

UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARANÁ

JONATAS PIETROCHINSKI MENDES

LASER: ARTIGO DE REVISÃO BIBLIOGRÁFICA DA TECNOLOGIA E  
COMISSONAMENTO DA MÁQUINA DE CORTE A LASER SF 1313 G-SERIES

CURITIBA

2022

JONATAS PIETROCHINSKI MENDES

LASER: ARTIGO DE REVISÃO BIBLIOGRÁFICA DA TECNOLOGIA E  
COMISSIONAMENTO DA MÁQUINA DE CORTE A LASER SF 1313 G-SERIES

TCC apresentado ao curso de Graduação em Engenharia Mecânica, Setor de Tecnologia, Universidade Federal do Paraná, como requisito parcial à obtenção do título de Bacharel em Engenharia Mecânica.

Orientador: Prof. Dr. Dalberto Dias da Costa

CURITIBA

2022

## TERMO DE APROVAÇÃO

JONATAS PIETROCHINSKI MENDES

LASER: ARTIGO DE REVISÃO BIBLIOGRÁFICA DA TECNOLOGIA E  
COMISSIONAMENTO DA MÁQUINA DE CORTE A LASER SF 1313 G-SERIES

TCC apresentado ao curso de Graduação em Engenharia Mecânica, Setor de Tecnologia, Universidade Federal do Paraná, como requisito parcial à obtenção do título de Bacharel em Engenharia Mecânica.

---

Prof. Dr. Dalberto Dias da Costa

Orientador(a) – Departamento de Mecânica da UFPR

Curitiba, XX de maio de 2022.

## **AGRADECIMENTOS**

Tive a honra de ser aceito como estagiário no Laboratório de Usinagem, tendo por orientador e supervisor de estágio o Prof. Dr. Dalberto Dias da Costa. Sou imensamente grato pelo conhecimento ameadado ao longo do meu estágio, pelo longo acompanhamento, orientação e amizade. Agradeço ainda ao meu orientador, Prof. Dr. Dalberto Dias da Costa, pela excelente sugestão do tema deste Trabalho de Conclusão de Curso – uma revisão bibliográfica de artigos que tem como tema o corte a laser e o comissionamento de entrega e operacionalização da máquina de corte a laser Senfeng SF 1313G 750W. Tanto a revisão de artigos quanto o comissionamento de um equipamento que opera com a tecnologia do laser foram temas fascinantes, que pude desenvolver com bastante afinco durante a interrupção das aulas por conta da pandemia de Covid-19.

Estendo meus agradecimentos ao Departamento de Engenharia Mecânica da Universidade Federal do Paraná, na pessoa do seu coordenador Prof. João Moraes da Silva Neto, na gestão 2020-2021.

Ao Curso de Engenharia Mecânica da Universidade Federal do Paraná, na pessoa do seu coordenador Prof. Luciano Kiyoshi Araki na gestão 2020-2021, e pelo conhecimento compartilhado por todo o corpo docente ao longo dos anos do curso.

Aos colegas, pelo companheirismo e ajuda mútua.

## RESUMO

O objetivo da revisão bibliográfica narrativa que compõe a primeira metade deste Trabalho de Conclusão de Curso é a análise e descrição da tecnologia LASER de amplificação da radiação, desde sua fundamentação física teórica, desenvolvimento histórico, categorização atual quanto ao meio de ganho, tipo de operação e principais aplicações, com principal abordagem sobre a utilização do laser no corte de materiais e maior enfoque ao corte de metais. A revisão bibliográfica encerra-se com um panorama atual do laser de fibra, seu funcionamento, posição recente no mercado, comparativos com outras tecnologias de corte a laser disponíveis, análise dos dados mais recentes relativos à aplicação do LASER e reúne pareceres relativamente à sua evolução, eficácia, segurança e futuro. Foi realizada uma revisão da literatura através da consulta de livros e artigos de língua portuguesa, inglesa, francesa e italiana, com um período de publicação entre 1967 e 2020, em bases de dados de relevo. A segunda metade deste Trabalho de Conclusão de Curso debruçou-se no comissionamento operacional do novo equipamento de corte a laser, uma nova tecnologia entregue durante a reforma do Laboratório de Usinagem do Departamento de Engenharia Mecânica da Universidade Federal do Paraná.

Palavras-chave: Laser. Usinagem. Corte a laser. Laser de fibra. Comissionamento de nova tecnologia.

## **ABSTRACT:**

The objective of the narrative bibliographic review that composes the first half of this Final Paper is the analysis and description of the LASER technology of radiation amplification, from its theoretical physical foundation, historical development, current categorization as to the means of gain, type of operation and main applications, with a main approach to the use of lasers in cutting materials and a greater focus on metal cutting. The literature review ends with a current overview of fiber laser, its operation, recent market position, comparisons with other available laser cutting technologies, analysis of the most recent data on the application of LASER and gathers opinions regarding its evolution, effectiveness, safety and future. A literature review was carried out by consulting books and articles in Portuguese, English, French and Italian, with a publication period between 1967 and 2020, in relevant databases. The second half of this Final Paper focused on the operational commissioning of the new laser cutting equipment, a new technology delivered during the renovation of the Machining Laboratory of the Mechanical Engineering Department of the Federal University of Paraná.

Keywords: Laser. Machining. Laser cut. Fiber laser. Commissioning of new technology.

## LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 – REFRAÇÃO DE LUZ "BRANCA" E LASER EM UM PRISMA .....	26
Figura 2 - COMPARAÇÃO DE LUZ BRANCA, MONOCROMÁTICA E LASER.....	27
Figura 3 - A ONDA ELETROMAGNÉTICA.....	28
Figura 4 – NÍVEIS DE ENERGIA DO SISTEMA QUÂNTICO.....	31
Figura 5 – INTERAÇÃO DA RADIAÇÃO ELETROMAGNÉTICO COM UM SISTEMA QUÂNTICO, APROXIMAÇÃO DE DOIS NÍVEIS. ....	32
Figura 6 - POPULAÇÃO DOS NÍVEIS ENERGÉTICOS EM EQUILÍBRIO TÉRMICO. ....	34
Figura 7 – REPRESENTAÇÃO DOS COEFICIENTES DE EXCITAÇÃO B <sub>12</sub> E COEFICIENTE DE EMISSÃO B <sub>21</sub> .....	35
Figura 8 – OS NÍVEIS ENERGÉTICOS NA APROXIMAÇÃO DE TRÊS E QUATRO NÍVEIS. ....	36
Figura 9 – AMPLIFICAÇÃO DA RADIAÇÃO.....	37
Figura 10 – ESPECTRO DE UM LASER DE HÉLIO NEÔNIO.....	39
Figura 11 – ILUSTRAÇÃO DAS PROPRIEDADES DA RADIAÇÃO LASER, COMPARADA À LÂMPADA E AO LED. ....	40
Figura 12 – COMPRIMENTOS DE ONDAS DE LASERS DISPONÍVEIS COMERCIALMENTE. ....	41
Figura 13 – ARQUITETURA E FUNCIONAMENTO DE UM LASER COMUM.....	42
Figura 14 – ARQUITETURA DE FORMAÇÃO DA RADIAÇÃO LASER.....	44
Figura 15 – LASER DE HÉLIO-NEÔNIO. ....	45
Figura 16 - ONDAS ESTACIONÁRIAS EM UM RESSONADOR ÓPTICO. ....	48
Figura 17 – TIPOS DE RESSONADORES ÓPTICOS USADOS EM UM SISTEMA LASER. ....	49
Figura 18 – DISTRIBUIÇÃO DO FEIXE DE SAÍDA GAUSSIANO EM MODO FUNDAMENTAL TEM <sub>00</sub> . ....	50
Figura 19 – EXEMPLO DE MODOS TRANSVERSAIS DENTRO DE UM RESSONADOR ÓPTICO. ....	51
Figura 20 – ESQUEMA DO LASER DE RUBY, DE THEODORE MAIMAN.....	56
Figura 21 – O PRIMEIRO CORTE A LASER DE GÁS ASSISTIDO POR OXIGÊNIO EM MAIO DE 1967.....	58
Figura 22 – ARRANJO EXPERIMENTAL USADO NOS PRIMEIROS EXPERIMENTOS DE CORTE. ....	59
Figura 23 – A CHAPA UTILIZADA NO PIONEIRO CORTE A LASER DE HOULCROFT E SULLIVAN.....	59
Figura 24 – CONCEITO DE 1969 PARA UMA MÁQUINA-FERRAMENTA DE CORTE A LASER.....	60
Figura 25 – PRIMEIRA MÁQUINA DE CORTE A LASER CO <sub>2</sub> COM ÓTIMCA MÓVEL DE 2 EIXOS (1975).....	61
Figura 26 – CORTE A LASER DE AÇO INOXIDÁVEL COM 150MM DE PROFUNDIDADE. VISTAS DA PLACA. ....	61
Figura 27 – CLASSIFICAÇÃO DO LASER DE ACORDO COM O MATERIAL (MEIO) ATIVO E BOMBEAMENTO. ....	63

Figura 28 - UM FASOR 50 W, BASEADO EM LASER Nd:YAG, USADO NO STARFIRE OPTICAL RANGE.....	65
Figura 29 – MATRIZ DE PEQUENOS LASERS SEMICONDUTORES VERMELHOS. ....	69
Figura 30 - O LASER DE ELÉTRONS LIVRES FELIX, NOS PAÍSES BAIXOS.....	71
Figura 31 – REPRESENTAÇÃO ESQUEMÁTICA DE UM ONDULADOR.....	72
Figura 32- ESQUEMA DE UM LASER DE CORANTE. ....	72
Figura 33 – ILUSTRAÇÃO DOS COMPRIMENTOS DE ONDA DE RADIAÇÃO E ENERGIA DE FÓTON EM TIPOS PARTICULARES DE LASER.....	73
Figura 34 – OPERAÇÃO QUASE-CONTÍNUA, MEDIDA DA INTENSIDADE DE SAÍDA PARA DIFERENTES VALORES DE LARGURA DE PULSO DE DISPARO.....	75
Figura 35 - DESENVOLVIMENTO TEMPORAL DA RADIAÇÃO LASER EM REGIME DE EXECUÇÃO LIVRE.....	76
Figura 36 - DESENVOLVIMENTO TEMPORAL DA RADIAÇÃO LASER EM REGIME DE EXECUÇÃO Q-COMUTADO QUASE- CONTÍNUO (a) E Q-COMUTADO PULSADO (b).....	77
Figura 37 - DESENVOLVIMENTO TEMPORAL DA RADIAÇÃO LASER EM REGIME DE EXECUÇÃO MODO BLOQUEADO QUASE- CONTÍNUO (a) E MODO BLOQUEADO REGIME PULSADO (b).....	78
Figura 38 – APLICAÇÃO DE LASER EM IMAGENS DE ÓPTICA ADAPTATIVA ASTRONÔMICA.....	80
Figura 39 – ARMA TÁTICA ISRAELENSE-AMERICANA DE ALTA ENERGIA. ....	82
Figura 40 – LASER AEROTRANSPORTADO (ABL) NUM BOEING YAL-1.....	84
Figura 41 – DIAGRAMA DO TERMINAL DE LASER QUE CONSTITUI A PARTE ÓPTICA DO EQUIPAMENTO ERDS DA AGÊNCIA ESPACIAL EUROPEIA. ....	87
Figura 42 – ESQUEMA DO PROCESSO DE CORTE A LASER. ....	91
Figura 43 – ESQUEMA DE CORTE A LASER POR SUBLIMAÇÃO.....	93
Figura 44 – COMPONENTES DE UM SISTEMA DE CORTE A LASER. ....	95
Figura 45 – PROJETOS DE BICOS PARA CORTE A LASER.....	98
Figura 46 – ESQUEMA DE UMA CABEÇA DE CORTE A LASER. ....	99
Figura 47 – ESQUEMA DE CORTE A LASER USANDO O BOCAL ANELAR. ....	100
Figura 48 – COMPARAÇÃO DO MÉTODO DE “CORTE LIMPO” AO TRADICIONAL NO CORTE DE AÇO INOXIDÁVEL. ....	100
Figura 49 - FOCO DE FEIXE LASER.....	105
Figura 50 – ESQUEMA REPRESENTATIVO DE ONDAS LONGITUDINAIS E DE ONDAS TRANSVERSAIS.....	106
Figura 51 – ESQUEMA REPRESENTATIVO PARA POLARIZAÇÃO DA LUZ COM USO DE UM FILTRO POLARIZADOR.....	107
Figura 52 - O EFEITO DA POLARIZAÇÃO NO DESEMPENHO DE CORTE COM DIREÇÃO DE CORTE. ....	108
Figura 53 - EFEITO DA ORIENTAÇÃO DO LASER POLARIZADO PLANO NA QUALIDADE DE CORTE. ....	109
Figura 54 - VARIAÇÃO DA TAXA DE CORTE COM A ESPESSURA DA PEÇA (EM AÇO) NO CORTE A LASER ASSISTIDO POR OXIGÊNIO.....	110
Figura 55 - CURVAS DE LIMITE PARA VELOCIDADE DE CORTE COM VARIAÇÃO DA ESPESSURA DA PEÇA NO CORTE A LASER.....	111
Figura 56 - ESPECTRO ELETROMAGNÉTICO. ....	114

Figura 57 - ABERTURA DE CORTE GERADA E VOLUME DE MATERIAL REMOVIDO.....	115
Figura 58 - VELOCIDADE DE CORTE EM FUNÇÃO DA PUREZA DO GÁS OXIGÊNIO.....	117
Figura 59 - COMPARAÇÃO DA VELOCIDADE MÁXIMA DE CORTE COM O <sub>2</sub> E COM ARGÔNIO PARA DIFERENTES METAIS.....	120
Figura 60 - VARIAÇÃO DA VELOCIDADE DE CORTE COM A PRESSÃO DO GÁS DE ASSISTÊNCIA OXIGÊNIO.....	121
Figura 61 - VARIAÇÃO DA VELOCIDADE DO FLUXO DE FUSÃO E ESPESSURA DO FILME DE FUSÃO COM PROFUNDIDADE DE CORTE PARA DIFERENTES PRESSÕES DE GÁS AUXILIAR.....	123
Figura 62 - CORTE DE AÇO INOXIDÁVEL COM GÁS INERTE E ALTAS PRESSÕES. ....	124
Figura 63 - VARIAÇÃO ESQUEMÁTICA DA ESPESSURA DO FUNDIDO COM A VELOCIDADE DE CORTE.....	126
Figura 64 - ÂNGULO DE INCIDÊNCIA DO FEIXE DE LASER NA SUPERFÍCIE DE CORTE E INCLINAÇÃO DA SUPERFÍCIE DE CORTE COM A VERTICAL.....	130
Figura 65 - VARIAÇÃO DA EFICIÊNCIA DE ABSORÇÃO DE UM FEIXE P-POLARIZADO COM INTENSIDADE DE FEIXE.....	130
Figura 66 - VARIAÇÃO DA REFLEXIVIDADE DO AÇO-CARBONO COM ÂNGULO DE INCIDÊNCIA DO FEIXE.....	131
Figura 67 - ILUSTRAÇÃO DAS ESTRIAS FORMADAS EM UMA SUPERFÍCIE APÓS O CORTE A LASER.....	134
Figura 68 - UMA VISÃO BIDIMENSIONAL DO PROCESSO DE CORTE. ....	136
Figura 69 - EFEITO DA PRESSÃO DO GÁS AUXILIAR NO PONTO DE SEPARAÇÃO DA CAMADA LIMITE E FIXAÇÃO DA ESCÓRIA. ....	138
Figura 70 - ESCÓRIA FORMADA NA BORDA INFERIOR DA PEÇA DE TRABALHO APÓS O CORTE A LASER.....	139
Figura 71 - ESQUEMA DAS FORÇAS QUE ATUAM SOBRE O MATERIAL FUNDIDO DURANTE O CORTE POR FUSÃO A LASER.....	140
Figura 72 - EFEITO DA VELOCIDADE DE CORTE NO PADRÃO DE ESTRIAS EM AÇO MACIO DE 15 MM.....	142
Figura 73 - EFEITO DA PRESSÃO DO GÁS AUXILIAR NA LOCALIZAÇÃO DO PONTO DE SEPARAÇÃO DA CAMADA LIMITE E NA LARGURA DA ABERTURA DE CORTE.....	143
Figura 74 - VARIAÇÃO DA RUGOSIDADE DA SUPERFÍCIE DAS BORDAS DE CORTE COM A PRESSÃO DE GÁS AUXILIAR.....	144
Figura 75 - EFEITO DA PRESSÃO DO GÁS AUXILIAR DE OXIGÊNIO NAS ESTRIAS E LARGURA DE CORTE. ....	145
Figura 76 - EFEITO DA POSIÇÃO FOCAL NA LARGURA DA ABERTURA PARA UM CORTE DE LIGA DE ALUMÍNIO 7075-T6. ....	146
Figura 77 - EFEITO DA POSIÇÃO DO PONTO FOCAL NA ADERÊNCIA DA ESCÓRIA EM AÇO INOXIDÁVEL DE 10 MM.....	147
Figura 78 - REFLETÂNCIA ESPECTRAL DE PRATA, COBRE, ALUMÍNIO E AÇO CARBONO AOS COMPRIMENTOS DE ONDA $2.10^{-7}$ A $2.10^{-5}$ M. ....	148
Figura 79 – COMPRIMENTO DE ONDA DE OPERAÇÃO E POTÊNCIA DE SAÍDA EM MODO ÚNICO DOS LASERS DE FIBRA.....	149

Figura 80 - REFLEXIVIDADE DOS PRINCIPAIS METAIS AOS COMPRIMENTOS DE ONDA $2.10^{-7}$ A $2.10^{-6}$ M. ....	149
Figura 81 - MICROGRAFIAS ÓPTICAS DA MORFOLOGIA DA SUPERFÍCIE DE BORDA DE CHAPA DE ALUMÍNIO CORTADA A LASER, EM FUNÇÃO DO TIPO DE GÁS DE ASSISTÊNCIA E DA POTÊNCIA DE CORTE .....	154
Figura 82 - ILUSTRAÇÃO DA VARIAÇÃO DO CONTEÚDO DE OXIGÊNIO COM A DISTÂNCIA DA ARESTA DE CORTE. ....	156
Figura 83 - COMPARAÇÃO DE PROCESSOS DE CORTE TÉRMICO EM AÇO DE BAIXO CARBONO. ....	165
Figura 84 - COMPARAÇÃO DE PROCESSOS DE USINAGEM POR DESCARGA ELÉTRICA (EDM), CORTE A LASER E CORTE A ARCO DE PLASMA. ....	166
Figura 85 - LARGURA “KERF” TÍPICA CORTE DE AÇO CARBONO DE 1/2” DE ESPESSURA. ....	167
Figura 86 – SÍMBOLOS DE ADVERTÊNCIA À RADIAÇÃO LASER. ....	168
Figura 87 - DIAGRAMA DA ESTAÇÃO DE PROCESSAMENTO DE MATERIAIS COM LASER A FIBRA.....	171
Figura 88 - MERCADO DE PROCESSAMENTO DE LASER DA CHINA POR PRODUTO, 2014 – 2025. ....	172
Figura 89 - RELATÓRIO DE MERCADO MUNDIAL DE LASER DE 2019, COM DADOS HISTÓRICOS DE VENDAS ATÉ 2018.....	173
Figura 90 - UM LASER DE FIBRA DE ITÉRBIO DE 7 KW, COMPREENDENDO MÓDULOS DE FIBRA DE 200W DE MODO ÚNICO E SEU SET-UP ÓTICO.....	176
Figura 91 - O CONCEITO DE FIBRA DE REVESTIMENTO DUPLO. ....	178
Figura 92 - UMA ILUSTRAÇÃO ESQUEMÁTICA DA FIBRA DE REVESTIMENTO DUPLO.....	179
Figura 93 - COMBINAÇÃO DE FEIXES PARA MODO MÚLTIPLO. ....	180
Figura 94 – ESQUEMA DE BOMBEAMENTO NA EXTREMIDADE OU LATERAL PARA O LASER DE FIBRA, GERALMENTE COM ACOPLAMENTO DE MÚLTIPLOS LASERS. ....	181
Figura 95 - PRODUTO DE PARÂMETRO DE FEIXE “BPP” DE SISTEMAS DE LASER DE ESTADO SÓLIDO (FIBRA E DISCO), DE CO <sub>2</sub> E DE DIODO DISPONÍVEIS ATUALMENTE. ....	182
Figura 96 - BANDAS DE EMISSÃO DOS DIFERENTES ÍONS TERRAS RARAS, EM NANÔMETROS.....	184
Figura 97 - IMAGEM DE MICROSCOPIA ELETRÔNICA DE VARREDURA DA SEPARAÇÃO DA CAMADA LIMITE EM UMA BORDA DE CORTE.....	184
Figura 98 - VELOCIDADES MÁXIMAS DE CORTE ALCANÇÁVEIS USANDO O LASER DE FIBRA DE ITÉRBIO.....	187
Figura 99 – COMPARATIVO DAS VELOCIDADES MÁXIMAS DE CORTE PARA CORTE DE AÇO INOXIDÁVEL ENTRE LASER DE CO <sub>2</sub> E LASER DE FIBRA.....	187
Figura 100 - MÁQUINA DE CORTE A LASER DE FIBRA SENFENG SF-1313G-SERIES 750 W APÓS ENTREGA TÉCNICA NO LABORATÓRIO DE USINAGEM DA UFPR. ....	190
Figura 101 - FLUXO DE AR DO COMPRESSOR A PARAFUSO ATLAS COPCO G7 FF (FULL-FEATURE, COM SECADOR DE AR INTEGRADO E MONTADO SOBRE O RESERVATÓRIO).....	194

Figura 102 - SISTEMA DE COMPRESSÃO E TRATAMENTO DE AR PARA FORNECIMENTO À REDE DE AR COMPRIMIDO. ....	195
Figura 103 - REFRIGERADOR DA ÁGUA EM DOIS CANAIS, PARA RETIRAR CALOR DA FONTE LASER E DO CABEÇOTE DE CORTE. ....	196
Figura 104 – TRANSFORMADOR ELÉTRICO TRIFÁSICO SHANGHAI XISHUN ELECTRIC CO. LTD. ....	197
Figura 105 - EXAUSTOR DE FUMOS E GASES TÓXICOS PROVENIENTES DE CORTE.....	198
Figura 106 - FONTE LASER DE FIBRA RAYCUS RFL-C750. ....	199
Figura 107 - INSTRUÇÃO DE RETIRADA DO SUPORTE DALENTE, PARA LIMPEZA OU TROCA. ....	199
Figura 108 - BICOS DE CORTE PARA USO DE GÁS DE ASSISTÊNCIA OXIGÊNIO. ....	202
Figura 109 - BICOS DE CORTE PARA USO DE GÁS DE ASSISTÊNCIA NITROGÊNIO.....	203
Figura 110 - DETALHES PARA ACIONAMENTO DO COMPRESSOR E SECADOR DE AR PARA FORNECIMENTO À REDE DE AR COMPRIMIDO.....	205
V. Figura 111 - VÁLVULA DE SAÍDA DA REDE DE AR COMPRIMIDO PARA FORNECIMENTO À MÁQUINA DE CORTE A LASER.....	205
Figura 112 - DETALHES DOS CILINDROS DE OXIGÊNIO E DE NITROGÊNIO UTILIZADOS COMO GÁS DE ASSISTÊNCIA DO CORTE. ....	206
Figura 113 - QUADRO DE DISJUNTORES 2. ACIONAMENTO DO GERAL BARRAMENTO I E LASER.....	207
Figura 114 - TRANSFORMADOR 380V / 220V. ....	208
Figura 115 - EXAUSTOR DE FUMOS E GASES TÓXICOS PROVENIENTES DA FUSÃO DE MATERIAIS NO CORTE A LASER.....	208
Figura 116 - SEQUÊNCIA DE ACIONAMENTO NO PAINEL DA MÁQUINA.....	209
Figura 117 - DISPARO DE LASER COM CABEÇOTE PARADO, PARA MARCAÇÃO (LASER BURST).....	210
Figura 118 - TESTE DE CONCENTRICIDADE DO FEIXE LASER COM O BOCAL. ....	211
Figura 119 - ACIONAMENTO DO PONTEIRO LASER INDICATIVO (SHUTTER) E MOVIMENTAÇÃO DO CABEÇOTE NO PLANO XY E NA ALTURA Z. ....	212
Figura 120 - INSTRUÇÃO PARA ABERTURA DA FERRAMENTA DE CALIBRAÇÃO DO SENSOR CAPACITIVO BCS100 MONITOR.....	212
Figura 121 - CALIBRAÇÃO DO SENSOR CAPACITIVO BCS100, PELA JANELA BCS100 MONITOR.....	213
Figura 122 - SELEÇÃO DO SISTEMA DE COORDENADAS PARA A TAREFA - FLUTUANTE OU DA PEÇA. ....	214
Figura 123 - POSIÇÃO DO MENU VERTICAL DE CAMADAS PARA PARAMETRIZAÇÃO DO CORTE E DA PERFURAÇÃO INICIAL.....	214
Figura 124 - IDENTIFICAÇÃO DO MATERIAL, ESPESSURA E BOCAL A QUE SE DESTINA OS PARÂMETROS DA CAMADA. ....	215
Figura 125 - ÍCONE DE ATALHO DO SOFTWARE CYPCUT. ....	218
Figura 126 - DISPOSIÇÃO DA JANELA PRINCIPAL DO SOFTWARE CYPCUT. ....	218
Figura 127 - ABA LATERAL COM ATALHOS PARA DESENHOS. ....	219
Figura 128 - ATALHO E FERRAMENTAS DE TEXTO. ....	220

Figura 129 - INSERÇÃO DE FORMAS (PEÇAS) PADRÃO. ....	221
Figura 130 - CENTRALIZAÇÃO DE CURVAS. ....	221
Figura 131 – ATALHO PARA A FERRAMENTA DE FILETE. ....	222
Figura 132 - COMANDO EXPLODIR GRÁFICO. ....	223
Figura 133 - BARRA DE ATALHO PARA FUNÇÕES FREQUENTES.....	223
Figura 134 - EXEMPLO DE CURVA DE CORTE “ABERTA”, DEFEITUOSA. ....	224
Figura 135 - EDIÇÃO DE NÓS, UNIÃO DE EXTREMIDADES PARA FECHAMENTO DE UMA CURVA DE CORTE. ....	225
Figura 136 - REORDENAÇÃO DA SEQUÊNCIA DE CORTE.....	225
Figura 137 - ABA FILE. ....	226
Figura 138 - RELATÓRIO DA TAREFA DE CORTE (TASK REPORT). ....	227
Figura 139 - FERRAMENTAS ESPECIAIS DE SELEÇÃO. ....	229
Figura 140 – SELECIONAR UMA FIGURA ABERTA OU EXPLODIDA (SELECT OPEN FIGURE). ....	231
Figura 141 – SELECIONAR TODAS AS FIGURAS SEMELHANTES (SELECT SIMILAR FIGURE). ....	231
Figura 142 - OPÇÕES AVANÇADAS DE VISUALIZAÇÃO E DESTAQUE A DETALHES DO GRÁFICO EM PROCESSO. ....	232
Figura 143 - Ferramenta De Redimensionamento (SCALE). ....	233
Figura 144 - FERRAMENTAS DE TRANSFORMAÇÕES E ROTAÇÃO.....	234
Figura 145 - MUDANÇA DE ESCALA MANUAL (BOTÃO ZOOM NO MENU TRANSFORM). ....	234
Figura 146 - JANELA DE CONFIGURAÇÃO LEAD LINE. ....	235
Figura 147 - POSIÇÃO DE LEAD LINE. ....	237
Figura 148 - CORREÇÃO AUTOMÁTICA DE LEAD LINE, POSIÇÃO E COMPRIMENTO. ....	238
Figura 149 - CORREÇÃO DE LEAD LINE. ....	238
Figura 150 - FUNÇÃO START POINT. ....	240
Figura 151 - COMPENSAÇÃO DIMENSIONAL DE LARGURA DA FRENTE DE CORTE (COMPENSATE). ....	241
Figura 152 - CORREÇÃO DE INTERPRETAÇÃO DE CONTORNO EXTERNO (OUTER) E RECORTES INTERNOS (INNER). ....	242
Figura 153 - INSERÇÃO MANUAL DE MICRO JUNÇÕES.....	243
Figura 154 - INSERÇÃO AUTOMÁTICA DE AUTO JUNÇÕES.....	244
Figura 155 – INVERSÃO DO SENTIDO DE CORTE, HORÁRIO OU ANTI-HORÁRIO. ....	245
Figura 156 - FUNÇÕES GAP, SEAL, OVER E MULTI.....	246
Figura 157 - APLICAR ALÍVIOS E FILETES.....	247
FIGURA 158 - PONTOS DE RESFRIAMENTO.....	248
Figura 159 - FERRAMENTA PARA PRODUIR CANTOS AFILADOS. ....	249
Figura 160 - OPÇÕES DE APLICAÇÃO DA FERRAMENTA RING CUT PARA PRODUIR VÉRTICES AFILADOS.....	250
Figura 161 - POSICIONAMENTO DO PONTO ZERO DA PEÇA NA CHAPA. ....	251
Figura 162 - REFERENCIANDO O "PONTO ZERO" DA PEÇA COM O BOTÃO REFERENCE.....	252
Figura 163 - OPÇÕES DE ORDENAÇÃO AUTOMÁTICA DA SEQUÊNCIA DE CORTE.....	252

Figura 164 - ORDEM PREVISTA DE CORTE.....	254
Figura 165 - REARRANJO MANUAL DA ORDEM DE CORTE. ....	255
Figura 166 - ORDENAMENTO MANUAL PELO BOTÃO SORT À ESQUERDA DA TELA. ....	255
Figura 167 - AGRUPANDO PEÇAS PARA MELHOR ORDENAMENTO DE CORTE. ....	256
Figura 168 - FERRAMENTA DE CÓPIA EM MATRIZ, COMANDO ARRAY.....	257
Figura 169 - DIMENSIONAMENTO DINÂMICO DE MATRIZ, COMANDO DYNAMIC ARRAY.....	257
Figura 170 - CÓPIA CIRCULAR, OPÇÃO CIRCULAR ARRAY. ....	258
Figura 171 - FERRAMENTA DE PREENCHIMENTO AUTOMÁTICO DA CHAPA (MENU ARRAY, OPÇÃO FULL FILL). ....	259
Figura 172 - CORTE VOLANTE DE MATRIZ DE FORMAS CIRCULARES (CIRCULAR FLYING CUTTING). ....	260
Figura 173 - OBSERVAÇÃO QUANTO À DISTÂNCIA MÁXIMAS ENTRE FIGURAS PARA FLYCUT.....	261
Figura 174 - RECONHECIMENTO DE FORMAS ARREDONDADAS PARA CORTE VOLANTE DE FORMAS CIRCULARES. ....	261
Figura 175 - Corte volante por linhas (LINEAR FLYCUT). ....	262
Figura 176 - ESTRATÉGIAS DE CORTE PARA COMPARTILHAMENTO DE CONTORNO EXTERNO (COEDGE). ....	263
Figura 177 - COMPARTILHAMENTO DE CONTORNOS EM PEÇAS COM RECORTE INTERNO. ....	264
Figura 178 - SIMULAÇÃO VISUAL DE SEQUÊNCIA E CAMINHO DE CORTE.....	265
Figura 179 - DEFEITO DECORRENTE DA REALIZAÇÃO DE CORTES VAZADOS QUANDO HÁ UMA ÁREA FLUTUANTE.....	265
Figura 180 - CONEXÃO DE MATERIAL PARA REALIZAÇÃO DE CORTES VAZADOS.....	266
Figura 181 - FERRAMENTA DE MEDIDA E DE COMPRIMENTO DE CURVA DE CORTE.....	267
Figura 182 - LOG COM A HISTÓRIA DE COMANDOS DE CRIAÇÃO OU REPRODUÇÃO A PARTIR DE UMA VISTA 2D. ....	268
Figura 183 - FERRAMENTAS DE CÍRCULO RELEVANTES PARA CORREÇÃO DE IMPORTAÇÕES DE ARQUIVOS CAD. ....	269
Figura 184 - APARAR LINHAS (TRIM). ....	269
Figura 185 - EXTENDER LINHAS (EXTEND).....	270
Figura 186 - FATIAR FORMA (DIVIDE). ....	270
Figura 187 - UNIÃO DE FORMAS (KNIT).....	270
Figura 188 - FERRAMENTAS DE OTIMIZAÇÃO.....	271
Figura 189 - SEGMENTAÇÃO DE CURVAS EM RETAS (SMOOTH LINE). ....	271
Figura 190 - FERRAMENTA DE UNIÃO DE PEQUENOS VAZIOS ENTRE LINHAS (JOIN LINE).....	272
Figura 191 - ORGANIZAÇÃO DA DISPOSIÇÃO DAS PEÇAS PARA MÁXIMO APROVEITAMENTO DE CHAPA (NESTING / PARTS). ....	273
Figura 192 - PARÂMETROS PARA PROTOCOLO INTELIGENTE DE APROVEITAMENTO DE CHAPA (AUTO NEST).....	274

Figura 193 - RESULTADO DO APROVEITAMENTO AUTOMÁTICO DA CHAPA (AUTO NEST).....	276
Figura 194 - BUSCA DAS BORDAS DA CHAPA COM O SENSOR CAPACITIVO (BCS100 FIND EDGE).....	277
Figura 195 - SISTEMA DE COORDENADAS FLUTUANTE E SISTEMA DE COORDENADAS DE REFERÊNCIA DA PEÇA.....	279
Figura 196 - ALTERAÇÃO DA COORDENADA DA PEÇA WORKPIECE COORDINATE PARA POSIÇÕES DIFERENTES DO “PONTO ZERO MECÂNICO”. .....	280
Figura 197 - PARTE SUPERIOR DO CONTROLE DE ÁREA DE TRABALHO. ....	281
Figura 198 - PARÂMETROS DE CORTE PARA A CAMADA DE CORTE JOG CUT, OU CORTE COM TRAJETÓRIA DEFINIDA MANUALMENTE.....	282
Figura 199 - MARCADORES DE POSIÇÃO PARA DESLOCAMENTO DO CABEÇOTE.....	283
Figura 200 - COMANDOS DE PONTEIRO LASER, DISPARO DO LASER PARA MARCAÇÃO, DISTÂNCIA CALBRADA DA CHAPA NO EIXO Z, SELEÇÃO E LIBERAÇÃO DE GÁS DE ASSISTÊNCIA.....	284
Figura 201 - BOTÕES DO MACHINE CONTROL E SUAS POSIÇÕES NO CONTROLE REMOTO.....	285
Figura 202 - POSICIONAMENTO DO CABEÇOTE AO FINAL DO PROCESSO. ..	286
Figura 203 - REPRESENTAÇÃO GRÁFICA DO PERÍMETRO DA ÁREA DE CORTE, BOTÃO FRAME. ....	288
Figura 204 - VELOCIDADE INSTANTÂNEA DE CORTE, DECOMPOSTA NO PLANO XY. ....	290
Figura 205 - ENTRADA LATERAL DE GASES. NA ÁREA MARCADA COM O POLÍGONO VERMELHO, OS GASES UTILIZADOS PARA CORTE, SENDO OXIGÊNIO À ESQUERDA E DE NITROGÊNIO (OU AR COMPRIMIDO) À DIREITA. MARCADO COM O POLÍGONO AZUL, A ENTRADA CYLINDER, DE AR COMPRIMIDO LIMPO E SECO USADO PARA O CILINDRO DE APERTO DA BANCADA.....	290
Figura 206 - REPRESENTAÇÃO GRÁFICA DE EMISSÃO PULSADA DA RADIAÇÃO LASER, CONCEITUANDO POTÊNCIA DE PICO, POTÊNCIA DE CORTE (DUTY) E FREQUÊNCIA.....	291
• Figura 207 - JANELA DE PARAMETRIZAÇÃO EM CAMADAS, LAYER PARAMETER SETTINGS. ....	292
Figura 208 - EDIÇÃO DA CURVA DE POTÊNCIA EM FUNÇÃO DA VELOCIDADE DE CORTE.....	293
Figura 209 - PARÂMETROS ESPECÍFICOS PARA PERFURAÇÃO DA CHAPA EM MÚLTIPLOS ESTÁGIOS.....	294
Figura 210 - PARÂMETROS ESPECIAIS. ....	295
Figura 211 - CONFIGURAÇÃO DA TÉCNICA DE VAPORIZAÇÃO DE PELÍCULA DE PROTEÇÃO. ....	296
Figura 212 - FERRAMENTA DE VAPORIZAÇÃO DE PELÍCULA PROTETIVA, PERFURAÇÃO PRÉVIA E PASSE DE RESFRIAMENTO.....	297
Figura 213 - CONFIGURAÇÃO DA TÉCNICA DE RESFRIAMENTO DE CORTE RECÉM REALIZADO (RECOOL).....	298

Figura 214 - MARCAÇÃO DE PEÇA A LASER COM MÚLTIPLOS PASSES, FERRAMENTA MULTICUT.....	299
Figura 215 - ABA DE PARÂMETROS GLOBAIS, COM DESTAQUE A ALTERAÇÕES DE UNIDADES.....	301

## LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - POSSÍVEIS CONDIÇÕES DE CORTE PARA CORTE A LASER DE CO <sub>2</sub> DE DIFERENTES MATERIAIS.....	101
Tabela 2 – VALORES DE TENSÃO SUPERFICIAL PARA ALGUNS METAIS E ÓXIDOS.....	120
Tabela 3 – ABSORTIVIDADE ESPECTRAL NORMAL DE MATERIAIS EM COMPRIMENTOS DE ONDA DE LASER IMPORTANTES.....	128
Tabela 4 - ILUSTRAÇÃO DA VARIAÇÃO DA RUGOSIDADE DA SUPERFÍCIE DE CORTE COM A ESPESSURA DA PEÇA DE TRABALHO PARA UMA PLACA DE AÇO.....	135

## LISTA DE QUADROS

Quadro 1 – MARCOS IMPORTANTES NO DESENVOLVIMENTO DE LASERS.....	57
Quadro 2 - POTÊNCIA CONTÍNUA OU MÉDIA NECESSÁRIA PARA ALGUNS USOS. ....	81
Quadro 3 - VISÃO GERAL DOS PROJETOS MILITARES DE LASER DESDE 2010. ....	84
Quadro 4 - TIPOS DE GÁS AUXILIAR TÍPICOS USADOS NO CORTE A LASER INDUSTRIAL DE METAIS. ....	97
Quadro 5 – DEFINIÇÃO DO ESPECTRO ELETROMAGNÉTICO. ....	103
Quadro 6 - PARÂMETROS DE PROCESSAMENTO RELACIONADOS À DINÂMICA DOS PROCESSOS DE CORTE A LASER. ....	112
Quadro 7 - MECANISMOS DE CORTE A LASER PARA DIVERSOS MATERIAIS DE ENGENHARIA. ....	157
Quadro 8 - UMA COMPARAÇÃO ENTRE AS TÉCNICAS DE CORTE A LASER DE VIDRO. ....	159
Quadro 9 – COMPARAÇÃO DE DIFERENTES PROCESSOS DE CORTE. ....	161
Quadro 10 - CLASSIFICAÇÃO DE SEGURANÇA DO LASER. ....	168
Quadro 11 - DADOS GERAIS DE DESEMPENHO PARA UMA VARIEDADE DE LASERS. ....	175
Quadro 12 - COMPARAÇÃO DE FONTE DE LASER. ....	175
Quadro 13 - ESPECIFICAÇÕES TÉCNICAS DA MÁQUINA SENFENG SF 1313G 750W. ....	192
Quadro 14 - LISTA DE MATERIAIS CONSUMÍVEIS E VULNERÁVEIS. ...	192

## LISTA DE ABREVIATURAS, SIGLAS E SÍMBOLOS

BPP	- Parâmetro de qualidade de feixe laser, acrônimo do termo em inglês <i>beam parameter product</i> .
CAGR	- Taxa composta anual de crescimento.
CAD	- Desenho assistido por computador, abreviatura para a tradução deste termo em idioma inglês.
CAM	- Manufatura assistida por computador, acrônimo do termo em inglês.
CNC	- Controle numérico computadorizado de máquinas.
CW	- Modo de operação do laser em onda contínua.
EDM	- Usinagem por eletroerosão.
FEL	- Laser de elétrons livres, acrônimo do termo em inglês <i>free electron laser</i> .
FWHM	- Largura total até a metade da intensidade, acrônimo do termo em inglês <i>full width at half maximum</i> .
Kerf	- <i>Kerf</i> é definido como a largura do material que é removido por um processo de corte. Ao falar sobre o corte de forma CNC com processos de corte típicos, o <i>kerf</i> é a largura do material que o processo remove à medida que corta a placa. (ESAB).
LED	- Diodo emissor de luz
Maser	- Amplificação de micro-ondas por emissão estimulada de radiação
Q-switching	- Q-comutado
ZTA	- Zona termicamente afetada
$\lambda$	- Comprimento de onda

## SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO.....	24
2	FUNDAMENTOS.....	26
2.1.	Interação Luz e Matéria .....	27
2.2.	Física quântica.....	29
2.3.	Emissão estimulada .....	30
2.3.1.	Sistema quântico, inversão populacional e bombeamento .....	32
2.4.	Características da radiação laser.....	37
3	ARQUITETURA DO LASER.....	42
3.1.	Material ativo (meio de ganho).....	45
3.2.	Bombeamento (fonte de energia).....	46
3.3.	Cavidade / ressonador aberto .....	46
4	HISTÓRIA.....	52
4.1.	Teoria e princípios.....	52
4.2.	Amplificação de micro-ondas – MASER .....	53
4.3.	Amplificação da luz visível – LASER.....	54
4.4.	Corte a laser.....	57
5	CLASSIFICAÇÃO E MODOS DE OPERAÇÃO.....	62
5.1.	TIPOS E PRINCÍPIOS DE OPERAÇÃO .....	63
5.1.1.	A gás.....	64
5.1.2.	De estado sólido .....	64
5.1.3.	De fibra .....	66
5.1.4.	De cristal fotônico .....	67
5.1.5.	Excímero.....	68
5.1.6.	De semicondutores (diodos emissores de luz) .....	69
5.1.7.	Químicos.....	70
5.1.8.	De elétrons livres .....	71
5.1.9.	De corantes.....	72
5.2.	Modos de operação .....	74
5.2.1.	Onda contínua (CW).....	74
5.2.2.	Pulsado.....	75
5.2.3.	Regime de funcionamento livre.....	76
5.2.4.	Q-comutado .....	76

5.2.5.	Modo Bloqueado ( <i>Mode Locking</i> ) .....	77
5.2.6.	Bombeamento pulsado .....	78
6	UTILIZAÇÕES .....	79
6.1.	Introdução .....	79
6.2.	Utilizações divididas por potência .....	80
6.3.	Armamentista .....	82
6.4.	Telecomunicação no espaço.....	86
6.5.	Medicina.....	88
6.6.	Indústria .....	89
7	CORTE A LASER .....	90
7.1.	Introdução .....	90
7.2.	Formas de corte a laser .....	91
7.2.1.	Corte por fusão .....	92
7.2.2.	Corte por sublimação.....	92
7.2.3.	Ablação fotoquímica .....	93
7.3.	Componentes.....	94
7.3.1.	Gases de assistência (descrição resumida inertes e ativos) .....	96
7.3.2.	Bocais .....	98
7.4.	Condições do processo.....	101
7.4.1.	Potência.....	102
7.4.2.	Características .....	103
7.4.3.	Velocidade transversal.....	110
7.4.4.	Resumo dos parâmetros do feixe de laser .....	111
7.5.	Funções do gás auxiliar e seu fluxo .....	115
7.5.1.	Efeito dos diferentes tipos de gases de assistência.....	116
7.5.2.	Remoção da fusão.....	121
7.6.	Princípios do corte a laser.....	124
7.6.1.	Absortividade (coeficiente de acoplamento) ao feixe durante o corte a laser	126
7.6.2.	Mecanismos de absorção do raio laser por metais.....	131
7.7.	Qualidade da peça cortada .....	133
7.7.1.	Estrias.....	133
7.7.2.	Separação da camada limite e aderência de escória .....	136
7.7.3.	Corte a laser de metais de seção espessa .....	139
7.7.4.	Efeito da potência do laser e da velocidade de corte.....	141

7.7.5.	Efeito do tipo e pressão do gás auxiliar .....	142
7.7.6.	Efeito do diâmetro do bocal .....	145
7.7.7.	Efeito da posição focal.....	146
7.8.	Considerações sobre materiais.....	148
7.8.1.	Metais .....	150
7.8.2.	Não metais.....	157
7.9.	Vantagens e desvantagens.....	161
7.9.1.	Vantagens.....	163
7.9.2.	Desvantagens.....	164
7.9.3.	Comparações.....	164
7.10.	Classificação de segurança .....	167
8	LASER DE FIBRA .....	171
8.1.	Introdução, histórico e panorama atual .....	171
8.2.	Mecanismo de emissão laser.....	174
8.3.	Laser de fibra de alta potência de itérbio .....	177
8.4.	Recursos .....	179
8.4.1.	Potência de saída .....	180
8.4.2.	Qualidade de feixe e sua focabilidade .....	181
8.4.3.	Comprimento de onda .....	183
8.5.	Desempenho no corte de metais .....	184
8.5.1.	Velocidade máxima alcançável.....	185
8.6.	Comparativo do laser de fibra com o laser CO2 .....	187
8.7.	Ponderações sobre a tecnologia de corte a laser de fibra .....	188
9	MÁQUINA DE CORTE A LASER DE FIBRA SENFENG SF1313G 750W 190	
9.1.	Equipamentos periféricos.....	193
9.1.1.	Sistema compressão, tratamento e distribuição de ar atmosférico via rede de ar comprimido .....	193
9.1.2.	Refrigerador da água em dois canais. ....	195
9.1.3.	Transformador elétrico.....	197
9.1.4.	Exaustor de fumos e gases tóxicos. ....	197
9.1.5.	Fonte de laser.....	198
9.2.	Limpeza da lente.....	199
9.2.1.	Para limpar a lente com papel para lentes.....	200
9.2.2.	Para limpar a lente com hastes de algodão.....	200
9.3.	Montagem do bocal de corte.....	201

10	SEQUÊNCIA DE ACIONAMENTO DA MÁQUINA DE CORTE A LASER DO LABOTARÓRIO DE USINAGEM .....	204
11	TUTORIAL PARA REFERÊNCIA E USO DO SOFTWARE CAM CYPCUT LASER CUTTING SYSTEM .....	217
11.1.	Disposição das principais áreas na tela do software.....	217
11.1.1.	Barra de atalhos - menu vertical esquerdo. ....	219
11.2.	Abas principais.....	226
11.2.1.	Aba FILE .....	226
11.2.2.	Aba principal de configuração do processo de corte (HOME).....	228
11.2.3.	Aba de desenho (DRAW) .....	267
11.2.4.	Aba CNC.....	276
11.3.	Módulo de controle de trabalho.....	278
11.3.1.	Sistema de coordenadas flutuante.....	278
11.3.2.	Sistema de coordenadas da peça.....	279
11.3.3.	Botões de navegação para movimentação do cabeçote (JOG). 280	
11.3.4.	Corte a laser com trajetória definida manualmente (JOG CUT). 281	
11.3.5.	Disparo do laser com o cabeçote parado para fins de marcação (BURST). 282	
11.3.6.	Marcadores de posição.....	282
11.3.7.	Luz indicadora a laser vermelho, disparo do laser para marcação, distância calibrada da chapa no eixo Z, liberação de gás e seleção do tipo do gás de assistência.....	283
11.4.	Módulo de controle de operações MACHINE CONTROL. ....	284
11.4.1.	Repetição cíclica da operação de corte (LOOP).....	287
11.4.2.	Delimitação visual da área prevista de corte sobre a chapa com o indicador de laser vermelho (FRAME).....	287
11.4.3.	Processar somente os cortes selecionados (PROCESS SELECTED ONLY).....	288
11.4.4.	Busca das bordas da chapa com o sensor capacitivo antes do início da operação de corte (FIND EDGE BEFORE PROCESS).....	288
11.5.	Menu de parametrização do corte por meio de camadas (LAYER). 289	
11.5.1.	Parâmetros válidos para corte desenvolvido, após a perfuração inicial (janela LAYER, aba CUT).....	289
11.5.2.	Parâmetros válidos para obter a perfuração inicial (janela LAYER, aba PIERCE).....	293

11.5.3.	Opções especiais do processo. ....	294
11.5.4.	Parâmetros globais e seleção do sistema de unidades (aba GLOBAL PARAMETERS na janela LAYER PARAMETER SETTINGS) .....	300
12	CONCLUSÃO.....	303
13	BIBLIOGRAFIA .....	304

## 1 INTRODUÇÃO

Um laser é um dispositivo que emite luz no processo de amplificação óptica, baseado na emissão estimulada de radiação eletromagnética. O termo "laser" é um acrônimo no idioma inglês para "amplificação da luz por emissão estimulada de radiação". O primeiro laser foi uma evolução natural do trabalho da amplificação de micro-ondas concretizado em 1958 por duas equipes que trabalharam em paralelo - dos russos Aleksandr Mikhailovich Prokhorov e Nicolai Gennadiyevich Basov e da equipe dos americanos Charles Hard Townes e Arthur Leonard Schawlow – ambas as pesquisas que se basearam nos fundamentos teóricos dados por Albert Einstein em 1917. Reconhece-se, entretanto, que o primeiro equipamento construído a ter sucesso na amplificação da luz visível foi construído em 1960 por Theodore H. Maiman, no *Hughes Research Laboratory*, usando rubi sintético como seu meio de ganho (ZLATANOV, 2016).

