No eixo X, uma variável que influencia os valores do eixo Z;
- No eixo Y, outra variável que influencia os valores do eixo Z.

Neste estudo, o parâmetro mais significativo nos resultados da rebarba (eixo Z) foi a pressão do gás (eixo Y). Os gráficos de superfície, neste caso, serão da pressão do gás (eixo Y), em função da velocidade de corte (eixo X) e da potência de radiação (eixo X).

Na Figura 117, observa-se o gráfico de superfície da rebarba (eixo Z) em função, da pressão do gás (eixo Y) e da velocidade de corte (eixo X), constatando-se que:

- Como mostra a Tabela 38, a velocidade de corte de 5300 mm/min e a pressão do gás de 10 bar, conduzem ao valor mais baixo da rebarba. Como se observa é o pico mais baixo do gráfico;
- Quanto menor for a velocidade de corte e maior a pressão do gás, os valores de rebarba tendem a ser superiores;
- O pico máximo de rebarba é atingido com a velocidade de corte mais baixa e a pressão do gás mais alta. Constata-se o mesmo na referência [18].

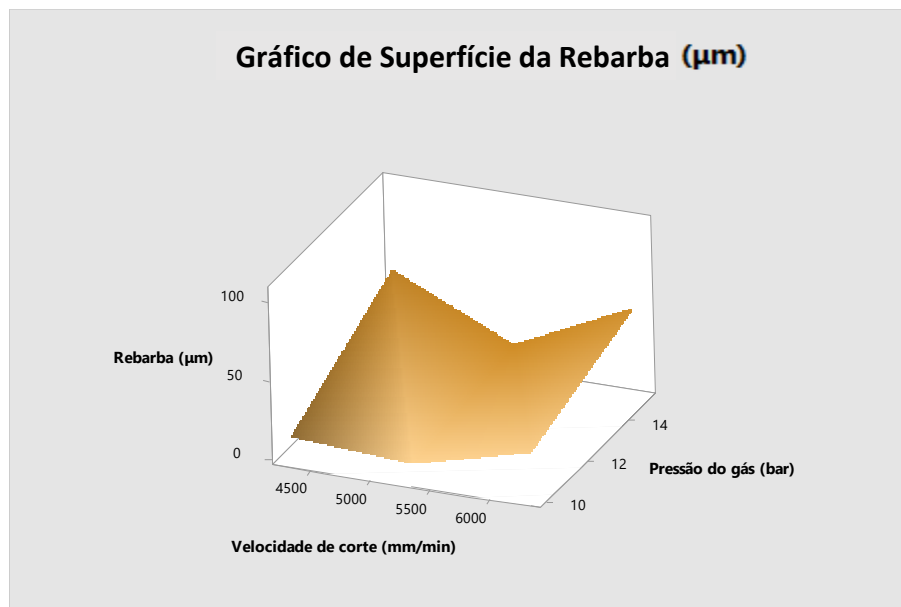


Figura 117 - Gráfico de superfície da rebarba, com a pressão do gás e a velocidade de corte

Já na Figura 118, observa-se o gráfico de superfície da rebarba (eixo Z) em função, da pressão do gás (eixo Y) e da potência de radiação (eixo X), constatando-se que:

- Como mostra a Tabela 38, a potência de radiação de 3000 W e a pressão do gás de 10 bar, conduzem ao valor mais baixo da rebarba, sendo o pico mais baixo do gráfico;
- Quanto menor for a potência de radiação e maior a pressão do gás, os valores de rebarba tendem a ser superiores;
- O pico máximo de rebarba é atingido com a potência de corte mais baixa e a pressão do gás mais elevada, embora, quanto maior for o valor da pressão do gás, melhor será a remoção de rebarbas. A potência de radiação com valores baixos, provoca sempre grandes níveis de rebarba, independentemente do valor da pressão do gás;
- Observa-se, como no gráfico da Figura 117, que é com valores intermédios que são atingidos os melhores resultados para minimizar o defeito da rebarba. Verifica-se o mesmo na referência [47].

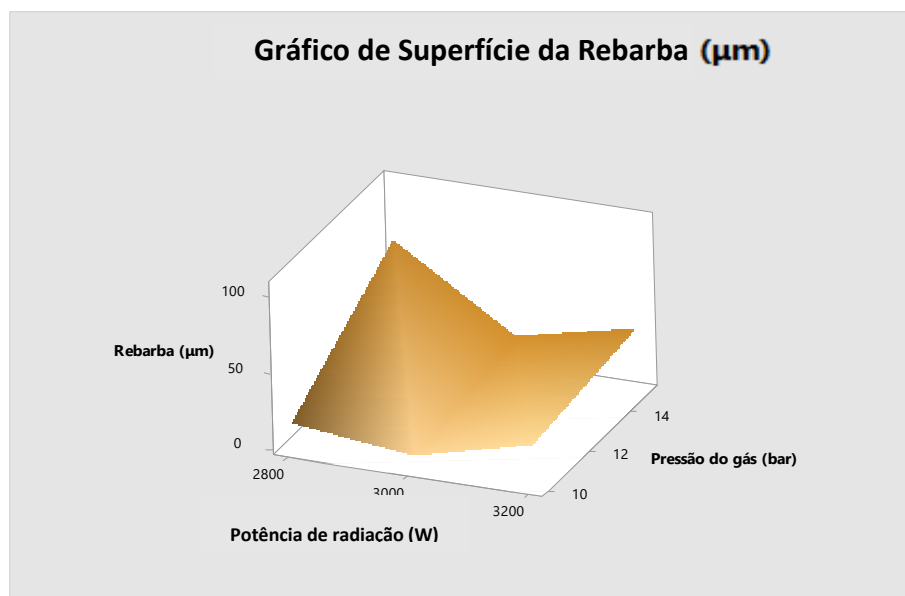


Figura 118 - Gráfico de superfície da rebarba, com a pressão do gás e a potência de radiação

Foi realizada a mesma análise para os parâmetros de rugosidade. Na rugosidade R_a , o parâmetro de corte mais significativo, foi também a pressão do gás.

Na Figura 119, observa-se o gráfico de superfície da rugosidade R_a (eixo Z), em função da pressão do gás (eixo Y) e da velocidade de corte (eixo X), constatando-se:

- Como mostra a Tabela 38, a velocidade de corte de 4300 mm/min e a pressão do gás de 15 bar, conduzem ao valor mais baixo da rugosidade R_a . Como se observa é o pico mais baixo do gráfico;
- Neste gráfico de superfície, não existe uma diferença tão grande de forma, facto que é explicável pela baixa variação dos resultados.

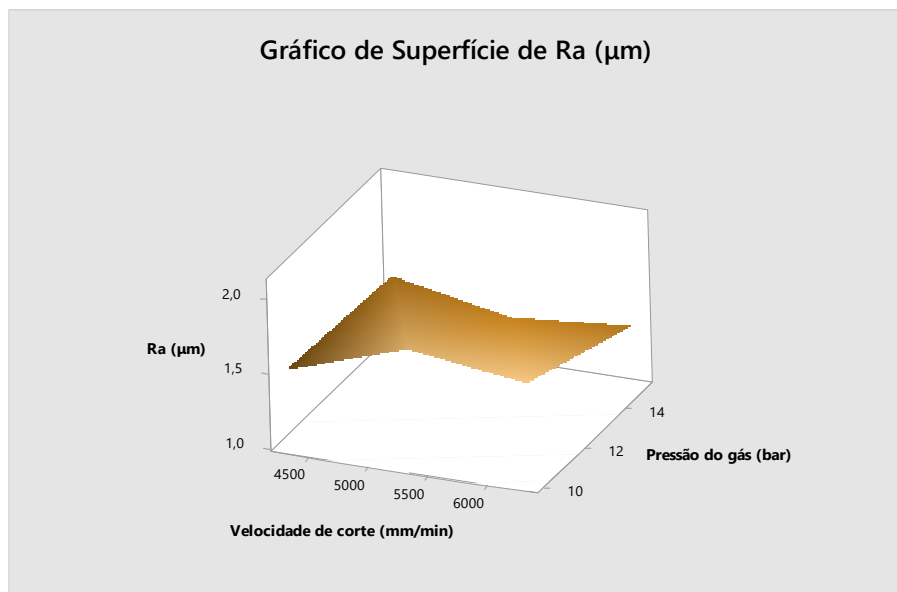


Figura 119 - Gráfico de superfície de R_a , com a pressão do gás e a velocidade de corte

Na Figura 120, observa-se o gráfico de superfície da rugosidade R_a (eixo Z), em função da pressão do gás (eixo Y) e da potência de radiação (eixo X), constatando-se que:

- Como mostra a Tabela 38, a potência de radiação de 2800 W e a pressão do gás de 15 bar, conduzem ao valor mais baixo da rugosidade R_a . Como se observa, é o pico mais baixo do gráfico;
- Neste caso, observa-se um pico máximo destacado, correspondente à potência de radiação de 3000 W e à pressão do gás de 10 bar;
- Independentemente do valor da pressão do gás, os melhores resultados para a rugosidade R_a estão concentrados na zona onde a potência de radiação é a mais baixa de todas;
- Com a pressão do gás a aumentar, também se verificam algumas zonas onde a rugosidade R_a aumenta. Constata-se o mesmo na referência [24]
- Na zona intermédia do gráfico, existe uma forma com altura mais elevada, que corresponde a piores resultados da rugosidade R_a .

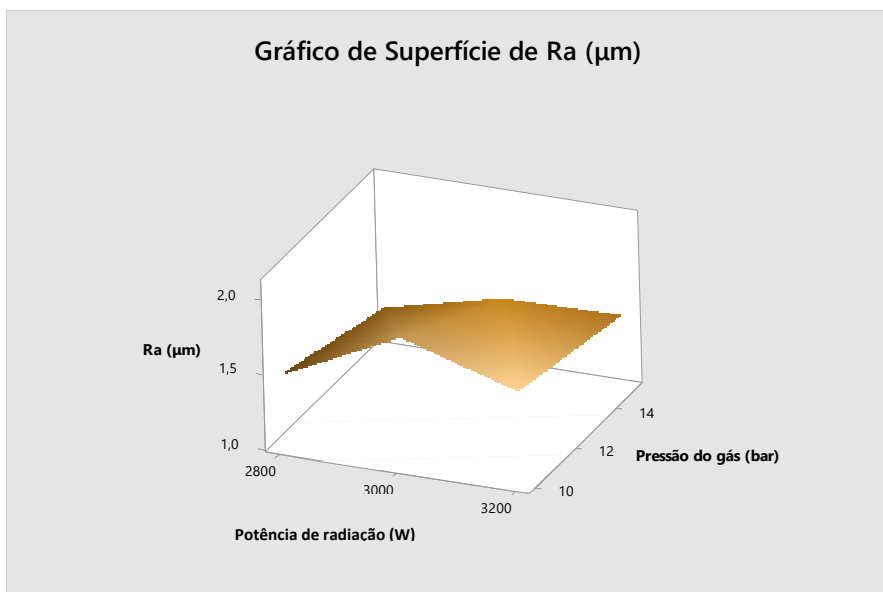


Figura 120 - Gráfico de superfície de R_a , com a pressão do gás e a potência de radiação

A mesma análise foi feita para os parâmetros de rugosidade R_z e R_{max} . Estes dois parâmetros vão ser analisados em conjunto, porque os resultados são idênticos, tanto nos valores dos parâmetros de corte laser, como na importância de cada um. Para estes dois parâmetros de rugosidade, a potência de radiação foi o parâmetro mais significativo.

Na Figura 121, observa-se o gráfico de superfície das rugosidades R_z e R_{max} (eixo Z), em função da potência de radiação (eixo Y) e da velocidade de corte (eixo X), constatando-se que:

- Como patente na Tabela 38, a velocidade de corte de 4300 mm/min e a potência de radiação de 2800 W, conduzem ao valor mais baixo das rugosidades R_z e R_{max} . Como se observa, é o pico mais baixo do gráfico;
- Neste gráfico de superfície, o pico máximo de nível de rugosidade é o correspondente à velocidade de corte de 5300 mm/min e a uma potência de radiação de 3000 W;
- Relacionando o que se observou na Figura 120, neste gráfico é também perceptível que na zona onde a potência de radiação é a mais baixa de todas, os valores destes dois tipos de rugosidade atingem os melhores níveis de qualidade;
- Os parâmetros de rugosidade R_a , R_z e R_{max} , apesar de serem diferentes, estão em sintonia nas melhores condições de corte.

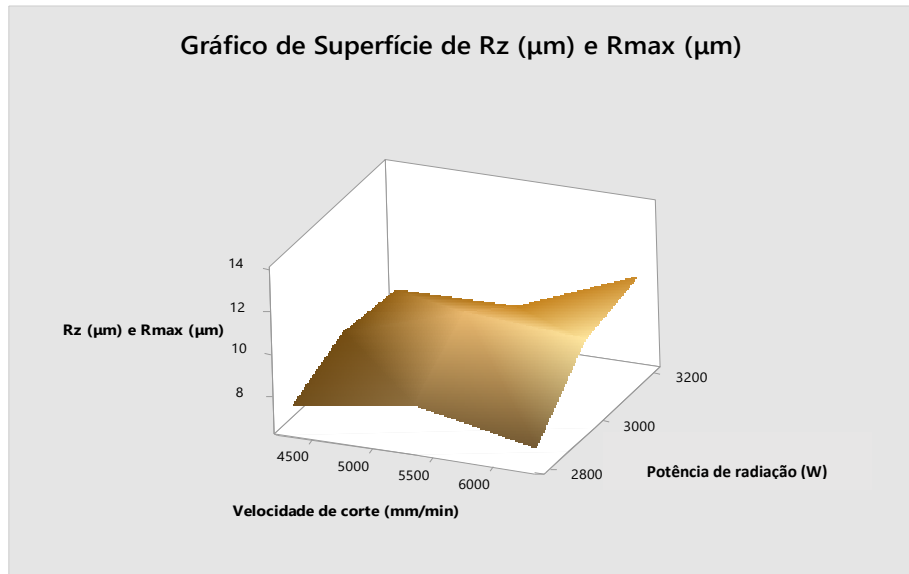


Figura 121 - Gráfico de superfície de Rz e R_{max}, com a potência de radiação e velocidade de corte

Na Figura 122, observa-se o gráfico de superfície das rugosidades Rz e R_{max} (eixo Z) em função, da potência da radiação (eixo Y) e da pressão do gás (eixo X), constatando-se que:

- Como foi visto na Tabela 38, a potência de radiação de 2800 W mm/min e a pressão do gás de 15 bar, conduzem ao valor mais baixo das rugosidades Rz e R_{max}. Como se observa, é o pico mais baixo do gráfico;
- O pico máximo dos níveis de rugosidade é o correspondente à potência de radiação de 3000 W, com a pressão do gás em 10 bar, o valor mais baixo.

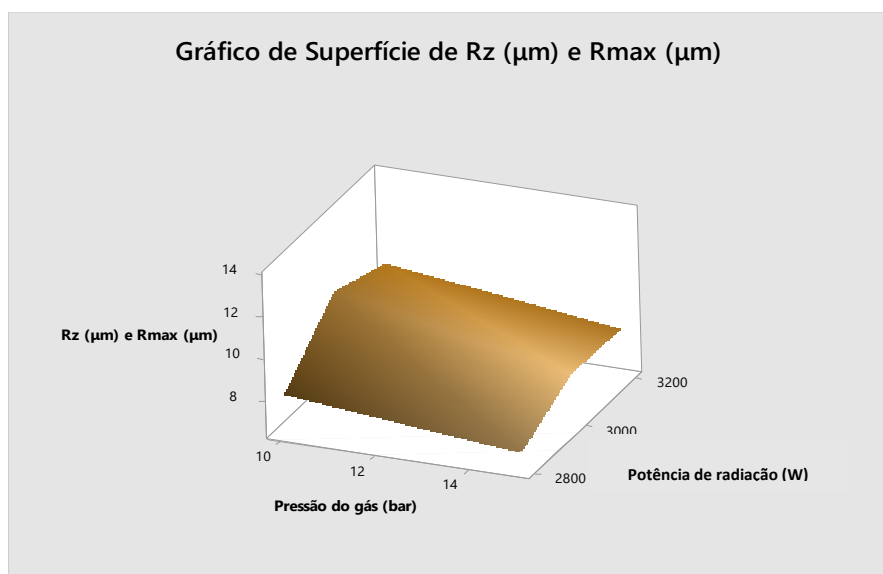


Figura 122 - Gráfico de superfície da Rz e Rmax, com potência de radiação e pressão do gás

3.10 Análise estatística das amostras em AISI 316L – laser de fibra ótica

3.10.1 Método Taguchi

Na Tabela 40 estão os resultados relativos às amostras em AISI 316L, cortadas no laser do tipo fibra ótica.

Tabela 40 - Valores das amostras em AISI 316L, cortadas no laser do tipo fibra ótica

AISI 316L (2 mm) – Equipamento de fibra ótica							
Amostra	Potência (W)	Velocidade (mm/min)	Pressão (bar)	Rebarba (μm)	R_a (μm)	R_z (μm)	R_{max} (μm)
PnVhpn	4000	25000	15	53	1,38	7,90	9,72
PrVhpn	3500	25000	15	136	1,27	7,80	9,40
PrrVhpn	1500	25000	15	18	1,06	7,12	9,70
PnVnpr	4000	20000	15	79	1,73	9,66	12,1
PrVnpr	3500	20000	15	78	1,09	6,78	8,84
PrrVnpr	1500	20000	15	65	2,42	13,1	17,2
PnVrpn	4000	10000	15	75	2,83	16,0	20,7
PrVrpn	3500	10000	15	61	2,19	11,2	14,3
PrrVrpn	1500	10000	15	32	3,19	17,5	21,9
PnVhpr	4000	25000	7	803	1,65	8,67	10,9
PrVhpr	3500	25000	7	950	2,03	11,4	14,9
PrrVhpr	1500	25000	7	703	2,73	13,6	17,7
PnVnpr	4000	20000	7	668	2,08	11,1	14,3
PrVnpr	3500	20000	7	443	2,15	13,6	26,0
PrrVnpr	1500	20000	7	826	2,16	11,0	14,1
PnVrpr	4000	10000	7	707	2,65	15,1	20,8
PrVrpr	3500	10000	7	39	2,09	12,1	15,8
PrrVrpr	1500	10000	7	675	3,65	20,6	24,1

Respeitando novamente a categoria do rácio S/N, em que se indica no DOE que “o menor é o melhor, sendo que, quanto maior o rácio S/N, melhor é o parâmetro. Na Figura 123 está o gráfico S/N dos resultados da rebarba. Neste caso, os melhores valores para um menor nível de rugosidade são:

- Pressão do gás (pn) - 15 bar;
- Velocidade de corte inferior (Vr) - 10000 mm/min;
- Potência de radiação reduzida uma vez (Pr) - 3500 W

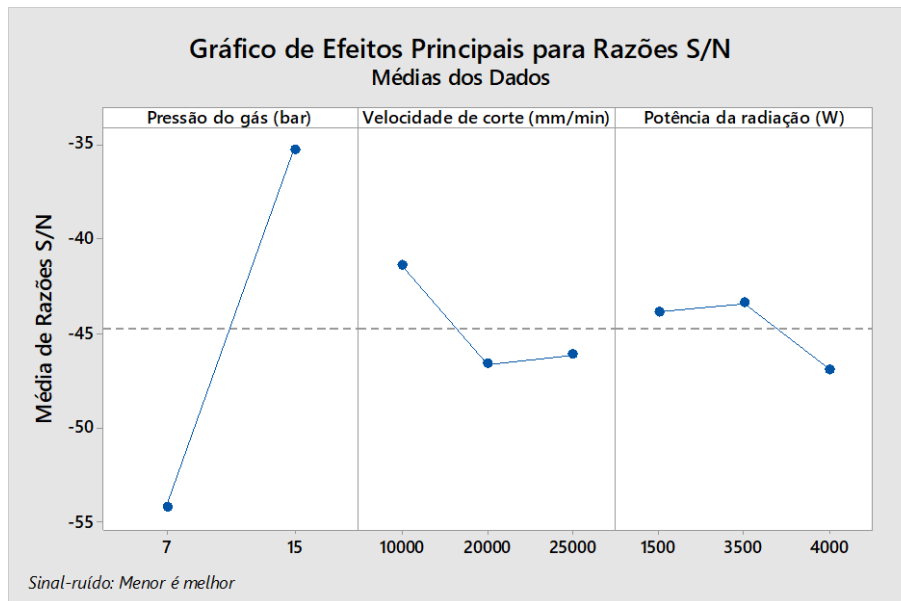


Figura 123 - Gráfico do rácio S/N, dos resultados da rebarba

Na Figura 124 está o gráfico S/N dos resultados da rugosidade R_a . Neste caso, os melhores valores para um menor nível de rugosidade são:

- Pressão do gás (p_n) - 15 bar;
- Velocidade de corte superior (V_h) - 25000 mm/min;
- Potência de radiação reduzida uma vez (P_r) - 3500 W.