A tecnologia laser está no centro da área mais ampla da fotônica, essencialmente porque a luz laser tem uma série de propriedades muito especiais (SVELTO, *Principi dei Laser*, 1970):

- Colimação: o raio laser emitido é bem direcionado pode se propagar por longa distância sem muita divergência. Pode ser focado em pontos muito pequenos, onde uma alta intensidade é alcançada.
- Monocromaticidade: o laser pode emitir em uma largura de banda óptica muito estreita, enquanto a maioria das lâmpadas emite luz com um espectro óptico muito amplo.
- Pode ser emitido continuamente ou, alternativamente, na forma de pulsos curtos ou ultracurtos. A coerência temporal pode ser usada para produzir pulsos de luz tão curtos quanto femtossegundos ( $10^{-15}$  s). Viajando a 299.702.547 m/s no ar, em um femtossegundo a luz percorre apenas  $3 \cdot 10^{-7}$  m, o tamanho de um vírus, o que torna útil sua utilização na ablação de tecidos e outros procedimentos de alta sensibilidade.

Um laser consiste em um meio de ganho, um dispositivo que fornece energia (bombeamento) e componentes que realizam a retroalimentação óptica. O meio de ganho absorve a energia de bombeamento, que eleva alguns elétrons a estados quânticos de alta energia, excitados. As partículas podem interagir com a luz absorvendo ou emitindo fótons. O meio de ganho é um material com orbitais atômicos e níveis energéticos tais que, sendo bombeado de energia, sofrerá *inversão populacional* (a maior parte dos átomos constituintes estarão em estado excitado pelo efeito do bombeamento, com elétrons em orbitais de maior nível de energia). Quando a inversão da população é alcançada, a quantidade de emissão estimulada devido à luz que passa é maior do que a quantidade de absorção. Isto significa que um fóton incidente terá maior probabilidade de promover a emissão estimulada de outro fóton – na mesma a frequência, conforme o projeto do laser, e direção - ao causar o decaimento de um átomo excitado ao seu estado fundamental. Basicamente isto será a amplificação da luz por emissão estimulada, conforme preceitos formulados por

Albert Einstein (EINSTEIN, 1917). A luz de um determinado comprimento de onda passa pelo dispositivo com ganho aumentado (potência aumentada). O meio de ganho de um laser é normalmente um material de pureza, tamanho, concentração e forma controlados, existindo atualmente em forma de gás, líquido, sólido ou plasma.

A *inversão populacional* é o que assegura que haja maior probabilidade de um fóton incidir sobre um átomo excitado, causando seu decaimento estimulado, do que teria de atingir um átomo em estado fundamental, cuja energia do fóton incidente iria ter como efeito excitá-lo. Este segundo processo deve ser feito idealmente pelo bombeamento, já que se a excitação se der por outro fóton não haverá ganho. Assim, para que os recursos espaciais amplifiquem a luz, ao meio de ganho deve ser fornecida energia em um processo chamado *bombeamento*. Este bombeamento de energia é geralmente feito na forma de corrente elétrica ou luz de diferentes comprimentos de onda, neste último caso por uma lâmpada de flash ou outro laser.

Os lasers mais comuns usam retroalimentação de uma cavidade óptica - um par de espelhos em ambas as extremidades do meio de ganho (a cavidade ótica pode ser maior do que o meio de ganho, geralmente é maior). A luz reflete para frente e para trás entre os espelhos, passando pelo espaço e crescendo a cada passagem (geralmente  $10^9 \text{ s}^{-1}$ ). O acoplamento de saída geralmente é um dos dois espelhos, que por ser parcialmente transparente permite que um pequeno percentual escape da cavidade óptica. Esta parcela da luz que sai pelo espelho é o feixe de laser que se aproveita. Dependendo do design da cavidade (espelho plano ou curvo), a luz do laser pode se propagar ou produzir um feixe estreito.

Dentre suas muitas aplicações, os lasers são usados em leitores de disco rígido, impressoras a laser e leitores de código de barras; sequenciamento de DNA, cirurgia a laser e cuidados com a pele; fibra ótica e comunicação ótica de espaço livre (FSO); corte e soldagem de materiais; equipamento militar e miras; mapeamento topográfico e sensoriamento remoto LIDAR, medição de distância e velocidade; e espetáculos de iluminação laser na indústria do entretenimento.

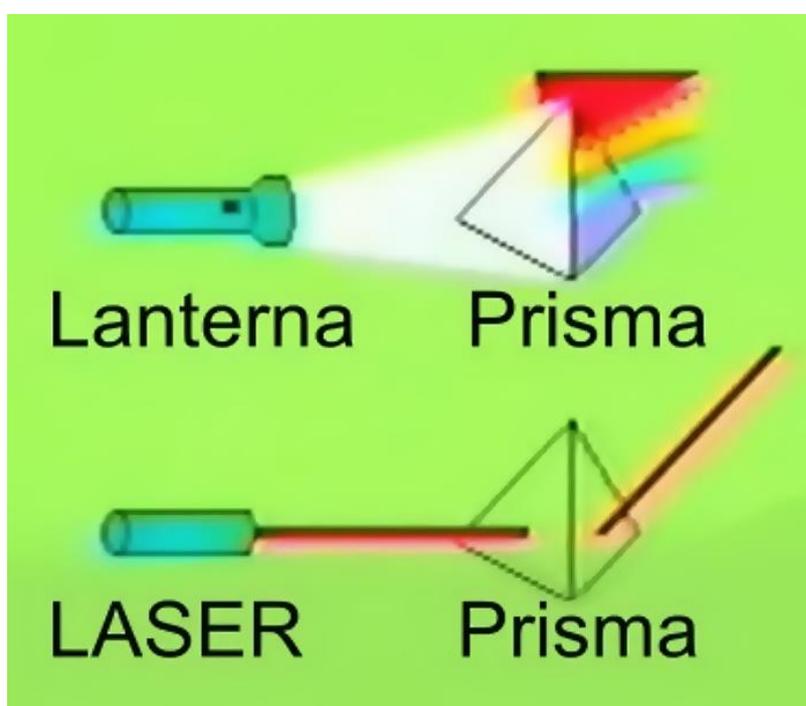
O objetivo geral da *primeira* metade do Trabalho de Conclusão de Curso – o TCC I - é compendiar conhecimento robusto a respeito da tecnologia LASER, sobretudo direcionando-o ao processo de usinagem numa máquina de corte a laser.

O objetivo geral da *segunda* metade do Trabalho de Conclusão de Curso – o TCC II – consiste no comissionamento da máquina de corte a laser de fibra SENFENG SF1313G 750W entregue ao Laboratório de Usinagem do Departamento de Engenharia Mecânica da UFPR durante sua reforma e modernização no ano de 2021. São objetivos concretos o acompanhamento técnico durante o período de instalação do equipamento e da infraestrutura necessária a seus periféricos, realização de ensaios durante a entrega técnica, reunião de uma rotina de acionamento da máquina de corte a laser e, finalmente, compilação de um tutorial para referência e manual de operação do programa CAM CypCut (que é a interface entre o CNC da máquina e os desenhos carregados por um operador).

## 2 FUNDAMENTOS

A coerência do laser o distingue de outras fontes de luz e permitem que o feixe de laser possa ser focalizado em uma região muito pequena, atingindo uma irradiância muito alta, ou que a energia possa ser focada em uma longa distância com pouca divergência. A coerência espacial é geralmente expressa como uma saída de feixe estreito, que é comparado ao limite de difração do feixe gaussiano ideal por seu parâmetro de qualidade de feixe BPP (ver 8.4.2) (ZLATANOV, 2016).

Figura 1 – REFRAÇÃO DE LUZ "BRANCA" E LASER EM UM PRISMA

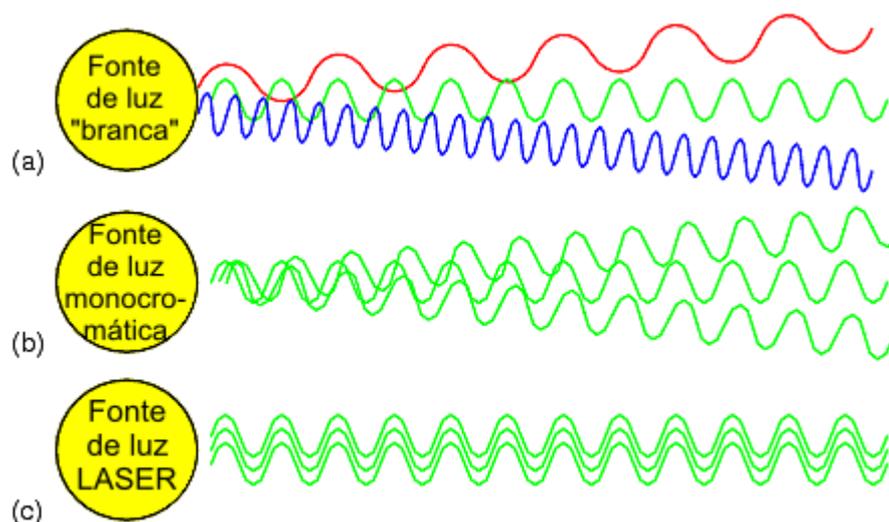


FONTE: O autor (2022).

LEGENDA: Representação da luz monocromática do laser, em função da estreita faixa de frequência de radiação, em comparação com uma fonte de luz "branca".

Os lasers também apresentam alta coerência temporal (ou longitudinal), o que lhes permite emitir luz em um espectro muito estreito, ou seja, monocromática. A luz gerada por uma fonte de luz térmica ou outras fontes de luz incoerentes têm amplitude e fase que mudam aleatoriamente com relação ao tempo e à posição, então o comprimento de coerência é relativamente curto. Coerência longitudinal (ou temporal) significa uma onda polarizada (que oscila em apenas uma direção e plano, ver 7.4.2.5) e em uma única frequência, cuja fase está correlacionada a uma distância relativamente grande ao longo do feixe (comprimento de coerência). A coerência temporal pode ser usada para produzir pulsos de luz tão curtos quanto um femtossegundo ( $10^{-15}$  s).

Figura 2 - COMPARAÇÃO DE LUZ BRANCA, MONOCROMÁTICA E LASER.



FONTE: O autor (2022).

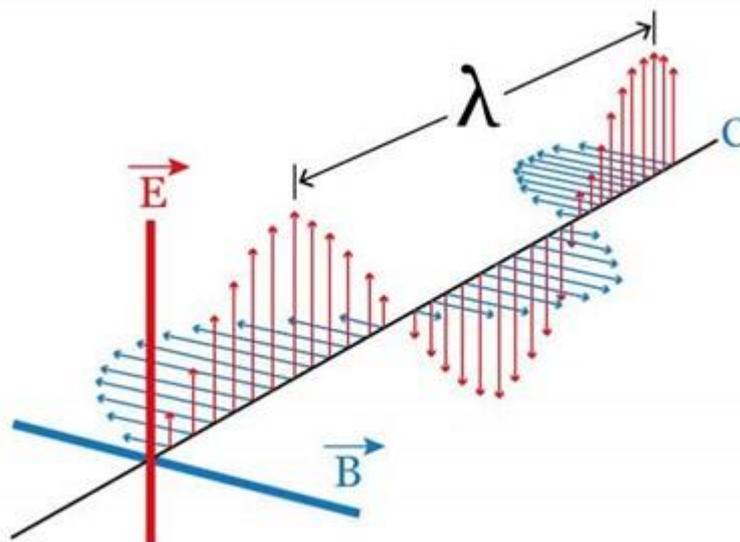
LEGENDA: Comparação de (a) luz branca (em diferentes comprimentos de onda e diferentes direções); (b) luz monocromática (mesmo comprimento de onda, mas em fases e direções diferentes); (c) luz de laser (mesmo comprimento de onda, em fase e colimada).

Lasers são caracterizados por seu comprimento de onda no vácuo e são usados em aplicações onde técnicas simples não podem ser usadas para gerar a luz da coerência espacial ou temporal necessária (ZLATANOV, 2016).

## 2.1. INTERAÇÃO LUZ E MATÉRIA

No século XIX, foi o físico escocês James Clerk Maxwell teorizou e demonstrou a existência de ondas eletromagnéticas, por demonstrar que a oscilação de uma carga elétrica  $C$  dá origem a campos magnéticos  $\vec{B}$ . Esses campos, por sua vez, produzem campos elétricos  $\vec{E}$ , assim como a variação de fluxo de campos elétricos origina campos magnéticos. A interação entre esses campos é responsável pelo surgimento das ondas eletromagnéticas (CARISTAN, Laser Cutting Guide for Manufacturing, 2004, p. 357).

Figura 3 - A ONDA ELETROMAGNÉTICA



FONTE: adaptado do original de Lennart Kudling do repositório digital da Wikimedia Commons (2019).

LEGENDA: Onda eletromagnética: representação da ortogonalidade do campo elétrico  $\vec{E}$ , campo magnético  $\vec{B}$  e direção de propagação na velocidade  $c$ , além do comprimento de onda  $\lambda$ .

Os campos elétricos e magnéticos são sempre perpendiculares entre si, que se propagam como uma onda. A velocidade da propagação da onda magnética  $c$  é perpendicular a ambos.

O mesmo Maxwell percebeu que a luz visível é uma onda eletromagnética, algo que não era óbvio até então. O próprio fóton é hoje referido como sendo o “estado excitado do campo eletromagnético” (MUTHUKRISHNAN, SCULLY, & ZUBAIRY, 2003). Uma característica surpreendente das ondas eletromagnéticas é sua capacidade de se propagar no vácuo, já que estas ondas carregam apenas energia e por isso dispensam a necessidade de um meio físico para sua propagação, desmentindo a hipótese da existência do “éter luminífero”, teoria cogitada até o início do século XX. Nosso olho detecta como luz apenas uma faixa estreita do espectro das ondas eletromagnéticas (Figura 56). Dessa forma, podemos dizer que luz é apenas o nome que damos à forma como nosso cérebro interpreta os sinais que ele recebe da retina quando nela incidem radiações eletromagnéticas de determinada faixa de frequência (SILVA D. C.).

O vácuo é perfeitamente transparente e nossa atmosfera pode ser, razoavelmente, descrita assim. Apesar de muitos considerarmos vidros como “transparentes”, de ponto de vista da óptica é correto classificá-los como “translúcidos”, já que costumeiramente afetam sua nitidez. A grande maioria dos objetos, porém, são opacos, não permitem a passagem da luz (luz visível, porém permitem a passagem de outros comprimentos de onda, como as ondas de rádio, por exemplo), sendo que os objetos percebidos como escuros são meios “absorvedores”.

Isto se dá pela interação das ondas magnéticas em certos comprimentos de ondas com os átomos que compõem um objeto qualquer.

Desde o século XVII, físicos discutiam a natureza da luz. O físico e matemático britânico Isaac Newton argumentou que a luz é um fluxo de pequenas partículas (MUTHUKRISHNAN, SCULLY, & ZUBAIRY, 2003), enquanto o holandês Christiaan Huygens, também físico e matemático, acreditava que a luz tinha propriedades de ondas (STEEN, Capítulo 2 - Basic Laser Optics, 2003, p. 61). No início do século XX, o físico francês Louis-Victor-Pierre-Raymond, VII duque de Broglie, conhecido geralmente como Louis de Broglie, sugeriu que estas características aparentemente diferentes eram, na realidade, o mesmo comportamento observado de diferentes perspectivas: que as partículas podem se comportar como ondas e as ondas (radiação) podem comportar-se como partículas (Prince Louis-Victor Pierre Raymond de Broglie - Prêmio Nobel de Física 1929, 1929) (EISBERG & RESNICK, Cap.3 O postulado de De Broglie – Propriedades ondulatórias das partículas, 1979).

## 2.2. FÍSICA QUÂNTICA

Após acompanhar a pesquisa de Max Planck com estudos do efeito fotoelétrico e munindo-se das ideias do físico Heinrich Hertz, em 1905 Albert Einstein propôs uma estimativa quantitativa da radiação eletromagnética conhecida como fóton. Ele introduziu a ideia de que se a luz for absorvida ou emitida pelo corpo, ela ocorrerá nos átomos do corpo. Quando um fóton de frequência  $f$  é absorvido por um átomo, a energia de alta frequência é transferida do fóton de luz para o átomo.

A equação da energia do fóton (*Relação de Planck-Einstein*) é:

$$E = h * c / \lambda$$

Equação 2.1

Onde  $h$  é a constante de Planck ( $h = 6,62607015 \times 10^{-34} J.s$ ),  $c$  é a velocidade da luz no vácuo ( $c = 299.792.458 m/s$ ) e  $\lambda$  é o comprimento de onda do fóton. Como  $h$  e  $c$  são ambos constantes, a energia do fóton varia diretamente em relação ao comprimento de onda  $\lambda$ . Como  $\frac{c}{\lambda} = \nu$  (frequência de radiação), é possível simplificar a energia do fóton como:

$$E = h * \nu$$

Equação 2.2

Arthur Holly Compton confirmou o proposto por Albert Einstein ao demonstrar que, quando um fóton colide com um elétron, ambos se comportam como corpos materiais. De acordo com a teoria do efeito fotoelétrico de Albert Einstein, a luz consiste em quanta, "pacotes" com energias definidas correspondendo a certas frequências. Um quantum de luz é chamado de fóton. Quando Arthur Compton direcionou fótons de raios-X para uma superfície metálica em 1922, os elétrons foram emancipados e o comprimento de onda dos raios-X aumentou porque parte da energia

do fóton incidente foi transferida para os elétrons. O experimento confirmou que a radiação eletromagnética também pode ser descrita como partículas de fótons, seguindo as leis da mecânica (Arthur Holly Compton – Prêmio Nobel de Física de 1927, 1927) (PALANDI, FIGUEIREDO, DENARDIN, & MAGNAGO, 2010).

Quando a luz se propaga no espaço, ela se comporta como onda, mas quando incide sobre uma superfície, passa a se comportar como partícula. Trata-se da lei do efeito fotoelétrico, pela qual Einstein recebeu o Prêmio Nobel de física de 1921 (Albert Einstein – Prêmio Nobel de Física de 1921, 1921) (EISBERG & RESNICK, Cap.3 O postulado de De Broglie – Propriedades ondulatórias das partículas, 1979).

O dinamarquês Niels Bohr propunha na mesma época o modelo do átomo, com a maior parte de sua massa contida no núcleo (prótons e nêutrons) e orbitado pelos elétrons, leves, mas eletricamente equivalentes aos prótons. Esta descrição da estrutura eletrônica dos elementos, sua relação com o conceito de valência, a relação entre periodicidade e configuração eletrônica, além dos princípios básicos da espectroscopia, impactou a química e a física (PALANDI, FIGUEIREDO, DENARDIN, & MAGNAGO, 2010).

O sódio, ao ser aquecido, emite uma luz amarela brilhante correspondente a duas linhas próximas a 589 nm. No entanto, a decomposição da luz de sódio pelo prisma revela muitas outras linhas. Explicar esse fenômeno foi um dos objetivos de cientistas como Niels Bohr, que apresentou à ionosfera de um átomo um número limitado de "camadas" eletrônicas, cada uma com uma energia específica. Os elétrons podem absorver fótons (quantum de luz) e mover-se para a camada externa. Ao retornar à camada fundamental, deve liberar o excesso de energia, na forma de fótons (CARVALHO, 2020).

Apesar da interação abundante entre luz e matéria, absorção e emissão de luz visível está relacionado principalmente às transições entre níveis de energia de elétrons de valência em orbitais atômicos e moleculares (orbitais envolvidos na ligação). A energia da luz (daí a frequência e, portanto, a cor) está relacionada à diferença de energia entre os estados eletrônicos (níveis de energia) durante essas transições (EISBERG & RESNICK, Cap.4 O modelo de Bohr para o átomo, 1979).

No projeto de fonte de laser, é particularmente interessante seu meio ativo, pois esta diferença de energia entre os estados eletrônicos se dá no material que o compõe, um sistema de moléculas, átomos e íons ligados entre si, constituídos por sua vez de partículas elementares: prótons, nêutrons e elétrons.

### 2.3. EMISSÃO ESTIMULADA

O átomo, em seu "estado estacionário" conforme definido por Niels Bohr em 1915 é caracterizado por uma energia específica e bem definida (BOHR, 1934) apud (CHEN, DING, HSU, KIM, & ZHOU, 2006).

Os elétrons só podem orbitar de forma estável, sem emitir radiação, em certas órbitas (chamadas por Bohr de "órbitas estacionárias"): a um certo conjunto discreto

de distâncias do núcleo. Essas órbitas estão associadas a energias definidas e bem específica, também chamadas de camadas de energia ou níveis de energia (Figura 4). Nessas órbitas, a aceleração do elétron não resulta em radiação e perda de energia, conforme exigido pela eletrodinâmica clássica. O estado correspondente ao menor valor de energia  $E_0$  é denominado estado fundamental (JELÍNKOVÁ & ŠULC, 2013, p. 20). Outros estados, de maior energia, são definidos como estados excitados. Um sistema de átomos, íons ou moléculas é chamado de sistema quântico porque a energia em estado estacionário do sistema não pode assumir um valor arbitrário (é quantizado) (PALANDI, FIGUEIREDO, DENARDIN, & MAGNAGO, 2010, p. 53). Os elétrons só podem ganhar e perder energia saltando de uma órbita permitida para outra, absorvendo ou emitindo radiação eletromagnética com uma frequência  $\nu$  determinada pela diferença de energia dos níveis de acordo com a *Relação de Planck-Einstein*, descrita no item anterior, repetida aqui:

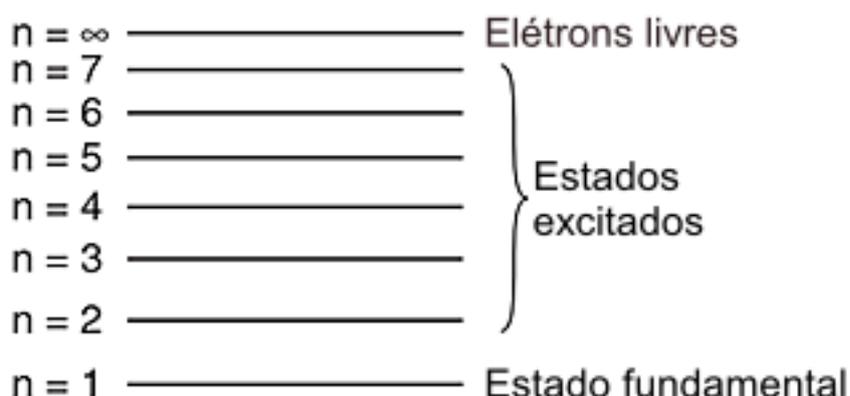
$$\Delta E = E_2 - E_1 = h\nu$$

Equação 2.3

onde  $h$  é a constante de Planck e  $\nu$  é a frequência da radiação (CHEN, DING, HSU, KIM, & ZHOU, 2006)

A diferença de energia entre o estado fundamental e o estado excitado é chamada de energia de excitação. O nível de energia mais alto em um sistema quântico corresponde à energia de ionização, que divide o átomo em elétrons e íons livre, ou energia de dissociação, que divide a molécula em átomos mais simples, grupos únicos de átomos ou íons (URQUHART, 1988).

Figura 4 – NÍVEIS DE ENERGIA DO SISTEMA QUÂNTICO.



FONTE: Adaptado da figura 2.2 de (JELÍNKOVÁ & ŠULC, 2013).

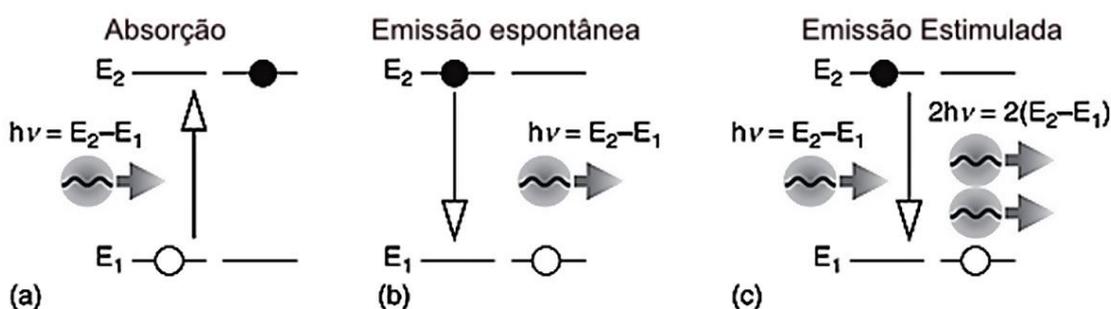
LEGENDA: Níveis de energia do sistema quântico (n é o número do nível de energia que corresponde à energia E).

A transição quântica é a mudança de um estado estacionário do sistema quântico para outro. O processo é denominado *absorção* quando um sistema quântico

passa a um estado excitado (nível excitado) por receber energia, podendo ser a energia advinda de uma fonte de luz externa ou como resultado de colisões de átomos ou moléculas. Depois de um tempo, o sistema quântico libera energia durante a transição e retorna a um estado estável, num processo denominado *emissão espontânea* (JELÍNKOVÁ & ŠULC, 2013, p. 19). O intervalo de tempo durante o qual um sistema quântico mantém um estado excitado é chamado de vida útil desse estado, sendo geralmente de alguns nanossegundos ( $10^{-9}$  s), mas pode ser tão curta quanto picossegundos ( $10^{-12}$  s) ou tão longa quanto milissegundos ( $10^{-3}$  s). O estado excitado de vida longa é chamado de estado metaestável, investigado originalmente em gás hélio excitado por Jay Frank e F. Reich (FRANCK & REICHE, 1920) (PALANDI, FIGUEIREDO, DENARDIN, & MAGNAGO, 2010).

De modo a satisfazer a lei da conservação da energia, a energia trocada entre o sistema quântico e o meio ambiente deve ser igual à diferença de energias entre os estados inicial e final do sistema quântico ( $\Delta E = E_{inicial} - E_{final}$ ). A energia trocada pode assumir a forma de fótons (ondas eletromagnéticas) com energia igual a  $\Delta E$ . Na *emissão espontânea*, porém, todas as outras propriedades deste fóton são aleatórias (direção, fase, polarização etc.). Os efeitos que ocorrem em sistemas quânticos podem ser mais facilmente compreendidos quando explicados em apenas em dois níveis, a chamada aproximação de dois níveis (Figura 5) (JELÍNKOVÁ & ŠULC, 2013).

Figura 5 – INTERAÇÃO DA RADIAÇÃO ELETROMAGNÉTICO COM UM SISTEMA QUÂNTICO, APROXIMAÇÃO DE DOIS NÍVEIS.



FONTE: Adaptado da figura 2.3 de (JELÍNKOVÁ & ŠULC, 2013).

LEGENDA: Os processos durante a interação da radiação eletromagnética com um sistema quântico: absorção (a), emissão espontânea (b) e emissão estimulada (c).

### 2.3.1. Sistema quântico, inversão populacional e bombeamento

O modelo básico do material ativo (meio ativo) é um conjunto de  $N$  sistemas quânticos idênticos (geralmente com  $N \gg 1$ ) por unidade de volume que, embora tratando-se do mesmo sistema quântico, geralmente podem existir em muitos estados quânticos possíveis (JELÍNKOVÁ & ŠULC, 2013).

Isto quer dizer que os componentes deste sistema quântico podem estar em diferentes configurações internas e diferentes energias  $E_i$  (onde  $i = 0, 1, 2 \dots$ ). Assim, o  $i$ -ésimo nível de energia ( $E_i$ ) terá um certo número de partículas ( $N_i$ ) dentro do conjunto  $N$ . A contagem de partículas ( $N_i$ ) por unidade de volume tem seu significado estatístico chamado de *população do  $i$ -ésimo nível de energia*. Se o sistema quântico está isolado, não interage com o meio, não haverá alterações macroscópicas e o sistema é definido como estando em *equilíbrio termodinâmico*. Nesse caso, a população dos níveis é dada pela lei de Boltzmann

$$N_2 = N_1 \exp \frac{E_2 - E_1}{kT}$$

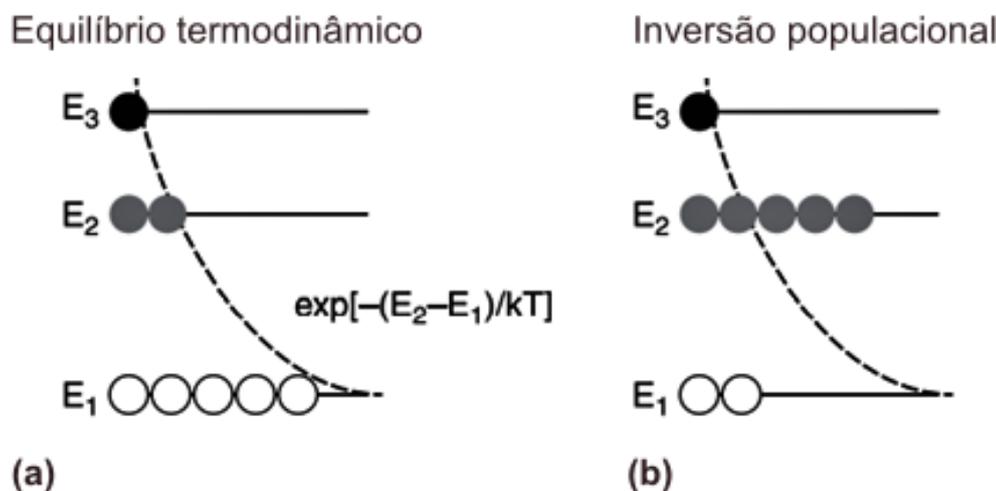
Equação 2.4

onde  $N_1$ ,  $N_2$  representam a porcentagem de ocupação dos níveis de energia  $E_1$  e  $E_2$ ,  $k = 1,381 \times 10^{-23} \text{ [J/K]}$  é a constante de Boltzmann e  $T$  é a temperatura absoluta [K]. Assim, esta equação nos mostra que a *população dos níveis de energia diminui exponencialmente com o aumento da energia* (Figura 6.a).

A maioria das substâncias na natureza está em equilíbrio termodinâmico, isto é, a maioria dos sistemas quânticos está no estado fundamental, dado pela estrutura específica de átomos ou moléculas. Portanto, *em condições naturais, a probabilidade de absorção é maior que a probabilidade de emissão estimulada de radiação, assim apenas ocorre emissão espontânea* (KANNATEY-ASIBU JR., Capítulo 1 - Laser Generation, 2009).

Para amplificar a radiação deve-se estabelecer a chamada *inversão populacional*, o que irá assegurar maior probabilidade de um fóton incidir sobre um átomo em estado excitado - digamos parte da população  $N_2$  (no nível superior) – e diminuir a probabilidade de atingir um átomo em seu estado fundamental – que, neste exemplo, seria parte da população  $N_1$ , nível inferior. É necessário adicionar energia ao sistema quântico para que este escape do seu equilíbrio termodinâmico e alcance essa inversão populacional (Figura 6), num processo denominado de *bombeamento de sistemas quânticos*.

Figura 6 - POPULAÇÃO DOS NÍVEIS ENERGÉTICOS EM EQUILÍBRIO TÉRMICO.



FONTE: Adaptado da figura 2.4 de (JELÍNKOVÁ & ŠULC, 2013).

LEGENDA: População dos níveis energéticos em equilíbrio térmico (a) e distribuição da população entre os níveis energéticos em caso de inversão populacional (b).

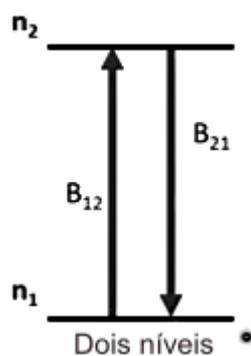
O físico italiano Prof. Orazio Svelto (SVELTO, *Principi dei Laser*, 1970), em seu livro *Principi dei Laser*, propõe considerar o problema de como produzir uma inversão populacional em um determinado material. Assumindo que isso possa ser possível por meio da interação do material com uma campo eletromagnético na frequência  $\nu$  dada pela relação de Planck-Einstein

$$\nu = \frac{E_2 - E_1}{h}$$

Equação 2.5

Inicialmente, no equilíbrio termodinâmico, o nível 1 é mais povoado do que o nível 2, assim a absorção irá de fato predominar sobre a emissão estimulada. A onda de entrada produziria mais transições 1→2 do que as transições 2→1 e, dessa forma, esperamos acabar com uma inversão da população. Tal sistema não se comportaria assim, porém, pois quando de fato a condição é alcançada em que as populações são iguais ( $N_2 = N_1$ ), então os processos de absorção e estimulados se compensarão e o material ficará *transparente*. Essa situação costuma ser chamada de *saturação de dois níveis*. Num sistema equilibrado, transparente, o coeficiente de excitação  $B_{12}$  é igual ao coeficiente de emissão  $B_{21}$ , logo quanto um elétron passa ao estado fundamental, outro passa ao estado excitado, o que não promove a amplificação da radiação necessário a um MASER ou LASER (Figura 7).

Figura 7 – REPRESENTAÇÃO DOS COEFICIENTES DE EXCITAÇÃO  $B_{12}$  E COEFICIENTE DE EMISSÃO  $B_{21}$ .



FONTE: O autor (2022)

### 2.3.1.1. Aproximação de três níveis

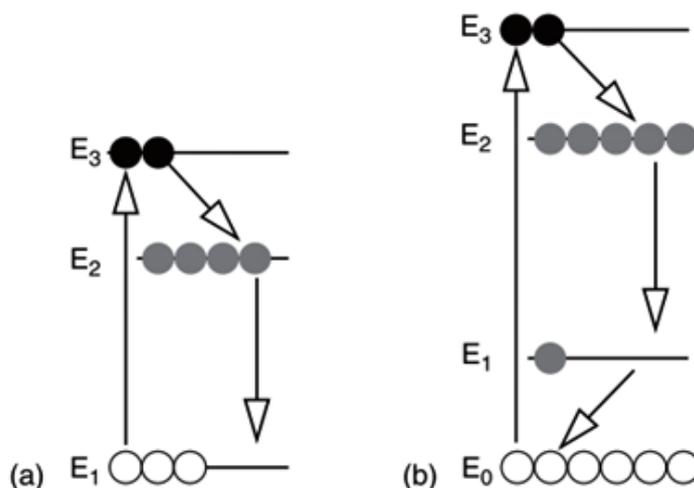
Devido à saturação explicada no parágrafo anterior, a aproximação em dois níveis do sistema quântico não é suficiente para explicar o procedimento de bombeamento e, portanto, é necessário usar uma visão na qual níveis mais altos de excitação são levados em consideração. Obviamente, eles são compactados em um "nível de bombeamento".

Em seguida, são definidos os chamados modelos de três ou quatro níveis (Figura 8). Em ambos os casos, a transição laser ocorre entre o nível superior 2 e o nível terminal 1.

No caso de aproximação em três níveis, o bombeamento causa uma excitação do estado fundamental 1 ao estado excitado 3 (Figura 8.a). Esse estado é de curta duração e, portanto, o átomo decai rapidamente para o primeiro nível excitado 2, que é considerado um *nível metaestável* (nesta transição não-radiativa  $3 \rightarrow 2$ , a energia  $\Delta E = E_{inicial} - E_{final}$  é liberada na forma de um fônon não-radiativo, causando vibração da rede e, conseqüentemente, aquecimento do material). A transição desse nível metaestável 2 para o estado fundamental 1 (transição radiativa  $2 \rightarrow 1$ ) causa a liberação de *quanta* de radiação. Quando mais fótons são absorvidos da fonte de bombeamento, o número de átomos no estado metaestável pode exceder o número de átomos no estado fundamental e ocorre a inversão da população. O principal representante do sistema de três níveis é o pioneiro laser de rubi, conforme relatado no subitem 4.3.

### 2.3.1.2. Aproximação de quatro níveis

Figura 8 – OS NÍVEIS ENERGÉTICOS NA APROXIMAÇÃO DE TRÊS E QUATRO NÍVEIS.



FONTE: Adaptado da figura 2.5 de (JELÍNKOVÁ & ŠULC, 2013)

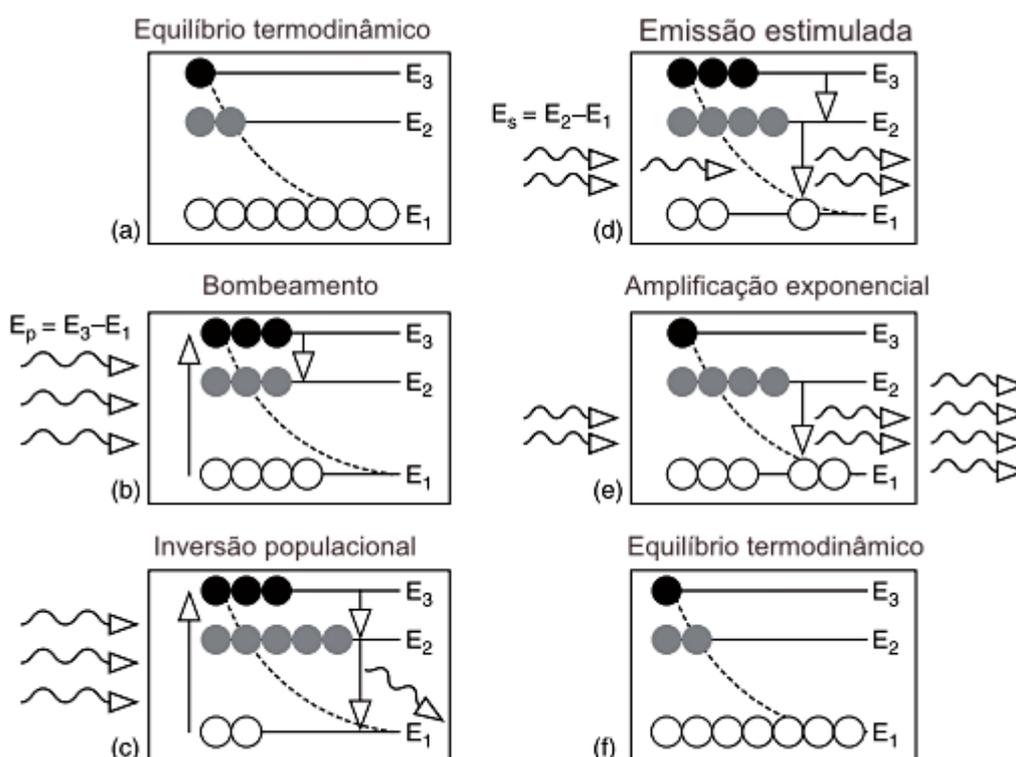
LEGENDA: Representação esquemática dos níveis energéticos na aproximação de três níveis (a) e em quatro níveis (b).

Na aproximação de quatro níveis, o nível mais baixo do laser não é mais o estado terminal 1, mas passa a ser o estado fundamental 0 (Figura 8.b). A radiação de bombeamento causa a transição do estado fundamental 0 para o segundo estado excitado de curta duração 3, a partir do qual o sistema quântico decai rapidamente (e de forma não-radiativa) para o nível laser superior metaestável 2. A transição do laser ocorre entre este nível laser 2 e o nível terminal 1. Este nível terminal 1, por sua vez, é um estado de vida curta e sua população é próxima de zero - a transição deste nível 1 e estado fundamental 0 também é uma transição não-radiativa e rápida. Nesta aproximação de quatro níveis, assegura-se uma população próxima a zero nos níveis 1 e 3, e uma maior população no nível metaestável 2 (que ao ser estimulado por um fóton incidente de energia  $\Delta E = E_2 - E_1$  irá decair emitindo um fóton igual) e, também, do nível fundamental 0, que está sendo continuamente bombeado. A inversão da população entre os níveis 2 e 1 pode ser alcançada de uma maneira muito mais fácil em comparação com o sistema de energia em três níveis. Um laser típico de quatro níveis é o laser Nd:YAG (subitem 5.1.2) ou o laser de gás hélio-neon (He-Ne) (subitem 5.1.1).

Na Figura 9, Jelínková e Šulc (JELÍNKOVÁ & ŠULC, 2013) descrevem esquematicamente o princípio da amplificação de radiação em um modelo de três níveis. O lado esquerdo da figura (Figura 9 (a – c)) mostra a interação dos fótons com os materiais não-bombeados, estando originalmente em equilíbrio termodinâmico - Figura 9.a. Os próximos *quanta* com frequência de bombeamento ressonante  $\nu_b$  (isto é, em frequência proporcional à diferença de energia entre os níveis 3 e 1, conforme Equação de Planck-Einstein do efeito fotoelétrico:  $\nu_b = \frac{E_3 - E_1}{h}$ ) são absorvidos em sua maior parte e o sistema quântico alcançará gradualmente o estado excitado (Figura

9.c). No lado direito da figura (Figura 9 (d – f)), os fótons ressonantes na onda de sinal interagem com o material ativo que está no estado excitado. A radiação da fonte externa com a energia de sinal  $E_s$  ( $E_s = E_2 - E_1$ ) está passando pelo material excitado e *estimula* os átomos a fazer a transição (decaimento) para o nível terminal (Figura 9.d). É importante notar que esta diferença energética  $E_s$  é menor que  $E_b$ , assim:  $E_s = E_b -$  *transição fônica*. Isto assegura que o bombeamento  $E_b$  preste-se à inversão de população, enquanto emissão estimulada ocorre pelo fóton de energia  $E_s$ . À medida que se espalha pelo material ativo, um processo de “avalanche” começa e o número de fótons estimulados aumenta - a radiação original é amplificada (Figura 9.e). O sistema quântico relaxa de volta ao estado de equilíbrio termodinâmico, como no início do processo (Figura 9 (f, a)).

Figura 9 – AMPLIFICAÇÃO DA RADIAÇÃO.



FONTE: Adaptado da figura 2.6 de (JELÍNKOVÁ & ŠULC, 2013).

LEGENDA: Estado inicial (a); absorção da radiação ressonante  $E_p$  e criação de inversão de população (b, c); emissão estimulada (d) amplificação da radiação passante  $E_s$  (e); transição do material para o equilíbrio termodinâmico (f).

## 2.4. CARACTERÍSTICAS DA RADIAÇÃO LASER

A luz produzida pela emissão estimulada é muito semelhante ao fóton estimulante de energia  $E_s$  em suas características de comprimento de onda, fase e

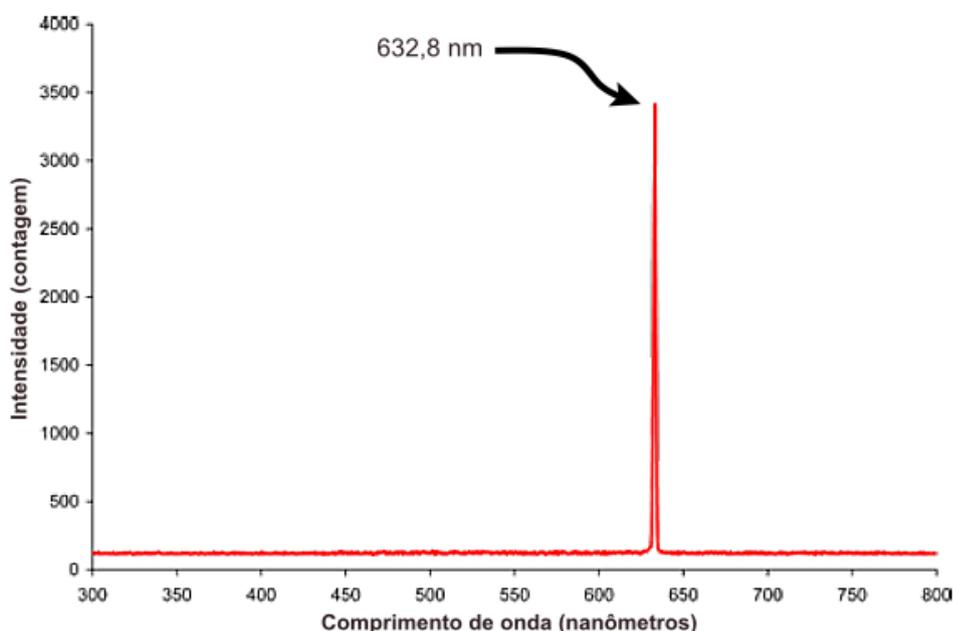
polarização. Portanto, o laser tem uma coerência distinta e pode manter a polarização uniforme e frequência monocromática conforme projeto da cavidade óptica.

Pela forma que a radiação eletromagnética é “construída” num laser, esta tem propriedades únicas que não são encontradas em nenhuma outra luz. O laser emite um feixe de luz altamente colimado que tornam a luz quase monocromática e direcional. Essas duas propriedades significam que a luz laser é altamente estruturada no espaço e correlacionada no tempo. Isso é chamado de luz *coerente*. Características comuns da luz laser são: *monocromaticidade*, *direcionalidade*, *coerência* e *alto brilho* (SVELTO, Principi dei Laser, 1970).

***Monocromaticidade*** significa que a radiação gerada no laser se localiza em um intervalo muito específico e curto em termos de comprimento de onda, se comparada a outras fontes (Figura 10). Isso é alcançado, primeiramente, pois somente uma onda eletromagnética de frequência  $\nu$  conforme a Equação 2.5 pode ser amplificada. A segunda razão é que, devido à cavidade ressonante formada pelos dois espelhos, a oscilação pode ocorrer apenas nas frequências de ressonância do projeto dessa cavidade. A última circunstância faz com que a largura de banda do laser seja frequentemente muito mais estreita (em até seis ordens de magnitude) do que a largura de banda observada na emissão espontânea (SVELTO, Principi dei Laser, 1970).

Existem casos especiais de projetos de ressonadores e escolha dos meios ativos em que a radiação laser pode gerar mais de um comprimento de onda ou pode ser sintonizado (por exemplo: Nd:YAG 1,06  $\mu\text{m}$ , 1,32  $\mu\text{m}$  ou 1,44  $\mu\text{m}$ ; laser de íon argônio de 0,515  $\mu\text{m}$  ou 0,488  $\mu\text{m}$ ). Embora alguns projetos lasers permitam ser sintonizados para tais escolhas de comprimentos de onda, a saída do laser cobre uma faixa espectral tão estreita que a luz emitida pelos lasers é considerada monocromática.

Figura 10 – ESPECTRO DE UM LASER DE HÉLIO NEÔNIO.



FONTE: Adaptado da figura retratada na página 6 de (ZLATANOV, 2016).

LEGENDA: Espectro de um laser de hélio neônio ilustrando sua altíssima pureza espectral (limitada pelo aparelho de medição). A largura de banda de 0,002 nm do meio laser é bem mais de 10.000 vezes mais estreita do que a largura espectral de um LED.

A **direcionalidade** significa que o feixe é bem colimado e pode se propagar longas distâncias mantendo-se estreito e com pouco espaçamento. Ao contrário da emissão espontânea, a radiação estimulada não é emitida isotropicamente, mas sim na mesma direção da onda de entrada. O ponto focal de um feixe laser é limitado apenas pelo efeito de difração e não pelo tamanho da fonte de laser. Pode-se facilmente atingir uma densidade de fluxo de luz de laser ao nível de  $10^{15} \text{W/cm}^2$ . Para efeitos de comparação, uma chama de oxiacetileno possui uma densidade de fluxo de  $10^3 \text{W/cm}^2$  (JELÍNKOVÁ & ŠULC, 2013).

**Coerência:** a coerência garante que as ondas produzidas estão em fase, movendo-se precisamente juntas no tempo e no espaço e, portanto, suas amplitudes se somam em interferência construtiva em vez de cancelar a amplitude uma da outra por interferência destrutiva. A intensidade de uma onda é proporcional ao quadrado de sua amplitude (CARISTAN, Laser Cutting Guide for Manufacturing, 2004, p. 359). O comprimento sobre o qual a fase em um feixe de luz está correlacionada é chamado *comprimento de coerência* (SVELTO, Principi dei Laser, 1970).