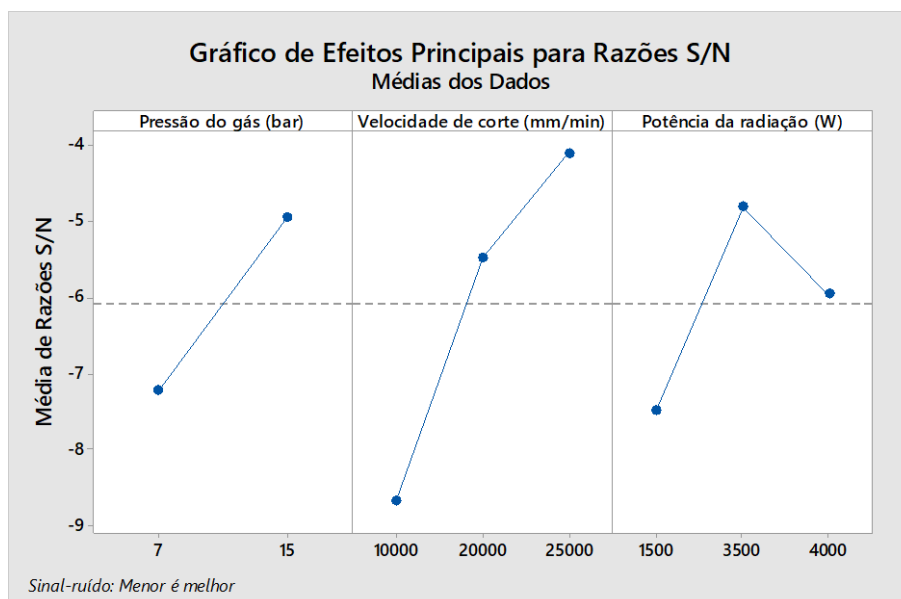


Figura 124 - Gráfico do rácio S/N, dos resultados da rugosidade R_a

Na Figura 125 está o gráfico S/N dos resultados da rugosidade R_z . Os melhores resultados para um menor nível de rugosidade continuam a ser os mesmos da rugosidade R_a .

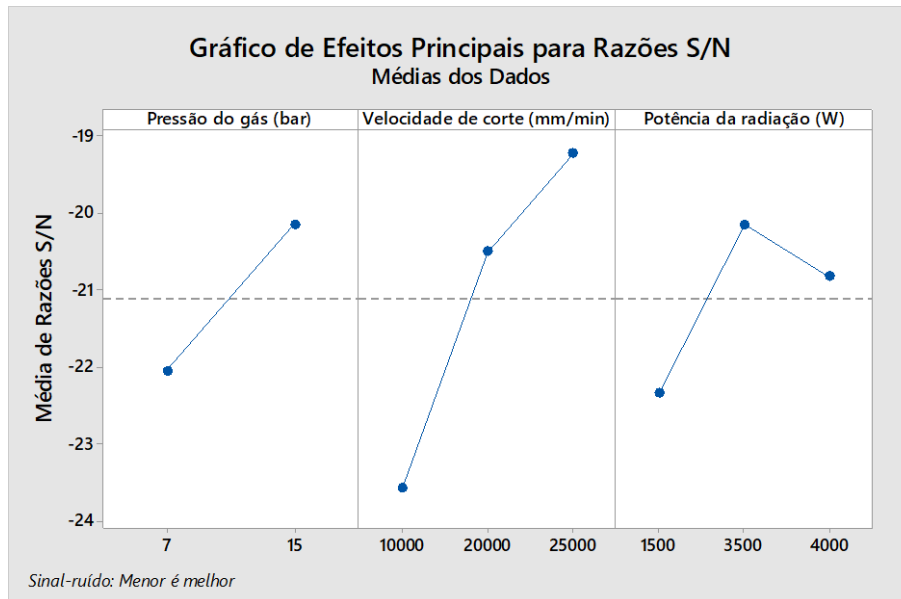


Figura 125 - Gráfico do rácio S/N, dos resultados da rugosidade R_z

Na Figura 126 está o gráfico S/N dos resultados da rugosidade R_{max} . Mantém-se a tendência dos outros dois parâmetros de rugosidade, para a obtenção do menor nível de rugosidade.

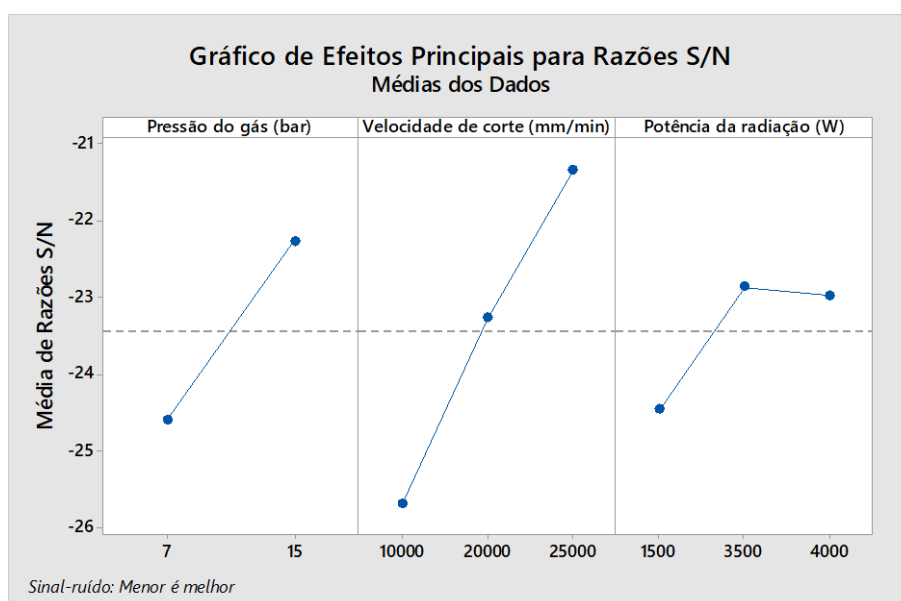


Figura 126 - Gráfico do rácio S/N, dos resultados da rugosidade R_{max}

3.10.2 Análise da Variância (ANOVA)

A análise da variância mantém-se a mesma do estudo anterior, com o gráfico da linha de tendência, acompanhado de uma análise do valor-p, que indica a importância de cada parâmetro para os diferentes resultados.

Na Figura 127 está a linha de tendência para os resultados da rebarba. Observam-se alguns valores dispersos, que acabam por ser excluídos da análise dada a sua discrepância, relativamente aos restantes. Neste caso, o R^2 é de 78,57 %, indicando que é um modelo fiável, mas mesmo assim pode ser aperfeiçoado.

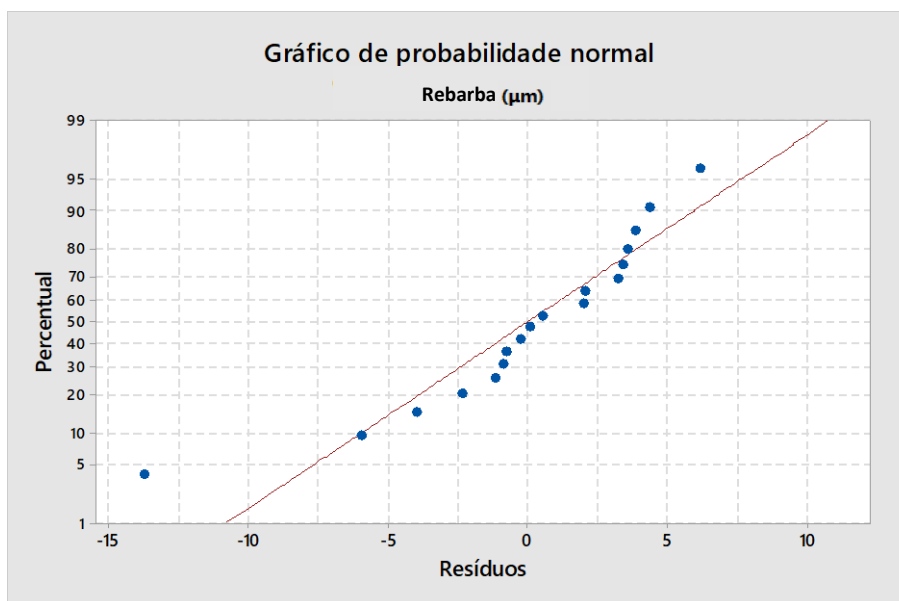


Figura 127 - Linha de tendência dos resultados da rebarba

Na Tabela 41, constata-se que o valor-p mais baixo é de 0,001, o que indica que a pressão do gás é o parâmetro de maior importância, nos resultados da rebarba.

Tabela 41 - Resultados estatísticos dos valores dos resultados da rebarba

Parâmetro	Valor-p	R^2
Pressão do gás (bar)	0,001	78,57 %
Velocidade de corte (mm/min)	0,350	
Potência de radiação (W)	0,605	

Na Figura 128, está a linha de tendência para os resultados da rugosidade R_a . Neste caso, o R^2 é de 74,55 %, indicando que é um modelo fiável, podendo ainda ser melhorado.

Já na Tabela 42, o valor-p mais baixo é de 0,002, relativo à velocidade de corte. Este parâmetro é o mais importante na alteração dos valores de rugosidade R_a .

Tabela 42 - Resultados estatísticos dos valores dos resultados da rugosidade R_a

Parâmetro	Valor-p	R^2
Pressão do gás (bar)	0,046	74,55 %
Velocidade de corte (mm/min)	0,002	
Potência de radiação (W)	0,034	

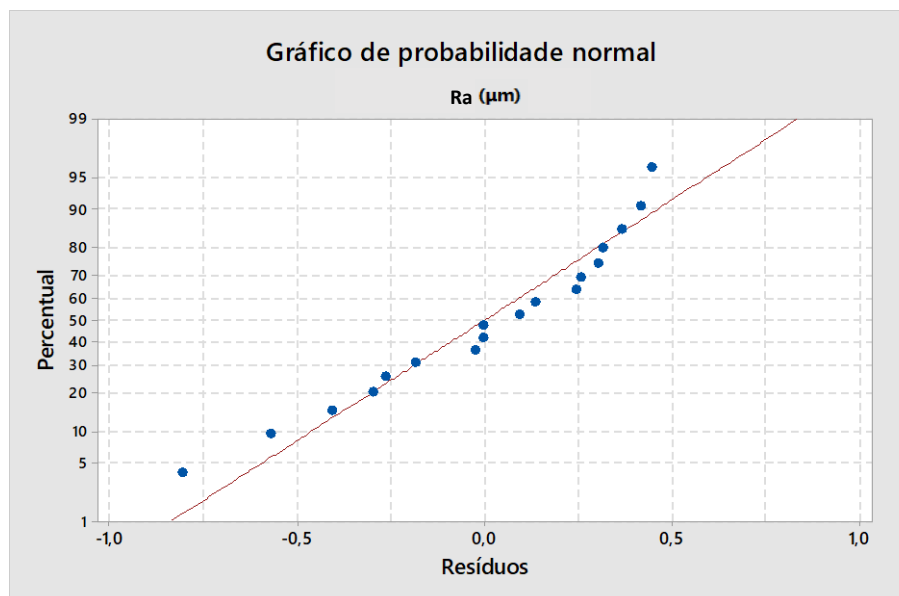


Figura 128 - Linha de tendência dos resultados da rugosidade R_a

Na Figura 129, está a linha de tendência para os resultados da rugosidade R_z . Neste caso, o R^2 é de 74,49 %, mantendo-se a lógica de um modelo fiável, à semelhança dos anteriores.

Já na Tabela 43, o valor-p mais baixo é de 0,002, relativo à velocidade de corte. Este parâmetro, como na rugosidade R_a , é o mais importante na alteração dos valores de rugosidade R_z .

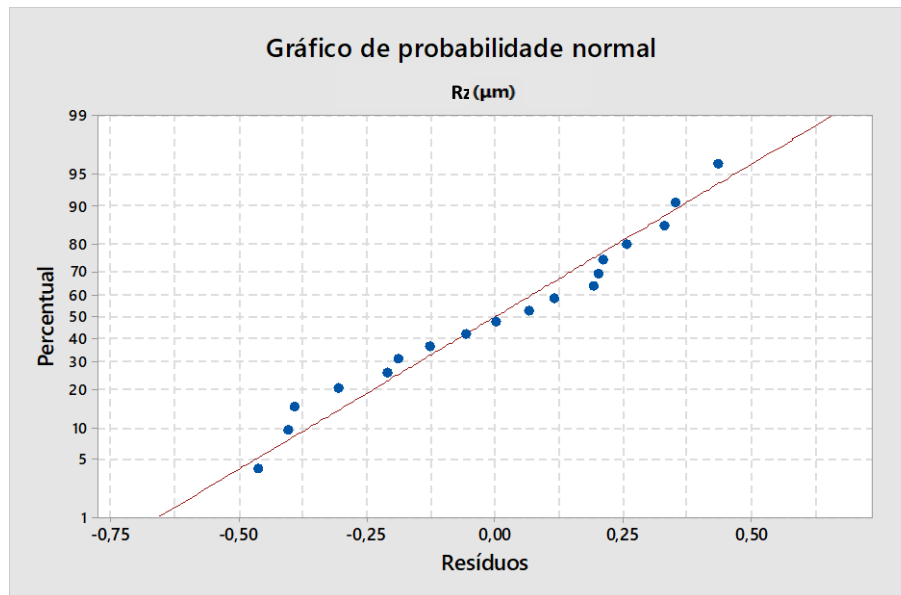


Figura 129 - Linha de tendência dos resultados da rugosidade R_z

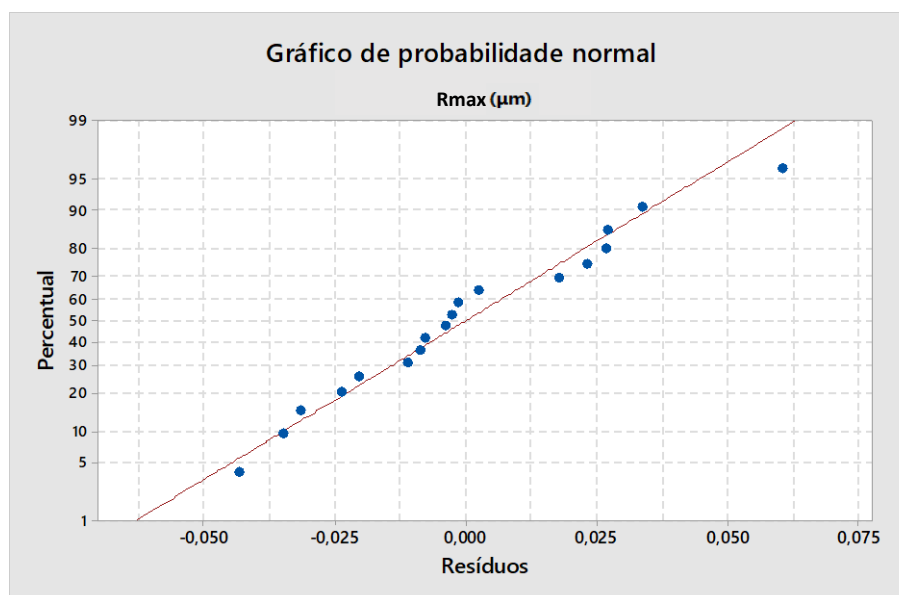
Tabela 43 - Resultados estatísticos dos valores dos resultados da rugosidade R_z

Parâmetro	Valor-p	R^2
Pressão do gás (bar)	0,049	
Velocidade de corte (mm/min)	0,002	72,49 %
Potência de radiação (W)	0,093	

Na Figura 130, está a linha de tendência para os resultados da rugosidade R_{max} . Neste caso, o R^2 é de 63,22 %. Nesta situação, alguns valores estão afastados da linha média, o que provocou um abaixamento do R^2 .

Este modelo pode não ser o mais adequado para este tipo de rugosidade, apesar de o modo de medição ter sido exatamente o mesmo da rugosidade R_a e R_z . Esta situação, pode ser explicada pela existência de alguns valores mais distantes da média de todos os valores.

Já na Tabela 44, o valor-p mais baixo é de 0,013, relativo à velocidade de corte. Este parâmetro, como na R_a e R_z , é o mais importante na alteração dos valores de rugosidade R_{max} .

Figura 130 - Linha de tendência dos resultados da rugosidade R_{max} Tabela 44 - Resultados estatísticos dos valores dos resultados da rugosidade R_{max}

Parâmetro	Valor-p	R^2
Pressão do gás (bar)	0,033	
Velocidade de corte (mm/min)	0,013	63,22 %
Potência de radiação (W)	0,372	

Na Tabela 45 e 46 estão as melhores condições de corte, das análises do método Taguchi e ANOVA, respectivamente, das amostras em AISI 316L, cortadas no equipamento de laser de fibra ótica.

Tabela 45 – Melhores condições de corte, pelo método Taguchi

Método Taguchi

Melhores condições de corte - resultados da rebarba

Pressão do gás (bar)	Velocidade de corte (mm/min)	Potência de radiação (W)
15 (pn)	10000 (Vn)	3500 (Pr)

Melhores condições de corte - resultados da rugosidade R_a , R_z e R_{max}

Pressão do gás (bar)	Velocidade de corte (mm/min)	Potência de radiação (W)
15 (pn)	25000 (Vh)	3500 (Pr)

Tabela 46 – Melhores parâmetros de corte laser, pela análise de variância

ANOVA	
Parâmetro de corte mais significativo - resultados da rebarba	
Pressão do gás (bar)	
Parâmetro de corte mais significativo - resultados da rugosidade R_a, R_z e R_{max}	
Velocidade de corte (mm/min)	

Neste estudo, também se recorreu aos gráficos de superfície 3D para complementar as análises Taguchi e ANOVA. O parâmetro mais significativo nos resultados da rebarba continua a ser a pressão do gás, indicando já uma tendência de significância deste parâmetro para os resultados da rebarba. Sendo a pressão do gás o parâmetro de maior importância, analisa-se os resultados deste parâmetro em relação aos restantes.

Na Figura 131, observa-se o gráfico de superfície da rebarba (eixo Z), em função da pressão do gás (eixo Y) e da velocidade de corte (eixo X), constatando-se que:

- Como mostra a Tabela 45, a velocidade de corte de 10000 mm/min e a pressão do gás de 15 bar, conduzem ao valor mais baixo da rebarba. Como se observa é o pico mais baixo do gráfico;
- Neste gráfico, a forma da superfície apresenta-se com poucos picos, não sendo possível por aqui indicar qual o pico máximo de rebarba. O gráfico do rácio S/N, indica-nos esse valor, que corresponde à velocidade de corte de 20000 mm/min e uma pressão do gás de 7 bar;
- Ao observar a Tabela 39, percebe-se que existem duas séries de valores bastante distintas. Uma série com valores mais baixos de rebarba, e outra série com valores bastante altos. Esta diferença, provoca uma forma de superfície do gráfico 3D visualmente menos perceptível. Para este estudo, o mais indicado é a análise dos gráficos de rácio S/N;
- Ainda é possível observar uma tendência dos valores da rebarba irem baixando, com a velocidade de corte no seu nível mais baixo, mas com a pressão do gás a aumentar;
- Observa-se uma inclinação da forma da superfície e, conseqüentemente, piores níveis de rebarba, nos valores da pressão do gás mais baixos.