**Brilho:** a característica geral da radiação laser resultante das propriedades acima mencionadas, juntamente com alta energia ou potência, causa alto brilho da luz laser, superando outras fontes de luz (SVELTO, Principi dei Laser, 1970). Jelínková e Šulc definem o brilho de uma determinada fonte de ondas eletromagnéticas como a potência emitida por unidade de área de superfície por unidade de ângulo sólido (JELÍNKOVÁ & ŠULC, 2013). Desta forma, o brilho  $B$  é definido como a potência de

radiação de saída  $P$  emitida pela seção  $A$  e pelo ângulo de divergência espacial do feixe  $\Omega$ :

$$B = \frac{P}{A * \Omega} [W/(cm \cdot sr)]$$

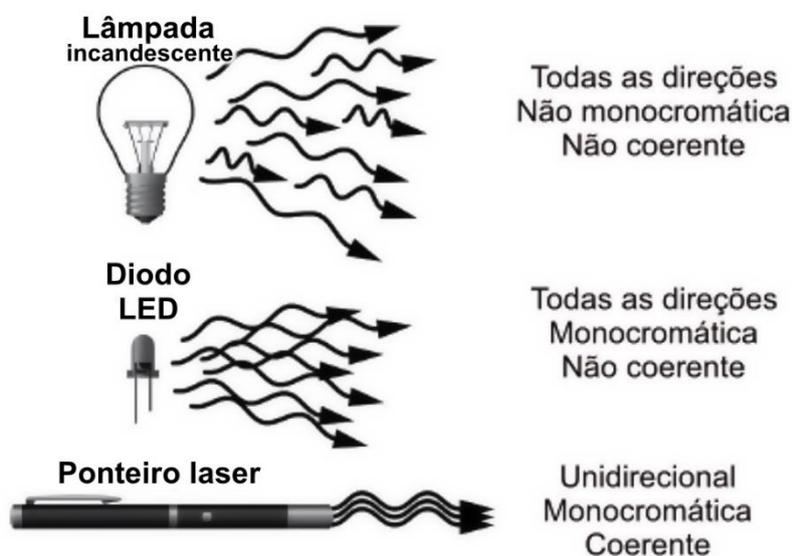
Equação 2.6

\*sr: esterradiano ou esferorradiano

Um laser de potência até moderada (por exemplo, alguns miliwatts) tem um brilho que é ordens de magnitude maior do que o das fontes convencionais mais brilhantes. Isso se deve principalmente ao alto propriedades direcionais do feixe de laser (SVELTO, Principi dei Laser, 1970).

As diferenças entre a radiação laser coerente e outras fontes de luz incoerentes são mostradas na Figura 11. A radiação emitida pela lâmpada é não monocromática (diferentes comprimentos de onda), não-coerente (fora de fase) e propaga-se para todas as direções. Os LEDs emitem uma luz de cor única, mas também é luz não-coerente e com grande divergência. Apenas o laser (indicado pelo apontador a laser na Figura 11) possui as propriedades excepcionais mencionadas acima.

Figura 11 – ILUSTRAÇÃO DAS PROPRIEDADES DA RADIAÇÃO LASER, COMPARADA À LÂMPADA E AO LED.

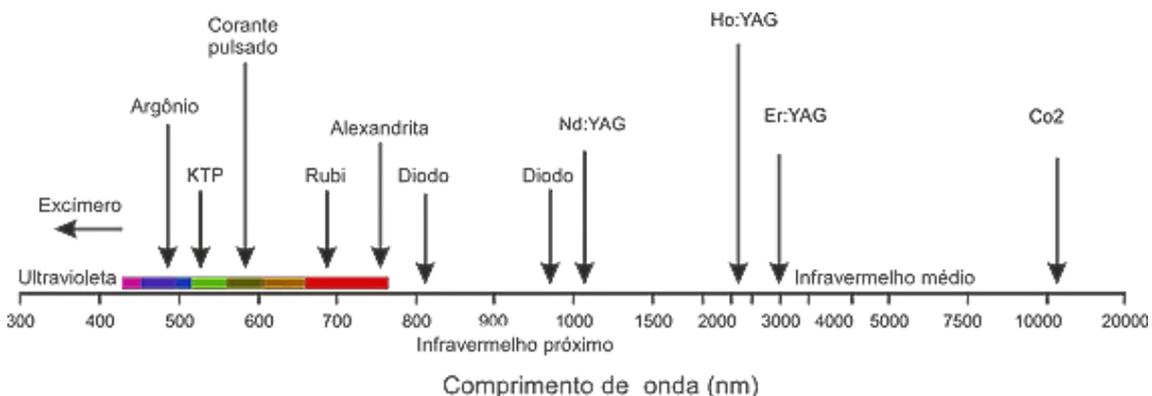


FONTE: Adaptado da figura 2.14 de (JELÍNKOVÁ & ŠULC, 2013).

LEGENDA: Ilustração das propriedades da radiação de saída geradas por uma lâmpada, um LED e pelo laser.

No uso moderno, o termo "luz" da sigla laser inclui radiação eletromagnética em todas as suas frequências, não apenas luz visível, daí os termos laser infravermelho, laser ultravioleta, laser de raios-x, laser de raios gama etc. Como o antecessor do laser em micro-ondas, o MASER, foi desenvolvido primeiro, dispositivos desse tipo operando em micro-ondas e frequências de rádio são referidos como "masers" em vez de "lasers de micro-ondas" ou "lasers de rádio" (ZLATANOV, 2016).

Figura 12 – COMPRIMENTOS DE ONDAS DE LASERS DISPONÍVEIS COMERCIALMENTE.



FONTE: Adaptado da figura retratada na página 12 de (ZLATANOV, 2016) e compilação de (WEBER M. J., 1999)

Na Figura 12, acima, tipos de laser com linhas de laser distintas são mostrados acima da barra de comprimento de onda, enquanto abaixo são mostrados lasers que podem emitir em uma faixa de comprimento de onda. A cor codifica o tipo de material do laser (WEBER M. J., 1999).

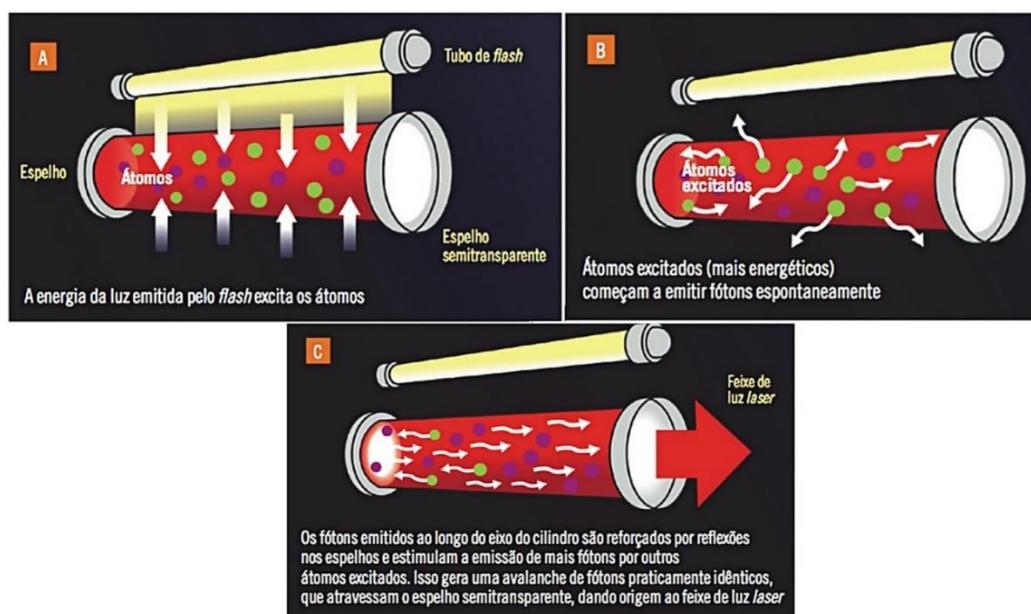
### 3 ARQUITETURA DO LASER

De acordo com (ZLATANOV, 2016), são componentes de um gerador laser típico:

- Meio de ganho
- Sistema de energia para bombeamento do laser
- Espelho de alta reflexão
- Acoplador de saída (espelho menos refletivo)
- Feixe de laser

Pelas características descritas da amplificação da radiação, conclui-se que o sistema a laser consiste nas três partes principais, a seguir: um material (meio) ativo, uma fonte de bombeamento e um ressonador óptico (aberto), que juntos formam a cabeça do sistema a laser (Figura 13).

Figura 13 – ARQUITETURA E FUNCIONAMENTO DE UM LASER COMUM.

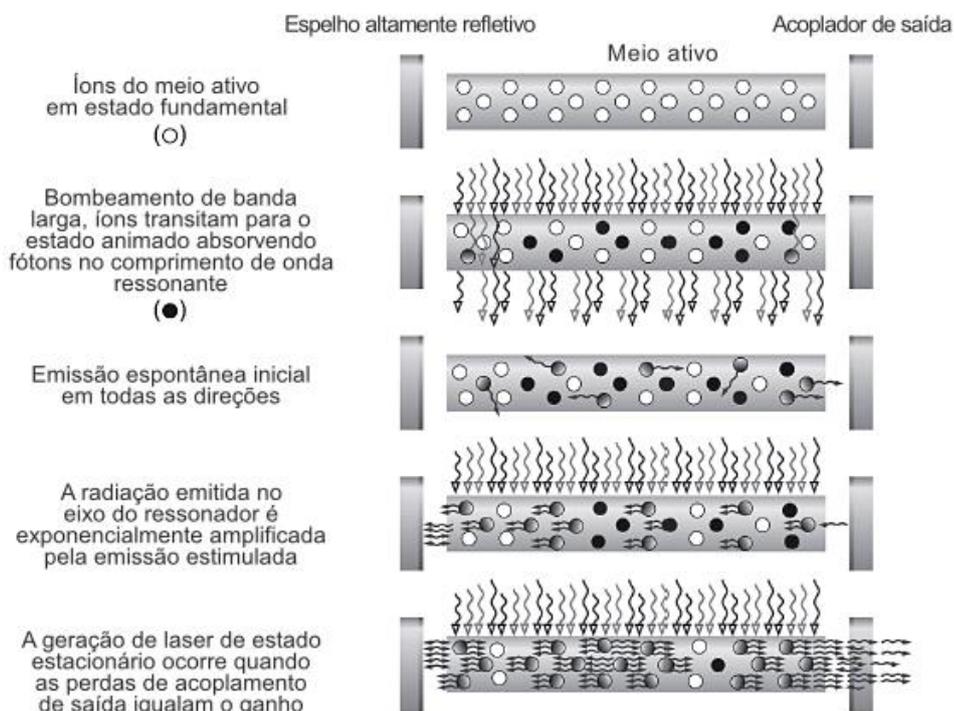


FONTE: Adaptado da figura 4 de (DAVIDOVICH, 2015)

O pioneiro laser de rubi, construído pelo físico estadunidense Theodore Harold Maiman trabalhou com o seguinte princípio: Quando a inversão da população é estabelecida pelo bombeamento  $E_b$ , os átomos, os íons ou as moléculas do material ativo estão excitados e então a geração de radiação laser pode começar. Devido ao esforço de um sistema quântico para permanecer em equilíbrio termodinâmico, alguns dos sistemas quânticos estão retornando ao estado inferior com a emissão espontânea de fótons, emitidos com diferentes polarizações em todas as direções e em uma ampla faixa espectral dada pelo meio ativo do laser (Figura 12) (MAIMAN, The Laser Odyssey, 2000).

Estes fótons espontâneos cumprem o papel dos fótons estimulantes (ver Figura 9.d), causando a transição induzida (decaimento) de outros sistemas quânticos excitados (átomos, íons, moléculas) para o estado fundamental, com a emissão estimulada de fótons (emissão estimulada). Como resultado, todo fóton emitido espontaneamente desencadeia a geração de outros fótons. Enquanto passam pelo meio ativo, como descrito acima, os fótons iniciam um processo de "avalanche" e o número de fótons estimulados aumenta exponencialmente. Para ampliar ainda mais o feixe de fótons gerado, um espelho 100% refletivo é colocado no caminho dos fótons em propagação. Após a reflexão, eles passam pelo meio ativo mais uma vez e seu número aumenta. Quando o segundo espelho - paralelo ao primeiro - é usado no lado oposto do meio ativo, a radiação é mais uma vez refletida e passa pelo meio ativo novamente. O sistema de dois espelhos ajustados em plano paralelo é chamado de "ressonador óptico (aberto)", baseado na cavidade Fabry-Pérot (KANNATEY-ASIBU JR., Capítulo 2 - Optical Resonators, 2009). Quando o bombeamento ainda está ligado (resultando que, no meio ativo, existam sistemas suficientes no estado excitado), o número de fótons emitidos dentro do ressonador está crescendo, o feixe de laser é formado e deixa o ressonador através do segundo espelho, que é *parcialmente refletivo*. Este segundo espelho, que permite que parte da radiação escape para formar o feixe laser útil, é chamado de "acoplador de saída". A formação de radiação laser no interior do ressonador é ilustrada graficamente na Figura 14. Os fótons que se deslocam em outras direções (que não a direção perpendicular aos espelhos ressonadores) não retornam ao meio ativo e não desempenham um papel ativo na geração de radiação laser (JELÍNKOVÁ & ŠULC, 2013).

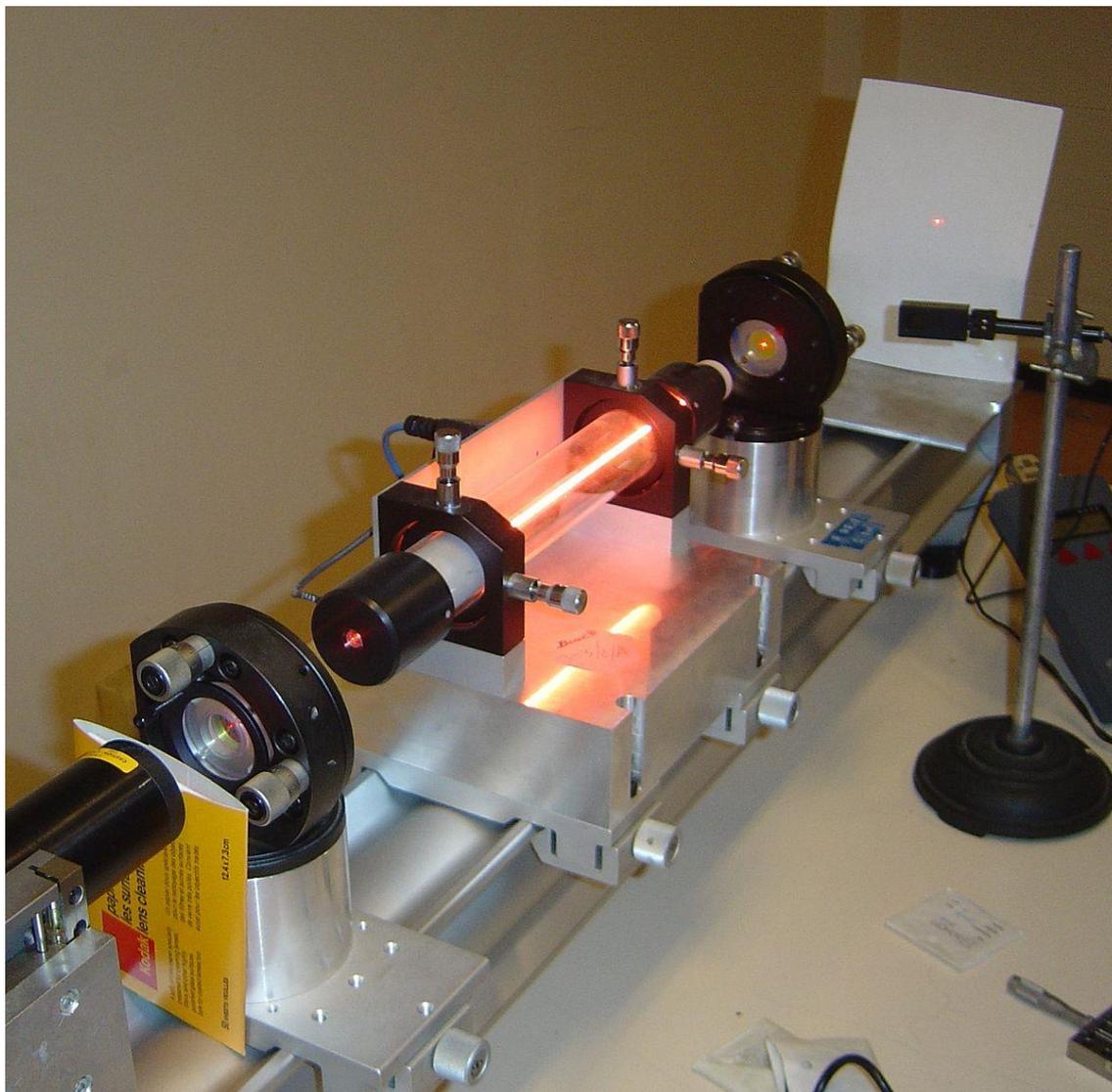
Figura 14 – ARQUITETURA DE FORMAÇÃO DA RADIAÇÃO LASER.



FONTE: Adaptado da figura 2.7 de (JELÍNKOVÁ & ŠULC, 2013).

Na Figura 15, um laser de hélio-neônio é mostrado. O intenso brilho rosa-alaranjado no centro do tubo é luz incoerente, tal como num tubo de neônio, produzido por uma descarga elétrica. Mas este plasma brilhante é excitado e então atua como “meio de ganho” através do qual o feixe interno passa e é refletido entre os dois espelhos. A saída de radiação de laser através do espelho frontal – acoplador de saída - pode ser vista produzindo um ponto intenso minúsculo (cerca de 1 mm de diâmetro) no canto superior direito (ZLATANOV, 2016).

Figura 15 – LASER DE HÉLIO-NEÔNIO.



FONTE: Adaptado da figura 7 de (ZLATANOV, 2016).

LEGENDA: Laser de hélio-néon no Laboratório Kastler-Brossel da Université Paris 6

### 3.1. MATERIAL ATIVO (MEIO DE GANHO)

O meio de ganho é uma substância na qual a inversão populacional pode ser alcançada pois têm, como característica comum, uma estrutura interna complicada de níveis ou bandas de energia (para os semicondutores). Abaixo alguns exemplos:

- Átomos - Cobre, Neônio e Iodo, por exemplo;
- Íons - e.g. Cádmi<sup>+</sup> e Argônio<sup>+</sup>;
- Moléculas em gases – v.g. ArF, CO e CO<sub>2</sub>;
- Íons dopados em cristais - Ferro<sup>2+</sup>, Disprósio<sup>2+</sup>, Cromo<sup>3+</sup>, Titânio<sup>3+</sup>, Neodímio<sup>3+</sup>, Praseodímio<sup>3+</sup>, Disprósio<sup>3+</sup>, Hólmio<sup>3+</sup>, Érbio<sup>3+</sup>, Túlio<sup>3+</sup>, Itérbio<sup>3+</sup>;

- Moléculas de corante em soluções ou sólidos - rodamina 6, por exemplo;
- Pares de elétron-buraco em material semiconductor - e.g. InGaAs;
- Átomos multi-ionizados no plasma (Figura 27).

Este material ativo pode estar em qualquer estado: gás, líquido, sólido ou plasma (JELÍNKOVÁ & ŠULC, 2013). O importante é que o meio de ganho de um laser é cuidadosamente selecionado para o projeto laser específico de modo a emitir em uma desejada faixa de frequência, de modo que o projeto da cavidade e da fonte de bombeamento é específica para o meio de ganho. É normalmente um material de pureza, tamanho, concentração e forma controlados (ZLATANOV, 2016). O meio de ganho é colocado em um estado excitado por uma fonte externa de energia, conforme explicado no item 3.2. Na maioria dos lasers, esse meio consiste em uma população de átomos que foram excitados a tal estado por meio de uma fonte de luz externa, ou um campo elétrico que fornece energia para os átomos absorverem e serem transformados em seus estados excitados. Através de processo descrito anteriormente - item 2.3 - o feixe é amplificado pelo processo de emissão estimulada. Por si só, isso constitui um amplificador óptico. Mas quando um amplificador óptico é colocado dentro de uma cavidade óptica ressonante, obtém-se um oscilador de laser (SALEH & TEICH, 1991).

### 3.2. BOMBEAMENTO (FONTE DE ENERGIA)

Como o principal requisito para a amplificação da radiação é criar e manter a inversão populacional dos níveis de energia no meio ativo do laser, faz-se necessária uma fonte de energia. O bombeamento pode ser feito com a luz de um flash, radiação de outro laser, descarga elétrica, reação química ou corrente elétrica para causar colisões de elétrons, dentre outras, a depender do tipo de um material ativo específico em que se deseja excitar (SIEGMAN, 1986). Devido a vários materiais ativos, existem inúmeros sistemas de bombeamento a laser, que são fortemente dependentes das propriedades do meio ativo, alguns dos sistemas de bombeamento mais comuns seriam: opticamente bombeados, por descarga elétrica, por feixe de elétrons, por expansão de gás comprimido, por reação química e por recombinação (Figura 27) (KOECHNER, 1999).

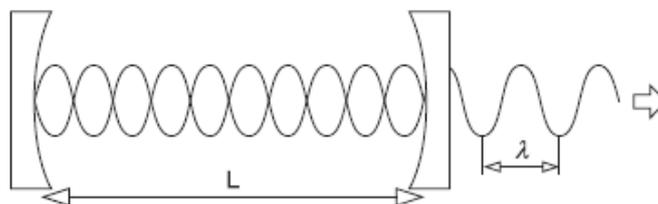
### 3.3. CAVIDADE / RESSONADOR ABERTO

Quando ocorre o *decaimento espontâneo*, átomos excitados emitirão fótons em qualquer direção. Cada um desses fótons emitidos espontaneamente irá desencadear *emissão estimulada* na direção de sua propagação, mas assim os fótons estimulados se propagarão em diferentes direções, o que não propicia a amplificação coerente da luz. O ressonador óptico é o mecanismo que estimula uma direção específica de propagação para a emissão estimulada e restringe as perdas por difração, por meio de espelhos (HODGSON & WEBER, 2005). O ressonador óptico é

algumas vezes referido como uma "cavidade óptica", mas este é um nome incorreto: os lasers usam ressonadores abertos em oposição à cavidade literal que seria empregada em frequências de micro-ondas em um maser. O ressonador óptico (aberto) cria um mecanismo de retroalimentação óptica essencial para a formação de oscilações do laser dentro do ressonador. É um sistema de duas ou mais superfícies refletivas - espelhos ou outros elementos ópticos refletores tais como prismas (utilizados para moldar o feixe, sobretudo feixes de formato muito elíptico, conforme mencionado por (URQUHART, 1988)) que permitem estabelecer ondas estacionárias com comprimento de onda  $\lambda$  muito menor que a dimensão geométrica dos espelhos e a distância entre eles, vide Figura 16 (WATSON, 1992).

O ressonador é geralmente composto de dois espelhos, entre os quais um feixe de luz coerente viaja sendo refletido e cruzando novamente o meio de ganho, de modo que o fóton médio passa pelo meio de ganho diversas vezes antes de ser emitido pelo orifício de saída ou perdido para difração ou absorção. Um dos espelhos do ressonador é totalmente refletivo (sua reflexividade é de  $\sim 100\%$ ); o outro é parcialmente transparente (a transparência é igual a 1% a 99%, de acordo com o projeto de sistema do laser). Por esse espelho (chamado acoplador de saída) o feixe de laser sai do ressonador. O meio de ganho amplificará todos os fótons que passarem por ele, independentemente da direção; mas apenas os fótons em um modo espacial suportado pelo ressonador - na direção de reflexão entre os dois espelhos - passarão mais de uma vez pelo meio (aproximadamente  $10^9 \text{ s}^{-1}$ ) e receberão amplificação substancial (SILFVAST, 2004). Se o ganho (amplificação) no meio for maior do que as perdas do ressonador, então a potência da luz recirculada pode aumentar exponencialmente. Mas cada evento de emissão estimulado retorna um átomo de seu estado excitado para o estado fundamental, reduzindo o ganho do meio. Com o aumento da potência do feixe, o ganho líquido (ganho menos perda) se reduz à unidade e o meio de ganho é considerado saturado. Em um laser de onda contínua (CW), o equilíbrio da potência do bombeamento contra a saturação de ganho e as perdas da cavidade produz um valor de equilíbrio da potência do laser dentro da cavidade; este equilíbrio determina o ponto de operação do laser. Se a potência de bombeamento aplicado for muito pequena, o ganho nunca será suficiente para superar as perdas do ressonador e a luz do laser não será produzida. A potência mínima de bombeamento necessário para iniciar a ação do laser é chamada de *limite* de laser.

Figura 16 - ONDAS ESTACIONÁRIAS EM UM RESSONADOR ÓPTICO.



FONTE: Adaptado da figura 2.8 de (JELÍNKOVÁ & ŠULC, 2013).

LEGENDA: Esquema das ondas estacionárias dentro do ressonador óptico e radiação gerada transmitida pelo espelho ressonador parcialmente transparente (L - comprimento do ressonador, distância entre os espelhos do ressonador,  $\lambda$  - comprimento de onda da radiação gerada).

O ressonador pode ser construído em um arranjo estável ou instável, de acordo com a direção da radiação de seus espelhos após a reflexão (HODGSON & WEBER, 2005). Num sistema laser são principalmente usadas configurações do ressonador estáveis, o que significa que concentram a onda após a reflexão nos espelhos no meio ativo colocado dentro do ressonador (SIEGMAN, 1986). De acordo com a curvatura dos espelhos ( $r_1$ ,  $r_2$  - raio do espelho) e a distância L entre eles (L,  $r_1$  e  $r_2$  juntamente com a refletância dos espelhos  $R_1$  e  $R_2$  são os principais parâmetros que caracterizam o ressonador). Refletância é a proporção entre o fluxo de radiação eletromagnética incidente numa superfície e o fluxo que é refletido, formalmente:

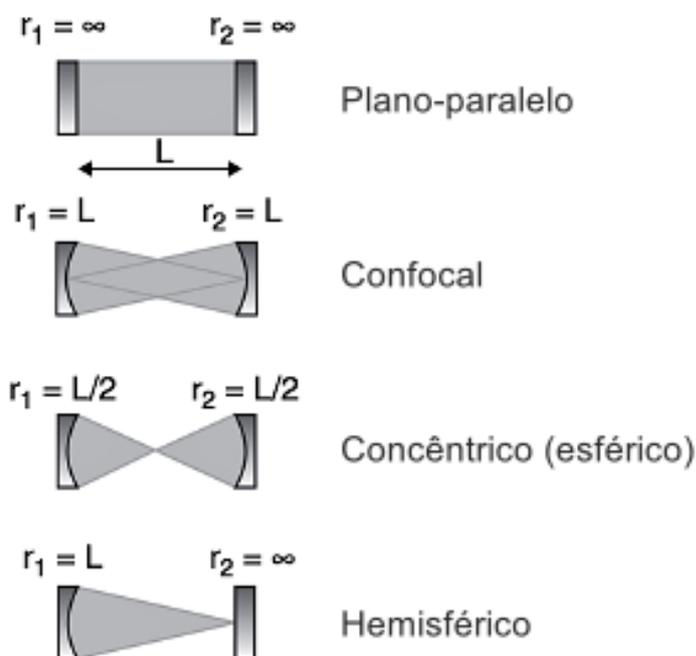
$$R = \frac{\Phi_e^r}{\Phi_e^i}$$

Equação 3.1

onde:  $R$ : refletância;  $\Phi_e^r$ : Fluxo de radiação eletromagnética refletido;  $\Phi_e^i$ : Fluxo total de radiação eletromagnética incidente (CHALK, 2019).

Os ressonadores podem ser referidos como: plano paralelo; confocal; concêntrico (esférico) ou hemisférico (Figura 17), conforme descritos no capítulo 4 de (SVELTO, Principi dei Laser, 1970).

Figura 17 – TIPOS DE RESSONADORES ÓPTICOS USADOS EM UM SISTEMA LASER.



FONTE: Adaptado da figura 2.10 de (JELÍNKOVÁ & ŠULC, 2013).

LEGENDA: plano paralelo ( $r_1=r_2=\infty$ ); confocal ( $r_1=r_2=L$ ); concêntrico ( $r_1=r_2=L/2$ ) ou hemisférico ( $r_1=\infty$ ;  $r_2=L$ ).

Conforme a geometria específica do ressonador, sua estrutura suportará oscilações de ondas eletromagnéticas em frequências de ressonância  $\nu$  bem definidas, que correspondem a ondas estacionárias (Figura 16), tal como seria com ondas mecânicas num dado comprimento de corda. O comprimento do ressonador deve ser igual a um número inteiro  $k$  múltiplo da metade do comprimento de onda  $\lambda$  das ondas ressonantes (KANNATEY-ASIBU JR., Capítulo 2 - Optical Resonators, 2009, p. 21). A frequências de ressonância correspondente será

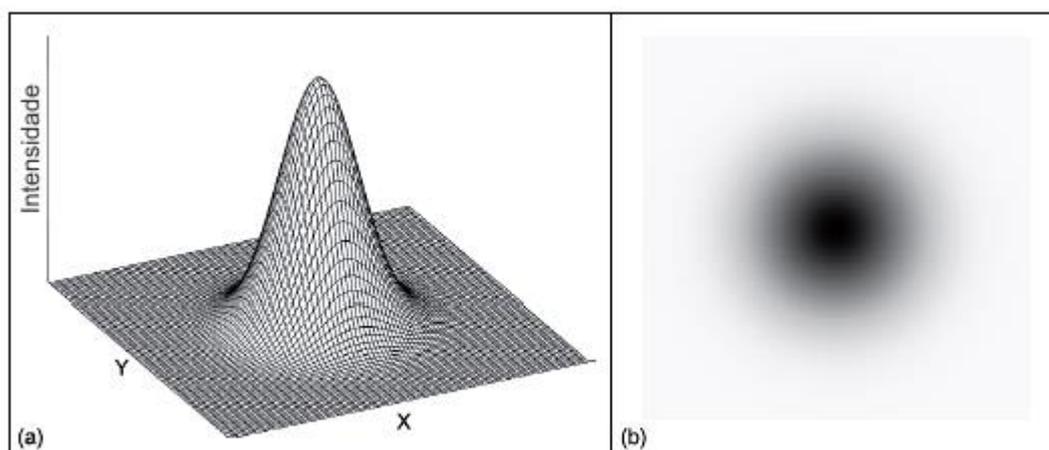
$$\nu = \frac{kc}{2L}$$

Equação 3.2

onde  $k$  é um número inteiro,  $c$  a velocidade da luz e  $L$  o comprimento óptico do ressonador. As ondas que ressoam na cavidade nessas frequências são chamadas de modos axiais ou longitudinais. Duas das características mais distintas da emissão de laser são a coerência espacial e a coerência espectral (vide subitem 2.4). A coerência espectral é avaliada medindo a largura de linha (*linewidth*) da radiação do laser. As características espectrais do laser, como largura de linha e comprimento da coerência, são determinadas principalmente pelos modos axiais.

Os padrões particulares de amplitude (ou intensidade) das ondas em um plano transversal à direção de propagação são chamados de modos transversais. Os modos longitudinais (ou axiais) diferem um do outro apenas em sua frequência de oscilação; os modos transversais diferem um do outro não apenas em sua frequência de oscilação, mas também em sua distribuição de campo em um plano perpendicular à direção de propagação. A coerência espacial está relacionada à divergência do feixe do laser. A divergência do feixe, o diâmetro do feixe e a distribuição de energia são governados pelos modos transversais.

Figura 18 – DISTRIBUIÇÃO DO FEIXE DE SAÍDA GAUSSIANO EM MODO FUNDAMENTAL TEM<sub>00</sub>.



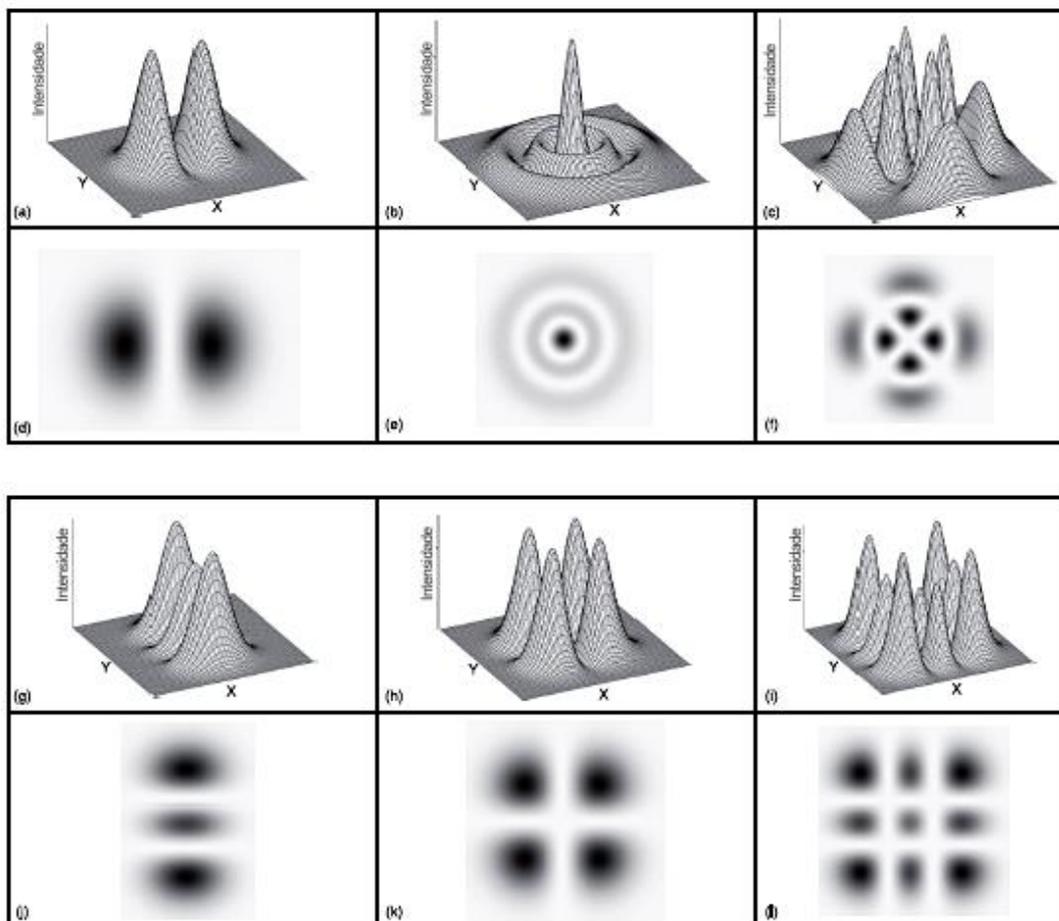
FONTE: Adaptado da figura 2.11 de (JELÍNKOVÁ & ŠULC, 2013).

LEGENDA: Distribuição do feixe de saída Gaussiano em modo fundamental TEM<sub>00</sub>, em perfis tri (a) e bidimensionais (b)

Fisicamente, a onda gaussiana concentra a intensidade da luz ao longo do eixo da cavidade. Propagando pelo espaço, assemelha-se a um estreito feixe de luz chamado feixe gaussiano. Em um caso ideal, quando o laser opera no modo fundamental (TEM<sub>00</sub>, do termo em inglês *transverse electromagnetic mode*), as ondas no plano perpendicular ao eixo de propagação têm um perfil de intensidade gaussiano (Figura 18) (STEEN, Capítulo 2 - Basic Laser Optics, 2003 , p. 80).

A menos que sejam feitos esforços específicos para limitar o número de modos de oscilação, em geral os lasers são osciladores multimodo (DAVIS, 2014, p. 150). A razão para isso é o fato de que um grande número de modos de ressonador longitudinal cai dentro da largura de banda exibida pela transição a laser. Um exemplo de outros possíveis modos transversais gerados é mostrado na Figura 19.

Figura 19 – EXEMPLO DE MODOS TRANSVERSAIS DENTRO DE UM RESSONADOR ÓPTICO.



FONTE: Adaptado da figura 2.12 de (JELÍNKOVÁ & ŠULC, 2013).

LEGENDA: Representação tri e bidimensional de modos transversais dentro de um ressonador óptico. TEM<sub>10</sub> (a, d); TEM<sub>20</sub> (b, e); TEM<sub>12</sub> (c, f); TEM<sub>02</sub> (g, j); TEM<sub>11</sub> (h, k); TEM<sub>22</sub> (i, l).

A cavidade atua como um filtro espacial e seleciona preferencialmente os raios de luz próximos ao seu eixo central, podendo os demais feixes serem perdidos devido à distância do eixo e ao tamanho dos espelhos. Quando o laser opera no modo de estado estacionário, produz uma onda de luz cuja estrutura espacial não muda nas inúmeras reflexões no interior da cavidade (DAVIS, 2014, p. 151).

A principal característica do ressonador aberto é dada por seu fator de qualidade  $Q$ , definido como a razão entre a energia armazenada na cavidade e a perda de energia por ciclo (KANNATEY-ASIBU JR., Capítulo 6 - Beam Modification, 2009, p. 96).

$$Q = \frac{2 * \pi * \nu * E}{P}$$

onde  $\nu$  é a frequência ressonante,  $E$  é a energia armazenada no ressonador e  $P = \frac{-dE}{dt}$  é a potência dissipada (energia perdida em um período do período de oscilação óptica). Quanto mais altos os fatores de qualidade para o ressonador específico, menores serão as perdas internas e externas.

## 4 HISTÓRIA

### 4.1. TEORIA E PRINCÍPIOS

Em 1917, Albert Einstein estabeleceu as bases teóricas para o laser e o maser no artigo *Zur Quantentheorie der Strahlung* (Sobre a Teoria Quântica da Radiação, em tradução livre) (EINSTEIN, 1917). Einstein levantou a hipótese de que, além da emissão espontânea, uma transição estimulada, induzida ou forçada pode existir. Basicamente, Albert Einstein traçou os princípios teóricos para a amplificação da radiação pela suposição que elétrons podem ser estimulados a emitir luz de comprimento de onda  $\lambda$  particular, a partir de luz estimulante naquele  $\lambda$ . Essa emissão ocorre quando o fóton recebido (estimulante, com a energia igual à diferença  $\Delta E = E_2 - E_1$ ) induz a transição do sistema quântico do estado excitado para o estado fundamental. O novo fóton *emitido*, então, não apenas tem a mesma energia que o fóton *estimulante*, mas se propaga na mesma direção e tem a mesma fase. Essa emissão é denominada emissão estimulada, induzida ou forçada (Figura 5.c) (KLEPPNER, 2005). Esta declaração expressa o princípio fundamental do maser (amplificação de micro-ondas por emissão estimulada de radiação) e do laser (amplificação de luz por emissão estimulada de radiação). Os conceitos teóricos básicos de masers e lasers foram assim fornecidos, mas foram necessários muitos anos para demonstrar com sucesso a primeira amplificação por emissão estimulada de radiação.

Em 1928, os físicos alemães Hans Kopfermann e Rudolf Walther Ladenburg observaram a emissão estimulada pela primeira vez, por meio de uma descarga de gás (KOPFERMANN, 1928), embora na época parecesse não ter uso prático tão evidente (HECHT J. , Laser, 2020).

O físico moscovita Valentin A. Fabrikant é conhecido por sua tese de 1939 com sugestões de experimentos sobre amplificação de luz provando diretamente a existência de absorção negativa na descarga de gás, seu pedido de patente de 1951 (juntamente com M. M. Vudynsky e F. A. Butaeva) para amplificação da radiação eletromagnética (ultravioleta, visível, infravermelho e regiões espectrais de rádio), e suas tentativas experimentais (em conjunto com F. A. Butaeva) para observar a amplificação da luz na descarga de gás (submissão de artigo de dezembro de 1957) (LUKISHOVA, 2010).

## 4.2. AMPLIFICAÇÃO DE MICRO-ONDAS – MASER

A ideia de amplificar a radiação por emissão estimulada foi comprovada pela primeira vez na região de micro-ondas. Em 1951, Joseph Weber apresentou um artigo sobre o uso de emissões estimuladas para fazer um amplificador de micro-ondas para a Conferência de Pesquisa de Tubos de Vácuo do Instituto de Engenheiros de Rádio de junho de 1952, em Ottawa, no Canadá. Após essa apresentação, a RCA pediu a Weber que desse um seminário sobre essa ideia e Charles Hard Townes pediu a ele uma cópia do artigo. Em 1953, Joseph Weber propôs um amplificador de micro-ondas baseado em emissão estimulada em um sólido paramagnético (WEBER J. , 1953). Em 1954, um dispositivo molecular MASER para gerar radiação de micro-ondas com um comprimento de onda de 13 mm foi construído independentemente por Nikolay G. Basov e Aleksandr M. Prokhorov, e por James P. Gordon, Herbert J. Zeiger e Charles Hard Townes (BASOV & PROKHOROV, 1954) (GORDON, ZEIGER, & TOWNES, 1955).

O primitivo MASER da equipe americana usou moléculas de amônia em uma cavidade ressonante de micro-ondas. Operou em princípios semelhantes aos do laser, mas amplificando a radiação de micro-ondas ao invés da radiação infravermelha ou visível. Utilizou a amônia ( $\text{NH}_3$ ) como meio ativo e a fonte de bombeamento como sendo o calor. O aquecimento da amônia a  $50^\circ \sim 60^\circ \text{C}$  promove seu estado excitado (parcialmente, em equilíbrio com o estado fundamental). Nas moléculas de amônia em estado excitado há uma distorção da molécula (um momento dipolo-dipolo) que permite obter a inversão populacional ao separar a população no estado fundamental e no estado excitado por meio de um campo eletromagnético, sendo que a população no estado excitado seguia para uma cavidade onde seu decaimento promove a amplificação de micro-ondas. Por ser um sistema típico de dois níveis, a amplificação se dá por meio de pulsos, já que neste arranjo não é possível um bombeamento que promova a inversão populacional contínua (CARISTAN, Laser Cutting Guide for Manufacturing, 2004, p. 4).

A equipe soviética de Nikolay Basov e Aleksandr Prokhorov no Instituto de Física Lebedev em Moscou, atual Rússia, trabalhou em um princípio semelhante, porém com fluoreto de cério ( $\text{CsF}$ ) e um campo elétrico não uniforme, em vez de magnético, para separar as moléculas excitadas daquelas em estado fundamental (STEEN, Capítulo 1 - Background and General Applications, 2003, p. 4). Basov e Prokhorov resolveram o problema dos sistemas de saída contínua usando mais de dois níveis de energia. Esses meios de ganho poderiam liberar emissões estimuladas entre um estado excitado e um estado excitado inferior, não o estado fundamental, facilitando a manutenção de uma inversão populacional. Em 1955, Prokhorov e Basov sugeriram o bombeamento óptico de um sistema multinível como método para obter a inversão da população, mais tarde um método principal de bombeamento a laser (ZAVECZ, SAIFI, & NOTIS, Metal reflectivity under high-intensity optical radiation, 1975).

O Prêmio Nobel de Física de 1964 foi dividido, metade concedido a Charles Hard Townes, a outra metade juntamente com Nicolay Gennadiyevich Basov e

Aleksandr Mikhailovich Prokhorov "pelo trabalho fundamental no campo da eletrônica quântica, que levou à construção de osciladores e amplificadores baseado no princípio maser-laser" (Prêmio Nobel em física 1964 - Charles Hard Townes, Nicolay Gennadiyevich Basov, Aleksandr Mikhailovich Prokhorov, 1964).

#### 4.3. AMPLIFICAÇÃO DA LUZ VISÍVEL – LASER

Com a demonstração de que a amplificação de radiação era possível, acirram-se as pesquisas que possibilitassem amplificar comprimentos de ondas menores, que carregavam mais energia.

Em 1958, um MASER com um meio de estado sólido - o rubi - foi desenvolvido por Makov et al. Para gerar comprimentos de onda mais curtos, mesmo na região óptica, um ressonador especial baseado na cavidade aberta de Fabry–Pérot foi sugerido por Charles Hard Townes e Arthur Leonard Schawlow. Sugestões do uso do rubi como meio ativo para um LASER (amplificação da luz visível) foram aventadas - porém desacreditadas - pelo próprio Townes (NELSON, COLLINS, & KAISER, 2009), de tal sorte que muitos pesquisadores desistiram dela (MAIMAN FOUNDATION, 2020).

A partir desta época iniciou-se uma “corrida” pela construção com sucesso do primeiro laser. Na Bell Labs, 1957, Charles Hard Townes e Arthur Leonard Schawlow decidiram abandonar a amplificação de radiação infravermelha para se concentrarem na luz visível, num conceito originalmente chamado de "maser óptico", para o qual a Bell Labs entrou com um pedido de patente para seu maser óptico proposto no ano de 1958, através de um manuscrito com cálculos teóricos submetidos por Schawlow e Townes à *Physical Review*, publicado naquele ano no Volume 112, Edição nº 6 (SCHAWLOW & TOWNES, 1958). A Bell Labs e os pesquisadores sustentam que isso os torna os “inventores do Laser” (Scientific American, 1999).

À mesma época, no Laboratório de Radiação da novaiorquina Universidade de Columbia - *Columbia University in the City of New York* - o estudante de graduação Gordon Gould trabalhava em sua tese de doutorado sobre os níveis de energia do tálio excitado e, em 1957, Gould anotou suas ideias para o uso de um ressonador aberto. Segundo ele, ao perceber a importância do que tinha anotado, registrou-as em um cartório notarial. Por suas notas descrevendo os elementos essenciais para construção de um dispositivo laser e por ter cunhado o termo LASER, Gordon Gould também entrou na disputa pela patente (STEEN, Capítulo 1 - Background and General Applications, 2003).

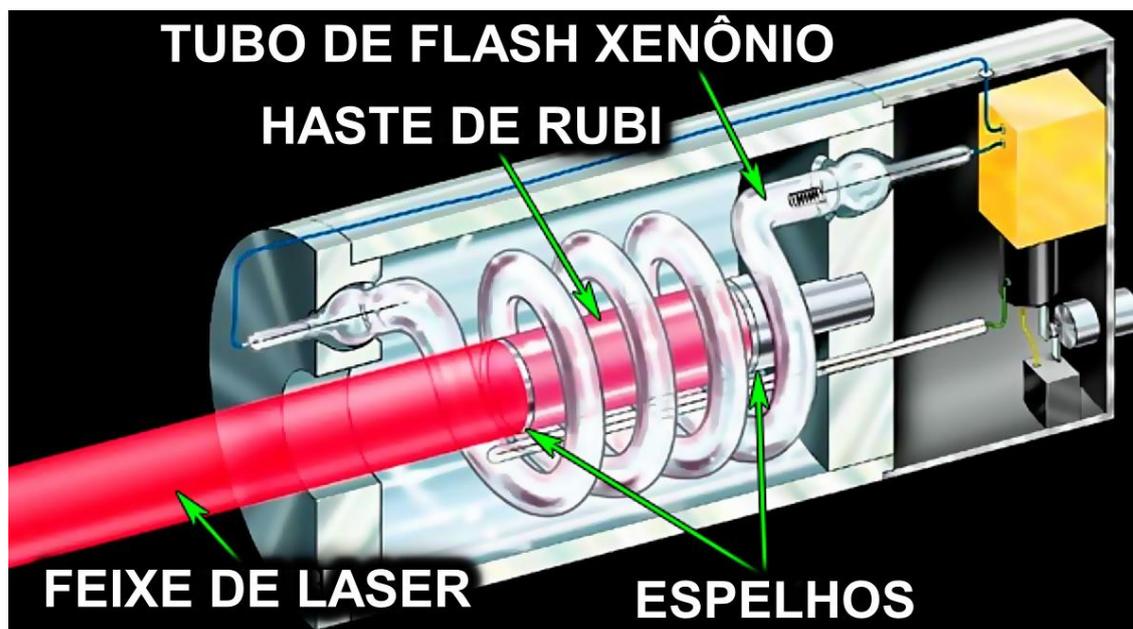
Na União Soviética à mesma época, 1958, Prokhorov publicou pela primeira vez a proposta do uso de um ressonador aberto. Sem conhecimento das publicações de Prokhorov e do trabalho ainda não publicado de Gould sobre o laser, nos laboratórios Bells, na costa oeste americana, Schawlow e Townes concordaram com um projeto de laser de ressonador aberto.

O pesquisador Gordon Gould publicou o termo LASER no artigo *The LASER, Light Amplification by Stimulated Emission of Radiation*, em uma conferência que aconteceu em 1958. O artigo abrangia possíveis aplicações para um laser – em espectrometria, interferometria, radar e fusão nuclear. Entrou com um pedido de patente em abril de 1959. O *US Patent Office* – Escritório de Patentes e Marcas dos Estados Unidos - negou seu pedido e concedeu uma patente ao Bell Labs, em 1960. Mesmo sem terem construído realmente o dispositivo, as ideias e artigos publicados provocou um processo de 28 anos. Gould ganhou sua primeira patente menor em 1977, mas não foi até 1987 que ele ganhou a primeira vitória significativa em um processo de patente, quando um juiz federal ordenou que o Escritório de Patentes e Marcas dos Estados Unidos emitisse patentes para Gould para bombeamento óptico e dispositivos a laser de descarga de gás (CARISTAN, *Laser Cutting Guide for Manufacturing*, 2004).

A publicação de artigos e o registro de patentes sem a finalização do dispositivo – visando certamente prestígio científico e exploração financeira da patente – gerou esta confusão para a questão de como atribuir crédito pela invenção do laser, ainda sem solução pelos historiadores (BLOEMBERGEN, 2001).