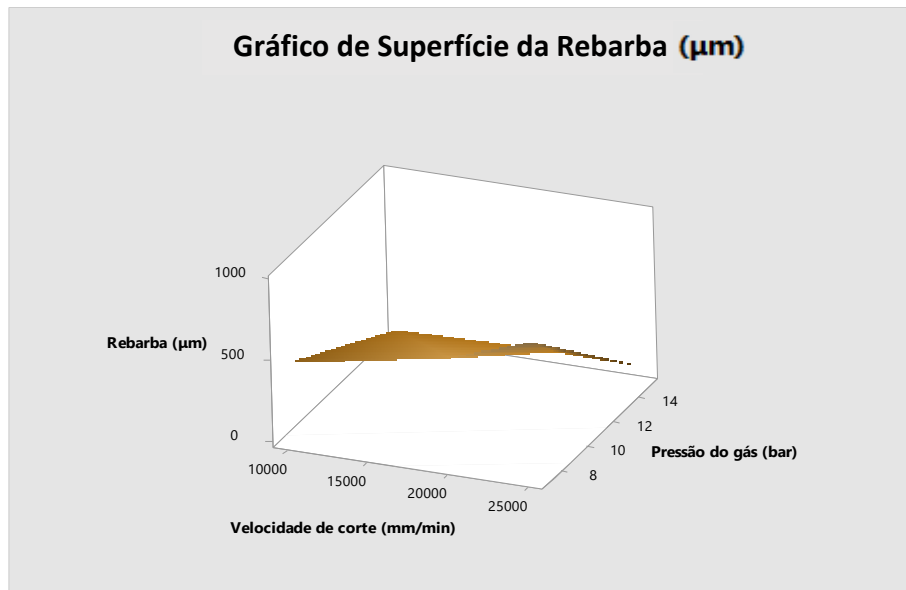


Figura 131 - Gráfico de superfície da rebarba, com a pressão do gás e a velocidade de corte

Na Figura 132, observa-se o gráfico de superfície da rebarba (eixo Z), em função da pressão do gás (eixo Y) e da potência de radiação (eixo X), constatando-se que:

- À semelhança do que aconteceu no gráfico anterior da Figura 131, a forma da superfície apresenta-se com poucos picos, não sendo possível por aqui indicar qual o pico mínimo ou máximo de rebarba. O gráfico do rácio S/N, indica-nos esses valores de forma mais explícita;
- Nestas amostras, os resultados da rebarba foram muito díspares e com valores, alguns deles, bastante altos, em comparação com outros bastante baixos;
- Ainda assim, observa-se que a tendência de minimizar a rebarba, segue pelo caminho da pressão do gás a 15 bar e da potência de radiação de 3500 W;
- O facto de a escala do gráfico estar aumentada, devido à discrepância dos resultados da rebarba, faz com que o gráfico perca a possibilidade de observar de forma mais nítida a existência de picos máximos ou mínimos;
- Esta forma ainda é de mais difícil análise do que a forma da superfície do gráfico da Figura 131. Mas observa-se novamente, uma ligeira inclinação da forma, correspondente a menores valores de rebarba, à medida que a pressão do gás vai aumentando.

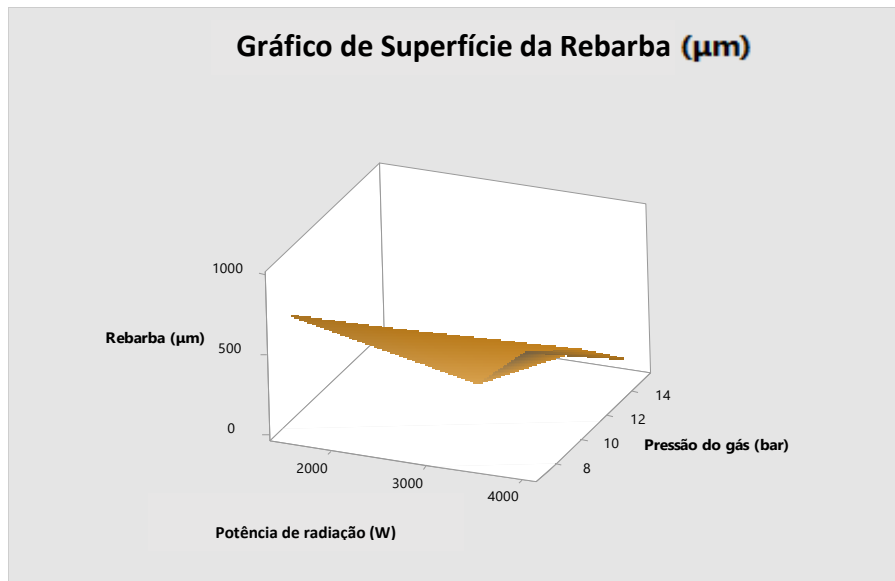


Figura 132 - Gráfico de superfície da rebarba, com a pressão do gás e a potência de radiação

A mesma análise foi feita para os parâmetros de rugosidade R_a , R_z e R_{max} . Estes parâmetros de rugosidade vão ser analisados em conjunto, porque os resultados são idênticos, tanto nos valores dos parâmetros de corte laser, como na importância de cada um. Para estes parâmetros de rugosidade, a velocidade de corte foi o parâmetro mais significativo. A velocidade de corte será então analisada, em relação aos restantes parâmetros de corte laser.

Na Figura 133, observa-se o gráfico de superfície da rugosidade (eixo Z), em função da velocidade de corte (eixo Y) e da pressão do gás (eixo X), constatando-se que:

- Como mostra a Tabela 45, a velocidade de corte de 25000 mm/min e a pressão do gás de 15 bar, conduzem ao valor mais baixo para as rugosidades. Como se observa, é o pico mais baixo do gráfico;
- Pela forma desta superfície, não é possível identificar o pico máximo. Novamente, só com recurso aos gráficos do rácio S/N, será possível indicar de forma mais evidente os valores dos parâmetros;
- Existe uma tendência para os valores de rugosidade baixarem, à medida que se aumenta a velocidade de corte, juntamente com o aumento da pressão do gás. Verifica-se o mesmo na referência [24];
- Pela forma da superfície, pode-se também concluir que nos valores de pressão do gás mais baixos, independentemente da velocidade de corte, estão situados os valores superiores de rugosidade.

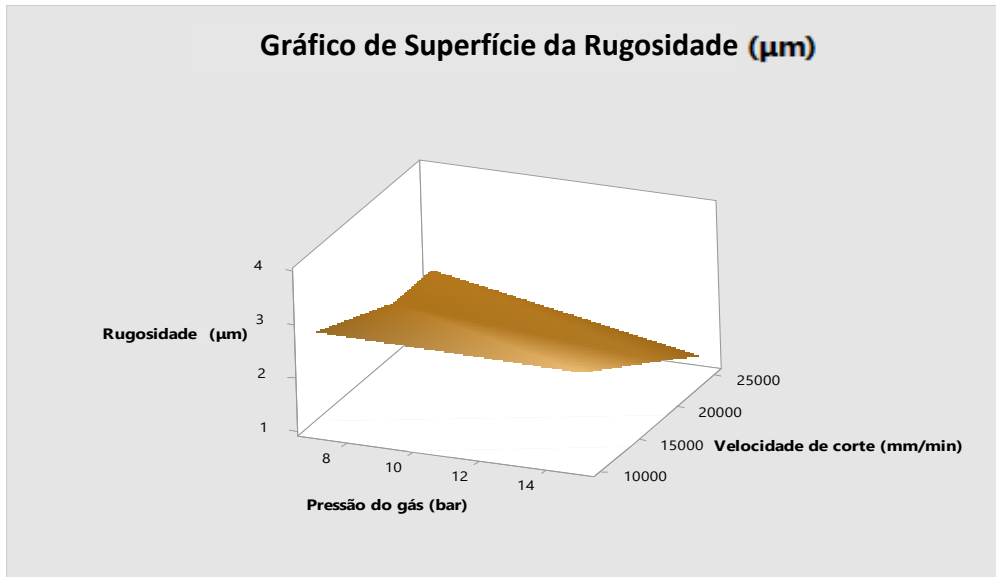


Figura 133 - Gráfico de superfície da rugosidade, com a velocidade de corte e a pressão do gás

Na Figura 134, observa-se o gráfico de superfície da rugosidade (eixo Z), em função da velocidade de corte (eixo Y) e da potência de radiação (eixo X), constatando-se:

- Como se visualiza na Tabela 45, a velocidade de corte de 25000 mm/min e a potência de radiação de 3500 W, conduzem ao valor mais baixo para as rugosidades. Como se observa, é o pico mais baixo do gráfico;
- Aqui, neste gráfico, já é possível identificar o pico máximo de rugosidade, que é atingido na potência da radiação de 1500 W, com a velocidade de corte de 10000 mm/min.

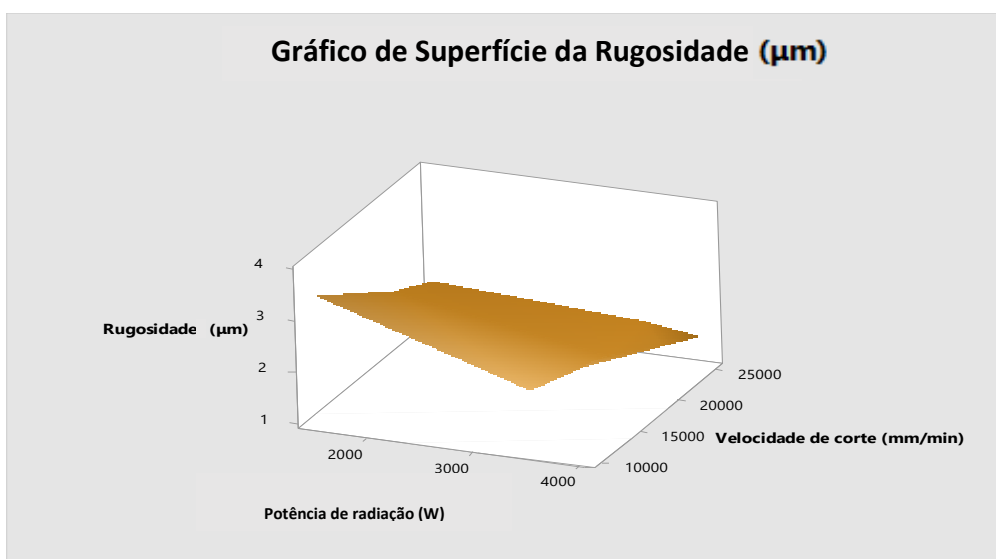


Figura 134 - Gráfico de superfície da rugosidade, com a velocidade de corte e a potência de radiação

3.11 Análise estatística das amostras em St12 – laser CO₂

3.11.1 Método Taguchi

Na Tabela 47 estão os valores relativos às amostras de St12, cortadas no laser do tipo CO₂. Recorreu-se de novo ao método Taguchi.

Tabela 47 - Valores das amostras em St12, cortadas no laser do tipo CO₂

St12 (2 mm) – Equipamento de CO ₂							
Amostra	Potência (W)	Velocidade (mm/min)	Pressão (bar)	Rebarba (μm)	R _a (μm)	R _z (μm)	R _{max} (μm)
PnVhpn	1400	6500	1,2	122	0,930	4,31	8,28
PrVhpn	1000	6500	1,2	936	2,15	16,4	35,3
PrrVhpn	800	6500	1,2	229	1,38	7,19	12,7
PnVnpr	1400	5000	1,2	7	1,61	5,39	8,05
PrVnpr	1000	5000	1,2	4	1,15	4,38	5,44
PrrVnpr	800	5000	1,2	14	2,09	11,6	13,6
PnVrpn	1400	3000	1,2	22	8,19	37,6	41,5
PrVrpn	1000	3000	1,2	118	4,23	18,8	20,2
PrrVrpn	800	3000	1,2	68	4,16	19,3	21,2
PnVhpr	1400	6500	0,8	10	1,02	4,97	6,48
PrVhpr	1000	6500	0,8	43	0,556	3,15	5,27
PrrVhpr	800	6500	0,8	68	1,08	7,85	11,9
PnVnpr	1400	5000	0,8	22	0,797	4,09	5,26
PrVnpr	1000	5000	0,8	13	0,835	3,77	4,56
PrrVnpr	800	5000	0,8	36	1,00	4,39	6,72
PnVrpr	1400	3000	0,8	25	3,55	17,7	21,3
PrVrpr	1000	3000	0,8	36	1,83	10,0	13,7
PrrVrpr	800	3000	0,8	68	3,13	14,8	17,4

Na Figura 135 está o gráfico do rácio S/N. Para este tipo de amostras, os melhores resultados de rebarba são obtidos com:

- Pressão do gás (pr) - 0,8 bar;
- Velocidade de corte recomendada (Vn) - 5000 mm/min;
- Potência de radiação (Pn) - 1400 W.

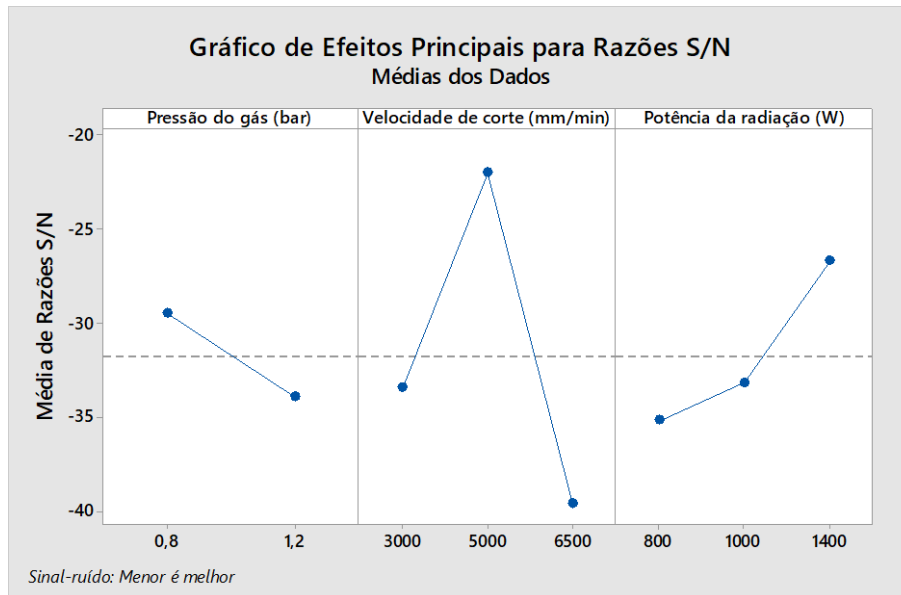


Figura 135 - Gráfico do rácio S/N, dos resultados da rebarba

Na Figura 136 está o gráfico do rácio S/N, para os resultados da rugosidade R_a . Os melhores parâmetros são:

- Pressão do gás (pr) - 0,8 bar;
- Velocidade de corte superior (Vh) - 6500 mm/min;
- Potência de radiação reduzida (Pr) - 1000 W.

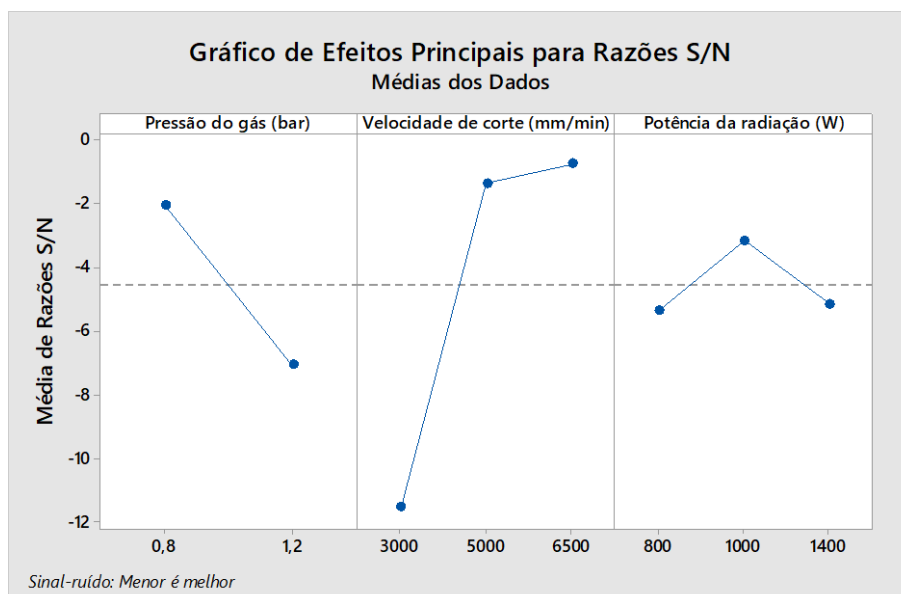


Figura 136 - Gráfico do rácio S/N, dos resultados da rugosidade R_a

Nas Figuras 137 e 138 estão os gráficos dos raios S/N, para os resultados das rugosidades R_z e R_{max} , respectivamente. Os melhores resultados para estas duas rugosidades são:

- Pressão do gás (pr) - 0,8 bar;
- Velocidade de corte (Vn) - 5000 mm/min;
- Potência de radiação reduzida (Pr) - 1000 W.

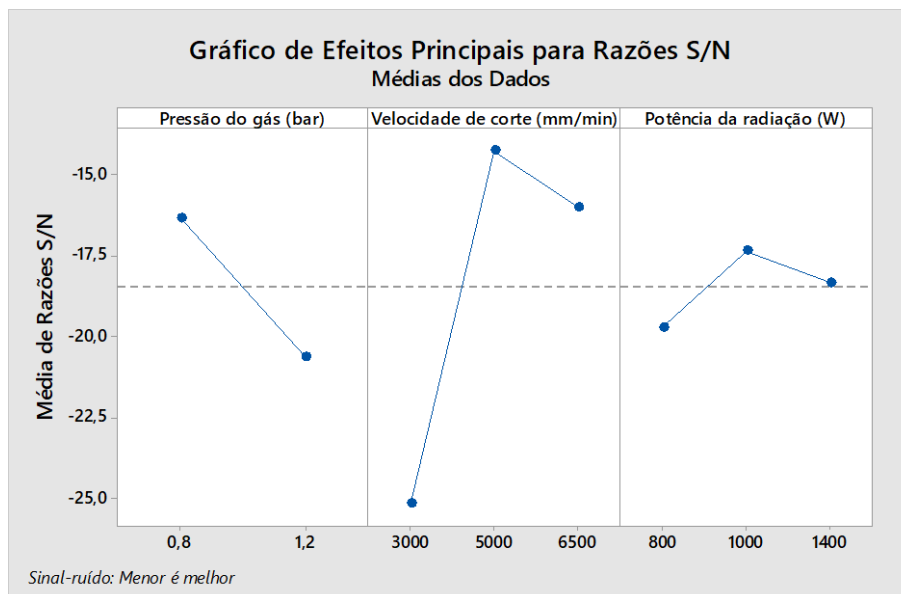


Figura 137 - Gráfico do rácio S/N, dos resultados da rugosidade R_z

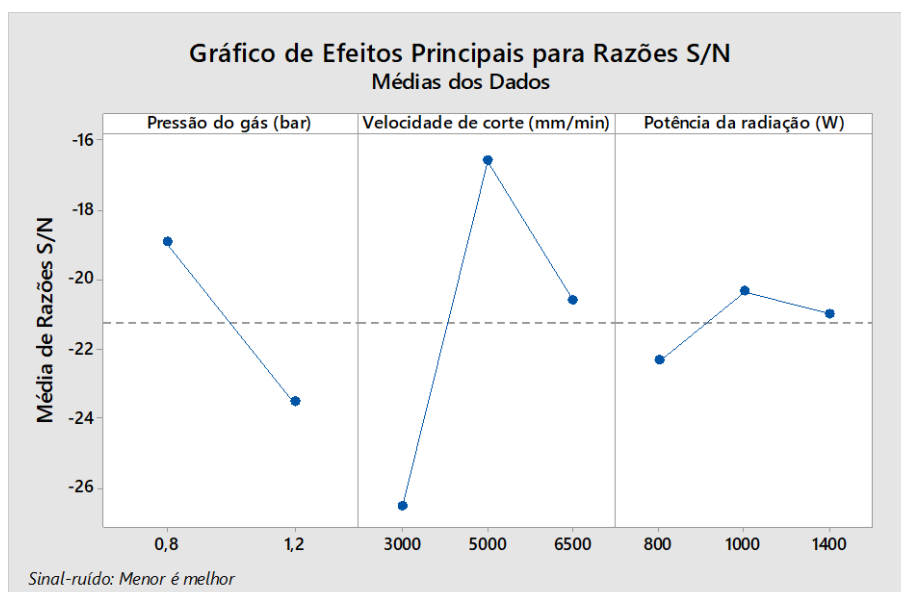


Figura 138 - Gráfico do rácio S/N, dos resultados da rugosidade R_{max}

3.11.2 Análise da Variância (ANOVA)

Na Figura 139, está a linha de tendência para os resultados da rebarba. Neste caso, o R^2 é de 56,91 %. Nesta situação, alguns valores estão afastados da linha normal, o que provocou um R^2 baixo, indicando que o modelo ainda pode não ser o mais adequado.

Já na Tabela 48, o valor-p mais baixo é de 0,016, relativo à velocidade de corte.

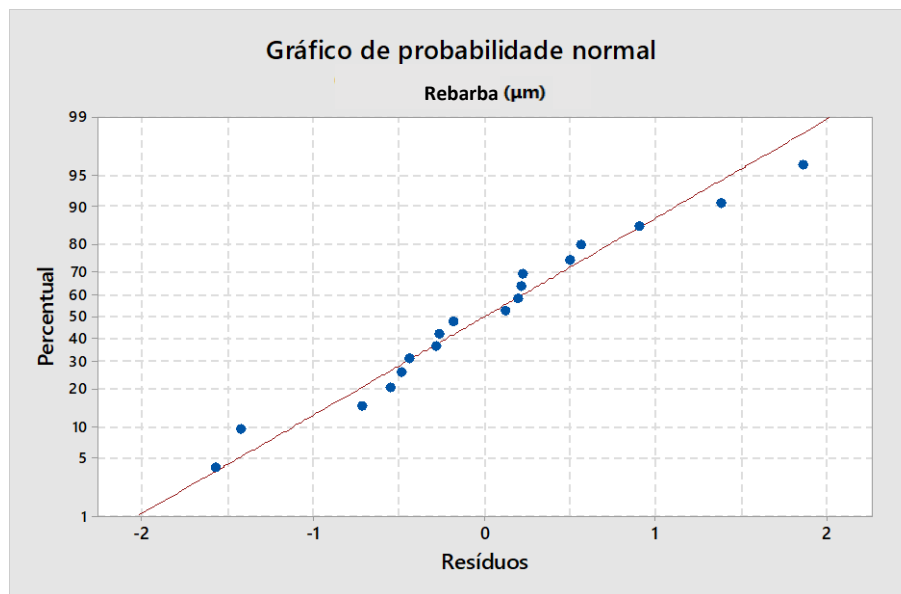


Figura 139 - Linha de tendência dos resultados da rebarba

Tabela 48 - Resultados estatísticos dos valores dos resultados da rebarba

Parâmetro	Valor-p	R^2
Pressão do gás (bar)	0,317	
Velocidade de corte (mm/min)	0,016	56,91 %
Potência de radiação (W)	0,271	

Na Figura 140, está a linha de tendência para os resultados da rugosidade R_a . Neste caso, o R^2 é de 86,78 %, sendo o melhor coeficiente de todos os estudos analisados, indicando que é um modelo fiável.

Na Tabela 49, o valor-p mais baixo é de 0,001, relativo à velocidade de corte. A velocidade de corte começa a destacar-se em muitos estudos como o principal parâmetro a contribuir para mudança no valor das rugosidades.

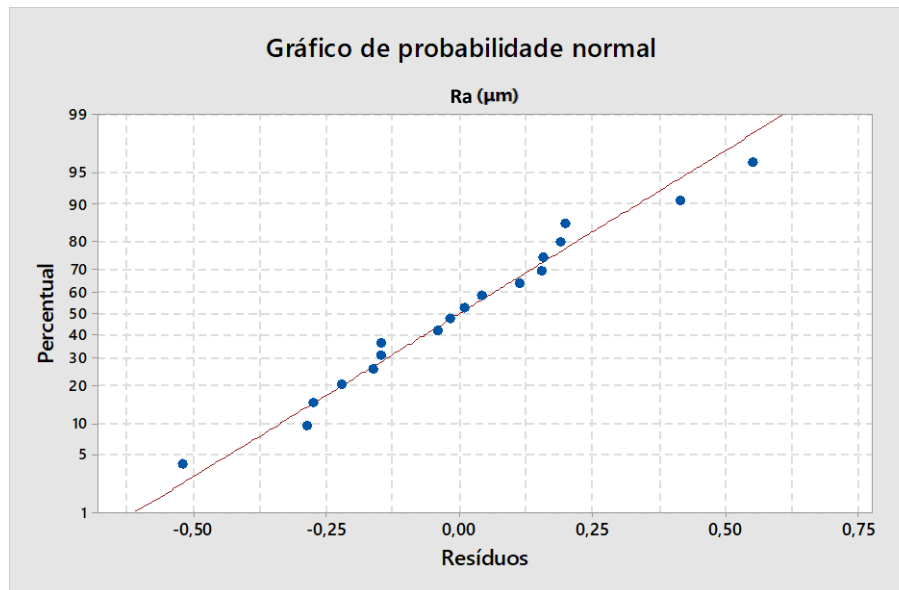


Figura 140 - Linha de tendência dos resultados da rugosidade R_a

Tabela 49 - Resultados estatísticos dos valores dos resultados da rugosidade R_a

Parâmetro	Valor-p	R^2
Pressão do gás (bar)	0,002	
Velocidade de corte (mm/min)	0,001	86,78 %
Potência da radiação (W)	0,330	

Na Figura 141, está a linha de tendência para os resultados da rugosidade R_z . Neste caso, o R^2 é de 76,28 %, indicando também um modelo fiável, mas possível de ser melhorado.

Na Tabela 50, o valor-p mais baixo é de 0,001, relativo à velocidade de corte. À semelhança do que tem acontecido nas rugosidades, este parâmetro é o mais significativo.

Tabela 50 - Resultados estatísticos dos valores dos resultados rugosidade R_z

Parâmetro	Valor-p	R^2
Pressão do gás (bar)	0,028	
Velocidade de corte (mm/min)	0,001	76,28 %
Potência de radiação (W)	0,547	

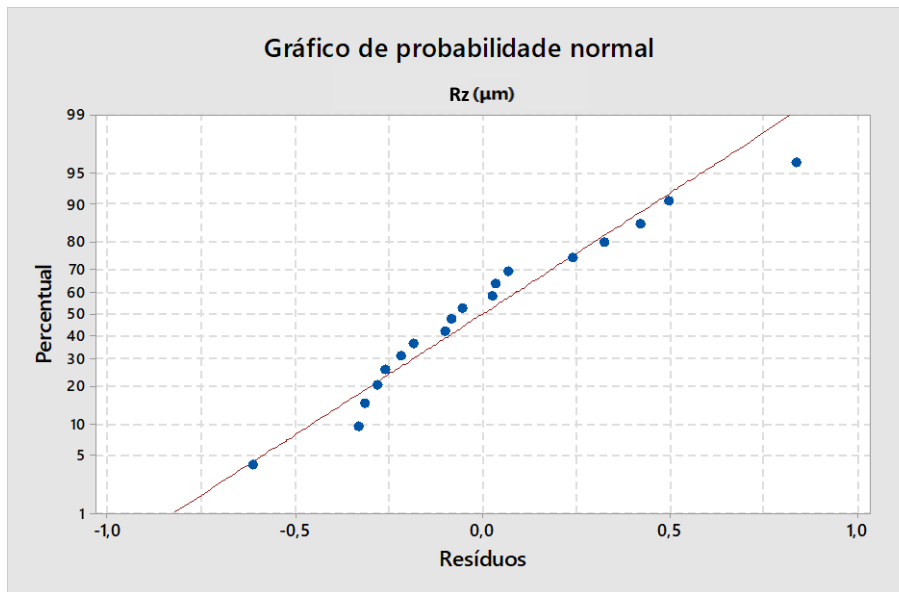


Figura 141 - Linha de tendência dos resultados da rugosidade R_z

Na Figura 142, está a linha de tendência para os resultados da rugosidade R_{max} . Neste caso, o R^2 é de 74,31 %, sendo um modelo fiável.

Na Tabela 51, o valor-p mais baixo é de 0,001, relativo à velocidade de corte. Em linha com o que tem acontecido nas rugosidades, este parâmetro é o mais significativo.

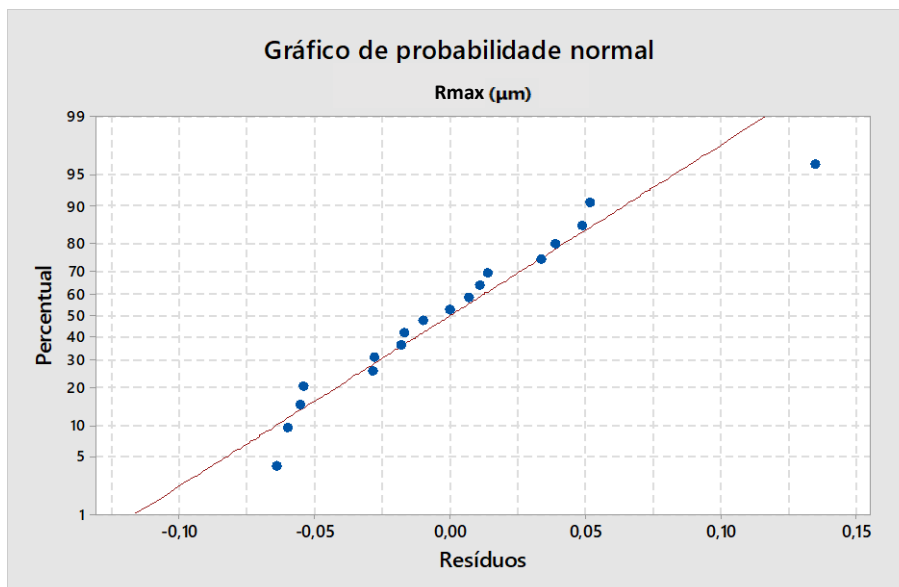


Figura 142 - Linha de tendência dos resultados da rugosidade R_{max}

Tabela 51 - Resultados estatísticos dos valores dos resultados rugosidade R_{max}

Parâmetro	Valor-p	R^2
Pressão do gás (bar)	0,018	
Velocidade de corte (mm/min)	0,001	74,31 %
Potência de radiação (W)	0,338	

Na Tabela 52 e 53, estão as principais conclusões das análises do método Taguchi e ANOVA, respectivamente, das amostras em St12, cortadas no equipamento de laser CO₂.

Tabela 52 – Melhores condições de corte laser, pelo método Taguchi

Método Taguchi		
Melhores condições de corte - resultados da rebarba		
Pressão do gás (bar)	Velocidade de corte (mm/min)	Potência de radiação (W)
0,8 (pr)	5000 (Vn)	1400 (Pn)
Melhores condições de corte - resultados da rugosidade R_a		
Pressão do gás (bar)	Velocidade de corte (mm/min)	Potência de radiação (W)
0,8 (pr)	6500 (Vh)	1000 (Pr)
Melhores condições de corte - resultados da rugosidade R_z e R_{max}		
Pressão do gás (bar)	Velocidade de corte (mm/min)	Potência de radiação (W)
0,8 (pr)	5000 (Vn)	1000 (Pr)

Tabela 53 – Melhores parâmetros de corte laser, pela análise da variância

ANOVA
Parâmetro de corte mais significativo - resultados da rebarba e parâmetros de rugosidade
Velocidade de corte (mm/min)

Recorreu-se novamente aos gráficos de superfície 3D, para a análise dos resultados das amostras deste tipo. Neste caso, a velocidade de corte foi o parâmetro de corte laser mais significativo, tanto para a rebarba como para os três parâmetros de rugosidade (R_a ,

R_z e R_{max}). Sendo assim, o parâmetro de velocidade de corte será analisado em relação aos restantes parâmetros de corte laser.

Na Figura 143, observa-se o gráfico de superfície da rebarba (eixo Z), em função da velocidade de corte (eixo Y) e da pressão do gás (eixo X), constatando-se que:

- Como na Tabela 52, a velocidade de corte de 5000 mm/min e a pressão do gás de 0,8 bar, conduzem ao valor mais baixo da rebarba. Como se observa, é a forma onde os valores atingem níveis mais baixos;
- Neste gráfico, a forma da superfície apresenta um pico máximo, relativo a uma velocidade de corte máxima, com uma pressão do gás mais alta.

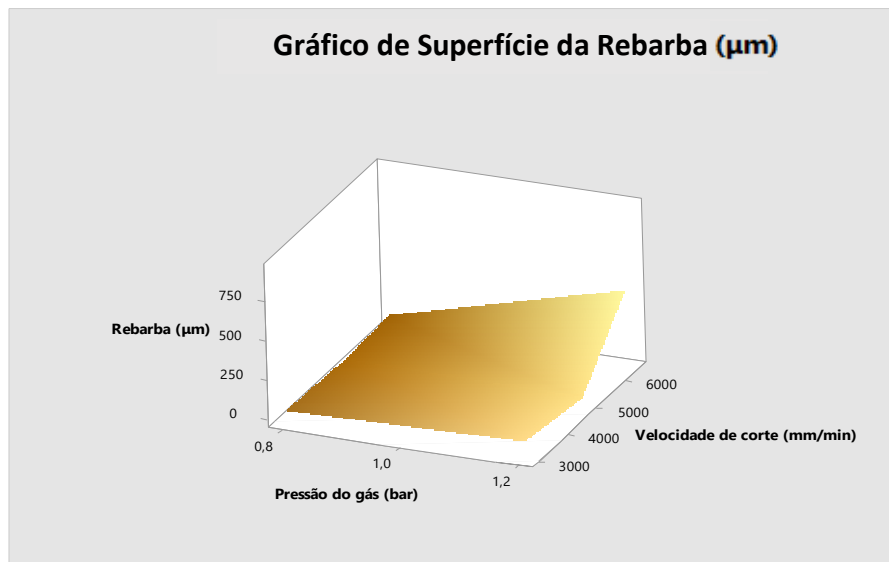


Figura 143 - Gráfico de superfície da rebarba, com a velocidade de corte e a pressão do gás

Na Figura 144, observa-se o gráfico de superfície da rebarba (eixo Z), em função da velocidade de corte (eixo Y) e potência de radiação (eixo X), constatando-se que:

- Como na Tabela 52, a velocidade de corte de 5000 mm/min e a potência da radiação de 1400 W, conduzem ao valor mais baixo da rebarba. Como se observa, é a forma onde os valores atingem níveis mais baixos, com os picos mínimos mais concentrados;
- Neste gráfico, a forma da superfície apresenta um pico máximo relativo a uma velocidade de corte máxima, com uma potência de radiação intermédia. Isto vem comprovar, o que foi dito na referência [46], em que a potência deve atuar sempre no seu nível máximo.

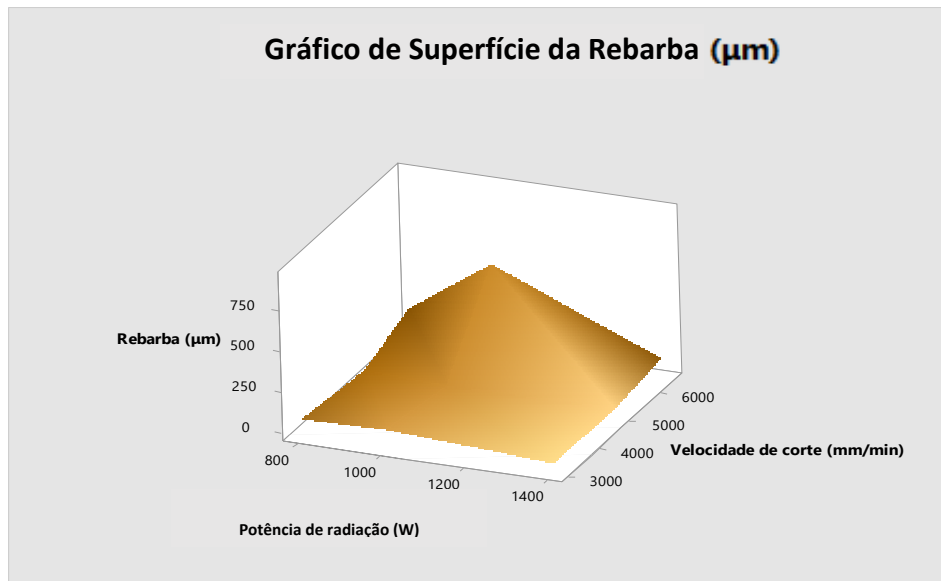


Figura 144 - Gráfico de superfície da rebarba, com a velocidade de corte e a potência de radiação

Para a rugosidade R_a , o parâmetro mais significativo também é a velocidade de corte.

Na Figura 145, observa-se o gráfico de superfície da rugosidade R_a (eixo Z), em função da velocidade de corte (eixo Y) e da pressão do gás (eixo X), constatando-se que:

- Como mostra a Tabela 52, a velocidade de corte de 6500 mm/min e a pressão do gás de 0,8 bar, conduzem ao valor mais baixo da rugosidade R_a . Como se observa, é a forma onde os valores atingem níveis mais baixos;
- Neste gráfico, a forma da superfície apresenta um pico máximo, relativo a uma velocidade de corte mínima, com uma pressão do gás mais alta;
- Na zona onde os valores da pressão do gás são os mais baixos e os da velocidade corte são os mais altos, a forma da superfície do gráfico estabiliza completamente, que corresponde a valores mais baixos da rugosidade R_a ;
- A forma de superfície do gráfico é mais inclinada, quanto menor for a pressão do gás e a velocidade de corte. Por isso, indica piores resultados quanto à rugosidade R_a . Verifica-se o mesmo na referência [24];
- Os resultados da rugosidade R_a vão melhorando à medida que a pressão do gás aumenta, bem como a velocidade de corte. Isto comprava-se pela forma do gráfico superfície apresentar menos variações. Constata-se o mesmo na referência [53].

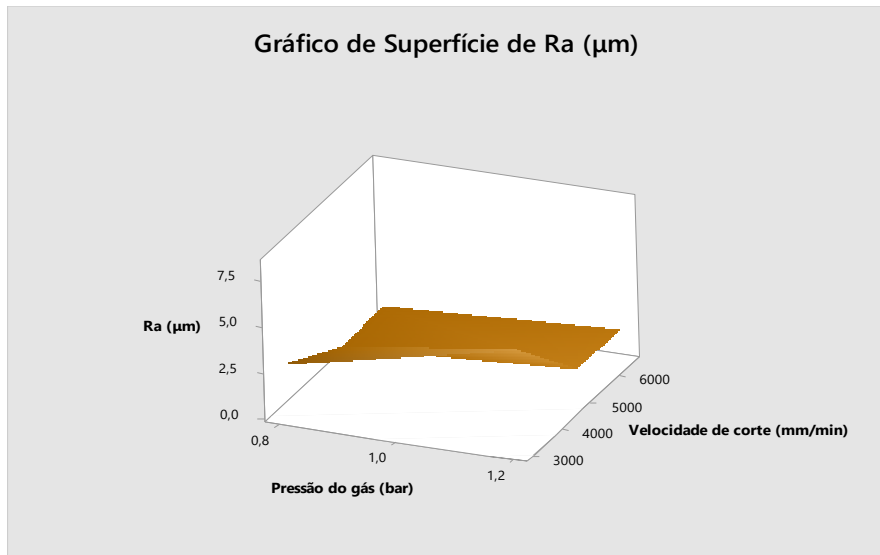


Figura 145 - Gráfico de superfície de R_a , com a velocidade de corte e a pressão do gás

Na Figura 146, observa-se o gráfico de superfície da rugosidade R_a (eixo Z), em função da velocidade de corte (eixo Y) e potência de radiação (eixo X), constatando-se que:

- Como mostra a Tabela 52, a velocidade de corte de 6500 mm/min e a potência de radiação de 1000 W, conduzem ao valor mais baixo da rugosidade R_a . Como se observa, é a forma onde os valores são mais baixos;
- Neste gráfico, a forma da superfície apresenta um pico máximo relativo a uma velocidade de corte mínima, com uma potência mais elevada.