Este gradual desenvolvimento de tecnologias, feito por diversos cientistas, permitiu que todas as partes do futuro laser estivessem disponíveis (ou seja, o meio ativo, o bombeamento e o ressonador aberto). Coube, porém, a mais um personagem – o físico estadunidense Theodore Harold Maiman - reuni-las com uma técnica e apuro tal que permitisse a construção do aparelho que finalmente produziu a amplificação da radiação visível (Estados Unidos da América Patente Nº US3353115A, 1965). Em 16 de maio de 1960, nos laboratórios da Hughes Aircraft Co. em Malibu, no estado estadunidense da Califórnia, Theodore Harold Maiman gerou a primeira radiação laser óptica de todos os tempos. Ele disparou pulsos brilhantes de uma lâmpada de flash de fotógrafo para excitar átomos de cromo em um cristal de rubi sintético, um material que escolheu porque havia estudado cuidadosamente como ele absorvia e emitia luz e calculou que deveria funcionar como um laser (HECHT J. , *Laser*, 2020). O laser de Maiman, o primeiro funcional, produziu luz laser vermelha com comprimento de onda de 694 nanômetros. Uma lâmpada helicoidal (fonte de bombeamento) circundava um cristal de rubi sintético em forma de haste (meio ativo), e a cavidade óptica foi formada revestindo as extremidades achatadas da haste de rubi com um material altamente refletivo (cavidade aberta). Um feixe vermelho intenso foi observado emergindo da extremidade da haste quando a lâmpada foi disparada: obteve a radiação vermelha em um comprimento de onda de 694,3 nm em operação pulsada. O sistema recebeu o nome de LASER (MAIMAN, *Optical and microwave- optical experiments in ruby* , 1960) e (MAIMAN, *Stimulated optical radiation in ruby*, 1960). O dispositivo, no entanto, só era capaz de operação pulsada, devido ao seu esquema de projeto de bombeamento de três níveis.

Figura 20 – ESQUEMA DO LASER DE RUBY, DE THEODORE MAIMAN.



FONTE: Adaptado da Figura 2 de (OLSON, 2012, p. 28).

Desde então, muitos outros lasers com vários materiais ativos, diferentes sistemas de bombeamento e arranjos do ressonador Fabry–Pérot foram projetados, construídos, investigados e até introduzidos na prática.

Mais tarde naquele ano, o físico iraniano Ali Javan, juntamente com os estadunidenses William R. Bennett e Donald Herriott, construíram nos Laboratórios Bell o primeiro laser de gás, usando hélio e neônio, que era capaz de operação contínua no infravermelho. Foi o primeiro laser de operação contínua CW (Estados Unidos da América Patente Nº 3.149.290, 1960); mais tarde, em 1993, Javan recebeu o Prêmio Albert Einstein. Nos mesmos laboratórios, L.F. Johnson e K. Nassau demonstraram o primeiro laser de neodímio, que desde então se tornou um dos lasers mais confiáveis disponíveis.

O russo Nicolay G. Basov e o iraniano Ali Javan propuseram o conceito de diodo laser semiconductor. Em 1962, Robert N. Hall e colegas de trabalho no Centro de Pesquisa e Desenvolvimento da General Electric em Schenectady (cidade no estado de Nova Iorque, E.U.A.) fizeram o primeiro laser semiconductor (HECHT J. , Laser, 2020). Este pioneiro laser a diodo foi feito de fato de arseneto de gálio emitindo a 850 nm na faixa do infravermelho próximo do espectro. Mais tarde naquele ano, Nick Holonyak Jr. demonstrou o primeiro laser semiconductor com uma emissão visível vermelha, ao invés do infravermelho. Este primeiro laser semiconductor só poderia ser usado em operação de feixe pulsado e quando resfriado a temperaturas de nitrogênio líquido (77 K). Em 1970, Zhores Alferov, na então URSS, e Izo Hayashi e Morton Panish da Bell Telephone Laboratories também desenvolveram independentemente lasers de diodo de operação contínua em temperatura ambiente, usando a estrutura de heterojunção (ZLATANOV, 2016, p. 11).

Quadro 1 – MARCOS IMPORTANTES NO DESENVOLVIMENTO DE LASERS.

Ano	Autor	Tipo de Laser ou Princípio
1952	Albert Einstein	Princípio Maser
1954	Townes, Gordon, Zeiger	Maser
1958	Townes, Schawlow, Basov, Prokhorov	Princípio Laser
1960	Theodore Maiman	Laser de Rubi
1961	A. Javan, W. Bennett e D. Harriott	Laser de Hélio-Neônio
1961	L. F. Johnson e K. Nassau	Laser de Neodímio
1962	A. Javan e Nicolay G. Basov	Princípio Diodo Laser Semicondutor
1962	R. Hall	Laser de Semicondutores
1963	C. K. N. Patel	Laser de CO <sub>2</sub>
1964	W. Bridges	Laser de Íon de Argônio
1966	W. Silfvast, G. R. Fowles e B. D. Hopkins	Laser de Hélio-Cádmio
1966	P. P. Sorokin e J. R. Lankard	Laser de Corante Sintonizável
1975	J. J. Ewing e C. Brau	Laser de Excímero
1976	J. M. J. Modey e colaboradores	Laser de Elétron Livre
1979	Walling e colaboradores	Laser de Alexandrita
1985	D. Mathews e colaboradores	Laser de Raio-x

FONTE: Reproduzido e traduzido da publicação de patente internacional WO 2006059341 A1 "Laser electric power generator", por SOUNTHIRARAJAN, Shry K. (2006).

#### 4.4. CORTE A LASER

O primeiro experimento no processamento de materiais a laser foi conduzido em maio de 1967, quando o britânico Peter Houldcroft usou um gás auxiliar de oxigênio para cortar chapas de aço de 1 mm de espessura com um feixe de laser de CO<sub>2</sub> de fluxo lento de 300W focalizado (POWELL, et al., 2008). Este laser de 300W estava operacional no Reino Unido apenas dois anos depois de Patel ter demonstrado a ação de emissão laser da molécula de CO<sub>2</sub>. Esses primeiros experimentos marcam o início de processamento de materiais a laser como o conhecemos hoje, particularmente relevante pois o corte é a aplicação mais significativa do uso de lasers no processamento de materiais e na indústria (RIVEIRO A. , et al., 2019).

Peter Houldcroft era então vice-diretor científico do TWI (*The Welding Institute*, uma organização de pesquisa e tecnologia, com especialidade em soldagem localizada em Cambridge, na região leste do Reino Unido, a 80 km de Londres). Após uma visita à BMC (indústria de automóveis British Motor Company), foi informado que alguns testes preliminares de corte haviam sido realizados usando uma tocha de plasma e um robô de braço articulado, para a aplicação de recorte do painel da carroceria durante o desenvolvimento da ferramenta de prensa. O problema era que o sistema não era preciso o suficiente e produzia queima. Peter foi questionado se ele poderia pensar em qualquer outro processo de corte adequado (HILLTON, 2007). Ele percebeu que a combinação de um feixe de laser focalizado e um gás auxiliar de oxigênio tinha o potencial de melhorar a precisão e a velocidade oferecidas pelos processos de corte térmico. Em 1965, o TWI tomou conhecimento de que um laser de

gás CO<sub>2</sub> de 300W, desenvolvido para aplicações militares, estava operacional no Laboratório de Pesquisa Eletrônica de Serviços (SERL) em Harlow, não muito distante do TWI. Apesar do laser de CO<sub>2</sub> de 300W ter sido desenvolvido por motivações militares, potenciais aplicações industriais também estavam sendo consideradas (HILLTON, 2007). O laser da SERL consistia em 5 seções de descarga, com um comprimento total de 10m, do tipo de fluxo lento. Uma potência de saída máxima de 300 W a 100 Hz estava disponível.

Houldcroft projetou, no início de 1967, um 'bocal de corte a laser', algo fundamental no corte a laser meio século depois. O corte foi auxiliado por gás ativo oxigênio: uma câmara de pressão de oxigênio que forneceria o fluxo de gás auxiliar reativo coaxial na região do foco do feixe de laser, conforme Figura 21.

Figura 21 – O PRIMEIRO CORTE A LASER DE GÁS ASSISTIDO POR OXIGÊNIO EM MAIO DE 1967



FONTE: Adaptado da figura 2 de (HILLTON, 2007).

Os cortes foram feitos usando o oxigênio com gás auxiliar em aço para ferramentas de alto carbono e aço inoxidável de até 2,5 mm de espessura e velocidades de até 1 m / min. Para esses materiais, foi encontrada uma posição focal ideal na superfície da peça e um tamanho de ponto focado de 0,4 mm foi declarado (HILLTON, 2007). A largura do *kerf* era geralmente cerca de um terço maior do que o diâmetro do foco do feixe de laser. A Figura 21 mostra uma amostra sendo cortada. Arthur Sullivan, que trabalhou no Laboratório de Pesquisa Eletrônica de Serviços (SERL), operou o laser. A qualidade da borda deste corte pode ser vista na fotografia da Figura 23. Os resultados das primeiras experiências foram publicados no *British Welding Journal* em agosto de 1967 - 'Corte a laser a jato de gás' por A. B. J. Sullivan e P. T. Houldcroft (SULLIVAN & HOULDCROFT, 1967).

Figura 22 – ARRANJO EXPERIMENTAL USADO NOS PRIMEIROS EXPERIMENTOS DE CORTE.



FONTE: Adaptado da figura 3 de (HILLTON, 2007).

LEGENDA: Arranjo experimental usado nos primeiros experimentos de corte, mostrando a parada do feixe, espelho, lente, câmara de pressão, bico e amostra.

Figura 23 – A CHAPA UTILIZADA NO PIONEIRO CORTE A LASER DE HOULCROFT E SULLIVAN.



FONTE: Adaptado da figura 4 de (HILLTON, 2007).

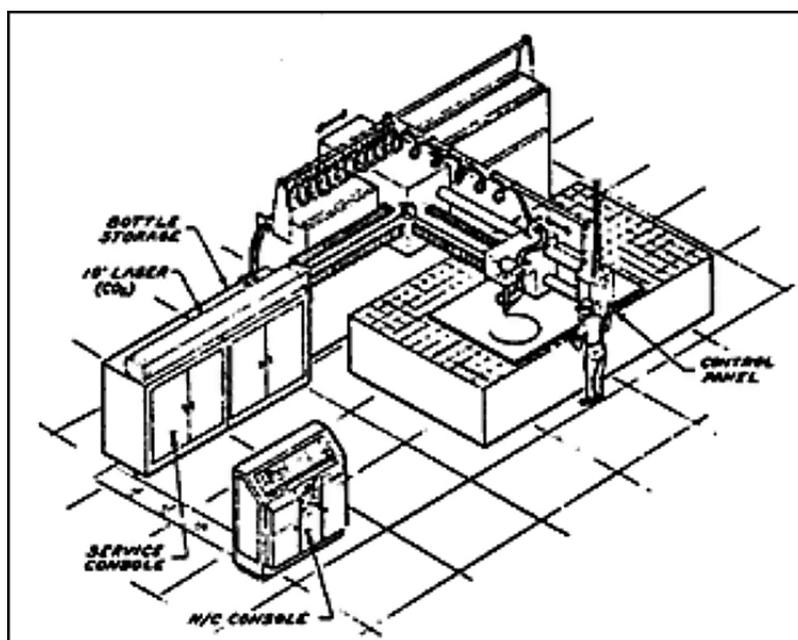
LEGENDA: Qualidade da aresta obtida em aço ferramenta de 1 mm de espessura na pioneira experiência de Houlcroft e Sullivan.

O artigo descreve observações feitas durante os primeiros experimentos. A largura do *kerf* - a abertura na chapa para penetração do corte - que era pequena (0,5 mm), foi vista como dependente do tamanho do ponto focalizado e não do tamanho do jato de gás; as bordas cortadas estavam livres de microfissuras e rasgos quentes; a distorção foi desprezível; o processo não induz forças mecânicas na peça cortada

(SULLIVAN & HOULDCROFT, 1967). Tais observações são ainda hoje reconhecidos como alguns dos principais benefícios do corte a laser. Pelo pioneirismo em “processos de corte empregando um laser”, Houlcroft obteve a patente no Reino Unido em 1969 e Estados Unidos da América no ano seguinte (Estados Unidos da América Patente Nº US3612814A, 1970).

Dois anos após a experiência pioneira, num artigo publicado em agosto de 1969, três funcionários da Boeing Company relataram o uso do corte a laser de CO<sub>2</sub> de materiais 'duros', como titânio, Hastelloy e cerâmica, usando a técnica de gás auxiliar (BROD, BRASIER, & PARKS, 1969). Mais interessante ainda, os autores apresentam uma 'concepção artística' de como uma ferramenta de corte a laser pode ser, bastante semelhante a uma mesa de corte de dois eixos atual, conforme pode ser visto na Figura 24, que foi digitalizado do papel original.

Figura 24 – CONCEITO DE 1969 PARA UMA MÁQUINA-FERRAMENTA DE CORTE A LASER.



FONTE: Adaptado de (BROD, BRASIER, & PARKS, 1969) apud figura 6 de (HILLTON, 2007).

O primeiro sistema de corte a laser de CO<sub>2</sub> ótica móvel disponível comercialmente, com uma configuração comparável a uma ampla gama de equipamentos disponíveis hoje, foi fornecido pela Laser Work AG da Suíça em 1975, vista na Figura 25.

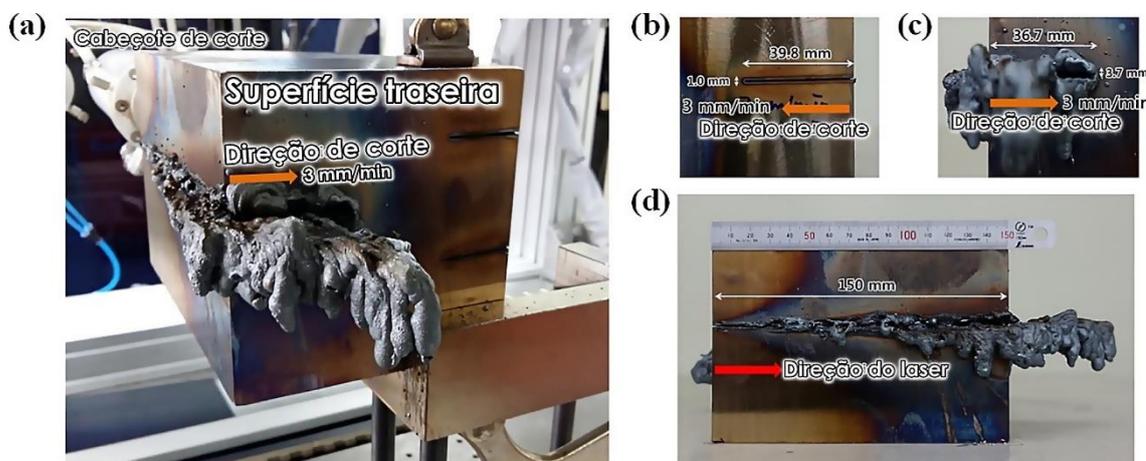
Figura 25 – PRIMEIRA MÁQUINA DE CORTE A LASER CO<sub>2</sub> COM ÓTIMCA MÓVEL DE 2 EIXOS (1975)



FONTE: Foto de Laser – Work AG, apud (HILLTON, 2007).

Hoje, mais de 50 anos desde a pioneira experiência, uma gama ampla de materiais pode ser cortada usando lasers para uso comercial. As máquinas de corte a laser atuais oferecem alta qualidade de feixe e altas potências (até e acima de 12 kW), estendendo a faixa de espessura para cortes em aço inoxidável de até 150 mm de espessura, condição especial de corte testada para descomissionamento de usinas nucleares, e o trabalho continua para estender essa faixa ainda mais (SHIN, et al., Cutting performance of thick steel plates up to 150 mm in thickness and large size pipes with a 10-kW fiber laser for dismantling of nuclear facilities, 2018).

Figura 26 – CORTE A LASER DE AÇO INOXIDÁVEL COM 150MM DE PROFUNDIDADE. VISTAS DA PLACA.



FONTE: (SHIN, et al., High-speed fiber laser cutting of thick stainless steel for dismantling tasks, 2017) e (SHIN, et al., Cutting performance of thick steel plates up to 150 mm in thickness and large size pipes with a 10-kW fiber laser for dismantling of nuclear facilities, 2018).

LEGENDA: Vistas da placa de aço inoxidável com 150 mm de espessura após o corte a uma velocidade de 3 mm / min: (a) vista da amostra de corte imediatamente após o corte e (b) vista frontal, (c) traseira e (d) vistas laterais.

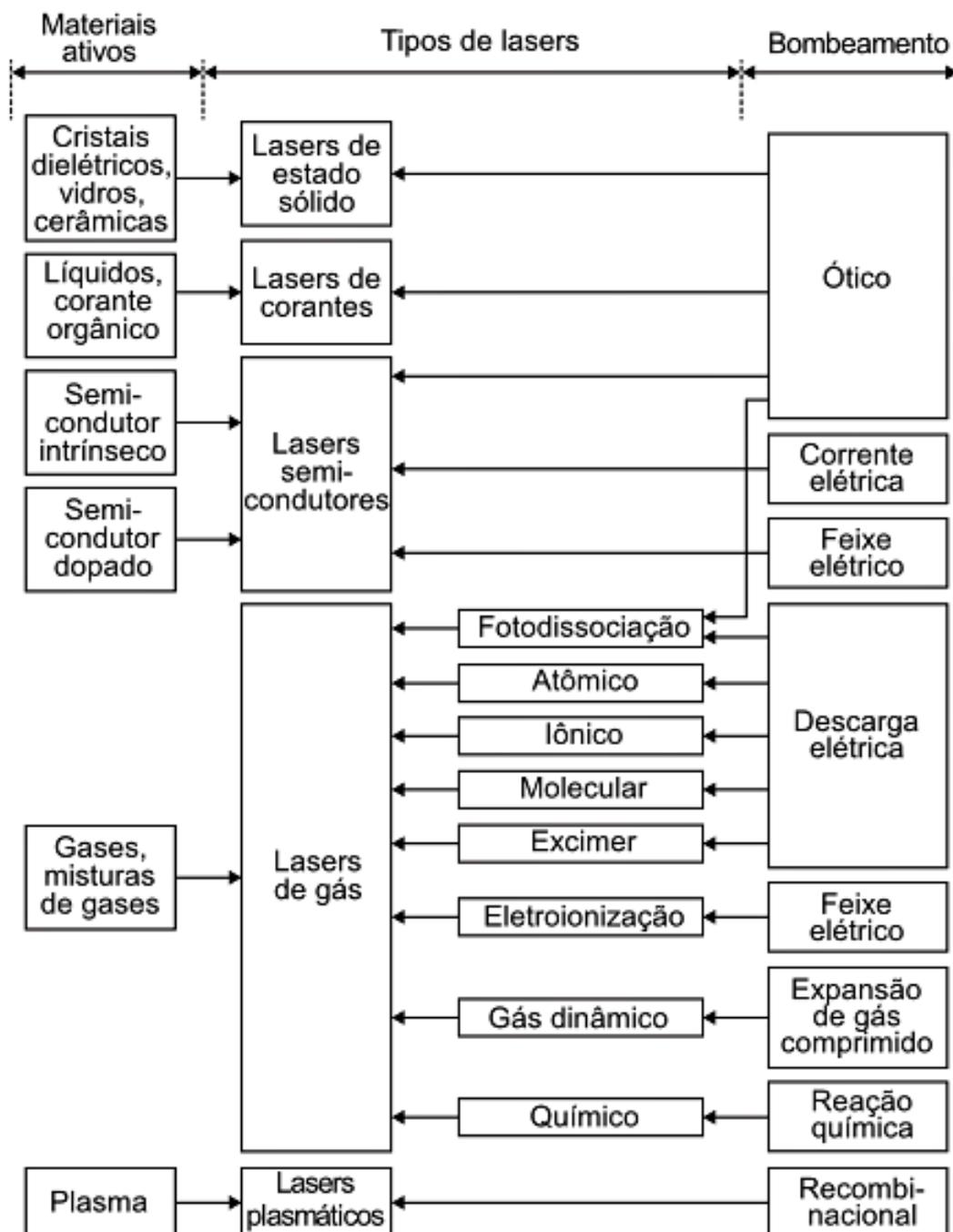
## 5 CLASSIFICAÇÃO E MODOS DE OPERAÇÃO

Diversos critérios podem ser empregados para categorizar os sistemas a laser: conforme o material (meio) ativo, mecanismo de bombeamento, comprimento de onda gerado, regime de operação, operação temporal, tipo de transições quânticas etc.

- os *meios ativos* do laser podem ser classificados em cinco grandes grupos: lasers de estado sólido, semicondutor, gás, líquido e plasma. Além destes principais materiais, há ainda possibilidade de emissão laser de mídias exóticas, elétrons livres e reações químicas, segundo item 5.1;
- os *níveis de energia* envolvidos nos lasers de emissão estimulados são distinguidos como: bandas de elétrons, de íons e moleculares em lasers semicondutores;
- *métodos de bombeamento*: os sistemas são divididos em lasers bombeados opticamente, por feixe de elétrons, por expansão de gás comprimido, descarga elétrica, reação química, por recombinação etc.;
- os *comprimentos de onda* gerados pelos lasers podem ser divididos em: laser infravermelho, visível, ultravioleta e de raios-X;
- *desenvolvimento temporal* da radiação: os lasers podem ser divididos em contínuos (CW), pulsados e quase contínuos (subitem 5.2);
- *regime de operação*: os lasers podem ser de execução livre, Q-switch ou de modo bloqueado (subitem 5.2).

A classificação dos lasers de acordo com os materiais ativos e o tipo de bombeamento é apresentada na Figura 27.

Figura 27 – CLASSIFICAÇÃO DO LASER DE ACORDO COM O MATERIAL (MEIO) ATIVO E BOMBAMENTO.



FONTE: Adaptado da figura 2.13 de (JELÍNKOVÁ & ŠULC, 2013).

## 5.1. TIPOS E PRINCÍPIOS DE OPERAÇÃO

### 5.1.1. A gás

Seguindo a invenção do laser de gás He-Ne por Javan et al. (operando em  $\lambda_3=1,15 \mu\text{m}$ ) (JAVAN, BENNET Jr., & HERRIOTT, 1961), lasers de gás usando muitos gases diferentes foram construídos para amplificar a luz de forma coerente e usados para muitos propósitos. O laser de hélio-neônio (He-Ne) é capaz de operar em vários comprimentos de onda diferentes, podendo oscilar principalmente em um dos três comprimentos de onda:  $\lambda_1 = 3,39 \mu\text{m}$  (infravermelho),  $\lambda_2 = 0,6328 \mu\text{m}$  (vermelho),  $\lambda_3 = 1,15 \mu\text{m}$  (infravermelho).

Os lasers comerciais de dióxido de carbono ( $\text{CO}_2$ ) podem emitir muitas centenas de watts em um único modo espacial que pode ser concentrado em um pequeno ponto. Essa emissão está no infravermelho térmico a  $10,6 \mu\text{m}$ ; esses lasers são regularmente usados na indústria para corte e soldagem. A eficiência de um laser de  $\text{CO}_2$  é superior a 30% (STEEN, Capítulo 1 - Background and General Applications, 2003).

Os lasers de íon de argônio ( $\text{Ar}^+$ ) podem operar em várias transições de laser entre 351 e 528,7 nm. Dependendo do projeto óptico, uma ou mais dessas transições podem estar ocorrendo simultaneamente; as linhas mais comumente usadas são 458 nm, 488 nm e 514,5 nm (KANNATEY-ASIBU JR., Capítulo 8 - Types of Lasers, 2009).

Lasers de íons metálicos são lasers de gás que geram comprimentos de onda ultravioleta profundos. Hélio-prata (He-Ag) 224 nm e neônio-cobre (Ne-Cu) 248 nm são dois exemplos. Como todos os lasers de gás de baixa pressão, a mídia de ganho desses lasers tem larguras de linha de oscilação bastante estreitas, menos de 3 GHz (0,5 picômetros), tornando-os candidatos para uso em espectroscopia Raman com supressão de fluorescência (SVELTO, Capítulo 6 - Types of Lasers, 1970).

### 5.1.2. De estado sólido

Figura 28 - UM FASOR 50 W, BASEADO EM LASER Nd:YAG, USADO NO STARFIRE OPTICAL RANGE.



FONTE: Força Aérea dos E. U. A., em domínio público.

Os lasers de estado sólido usam um bastão cristalino ou de vidro que é "dopado" com íons que fornecem os estados de energia necessários. Por exemplo, o primeiro laser colocado em funcionamento por Theodore H. Maiman foi um laser de rubi sintético (MAIMAN FOUNDATION, 2020). Rubi é um cristal de  $\text{Al}_2\text{O}_3$  (corindo) no qual o íon  $\text{Cr}^{3+}$  substitui o íon  $\text{Al}^{3+}$  em alguns pontos da rede. Como material laser, é obtido a partir da fusão de um pó formado pela mistura de  $\text{Cr}_2\text{O}_3$  (~ 0,05% em peso) e  $\text{Al}_2\text{O}_3$ . A inversão da população é mantida no dopante. Esses materiais são bombeados opticamente usando um comprimento de onda menor do que o comprimento de onda do laser, geralmente a partir de um tubo flash ou de outro laser de menor potência. Para lasers de rubi *contínuos*, foram usados sistemas de bombeamento óptico que normalmente tinham uma lâmpada de vapor de mercúrio de alta pressão como fonte de luz. O diâmetro típico da barra de rubi era tipicamente de 2 mm e o comprimento de alguns centímetros. Para lasers de *operação pulsada*, como no dispositivo pioneiro de Maiman, lâmpadas de flash de xenônio de baixa pressão foram usadas como fontes de luz; o diâmetro da haste variou de 5 a 10 mm e o comprimento de 5 a 20 cm (MAIMAN, Optical and microwave- optical experiments in ruby , 1960).

O uso do termo "estado sólido" na física do laser é mais restrito do que no uso típico. Lasers semicondutores (diodos de laser) são considerados em uma seção separada e normalmente não são chamados de lasers de estado sólido, pois os mecanismos de bombeamento e de ação do laser são bastante diferentes (ZLATANOV, 2016).

Os lasers de neodímio são o tipo mais popular de laser de estado sólido. O meio de laser é geralmente um cristal de  $\text{Y}_3\text{Al}_5\text{O}_{12}$  (comumente chamado de Y AG,

um acrônimo para a sigla em idioma inglês para “granada de ítrio e alumínio”) em que alguns dos íons  $Y^{3+}$  são substituídos por íons  $Nd^{3+}$ , ou simplesmente um vidro que foi dopado por íons  $Nd^{3+}$ . O neodímio é um dopante comum em vários cristais de laser de estado sólido, incluindo neodímio dopado em ortovanadato de ítrio (Nd: YVO<sub>4</sub>), fluoreto de ítrio-lítio (Nd: YLF) e neodímio dopado em granada de ítrio-alumínio (Nd:YAG). Todos esses lasers podem produzir altas potências no espectro infravermelho em 1064 nm. Eles são usados para corte, soldagem e marcação de metais e outros materiais e, também, em espectroscopia e para bombeamento de lasers de corante. Esses lasers também são comumente duplicados, triplicados ou quadruplicados para produzir feixes de 532 nm (verde, visível), 355 nm e 266 nm (UV), respectivamente (KANNATEY-ASIBU JR., Capítulo 8 - Types of Lasers, 2009).

Itérbio, hólmio, túlio e érbio são outros "dopantes" comuns em lasers de estado sólido. O itérbio é usado em cristais como Yb: YAG, Yb: KGW, Yb: KYW, Yb: SYS, Yb: BOYS, Yb: CaF<sub>2</sub>, operando normalmente em torno de 1020–1050 nm. Eles são potencialmente muito eficientes e de alta potência devido a um pequeno defeito quântico. Potências extremamente altas em pulsos ultracurtos podem ser obtidas com Yb: YAG. YAG dopado com cristais de hólmio emitem em 2097 nm e formam um laser eficiente operando em comprimentos de onda infravermelhos fortemente absorvidos por tecidos que contém água. O Ho-YAG é normalmente operado em modo pulsado e passado através de dispositivos cirúrgicos de fibra óptica para ressurgir juntas, remover podridão de dentes, vaporizar cânceres e pulverizar cálculos renais e biliares (STEEN, Capítulo 1 - Background and General Applications, 2003).

A safira dopada com titânio (Ti: safira) produz um laser infravermelho altamente ajustável, comumente usada para espectroscopia. Também é notável para uso como um laser de modo bloqueado, produzindo pulsos ultracurtos de potência de pico extremamente alta (ZLATANOV, 2016, p. 14).

As limitações térmicas em lasers de estado sólido surgem da potência da bomba não convertida que aquece o meio. Este calor, quando acoplado a um alto coeficiente termo-óptico  $\frac{dn}{dT}$ , pode causar lente térmica e reduzir a eficiência quântica (ZENTENO, 1993). Os lasers de disco fino com bombeamento de diodo superam esses problemas por ter um meio de ganho que é muito mais fino do que o diâmetro do feixe da bomba. Isso permite uma temperatura mais uniforme no material. Foi demonstrado que os lasers de disco fino produzem feixes de até um quilowatt (WANDERA, SALMINEN, OLSEN, & KUJANPÄÄ, 2006).

### 5.1.3. De fibra

São chamados de lasers de fibra amplificadores de laser em que a luz é guiada pela reflexão interna total em uma fibra óptica com um núcleo dopado com um elemento de terra rara, que é o meio ativo deste laser. Os elementos comuns usados para dopagem incluem érbio (Er), neodímio (Nd) e itérbio (Yb) (KANNATEY-ASIBU JR., Capítulo 8 - Types of Lasers, 2009, p. 180). O bombeamento normalmente é feito usando bancos de diodos. A luz é canalizada e amplificada por meio de um cabo de

fibra ótica semelhante ao usado para transferência de dados. A luz amplificada, ao sair do cabo de fibra, é colimada e então focada por uma lente no material a ser cortado. A criação da luz é 200% mais eficiente do que por meio de um laser CO<sub>2</sub> tradicional (KELLENS, RODRIGUES, DEWULF, & DUFLOU, 2014, p. 856) e o fornecimento é muito mais simples, sem espelhos óticos caros (LARCOMBE, 2013). A lente de foco, ao contrário de uma máquina de laser CO<sub>2</sub> convencional, é selada na cabeça de corte e, portanto, não é um item consumível.

Como o direcionamento dentro das fibras óticas permite que as regiões de ganho sejam longas (até mesmo quilômetros) e as fibras têm excelente relação volume / área de superfície, há condição de resfriamento muito eficiente que torna possível suportar quilowatts de potência de saída contínua. Isto é uma grande vantagem em relação aos lasers de estado sólido, que tendem a aquecer, conforme subitem 5.1.2. Além disso, as propriedades de guia de onda da fibra tendem a reduzir a distorção térmica do feixe (ZLATANOV, 2016).

Frequentemente, o laser de fibra é projetado como uma fibra de revestimento duplo: um núcleo de fibra, um revestimento interno e um revestimento externo. O índice das três camadas concêntricas é escolhido de forma que o núcleo da fibra atue como uma fibra monomodo para a emissão do laser, enquanto o revestimento externo atua como um núcleo altamente multimodo para a bomba de laser. Isso permite que a bomba propague uma grande quantidade de energia para dentro e através da região do núcleo interno ativo, vide Figura 94.

Com comprimento de onda de 1064 nm, os lasers de fibra produzem um diâmetro focal particularmente pequeno, o que significa que sua intensidade é até 100 vezes maior do que a dos lasers de CO<sub>2</sub> com a mesma potência média emitida (MELO, SOUSA, BERENDT, HENDOW, & SALCEDO, 2011).

Lasers de fibra são apresentados de maneira dedicada no capítulo 8.

#### 5.1.4. De cristal fotônico

As melhorias no confinamento da energia de excitação e da luz emitida têm desempenhado um papel fundamental na evolução dos lasers semicondutores. Os cristais fotônicos levam o confinamento a um novo nível, criando nanocavidades que ocupam um volume menor do que um comprimento de onda cúbico. A nanocavidade em um laser de cristal fotônico é uma região de “defeito” em uma região microestruturada de um semicondutor (PHIPPS, 2011). A gravação de uma matriz de orifícios no semicondutor cria uma zona microestruturada com contraste de alto índice de refração entre os dois materiais - ar e o semicondutor de alto índice. Isso cria um *gap* fotônico, que bloqueia a transmissão de luz em uma faixa de comprimento de onda de algumas centenas de nanômetros. Eles têm o tamanho típico de 10<sup>-7</sup> a 10<sup>-6</sup> metro e podem ser ajustados nas bandas dos cristais fotônicos (JARMAN, 1996).

O objetivo da miniaturização ao nível da nanotecnologia é que as cavidades de cristal fotônico controlam a emissão espontânea, aumentando a energia acoplada

ao modo laser e reduzindo o limiar do laser (HECHT J. , 2007). Como a cavidade é tão pequena - cerca de um comprimento de onda quadrado no plano do dispositivo - a modulação direta pode ser extremamente rápida. Um grupo da *Stanford University*, na Califórnia, EUA, gerou pulsos de 3 picossegundos ( $3 \times 10^{-12}$  s.) por bombeamento óptico de cavidades de cristal fotônico único em temperatura ambiente, trazendo a velocidade de modulação do laser para o limite de terahertz, um grande atrativo para conexões ópticas de alta velocidade (TÜNNERMANN, et al., 2005).

O controle da emissão espontânea habilitado por cristais fotônicos 2-D é um passo importante na evolução dos dispositivos fotônicos. Em particular, pode levar ao aumento drástico da eficiência quântica externa dos LEDs, o que é muito importante para sistemas de iluminação de estado sólido de próxima geração (NODA, YOKOYAMA, IMADA, CHUTINAN, & MOCHIZUKI, 2001).

#### 5.1.5. Excímero

Os lasers de excímero são um tipo especial de laser de gás alimentado por uma descarga elétrica em que o meio de laser é um excímero ou, mais precisamente, um exciplex (complexo de moléculas excitadas). Um excímero (originalmente abreviação de dímero excitado) é uma molécula dimérica ou heterodimérica de vida curta formada a partir de duas espécies, pelo menos uma das quais preencheu completamente a camada de valência por elétrons (por exemplo, gases nobres) (KANNATEY-ASIBU JR., Capítulo 8 - Types of Lasers, 2009). Nesse caso, a formação de moléculas só é possível se esse átomo estiver em um estado de excitação eletrônica. Assim, os átomos componentes estão ligados no estado excitado, mas não no estado fundamental (CHEN, YAMASHITA, HAMASAKI, MANAKA, & OBARA, 2014). Uma vez que a molécula transfere sua energia de excitação para um fóton, portanto, seus átomos não estão mais ligados uns aos outros e a molécula se desintegra. Isso reduz drasticamente a população do estado de baixa energia, facilitando muito a inversão da população.

Laser excímero é um termo usado hoje para descrever uma família de lasers com características de saída semelhantes, em que todos eles emitem pulsos poderosos com duração de nanossegundos ou dezenas de nanossegundos, em comprimentos de onda no ultravioleta ou próximo a ele. As moléculas de excímero mais importantes são os haletos de gás raros, como ArF, KrF, XeF e XeCl, que não existem na natureza, mas podem ser produzidos passando uma descarga elétrica por uma mistura de gás adequada (SVELTO, Capítulo 6 - Types of Lasers, 1970, p. 237). Excímeros são todos compostos por estes gases nobres (ou raros), descritos assim pois são quimicamente inertes e só podem formar compostos quando em estado de excitação. Em lasers de excímero, o gás raro corresponde a cerca de 1-9% da mistura, com uma concentração de doador de halogênio de cerca de 0,1 a 0,2%. O resto do gás é geralmente hélio ou neônio e é usado para promover a transferência de energia (WEBER M. J., 1999). Lasers excímero normalmente operam em comprimentos de onda ultravioleta com aplicações principais, incluindo fotolitografia semicondutora e cirurgia ocular LASIK. Moléculas de excímero comumente usadas incluem ArF

(emissão a 193 nm), KrCl (222 nm), KrF (248 nm), XeCl (308 nm) e XeF (351 nm). O laser molecular de flúor, que emite a 157 nm no ultravioleta de vácuo, às vezes é referido como um laser excímero; no entanto, este parece ser um nome incorreto, visto que  $F_2$  é um composto estável (ZLATANOV, 2016).

#### 5.1.6. De semicondutores (diodos emissores de luz)

Figura 29 – MATRIZ DE PEQUENOS LASERS SEMICONDUCTORES VERMELHOS.



FONTE: Crédito Volker Sorger/GWU

São os lasers de maior contato cotidiano: impressoras a laser, mouses a laser, ponteiros laser de luz visível, leitores de CD ou DVD, Blu-ray, leitores de códigos de barra, dentre outros usos. Mas também tem extensa aplicação na área médica, comunicação em fibra ótica, sensoriamento de gases e até usos industriais, onde podem atingir até 10 kW (ZLATANOV, 2016, p. 15). Os lasers semicondutores são diodos bombeados eletricamente. Os lasers de diodo são, atualmente, dispositivos eficientes para converter energia elétrica em óptica, com eficiência *Wall-Plug Efficiency* (“eficiência na tomada”, em tradução livre) podendo alcançar até 50%, conforme (STEEN, Capítulo 1 - Background and General Applications, 2003, p. 17).

Os diodos emissores de luz (LEDs) funcionam graças à emissão de luz pela recombinação de elétrons e lacunas numa junção “p-n”, sendo o material “tipo-n” aquele com excesso de elétrons e o material “tipo-p” com excesso de lacunas (WEBER M. J., 1999, p. 23). Se os semicondutores (tipo p e n) são satisfatoriamente dopados e expostos a altas correntes, pode ocorrer uma inversão populacional de elétrons e lacunas na região de junção. A recombinação de elétrons e buracos criados pela corrente aplicada introduz ganho óptico. Dispondo a junção na cavidade óptica desta forma, um laser pode ser obtido. A reflexividade das extremidades do cristal na interface semicondutor / ar ( $R \sim 0,30$ ) e a refração suficientemente alta ( $n \sim 3,5$ ) para sustentar a emissão laser um ressonador óptico, embora o ressonador possa ser externo ao semicondutor em alguns projetos (ITAYA, SUGAWARA, & HATAKOSHI, 1994).

Ao invés de meios ativos sólidos ou gasosos, o laser diodo (ou semicondutor) utiliza uma junção “p-n” para este efeito. As junções “p-n” podem ser por sua vez junções do tipo “p-p-n”, chamadas de heterojunções, de maior eficiência. Outra diferença entre o laser diodo e os lasers do estado sólido e gasosos reside na fonte de bombeamento. Os lasers do estado sólido e gasosos utilizam luz como fonte de energia (lâmpadas com espectro de emissão largo), enquanto o laser de semicondutor utiliza corrente elétrica através de junções “p-n” para injetar elétrons na zona de condução e lacunas na zona de valência (CASEY & PANISH, 1994) (YARIV, 1989). Os lasers semicondutores de cavidade externa possuem um meio ativo semicondutor em uma cavidade maior. Esses dispositivos podem gerar saídas de alta potência com boa qualidade de feixe, radiação de largura de linha estreita ajustável no comprimento de onda ou pulsos de laser ultracurtos (STEEN, Capítulo 1 - Background and General Applications, 2003).

Os lasers de diodo de uso comercial emitem em comprimentos de onda de 375 nm a 3500 nm. Estes lasers também são frequentemente usados para bombear opticamente outros lasers mais potentes com alta eficiência. Os lasers de diodo industriais de maior potência, com potência de até 10 kW, são usados na indústria para corte e soldagem (ZLATANOV, 2016).

#### 5.1.7. Químicos

Proposto pela primeira vez por John Charles Polanyi em 1960, os lasers químicos são alimentados por uma reação química que permite que uma grande quantidade de energia seja liberada rapidamente, ao mesmo tempo depositando energia em excesso nas vibrações de alongamento da ligação recém-formada. Se a reação química favorece a produção de estados com maior energia interna sobre estados com menos energia interna, então uma inversão populacional pode ser alcançada. Um exemplo importante é a reação do flúor atômico com o hidrogênio molecular para produzir fluoreto de hidrogênio (HF) excitado vibracionalmente (POLANYI, 1961) apud (WEBER M. J., 1999, p. 29).

O primeiro laser químico foi demonstrado em 1965 por Kasper e Pimentel, iniciando uma explosão de hidrogênio-cloro com uma lanterna (STEEN, Capítulo 1 - Background and General Applications, 2003, p. 4). Em 1967, os lasers baseados na reação do flúor atômico com o hidrogênio molecular e outras moléculas foram desenvolvidos. Vários experimentos importantes foram realizados em 1969, e a emissão foi realizada em uma chama de difusão supersônica de HF por Spencer e colegas de trabalho. O desenvolvimento subsequente do laser químico de HF foi rápido e, em 1984, os lasers de HF com potências superiores a 1 MW foram desenvolvidos (SVELTO, Capítulo 6 - Types of Lasers, 1970).

Esses lasers de altíssima potência são de interesse especial para os militares, no entanto, lasers químicos de onda contínua em níveis de potência muito altos, alimentados por fluxos de gases, foram desenvolvidos e têm algumas aplicações industriais. Como exemplos, no laser de fluoreto de hidrogênio (2700–2900 nm) e no

laser de fluoreto de deutério (3800 nm), a reação é a combinação de hidrogênio ou gás deutério com produtos de combustão de etileno em trifluoreto de nitrogênio (ZLATANOV, 2016).

#### 5.1.8. De elétrons livres

Figura 30 - O LASER DE ELÉTRONS LIVRES FELIX, NOS PAÍSES BAIXOS.



FONTE: Site da Universidade Radboud - ru.nl

LEGENDA: O laser de elétrons livres FELIX no FOM Institute for Plasma Physics Rijnhuizen, Nieuwegein, nos Países Baixos.

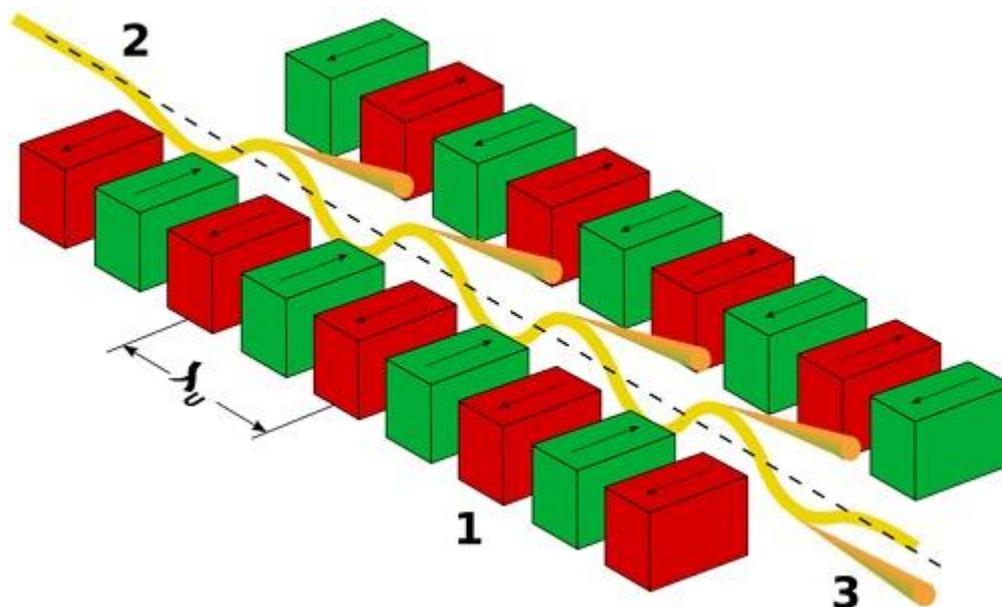
Lasers de elétrons livres - ou FELs de sua sigla no idioma inglês - geram radiação coerente de alta potência que é amplamente sintonizável, atualmente variando em comprimento de onda de micro-ondas por radiação terahertz e infravermelho para o espectro visível e raios-X suaves. Eles têm a faixa de frequência mais ampla de qualquer tipo de laser (MASSIMO & MAJED, 2007).

Embora os feixes de FEL compartilhem as mesmas características ópticas de outros lasers, como radiação coerente, a operação do FEL é bastante diferente. Ao contrário dos lasers gasosos, líquidos ou de estado sólido, que dependem de estados atômicos ou moleculares ligados, os FELs usam um feixe de elétrons relativístico como meio de emissão, daí o termo elétron livre.

Quando elétrons rápidos, quase à velocidade da luz, cruzam um campo magnético em seu caminho, eles são desviados e geram luz brilhante e bem colimada tangencialmente ao seu caminho curvo, como observado pela primeira vez em um acelerador sincrotron General Electric em 1947 (DEACON, et al., 1977). Tal luz foi chamada de radiação sincrotron. As fontes de radiação sincrotron modernas não usam ímãs únicos para gerar a luz, mas uma série de dezenas (ou mesmo centenas) de ímãs com campo alternado, chamados onduladores, nos quais o feixe de elétrons

balança ("ondula") apenas ligeiramente em torno de uma linha reta. Em cada curva, os elétrons geram luz que se sobrepõe e interfere construtivamente para certos comprimentos de onda, levando a uma luz quase monocromática emitida em um cone estreito. Isso é ilustrado esquematicamente na figura abaixo (PHIPPS, 2011, pp. 535-540).

Figura 31 – REPRESENTAÇÃO ESQUEMÁTICA DE UM ONDULADOR.



FONTE: Creative Commons, Bastian Holst (2005)

LEGENDA: Representação esquemática de um ondulador. 1: ímãs, 2: feixe de elétrons entrando pela parte superior esquerda, 3: luz laser saindo pela parte inferior direita.

### 5.1.9. De corantes

Figura 32- ESQUEMA DE UM LASER DE CORANTE.

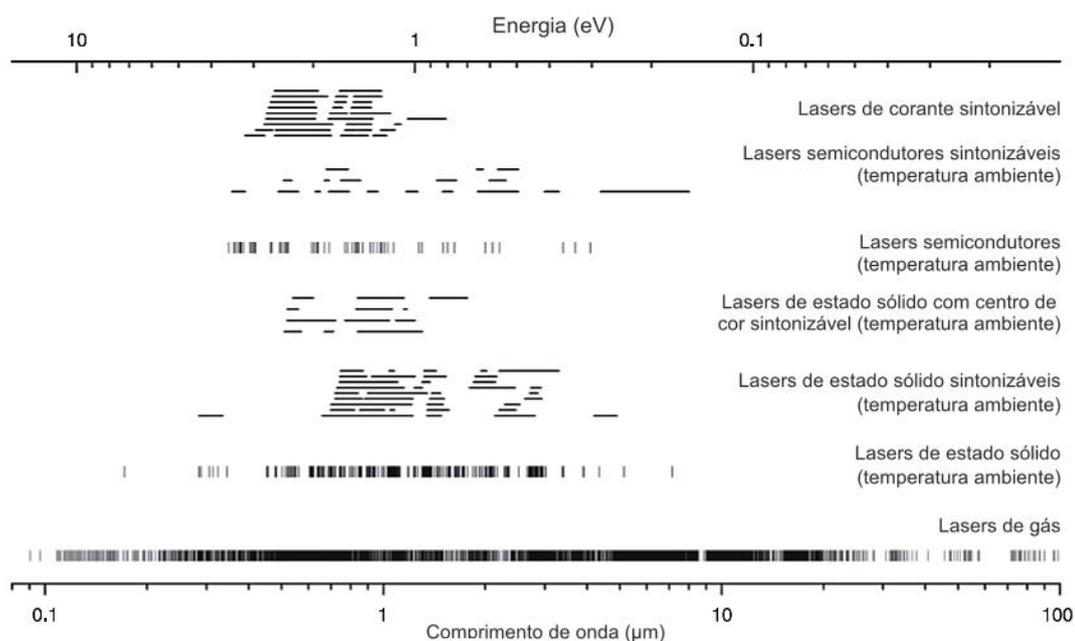


FONTE: Adaptado da Universidade de Niágara, Disponível em: < <http://technology.niagarac.on.ca/sop/SOP-DyeLaser.html> >. Acesso em: 11 de janeiro de 2021.

LEGENDA: Esquema de um laser de corante construído no laboratório do Niagara College em Welland, Ontário, Canadá.