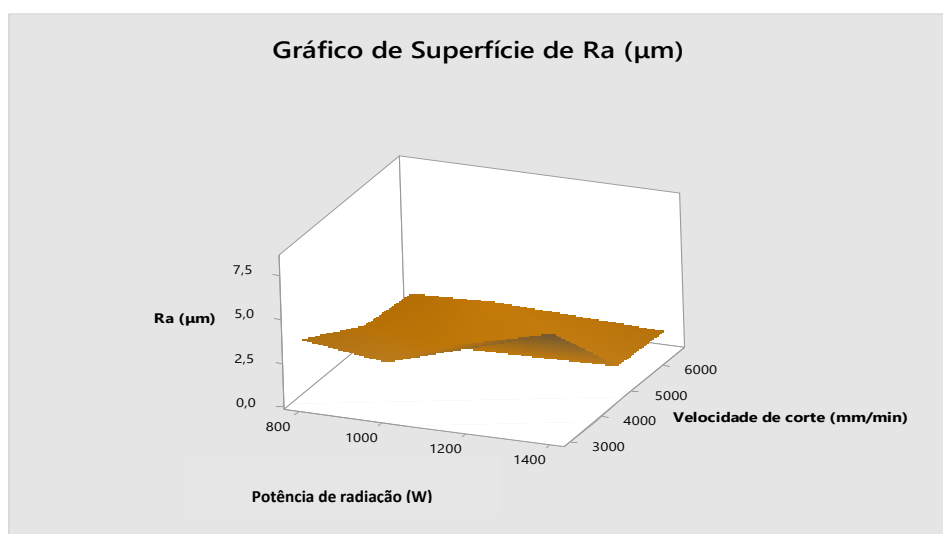


Figura 146 - Gráfico de superfície de R_a , com a velocidade de corte e a potência de radiação

Nos restantes parâmetros de rugosidade R_z e R_{max} , o parâmetro mais significativo continuou a ser a velocidade de corte. Portanto, a análise dos parâmetros é igual.

Na Figura 147, observa-se o gráfico de superfície das rugosidades R_z e R_{max} (eixo Z), em função da velocidade de corte (eixo Y) e da pressão do gás (eixo X), constatando-se que:

- Como está patente na Tabela 52, a velocidade de corte de 5000 mm/min e a pressão do gás 0,8 bar, conduzem ao valor mais baixo das rugosidades R_z e R_{mac} . Como se observa, é a forma onde os valores atingem níveis mais baixos;
- Neste gráfico, a forma da superfície apresenta um pico máximo relativo a uma velocidade de corte mínima, com uma pressão do gás máxima. Comprova-se o mesmo na referência [24].

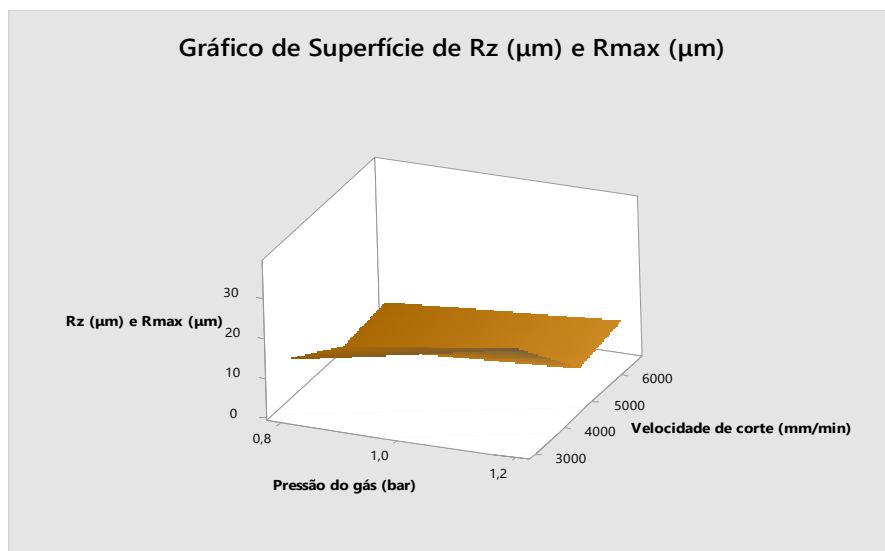


Figura 147 - Gráfico de superfície de R_z e R_{max} , com a velocidade de corte e a pressão do gás

Na Figura 148, observa-se o gráfico de superfície das rugosidades R_z e R_{max} (eixo Z), em função da velocidade de corte (eixo Y) e potência de radiação (eixo X), constatando-se que:

- Como se pode ver na Tabela 52, a velocidade de corte de 5000 mm/min e a potência da radiação de 1000 W, conduzem ao valor mais baixo das rugosidades R_z e R_{mac} . Como se observa, é a forma onde os valores atingem níveis mais baixos;
- Neste gráfico, a forma da superfície apresenta um pico máximo relativo a uma velocidade de corte mínima, com uma potência de radiação mínima. Comprova-se o mesmo na referência [63].

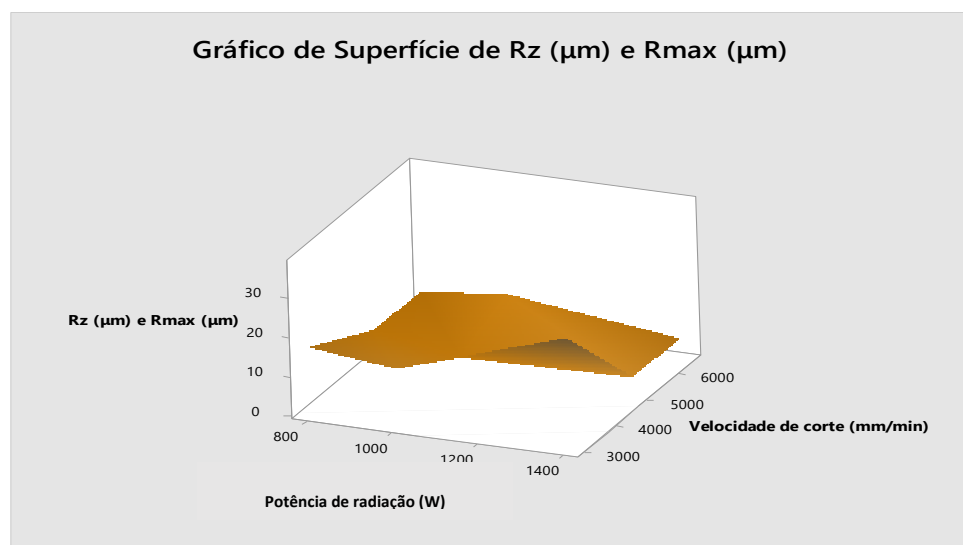


Figura 148 - Gráfico de superfície de Rz e Rmax, com a velocidade de corte e a potência de radiação

3.12 Análise estatística das amostras em St12 – laser de fibra ótica

3.12.1 Método Taguchi

Na Tabela 54 estão os valores das amostras de St12, cortadas no laser do tipo fibra ótica.

Tabela 54 - Valores das amostras em AISI 316L, cortadas no laser do tipo fibra ótica

St12 (2 mm) – Equipamento de fibra ótica

Amostra	Potência (W)	Velocidade (mm/min)	Pressão (bar)	Rebarba (μm)	R _a (μm)	R _z (μm)	R _{max} (μm)
PnVhpn	1000	7500	2,8	177	1,35	7,84	9,26
PrVhpn	700	7500	2,8	7	0,902	5,79	6,55
PrrVhpn	300	7500	2,8	7	1,49	6,71	8,17
PnVnpr	1000	5500	2,8	4	2,38	12,7	15,1
PrVnpr	700	5500	2,8	25	0,901	4,47	6,69
PrrVnpr	300	5500	2,8	25	1,83	7,46	7,96
PnVrpn	1000	2500	2,8	75	2,7	14,9	16,5
PrVrpn	700	2500	2,8	3	2,82	16,0	20,0
PrrVrpn	300	2500	2,8	3	1,75	12,6	13,7
PnVhpr	1000	7500	1,2	418	0,840	5,66	8,54
PrVhpr	700	7500	1,2	264	0,969	5,15	6,63
PrrVhpr	300	7500	1,2	82	0,978	6,42	7,43
PnVnpr	1000	5500	1,2	286	1,09	6,26	7,25

PrVnpr	700	5500	1,2	350	1,06	8,92	11,1
PrrVnpr	300	5500	1,2	171	1,74	9,47	11,1
PnVrpr	1000	2500	1,2	439	1,31	7,94	8,41
PrVrpr	700	2500	1,2	325	1,46	8,02	8,57
PrrVrpr	300	2500	1,2	43	3,18	16,9	18,4

À semelhança do que se fez anteriormente, na Figura 149 encontra-se o gráfico do rácio S/N, para os resultados da rebarba. Os melhores parâmetros são:

- Pressão do gás (pn) - 2,8 bar;
- Velocidade de corte inferior (Vr) - 2500 mm/min;
- Potência de radiação reduzida duas vezes (Prr) - 300 W.

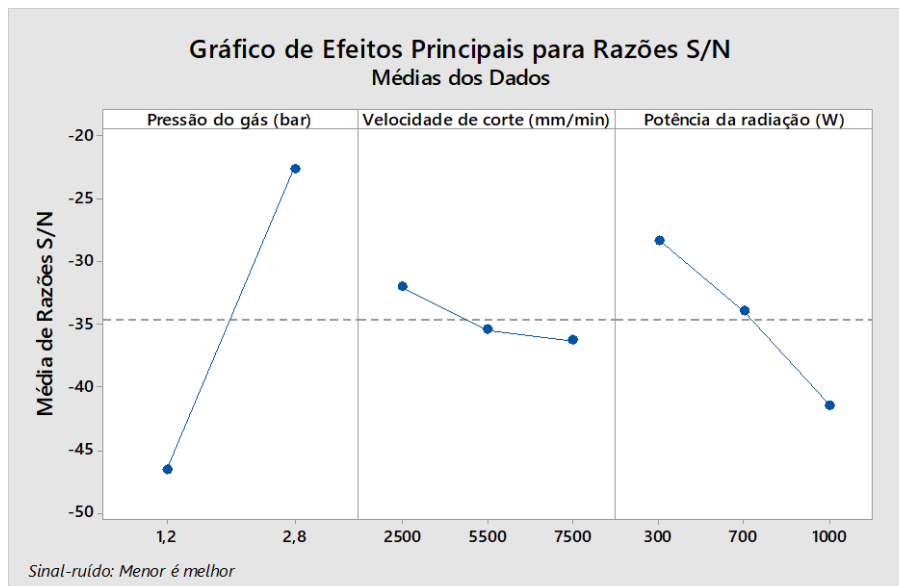


Figura 149 - Gráfico do rácio S/N, dos resultados da rebarba

Na Figura 150 está o gráfico do rácio S/N, para os resultados da rugosidade R_a . Os melhores parâmetros são:

- Pressão do gás (pr) - 1,2 bar;
- Velocidade de corte superior (Vh) - 7500 mm/min;
- Potência de radiação reduzida (Pr) - 700 W.

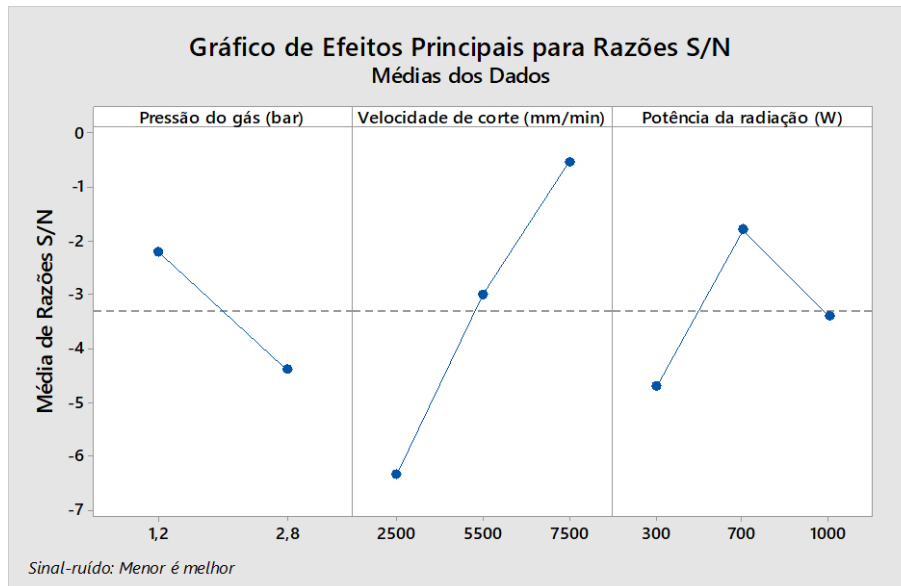


Figura 150 - Gráfico do rácio S/N, dos resultados da rugosidade R_a

Na Figura 151 e 152 estão os gráficos do rácio S/N, para os resultados das rugosidades R_z e R_{max} , respetivamente. Os melhores parâmetros são os mesmos da rugosidade R_a .

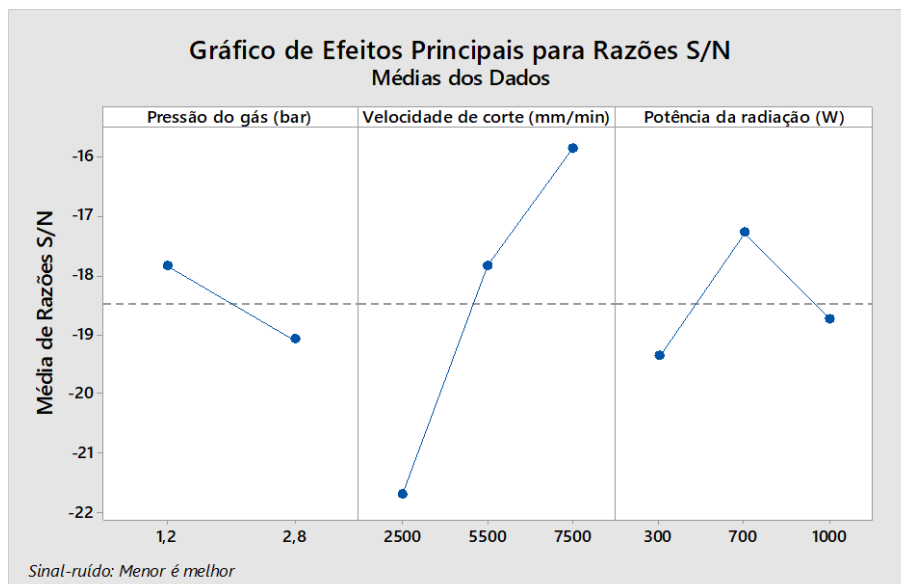


Figura 151 - Gráfico do rácio S/N, dos resultados da rugosidade R_z

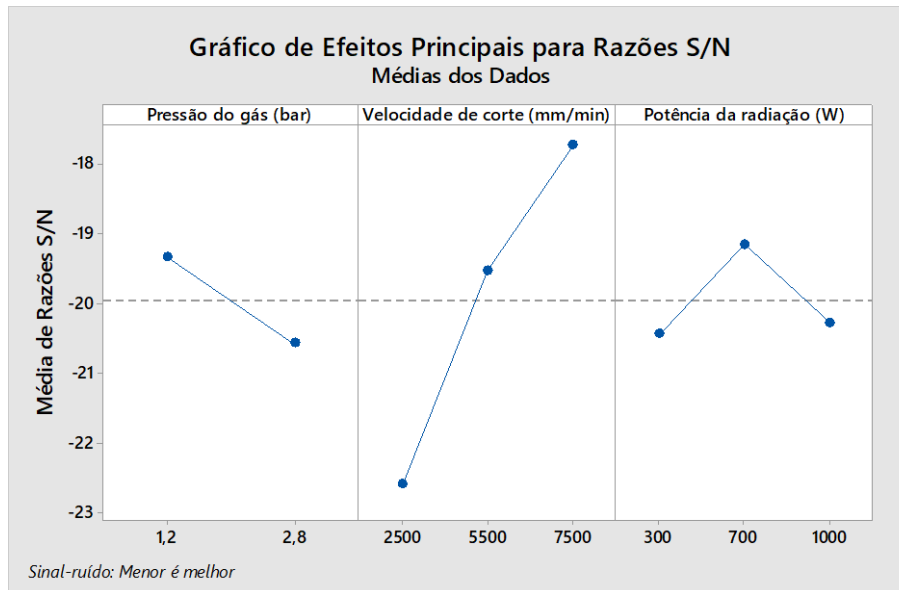


Figura 152 - Gráfico do rácio S/N, dos resultados da rugosidade R_{max}

3.12.2 Análise da Variância (ANOVA)

A análise da variância é feita da mesma forma que se viu anteriormente, noutros estudos. Na Figura 153, está a linha de tendência para os resultados da rebarba. Neste caso, o R^2 é de 81,53 %, sendo um modelo fiável.

Na Tabela 55, o valor-p mais baixo é de 0,001, relativo à pressão do gás.

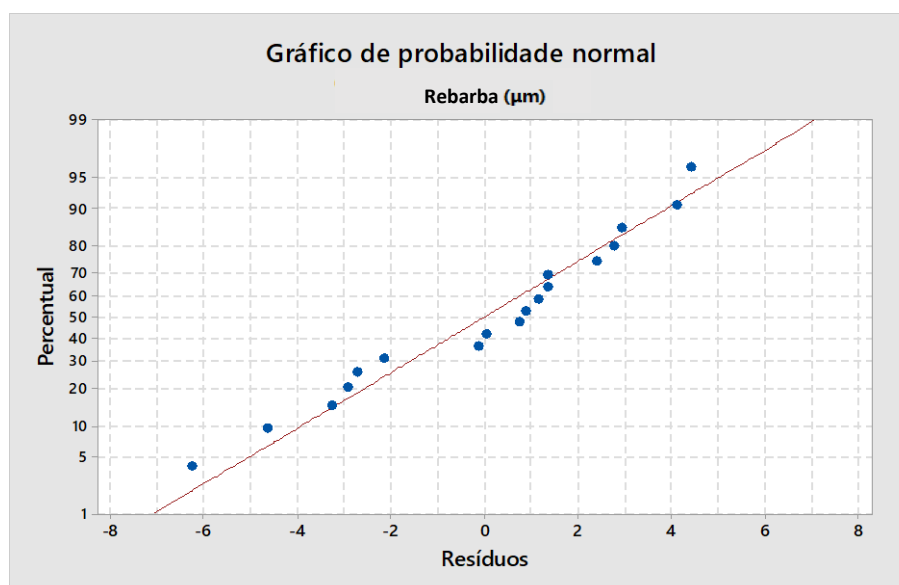


Figura 153 - Linha de tendência dos resultados da rebarba

Tabela 55 - Resultados estatísticos dos valores dos resultados da rebarba

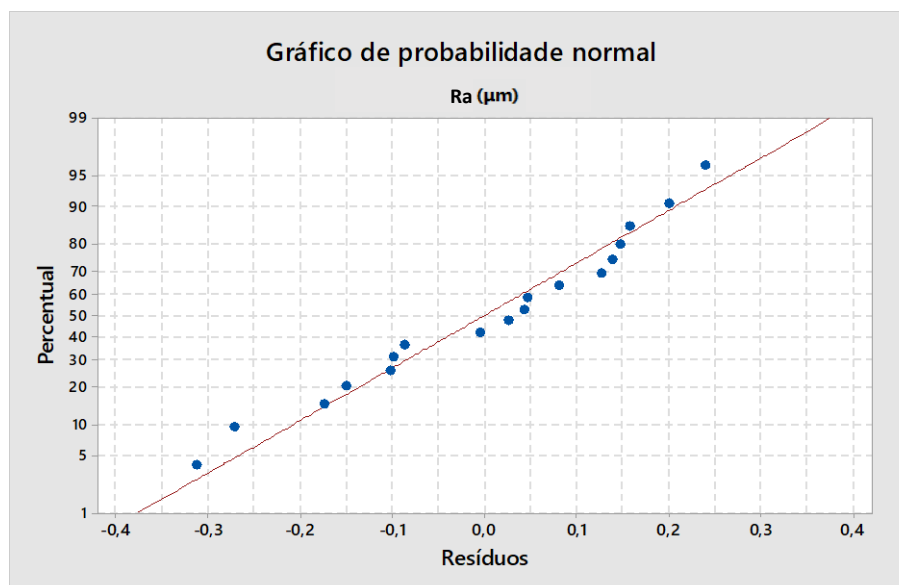
Parâmetro	Valor-p	R ²
Pressão do gás (bar)	0,001	
Velocidade de corte (mm/min)	0,0868	81,53 %
Potência de radiação (W)	0,014	

Na Figura 154, está a linha de tendência para os resultados da rugosidade R_a . Neste caso, o R^2 é de 68,02 %, sendo um valor ainda pouco fiável, comparativamente a outros.

Na Tabela 56, o valor-p mais baixo é de 0,005, relativo à velocidade de corte. Uma vez mais, este parâmetro volta a destacar-se em relação aos demais, na contribuição que tem para os resultados das diferentes rugosidades.