Os lasers de corante usam como meio de ganho um corante orgânico em líquidos, como álcool etílico, álcool metílico ou água. Há um amplo espectro de ganho de corantes disponíveis – e suas misturas – assim tais lasers são altamente sintonizáveis e podem produzir pulsos de duração muito curta (na ordem de alguns femtossegundos). Os corantes geralmente pertencem a uma das seguintes classes: corantes polimetina (0,7-1  $\mu\text{m}$ ); corantes xantenos (0,5-0,7  $\mu\text{m}$ ); corantes cumarina (0,4-0,5  $\mu\text{m}$ ) e corantes cintiladores ( $\lambda < 0,4 \mu\text{m}$ ) (KANNATEY-ASIBU JR., Capítulo 8 - Types of Lasers, 2009, p. 158). Em virtude de sua sintonia de comprimento de onda, ampla cobertura espectral e simplicidade, os lasers de corante orgânico estão desempenhando um papel cada vez mais importante em vários campos de aplicação (da espectroscopia à fotoquímica) (SVELTO, Capítulo 6 - Types of Lasers, 1970). Pesquisadores também demonstraram emissão sintonizável de largura de linha estreita em configurações de oscilador dispersivo que incorporam meio de ganho de corante de estado sólido, que usam sobretudo polímeros dopados com corante como meio de ganho laser (ZLATANOV, 2016).

Figura 33 – ILUSTRAÇÃO DOS COMPRIMENTOS DE ONDA DE RADIAÇÃO E ENERGIA DE FÓTON EM TIPOS PARTICULARES DE LASER.



FONTE: Adaptado de (WEBER M. J., 1999).

## 5.2. MODOS DE OPERAÇÃO

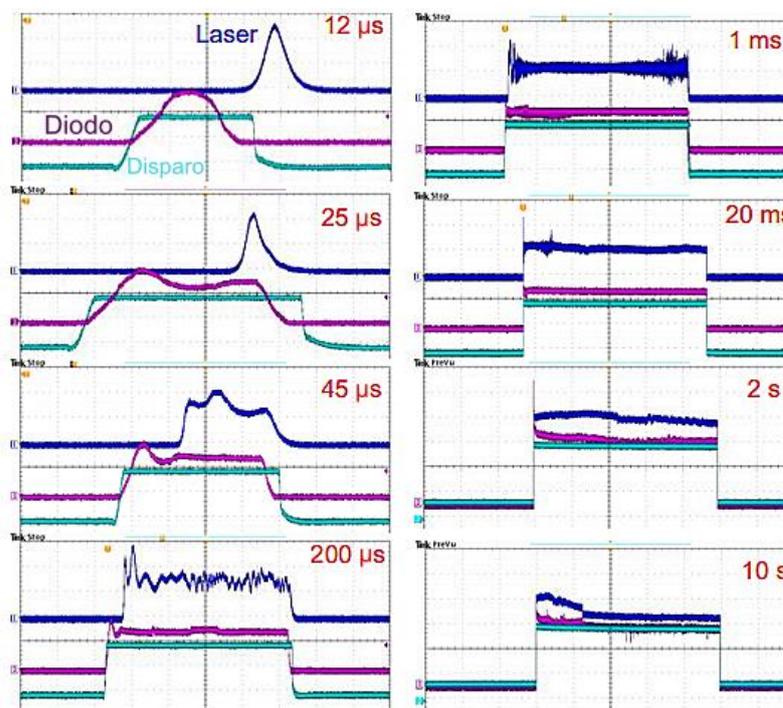
No domínio do tempo, conforme o procedimento de bombeamento, os lasers podem ser divididos em emissão contínua (CW, sigla do termo inglês *continuous wave*) ou emissão pulsada. Além desses dois regimes básicos, os lasers podem funcionar em um modo de *execução livre*, *bombeamento pulsado*, *Q-comutado* ou, ainda, *modo bloqueado* (que também pode ser contínuo ou pulsado) (KANNATEY-ASIBU JR., Capítulo 6 - Beam Modification, 2009) (JELÍNKOVÁ & ŠULC, 2013).

### 5.2.1. Onda contínua (CW)

Algumas aplicações de lasers dependem de um feixe cuja potência de saída é constante ao longo do tempo. Um laser de *onda contínua* (CW, sigla da língua inglesa para *continuous wave*) emite um feixe constante ao longo do tempo, o bombeamento garante que o meio ativo do laser esteja continuamente excitado (JELÍNKOVÁ & ŠULC, 2013). Muitos tipos de lasers podem ser feitos para operar em modo de onda contínua para satisfazer tal aplicação. Para operação de onda contínua, é necessário que a inversão da população do meio de ganho seja continuamente reabastecida por uma fonte de bomba constante. Em alguns meios laser, isso é impossível. Em alguns outros lasers, seria necessário bombear o laser em um nível de potência contínuo muito alto, o que seria impraticável ou destruiria o laser pela produção de calor excessivo. Esses lasers não podem ser executados no modo CW (ASHOORI, SHAYGANMANESH, & RADMARD, 2012).

Além disso, mesmo com bombeamento contínuo, é possível obter pulsos na saída do laser, mas isso requer um regime especial de trabalho a laser, caso no qual o laser está trabalhando no *regime quase-contínuo* (*quasi-CW*). Um caso especial desse regime é o *modo burst*, no qual são geradas algumas unidades ou dezenas de pulsos, abrindo e fechando repetidamente o obturador colocado dentro do ressonador de um laser de trabalho CW. Esse *modo burst* tem a vantagem de que a potência média fornecida pelo feixe de laser é baixa, o que resulta em uma “zona termicamente afetada” menor em comparação com o *regime CW*. Os pulsos assim gerados têm uma característica comum - sua forma é retangular no tempo, vide Figura 34. Os lasers contínuos e pulsados podem funcionar em algum arranjo em que pulsos longos ou curtos são gerados (DEMIRBAS & ACAR, 2016).

Figura 34 – OPERAÇÃO QUASE-CONTÍNUA, MEDIDA DA INTENSIDADE DE SAÍDA PARA DIFERENTES VALORES DE LARGURA DE PULSO DE DISPARO.



FONTE: Adaptado da Figura 5 de (DEMIRBAS & ACAR, 2016).

LEGENDA: Variação medida da saída dos lasers Cr:LiSAF no domínio do tempo para o modo de operação quase-contínuo (ou comutação de ganho) em vários valores de largura de pulso de disparo diferentes.

### 5.2.2. Pulsado

A operação pulsada de lasers refere-se a qualquer laser não classificado como onda contínua, de forma que a potência óptica aparece em pulsos de alguma duração em alguma taxa de repetição. Isso engloba uma ampla gama de tecnologias desenvolvidas para abordagem de diferentes motivações. Alguns lasers são pulsados simplesmente porque não podem funcionar em modo contínuo, pela dificuldade relacionada a manter a inversão de população, como é o caso do pioneiro laser a rubi de Maiman, conforme descrito no subitem 4.3 (ASHOORI, SHAYGANMANESH, & RADMARD, 2012).

Em outros casos, a aplicação requer a produção de pulsos com a maior energia possível. Uma vez que a energia do pulso é igual à potência média dividida pela taxa de repetição (Equação 7.1 e Equação 7.2), essa meta pode às vezes ser satisfeita diminuindo a taxa dos pulsos para que mais energia possa ser acumulada entre os pulsos. Na ablação a laser, por exemplo, um pequeno volume de material na superfície de uma peça de trabalho pode ser evaporado se for aquecido em um tempo muito curto, enquanto o fornecimento de energia gradualmente permitiria que o calor

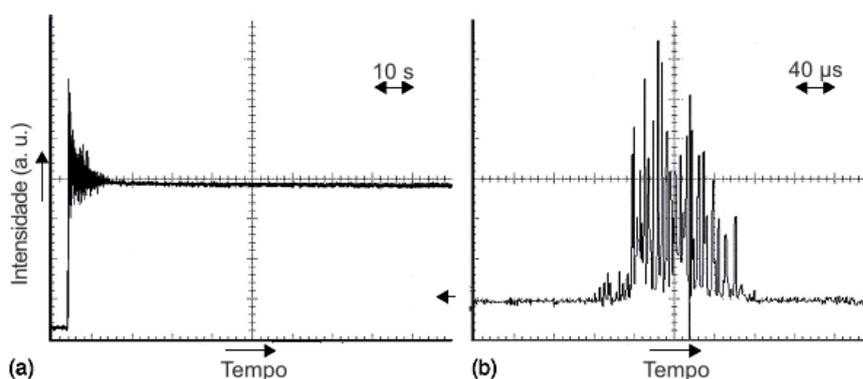
fosse absorvido pela maior parte da peça, nunca atingindo uma temperatura suficientemente alta em um determinado ponto (PHIPPS, 2011).

Outras aplicações dependem da potência de pico do pulso (em vez da energia no pulso), especialmente para obter efeitos ópticos não lineares. Para uma determinada energia de pulso, isso requer a criação de pulsos com a duração mais curta possível utilizando técnicas como Q-comutado, no subitem 5.2.4.

### 5.2.3. Regime de funcionamento livre

Neste regime de funcionamento, a radiação desenvolve-se livremente no meio ativo amplificando-se entre os espelhos do ressonador. O que determina o tipo de radiação obtida na saída, contínua ou pulsada, é o bombeamento. Na Figura 35 está representada a relação de intensidade e tempo de tal radiação tanto para a saída contínua quanto pulsada.

Figura 35 - DESENVOLVIMENTO TEMPORAL DA RADIAÇÃO LASER EM REGIME DE EXECUÇÃO LIVRE.



FONTE: Adaptado da figura 2.14 de (JELÍNKOVÁ & ŠULC, 2013).

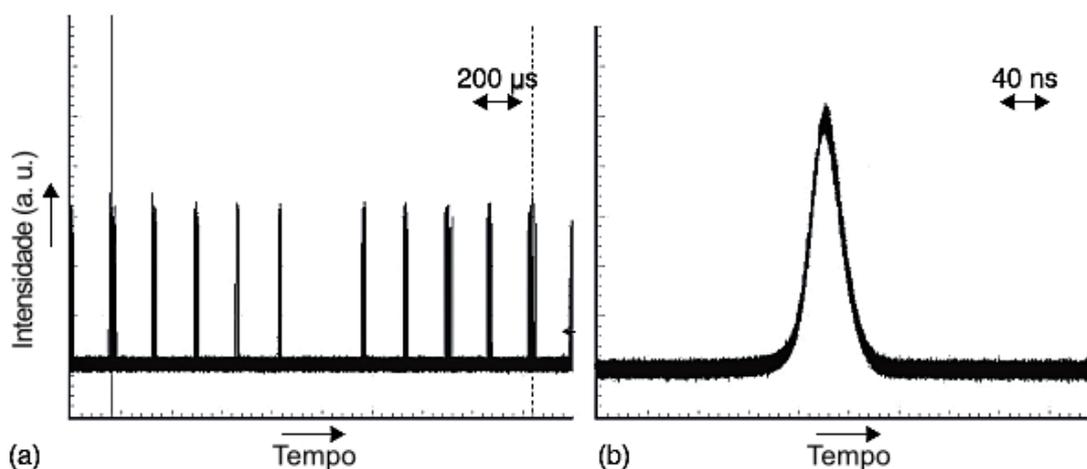
LEGENDA: Desenvolvimento temporal de radiação laser em regime de execução livre, na forma contínua (a) ou pulsada (b). Vertical - intensidade (a.u.), horizontal - (a) tempo 10 s/div; (b) 40 μs/div.

### 5.2.4. Q-comutado

Em um laser Q-comutado (frequentemente referenciado pelo termo em inglês *Q-switching*), a inversão da população se acumula pela introdução de um mecanismo de perda dentro do ressonador que excede o ganho do meio, isto é, há uma intencional redução do fator de qualidade - ou 'Q' - da cavidade (definido na Equação 3.3). O mecanismo de perda introduzido (muitas vezes um elemento eletro ou acústico-óptico, como um obturador) é rapidamente removido quando a energia armazenada máxima possível é alcançada no meio ativo, gerando um pulso muito intenso quando a radiação laser é rapidamente amplificada e incorpora a energia acumulada. A duração

desses pulsos está na faixa de unidades ou dezenas de nanossegundos ( $10^{-9} \sim 10^{-8}$  s) (JELÍNKOVÁ & ŠULC, 2013, p. 37). Quando o bombeamento do laser é contínuo, é gerado um trem de pulsos específicos (Figura 36.a) e o regime é chamado de *comutação Q quase-contínua*. No regime pulsado, apenas um (Figura 36.b), ou, excepcionalmente, dois ou três pulsos aparecem na saída do laser (ZLATANOV, 2016).

Figura 36 - DESENVOLVIMENTO TEMPORAL DA RADIAÇÃO LASER EM REGIME DE EXECUÇÃO Q-COMUTADO QUASE- CONTÍNUO (a) E Q-COMUTADO PULSADO (b).



FONTE: Adaptado da figura 2.17 de (JELÍNKOVÁ & ŠULC, 2013).

LEGENDA: Registro do osciloscópio da radiação gerada pelo laser Nd: YAG operando em regime Q-comutado quase contínuo (a) e regime Q-comutado pulsado (b). Vertical - Intensidade (a.u.), horizontal - (a) tempo 200 μs/div; (b) 40 ns/div.

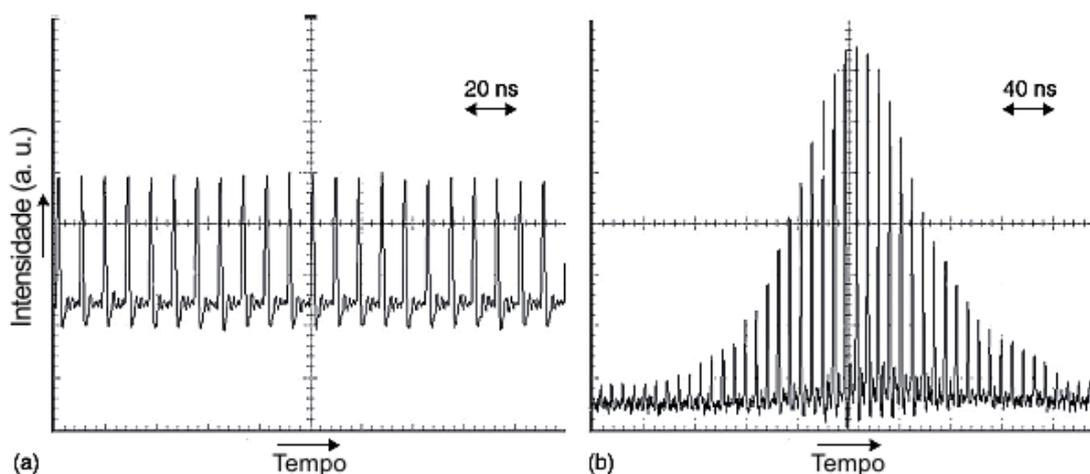
### 5.2.5. Modo Bloqueado (*Mode Locking*)

Um laser de modo bloqueado é capaz de emitir pulsos extremamente curtos, na ordem de dezenas ou unidades de picossegundos ( $10^{-12}$  s) a unidades de femtossegundos ( $10^{-15}$  s). Um laser de modo bloqueado é obtido pela inserção de um obturador de bloqueio de modo no ressonador (modulador ou controlador de polarização), que provoca o acoplamento dos modos longitudinais dentro do ressonador de tal maneira que suas fases são bloqueadas. Esses pulsos se repetirão no tempo de ida e volta, ou seja, o tempo que a luz leva para completar uma viagem de ida e volta entre os espelhos que compõem o ressonador. Os feixes de saída consistem em um trem de pulsos iguais em um regime de quase contínuo (conforme Figura 37.a) ou em um trem de pulsos sob o envelope de pulso Q-comutado (Figura 37.b). Um pulso de comprimento temporal tão curto tem um espectro espalhado por uma largura de banda considerável (ZLATANOV, 2016) devido ao limite de Fourier

(ou relação da incerteza energia-tempo). Assim, esse meio de ganho deve ter uma largura de banda de ganho suficientemente ampla para amplificar essas frequências (JELÍNKOVÁ & ŠULC, 2013).

Esses lasers de modo bloqueado são uma ferramenta mais versátil para pesquisar processos que ocorrem em escalas de tempo extremamente curtas (conhecidas como física do femtossegundo, química do femtossegundo e ciência ultrarrápida), para maximizar o efeito da não linearidade em materiais ópticos e em aplicações de ablação (PHIPPS, 2011). Devido à duração extremamente curta do pulso, esse laser produzirá pulsos que atingem uma potência de pico extremamente alta (SVELTO, Capítulo 5 - CW and Transient Laser Behavior, 1970 ).

Figura 37 - DESENVOLVIMENTO TEMPORAL DA RADIAÇÃO LASER EM REGIME DE EXECUÇÃO MODO BLOQUEADO QUASE- CONTÍNUO (a) E MODO BLOQUEADO REGIME PULSADO (b).



FONTE: Adaptado da figura 2.18 de (JELÍNKOVÁ & ŠULC, 2013).

LEGENDA: Registro do osciloscópio da radiação gerada pelo laser Nd: YAG operando em regime quase contínuo de modo bloqueado (a) e em regime pulsado de modo bloqueado (b). Vertical - Intensidade (a.u.), horizontal - (a)tempo 20ns/div; (b) 40 ns/div.

#### 5.2.6. Bombeamento pulsado

Esta operação de laser pulsada é obtida ao se bombear o material ativo do laser com uma fonte pulsada, seja por meio do bombeamento de outro laser que já seja pulsado ou pelo de carregamento eletrônico, no caso de lâmpadas de flash. O bombeamento pulsado foi historicamente usado com lasers de corante onde a vida da inversão de população de uma molécula de corante era tão curta que uma bomba rápida de alta energia era necessária. A maneira de superar esse problema era carregar grandes capacitores que são então acionados para descarregar através de lâmpadas de flash, produzindo um flash intenso (SVELTO, Principi dei Laser, 1970).

O bombeamento pulsado também é necessário para lasers de três níveis, nos quais o nível de energia mais baixo rapidamente se torna altamente populado, evitando que ocorra mais lasers até que esses átomos voltem ao estado fundamental. Esses lasers - como o laser de excímero e o laser de vapor de cobre - nunca podem ser operados no modo CW (TÜNNERMANN, WREDE, & WELLEGEHAUSEN, Generation of high peak power excimer laser radiation by pulse shortening, 1990).

## 6 UTILIZAÇÕES

### 6.1. INTRODUÇÃO

Um jovem físico chamado Irnee D'Haenens, enquanto trabalhava com Maiman no pioneiro laser de rubi, comentou que o dispositivo era "uma solução em busca de um problema" (HECHT J. , Laser, 2020). Desde então, encontraram utilidade em milhares de aplicações altamente variadas em cada seção da sociedade moderna, incluindo produtos eletrônicos de consumo, tecnologia da informação, ciência, medicina, indústria, aplicação da lei, gravação de padrões em produtos em linha de produção, entretenimento, militar e comunicação. Nesta última aplicação, a comunicação via fibra óptica por meio de lasers permite serviços como a Internet, logo é uma tecnologia-chave nas comunicações modernas e em nosso estilo de vida (ZLATANOV, 2016).

Lasers de uso amplo variam em tamanho desde microscópicos lasers de diodo (com numerosas aplicações na vida cotidiana), a lasers de vidro de neodímio do tamanho de campos de futebol que podem gerar dois petawatts ( $2 \cdot 10^{15}$  W) durante um período de um picossegundo ( $10^{-12}$  s), usados para fusão nuclear de confinamento inercial (uma opção a aceleradores de partículas no campo de fusão nuclear) e outros experimentos físicos de alta densidade de energia (SARRI, 2015).

Os lasers de hélio-neon foram os primeiros lasers com amplas aplicações comerciais. Como podiam ser ajustados para gerar um feixe vermelho visível em vez de um feixe infravermelho, eles encontraram uso imediato para projetar linhas retas para alinhamento, levantamento topográfico, construção e irrigação. Logo as cirurgias oculares começaram a usar pulsos de lasers de rubi para soldar retinas destacadas de volta no lugar, sem cortar o olho. A primeira aplicação em larga escala para lasers foi o scanner a laser de código de barras para caixas automáticas em supermercados, que foi desenvolvido em meados da década de 1970 e se tornou comum alguns anos depois. O reproduzidor de disco laser, LD, lançado em 1978, foi o primeiro produto de consumo de sucesso a incluir um laser, mas o reproduzidor de disco laser compacto, o conhecido CD, foi o primeiro dispositivo equipado com um laser a se tornar comum, começando em 1982, sendo logo seguido pelas impressoras a laser (HECHT J. , Laser, 2020).

Alguns outros usos são (ZLATANOV, 2016):

- Indústria: Corte, soldagem, tratamento térmico de materiais, marcação de peças, medição sem contato de peças.
- Medicina: cirurgia sem sangue, cura a laser, tratamento cirúrgico, tratamento com cálculo renal, tratamento ocular, odontologia.
- Desenvolvimento de produto / comercial: impressoras a laser, impressoras 3D a laser (sinterização seletiva de sólidos ou estereolitografia de resinas), discos ópticos, leitores de código de barras, termômetros, ponteiros laser, hologramas, bolhas.
- Militar: marcação de alvos, munições guiadas, defesa antimísseis, contramedidas eletro-ópticas (EOCM), alternativa ao radar, tropas cegantes.
- Aplicação da lei: usado para detecção de impressão digital latente no campo de identificação forense.
- Pesquisa: Espectroscopia, ablação a laser, recozimento a laser, espalhamento a laser, interferometria a laser, lidar, microdissecção de captura a laser, microscopia de fluorescência, metrologia.
- Exibições de luz laser: Exibições de luz laser.
- Tratamentos cosméticos para a pele: tratamento da acne, redução da celulite e estrias e depilação.

## 6.2. UTILIZAÇÕES DIVIDIDAS POR POTÊNCIA

Figura 38 – APLICAÇÃO DE LASER EM IMAGENS DE ÓPTICA ADAPTATIVA ASTRONÔMICA.



FONTE: Creative Commons. Crédito: G. Hüdepohl / European Southern Observatory – Disponível em: < [http://www.eso.org/public/images/gerd\\_huedepohl\\_4/](http://www.eso.org/public/images/gerd_huedepohl_4/), CC BY 4.0, <https://commons.wikimedia.org/w/index.php?curid=11683404> >. Acesso em: 17 de janeiro de 2021.

Conforme as aplicações, lasers com diferentes potências de saída são requeridos. Lasers que produzem um feixe contínuo ou uma série de pulsos curtos podem ser comparados com base em sua potência média. Lasers que produzem pulsos também podem ser caracterizados com base na potência de pico de cada pulso. A potência de pico de um laser pulsado é muitas ordens de magnitude maior do que sua potência média (Equação 7.1 e Equação 7.2). A potência média de saída é sempre menor do que a potência consumida. No artigo *Laser and Laser Applications* de (ZLATANOV, 2016) estão listadas potências médias habituais para alguns usos do laser, conforme reproduzido no Quadro 2.

Quadro 2 - POTÊNCIA CONTÍNUA OU MÉDIA NECESSÁRIA PARA ALGUNS USOS.

POTÊNCIA	USO
1–5 mW	Ponteiros laser
5 mW	Drive de CD
5-10 mW	Leitor DVD player ou unidade de DVD-ROM
100 mW	Gravador de CD-RW de alta velocidade
250 mW	Gravador de DVD-R 16 X de uso doméstico
400 mW	Queima uma caixa de CD - embalagem e disco - em 4 segundos.
	Gravação de DVD de dupla camada 24x.
1 W	Laser verde no atual desenvolvimento de protótipo de disco versátil holográfico
1–20 W	Saída da maioria dos lasers de estado sólido disponíveis comercialmente usados para micro usinagem
30–100 W	Lasers cirúrgicos típicos
100–3000 W	Lasers típicos usados em corte a laser industrial

Fonte: (ZLATANOV, 2016, p. 18)

Ainda em (ZLATANOV, 2016), são citados exemplos de sistemas pulsados com alta potência de pico:

- 700 TW ( $700 \times 10^{12}$  W) - NIF, *National Ignition Facility*, um sistema de laser de 192 feixes e 1,8 megajoule adjacente a uma câmara-alvo de 10 metros de diâmetro, localizado no Laboratório Lawrence Livermore próximo a San Francisco, E.U.A.
- 2 PW ( $2,0 \times 10^{15}$  W) - *Laser for Fast Ignition Experiments* (LFEX), o laser mais poderoso do mundo em 2015, localizado na Universidade de Osaka, no Japão.

### 6.3. ARMAMENTISTA

Figura 39 – ARMA TÁTICA ISRAELENSE-AMERICANA DE ALTA ENERGIA.



FONTE: Figura 6 de (OLSON, 2012, p. 33)

LEGENDA: Arma tática israelense-americana de alta energia, tem sido usada para derrubar foguetes e projéteis de artilharia

Existem dezenas de lasers diferentes, dependendo da fonte utilizada para obter a radiação luminosa (visível ou invisível). Mas os lasers de alta potência, de utilização militar, não são muito numerosos. De todos os lasers existentes, quatro foram selecionados até agora para uso militar (MEUNIER, 2015). São três os chamados lasers "químicos", onde a radiação é obtida por meio de uma reação química: o laser de fluoreto de hidrogênio (FH), o laser de fluoreto de deutério (DH) e o laser de iodeto químico, oxigênio (COIL), e um chamado laser de "gás dinâmico". Outros chamados lasers "sólidos" que usam cristais e cerâmicas também estão encontrando usos militares. Eles desenvolvem poderes inferiores, mas são muito menores em tamanho (SYED, MOHSIN, & ZUBAIR ALI, 2020).

Do ponto de vista estritamente militar, o laser pertence à categoria de armas de energia dirigida. Seja o Boeing 747 ABL, o C-130 ATL ou a defesa cerrada de navios de guerra, forças aéreas e marinhas (especialmente estadunidenses) dão lugar de destaque ao desenvolvimento de sistemas a laser a bordo. E ao contrário do que se possa imaginar à primeira vista, trata-se, de fato, de lasers destinados à destruição

de objetivos: pequenas embarcações, mísseis de ataque ou mísseis balísticos. Os porta-aviões da classe *Gerald Ford* são projetados para eventualmente acomodar armas laser de defesa de curto alcance, e o C-130 ATL já disparou fogo destrutivo contra veículos em movimento (MEUNIER, 2015).

As forças terrestres há muito usam a descoberta de alcance do laser para estimar distâncias. Baseado no princípio de LiDAR (*Light Detection & Ranging*), e associado aos meios GPS, também permite a designação de alvos por meio de instrumentos como o CILAS DHY 307, para ataques aéreos com munições guiadas a laser. Desde as guerras dos Bálcãs na década de 1990, e com a necessidade de encontrar uma maneira de localizar atiradores, os inventários das forças armadas têm aparecido em detectores ópticos pontiagudos, ou DOPs. Usando o efeito "olho de gato" da óptica de mira, esses sistemas permitem a localização no ambiente de qualquer óptica de tamanho suficiente. Um tanque óptico é, portanto, visível a vários quilômetros de distância. Entre os produtos que utilizam esta tecnologia, destacamos também o SLD Scout da CILAS. A categoria de lasers ofensivos começa com aqueles destinados principalmente para neutralizar a óptica assim detectada. a cúpula JD-3 inclui, além do DOP, um laser de média potência que visa "velar" a ótica detectada, aquecendo as superfícies refletoras (ROSO, MOREIRA, & OLIVEIRA, 2014) (U.S. Navy Laser Versus UAVs... Laser Wins..., 2009).

Na década de 1990, a França desenvolveu um sistema equivalente com a torre LATEX (Laser Associado a uma Torre Experimental), que se manteve em fase de demonstrador tecnológico. Os sistemas de laser de baixa potência já estão encontrando aplicações no campo de armas não letais: o Dazzler, destinado a deslumbrar e desorientar uma multidão, já foi usado em postos de controle no Iraque; da mesma forma, o *Pulsed Energy Projectile* (PEP) se destina a afastar multidões, aquecendo a pele (MEUNIER, 2015).

O laser MIRACL estava operacional já em 1980, com uma potência superior a um megawatt e podendo emitir por 70 segundos (emissão contínua). Foi projetado com objetivo de perseguir e destruir mísseis de cruzeiro anti-navio, mas posteriormente foi usado para medir a fenomenologia associada com armas laser anti-balísticas e anti-satélite. Desde os anos 2000, está instalado em *White Sands Missile Range*, uma plataforma de lançamento de 8.300 km<sup>2</sup>, a maior instalação militar dos Estados Unidos (Pentagon beams over military laser test Laser U.S. wants to determine vulnerability of satellites, 1997).

Os sistemas ofensivos mais próximos do estágio operacional hoje são os sistemas projetados para a neutralização de IEDs e para a destruição de alvos com blindagem fraca em voo (drones ou mísseis). No primeiro caso, é o sistema americano HLONS Zeus, que teria sido implantado no Afeganistão, e no segundo, o sistema Avenger (também americano), montado no Humvee, e do qual um pod de míssil Stingers foi substituído por um laser. A defesa antimísseis e antiaérea é atualmente a principal rota escolhida para o uso terrestre de lasers, seja o MTHEL israelense-americano (Figura 39) ou o *Rheinmetall Laser Skyshield*. Mas em todos os casos mencionados acima, com exceção do MTHEL, as potências permanecem baixas (algumas dezenas de kW) em comparação com as necessárias para neutralizar, por

exemplo, um veículo blindado (várias centenas de kW a vários MW). Mais recentemente, a Marinha dos Estados Unidos revelou a filmagem de seu teste do Sistema de Arma a Laser (LaWS) no Golfo Pérsico. Um evento histórico que muda definitivamente o canhão laser da ficção científica para a realidade: implantada pela primeira vez em um navio em operação - o USS Ponce – a nova arma está perfeitamente integrada ao sistema de defesa (FEIN, 2011).

Um panorama recente das inovações da segunda década do século 21 é dada por (SYED, MOHSIN, & ZUBAIR ALI, 2020) e transcrito e adaptado no Quadro 3.

Figura 40 – LASER AEROTRANSPORTADO (ABL) NUM BOEING YAL-1.



FONTE: Figura 8 de (OLSON, 2012, p. 34)

LEGENDA: Boeing YAL-1. O sistema de laser é montado em uma torre fixada ao nariz da aeronave.

Quadro 3 - VISÃO GERAL DOS PROJETOS MILITARES DE LASER DESDE 2010.

<b>Título</b>	<b>Origem</b>	<b>Objetivo</b>	<b>Descrição</b>	<b>Ano</b>
Projeto Blue Beam	Agência Espacial dos Estados Unidos	Imaginação	A NASA iniciou este projeto para criar hologramas do espaço na superfície da terra para operações secretas. Satélites de retransmissão ou projetores de	Não conhecido

<b>Título</b>	<b>Origem</b>	<b>Objetivo</b>	<b>Descrição</b>	<b>Ano</b>
			laser nas estações espaciais da NASA que transmitem dados para veículos aerotransportados para gerar imagens holográficas.	
Iniciativa Laser Elétrico Robusto	Departamento de Defesa dos E. U. A., Lockheed Martin	Arma Militar	O projeto foi projetado para melhorar a eficiência em mais de 30%, mantendo a qualidade do feixe. Esta arma de próxima geração usou tecnologia de fibra de laser para melhorar a arma laser de 25 kW testada para produzir 100 kW. Um teste bem-sucedido de um laser de 60 kW foi realizado em 2017.	2013 - Em andamento
Demonstração de comunicação do laser lunar (LLCD)	Instituto de Tecnologia de Massachusetts, Lincoln LABs & Agência Espacial dos Estados Unidos	Comunicações	O projeto teve como objetivo criar a primeira comunicação a laser no espaço livre. O objetivo era estabelecer comunicações de laser duplex de um veículo espacial orbital lunar para um receptor estacionário na Terra. O LLCD atingiu taxas de dados de 620 Mbps para downlink e 20 Mbps para uplink.	Testado com sucesso em 18 de outubro de 2013
Boeing Demonstrador móvel de laser de alta energia	Boeing & Comando de Defesa Espacial e Mísseis do Exército dos E. U. A.	Arma Militar	O programa foi iniciado para demonstrar que o exército pode eliminar ameaças como foguetes, morteiros e veículos aéreos não-tripulados na velocidade da luz. Em 2014, foi realizado um experimento para gerar uma arma de laser de alta energia usando um laser de estado sólido de 10 kW.	2011 - em andamento
Distribuição de chaves quânticas do espaço livre (QKD)	E. U. A., China, Japão	Comunicações	Esta pesquisa foi realizada para verificar a viabilidade do QKD no espaço livre. Recentemente, uma chave secreta foi trocada de 20 km através do link ar-solo a 7,9 bps e de 144 km através do link solo-solo a uma taxa de 12,8 bps.	Projeto de vários estágios - em andamento
Sistema Europeu de Retransmissão de Dados(EDRS)	Centro Aeroespacial Alemão & Agência Espacial Europeia	Comunicações	O EDRS tem satélites GEO que transmitem dados e informações entre veículos aéreos não-tripulados, ônibus espaciais, estações terrestres e outros satélites. Com a ajuda da tecnologia de laser de última geração, o terminal de laser transmitiu 1,8 Gbps por 45.000 km em links GEO-LEO.	2015 - em andamento
Maturação da Tecnologia de Laser de Estado Sólido	Escritório de Pesquisa Naval dos E. U. A.	Arma Militar	O projeto foi iniciado para entregar armas HEL (laser de alta energia) maduras para futuras operações navais. Começando com um sistema de 60 kW e visando um sistema de 150 kW. Em 2016, o objetivo do SL-TM era projetar, construir e testá-lo em um navio.	2012 em curso

<b>Título</b>	<b>Origem</b>	<b>Objetivo</b>	<b>Descrição</b>	<b>Ano</b>
Programa de Controle de Feixe Aero Adaptativo	Lockheed Martin, Laboratório de Pesquisa da Força Aérea dos E. U. A., Agência de Projetos de Pesquisa Avançada de Defesa dos Estados Unidos	Arma Militar	O objetivo deste projeto era instalar armas HEL (laser de alta energia) em veículos aerotransportados, permitindo-lhes disparar um laser em todas as direções possíveis com precisão. Em 2015, a Lockheed Martin demonstrou um sistema de protótipo de laser de fibra elétrica de 30 kW.	2013 - em andamento
Embarcação de guerra não tripulada de trilha contínua anti-submarinos	Agência de Projetos de Pesquisa Avançada de Defesa dos Estados Unidos	Navio de guerra	Este projeto foi sobre o desenvolvimento de um drone anti-submarino que pode rastrear submarinos a diesel com sucesso usando sensores laser / eletro-ópticos ou tecnologias de radar não ativo LIDAR. Após o primeiro teste bem-sucedido em 2016, a embarcação foi batizada de Sea Hunter.	2010 - em andamento
Programa de Satélites da Ciência Quântica da China	Academia Chinesa de Ciências	Comunicações	O objetivo do projeto era lançar uma série de satélites para distribuição de chave quântica usando comunicação a laser para vários projetos militares, radiação cósmica e a exploração de matéria escura.	2016 - em andamento

Fonte: Adaptado da Tabela 1 de (SYED, MOHSIN, & ZUBAIR ALI, 2020, p. 5)

#### 6.4. TELECOMUNICAÇÃO NO ESPAÇO

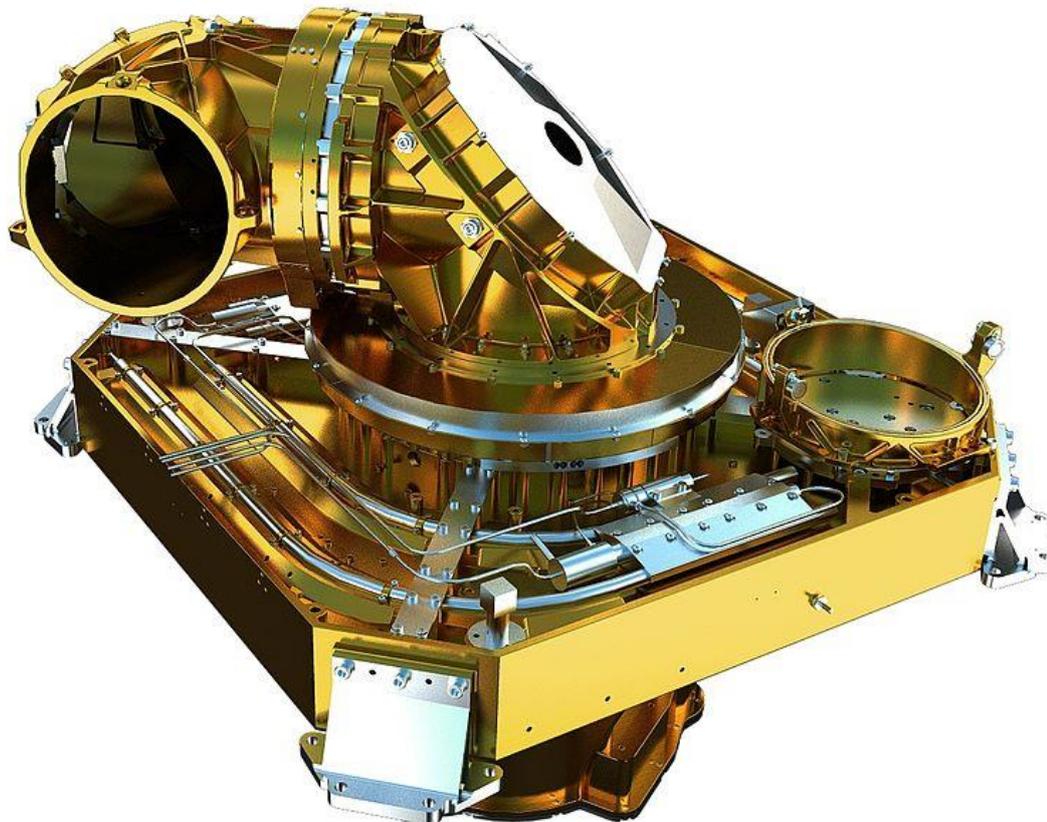
A tecnologia recente permitiu protótipos para comunicações de laser e comunicação de luz visível no espaço sideral: as telecomunicações ópticas espaciais, baseada no uso de lasers para transmissão de dados. Essa técnica torna possível aumentar consideravelmente a taxa de transferência em comparação com links de rádio enquanto reduz a energia elétrica necessária. Com dados de 2018, a transmissão de dados consome 2% da energia elétrica mundial (JONES, 2018). A utilização do laser neste contexto, porém, esbarra na necessidade de um apontamento extremamente preciso a partir de um suporte possivelmente se movendo em alta velocidade em relação ao receptor e quando este estiver no solo com problemas de transparência da atmosfera. As telecomunicações ópticas espaciais têm sido objeto de inúmeras experiências desde o início dos anos 2000 (MAJUMDAR, 2005). A utilização de lasers visa responder a diferentes contextos: crescimento do volume de dados transmitidos por instrumentos a bordo de satélites cada vez mais potentes, distância da espaçonave à Terra, aumentando as demandas dos consumidores. O alcance de comunicação da comunicação óptica no espaço livre é atualmente da ordem de vários milhares de quilômetros, mas tem o potencial de

superar distâncias interplanetárias de milhões de quilômetros, usando telescópios ópticos como expansores de feixe (SHEAHAN, 2014).

O European Data Relay Satellite System (EDRS) será uma constelação de satélites geoestacionários destinados a transmitir informações e dados entre satélites/nave espacial, UAVs e estações terrestres. O EDRS é um sistema de satélite europeu independente que objetiva reduzir os atrasos na transmissão de grandes quantidades de dados, visando construir uma rede de telecomunicações rápida, fiável e contínua, aumentando assim a autossuficiência da Europa. Apesar dos avanços recentes nas capacidades de telecomunicações, ainda há uma série de limitações que atrasam a entrega de dados críticos aos usuários (SYED, MOHSIN, & ZUBAIR ALI, 2020). Com a implementação do programa Copernicus da ESA / Comissão Europeia, estima-se que as infraestruturas de telecomunicações espaciais europeias terão de transmitir 6 terabytes de dados todos os dias do espaço para o solo (European Data Relay Satellite System (EDRS) Overview).

Ainda mais recente, a empresa SpaceX, de Elon Musk, retomou a conexão da Ucrânia em guerra através da *internet* via satélite, que utiliza lasers para melhorar a conexão da Starlink (ARBULU & RIGUES, 2021).

Figura 41 – DIAGRAMA DO TERMINAL DE LASER QUE CONSTITUI A PARTE ÓPTICA DO EQUIPAMENTO EDRS DA AGÊNCIA ESPACIAL EUROPEIA.



FONTE: Agência Especial Europeia, Disponível em:  
<[http://www.esa.int/ESA\\_Multimedia/Images/2015/06/Laser\\_communication\\_terminal](http://www.esa.int/ESA_Multimedia/Images/2015/06/Laser_communication_terminal)>. Acesso em: 5 de fevereiro de 2021.

## 6.5. MEDICINA

Os lasers surgiram como fontes de luz potencialmente interessantes para a medicina desde a sua invenção. Diferentes modos de ação sobre os tecidos biológicos podem ser obtidos graças à possibilidade de se obter um comprimento de onda específico e uma emissão contínua ou pulsada. Quatro efeitos são distinguidos: fotomecânico, fotoablativo, térmico e fotodinâmico (MORDON, Applications médicales du laser, 2010). Muitas áreas médicas recorrem aos lasers em busca desses efeitos (KATZIR, Capítulo 1 - Introduction, 1993) (KATZIR, Capítulo 9 - Clinical Applications of Fiberoptic Laser Systems, 1993).

Em oftalmologia, uma das aplicações mais conhecidas do laser na medicina é o tratamento da miopia com o laser sendo aplicado na área central da córnea, mas essa técnica também pode tratar hipermetropia - com retirada de tecido na periferia da córnea - e astigmatismo, realizado em áreas selecionadas, aplanando ou encurvando a região central. Também trata certos glaucomas e descolamento de retina. Rápida (cinco a dez minutos), indolor e permanente, a cirurgia ocular a laser tornou-se um ato de rotina para os médicos e uma solução definitiva para os pacientes (SILVA M. R., 2018).

Na dermatologia, o laser é muito útil para o tratamento de angioma, rosácea, manchas escuras e cicatrizes. É usado em cirurgia estética para eliminar a celulite e rugas superficiais. Também é eficaz na remoção de tatuagens e até mesmo na obtenção de uma remoção de cabelos e pelos de longa duração (WELCH, TORRES, & CHEONG, 1989).

Na periodontia, o laser substitui a cirurgia tradicional para tratar doenças gengivais e na flebologia queima as veias varicosas.

É utilizado em oncologia para a remoção de tumores, mas também em ginecologia, urologia, cardiologia e neurologia (MORDON, Actions thermiques des lasers, 1995) apud (KOSTRON & HASAN, 2016).

O raio pode, de fato, ser tão fino que atinge apenas uma única célula (pulsos em femtossegundos,  $1 \text{ fs} = 10^{-15} \text{ s}$ ). A luz laser é monocromática (ou seja, emitida em um único comprimento de onda), o que permite que ela atue especificamente em determinados tecidos, sem afetar outros. Ao selecionar um comprimento de onda preciso, podemos direcionar a área a ser tratada.

As aplicações dos lasers em medicina são tanto mais diversas porque esta radiação pode ter um efeito térmico, mecânico ou químico (MORDON, Applications médicales du laser, 2010).

## 6.6. INDÚSTRIA

O laser é uma ferramenta de produção industrial extremamente eficiente e inovadora, sobretudo com o advento da automação e robotização. Além do seu uso mais difundido no corte a laser, marcação e soldagem, outros processos industriais relevantes que empregam o laser devem ser mencionados: fabricação aditiva, revestimento duro (restauração de partes que tenham sofrido algum tipo de fenômeno de desgaste), tratamento térmico, decapagem e medições (MICRONORA, 2012).

O corte a laser foi o primeiro processo usado do laser na indústria em larga escala e segue como seu uso mais conhecido. Em tais contextos, o interesse do laser não é outro senão sua capacidade de cortar materiais de espessura fina a média. Existem muitos materiais compatíveis: aço carbono, aço inoxidável, titânio, alumínio, cerâmica, compósitos, polímeros, silício e outros (BADONIYA, 2018). Este processo é particularmente vantajoso quando empregado em peças muito finas e delicadas, com versatilidade para protótipos e lotes menores. A simplicidade de uso é uma das principais vantagens do corte a laser sobre outros tipos de corte, não requer ferramentas especiais, troca de ferramental e não há desgaste. Além disso, é muito preciso, produz pouco superaquecimento na borda e causa poucas rebarbas. Dentre as máquinas de corte a laser, pode-se distinguir as máquinas destinadas ao corte de chapas (sobre mesas) e as máquinas de corte de tubos. Além do corte, o laser também é utilizado em processos de furação (KANNATEY-ASIBU JR., Capítulo 15 - Laser Cutting and Drilling, 2009).

Marcação e a gravação a laser são outras utilizações frequentes. A diferença entre os processos é a profundidade. A *marcação* é uma oxidação colorida superficial, enquanto a *gravação* derrete e vaporiza o material, esvaziando-o a uma profundidade de alguns centésimos a alguns décimos de milímetro. Muito utilizada nas indústrias médica, aeronáutica e aeroespacial, com muitas vantagens: é pontiagudo e preciso, não se degrada e é sempre rastreável, o que o torna uma excelente alternativa à rotulagem. O laser é usado principalmente para marcar logotipos e códigos de barras Datamatrix. Na indústria farmacêutica em particular, ele também permite a serialização. Outra vantagem é que a marcação a laser pode ser feita em quase todos os materiais, inclusive embalagens (CLAPAUD, 2018).

Soldagem a laser é uma alternativa interessante para muitos projetos industriais. Este processo tem a vantagem particular de ser compatível com vários materiais: alumínio, aço inoxidável, titânio, cromo, cobalto, ligas de ferro-níquel, dentre outros. Dois métodos principais podem ser destacados: a *soldagem a ponto*, que envolve juntar as duas peças uma em cima da outra, sem vedação, e a *soldagem de cordão completo*, que envolve fazer uma ligação metalúrgica com um início e um fim, caso em que pode ser vedante. Esta última técnica é, portanto, particularmente vantajosa quando a vedação é necessária como na fabricação de tubos, por exemplo. As principais vantagens da soldagem a laser são: nenhum metal de adição é necessário; a zona termicamente afetada (ZTA) é pequena, o que ajuda a evitar deformações; a resistência mecânica é forte, dependendo da profundidade de penetração; a estética do processo é excelente, sobretudo por ser automatizada; a

solda é hermética; a possibilidade de soldagem de materiais magnéticos; o processo é, de modo inerente, automatizado; a profundidade de penetração é controlada (LASER RHÔNE ALPES, 2019).

Os usos industriais do laser são diversos e muito pode ser reunido a respeito, entretanto o escopo deste trabalho focará no corte a laser, a partir do capítulo seguinte.

## 7 CORTE A LASER

### 7.1. INTRODUÇÃO

Qualidade de acabamento na borda cortada, automatização e facilidade de operação, versatilidade quanto aos materiais, repetibilidade e precisão, otimização no aproveitamento do material e, virtualmente, inexistência de desgaste de ferramentas são algumas das vantagens do processo de corte por fusão a laser em relação a outros métodos de corte, convencionais ou não (RIVEIRO A. , et al., 2019). Como mencionado no item 4.4, a primeira tentativa relatada de usar um laser como uma ferramenta de corte pode ser bem atribuído a britânico Peter Houldcroft, que em 1967 usou um laser de CO<sub>2</sub> de 300W com oxigênio como gás de assistência para cortar folha de aço de 1 mm de espessura (HILLTON, 2007). Tal processo é hoje rotina na indústria, sobressaindo para corte de chapas de aço com espessuras que variam de 0,5 a 30 mm, bem como em outros materiais de engenharia (POWELL, et al., 2008).

De modo conciso, para haver a perfuração inicial da chapa e o corte a laser subsequente, o raio laser focalizado é direcionado para a superfície da peça para aquecê-lo rapidamente, resultando em fusão e/ou vaporização, dependendo da intensidade do feixe e do material da peça. O fundido ou vapor é removido ao ser soprado pelo gás auxiliar, inerte ou reativo (Figura 42). Se utilizar um gás auxiliar que seja quimicamente inerte, com função de remoção do fundido e até mesmo a formação de uma atmosfera livre do oxigênio, o processo é chamado de *corte por fusão a laser*. Quando o gás auxiliar é reativo em contato com o material fundido, é designado como *corte de fusão reativa a laser*. O corte é o *slot* ou a abertura criada pelo processo de corte. As particularidades do processo de perfuração a laser não serão discutidas neste trabalho.

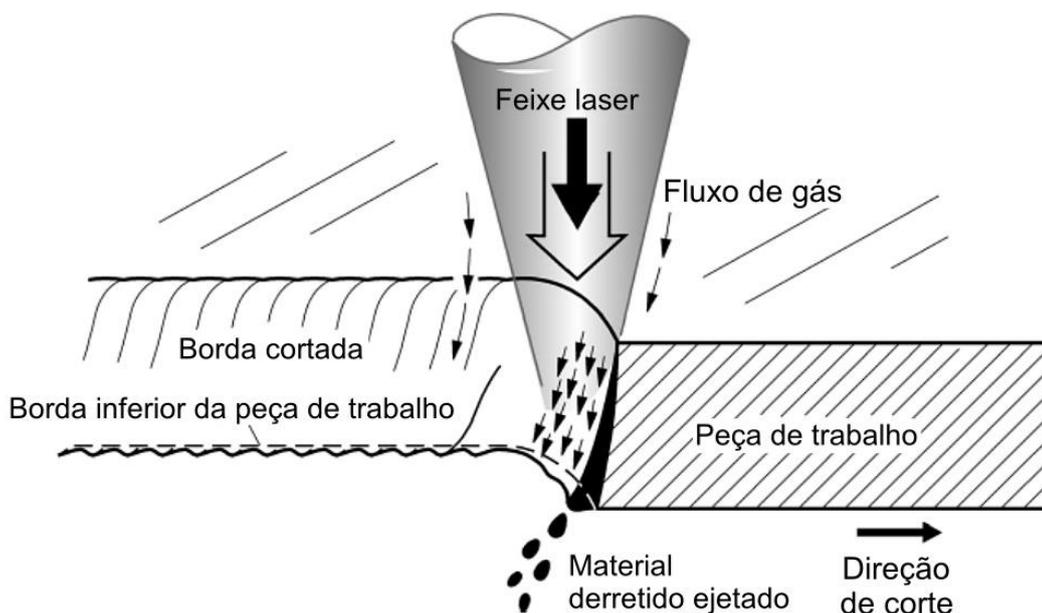
Para metais, a densidade de potência necessária é tipicamente da ordem de 10<sup>6</sup> a 10<sup>7</sup> W/cm<sup>2</sup>. Os lasers podem ser usados para cortar efetivamente placas de metal de espessuras de até 10 cm (KANNATEY-ASIBU JR., Capítulo 15 - Laser Cutting and Drilling, 2009, p. 431). Resultam do processo de corte de metais superfícies aproximadamente paralelas e com arestas retas. Sempre haverá, na realidade, uma ligeira inclinação da superfície de corte produzida devido à natureza divergente do feixe, fenômeno mais acentuado para maiores espessuras de chapas. A espessura da peça que pode ser cortada com lados paralelos é determinada pela profundidade do foco. Placas mais espessas que a profundidade de foco normalmente

resultam em superfícies cônicas. Além disso, para remoção eficaz do material da zona de corte, a proporção entre a espessura da peça e a largura do corte precisa ser menor que 20:1 para a maioria dos metais e menor que 40:1 para a cerâmica (KANNATEY-ASIBU JR., Capítulo 15 - Laser Cutting and Drilling, 2009).

O tamanho de zona afetada pelo calor (ZTA) é pequeno, da ordem de 0,1 mm, pois o processo de corte a laser demanda uma entrada total de calor relativamente pequena. Além disso, o tamanho pequeno do feixe focalizado resulta em tamanhos de abertura de corte muito estreitos, geralmente cerca de 0,05mm a 1 mm (BADONIYA, 2018).

A produção de bordas de corte de alta qualidade pode ser feita controlando os parâmetros de corte a laser de maneira correta. Existem muitos parâmetros para o processo do laser, como distância do bocal, posição do foco, velocidade de corte, diâmetro do bico, espessura da camada de trabalho, pressão do gás auxiliar etc. Muitos pesquisadores estudaram o efeito desses parâmetros nas larguras do corte, ângulo de conicidade, taxa de remoção de material, zona afetada pelo calor (ZTA) e rugosidade da superfície (CHEN S. L., 1999) apud (BADONIYA, 2018).

Figura 42 – ESQUEMA DO PROCESSO DE CORTE A LASER.



FONTE: Extraído e adaptado de (READY & FARSON, LIA Handbook of Laser Materials Processing, 2001).

## 7.2. FORMAS DE CORTE A LASER

De acordo com (KANNATEY-ASIBU JR., Capítulo 15 - Laser Cutting and Drilling, 2009), o processo de corte a laser pode ocorrer em uma das três formas:

- Corte por fusão.
- Corte por sublimação.
- Ablação fotoquímica.

#### 7.2.1. Corte por fusão

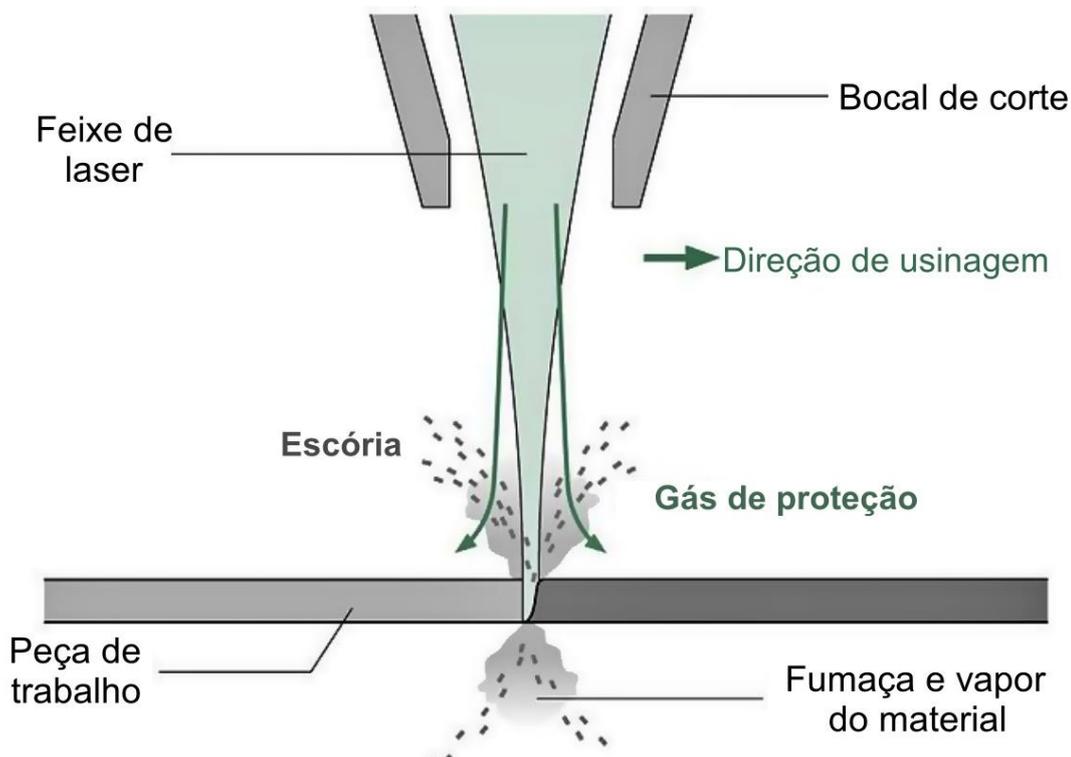
Processo mais comum no uso industrial do corte a laser, utiliza um feixe de laser focalizado para a fusão do material base, que é continuamente ejetado usando um gás auxiliar sob alta pressão, inerte ou reativo. No caso de uso de um gás inerte, tal como o nitrogênio (inerte à maioria dos metais), hélio ou argônio, a energia para fundir é fornecida inteiramente pelo raio de laser. O gás é usado somente para ejeção do fundido, podendo mesmo ser usado para formação de uma atmosfera que evita a oxidação. Quando é utilizado o oxigênio ou ar, que reagem com o metal base, a reação exotérmica resultante fornece energia adicional para o processo.

Um problema do corte por fusão é a formação de estrias na superfície de corte (vales e picos que percorrem a espessura da seção de corte) e rebarbas na aresta de corte inferior (escória de material fundido que se apega e solidifica na parte inferior e solidifica). Comparado a outros métodos convencionais de corte, porém, o processo de corte por fusão é mais eficiente – exige menos energia por unidade de volume de material removido (KELLENS, RODRIGUES, DEWULF, & DUFLOU, 2014).

#### 7.2.2. Corte por sublimação

Este processo de corte *vaporiza* o material da peça ao longo da linha de corte, o que é alcançado geralmente usando um feixe de laser pulsado e um jato de gás de assistência inerte, coaxial com o feixe, usado para soprar o vapor produzido, esquema ilustrado na Figura 43 (veja detalhes sobre modos de operação em 5.2). Seu uso em metais é, ainda, limitado a seções relativamente finas, pois em comparação com o corte por fusão do subitem 7.2.1 é necessária mais energia para remover um volume unitário de material. No entanto, possui a vantagem de permitir o uso em uma espessura de corte mais estreita e produzir uma superfície de corte de maior qualidade (KANNATEY-ASIBU JR., Capítulo 15 - Laser Cutting and Drilling, 2009, p. 432). Feixes pulsados com altos picos de potência podem ser necessários quando a qualidade da superfície é crítica. Assim, este processo raramente é usado na fabricação de chapas metálicas, porém torna-se atraente em aplicações que envolvem trabalhos de corte particularmente delicados, como na produção de estentes - endoprótese expansível - utilizado na medicina (TRUMPF GROUP).

Figura 43 – ESQUEMA DE CORTE A LASER POR SUBLIMAÇÃO.



FONTE: Crédito: (TRUMPF GROUP).

### 7.2.3. Ablação fotoquímica

Neste processo, a irradiação laser causa a remoção de material sólido pelo rápido aquecimento devido à energia absorvida, causando sua evaporação ou sublimação. Esta é uma técnica relativamente nova possibilitada pelo uso de lasers de excímero de alta potência trabalhando no ultravioleta (STEEN, Capítulo 3 - Laser Cutting, 2003). É o método utilizado normalmente para corte de materiais orgânicos, cerâmicos ou de difícil corte em geral. Compostos orgânicos tendem a absorver a radiação ultravioleta de maneira eficiente. Os níveis de energia do fóton dos lasers baseados na radiação ultravioleta variam entre 3,5 e 6,5 eV, o que corresponde aos níveis de energia necessários para a ligação molecular carbono-carbono (aproximadamente 4,6 eV) e carbono-hidrogênio (cerca de 4,2 eV) (KANNATEY-ASIBU JR., Capítulo 15 - Laser Cutting and Drilling, 2009, p. 433). Quando um material orgânico é irradiado com um feixe ultravioleta, absorve a energia do feixe em uma camada muito fina perto da superfície, da ordem dos submícrons. A absorção rompe ligações moleculares, causando decomposição ablativa da área irradiada em um processo quase instantâneo, cerca de 20 nanossegundos de duração. Como a condutividade térmica dos materiais orgânicos é relativamente baixa, as bordas resultantes são bem definidas, com danos térmicos mínimos à área que a circunda, sendo às vezes chamado de “corte a frio” (STEEN, Capítulo 3 - Laser Cutting, 2003).

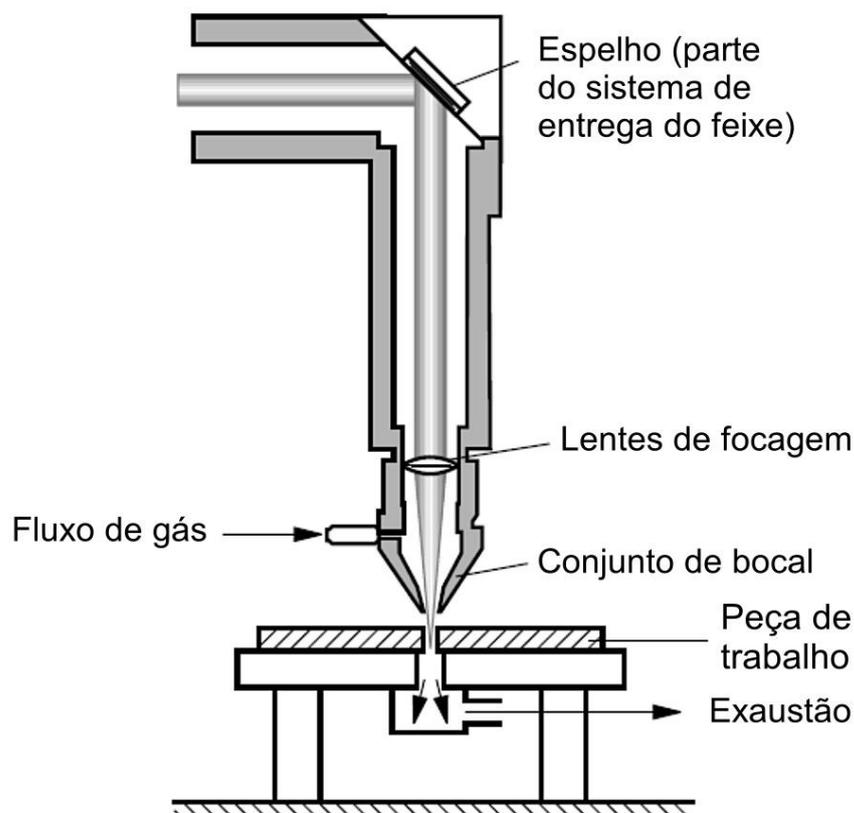
A ablação a laser também é um método para a deposição física de camadas finas. Um feixe de laser pulsado é focado em um alvo feito do material a ser depositado. A interação alvo-feixe faz com que o material que constitui o alvo seja arrancado, por pulverização catódica, evaporação ou mesmo fraturamento mecânico. Este material pode então ser depositado em um substrato colocado em frente ao ponto de laser (PHIPPS, 2011).

### 7.3. COMPONENTES

Os componentes básicos de um sistema de corte estão ilustrados na Figura 44 e incluem

- GERADOR ou FONTE – o sistema que produz o feixe laser, conforme explicado no capítulo 3;
- DIRECIONAMENTO - Um sistema de reflexão do feixe de laser entre o gerador e as lentes de foco (espelhos, prismas, fibra ótica etc.);
- FOCALIZAÇÃO – Lente que posicionará o foco do feixe de laser relativamente à superfície da peça de trabalho;
- MOVIMENTAÇÃO - Uma unidade de movimentação, para fornecer movimento relativo entre o feixe de laser e a peça de trabalho, controlado por computador (CNC);
- EXAUSTÃO - Um conjunto de bocal, geralmente integrado ao conjunto de lente de focagem e coaxial com o feixe, para direcionar o gás de assistência à peça de trabalho e exaustão para o material fundido, residual.

Figura 44 – COMPONENTES DE UM SISTEMA DE CORTE A LASER.



FONTE: Adaptado da figura 15.2 de (KANNATEY-ASIBU JR., Capítulo 15 - Laser Cutting and Drilling, 2009).

O feixe emerge da cavidade frequentemente na horizontal, sendo desviado para baixo na vertical por um espelho ou com o uso de fibra ótica. O feixe é, então, focado pela lente na peça de trabalho. Ao mesmo tempo, um jato de gás é direcionado através de um bocal acoplado à ponta do conjunto de focagem para a peça de trabalho, de modo a sair coaxial ao feixe de laser. Um diâmetro típico de bocal seria de cerca de 1 - 2 mm. As pressões entregues para cortar materiais finos em altas velocidades são, normalmente, mantidas a cerca de 3 a 4 bar (0,3 a 0,4 MPa) no bocal de gás de assistência, logo lentes relativamente grossas precisam ser usadas para suportar altas pressões de gás, o que motiva cuidados com a deformação térmica da lente, sobretudo com o aumento da espessura da lente. O feixe é orientado em uma direção normal à superfície da peça de trabalho, pois espera-se uma deterioração na qualidade do produto se a orientação do feixe se desviar significativamente da direção normal. A distância da ponta do bocal à superfície da peça de trabalho é normalmente mantida constante a cerca de 0,3 mm para minimizar a expansão do fluxo de gás. Transdutores capacitivos podem ser instalados para medir essa distância. A unidade de focagem pode então ser movida usando um terceiro eixo controlado por computador (CNC). De fato, sensores e motores elétricos alimentados por

computadores viabilizaram o corte a laser como o conhecemos (CARISTAN, Laser Cutting Guide for Manufacturing, 2004).

Diretamente oposto ao bocal, no outro lado da peça de trabalho, é montado um sistema de exaustão para absorver o feixe transmitido (já não focalizado), detritos fundidos do corte e vapores de exaustão. Consiste geralmente em uma bomba de vácuo que puxa esta exaustão para uma unidade de descarte.

### 7.3.1. Gases de assistência (descrição resumida inertes e ativos)

Enquanto a luz é focaliza por precisas lentes em uma densidade de potência que pode atingir de  $10^6$  a  $10^9$  W/cm<sup>2</sup> promovendo a fusão imediata (ou mesmo sua sublimação) do material, frequentemente metal, os gases auxiliares do corte têm a não menos importante função de remover o metal derretido da chapa ou tubo que está sendo cortado.

Conforme (CARISTAN, Capítulo 5 - Methods , 2004, p. 127), existem quatro tipos principais de gases auxiliares usados para o corte:

- gás inerte puro, como argônio e hélio;
- gás reativo puro, como oxigênio e hidrogênio;
- gases neutros, como nitrogênio, que *não* são quimicamente reativos com a maioria dos metais e são alternativas de baixo custo aos gases inertes; e
- ar atmosférico (21% O<sub>2</sub> + 78% N<sub>2</sub> + 1% de argônio) ou qualquer combinação dos gases citados acima.

Os três principais gases empregados neste processo, individualmente ou combinados, são o oxigênio, o nitrogênio e ar atmosférico (KANNATEY-ASIBU JR., Capítulo 15 - Laser Cutting and Drilling, 2009, p. 439), cada um com características e resultados diferentes.

**Oxigênio:** além de remover o metal fundido, ele tem um efeito oxidativo que adiciona energia e facilita o corte de metais, fundamental sobretudo para chapas de maior espessura. Enquanto isso, a superfície do material cortado será significativamente oxidada e, também, apresenta um efeito de têmpera na superfície cortada e adjacente, aumentando a dureza no material, o que precisa ser considerado no processamento posterior.

**Nitrogênio:** este gás forma uma atmosfera protetora que evita a oxidação da superfície de corte e promove assim uma qualidade superficial superior no corte, porém por outro lado não tem o efeito de aumentar a transferência de calor e a capacidade de corte como no caso do oxigênio. Outro senão do uso do nitrogênio é o alto consumo deste gás, com efeitos negativos sobre a economia da operação.

**Ar atmosférico:** Composto de 78% de nitrogênio e de 21% de oxigênio, o uso do ar como gás auxiliar terá como resultado alguma oxidação, porém devido ao alto percentual de nitrogênio a oxidação não terá efeito significativo de aumentar a capacidade de corte por meio de uma maior transferência de calor. Entende-se como

uma solução intermediária entre os primeiros gases citados, com a significativa vantagem do custo ser apenas o consumo de energia usado no compressor/secador e o custo do elemento de filtragem do mesmo.

Quadro 4 - TIPOS DE GÁS AUXILIAR TÍPICOS USADOS NO CORTE A LASER INDUSTRIAL DE METAIS.

Material	Gás de assistência (pressão em bar)	Comentário
Aço carbono	O <sub>2</sub> de baixa pressão (1,5-1,8)	Mais comum para 1/4 pol. (6,40 mm) ou mais espesso
Aço carbono	O <sub>2</sub> de média pressão (1,8-5,0)	Mais comum para menos de 1/4 pol. (6,40 mm) de espessura
Aço carbono	N <sub>2</sub> de alta pressão (5-20)	Principalmente para corte de alta velocidade de chapas finas e para evitar escamas de óxido nas bordas de corte de aço
Aço carbono	Ar de alta pressão (5-20)	Principalmente para corte de alta velocidade de chapas finas - velocidade e custo menores do que o N <sub>2</sub> puro e aumenta a oxidação da borda
Aço inoxidável	N <sub>2</sub> de alta pressão (5-20)	Mais comum
Aço inoxidável	Ar de alta pressão (5-20)	Custo inferior ao N <sub>2</sub> puro, mas aumenta a oxidação da borda e a escória
Ligas de alumínio	N <sub>2</sub> de alta pressão (5-20)	Para requisitos especiais de borda de corte não oxidada e / ou placa espessa
Ligas de alumínio	Ar de alta pressão (5-20)	Mais comum para alumínio - menor custo do que N <sub>2</sub> puro, mas aumenta a escória
Ligas de cobre	O <sub>2</sub> de baixa pressão (1,5-1,8)	Moderadamente mais eficiente que o ar
Latão	O <sub>2</sub> de baixa pressão (1,5-1,8)	Moderadamente mais eficiente que o ar
Latão	O <sub>2</sub> ou N <sub>2</sub> de alta pressão (20)	Corte de alta velocidade de folhas finas
Ligas de titânio	Argônio de alta pressão (3-10)	Para aplicações aeroespaciais, O <sub>2</sub> e N <sub>2</sub> reativos são evitados
Ligas de níquel	O <sub>2</sub> de baixa pressão (3)	Para aplicações da indústria de energia, alta velocidade de corte é habilitada, mas com escória e oxidação da borda
Ligas de níquel	N <sub>2</sub> de alta pressão (3-10)	Para aplicações da indústria aeroespacial e de energia, há velocidade de corte mais lenta do que com assistência de O <sub>2</sub> , mas menos escória e nenhuma oxidação de borda

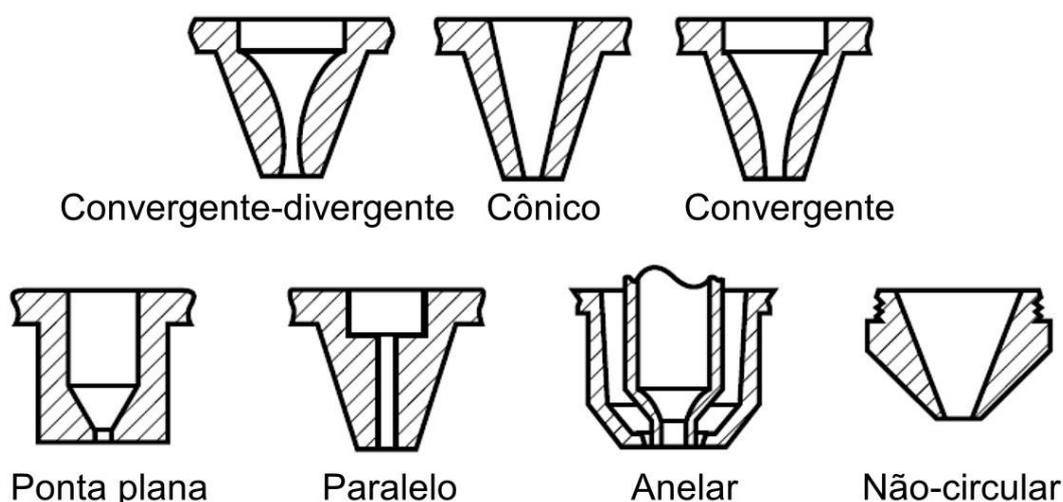
FONTE: Tabela 5-1 de (CARISTAN, Laser Cutting Guide for Manufacturing, 2004, pp. 128-129).

NOTA: Os valores numéricos indicados são pressões absolutas e não relativas à pressão atmosférica. Gás adicional misturas, como Ar / He e N<sub>2</sub> / H<sub>2</sub>, às vezes são úteis para certas aplicações, como titânio ou alta velocidade, folha fina corte.

### 7.3.2. Bocais

Modelos de bocais habitualmente usados para aplicação coaxial de um jato de gás durante o corte a laser são mostrados na Figura 45, sendo que os três primeiros mostrados são os mais comuns: projetos cônico, convergente e convergente-divergente (CARISTAN, Laser Cutting Guide for Manufacturing, 2004).

Figura 45 – PROJETOS DE BICOS PARA CORTE A LASER.



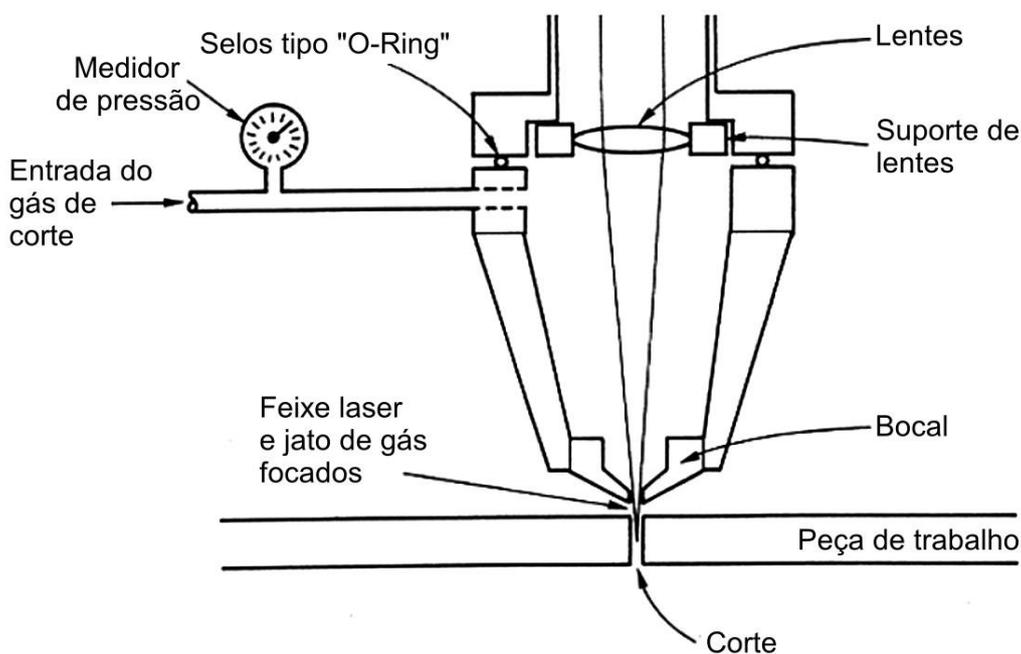
FONTE: (HERZIGER, KREUTZ, & WISSENBACH, 1986) apud (KANNATEY-ASIBU JR., Capítulo 15 - Laser Cutting and Drilling, 2009).

Conforme observa (KANNATEY-ASIBU JR., Capítulo 15 - Laser Cutting and Drilling, 2009, p. 441), resultados de boa repetibilidade são produzidos empregando um bocal coaxial no corte à laser com taxas de fluxo baixas ou subsônicas, especialmente quando o bocal é posicionado próximo à peça de trabalho, ou seja, com uma distância de afastamento (medida do bocal à zona de corte) de cerca de 0,1 a 1,5 mm. Apesar de que a pressão efetiva de corte diminui muito lentamente com o afastamento do bocal (queda apenas 15% em um espaço de 10 mm), comumente distâncias curtas são empregadas (RIVEIRO A. , et al., 2019) pois a direção do jato é altamente sensível a imperfeições na fabricação ou danos nas pontas, o que explica a razão de que menores distâncias sejam preferidas. Kannatey-Asibu observa ainda que, embora pressões ou taxas de fluxo mais altas resultem em velocidades e qualidade de corte mais altas, um fluxo turbulento de gás obtido nestas condições não garante boa repetibilidade ao processo.

A Figura 46 mostra um arranjo típico de uma cabeça de corte a laser, com o feixe de laser focalizado passa pelo centro do bocal coaxialmente ao jato de gás auxiliar de corte, este sim direcionado pelo bocal (POWELL, et al., 2008). Um design do bocal do tipo anelar é mostrado na Figura 47, versão que demonstrou produzir

bordas livres de óxido e de escória quando usada para cortar metais, especialmente aço inoxidável e alumínio de espessuras de até 3,4 mm (STEEN, Capítulo 3 - Laser Cutting, 2003 , p. 137). O processo resultante foi referido como a técnica de "corte limpo", que consiste na utilização de gases não-oxidantes de baixa pressão (cerca de 1 atm) fluindo através do bico interno com intenção de proteger a lente das nuvens de vapor, enquanto os gases não-oxidantes de alta pressão (cerca de 5 atm) fluem através do bico externo com objetivo de remover o material fundido. As imagens na Figura 48 comparam a qualidade de corte obtida para um corte de chapa de aço inoxidável com 2 mm de espessura, usando um assistente tradicional de gás oxigênio e o método de "corte limpo" (ORISHICH, et al., 2008).

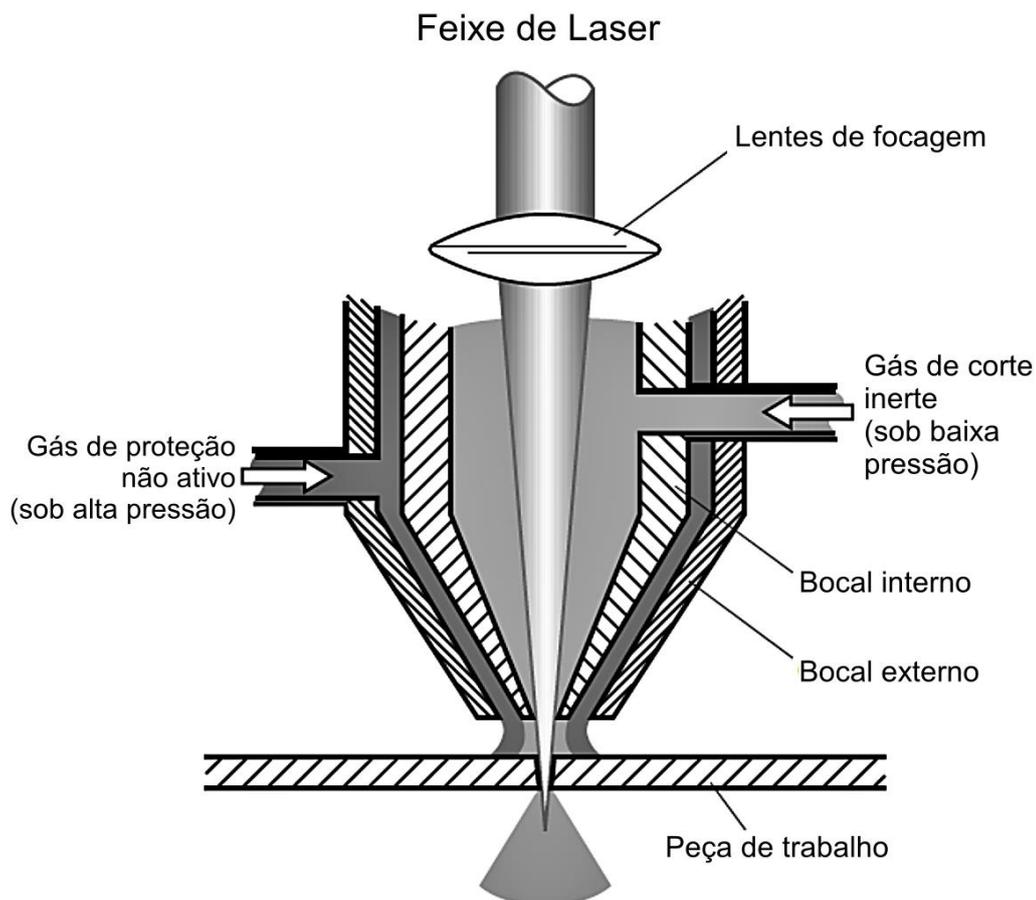
Figura 46 – ESQUEMA DE UMA CABEÇA DE CORTE A LASER.



FONTE: Adaptado da figura 4 de (POWELL, et al., 2008) e figura 1 de (POWELL, IVARSON, KAMALU, BRODÉN, & MAGNUSSON, 1992).

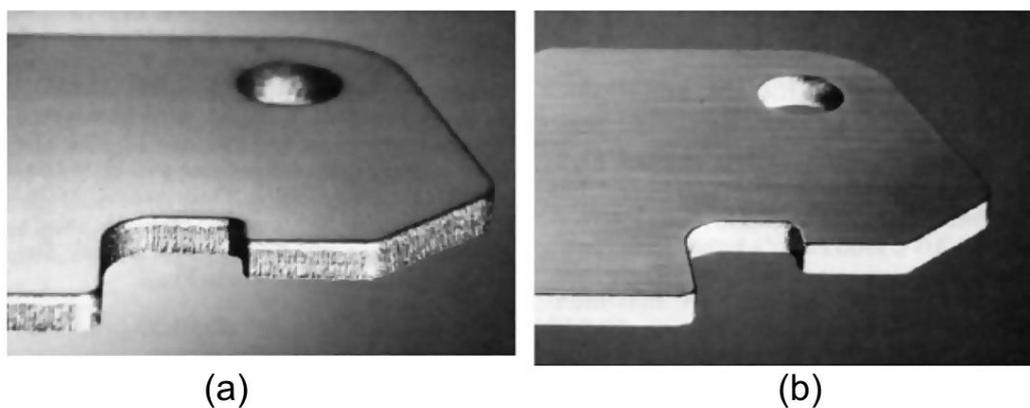
LEGENDA: Um esquema de uma cabeça de corte a laser, mostrando que o feixe de laser focalizado passa pelo bocal coaxialmente com o jato de gás auxiliar de corte.

Figura 47 – ESQUEMA DE CORTE A LASER USANDO O BOCAL ANELAR.



FONTE: Adaptado da figura 3.21 de (STEEN, Capítulo 3 - Laser Cutting, 2003 , p. 137).

Figura 48 – COMPARAÇÃO DO MÉTODO DE “CORTE LIMPO” AO TRADICIONAL NO CORTE DE AÇO INOXIDÁVEL.



FONTE: Adaptado de (KAWASUMI, 1990) apud (KANNATEY-ASIBU JR., Capítulo 15 - Laser Cutting and Drilling, 2009).

LEGENDA: (a): Corte de chapa de aço inoxidável com auxílio de gás oxigênio tradicional. (b): Corte de chapa de aço inoxidável usando o método de "corte limpo".

#### 7.4. CONDIÇÕES DO PROCESSO

Os principais parâmetros que afetam o processo de corte a laser incluem o seguinte:

1. Potência do feixe.
2. Características do feixe.
3. Velocidade.
4. Tipo de gás auxiliar e seu fluxo.
5. Localização do ponto focal em relação à superfície da peça.

A Tabela 1 fornece condições de amostra para o corte a laser de vários materiais. Cada um desses parâmetros é discutido nessa seção secundária.

Tabela 1 - POSSÍVEIS CONDIÇÕES DE CORTE PARA CORTE A LASER DE CO<sub>2</sub> DE DIFERENTES MATERIAIS.

Material	Espessura (mm)	Potência (W)	Velocidade de corte (m/min)	Pressão do Gás (kPa)
Aço carbono	0,5	250	3,5	
Aço carbono	1,5	400	4	
Aço carbono	3	600	3	
Aço carbono	6	1200	1,5	
Aço inoxidável *	1	1000	3,5	600
Aço inoxidável *	1,5	1500	3,5	700
Aço inoxidável *	3	1800	2	800
Aço inoxidável *	6	2000	1	1200
Alumínio **	1	1200	3	600
Alumínio **	1,5	1500	2,5	800
Alumínio **	3	1800	1	1000
Titânio ***	1	800	3,5	600
Titânio ***	1,5	900	3	700

Comentário:

Material	Espessura (mm)	Potência (W)	Velocidade de corte (m/min)	Pressão do Gás (kPa)
----------	----------------	--------------	-----------------------------	----------------------

\* aço inoxidável, gás auxiliar de nitrogênio;

\*\* alumínio, gás auxiliar de nitrogênio;

\*\*\* titânio, gás auxiliar de argônio.

Fonte: Tabelas 2 a 5 do capítulo 12 de (READY & FARSON, LIA Handbook of Laser Materials Processing, 2001)

#### 7.4.1. Potência

A potência é o mais significativo dos parâmetros listados, pois o aumento da potência incrementa diretamente a espessura máxima que pode ser cortada e/ou a velocidade possível do corte (KANNATEY-ASIBU JR., Capítulo 15 - Laser Cutting and Drilling, 2009).

Conforme explica a Dra. Jelínková (JELÍNKOVÁ & ŠULC, 2013, p. 39), a forma de medir em potência, energia ou suas densidades deve ser aplicado no contexto do regime de emissão do laser (consulte 5.2 Modos de operação).

No caso de lasers pulsados, a *energia* como característica da radiação laser de saída é usada preferencialmente. Então a *energia*  $E$  é o conteúdo total (integrado) da energia de um pulso. É medido em Joules (J) e pode ser gerado na ordem dos nanojoules ( $10^{-9}$  J) em microlasers para vários megajoules ( $10^6$  J) ou mesmo mais, para grandes sistemas energéticos.

*Potência de radiação*  $P$  ou *fluxo radiante* é a taxa de fluxo de energia por unidade de tempo, portanto medida em watts. Para um pulso gerado, o pico de potência  $P_{pico}$  da radiação (fluxo de energia durante a duração do pulso) é importante:

$$P_{pico} = \frac{E}{\tau} \quad [\text{W}]$$

Equação 7.1

*Potência de pico*  $P_{pico}$  (W) é definido como energia  $E$  (J) por tempo de interação  $\tau$  (s) (em FWHM, *full width at half maximum*, largura total a metade da intensidade) (SVELTO, Principi dei Laser, 1970). Devido ao possível intervalo de energias geradas – de nJ ( $10^{-9}$  J) até MJ ( $10^6$  J) - e de comprimento dos pulsos - fs ( $10^{-15}$  s) até ms ( $10^{-3}$  s) - podem ser gerado por lasers pulsos que variam de microwatt ( $10^{-6}$  W) até petawatt ( $10^{15}$  W) (JELÍNKOVÁ & ŠULC, 2013).

A grandeza *frequência de repetição de pulso*  $f_{rep}$  (Hertz) é definida como o número de pulsos emitidos por segundo (taxa de repetição). Dependendo da técnica de geração de pulso, meio ativo, tipo de bombeamento etc., a frequência de repetição de pulso pode variar de unidades de Hz a THz ( $10^9$  Hz). Nesse caso, além do pico de potência, também a potência média  $P_{méd}$  (W) para um laser pulsado é definida como energia de pulso  $E$  (J) multiplicada pela frequência de repetição  $f_{rep}$  (Hz =  $s^{-1}$ ) (assumindo que a energia de pulso é constante de pulso para pulso):

$$P_{méd} = E \times f_{rep} \text{ [W]}$$

Equação 7.2

Os *lasers de funcionamento contínuo* (lasers CW) são caracterizados pela *potência média*  $P_{méd}$  de saída, isto é, energia de saída gerada por segundo. No caso de *regime contínuo de comutação Q* ou de *modo bloqueado*, dois níveis de potência são importantes. A potência média (CW) também é definida como uma energia de pulso único  $E$  (J) multiplicada pelo número de pulsos por segundo, e a potência de pico (CW) é a energia de pulso único dividida por sua duração (JELÍNKOVÁ & ŠULC, 2013, p. 39).

#### 7.4.2. Características

Esta parte analisará os parâmetros de radiação do laser de saída que atuam na interação com o material. Cada sistema laser é caracterizado por seus parâmetros de saída, a saber:

- características espectrais
- características temporais
- energia ou densidade de potência
- características espaciais
- brilho.

##### 7.4.2.1. Características espectrais - comprimento de onda gerado

Atualmente, centenas de comprimentos de onda de radiação laser podem ser gerados, desde raios-X até infravermelho distante. O comprimento de onda da radiação a laser é fornecido pelo meio ativo do laser escolhido e pelo arranjo de ressonador aberto. De acordo com o comprimento de onda específico, os lasers são divididos em regiões, conforme mostrado no Quadro 5 adaptado de (READY & FARSON, LIA Handbook of Laser Materials Processing, 2001).

Conforme explicado pela natureza dupla da radiação - dualismo onda-partícula da radiação eletromagnética - a todo comprimento de onda do laser corresponde uma energia específica do fóton (MUTHUKRISHNAN, SCULLY, & ZUBAIRY, 2003). Para a aplicação da radiação laser, é necessário levar em consideração que os *fótons de comprimento de onda curto transportam mais energia que os fótons de ondas infravermelhas e, portanto, a influência das radiações ultravioleta e infravermelho é diferente* (JELÍNKOVÁ & ŠULC, 2013).

Quadro 5 – DEFINIÇÃO DO ESPECTRO ELETROMAGNÉTICO.

Divisão	Subdivisão / Abreviação	Comprimento de onda
Raio-X		0,01 – 25 nm
Ultravioleta	UV	25 – 400 nm
	UV de vácuo	25 – 200 nm
	UV-C	100 – 230 nm

Divisão	Subdivisão / Abreviação	Comprimento de onda
	UV-B	230 – 315 nm
	UV-A	315 – 400 nm
Visível	VIS	400 – 760 nm
	Violeta	0,4 – 0,42 $\mu\text{m}$
	Azul	0,42 – 0,45 $\mu\text{m}$
	Verde	0,45 – 0,57 $\mu\text{m}$
	Amarelo	0,57 – 0,59 $\mu\text{m}$
	Laranja	0,59 – 0,61 $\mu\text{m}$
	Vermelho	0,61 – 0,75 $\mu\text{m}$
Infravermelho	IR	0,75 $\mu\text{m}$ – 1 mm
	Infravermelho próximo; IR-A	0,75 – 1 $\mu\text{m}$
	Infravermelho de ondas curtas; SWIR; IR-B	1 – 3 $\mu\text{m}$
	Infravermelho de ondas médias; MSWIR; IR-C	3 – 5 $\mu\text{m}$
	Infravermelho de ondas longas; LWIR	5 – 14 $\mu\text{m}$
	Infravermelho de ondas muito longas; VLWIR	14 – 30 $\mu\text{m}$
	Infravermelho distante; FIR	15 $\mu\text{m}$ – 1 mm

Fonte: (READY & FARSON, LIA Handbook of Laser Materials Processing, 2001),

#### 7.4.2.2. Estrutura espacial e divergência do raio laser

Para caracterizar completamente a radiação laser, sua estrutura espacial e divergência do feixe de saída são importantes. A *estrutura espacial* é definida pela distribuição da intensidade espacial e pelo perfil. A *divergência* (Equação 7.4), por sua vez, caracteriza-se pelo diâmetro (Equação 7.3) ou raio do feixe e por seu fator de qualidade. Ambos são determinados pelo tipo de ressonador óptico, homogeneidade do meio ativo do laser e elementos ópticos colocados dentro do ressonador (JELÍNKOVÁ & ŠULC, 2013).

### Focagem do feixe de laser

Conforme explicado por (JELÍNKOVÁ & ŠULC, 2013, p. 43), focar o feixe de laser em um diâmetro próximo à magnitude do comprimento de onda  $\lambda$  (consulte subitem 7.4.4) é possível, o que é um ponto muito menor que pode ser alcançado com luz incoerente, de modo que com a radiação laser é possível obter uma intensidade ou fluência extremamente alta. O foco do feixe de laser colimado é mostrado na Figura 49.

O diâmetro de radiação  $2w'_0$  no foco é dado como

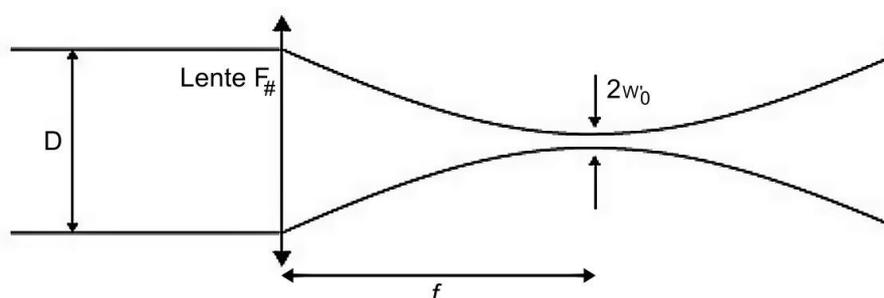
$$2w'_0 = 1,22\lambda * F_{\#} = 1,22\lambda * \frac{f}{D}$$

Equação 7.3

onde  $\lambda$  é o comprimento de onda da radiação,  $F\#$  é o número F da lente,  $f$  é a distância focal da lente e  $D$  é o diâmetro do feixe de laser na lente (SVELTO, Capítulo 8 - Laser Beam Transformation, 1970 ).

O fator  $M^2$  de um feixe de laser limita o grau em que o feixe pode ser focado para um dado ângulo de divergência do feixe  $\theta$ . Juntamente com a potência óptica, o fator de qualidade (vide Equação 8.3) do feixe determina o brilho do feixe de laser (CARISTAN, Capítulo 5 - Methods , 2004).

Figura 49 - FOCO DE FEIXE LASER.



FONTE: Adaptado da figura 2.22 de (JELÍNKOVÁ & ŠULC, 2013).

LEGENDA:  $2w_0$  é o diâmetro de radiação no foco,  $F\#$  é o número F da lente tal que  $(F\# = \frac{f}{D})$ , onde  $f$  é a distância focal da lente e  $D$  é o diâmetro do feixe de laser na lente (SVELTO, Capítulo 8 - Laser Beam Transformation, 1970 ).

#### 7.4.2.3. Modo de raio

Comparável à afiação de uma ferramenta de corte, o modo de raio está relacionado à capacidade do feixe de ser focado e é uma indicação de como a intensidade da energia é distribuída pela seção transversal do feixe. Para que haja a possibilidade de focar no menor tamanho de ponto possível, um feixe de baixa divergência é necessário por sua previsibilidade de propagação (JELÍNKOVÁ & ŠULC, 2013). Esse raio laser possui um perfil de intensidade gaussiano ideal (Figura 18), correspondendo ao modo  $TEM_{00}$  fundamental teórico, sendo este o modo que pode ser focado no menor tamanho focal teórico possível do laser e, portanto, com a maior densidade para uma determinada potência. Reunindo estes fatores, reduz-se a largura do corte e aumenta-se a velocidade de corte e a espessura dos materiais que podem ser cortados (NIZIEV & NESTEROV-MUELLER, 1999). Como os feixes de ordem superior ou multimodo são mais dispersos, eles resultam em tamanhos de ponto focal maiores e, por consequência, menor densidade de potência para a mesma potência de saída (Figura 19) (KANNATEY-ASIBU JR., Capítulo 2 - Optical Resonators, 2009).

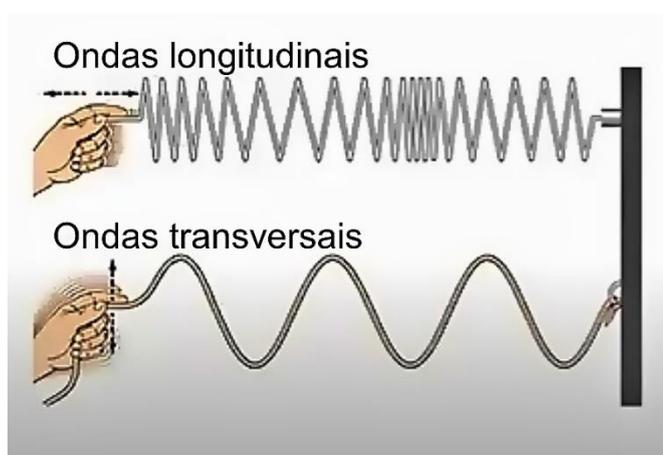
#### 7.4.2.4. Estabilidade

A estabilidade do feixe irá garantir que a potência, modo e direção do feixe (estabilidade do foco) permaneçam constantes com o tempo. Um feixe instável afeta as tolerâncias e o acabamento da superfície alcançáveis com o corte a laser, enquanto um feixe estável reduz as variações na produção e melhora a qualidade. A estabilidade do feixe é uma característica do gerador a laser e depende do seu design (DICKY & HOLSWADE, 2000) (KANNATEY-ASIBU JR., Capítulo 2 - Optical Resonators, 2009).

#### 7.4.2.5. Polarização

A luz é uma onda eletromagnética que, como tal, é uma onda transversal. Ondas transversais têm sua oscilação perpendicular à sua propagação, vibram em uma direção perpendicular à propagação, conforme representado na Figura 50. Podem, portanto, oscilar em infinitas direções que sejam perpendiculares à sua propagação, conforme esquematicamente representado à esquerda na Figura 51 (SILVA JR., 2020).

Figura 50 – ESQUEMA REPRESENTATIVO DE ONDAS LONGITUDINAIS E DE ONDAS TRANSVERSAIS.



FONTE: (SANTOS, 2017)

LEGENDA: Nas ondas longitudinais, a direção de vibração é igual à direção de propagação. Nas ondas transversais, a direção de vibração é perpendicular à direção de propagação.

A luz que oscila em várias direções é dita não-polarizada (o sol, lâmpadas, velas, etc.). O fenômeno da polarização da luz consiste em permitir que a onda oscile em apenas uma direção, utilizando habitualmente um filtro polarizador. O filtro polarizador absorverá as ondas que vibram em todas as outras direções e permitirá a passagem somente daquela que vibra na vertical (Figura 51).

Figura 51 – ESQUEMA REPRESENTATIVO PARA POLARIZAÇÃO DA LUZ COM USO DE UM FILTRO POLARIZADOR.