Tabela 56 - Resultados estatísticos dos valores dos resultados da rugosidade R_a

Parâmetro	Valor-p	R ²
Pressão do gás (bar)	0,081	
Velocidade de corte (mm/min)	0,005	68,02 %
Potência de radiação (W)	0,111	

Figura 154 - Linha de tendência dos resultados da rugosidade R_a

Na Figura 155, está a linha de tendência para os resultados da rugosidade R_z . Neste caso, o R^2 é de 60,36 %, sendo um valor ainda menos fiável, comparativamente a outros.

Na Tabela 57, o valor-p mais baixo é de 0,008, relativo à velocidade de corte. Uma vez mais, este parâmetro volta a ser considerado o mais importante no resultado das rugosidades.

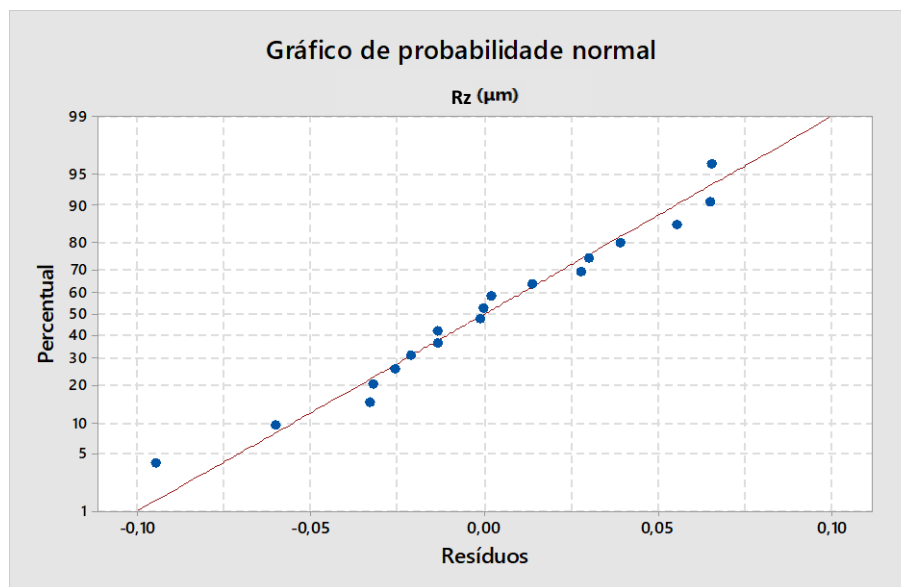


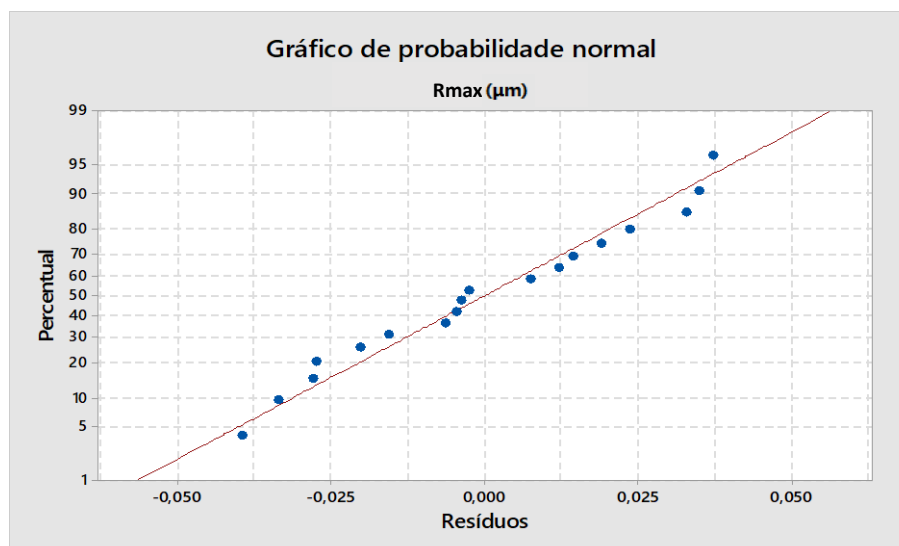
Figura 155 - Linha de tendência dos resultados da rugosidade R_z

Tabela 57 - Resultados estatísticos dos valores dos resultados da rugosidade R_z

Parâmetro	Valor-p	R^2
Pressão do gás (bar)	0,380	60,36 %
Velocidade de corte (mm/min)	0,008	
Potência de radiação (W)	0,321	

Por fim, na Figura 156, está a linha de tendência para os resultados da rugosidade R_{max} . Neste caso, o R^2 é de 50,15 %, sendo das análises a estas amostras o menos fiável.

Na Tabela 58, o valor-p mais baixo é de 0,027, relativo à velocidade de corte. Concluiu-se que a velocidade de corte é, inequivocamente, o parâmetro que provoca maiores alterações nos resultados das rugosidades.

Figura 156 - Linha de tendência dos resultados da rugosidade R_{max} Tabela 58 - Resultados estatísticos dos valores dos resultados da rugosidade R_{max}

Parâmetro	Valor-p	R^2
Pressão do gás (bar)	0,418	50,15 %
Velocidade de corte (mm/min)	0,027	
Potência de radiação (W)	0,495	

Na Tabela 59 e 60 estão as melhores condições de corte, das análises do método Taguchi e a ANOVA, respetivamente, das amostras em St12, cortadas no equipamento de fibra ótica.

Tabela 59 - Melhores condições de corte laser, pelo método Taguchi

Método Taguchi

Melhores condições de corte - resultados da rebarba		
Pressão do gás (bar)	Velocidade de corte (mm/min)	Potência de radiação (W)
2,8 (pn)	2500 (Vr)	300 (Prr)
Melhores condições de corte - resultados da rugosidade R_a , R_z e R_{max}		
Pressão do gás (bar)	Velocidade de corte (mm/min)	Potência de radiação (W)
1,2 (pr)	7500 (Vh)	700 (Pr)

Tabela 60 - Melhores parâmetros de corte laser, pela análise de variância

ANOVA

Parâmetro de corte mais significativo - resultados da rebarba

Pressão do gás (bar)

Parâmetro de corte mais significativo - resultados da rugosidade R_a , R_z e R_{max}

Velocidade de corte (mm/min)

Os últimos gráficos de superfície 3D, voltam a finalizar as análises Taguchi e ANOVA. A pressão do gás é, maioritariamente, o parâmetro mais significativo nos resultados da rebarba.

Na Figura 157, observa-se o gráfico de superfície da rebarba (eixo Z), em função da pressão do gás (eixo Y) e velocidade de corte (eixo X), constatando-se que:

- Como se vê na Tabela 59, a velocidade de corte de 2500 mm/min e a pressão do gás de 2,8 bar, conduzem ao valor mais baixo da rebarba. Como se observa, é a forma onde os valores atingem níveis mais baixos;
- Neste gráfico, a forma da superfície não apresenta um pico máximo visível neste gráfico, sendo imprescindível a análise do gráfico do rácio S/N, para obter os valores máximos.

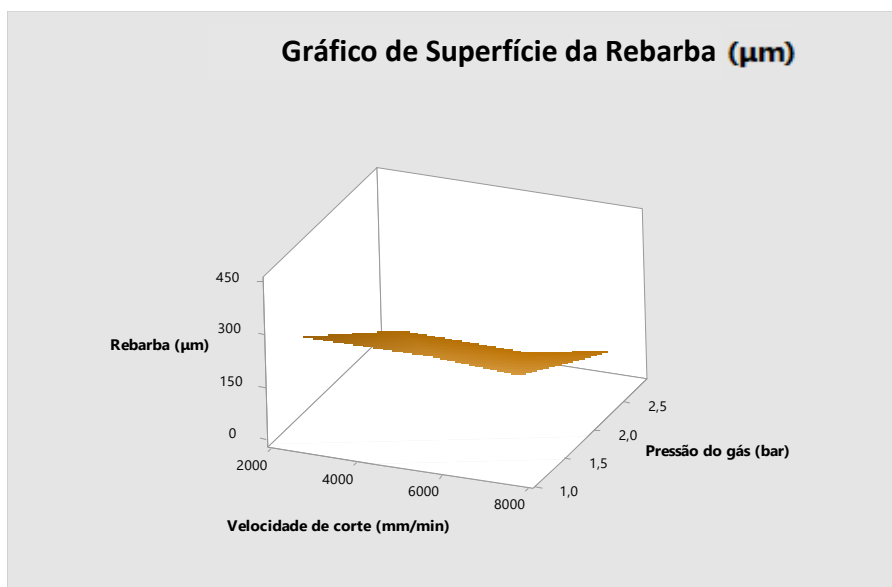


Figura 157 - Gráfico de superfície da rebarba, com a pressão do gás e a velocidade de corte

Na Figura 158, observa-se o gráfico de superfície da rebarba (eixo Z) em função, da pressão do gás (eixo Y) e da potência de radiação (eixo X), constatando-se que:

- Como se pode analisar na Tabela 59, a potência de radiação de 300 W e a pressão do gás de 0,8 bar, conduzem ao valor mais baixo da rebarba;
- Neste gráfico, a forma da superfície também não apresenta um pico máximo visível neste gráfico, sendo imprescindível a análise do gráfico do rácio S/N, para obter os valores máximos.

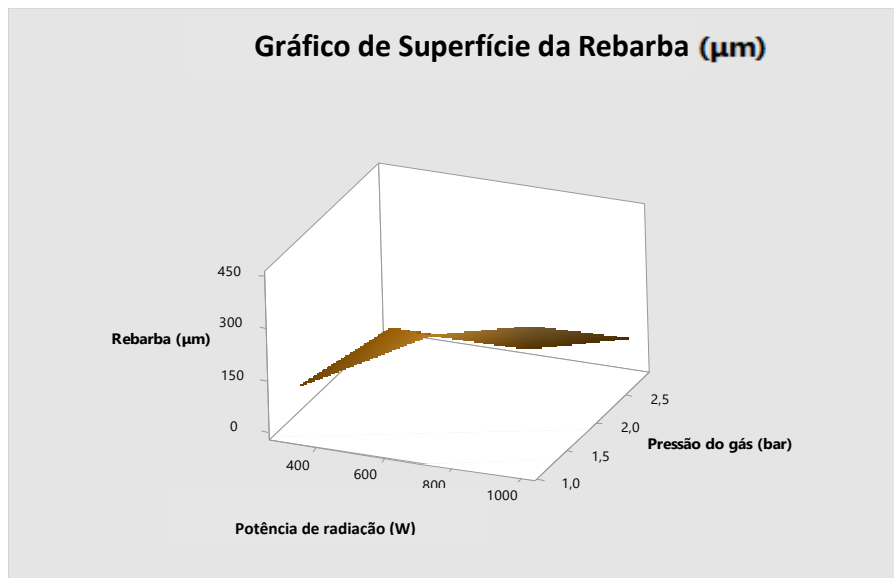


Figura 158 - Gráfico de superfície da rebarba, com a pressão do gás e a potência de radiação

Para os três parâmetros de rugosidade (R_a , R_z e R_{max}), o parâmetro com maior importância foi a velocidade de corte, à semelhança do que tinha acontecido com outros estudos de materiais e tipos de laser distintos. Pode-se assumir que há uma tendência para que a velocidade de corte seja o parâmetro de corte laser que mais influencia os resultados das rugosidades.

Na Figura 159, observa-se o gráfico de superfície da rugosidade (eixo Z), em função da velocidade de corte (eixo Y) e da pressão do gás (eixo X), constatando-se que:

- Como mostra a Tabela 59, a velocidade de corte de 7500 mm/min e a pressão do gás de 1,2 bar, conduzem ao valor mais baixo para as rugosidades. Como se observa, é a forma onde os valores atingem níveis mais baixos;
- Neste gráfico, a forma da superfície não apresenta um pico máximo visível neste gráfico, sendo imprescindível a análise do gráfico do rácio S/N, para obter os valores máximos.

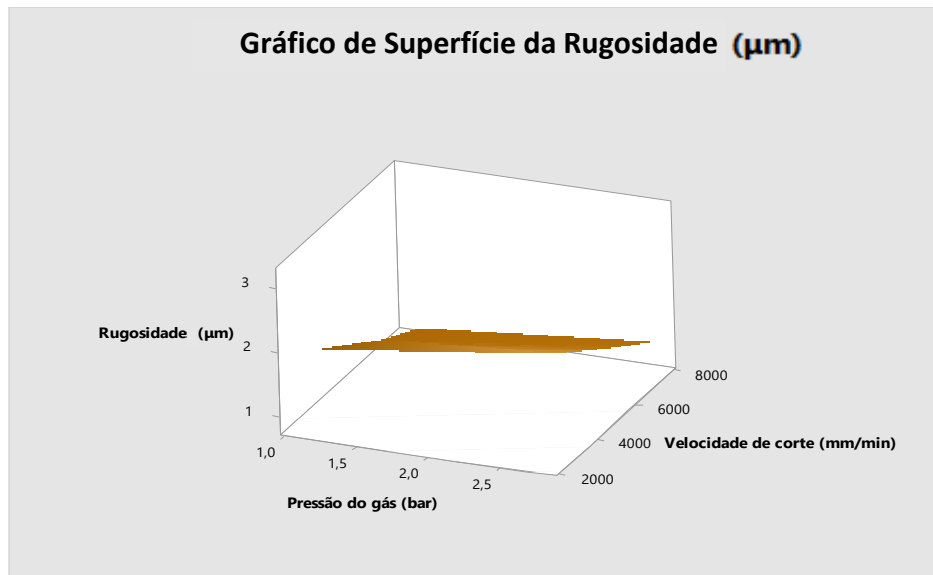


Figura 159 - Gráfico de superfície da rugosidade, com a velocidade de corte e a pressão do gás

Na Figura 160, observa-se o gráfico de superfície da rugosidade (eixo Z), em função da velocidade de corte (eixo Y) e potência de radiação (eixo X), constatando-se que:

- Como se vê na Tabela 59, a velocidade de corte de 7500 mm/min e a potência da radiação de 700 W, conduzem ao valor mais baixo para as rugosidades. Como se observa, é a forma onde os valores atingem níveis mais baixos;
- Neste gráfico, a forma da superfície já apresenta um pico máximo visível, que se situa nos valores de potência de radiação e velocidade de corte mínimas. Verifica-se o mesmo na referência [64].

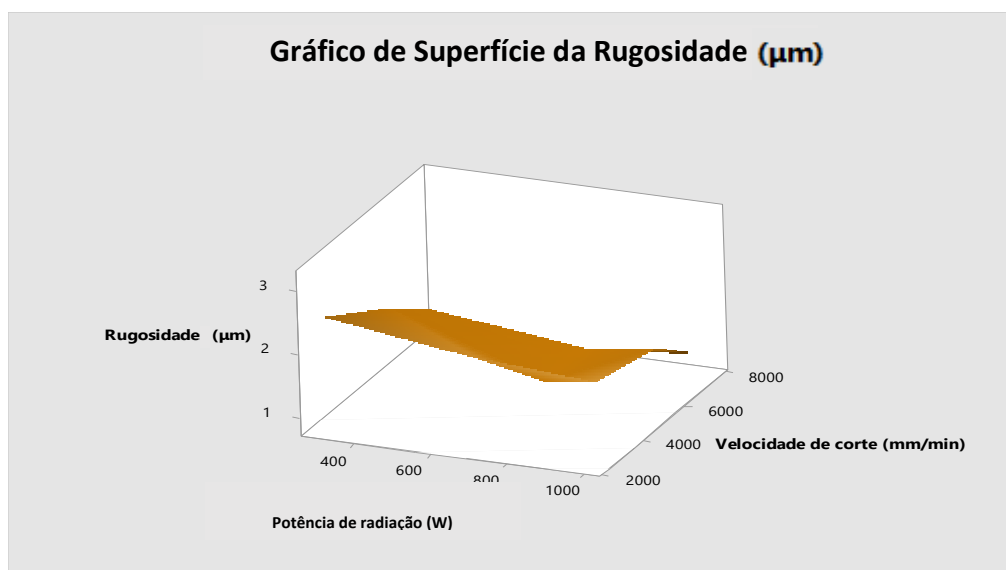


Figura 160 - Gráfico de superfície da rugosidade, com a velocidade de corte e a potência de radiação

3.13 Correspondência das análises estatísticas com as restantes análises

Durante esta dissertação, foram feitas as seguintes análises:

- Análise visual do estado da superfície cortada das amostras;
- Análise das microestruturas;
- Análise da superfície cortada;
- Análise estatística dos resultados das medições de rebarba e dos parâmetros de rugosidade.

Na Tabela 61, encontram-se as principais conclusões das análises efetuadas à rebarba.

Tabela 61 - Correspondência das análises em relação à rebarba

Tipo de análise	Conclusões
Análise visual	Independentemente do tipo de material e laser. Quanto menor a potência de radiação e a pressão do gás, maior nível de rebarba se observa nas amostras.
Análise das microestruturas	Em nenhuma das amostras analisadas em microscópio, foram observadas alterações nas microestruturas. Nem mesmo aquelas que apresentavam os parâmetros mais díspares.
Análise da superfície cortada	Confirmou-se, com o auxílio do SEM, que as amostras com potência da radiação e pressão do gás mais baixas, apresentam um maior nível de rebarba.
Análise estatística	A pressão do gás tem maior importância, relativamente aos restantes parâmetros de corte laser nos níveis de rebarba, na maioria dos tipos de material e laser. Como já foi referido, a pressão do gás controla a remoção de resíduos que se possam depositar durante a passagem do feixe laser. As melhores condições de corte, para os menores níveis de rebarba, concentram-se em: velocidades de corte próximas do valor recomendado pela marca (V_n); potência de radiação com valores próximos do valor ligeiramente inferior ao recomendado pela marca (P_r); pressão do gás com valores próximos do valor recomendado pela marca (p_n).

Na Figura 161, apresenta-se um gráfico da análise aos quatro estudos realizados, com o número de vezes em que cada nível, de cada parâmetro de corte laser foi indicado para as melhores condições de corte, para a rebarba. Nota-se que:

- Um domínio da velocidade de corte com valor recomendado pela marca (V_n), tendo sido indicada como a melhor para a redução da rebarba em três estudos diferentes;
- A potência de radiação reduzida (P_r), apresenta-se ligeiramente destacada. Em dois estudos foi indicada como a melhor opção;
- A pressão do gás recomendada pela marca (p_n) e a pressão do gás (p_r), apresentam-se empatadas. Este facto pode-se explicar pela diferença de valores deste parâmetro, nos diferentes estudos, não ser muito grande.

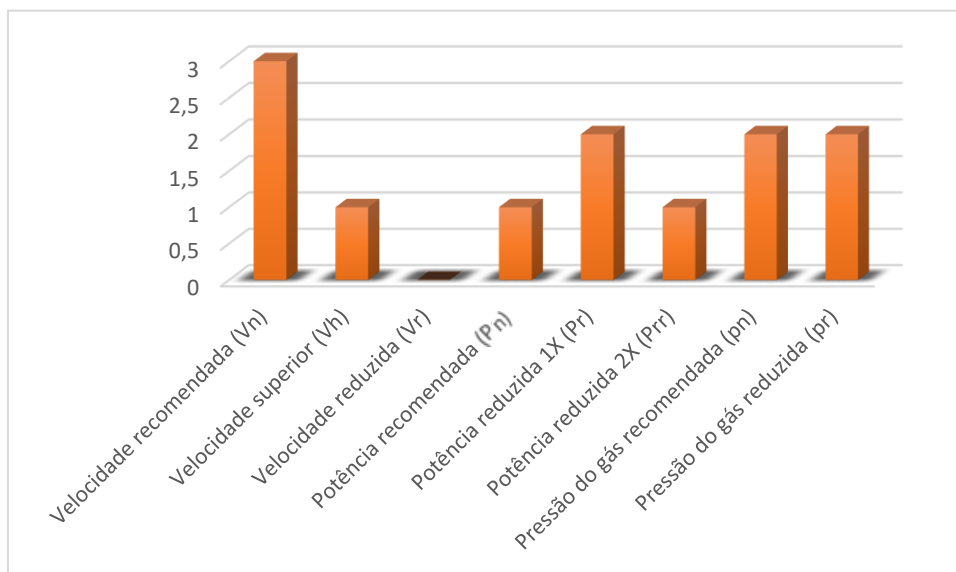


Figura 161 – Número de vezes em que cada tipo de parâmetro de corte laser foi abrangido pelas melhores condições, para a rebarba

Concluiu-se, relativamente à rebarba, aquilo que vinha a ser uma tendência ao longo destas análises. Os parâmetros de corte laser devem apresentar valores situados perto dos valores recomendados pela marca, sendo também uma tendência que se um parâmetro aumenta ou diminui, os restantes devem acompanhar essa tendência.