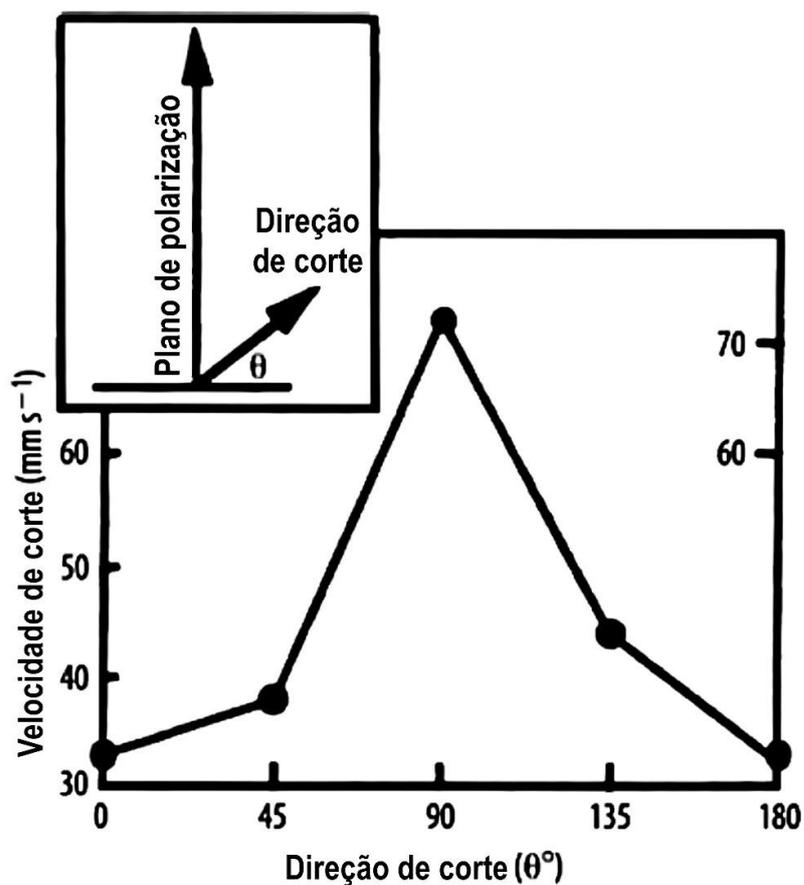


FONTE: (Pura Física, 2017)

Um feixe laser de saída não polarizado resulta em menor qualidade da peça cortada, como variações no corte, menor suavidade da borda e na sua perpendicularidade. Isso se deve principalmente ao impacto da polarização na absorção do feixe pelo material (NIZIEV & NESTEROV-MUELLER, 1999). A absorção do feixe de laser durante o corte é determinada usando as relações de Fresnel, que indicam que a absorção depende do ângulo de incidência e da polarização. Resultados experimentais indicam que, no corte a laser de CO<sub>2</sub>, os feixes que são polarizados em um plano paralelo à direção do corte resultam em velocidades de corte que podem ser até 50% maiores do que aquelas que são polarizadas no plano no plano normal à direção do corte (KANNATEY-ASIBU JR., Capítulo 9 - Beam Delivery, 2009, p. 192).

A qualidade do corte varia com a orientação do plano de polarização, e um feixe polarizado circular geralmente resulta em melhor qualidade de corte quando a direção do corte muda. Assim, o corte de perfil ou contorno é feito de preferência usando um feixe polarizado circularmente. Geralmente, o feixe polarizado circularmente resulta em maiores velocidades de corte em níveis mais altos de potência, de acordo com William M. Steen no subitem *Effect of Beam Polarisation* no capítulo 3 de seu livro (STEEN, Capítulo 3 - Laser Cutting, 2003), bem representado na Figura 52.

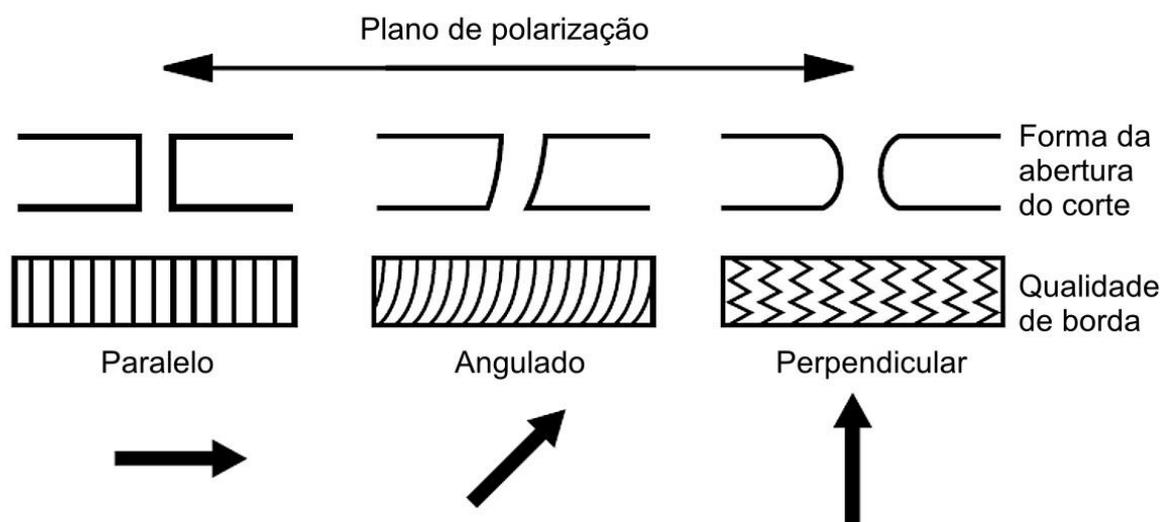
Figura 52 - O EFEITO DA POLARIZAÇÃO NO DESEMPENHO DE CORTE COM DIREÇÃO DE CORTE.



FONTE: Adaptado da figura 3.18 de (STEEN, Capítulo 3 - Laser Cutting, 2003 ).

O impacto da orientação de um feixe linearmente polarizado na qualidade do corte é ilustrado esquematicamente na Figura 53. Como mostra a figura, quando o feixe é polarizado na direção do corte - na representação à esquerda daquela figura - o corte resultante pode ter abertura mais estreita, com bordas retas e afiadas. No entanto, à medida que o plano de polarização é orientado para longe da direção de corte - representados esquematicamente no centro e à direita na Figura 52 - a absorção de energia diminui e, como resultado, a velocidade de corte é reduzida, a abertura do corte fica mais larga, as bordas mais ásperas e arredondadas com a superfície do material (KANNATEY-ASIBU JR., Capítulo 9 - Beam Delivery, 2009).

Figura 53 - EFEITO DA ORIENTAÇÃO DO LASER POLARIZADO PLANO NA QUALIDADE DE CORTE.



FONTE: Adaptado da figura 15.3 (KANNATEY-ASIBU JR., Capítulo 15 - Laser Cutting and Drilling, 2009).

#### 7.4.2.6. Forma do feixe (onda pulsada ou contínua).

Conforme explicado no item 5.2, os feixes de onda pulsada ou de onda contínua (CW) podem ser produzidos na emissão laser, além de variações mais específicas.

Para feixes pulsados, a rugosidade da superfície diminui com o aumento da carga de pulso, logo a qualidade do corte é afetada pela carga de pulso. A carga de pulso é a razão entre o período ( $\tau$ ) durante o qual o feixe de laser está ligado em um ciclo e o período total do tempo de ciclo. As velocidades máximas de corte que podem ser alcançadas são significativamente reduzidas a baixas taxas de pulso (número de pulsos por segundo), pois em baixas taxas de pulso há tempo suficiente entre os pulsos para o material esfriar substancialmente (KANNATEY-ASIBU JR., Capítulo 15 - Laser Cutting and Drilling, 2009). Isso ajuda a extinguir a reação de oxidação exotérmica, reduzindo assim a eficiência geral do processo. A temperatura média mais baixa resultante aumenta a tensão superficial ou a viscosidade do material fundido, dificultando o fluxo para fora da zona de reação, assim há uma maior probabilidade de formar escória (GARCÍA-LÓPEZ, MEDRANO-TELLES, IBARRA-MEDINA, SILLER, & RODRIGUEZ, 2017).

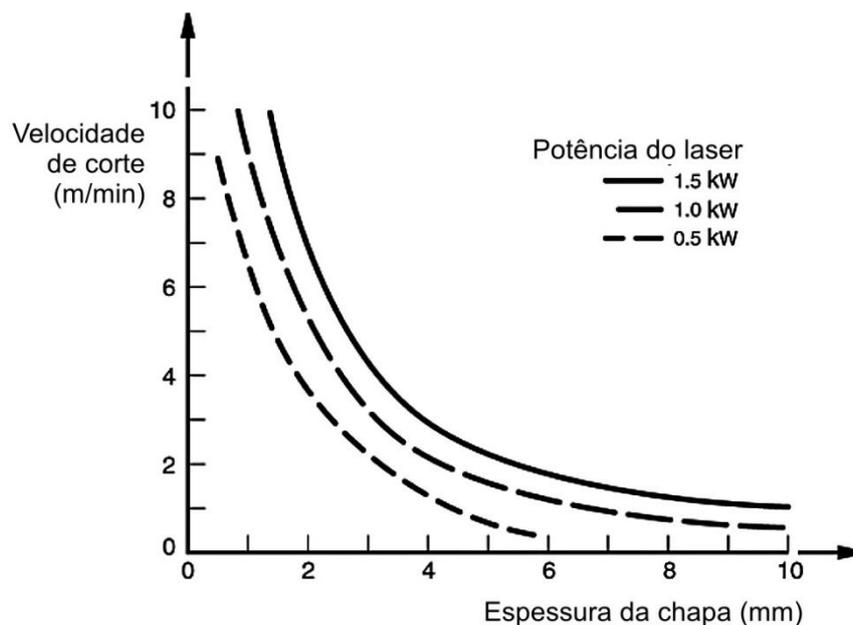
Apesar das inconveniências apontadas no parágrafo acima para baixas frequências, no caso de altas frequências de onda pulsada há algumas vantagens no desempenho do processo e sua eficiência geral em comparação à saída contínua. Usando *superpulsção* ou *hiperpulsção*, uma maior espessura de corte (até cerca de 100% maior) pode ser alcançada para a mesma potência média que uma saída de

onda contínua (CW) (KANNATEY-ASIBU JR., Capítulo 14 - Background on Laser Processing, 2009, p. 414). Velocidades de processamento aumentadas (20–33%) para a mesma potência média que uma saída CW. Por fim, a onda pulsada facilita o processamento de materiais altamente refletivos e/ou de alta condutividade térmica, como o alumínio. (SHARP, 1987) apud (STEEN, Capítulo 3 - Laser Cutting, 2003 ).

#### 7.4.3. Velocidade transversal

Para uma dada potência laser, observa-se que a velocidade máxima atingível diminui com o aumento da espessura da peça de trabalho (Figura 54), conforme cita Steen no subitem *Effect of Power* do capítulo 3 (STEEN, Capítulo 3 - Laser Cutting, 2003 ). Para uma determinada potência, um gráfico da variação da velocidade de corte com a espessura geralmente terá duas curvas limitantes (Figura 55), com a zona aceitável entre elas. A curva superior indica a velocidade máxima que pode ser alcançada para uma dada espessura. Acima da curva superior, o corte estará incompleto, a abertura de corte pode não se abrir e o material fundido não será expelido. Abaixo da curva inferior, ocorre a “autoqueima”, isto é, o material continua a queimar sem a ajuda do laser, o que geralmente amplia o corte e produz uma indesejável aspereza na superfície.

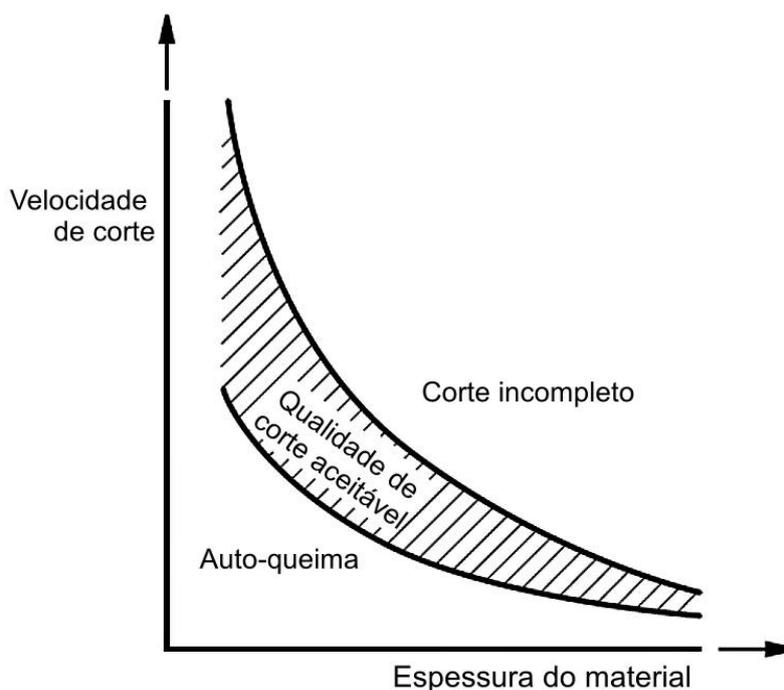
Figura 54 - VARIAÇÃO DA TAXA DE CORTE COM A ESPESSURA DA PEÇA (EM AÇO) NO CORTE A LASER ASSISTIDO POR OXIGÊNIO.



FONTE: Adaptado da figura 15.4 de (KANNATEY-ASIBU JR., Capítulo 15 - Laser Cutting and Drilling, 2009).

LEGENDA: Variação da velocidade de corte (taxas máximas de corte) com a espessura da peça em corte a laser assistido por oxigênio de chapa de aço.

Figura 55 - CURVAS DE LIMITE PARA VELOCIDADE DE CORTE COM VARIAÇÃO DA ESPESSURA DA PEÇA NO CORTE A LASER.



FONTE: Adaptado da figura 15.5 de (KANNATEY-ASIBU JR., Capítulo 15 - Laser Cutting and Drilling, 2009).

#### 7.4.4. Resumo dos parâmetros do feixe de laser

Os principais parâmetros de saída da radiação laser são resumidos da seguinte forma (JELÍNKOVÁ & ŠULC, 2013):

**Comprimento de onda  $\lambda$  ( $\mu\text{m}$ )** - característica espectral específica da radiação laser, sua posição no espectro eletromagnético (Figura 56);

**O número de onda  $\nu$  ( $\text{cm}^{-1}$ )** é conectado ao comprimento de onda  $\lambda$  (cm) da radiação gerada pela equação  $\nu=1/\lambda$ .

**A largura do pulso (duração)  $\tau$**  é dada pelo comprimento temporal do pulso do laser; isto é, o tempo durante o qual o laser realmente emite energia.

**Frequência de repetição (taxa de repetição)  $f_{rep}$  (Hz)** - número de pulsos de laser emitidos periodicamente por segundo (Figura 56).

**Energia ou Carga de pulso  $E$  (J)** - o conteúdo total de energia de um pulso.

**Potência de pico  $P_{pico}$  (W)** (laser pulsado ou quase-laser) - energia gerada  $E$  (J) por comprimento do pulso  $\tau$  (s);  $P_{pico} = \frac{E}{\tau}$ .

**Potência média  $P_{méd}$  (W)** (laser pulsado ou laser quase-contínuo) - energia de pulso único  $E$  (J) gerada multiplicada pela frequência de repetição  $f_{rep}$  (Hz);  $P_{méd} = E \times f_{rep}$ .

**Potência (laser CW)  $P$  (W)** - energia de saída gerada por segundo.

**O tamanho do ponto do feixe  $A$  (cm<sup>2</sup>)** refere-se à área do raio laser no alvo ( $A = \pi * w^2$ , onde  $w$  é o raio do ponto do feixe, no foco  $w = w_0$ ).

**Densidade de energia (fluência ou dose de energia)  $F$  (J/cm<sup>2</sup>)** - a quantidade de energia  $E$  (J) entregue à área tratada  $A$  (cm<sup>2</sup>);  $F = \frac{E}{A}$ .

**Intensidade, irradiância, densidade de potência  $I$  (W/cm<sup>2</sup>)** - potência  $P$  (W) por área irradiada  $A$  (cm<sup>2</sup>);  $I = \frac{P}{A}$ .

**Ângulo de divergência do feixe de laser  $\theta$  (rad)** - é definido pelo fator de qualidade do feixe  $M^2$ , comprimento de onda gerado  $\lambda$  (cm) e um raio pontual na cintura do feixe  $w_0$  (cm);

$$\theta = \frac{M^2 * \lambda}{\pi * w_0}$$

Equação 7.4

O Quadro 6, compilado pelo Dr. Kaplan (KAPLAN, 2002), resume os parâmetros relevantes no corte a laser.

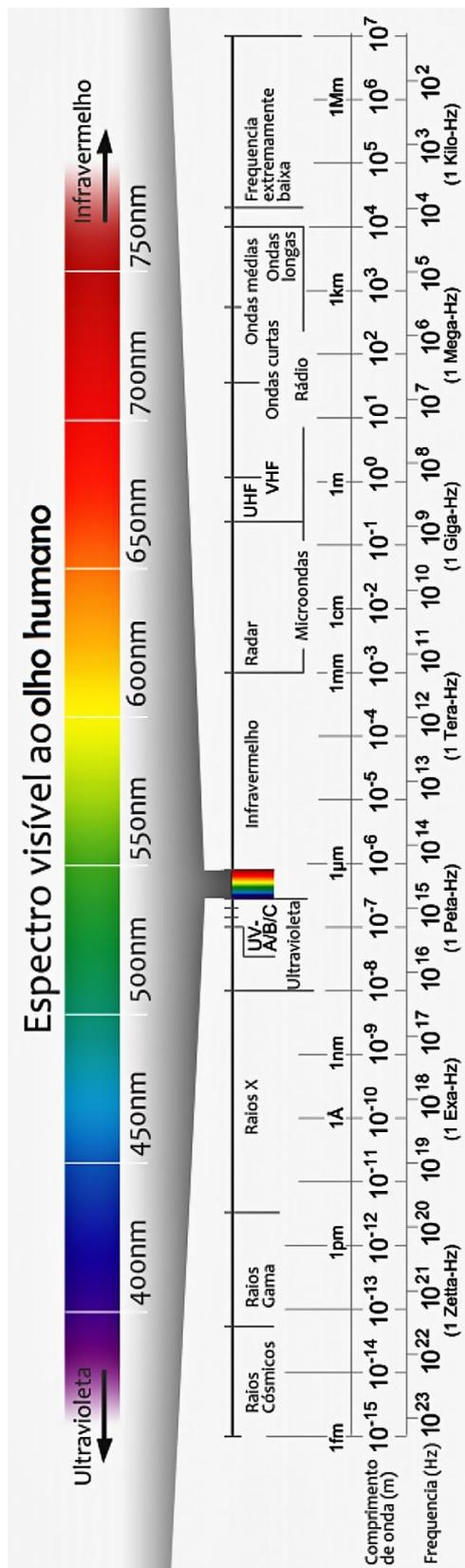
Quadro 6 - PARÂMETROS DE PROCESSAMENTO RELACIONADOS À DINÂMICA DOS PROCESSOS DE CORTE A LASER.

Feixe Raio Laser	Direcionamento do Feixe	Gás de Assistência	Propriedades de Transporte	Material
Comprimento de onda	Elemento de foco	Composição química	Velocidade de corte	Absorção
Diâmetro do feixe	Comprimento focal	Densidade		Densidade
Modo de feixe	Posição de foco	Viscosidade		Viscosidade
Produto de parâmetro de feixe		Pressão auxiliar		Ponto de fusão
Distribuição de intensidade		Geometria do bico		Ponto de evaporação
		Diâmetro do bico		Capacidades de calor específicas

<b>Feixe Raio Laser</b>	<b>Direcionamento do Feixe</b>	<b>Gás de Assistência</b>	<b>Propriedades de Transporte</b>	<b>Material</b>
espacial (perfil de feixe) Polarização Modo CW / Pulsado Frequência de pulso Ciclo de trabalho		Alinhamento do bico Distância de afastamento		Difusividade térmica Calor de fusão latente Calor latente de evaporação

Fonte: Adaptado de (KAPLAN, 2002) apud (RIVEIRO A. , et al., 2019)

Figura 56 - ESPECTRO ELETROMAGNÉTICO.



FONTE: Adaptado de (Wikimedia Commons, 2008).

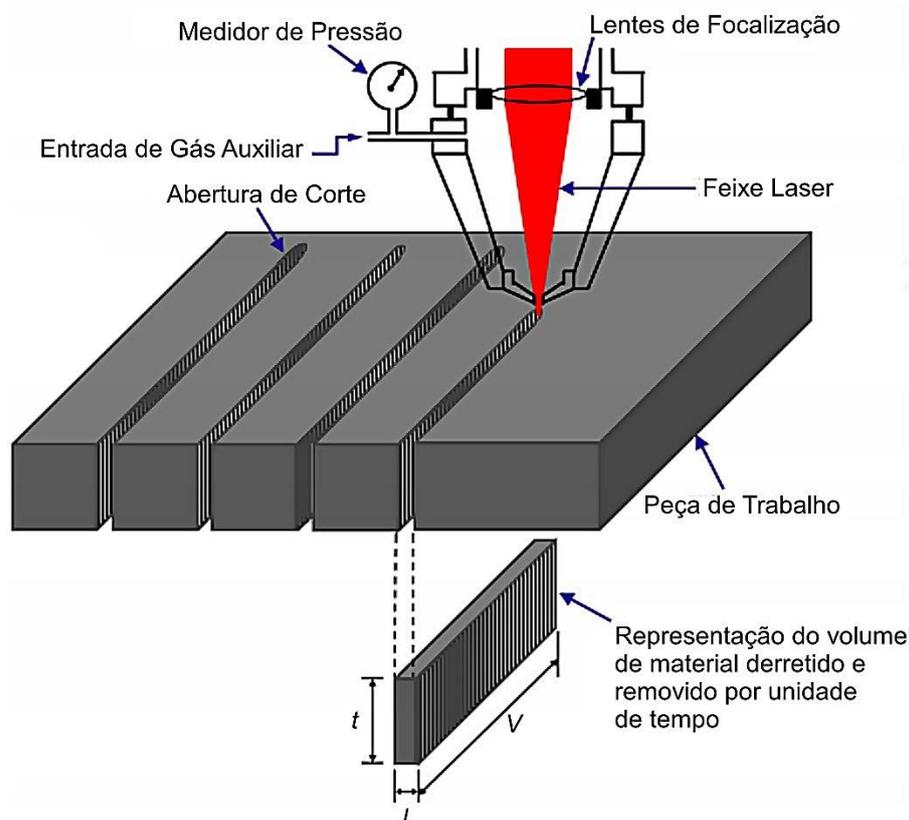
## 7.5. FUNÇÕES DO GÁS AUXILIAR E SEU FLUXO

O gás auxiliar do corte a laser atende a uma ou mais das seguintes funções:

1. Facilita a ejeção do metal fundido pela parte de trás da peça de trabalho.
2. Protege a lente contra respingos.
3. Se ativo, atua como fonte de calor, por meio de uma reação exotérmica que auxilia no corte, como pode ocorrer no corte de aço assistido por oxigênio.
4. Quando inerte, cria uma atmosfera não oxidativa.

Para a atual tecnologia de corte a laser de metal de seção espessa, o uso de um gás inerte ou um gás ativo é indispensável (RIVEIRO A. , et al., 2019). A Figura 57 ilustra esquematicamente a abertura de corte gerada e o volume de material removido durante o corte por fusão a laser de metais de seção espessa. O corte é a abertura criada durante a penetração através da espessura de uma peça de trabalho; a largura do corte,  $w$ , mostrada na Figura 57 é, portanto, a distância de separação entre as duas superfícies de corte, que representa a quantidade de material removido durante o processo de corte a laser. A potência do laser absorvida na frente de corte é utilizada no derretimento do volume do corte, porém parte da potência absorvida do laser é perdida na zona de corte através da condução de calor no metal do substrato.

Figura 57 - ABERTURA DE CORTE GERADA E VOLUME DE MATERIAL REMOVIDO.



FONTE: Adaptado de figura 1 de (WANDERA, SALMINEN, & KUJANPÄÄ, Inert gas cutting of thick-section stainless steel and medium-section aluminum using a high power fiber laser, 2009, p. 155).

### 7.5.1. Efeito dos diferentes tipos de gases de assistência

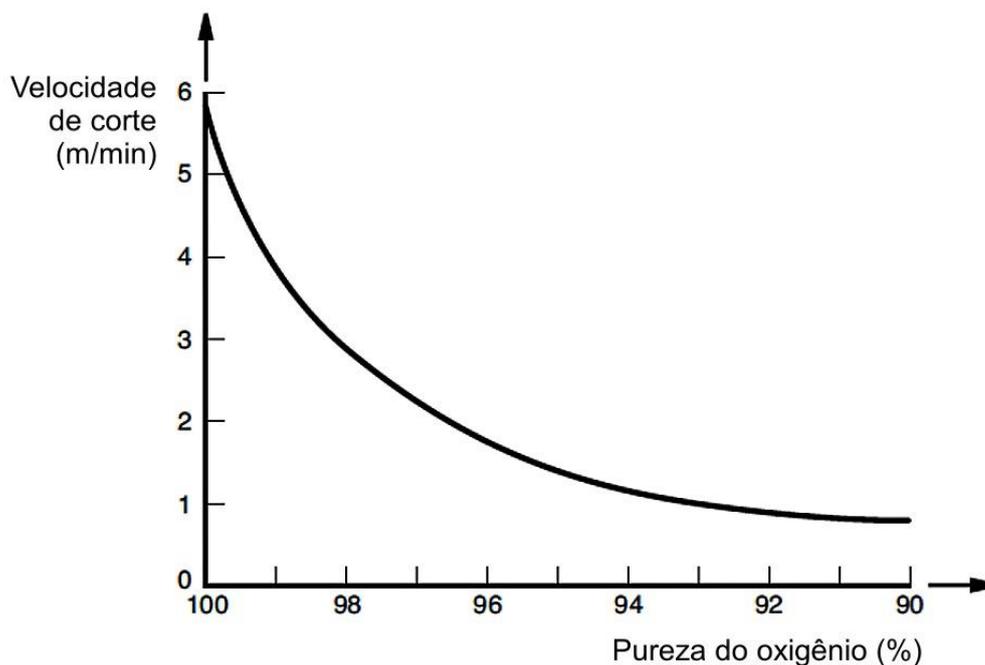
Segundo (CARISTAN, Laser Cutting Guide for Manufacturing, 2004), conforme já mencionado em 7.3.1, gases comumente usados incluem oxigênio, gases inertes, nitrogênio e ar atmosférico (seco e filtrado).

O oxigênio ou o ar são utilizados para reações exotérmicas durante o corte e, portanto, melhoram a eficiência do corte. A reação de oxidação exotérmica contribui com até 40% da energia usada no corte a laser de aço macio e aço inoxidável usando jato de gás auxiliar de oxigênio (STEEN, Fusion Cutting - Melt and Blow, 2003). Nestes casos que a reação exotérmica é desejada, a decisão de usar oxigênio ou ar depende principalmente da economia. O ar atmosférico é mais barato, mas exige fluxo maior para a mesma quantidade de energia térmica produzida. Além disso, o ar pode introduzir outros gases como o nitrogênio e hidrogênio na superfície de corte, tornando-o mais quebradiço (KANNATEY-ASIBU JR., Capítulo 11 - The Microstructure, 2009). Um ponto negativo do corte assistido por oxigênio é a deposição de uma camada de óxido na superfície do corte, dando uma aparência escura ou amarelada. Dependendo do uso subsequente das peças cortadas, pode ser necessário limpar essa camada de óxido (por lixamento ou escova de arames) (STEEN, Fusion Cutting - Melt and Blow, 2003).

No caso oposto utiliza-se um gás inerte (geralmente argônio) para auxiliar na ejeção do metal fundido sem ocorrer oxidação, formando uma atmosfera livre de oxigênio (AGGOUNE, AMARA, & DEBIANE, 2012). O uso de gases inertes ou nitrogênio elimina a formação da camada de óxido, entretanto isso pode reduzir significativamente as velocidades de corte que podem ser alcançadas. Além disso, pressões mais altas são necessárias para reduzir a formação de escória. A escória é um material fundido que se adere e solidifica na parte inferior da aresta de corte como rebarba (SHENG & JOSHI, 1995).

Pequenos níveis de impureza nos gases podem causar desvios significativos no desempenho do corte (como uma redução na velocidade máxima de corte ou aumento na adesão da escória) em comparação com o gás puro, seja oxigênio ou gás inerte. Isso é ilustrado na Figura 58, que mostra uma variação da velocidade de corte para vários níveis de pureza do gás oxigênio. Essa sensibilidade à contaminação se deve ao acúmulo de uma camada limite do contaminante na interface líquida da frente de corte (CARISTAN, Laser Cutting Guide for Manufacturing, 2004). Isto diminui a taxa de oxidação do material, diminuindo assim a entrada de energia na zona de corte.

Figura 58 - VELOCIDADE DE CORTE EM FUNÇÃO DA PUREZA DO GÁS OXIGÊNIO.



FONTE: Adaptado da figura 3 de (POWELL, IVARSON, KAMALU, BRODÉN, & MAGNUSSON, 1992)

LEGENDA: Velocidade de corte em função da pureza do gás oxigênio. Aço macio de 2 mm de espessura, cortado a 800 W a 2,5 bar de pressão.

#### 7.5.1.1. Gases inertes

O principal papel do jato de gás de assistência inerte durante o corte a laser de uma peça de metal é ejetar o volume de metal fundido para criar a abertura de corte. Cria também uma atmosfera livre do oxigênio, totalmente ocupada pelo gás inerte, por esta razão materiais metálicos como aço inoxidável e alumínio são frequentemente cortados a laser usando um jato de gás auxiliar inerte para favorecer bordas de corte não oxidadas, limpas, que não exigem nenhuma operação de limpeza após o corte. Gases puramente inertes são o argônio e o hélio. O nitrogênio, apesar de não ser um gás inerte puro, é classificado como um gás neutro e é largamente empregado no corte a laser como uma opção de menor custo aos gases inertes puros. O nitrogênio, portanto, pode ser aceito nesta classificação pois é quimicamente não-reativo à maioria dos metais (CARISTAN, Capítulo 5 - Methods, 2004). O processo de corte por fusão a laser assistida por gás inerte utiliza um feixe de laser de alta intensidade focado para derreter o volume do corte e um jato de gás inerte de alta pressão coincidente, coaxial, para soprar o metal fundido e formar a abertura de corte. Durante o corte de metal inerte por fusão a laser assistida por gás, a temperatura de fusão *não* é elevada ao ponto de ebulição pois a potência absorvida do laser é a única contribuição de energia recebida para a zona de corte, assim o processo de remoção do derretimento depende exclusivamente da força de arrasto fornecida pelo jato de gás auxiliar de alta pressão (AGGOUNE, AMARA, & DEBIANE, 2012). Devido à

contabilização das inevitáveis perdas de energia da zona de corte – condução para o metal de base e reflexividade do feixe pelo metal fundido – apenas uma parcela da a potência do laser absorvida é efetivamente utilizada na fusão do material. Portanto, em um processo de corte por fusão a laser puro - típico para corte de metal de seção espessa - em que o volume de corte é derretido, mas vaporizado de maneira insignificante e as perdas de potência de condução da zona de corte são significativas, o balanço de potência na frente de corte é dado na Equação 7.5 (STEEN, Capítulo 3 - Laser Cutting, 2003 )

$$A * P_L = P_{Fusão} - P_{Perda}$$

Equação 7.5

onde  $A$  é a absorção da peça de trabalho à radiação incidente a laser,  $P_L$  é a potência incidente a laser,  $P_{Fusão}$  é a energia utilizada na fusão do volume de corte e  $P_{Perda}$  é a inevitável perda de energia da zona de corte.

#### 7.5.1.2. Gases reativos

Durante o corte de fusão reativa, o raio laser incidente derrete a peça de trabalho e, também, inicia e continua a reação exotérmica entre o metal fundido e o oxigênio presente no jato de gás ativo. Portanto, o jato de gás de assistência ativo que passa pelo corte desempenha dois papéis importantes, que incluem exercer a força de arrasto necessária para soprar o material fundido para fora da abertura de corte e fornecer calor adicional ao processo de corte. Conseqüentemente, para a mesma potência de laser incidente, as velocidades do corte à laser com fusão reativa usando um gás de assistência ativo (oxigênio ou ar comprimido) são geralmente mais altas em comparação com o processo de corte com gás inerte (RIVEIRO A. , et al., 2019). As contribuições de energia recebidas para a zona de corte durante o corte a laser com gás ativo incluem a potência absorvida do laser e a potência da reação de oxidação exotérmica. No corte por fusão reativa de metais de seção espessa, a proporção do volume de corte que é vaporizado é considerada insignificante devido às altas perdas de condução que aumentam com o acréscimo da espessura da peça. A transferência de calor por condução da frente de corte através das paredes do corte para o metal do substrato é o meio mais significativo de perda de energia da zona de corte (STEEN, Capítulo 3 - Laser Cutting, 2003 ).

O óxido de ferro (FeO) gerado no corte a laser de aço macio assistido por oxigênio não ferve, mas se dissocia quando aquecido a altas temperaturas, processo este que consome muita energia pode levar ao colapso do processo de corte (POWELL, et al., 2008). Portanto, é suficiente assumir que o óxido de metal fundido é removido através do fundo do corte cortado sem vaporização. A oxidação do metal fundido durante o corte a laser é sustentada na medida em que os reagentes -  $O_2$  e metal fundido - estão disponíveis na zona de interação do material do laser. Portanto, a contribuição de potência para o processo de corte pela reação de oxidação é estimada a partir do fluxo de oxigênio na zona de interação ou do fluxo de ferro fundido

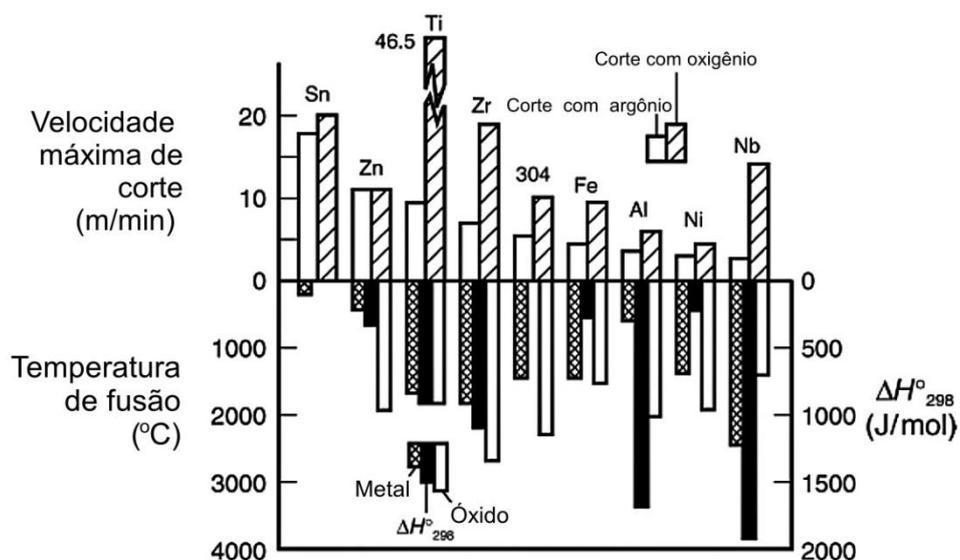
na zona de interação (READY & FARSON, LIA Handbook of Laser Materials Processing, 2001).

No processo por fusão reativa, as velocidades de corte são muito mais altas do que no corte por fusão com um gás auxiliar inerte devido ao calor adicional adicionado pela reação exotérmica. Devido à alta produtividade do corte por fusão reativa, esse método é frequentemente usado na indústria para o corte de aço-carbono (isto é, aço de baixa liga) (RIVEIRO A. , et al., 2019). A presença da camada de óxido na borda cortada é a desvantagem deste processo, pois a camada de óxido na borda cortada influencia a qualidade final da peça; essa camada de óxido pode precisar ser removida em uma operação de limpeza antes do processamento adicional da peça em operações de soldagem e pintura (POWELL, et al., 2008).

Para demonstrar o impacto da assistência por oxigênio no corte de vários materiais, a Figura 59 mostra as velocidades máximas de corte atingíveis para diferentes materiais quando cortadas usando gás inerte em comparação à assistência por oxigênio. Além da reação exotérmica resultante, o uso de oxigênio ajuda no corte ao reduzir a viscosidade e tensão superficial de alguns metais, facilitando o fluxo do metal fundido para fora da frente de corte. A Tabela 2 compara a tensão superficial de alguns metais e óxidos. O filme de óxido formado também tende a aumentar a absorção do feixe na poça de fusão (KANNATEY-ASIBU JR., Capítulo 15 - Laser Cutting and Drilling, 2009).

As velocidades máximas de corte alcançadas dependem das propriedades térmicas do metal. Conforme o gráfico da Figura 59, são obtidas velocidades mais altas para metais de baixos pontos de fusão e baixa condutividade térmica para corte assistido por gás inerte. As velocidades máximas de corte são mais altas para o corte assistido por oxigênio, em comparação com a assistência de gases inertes, para o corte de titânio, zircônio e nióbio devido à energia exotérmica relativamente alta associada a esses metais (MIYAMOTO & MARUO, 1991). Uma desvantagem é que a qualidade da superfície obtida é relativamente baixa, devido ao fato de que a região de oxidação não se limita à região de irradiação do feixe como resultado da alta energia exotérmica. Deve-se ter cuidado no corte assistido por oxigênio, pois o excesso de oxigênio pode resultar em reação exagerada ou queima incontrolável longe da direção principal do corte, especialmente para materiais espessos. Isso pode aumentar a formação de estrias e, conseqüentemente, da rugosidade (MIYAMOTO & MARUO, 1991). Para maiores detalhes sobre o comportamento de cada metal ao corte a laser e a reação exotérmica numa atmosfera oxidante, consulte o subitem 7.8.1.

Figura 59 - COMPARAÇÃO DA VELOCIDADE MÁXIMA DE CORTE COM O<sub>2</sub> E COM ARGÔNIO PARA DIFERENTES METAIS.



FONTE: Adaptado da figura 1 de (MIYAMOTO & MARUO, 1991, p. 283)

LEGENDA:  $\Delta H^\circ$  é a energia associada à reação exotérmica do processo. (Laser CO<sub>2</sub> 1 kW CW, 1mm de espessura)

Tabela 2 – VALORES DE TENSÃO SUPERFICIAL PARA ALGUNS METAIS E ÓXIDOS.

Material	Temperatura de fusão (°C)	Tensão superficial (g/s <sup>2</sup> = dyne/cm)
Cu	1085	1350
Fe	1538	1700–1800
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	2050–2400	360–570
Cr <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	2350–2500	810
FeO		580

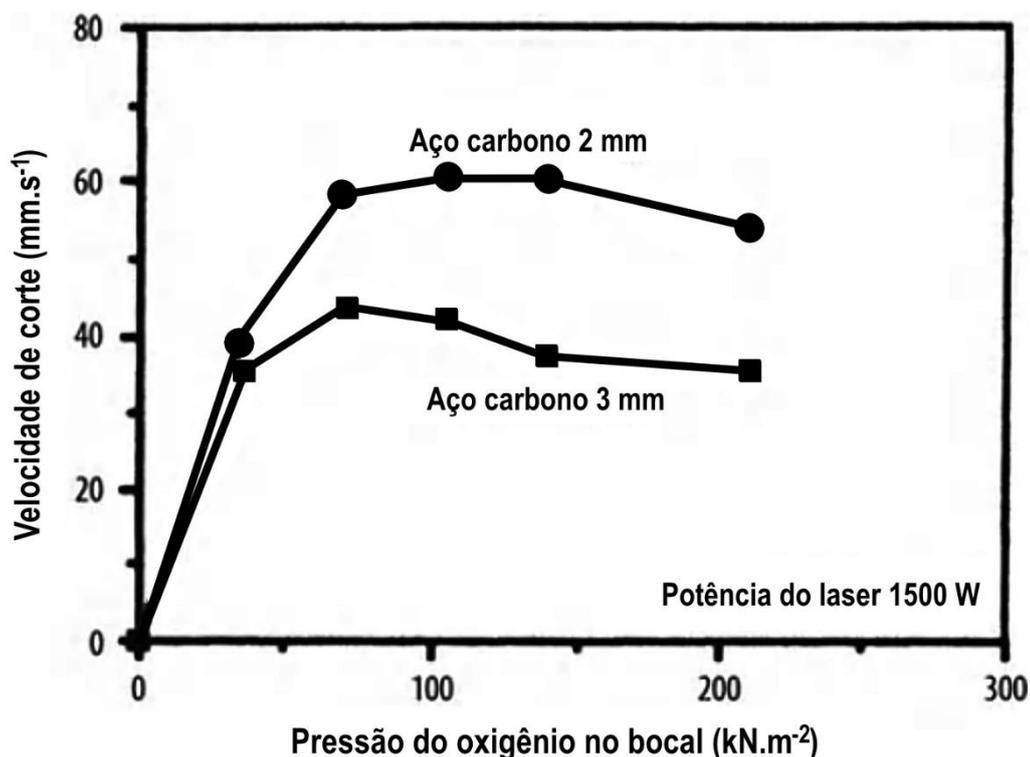
Fonte: Tabela 1 (MIYAMOTO & MARUO, 1991, p. 284)

As velocidades de corte relativamente baixas obtidas com alumínio e zinco são devidas à alta temperatura de fusão de seus óxidos (KANNATEY-ASIBU JR., Capítulo 15 - Laser Cutting and Drilling, 2009). A reação exotérmica associada ao aço não é muito alta, quando comparada com a de outros metais como titânio, zircônio e nióbio (veja equações das reações no subitem 7.8.1). Apesar das menores velocidades de corte dos primeiros metais em relação aos últimos, a qualidade do corte nos primeiros (alumínio e zinco) é boa uma vez que a reação exotérmica relativamente baixa resulta em uma zona de reação (logo termicamente afetada)

limitada à região irradiada pelo feixe (KANNATEY-ASIBU JR., Capítulo 15 - Laser Cutting and Drilling, 2009).

O efeito do aumento da velocidade de corte com incremento da pressão do jato de gás de assistência ativo é mostrado na Figura 60. É possível ver que, em duas diferentes espessuras de chapa de aço ao carbono, a velocidade aumenta com a pressão até um limite de cerca de 100 kN/m<sup>2</sup> (1 bar). Steen cita como um mistério saber por que, a partir daquela pressão, havia essa queda na velocidade de corte com o aumento da pressão do bico. Alguns dos primeiros trabalhos sugeriram que o resfriamento era o problema, mas equações demonstradas pelo próprio Steen tornaram tal hipótese improvável. Nos Laboratórios Culham (FIERET, TERRY, & WARD, 1986) fizeram algumas medições de pressão de superfície e mostraram que havia uma série de fenômenos de choque associados aos jatos de alta pressão, conforme citado por Steen no subitem *Effect of Gas Jet Velocity* (STEEN, Capítulo 3 - Laser Cutting, 2003 ).

Figura 60 - VARIAÇÃO DA VELOCIDADE DE CORTE COM A PRESSÃO DO GÁS DE ASSISTÊNCIA OXIGÊNIO.



FONTE: Adaptado da figura 3.23 de (STEEN, Capítulo 3 - Laser Cutting, 2003 ).

### 7.5.2. Remoção da fusão

É de suma importância para o desempenho de corte e para a qualidade da aresta de corte a eficiente remoção do metal derretido pelo laser, pois a abertura de

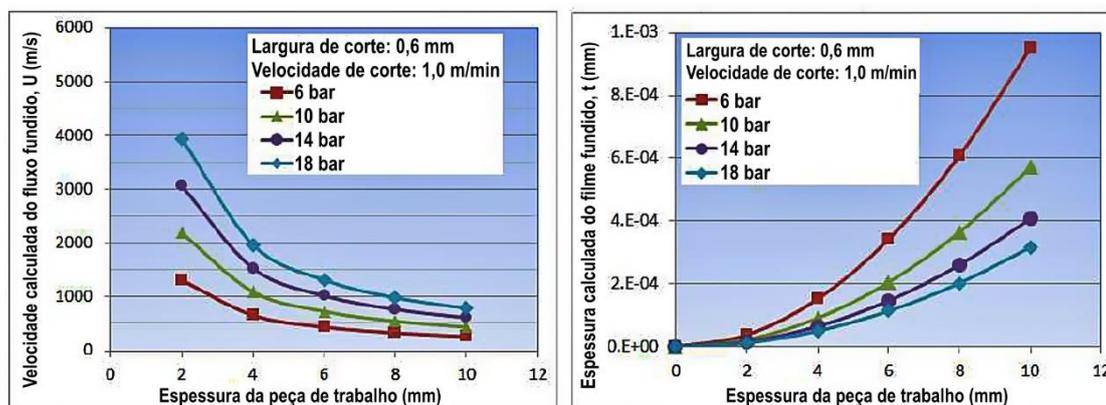
o corte é criada pela ação da força de arrasto do jato de gás auxiliar de alta pressão que atua coaxial ao raio laser (vide Figura 46). A força de arrasto do gás de auxiliar é que cisalha e acelera continuamente o metal fundido para fora da frente de corte, produzindo a abertura que é resultado do processo de corte a laser (WANDERA C. , Capítulo 18 - Fiber Lasers in Material Processing, 2016, p. 410). No corte contínuo, para que haja acoplamento eficiente de energia na linha de ação do feixe de laser ao metal ainda não derretido, uma espessura mínima do filme fundido deve ser mantida na frente do corte (KANNATEY-ASIBU JR., Capítulo 11 - The Microstructure, 2009). Os metais fundidos que têm alta tensão superficial e alta viscosidade são mais difíceis de remover da frente de corte e têm uma alta tendência a se fixar na parte inferior do corte como escória. Assim, a qualidade do corte depende da quantidade de fundido que se acumula no corte e causa escória na superfície do corte (YILBAS & SAHIN, 1995).

#### *7.5.2.1. Velocidade do fluxo de fusão e espessura do filme de fusão*

A ejeção de metal fundido é impulsionada principalmente pela força de cisalhamento na interface fundido-gás auxiliar e pelo gradiente de pressão criado no corte (AGGOUNE, AMARA, & DEBIANE, 2012, p. 2). Com a disposição coaxial do bico de gás auxiliar com o feixe de laser incidente, toda a superfície de fusão no corte está em contato com o jato de gás auxiliar. A largura do corte é geralmente uma fração de milímetro e o metal fundido tem uma viscosidade alta, de modo que o fluxo de fusão pode ser assumido para cobrir todo o corte.

A variação da velocidade do fluxo de fusão e da espessura do filme de fusão ao longo da profundidade de corte é mostrada na Figura 61 (KUJANPÄÄ & WANDERA, 2010). À medida que o fluxo de derretimento progride pelo corte há um retardo do derretimento, resultante no acúmulo de derretimento na seção inferior do corte antes de escorrer pela borda de corte inferior. A velocidade do fluxo de fusão aumenta com o aumento da pressão do gás de assistência e o aumento da largura do corte, resultando em uma redução na espessura do filme fundido (WANDERA C. , Capítulo 18 - Fiber Lasers in Material Processing, 2016, p. 411).

Figura 61 - VARIAÇÃO DA VELOCIDADE DO FLUXO DE FUSÃO E ESPESSURA DO FILME DE FUSÃO COM PROFUNDIDADE DE CORTE PARA DIFERENTES PRESSÕES DE GÁS AUXILIAR.

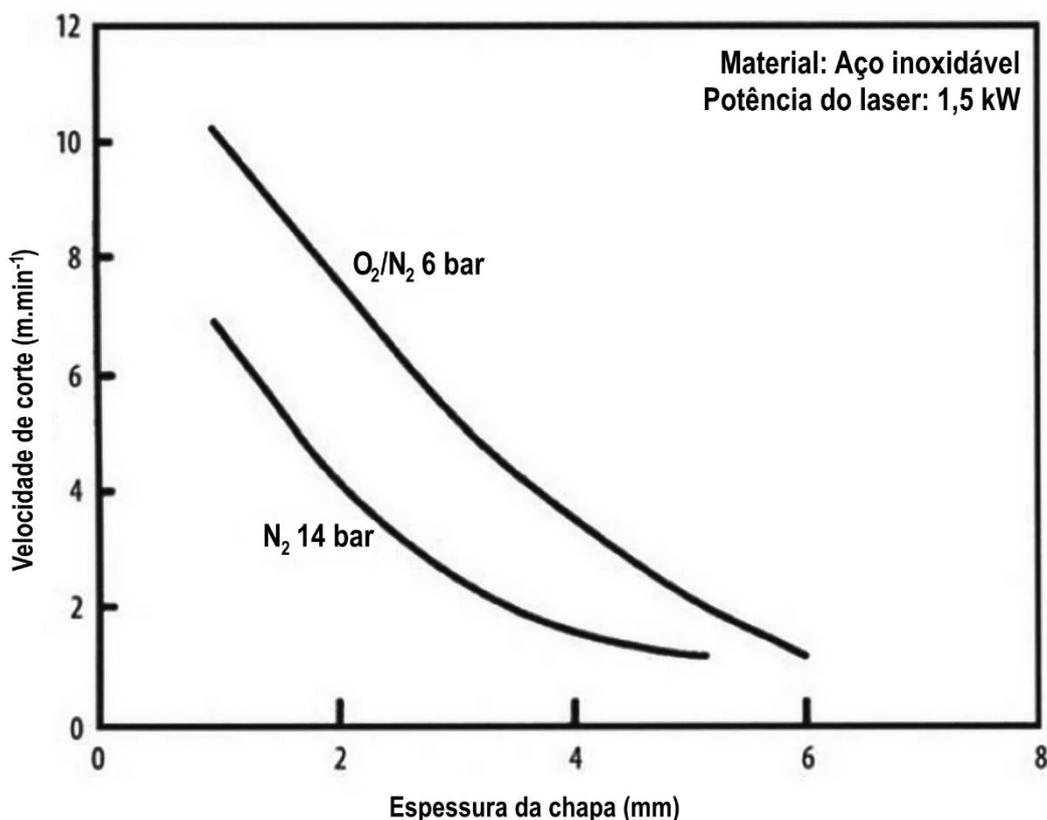


FONTE: Adaptado da figura 5 (a) e (b) de (KUJANPÄÄ & WANDERA, 2010, p. 67).