Existem poucos casos em que os valores dos parâmetros sobem e outros descem, e apresentam superfícies livres ou praticamente livres de rebarba. Nessas amostras, podem ter acontecido durante o corte laser, fenómenos que não são controlados pelo operador, sendo por isso desvalorizados.

Contudo, valores da potência de radiação mais reduzidos proporcionam menores níveis de rebarba. Mas, isto só se verifica se a velocidade de corte e a pressão do gás acompanharem esta descida na potência de radiação, tornando os parâmetros de corte laser mais homogêneos.

Na Tabela 62, apresentam-se as principais conclusões das análises efetuadas às rugosidades.

Tabela 62 - Correspondência das análises em relação à rugosidade

Tipo de análise	Conclusões
Análise visual	As amostras cortadas no tipo de laser CO ₂ , apresentam uma superfície visivelmente mais imperfeita, influenciando negativamente a rugosidade. Pode-se explicar este facto, pelo equipamento de fonte laser CO ₂ ser mais antigo, e consequentemente com componentes mais desgastados. Várias amostras em St12, apresentam estrias ao longo da superfície de corte. Como já foi referido anteriormente, pode estar relacionado com a baixa dureza do material.
Análise das microestruturas	As conclusões relativamente a esta análise são as mesmas da Tabela 59.
Análise da superfície cortada	Com um rugosímetro, foi possível medir os diferentes parâmetros de rugosidade (R _a , R _z e R _{max}). As amostras cortadas no tipo de material St12, apresentam níveis de rugosidade mais elevados, com a presença de estrias em várias amostras. A falta de material e irregularidade em algumas superfícies cortadas, foram pouco significativas. Foi possível também observar que as amostras de St12 cortadas com velocidade inferior (V _r), apresentavam maior número de estrias.
Análise estatística	A velocidade de corte tem maior importância, relativamente aos restantes parâmetros de corte laser, nos parâmetros de rugosidade, em praticamente todos os tipos de material e laser. As melhores condições de corte, para os menores níveis de rugosidade, concentram-se em: velocidades de corte superiores ao valor recomendado pela marca (V _h); potência de radiação com valores próximos do valor ligeiramente inferior ao recomendado pela marca (P _r); pressão do gás com valores próximos do valor recomendado pela marca (p _n).

Na Figura 164, apresenta-se um gráfico da análise aos quatro estudos realizados, com o número de vezes em que cada tipo, de cada parâmetro de corte laser foi indicado para as melhores condições de corte, tendo em conta a rugosidade. Nota-se que:

- Um domínio da velocidade de corte com valor superior ao recomendado pela marca (V_h), tendo sido indicada como a melhor, para a redução da rugosidade em três estudos diferentes;

- A potência de radiação reduzida (P_r), apresenta-se novamente em destaque em relação às restantes potências. Em três estudos, foi indicada como a melhor opção;
- A pressão do gás recomendada pela marca (p_n) e a pressão do gás (p_r), apresentam-se empatadas, à semelhança do que aconteceu nos resultados da rebarba.

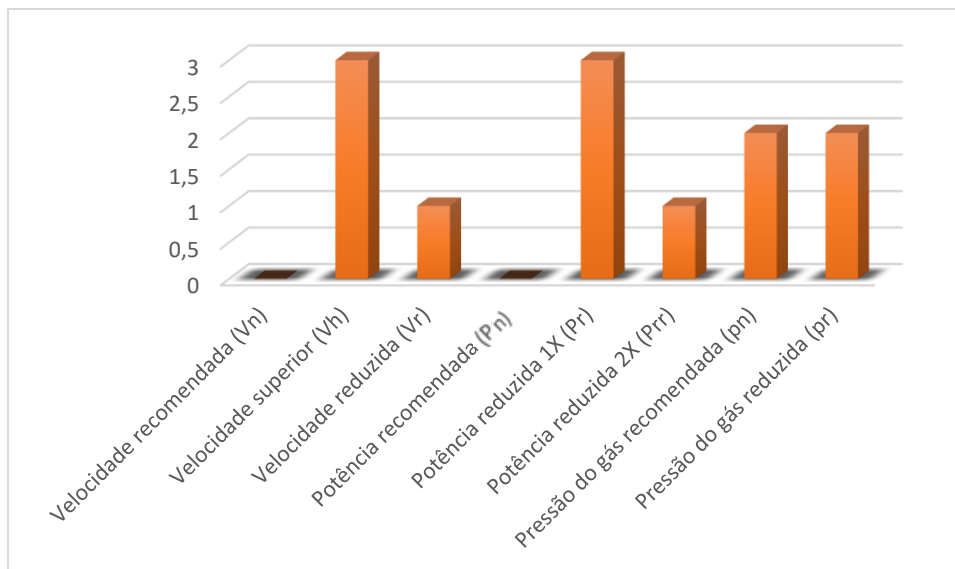


Figura 162 - Número de vezes em que cada tipo de parâmetro de corte laser foi abrangido pelas melhores condições, para a rugosidade

Concluiu-se, relativamente à rugosidade, que os parâmetros de corte laser ideais não se situam perto dos valores recomendados pela marca. Contrariamente aos resultados da rebarba, tanto a velocidade de corte superior (V_h) como a potência de radiação reduzida (P_r), apresentam-se destacadamente como as nas melhores condições de corte.

Apesar de durante a análise da superfície cortada das amostras de St12, com valores de velocidade reduzida (V_r), serem aquelas que apresentavam maior número de estrias e imperfeições, que levam a um aumento da rugosidade, a velocidade de corte reduzida (V_r) nas amostras de AISI 316L não produziu grande diferença, comparativamente a outros tipos, tendo sido até indicada como a melhor opção. Na rugosidade, influencia muito o tipo de material na atuação dos mesmos parâmetros de corte laser, conduzindo a efeitos diferentes. Mas, como é feita uma análise geral de todos os estudos, considera-se a velocidade superior (V_h), como a mais adequada.

Constata-se então que, para os melhores resultados da rugosidade, para os três parâmetros que avaliam a mesma (R_a , R_z e R_{max}), os valores dos parâmetros de corte laser recomendados pela marca devem ser alterados.

CONCLUSÕES

4.1 CONCLUSÕES PRINCIPAIS

4.2 PROPOSTAS PARA TRABALHOS FUTUROS

4 CONCLUSÕES

4.1 Conclusões principais

Com a realização desta dissertação foi possível analisar, estudar e testar a influência de diferentes parâmetros de corte laser, na qualidade da superfície cortada. A potência de radiação, velocidade de corte e a pressão do gás, são os parâmetros que mais vezes são alterados pelos operadores dos equipamentos de fonte laser, sendo por isso aqueles que foram selecionados para os estudos a realizar.

Confirmou-se durante a realização dos ensaios, que os operadores, por vezes alteram os valores dos diferentes parâmetros de corte laser que vêm definidos em tabelas estabelecidas pela marca. Estas alterações são feitas, porque durante o corte da matéria-prima, nem sempre os valores recomendados pela marca são os que conferem melhor qualidade final do produto resultante do corte laser. Decidiu-se então, realizar ensaios num equipamento de fonte laser CO₂ e noutro do tipo de fibra ótica. Os ensaios foram realizados com diferentes valores para os diferentes tipos de parâmetros, em dois tipos de material (AISI 316L e St12).

Analisou-se as microestruturas das amostras, que foram sujeitas aos parâmetros recomendados pela marca e a amostras com valores de parâmetros mais afastados dos valores recomendados. Confirmou-se que a nível microestrutural, não existem mudanças dignas de registo, remetendo para a conclusão de que o tempo de corte e as temperaturas que se atingiram durante o corte destas amostras, não foram suficientes para promover alterações. Conclui-se também, que ao nível das propriedades mecânicas, não houve alteração da identidade normal do material.

Das análises das medições da rebarba e das superfícies cortadas de todas as amostras, constata-se estatisticamente e visualmente que as amostras que foram cortadas com valores de parâmetros mais próximos dos valores recomendados pela marca, são aquelas que apresentam menor nível de rebarba, logo melhor qualidade final. Esta tendência de se seguir os valores recomendados pela marca para se obter menores níveis de rebarba, ou até, não produzir rebarba, torna-se lógico, pois é feito um cálculo pela marca destes valores para ficarem estabelecidos em tabelas.

Em relação à rugosidade, não se verificou uma tendência de abaixamento dos valores dos diferentes parâmetros de rugosidade medidos, com valores de parâmetros recomendados pela marca. Para a rugosidade, devem ser utilizados valores de velocidade superiores ao recomendado pela marca. A potência de radiação também deve ser alterada para um valor mais baixo do que o recomendado pela marca. A rugosidade tem um comportamento diferente em relação à rebarba, por isso os valores dos parâmetros seguem uma tendência diferente. Para a rugosidade, constatou-se também, que o tipo de material influencia muito a rugosidade. Nas diferentes amostras

de St12, por ser um material mais dúctil, o número de estrias criadas é muito superior às que são criadas no material AISI 316L. Quanto mais estrias, maiores serão os valores dos parâmetros de rugosidade.

Com estes diferentes estudos realizados, fornece-se valor acrescentado à empresa de acolhimento, destacando-se os seguintes contributos:

- Estudo dos diferentes equipamentos de fonte laser existentes na empresa, fornecendo pesquisas e análises da constituição dos mesmos;
- Estudo das microestruturas dos materiais utilizados pela empresa, sendo uma prova da qualidade da matéria-prima usada;
- Realização de vários ensaios em diferentes condições de corte, concluindo-se quais os melhores valores para os diferentes parâmetros de corte laser e formas de contornar problemas, com vista a aumentar os níveis de qualidade.

Conclui-se que as práticas dos operadores dos equipamentos de fonte laser devem seguir um plano, para os diferentes objetivos a atingir. Este plano tem de passar por:

- Uma maior atenção às tabelas dos parâmetros de corte laser disponibilizadas pela marca. Como se viu, nem sempre os parâmetros recomendados pela marca são os mais aconselhados;
- Uma rotina de cuidados de limpeza nos componentes, nomeadamente nas lentes de foco;
- Realização de manutenções preventivas.

4.2 Propostas para trabalhos futuros

Nesta dissertação foram analisados vários cenários de condições de corte, em dois tipos de laser, com três parâmetros de corte laser, em dois materiais distintos na mesma espessura. Propostas de trabalho futuro passariam por alargar estes cenários de corte laser, com as seguintes características:

- Corte de amostras em espessuras superiores a 5 mm, de forma a concluir se os resultados obtidos são idênticos;
- Realização de ensaios com outros parâmetros de corte laser;
- Corte de amostras noutros tipos de matéria-prima.

**BIBLIOGRAFIA E OUTRAS FONTES
DE INFORMAÇÃO**

5 BIBLIOGRAFIA E OUTRAS FONTES DE INFORMAÇÃO

- [1] Bortot, C. (2016). *Clareamento a laser: dentes brancos sem desconforto*. Obtido em 5 de Setembro de 2017, de Sulinfoco: <http://www.sulinfoco.com.br/clareamento-a-laser-dentes-brancos-sem-desconforto/>
- [2] Marsilinox. (2016). *Marsilinox*. Obtido em 5 de Setembro de 2017, de Marsilinox: <http://www.marsilinox.pt/?cId=175036b9-18b8-5304-a4e6-d357040f0c83>
- [3] Ribeiro, A., Coelho, L., Bertolami, O., & André, R. (2015). *Luz: História, Natureza e Aplicações*. Obtido em 10 de Setembro de 2017, de SPF: <https://www.spf.pt/magazines/GFIS/119/article/982/pdf>
- [4] Weart, S. (1991). *Bright Idea: First Lasers*. Obtido em 20 de Outubro de 2017, de Laserfest: <https://history.aip.org/exhibits/laser/sections/themaser.html>
- [5] Steen, W. (1998). Introduction. Em *Laser Material Processing* (pp. 3-9). Londres: Springer: https://books.google.pt/books?hl=pt-PT&lr=&id=gPsq0HHAU4UC&oi=fnd&pg=PA1&dq=steen+laser+material+processing&ots=TI3o5APKwq&sig=dsBpAOY1PIIdm9bgPvN8tCDNpNnU&redir_esc=y#v=onepage&q=steen%20laser%20material%20processing&f=false
- [6] Benoussan, H. (2016). *The History of Laser Cutting: From MASERs to CO₂ Laser Cutting*. Obtido em 3 de Novembro de 2017, de Sculpteo: <https://www.sculpteo.com/blog/2016/10/05/the-history-of-laser-cutting-from-masers-to-co2-laser-cutting/>
- [7] Hilton, P. (2002). *In the Beginning*. Obtido em 23 de Outubro de 2017, de TWI: <https://www.twi-global.com/technical-knowledge/published-papers/in-the-beginning-the-history-of-laser-cutting-october-2002/>
- [8] Hansson, R. (2011). *The rise of fiber laser cutting*. Obtido em 10 de Novembro de 2017, de Industrial Laser Solutions: <https://www.industrial-lasers.com/articles/print/volume-26/issue-6/features/the-rise-of-fiber-laser-cutting.html>
- [9] Costa Rodrigues, G., Vanhove, H., & Duflou, J. R. (2014). Direct diode lasers for industrial laser cutting: a performance comparison with conventional

- fiber and CO₂ technologies. *Physics Procedia*, 56, 901-908: <https://doi.org/10.1016/j.phpro.2014.08.109>
- [10] Schaeffer, L., Martins, V., Folle, L., Marques, A. S., Böesch Jr., P. R., & Ambrosi, C. (2012). *Programas CAD/CAE/CAM permitem reduzir perdas no corte de chapas & Conformação de Metais*, 30-45.
- [11] Frauenpreiss, T. (2007). *CO₂ Lasers: The Industrial Workhorse*. Obtido em 15 de Novembro de 2017, de EDU.photonics.com: https://www.photonics.com/a25155/COSUB2SUB_Lasers_The_Industrial_Workhorse
- [12] Almeida, J. (2018). *Tese de Mestrado - Conversão de um processo de soldadura manual em soldadura automática*. Porto: Departamento de Engenharia Mecânica da Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto.
- [13] Sigaud, L. (2017). *Átomos Multieletrônicos*. Brasil: Universidade Federal Fluminense.
- [14] Leme, A., Martins, B., Campitelli, B., Teixeira, G., Alves, G., & Augusto, F. (2009). *Solda a laser com feixe de elétrons-corrosão em frestas*. Obtido em 18 de Setembro de 2017, de EBAH: http://www.ebah.pt/content/ABAAABY_cAC/seminario-cores-1?part=2
- [15] Meijer, J. (2004). Laser beam machining (LBM), state of the art and new opportunities. *Journal of Materials Processing Technology*, 149, 2-17: <https://doi.org/10.1016/j.jmatprotec.2004.02.003>
- [16] Grenha, C. (2015). *Dissertação de Mestrado - Corte Térmico – Orçamentação de Produtos e Racionalização do Processo*. Guimarães: Departamento de Engenharia Mecânica da Universidade do Minho.
- [17] Treff, L. (2013). *O processo de corte a Laser*. Obtido em 15 de Novembro de 2017, de Indústria Hoje: <https://www.industriahoje.com.br/o-processo-de-corte-a-laser>
- [18] Ozaki, H., Koike, Y., Kawakami, H., & Suzuki, J. (2012). Cutting Properties of Austenitic Stainless Steel by Using Laser Cutting Process without Assist Gas. *Advances in Optical Technologies*, 8, 234-321: <https://doi.org/10.1155/2012/234321>

- [19] Chen, S. (1996). In-process high power CO₂ laser beam position sensing. *Optics & Laser Technology*, 28, 193-201: [https://doi.org/10.1016/0030-3992\(95\)00089-5](https://doi.org/10.1016/0030-3992(95)00089-5)
- [20] Trerotola, M. (2013). *How Does Laser Cutting Work?* Obtido em 18 de Novembro de 2017, de ESAB: <http://www.esabna.com/us/en/education/blog/how-does-laser-cutting-work.cfm>
- [21] Xie, S., Tu, Y., Liu, J., & Zhou, Z. (2001). Integrated and concurrent approach for compound sheet metal cutting and punching. *International Journal of Production Research*, 39, 1095–1112: <https://doi.org/10.1080/00207540010022359>
- [22] Yilbas, B. (1997). Parametric study to improve laser hole drilling process. *Journal of Materials Processing Technology*, 70, 264-273: [https://doi.org/10.1016/S0924-0136\(97\)00076-9](https://doi.org/10.1016/S0924-0136(97)00076-9)
- [23] Karatas, C., Keles, O., Uslan, I., & Usta, Y. (2006). Laser cutting of steel sheets: Influence of workpiece thickness and beam waist position on kerf size and stria formation. *Journal of Materials Processing Technology*, 172, 22–29: <https://doi.org/10.1016/j.jmatprotec.2005.08.017>
- [24] Eltawahni, H., Hagino, M., Benyounis, K., Inoue, T., & Olabi, A. (2012). Effect of CO₂ laser cutting process parameters on edge quality and operating cost of AISI316L. *Optics & Laser Technology*, 44, 1068- 1082: <https://doi.org/10.1016/j.optlastec.2011.10.008>
- [25] Santos, J. F., Quintino, L., & Miranda, R. M. (1991). *Processamento de materiais por feixe de electrões, laser e jacto de água*. Lisboa: ISQ.
- [26] Baptista, J., Barrionuevo, J., Spolador, P., & Caldas, V. (2016). *Sebenta: Corte a laser e corte a água*. Paraná: Universidade Federal do Paraná. Obtido em 4 de Dezembro de 2017, de http://www.exatas.ufpr.br/portal/deggraf_marcio/wp-content/uploads/sites/13/2014/09/DM-Corte-Lase-e-Agua.pdf
- [27] Gerck, E., & Lima, J. (1997). O Corte a Laser: da teoria à máquina. *ININ*, 97, 1-43: <https://doi.org/10.13140/RG.2.1.1475.3368>
- [28] Silveira, M. (2001). *Dissertação de Mestrado - Efeitos da radiação laser de vapor de cobre na parede dentina de canais radiculares: estudo in vitro por meio de microscopia eletrónica de varredura e microscópio*

estereoscópico. São Paulo: Faculdade de Odontologia da Universidade de São Paulo.

- [29] Weston, B. (2014). *Technology considerations for laser welding tubes and pipes*. Obtido em 7 de Dezembro de 2017, de The fabricator: <https://www.thefabricator.com/article/laserwelding/technology-considerations-for-laser-welding-tubes-and-pipes>
- [30] Sasnett, M. W. (1986). CO₂ laser design considerations for pulsed material processing. *Proceedings of the 3rd International Conference on Lasers in Manufacturing*, (pp. 279-292): [https://books.google.pt/books?id=823vCAAQBAJ&pg=PA43&lpg=PA43&dq=Sasnett,+M.+W.+\(1986\).+CO2+laser+design+considerations+for+pulsed+material+processing&source=bl&ots=ofBFF3WhB&sig=Ylx83YbTr4hu50u8e9Dem-TGMHE&hl=pt-PT&sa=X&ved=0ahUKEwiQ0L2Ps9HbAhVgJDQIHQ2zB1IQ6AEIKDAA#v=onepage&q=Sasnett%2C%20M.%20W.%20\(1986\).%20CO2%20laser%20design%20considerations%20for%20pulsed%20material%20processing&f=false](https://books.google.pt/books?id=823vCAAQBAJ&pg=PA43&lpg=PA43&dq=Sasnett,+M.+W.+(1986).+CO2+laser+design+considerations+for+pulsed+material+processing&source=bl&ots=ofBFF3WhB&sig=Ylx83YbTr4hu50u8e9Dem-TGMHE&hl=pt-PT&sa=X&ved=0ahUKEwiQ0L2Ps9HbAhVgJDQIHQ2zB1IQ6AEIKDAA#v=onepage&q=Sasnett%2C%20M.%20W.%20(1986).%20CO2%20laser%20design%20considerations%20for%20pulsed%20material%20processing&f=false)
- [31] Thompson, D. (2016). *Different types of CO₂ laser*. Obtido em 20 de Novembro de 2017, de ATK Laser: <http://atklaser.co.uk/2016/11/17/different-types-of-co2-laser/>
- [32] Schlüter, H. (2003). *CO₂ Lasers Make the Cut*. Obtido em 25 de Novembro de 2017, de photonics.com: https://www.photonics.com/a16233/CO2_Lasers_Make_the_Cut
- [33] Brierre, R. (2010). *Laser CO₂*. Obtido em 6 de Dezembro de 2017, de Wikipedia: https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Laser_CO2.es.jpg
- [34] DeMaria, J., & Hennessey, V. (2010). *CO₂ Laser*. Obtido em 20 de Dezembro de 2017, de SPIE.: <https://spie.org/membership/spie-professional-magazine/spie-professional-archives-and-special-content/jan2010-spie-professional/co2-laser?SSO=1>
- [35] Mahoney, P. (2011). *Carbon Dioxide (CO₂) Lasers Information*. Obtido em 21 de Dezembro de 2017, de GlobalSpec: https://www.globalspec.com/learnmore/optical_components_optics/lasers/carbon_dioxide_lasers
- [36] Henrique, F. (2013). *Diferença entre Corte Laser de Fibra e Laser de CO₂*. Obtido em 22 de Dezembro de 2017, de Indústria Hoje:

<https://www.industriahoje.com.br/diferenca-entre-corte-laser-de-fibra-e-laser-de-co2>

- [37] Faro, T. (2006). *Dissertação de Mestrado - Estudo e otimização do corte laser de alta velocidade em chapa metálica fina*. Porto: Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto.
- [38] Furtado, C. (2014). *Tese de Mestrado - Adaptação de um robô Fanuc 420iF para*. Coimbra: ISEC.
- [39] Machado, D. (2009). *Trabalho de Conclusão do Curso de Engenharia Mecânica - Projeto conceitual de máquina cortadora de chapas*. Porto Alegre: Universidade Federal do Rio Grande do Sul.
- [40] Anagnost, A. (2018). *Reusable mechanical drawing detailing tools*. Obtido em 4 de Janeiro de 2018, de Autodesk: <https://www.autodesk.com/products/autocad/included-toolsets/autocad-mechanical>
- [41] Leibinger-Kammüller, N. (2018). *TruTops Boost as the nucleus for networking production*. Obtido em 4 de Janeiro de 2018, de TRUMPF: https://www.trumpf.com/en_IN/products/software/translate-to-en-int-produkte/trutops-boost/
- [42] Scallan, G. (2018). *Tecnologia*. Obtido em 5 de Janeiro de 2018, de VectorLaser: http://www.vectorlaser.pt/?page_id=21412
- [43] Lundin, E. (2016). *Best practices for laser cutting tube, pipe, profiles*. Obtido em 15 de Janeiro de 2018, de thefabricator.com: <https://www.thefabricator.com/article/lasercutting/best-practices-for-laser-cutting-tube-pipe-profiles>
- [44] Chen, S. L. (1999). The effects of high-pressure assistant-gas flow on high-power CO₂ laser cutting. *Journal of Materials Processing Technology*, 88, 57-66: [https://doi.org/10.1016/S0924-0136\(98\)00402-6](https://doi.org/10.1016/S0924-0136(98)00402-6)
- [45] Rajaram, N., Sheik-Ahmad, J., & Cheraghi, S. (2003). CO₂ Laser Cut Quality of 4130 Steel. *International Journal of Machine Tools & Manufacture*, 43, 351-358: [https://doi.org/10.1016/S0890-6955\(02\)00270-5](https://doi.org/10.1016/S0890-6955(02)00270-5)
- [46] Choudhary, B. (10 de Maio de 2018). *Industrial Applications of LASERS*. Obtido de NITTTR:

http://www.nitttrchd.ac.in/sitenew1/app_sc/ppts/laser/Laser%20Material%20Processing.pdf

- [47] Madić, M., & Radovanović, M. (2011). Experimental Investigations of CO₂ Laser Cut Quality: A Review. *Nonconventional Technologies Review*, 4, 36-37: <https://pt.scribd.com/document/213123860/07-Radovanovic-Experimental-Investigations-of-CO2-Laser-Cut-Quality>
- [48] Ivarson, A., Powell, J., Ohlsson, L., & Magnusson, C. (1994). Energy redistribution in laser cutting. *Welding in the World*, 31, 6-160: https://www.researchgate.net/publication/293534635_Energy_redistribution_in_laser_cutting
- [49] Zebala, W., Matras, A., & Kowalczyk, R. (2012). Quality aspects of steel parts after laser cutting . *Advances in manufacturing science and technology*, 36, 11-13: <http://yadda.icm.edu.pl/yadda/element/bwmeta1.element.baztech-article-BOS5-0028-0079;jsessionid=567211791E57BAE1979E6EABC6C0F5B1>
- [50] Caló, E. (2013). *Estudo comprovativo da eficiência entre os processos de corte plasma e laser no material ASTM A36 na espessura de 12 mm*. São Caetano do Sul : Escola de Engenharia Mauá.
- [51] Neves, M., Berretta, J., Almeida, I., Rossi, W., & Vieira Jr., N. (2002). Corte de materiais com laser pulsado de Nd:YAG. *XXVII Consolda e XII Congresso Internacional de Soldagem*. São Paulo: Instituto de Pesquisas Energéticas e Nucleares.
- [52] O'Neill, W., & Gabzdyl, J. (2000). New developments in laser-assisted oxygen cutting. *Optics and Lasers in Engineering*, 34, 355-367: [https://doi.org/10.1016/S0143-8166\(00\)00070-1](https://doi.org/10.1016/S0143-8166(00)00070-1)
- [53] Yilbas, B. (2004). Laser cutting quality assessment and thermal efficiency analysis. *Journal of Materials Processing Technology*, 155-156, 2106-2115: <https://doi.org/10.1016/j.jmatprotec.2004.04.194>
- [54] Madić, M., & Radovanović, M. (2012). Analysis of the Heat Affected Zone in CO₂ Laser Cutting of stainless steel. *Thermal Science*, 16, 363-373: <https://doi.org/10.1063/1.4849285>

- [55] Ramos, J. (2011). *Thesis - Design and Testing of Components for a Low Cost Laser Cutter*. Massachusetts: Department of Mechanical Engineering of Massachusetts Institute of Technology.
- [56] Hsu, M., & Molian, P. (1994). Thermochemical modelling in CO₂ laser cutting of carbon steel. *J. of Materials Science*, 29, 5607-5611: <https://doi.org/10.1007/BF00349954>
- [57] Golnabi, H., & Bahar, M. (2009). Investigation of optimum condition in oxygen gas-assisted laser cutting. *Optics & Laser Technology*, 41, 454-460: <https://doi.org/10.1016/j.optlastec.2008.08.001>
- [58] Wandera, C. (2006). *Research Work - Laser cutting os austenitic stainless steel with a high quality laser beam*. Lappeenranta: Lappeenranta University of Technology.
- [59] Patel, U., & Sanghavi, S. (2014). Parametric Analysis of Process Parameters of Laser Cutting Machine(Mazak Hyper Gear 510) By Using Anova Method On SS 304. *Saffrony Institute of Technology*, 3, 3007-3011: http://www.academia.edu/6994178/Parametric_Analysis_of_Process_Parameters_of_Laser_Cutting_Machine_Mazak_Hyper_Gear_510_By_Using_Anova_Method_On_SS_304
- [60] Rossi, W., De Brito, R., R., B. J., De Almeida, I., & Vieira Jr., N. (2001). *Microfuração a laser em chapa de aço inoxidável AISI 304*. São Paulo: Instituto de Pesquisas Energéticas e Nucleares.
- [61] Meszlényi, G., Dobránszky, J., & Dévényi, L. (2008). Laser cutting of stainless steel thin sheets with pulsed Nd:YAG laser. *Budapest University of Technology and Economics*, 2, 1-6: <http://real.mtak.hu/6667/1/1187188.pdf>
- [62] Junior, D., Ventrella, V., & Gallego, J. (2016). Congresso Brasileiro de Engenharia e Ciência dos Materiais. *Microfuração com laser pulsado Nd:YAG em chapas de aço inoxidável AISI 316L*, (pp. 7768-7715). Natal.
- [63] Argade, P. V., & Arakerimath, R. (2016). Parametric Investigations on CO₂ Laser Cutting of AISI 409 to Optimize Process Parameters by Taguchi method. *International Journal of Engineering Trends and Technology (IJETT)*, 37, 311-316: <https://doi.org/10.14445/22315381/IJETT-V37P255>
- [64] Senthilkumar, V., Bharath, M., Dhanapal, K., Kumaran, M., & Gobinath, R. (2016). Analysis and Optimization of Laser Machining Parameters.

International Journal of Innovative Research in Science, Engineering and Technology, 5, 33-40: <http://docplayer.net/33160236-Analysis-and-optimization-of-laser-machining-parameters.html>

- [65] Grepl, M., Petru, J., Cep, R., Petrkovska, & Zlamal, T. (2012). The effect of process parameters on result quality of cut during laser cutting of material. *Annals & Proceedings of DAAAM International 2012* (pp. 1035-1038). Viena: DAAAM International.
- [66] Tavares, J. M. (2012). *Indicação dos Estados de Superfície*. Obtido em 14 de Junho de 2018, de FEUP: <https://paginas.fe.up.pt/~tavares/ensino/CFAC-G/Downloads/Apontamentos/Estado%20de%20Superficies.pdf>
- [67] Santos, V. M. (10 de Junho de 2018). *O que é o Método de Taguchi (Design Robusto) no Seis Sigma?* Obtido de FM2S: <https://www.fm2s.com.br/taguchi-design-robusto-seis-sigma/>
- [68] Castro, P. M. (2015). *Trabalho Académico - Método de Taguchi: controlo de qualidade com recurso não-convencional ao desenho estatístico de experiências (DOE)*. Lisboa: Instituto Português de Administração de Marketing.
- [69] Alam, M. (2013). *ECE 695A Lecture 35: Design of Experiments*. Obtido em 10 de Junho de 2018, de Nano Hub: <https://nanohub.org/resources/17671>
- [70] *Gráficos fatoriais e gráficos de dispersão para Analisar de experimento de Taguchi*. (10 de Junho de 2018). Obtido de Minitab: <https://support.minitab.com/pt-br/minitab/18/help-and-how-to/modeling-statistics/doe/how-to/taguchi/analyze-taguchi-design/interpret-the-results/all-statistics-and-graphs/factorial-plots-and-scatterplots/>
- [71] *Interpretar os principais resultados para Regressão não linear*. (10 de Junho de 2018). Obtido de Minitab: <https://support.minitab.com/pt-br/minitab/18/help-and-how-to/modeling-statistics/regression/how-to/nonlinear-regression/interpret-the-results/key-results/>
- [72] Sharma, V., Chattopadhyaya, S., & Hloch, S. (2017). Surface Quality Finish in Laser Cutting using Taguchi Design. *Birla Institute of Technology*, 24, 15-19: <https://doi.org/10.17559/TV-20130719101736>

- [73] Madíc, M., Radovanović, M., & Gostimirović, M. (2013). Selection of near optimal laser cutting parameters in CO₂ laser cutting by the Taguchi method. *Technical University of Ostrava*, 59, 99-107: <https://dspace.vsb.cz/bitstream/handle/10084/111751/1962.pdf?sequence=1>
- [74] Tushar, J. (2017). Parameters Optimization of Laser Beam Machine. *International Journal of Advance Research, Ideas and Innovations in Technology*, 3, 801-809: <https://www.ijariit.com/manuscript/parameters-optimization-of-laser-beam-machine/>

ANEXOS

6.1 ANEXO A – FICHA TÉCNICA DO LOTE DO MATERIAL AISI 316L

6.2 ANEXO B – FICHA TÉCNICA DO LOTE DO MATERIAL St12

6.3 ANEXO C – FICHA TÉCNICA DO EQUIPAMENTO DE FONTE
LASER DE FIBRA ÓTICA

6.4 ANEXO D – FICHA TÉCNICA DO EQUIPAMENTO DE FONTE
LASER DE CO₂

6 ANEXOS

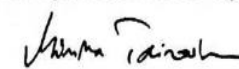
6.1 ANEXO A – Ficha técnica do lote do material AISI 316L

Line Reihe Ligne		Item Position Poste	Charge-test No. Schmelze-Probe Nr. Coulée n°	Size, Abmessungen, Dimensions	Quantity Stückzahl Nombre	Weight, Gewicht, Poids	Finish Ausführung Fini EN/ASTM
1		1	44976 5	2,0 X 1250 X 2500 MM	40	1968 KG	2B
2		2	45846 1	2,0 X 1500 X 3000 MM	23	1646 KG	2B
3		3	46590 1	2,5 X 1000 X 2000 MM	25	992 KG	2B



Chemical composition, Chemische Zusammensetzung, Composition chimiques										
Charge no. Schmelze Nr. Coulée n°	C %	Si %	Mn %	P %	S %	Cr %	Ni %	MO %	N %	
44976	0,019	0,46	0,92	0,033	<.001	16,7	10,1	2,04	0,041	
45846	0,017	0,53	0,89	0,036	0,001	16,8	10,1	2,05	0,046	
46590	0,018	0,38	0,96	0,034	<.001	16,6	10,1	2,04	0,041	

Mechanical properties, Mechanische Eigenschaften, Caracteristiques mecaniques										Tensile test, Zugversuch, Essai de traction	
Line Reihe Ligne	Location Ort Lieu	Rp0.2 MPa	Rp1.0 MPa	Rm MPa	%	A50 %	A80 %	Hardness Härte, Duratè HBW		ISO 6892-1:2009 A224 SAMPLES PERPENDICULAR TO THE ROLLING DIRECTION	
1	E	303	330	598		56	55	165		APPROVED ACC. TO AD2000-W0 WITH VERIFICATION OF THE UNIFORMITY OVER THE STRIP LENGTH. CERTIFIED ACC. TO PED 97/23/EC BY TUV NORD REG. NO. 0045. DOPS ACC. TO CPR AVAILABLE ON THE WEB PAGE BY STEEL NUMBER	
	A	297	324	590		59	57	165			
2	E	290	316	588		60	58	163			
	A	290	316	587		60	58	164			
3	E	309	337	592		57	56	164			
	A	305	333	592		56	55	165			

Identify test, Verwechslungsprüfung, Controle d'identification		OK
Surface, Oberflächliche Surface		OK
Test of intergran. corros. Prüfung auf interkrist. Korros. Test de corros. intercris.		OK
EN ISO 3651-2 A: OK		

ASTM A240/A240M ASME SA-240/SA-240M II A ED. 2013 TYPE 316 EN 10088-2:2014/1.4404, 1.4401	We certify that the above mentioned products comply with the terms of the order contract. Wir bestätigen, dass die Lieferung den Vereinbarungen der Bestellannahme entspricht. Nous certifions que les produits énumérés ci-dessus sont conformes aux prescriptions de la commande.
	This test certificate is made by controlled ADP-system and is valid without signature. Dieses Zeugnis wurde von einem überprüften Datenverarbeitungssystem erstellt und ist ohne Unterschrift gültig. Ce certificat a été établi par un système informatique contrôlé et est valide sans signature.
	Outokumpu Stainless Oy  Authorized inspector Werkssachverständiger Inspecteur autorisé MINNA TAIVAINEN
	FI-95490 Tornio, Finland Tel. +358 16 4521, Fax +358 16 452350. www.outokumpu.com Domicile: Tornio, Finland, Business Identity Code 0823315-9

6.2 Anexo B – Ficha técnica do lote do material St12

 Gonvarri Portugal <small>GONVARRI PRODUTOS SIDERURGICOS, S.A. APARTADO 24 - VILHAS DE AZEITÃO - 2625-901 AZEITÃO TELEFONO: 212 198 800 (MÓBIL) - FAX: 212 181 800/78</small>		CERTIFICADO DE QUALIDADE 2.2 EN 10204										Página: 1 A10															
A01		A03 CERTIFICADO NÚMERO: 010322774600001 A06 N.º ALBARAN: 103227745 A07 PEDIDO CLIENTE: 77314 B01 REFERÊNCIA CLIENTE: GCB3000X1500X2 B02 ESPECIFICAÇÃO TÉCNICA C P DCO1 A M										15161 ANTERO & CA., SA. AV VASCO DA GAMA N.º 7660 - APT 313 4431-901 AVINTES - VNG 11, Portugal															
Certificamos que o material designado satisfaz AS ESPECIFICAÇÕES TÉCNICAS DA ENCOMENDA e que, uma vez efectuadas todas as operações de controlo e ensaio, corresponde a todas as especificações particulares assim como as NORMAS EM VIGOR antes referidas.		DIMENSÕES (mm): ESPESSURA 2,00 LARGURA 1.500,00 COMPRIM. 3.000,00																									
BOBINA Nº	HRB	P	TRACÇÃO				f	n	REVESTIMENTO		RUGOSIDAD		EMB	COMPOSIÇÃO QUÍMICA %													
			S	Re	Rm	A%			(4)	(4)	Re	Otr.Med.		C	Mn	Si	P	S	Al	Nb	Ti	V	B	Cr	N		
(1)	(2)	(1)	N/mm ²		(3)	(4)	(4)	(µm)	(5)	(mm)	C71	C72	C73	C74	C75	C76	C77	C78	C80	C80	C82	C81					
807	C32	D01	C02	C11	C12	C13	C14	C15	C80	C80	C81	C82	C83	C71	C72	C73	C74	C75	C76	C77	C78	C80	C80	C82	C81		
3011898		F	T	201,85	300,77	42,92								0,0428	0,2120	0,0104	0,0105	0,0115	0,0440	0,0094	0,0010	0,0000	0,0002	0,0281	0,0029		
(1) POSIÇÃO (2) Princípio (3) Método (4) F.º		(1) REVEST. (2) Capa (3) µm		OBSERVAÇÕES: DOBRAGEM OK																				Organismo e Serviço de Controlo SERVIÇO LABORATORIO A06 			

6.3 Anexo C – Ficha técnica do equipamento de fonte laser de fibra ótica

Technical data

	TruLaser 3030 fiber	TruLaser 3040 fiber
DIMENSIONS		
LENGTH	8800 mm	11400 mm
WIDTH	6010 mm	6730 mm
HEIGHT	2400 mm	2400 mm
MAX. SPEED		
SIMULTANEOUS	140 m/min	140 m/min
WORKING RANGE		
X AXIS	3000 mm	4000 mm
Y AXIS	1500 mm	2000 mm
MAX. WORKPIECE WEIGHT	900 kg	1700 kg
LASER-SPECIFIC DATA - TRUDISK 3001		
MAX. LASER OUTPUT	3000 W	3000 W
MAX. SHEET THICKNESS, MILD STEEL	20 mm	20 mm
MAX. SHEET THICKNESS, STAINLESS STEEL	15 mm	15 mm
MAX. SHEET THICKNESS, ALUMINIUM	15 mm	15 mm
MAX. SHEET THICKNESS, COPPER	6 mm	6 mm
MAX. SHEET THICKNESS, BRASS	6 mm	6 mm
LASER-SPECIFIC DATA - TRUDISK 4001		
MAX. LASER OUTPUT	4000 W	4000 W
MAX. SHEET THICKNESS, MILD STEEL	25 mm	25 mm
MAX. BLECHDICKE EDELSTAHL	20 mm	20 mm
MAX. BLECHDICKE ALUMINIUM	20 mm	20 mm

6.4 Anexo D – Ficha técnica do equipamento de fonte laser de CO₂

Technical data

	TruLaser 3030	TruLaser 3040
DIMENSIONS		
LENGTH	9300 mm	12000 mm
WIDTH	4700 mm	5300 mm
HEIGHT	2200 mm	2200 mm
MAX. SPEED		
SIMULTANEOUS	140 m/min	140 m/min
WORKING RANGE		
X AXIS	3000 mm	4000 mm
Y AXIS	1500 mm	2000 mm
MAX. WORKPIECE WEIGHT	900 kg	1700 kg
LASER-SPECIFIC DATA - TRUFLOW 3200		
MAX. LASER OUTPUT	3200 W	3200 W
MAX. SHEET THICKNESS, MILD STEEL	20 mm	20 mm
MAX. SHEET THICKNESS, STAINLESS STEEL	12.7 mm	12.7 mm
MAX. SHEET THICKNESS, ALUMINUM	8 mm	8 mm
LASER-SPECIFIC DATA - TRUFLOW 4000		
MAX. LASER OUTPUT	4000 W	4000 W
MAX. SHEET THICKNESS, MILD STEEL	20 mm	20 mm
MAX. SHEET THICKNESS, STAINLESS STEEL	15 mm	15 mm
MAX. SHEET THICKNESS, ALUMINUM	10 mm	10 mm