LEGENDA: Variação da velocidade do fluxo de fusão e espessura do filme de fusão com profundidade de corte para diferentes pressões de gás auxiliar.

Durante o corte por fusão a laser usando um jato de gás auxiliar inerte, pela menor entrada de energia, o metal fundido possui uma viscosidade alta, de modo que é necessária uma maior pressão e fluxo do gás auxiliar (inerte) para facilitar a alta velocidade do fluxo de fusão, garantindo uma espessura do filme fundido mínima e a obtenção de alta qualidade da aresta de corte (WANDERA C. , Capítulo 18 - Fiber Lasers in Material Processing, 2016). Na Figura 62, Steen compara máximas velocidades de corte atingíveis com a variação da espessura de chapas de aço inoxidável em uma máquina de corte a laser de 1,5 kW, no qual o uso de um gás inerte ao aço inox - no caso o nitrogênio - demanda pressões mais altas (14 bar) e atinge velocidades bem inferiores a uma mistura oxigênio e nitrogênio, mesmo esta mistura estando a menos da metade da pressão da primeira (6 bar) (STEEN, Capítulo 3 - Laser Cutting, 2003 ).

Figura 62 - CORTE DE AÇO INOXIDÁVEL COM GÁS INERTE E ALTAS PRESSÕES.



FONTE: Adaptado da figura 3.26 de (STEEN, Capítulo 3 - Laser Cutting, 2003 , p. 136).

## 7.6. PRINCÍPIOS DO CORTE A LASER

O processo de corte por fusão a laser é ilustrado esquematicamente na Figura 42. Tanto o feixe de laser quanto o jato de gás auxiliar colidem com a superfície da peça. Fontes de calor para o processo de corte incluem a radiação a laser absorvida e, no caso da utilização de um gás de assistência ativo, também a reação exotérmica entre o material base e oxigênio do gás auxiliar, conforme discutido no item anterior (7.5 Funções do gás auxiliar e seu fluxo).

A energia proveniente das fontes de calor derrete e pode vaporizar parcialmente o material na frente do feixe, de tal modo que o jato de gás pressurizado ejeta o material fundido pela superfície inferior da peça de trabalho e, também, parte da remoção de material pode ocorrer pela evaporação diretamente da superfície da camada fundida.

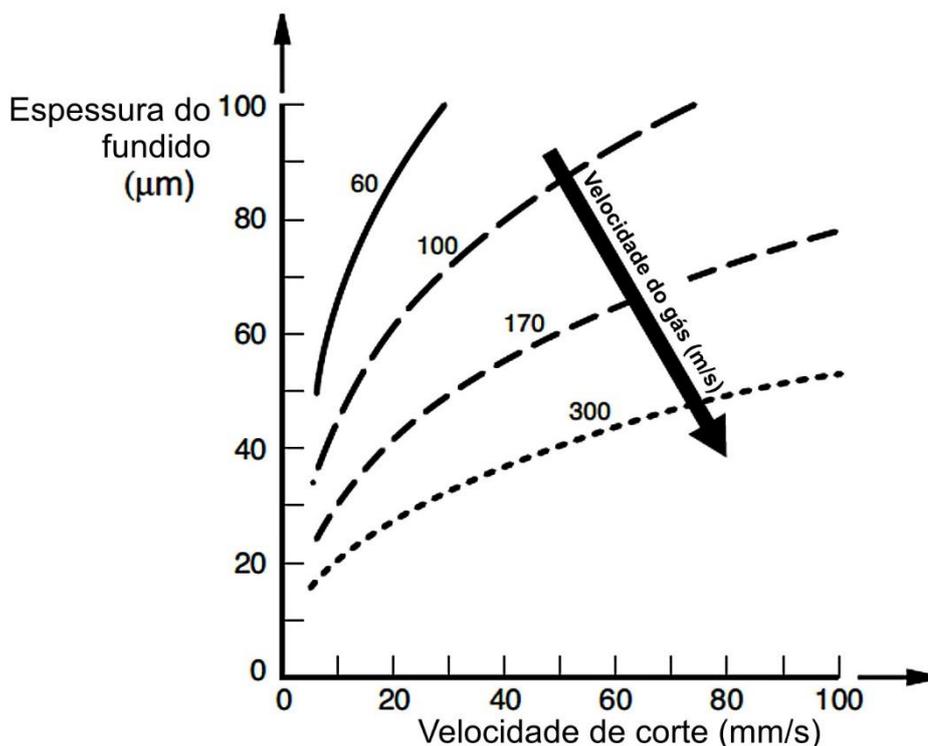
Durante o processo de corte a laser, a energia será dissipada e perdida pela fusão do material sólido, ejeção do metal fundido, evaporação da frente de erosão, condução de calor, radiação, reflexão e resfriamento por convecção pelo fluxo de gás. Para um fluxo de gás subsônico, o efeito de resfriamento por convecção é desprezível (KANNATEY-ASIBU JR., Capítulo 15 - Laser Cutting and Drilling, 2009) e (STEEN, Capítulo 3 - Laser Cutting, 2003 ). Ao examinar o requisito de energia durante o corte

a laser de uma peça de metal usando jatos de gás inerte e oxidante, Wandera et al. (WANDERA, KUJANPÄÄ, & SALMINEN, Laser power requirement for cutting of thicksection steel and effects of processing parameters on mild steel cut quality, 2011) desenvolveram um modelo teórico para estimar o requisito de potência para derreter o volume de corte considerando inevitáveis perdas de potência por condução. Conforme citado por Catherine Wandera (WANDERA C. , Capítulo 18 - Fiber Lasers in Material Processing, 2016), Schulz et al. (SCHULZ, BECKER, FRANKE, KEMMERLING, & HERZINGER, 1993) desenvolveram uma aproximação analítica das perdas de condução de calor durante o corte a laser de metais e forneceram uma expressão que pode ser usada para estimar a mudança de temperatura no substrato metálico durante o corte a laser; a mudança de temperatura no metal do substrato é inversamente proporcional ao número do Peclet, diretamente proporcional à velocidade de corte (YILBAS B. S., 1997).

Nos estágios iniciais do processo, todo o feixe e o jato de gás atingem a superfície da peça. No entanto, uma vez iniciado o processo, um corte é formado, e apenas uma parte do gás e do feixe de laser colide com a superfície superior da peça de trabalho diretamente à frente do corte, e essa parte pode ser refletida de volta. A porção restante do feixe se propaga para baixo no corte e é parcialmente absorvida na extremidade frontal do corte (frente de erosão), que é levemente inclinada para a vertical. Conforme citado no subitem 7.4.2.5 sobre polarização, a maior parte da potência do feixe é absorvida na frente da erosão para um feixe polarizado linearmente na direção do corte. Uma fina camada de material fundido se forma na interface entre o corte e o material base sólido à sua frente e é ejetada pelos mecanismos listados anteriormente. A espessura do fundido aumenta com o aumento da velocidade de corte, pois mais metal fundido é produzido por unidade de tempo, enquanto um aumento na velocidade do gás auxiliar diminui a espessura do filme de fundido, pois resulta em uma ejeção mais rápida do material derretido (Figura 63).

Para uma determinada potência do laser, as temperaturas médias atingidas na camada fundida diminuem à medida que a espessura da peça de trabalho aumenta, principalmente pelo efeito da condução térmica (YILBAS & SAHIN, 1995). Acima de uma certa espessura, na qual a temperatura média cai abaixo da temperatura de fusão, o corte ficará incompleto. Essa é a máxima espessura que pode ser cortada com um laser desse nível de potência, mantidos todos os outros parâmetros.

Figura 63 - VARIAÇÃO ESQUEMÁTICA DA ESPESSURA DO FUNDIDO COM A VELOCIDADE DE CORTE.



FONTE: Adaptado de (VICANEK, SIMON, URBASSEK, & DECKER, 1987) e figura 5.15 de (STEEN, 2003, p. 222).

#### 7.6.1. Absortividade (coeficiente de acoplamento) ao feixe durante o corte a laser

De acordo com Goswami e Kumar em seu artigo *Laser materials processing* (GOSWAMI & KUMAR, 1988), propriedades do material como *absortividade*, *condutividade térmica* e *calor específico* afetam diretamente o desempenho do processo de corte a laser. Niziev e Nesterov-Mueller destacam a *absortividade* como o parâmetro mais expressivo, uma vez que a eficiência do processo depende completamente da absorção de energia pela peça de trabalho (NIZIEV & NESTEROV-MUELLER, 1999). Embora por vezes consideradas sinônimos, *absortância* e *absortividade* têm uma sensível diferença: *absortância* é a propriedade de um conjunto que compõe uma superfície, por exemplo, uma chapa de alumínio pintada de branco. *Absortividade* é a propriedade de um material isolado, como do alumínio, da tinta branca, do revestimento, do aço etc. (MCCLUNEY, 2003). A *absortividade*  $A$  da superfície do metal para a radiação do laser é definida como a razão entre a potência do laser absorvida na superfície e a potência do laser incidente, conforme resumido na Equação 7.8 (ZAVECZ, SAIFI, & NOTIS, Metal reflectivity under high-intensity optical radiation, 1975). Segundo Zavec et al., a absorção desta energia depende de vários fatores, como do comprimento de onda da radiação laser,

da intensidade da radiação, do plano de polarização do feixe de luz, do ângulo de incidência, tipo de material e temperatura. De acordo com Steen descreve no subitem *Reflection or Absorption* dentro do capítulo 2 seu livro (STEEN, Capítulo 2 - Basic Laser Optics, 2003 , pp. 69-74), para um material opaco como um metal, a absorptividade é dada como

$$A = 1 - R$$

Equação 7.6

onde  $R$  é a reflexividade da superfície da peça. A absorção do feixe de luz pela peça de metal geralmente aumenta com o aumento da temperatura do material metálico. Quando o ângulo de incidência é zero (isto é, incidência vertical), tanto o raio laser polarizado paralelo ( $R_p$ ) quanto o raio laser polarizado perpendicularmente ( $R_s$ ) são absorvidos igualmente. No entanto, o coeficiente de absorção da luz polarizada paralela ( $R_p$ ) aumenta com o aumento do ângulo de incidência e é mais alto no ângulo de Brewster (READY & FARSON, LIA Handbook of Laser Materials Processing, 2001), enquanto o coeficiente de absorção da luz polarizada perpendicularmente ( $R_s$ ) diminui com o aumento do ângulo de incidência  $\theta$  (ION, Capítulo 5 - Engineering Materials, 2005).

Segundo (WANDERA C. , Capítulo 18 - Fiber Lasers in Material Processing, 2016), a absorptividade (coeficiente de acoplamento)  $A$  da peça de trabalho para o feixe de laser incidente pode ser estimada considerando que a potência do laser absorvida é utilizada tanto para a fusão do volume de corte como as inevitáveis perdas de potência, cujo principal mecanismo é a condução. Para um processo de corte por fusão pura, utilizando apenas a potência do laser incidente como fonte de energia de entrada, a absorptividade da peça de trabalho à radiação laser incidente pode ser estimada usando a Equação 7.8.

$$A = \frac{\text{Potência do laser absorvida } (P_{A_L})}{\text{Potência do laser incidente } (P_L)} = \frac{P_{derr} + P_{perd}}{P_L}$$

Equação 7.7

$$A = \frac{(\rho * w * t * V * (C_p * \Delta T + L_{fus})) + (2 * (\rho * C_p * \Delta T_{perd} * V * L * t))}{P_L}$$

Equação 7.8

onde  $A$  é a absorptividade da peça de trabalho à radiação laser incidente;  $P_L$  é a potência do laser incidente (W);  $P_{derr}$  é a potência do laser para derreter o volume do corte (W);  $P_{perd}$  é a inevitável perda de energia da zona de corte (W);  $w$  é a largura do corte (m);  $t$  é a espessura da peça (m);  $V$  é a velocidade de corte (m/s);  $\rho$  é a densidade da peça de trabalho em metal ( $\text{kg/m}^3$ );  $C_p$  é a capacidade térmica específica do material ( $\text{J/kg.K}$ );  $\Delta T$  é o aumento da temperatura que causa o derretimento do volume de corte (K);  $L_{fus}$  é o calor latente da fusão do material ( $\text{J/kg}$ );

$\Delta T_{perd}$  é a mudança de temperatura no substrato metálico (K) (WANDERA C. , Capítulo 18 - Fiber Lasers in Material Processing, 2016).

A eficiência de absorção do feixe de laser no corte varia com a intensidade do feixe, sendo menor a baixas intensidades, melhorando com o aumento da intensidade do feixe até um pico de máxima absorção, após o qual há absorção passa a diminuir com acréscimos adicionais na intensidade, comportamento retratado na Figura 65 (ZAVECZ, SAIFI, & NOTIS, Metal reflectivity under high-intensity optical radiation, 1975). Este fenômeno de um pico de absorvidade a uma média intensidade de feixe explica-se pela dependência da absorção com o ângulo de incidência. Em baixas intensidades, baixa potência, a frente de corte é relativamente plana e isso resulta em baixa absorção, pois o ângulo de incidência  $\theta$  é quase zero, ou seja, o feixe de laser é quase normal para a superfície da peça (Figura 64). Com o aumento da intensidade, o ângulo de incidência aumenta, o que aumenta ainda mais a absorção. Em intensidades muito altas, a frente de corte é quase vertical, resultando em uma incidência de quase 90°, na qual a absorção é relativamente baixa (Figura 66). Para condições de corte típicas, a inclinação da frente de corte para a vertical é menor que 1° perto da parte superior da peça de trabalho e aumenta para uma inclinação de 3° a 5° em direção à parte inferior da peça de trabalho (KANNATEY-ASIBU JR., Capítulo 15 - Laser Cutting and Drilling, 2009).

O efeito do comprimento de onda é altamente significativo. Citando diretamente Steen: “Em comprimentos de onda mais curtos, os fótons mais energéticos podem ser absorvidos por um maior número de elétrons ligados e assim a refletividade cai e a absorvidade da superfície é aumentada” (STEEN, Capítulo 2 - Basic Laser Optics, 2003 , p. 71). Esta tendência de aumento da absorvidade a menores comprimentos de onda é ratificada pelos dados da Tabela 3.

Tabela 3 – ABSORTIVIDADE ESPECTRAL NORMAL DE MATERIAIS EM COMPRIMENTOS DE ONDA DE LASER IMPORTANTES.

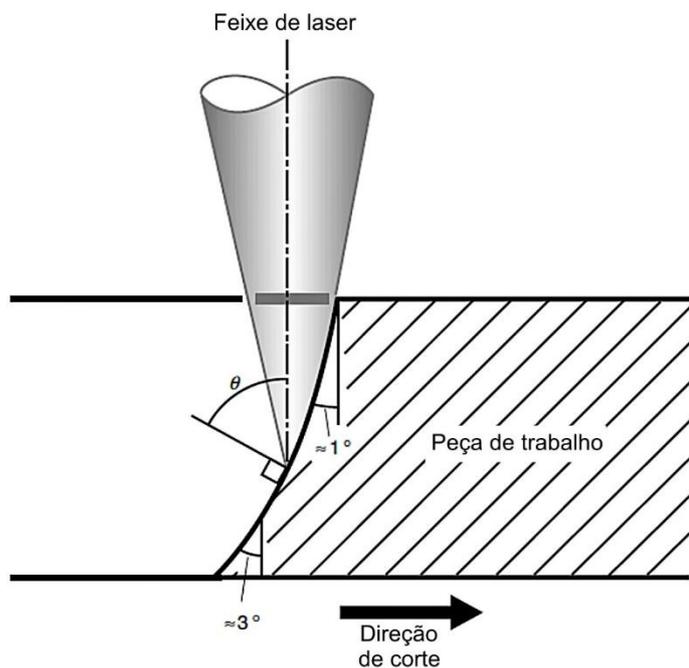
<b>Material</b>	<b>300-600 nm</b>	<b>1.06 <math>\mu\text{m}</math></b>	<b>10.6 <math>\mu\text{m}</math></b>
Alumínio, liso		0,06 - 0,2	0,03 - 0,06
áspero		0,2 - 0,4	0,1 - 0,4
Berílio	0,8	0,5 - 0,8	0 - 0,08
Cromo	0,35 – 0,40	0,3 - 0,4	0,06-0,10
Cobre polido	0,05	0,04	0,01 - 0,03
áspero	0,05	0,1-0,3	0,05-0,10
oxidado	0,85	0,5	
Germânio	0,05 - 0,3	0,05 - 0,65	0,6 - 0,7
Ouro	0,7-0,1a*	0,02 - 0,04	0,01 - 0,02
áspero			<0,12

<b>Material</b>	<b>300-600 nm</b>	<b>1.06 <math>\mu\text{m}</math></b>	<b>10.6 <math>\mu\text{m}</math></b>
Ferro polido	0,37 - 0,40	0,25 - 0,32	0,12
Molibdênio polido	0,4 - 0,5	0,25 - 0,35	0,05-0,15
Níquel	0,5	0,15-0,35	0,05-0,15
Platina	0,5 - 0,3a*	0,25 - 0,30	0,03 - 0,08
Ródio	0,2 - 0,5	0,15-0,25	0,05
Silício, sem dopagem	0,35 - 0,55*	0,7	0,25 - 0,38
dopado			<0,75
Prata	0,95 - 0,03*	0,03	0,02-0,10
Tungstênio	0,5	0,35	0,03 - 0,3
Carbono (grafite)	0,75	0,8 - 0,9	0,7 - 0,9
Alumina ( $\text{Al}_2\text{O}_3$ )		0,05-0,1	0,90 - 0,99
Óxido de magnésio (MgO)		0,2	0,93 - 0,98
Sílica ( $\text{SiO}_2$ )	transp,	transp,	0,9
Zircônia ( $\text{ZrO}_2$ )		0,1 -0,2	0,85 - 0,98
Carboneto de silício (SiC)	0,8 - 0,9	0,85 - 0,95	0,8 - 0,9
Nitreto de silício ( $\text{Si}_3\text{N}_4$ )	0,6 - 0,7	0,6 - 0,8	0,9

\* Indica mudança contínua com comprimento de onda.

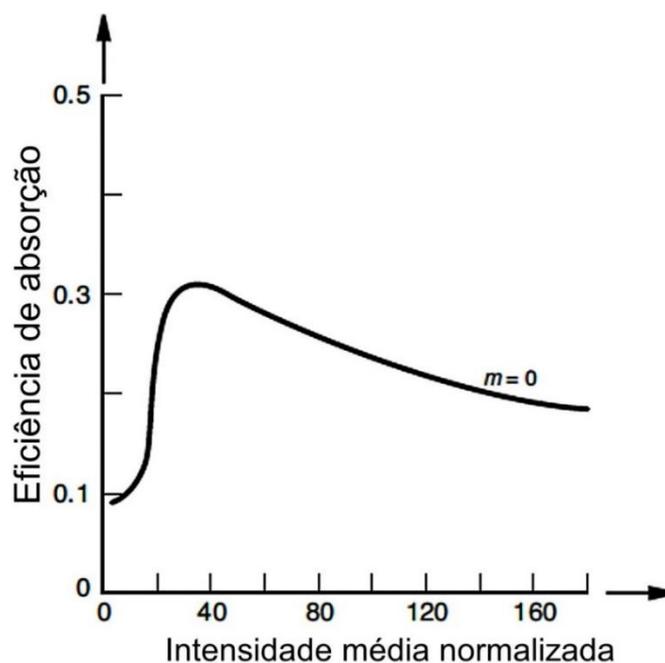
Fonte: Tabela 1 de (READY & FARSON, LIA Handbook of Laser Materials Processing, 2001)

Figura 64 - ÂNGULO DE INCIDÊNCIA DO FEIXE DE LASER NA SUPERFÍCIE DE CORTE E INCLINAÇÃO DA SUPERFÍCIE DE CORTE COM A VERTICAL.



FONTE: Adaptado da figura 1 de (VICANEK, SIMON, URBASSEK, & DECKER, 1987, p. 140) e da figura 15.12 de (KANNATEY-ASIBU JR., Capítulo 15 - Laser Cutting and Drilling, 2009, p. 446).

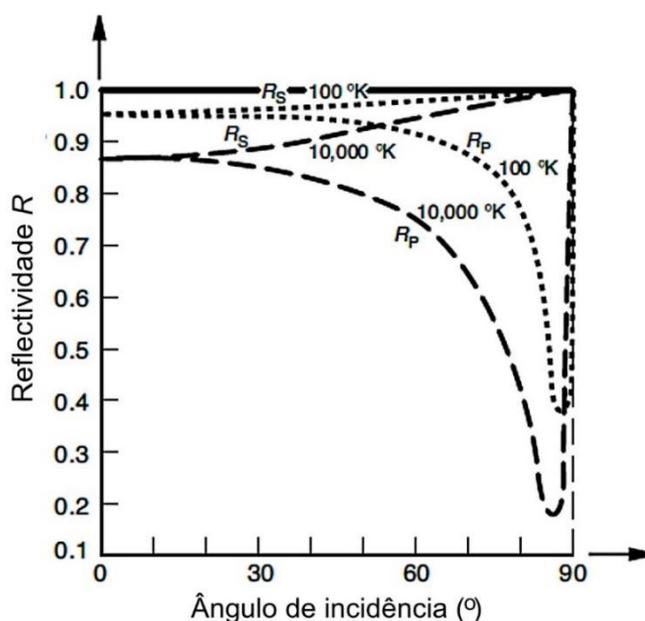
Figura 65 - VARIACÃO DA EFICIÊNCIA DE ABSORÇÃO DE UM FEIXE P-POLARIZADO COM INTENSIDADE DE FEIXE.



FONTE: Adaptado de (NIZIEV & NESTEROV-MUELLER, 1999) e (VICANEK, SIMON, URBASSEK, & DECKER, 1987) apud figura 15.13 de (KANNATEY-ASIBU JR., Capítulo 15 - Laser Cutting and Drilling, 2009, p. 446).

LEGENDA: Variação da eficiência de absorção de um feixe p-polarizado com intensidade de feixe para um feixe gaussiano ( $m = 0$ ).

Figura 66 - VARIAÇÃO DA REFLEXIVIDADE DO AÇO-CARBONO COM ÂNGULO DE INCIDÊNCIA DO FEIXE.



FONTE: Adaptado da figura 3 de (HO & WEI, 2001, p. 609) e

LEGENDA: Variação da reflexividade do aço-carbono com ângulo de incidência do feixe.  $R_p$  é a reflexividade da luz p-polarizada e  $R_s$  é a reflexividade da luz s-polarizada.

### 7.6.2. Mecanismos de absorção do raio laser por metais

A potência do feixe de laser absorvido e da potência da reação de oxidação (no caso do gás auxiliar oxigênio ou ar comprimido) geram a fusão que dá origem ao filme fundido na frente de corte. A reflexividade da superfície de metal afeta o início do corte a laser de metais, pois limita a quantidade de energia do laser acoplada à peça de trabalho. Por este motivo, metais com alta reflexividade superficial - por exemplo, alumínio - requerem maior intensidade de potência para iniciar o corte (STEEN, Capítulo 4 - Laser Welding, 2003). Após o início do corte, o processo de corte progride pela absorção do feixe de laser na frente inclinada, íngreme, pela ação de dois mecanismos de absorção, a saber: a absorção de Fresnel e a absorção de plasma (efeito de bremsstrahlung inverso).

O mecanismo de absorção de plasma (isto é, efeito de bremsstrahlung inverso) ocorre quando há presença de plasma induzido por laser durante o processo. A absorção do plasma ocorre através da absorção do feixe de laser pelos elétrons livres no plasma (isto é, vapor de metal quente), levando à re-radiação do plasma. Bremsstrahlung inverso envolve a absorção de fótons por elétrons livres que são acelerados durante a colisão com átomos neutros ou ionizados (PHIPPS, 2011, p. 70). O acúmulo de plasma não é muito significativo no corte por efeito do gás auxiliar, que o afasta, assim o mecanismo de absorção de plasma é muito limitado no corte a laser (STEEN, Capítulo 2 - Basic Laser Optics, 2003 ) (STEEN, Capítulo 4 - Laser Welding, 2003).

A absorção de Fresnel é o mecanismo mais significativo no corte a laser, é a absorção direta do feixe pela peça de trabalho durante a reflexão a partir da superfície (KANNATEY-ASIBU JR., Capítulo 15 - Laser Cutting and Drilling, 2009), na interação direta do feixe com o material. A absorção de Fresnel ocorre quando os fótons da radiação incidente do feixe de laser são absorvidos pelos elétrons livres na estrutura do metal. A energia absorvida coloca os elétrons em um movimento de vibração forçada, que pode ser detectado como *calor* (WANDERA C. , Capítulo 18 - Fiber Lasers in Material Processing, 2016). A absorção aumenta com o aumento da temperatura do material devido a um aumento na população de fônons, causando mais trocas de energia fônon-elétron e mais tendências para os elétrons interagirem com a estrutura do material, com a conseqüente queda na reflexividade (STEEN, Capítulo 3 - Laser Cutting, 2003 ).

Com a absorção de energia laser suficiente, as vibrações térmicas no metal tornam-se tão intensas que a ligação molecular é esticada e não é mais capaz de exibir resistência mecânica, resultando no derretimento do metal na zona de interação (STEEN, Capítulo 2 - Basic Laser Optics, 2003 ). Olsen e Alting (OLSEN & ALTING, 1989), em sua descrição dos mecanismos da formação da frente de corte, identificou a *superfície fundida*, o *filme fundido* e a *frente fundida* como as três zonas que compõem a frente de corte. Após o início do corte, o processo de corte a laser prossegue através da absorção do feixe de laser incidente na superfície de fusão, com acoplamento pelo filme fundido que o transmite para o material na frente de corte. Wandera et al. explica que existe uma espessura mínima de película fundida necessária para a transmissão da energia absorvida da superfície para a frente fundida, isto é, par que haja este efeito de acoplamento e absorvidade da potência do feixe de laser (WANDERA C. , Capítulo 18 - Fiber Lasers in Material Processing, 2016, p. 406). A superfície de fusão se propaga através do material a uma velocidade que depende da entrada de energia, das propriedades térmicas do metal da peça de trabalho e dos mecanismos de remoção do material fundido. A velocidade frontal do derretimento aumenta com o aumento da intensidade da potência do laser, o que aumenta a velocidade de penetração (YILBAS B. S., 1997). No caso dos cortes de seção espessa, a maior profundidade da abertura de corte propicia múltiplas reflexões do feixe de laser incidente dentro do corte de seção espessa, nestes casos a temperatura máxima na frente de corte ocorre abaixo da superfície do material pela maior absorção do feixe dentro do corte devido às múltiplas reflexões (BADONIYA, 2018) (WANDERA C. , Capítulo 18 - Fiber Lasers in Material Processing, 2016, p. 406).

## 7.7. QUALIDADE DA PEÇA CORTADA

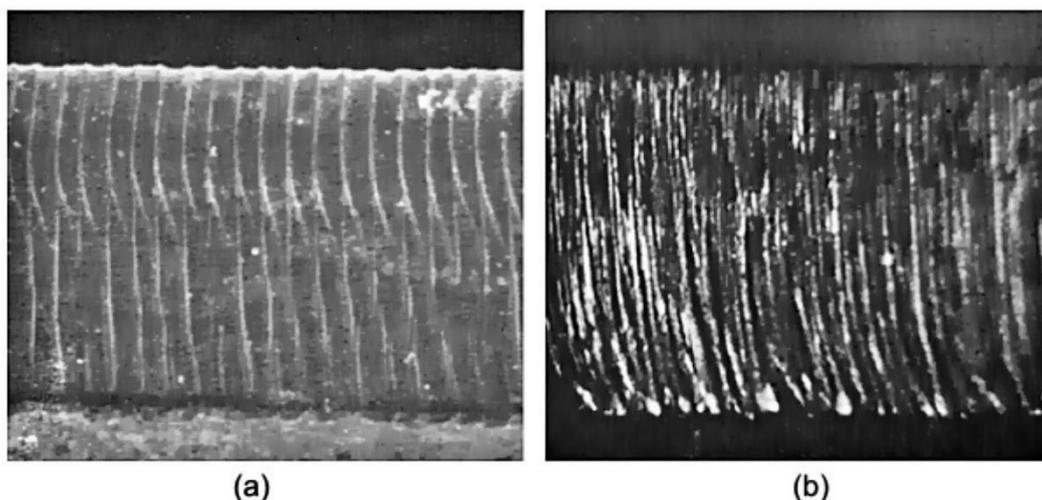
Os principais fatores que determinam a qualidade da peça cortada são estrias da superfície, formação de escória e fissuras. De acordo com a norma ISO para classificação de cortes térmicos ISO 9013:2017 (ISO 9013, 2017), as características das arestas de corte usadas para classificar cortes térmicos incluem *rugosidade da superfície* e *desvio da perpendicularidade* (ASTARITA, et al., 2014). A aderência de escória e a presença da separação da camada limite nas arestas de corte são dois aspectos críticos de qualidade que precisam ser considerados no corte a laser de metal de seção espessa, pois afetam a característica de rugosidade da superfície de uma aresta de corte a laser (AGGOUNE, AMARA, & DEBIANE, 2012).

Rugosidade da superfície é a irregularidade do perfil da superfície de corte que é observada na forma de estrias e escórias aderidas à borda do corte devido ao comportamento dinâmico do processo de corte a laser, que afeta o formato da frente de corte e o mecanismo de fluxo de fusão. A remoção ineficiente do derretimento e a forma geométrica da borda inferior da frente de derretimento têm forte influência na ocorrência de escória aderente e estão intimamente relacionadas às propriedades do fluxo de derretimento, conforme explicado por Schulz et al. (SCHULZ, KOSTRYKIN, MICHEL, PETRING, & KREUTZ, 1999). A alta tensão superficial e a viscosidade dos metais fundidos e seus óxidos afetam a ejeção do fundido e podem causar aderência à escória na borda de corte inferior (YILBAS & SAHIN, 1995), cuja variação na tensão superficial de alguns metais tem seus valores compilados na Tabela 2 por (MIYAMOTO & MARUO, 1991).

### 7.7.1. Estrias

Conforme Kannatey-Asibu Jr. afirma no capítulo 15 (KANNATEY-ASIBU JR., Capítulo 15 - Laser Cutting and Drilling, 2009), superfícies cortadas usando um feixe laser normalmente têm um padrão de estrias periódico, conforme visto na Figura 67 (a), que resulta em uma rugosidade da superfície. Dependendo nas condições de processamento, porém, também pode variar na direção da espessura, Figura 67 (b).

Figura 67 - ILUSTRAÇÃO DAS ESTRIAS FORMADAS EM UMA SUPERFÍCIE APÓS O CORTE A LASER.



FONTE: Adaptado (a) de (READY & FARSON, Capítulo - Laser cutting, 2001); (b) de (POWELL, FRASS, MENZIES, & FUHR, 1989) apud figura 15.18 de (KANNATEY-ASIBU JR., Capítulo 15 - Laser Cutting and Drilling, 2009).

LEGENDA: Ilustração das estrias formadas em uma superfície após o corte a laser. (a) Natureza periódica do padrão de estriação. (b) Variação do padrão de estriação na direção da espessura para materiais relativamente espessos.

Kannatey-Asibu (KANNATEY-ASIBU JR., Capítulo 15 - Laser Cutting and Drilling, 2009) lista as principais causas dessas estrias:

1. Vibrações na unidade de movimento.
2. Flutuações na potência do laser.
3. Flutuações no fluxo de gás.
4. Hidrodinâmica do fluxo de metal fundido.

As vibrações na unidade de movimento são um problema clássico de dinâmica ou robótica, mas constituem um defeito cuja consideração foge do tema estrito do corte a laser. A segunda causa listada, flutuações na potência do laser absorvido, podem ser devido a alterações na absorção resultantes da formação de plasma (veja o subitem 7.6.2). Eles também podem resultar de reflexões posteriores no ressonador, dinâmica do sistema de bombeamento do gás auxiliar, dinâmica da comutação em um laser de gás ou óptica suja.

O efeito da hidrodinâmica do derretimento pode ser analisado considerando pequenas perturbações no comportamento estacionário do sistema. Kannatey-Asibu, modelando as perturbações em aproximações com ondas planas, demonstra e conclui que:

O processo é estável sob ação de distúrbios infinitesimais “somente quando a força devido ao gradiente de pressão do fluxo de gás é muito menor que a força de cisalhamento devido ao atrito. No entanto, normalmente os dois

parâmetros são da mesma ordem de magnitude, de modo que a instabilidade é quase sempre inevitável. Um aumento na tensão superficial tende a estabilizar o processo, suavizando a superfície e minimizando as perturbações. Resultados experimentais mostram ainda que o sistema pode se tornar mais estável com o aumento da velocidade do gás de assistência ou a diminuição sensível da velocidade de corte, no caso em que a velocidade de corte do processo já for alta e próxima ao limite. Essa observação é pelo fato que, em baixas velocidades de corte, um aumento na velocidade do gás auxiliar ou uma diminuição na velocidade de corte torna o sistema ainda menos estável (KANNATEY-ASIBU JR., Capítulo 15 - Laser Cutting and Drilling, 2009, p. 454).

Um aspecto único das estrias são os dois padrões distintos evidentes na superfície de corte na Figura 67. Um padrão de estrias relativamente finas está mais próximo da superfície superior da peça, o outro padrão de estrias mais grosseiras está na parte inferior da superfície de corte, e os dois padrões são separados por uma linha bem distinta quase paralela à superfície da peça. Os dois padrões de estrias são resultados da distribuição de temperatura na camada fundida na direção vertical, sendo mais altos na porção superior em comparação à porção inferior, e seu efeito sob a velocidade do fluxo de gás (NASSAR, NASSAR, & YOUNIS, 2016). A velocidade do gás de assistência quando ele entra no corte é geralmente subsônica, mas sua temperatura aumenta à medida que penetra mais profundamente no corte, resultando em uma diminuição na densidade do gás, o que aumenta a velocidade do fluxo de gás. Este efeito assemelha-se ao comportamento de um bico convergente (RIVEIRO A. , et al., 2019, pp. 7-8). Quando o fluxo atinge velocidades sônicas, torna-se turbulento, o que altera a dinâmica da camada fundida. A turbulência no fluxo de gás também resfria a camada derretida de forma mais eficaz e, como a frequência de oscilação da camada derretida quando submetida a perturbações é maior para temperaturas mais altas, a frequência do padrão de estriamento é menor para a porção inferior da superfície de corte. Este fenômeno é denominado *separação da camada limite* e será discutido no item seguinte - 7.7.2. As frequências características das oscilações dependem da espessura da peça e podem ser da ordem de  $10^3$  ciclos/s, aumentando com a velocidade de corte. À medida que a espessura da peça cortada aumenta, as estrias tendem a se tornar irregulares e a rugosidade média da superfície cortada aumenta, justamente por este efeito de “bico convergente” explicado por Kannatey-Asibu (Tabela 4).

Além disso, o aumento da rugosidade das partes inferiores da superfície cortada com o aumento da espessura da peça também se deve, em parte, à incapacidade de fornecer energia adequada na parte inferior da peça para produzir metal fundido de viscosidade baixa (CARISTAN, Capítulo 3 - Materials, 2004, p. 65).

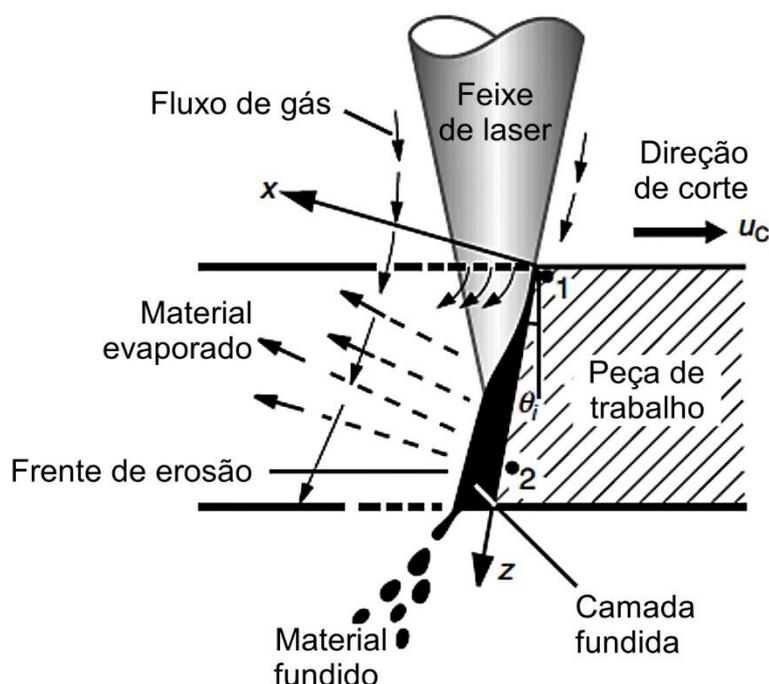
Tabela 4 - ILUSTRAÇÃO DA VARIAÇÃO DA RUGOSIDADE DA SUPERFÍCIE DE CORTE COM A ESPESSURA DA PEÇA DE TRABALHO PARA UMA PLACA DE AÇO.

Espessura (mm)	Aspereza superior ( $\mu\text{m}$ )	Aspereza inferior ( $\mu\text{m}$ )
1	3	3
3	9	11

Espessura (mm)	Aspereza superior ( $\mu\text{m}$ )	Aspereza inferior ( $\mu\text{m}$ )
5	24	30
7	40	55
9	70	60
10	85	110

Fonte: Tabela 3, Schoucker, Industrial Laser Annual Handbook 1986, apud (KANNATEY-ASIBU JR., Capítulo 15 - Laser Cutting and Drilling, 2009)

Figura 68 - UMA VISÃO BIDIMENSIONAL DO PROCESSO DE CORTE.



FONTE: Adaptado da figura 1 de (VICANEK, SIMON, URBASSEK, & DECKER, 1987, p. 140).

### 7.7.2. Separação da camada limite e aderência de escória

São características de baixa qualidade da aresta de corte a presença da separação da camada limite e a aderência da escória na aresta de corte a laser. A escória é essencialmente o material da frente de corte laser que, uma vez solidificado, se agarra no formato de gotas à borda inferior da peça de trabalho (Figura 70) (CARISTAN, Capítulo 9 - Quality, 2004, p. 235). O comportamento que leva à formação de escória depende da tensão superficial e viscosidade do metal fundido. Há maior a tendência de formação de escória em metais fundidos de maior tensão superficial ou a viscosidade, pois isso compromete o fluxo suave do material fundido para fora da zona de reação. O corte assistido por gás inerte tem uma tendência maior de formar escória em comparação com o corte assistido por oxigênio do mesmo material, uma vez que a tensão superficial do metal puro é geralmente maior que a do

seu óxido, conforme Tabela 2 (YILBAS & SAHIN, 1995). Para obter um corte sem escória com auxílio de gás inerte são empregadas pressões mais altas (acima de 1 MPa ou 10 bar), significativamente maior do que o necessário quando se usa o oxigênio como gás de assistência. Conforme o gráfico da Figura 59, são obtidas velocidades mais altas para metais de baixos pontos de fusão e baixa condutividade térmica para corte assistido por gás inerte. As velocidades máximas de corte são mais altas para o corte assistido por oxigênio, em comparação com a assistência de gases inertes, para o corte de titânio, zircônio e nióbio devido à energia exotérmica relativamente alta associada a esses metais (MIYAMOTO & MARUO, 1991). Além disso, a escória formada durante o corte assistido por gás inerte é geralmente mais difícil de remover do que a escória de óxido, mais quebradiça, formada quando a assistência de oxigênio é usada (KANNATEY-ASIBU JR., Capítulo 15 - Laser Cutting and Drilling, 2009, p. 456).

No caso específico do corte a laser de fibra do aço inoxidável, as estrias observadas nas arestas de corte com a remoção feita por um gás auxiliar inerte estão associadas aos mecanismos de fluxo de fusão. Os parâmetros do processo de corte que afetam a intensidade de potência na frente de corte e a dinâmica de gás, portanto, têm uma grande influência na separação da camada limite, na aderência da escória e na rugosidade resultante da superfície da aresta de corte (YILBAS & SAHIN, 1995).

O tamanho do corte (espessura e profundidade) e a pressão do gás auxiliar influenciam a velocidade de fusão e a espessura do filme de fusão. A aderência da escória na borda cortada, conforme indicado na Figura 70, é causada pela ineficiente ejeção por fusão na borda inferior, pelo fato que o metal fundido é mais espesso na parte inferior do corte.

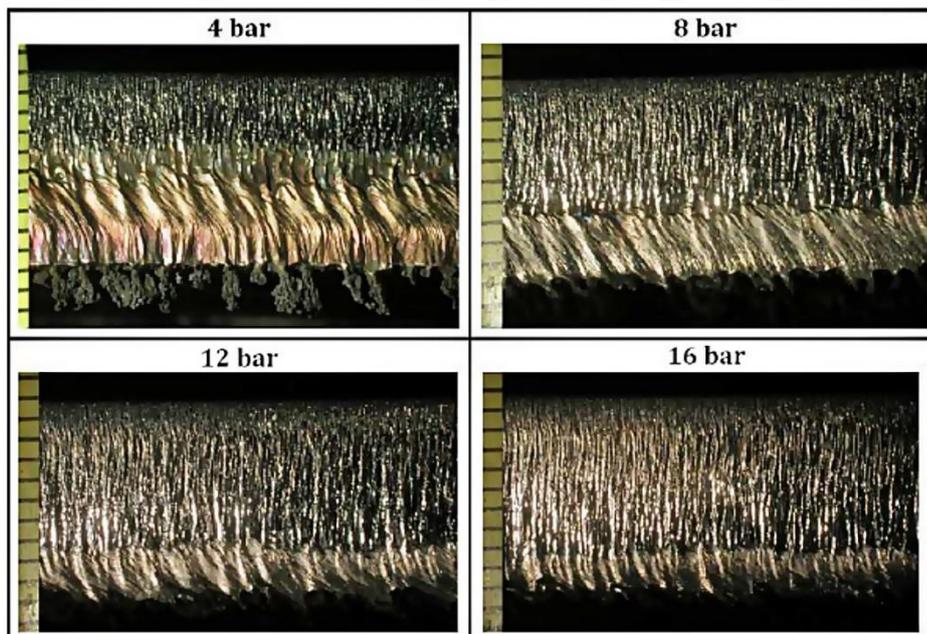
Os parâmetros do processo de corte que influenciam o tamanho do corte e a dinâmica do fluxo de gás no corte - como velocidade de corte, posição do ponto focal e pressão do gás auxiliar - precisam ser otimizados para melhorar a remoção do derretimento. Um tamanho de corte grande, alta pressão do gás de assistência e diâmetro de bico grande aumentam as taxas de fluxo de gás nos cortes de seção espessa (GARCÍA-LÓPEZ, MEDRANO-TELLES, IBARRA-MEDINA, SILLER, & RODRIGUEZ, 2017). O uso de altas pressões de gás de assistência e grande largura de corte evita a aderência da escória no corte de aço inoxidável de seção espessa com laser de fibra e um jato de gás de assistência inerte, conforme a Figura 69.

Figura 69 - EFEITO DA PRESSÃO DO GÁS AUXILIAR NO PONTO DE SEPARAÇÃO DA CAMADA LIMITE E FIXAÇÃO DA ESCÓRIA.

**Parâmetros comuns do processo de corte:**

**Aço inoxidável: 10 mm, Potência do laser de fibra: 4 kW, Velocidade de corte: 1,0 m / min**

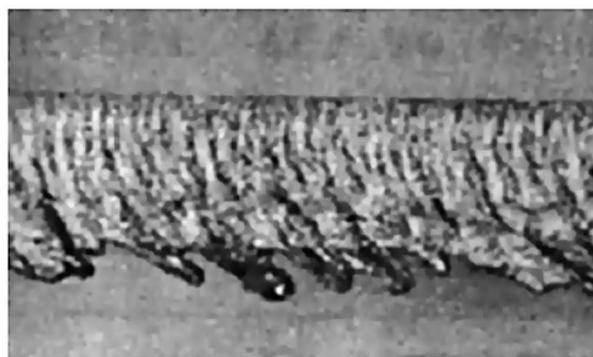
**Bocal: 2,5 mm, Comprimento focal: 190 mm, Posição focal: -8, Gás auxiliar de nitrogênio**



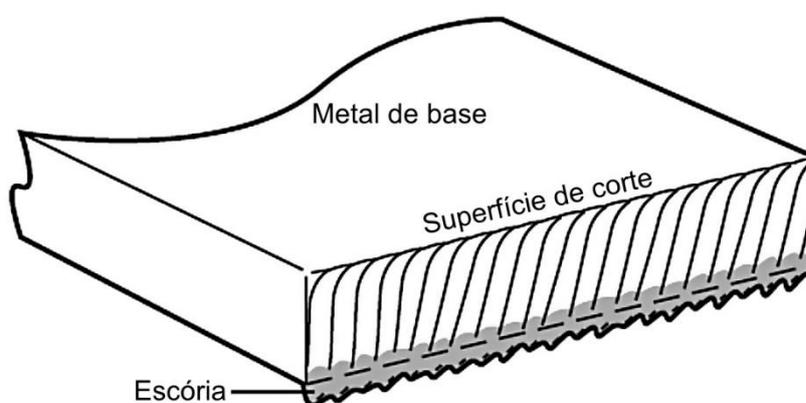
FONTE: Adaptado da figura 11 de (WANDERA, SALMINEN, & KUJANPÄÄ, Inert gas cutting of thick-section stainless steel and medium-section aluminum using a high power fiber laser, 2009, p. 159)

LEGENDA: Efeito da pressão do gás auxiliar na localização do ponto de separação da camada limite e fixação da escória nas bordas de corte no corte a laser assistido por gás inerte.

Figura 70 - ESCÓRIA FORMADA NA BORDA INFERIOR DA PEÇA DE TRABALHO APÓS O CORTE A LASER.



(a)



(b)

FONTE: Adaptado da figura 9 de (POWELL, FRASS, MENZIES, & FUHR, 1989).

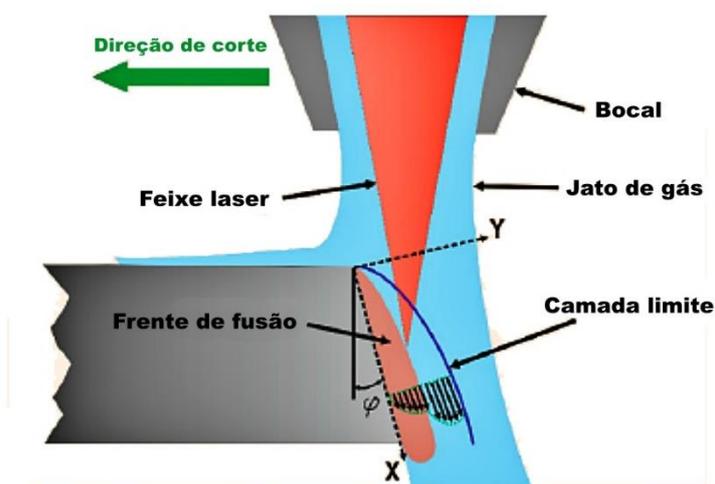
LEGENDA: (a) Fotografia de escória. (b) Esquema de escória.

### 7.7.3. Corte a laser de metais de seção espessa

Em caso de metais, a reflexividade da superfície do material (e a absorvidade, por consequência da Equação 7.6), a condutividade térmica e a espessura da peça são parâmetros do material que afetam criticamente a eficiência do processo de corte a laser, já que o processo requer intensidades de potência muito altas (intensidades da magnitude  $10^{10}$  W/m<sup>2</sup>) para derreter o material metálico até a profundidade de penetração necessária a uma velocidade de corte alta. A facilidade com que um material metálico pode ser cortado depende, portanto, da capacidade de absorção (absorvidade) do material ao feixe de laser incidente e da temperatura de fusão do material ou óxido formado (quando um gás auxiliar reativo é usado) (WANDERA, SALMINEN, & KUJANPÄÄ, Inert gas cutting of thick-section stainless steel and medium-section aluminum using a high power fiber laser, 2009).

Olsen usou um modelo teórico especificamente desenvolvido para simulação de corte a laser para determinar a taxa máxima de corte para diferentes espessuras de uma determinada peça como função da potência do laser e pressão do gás auxiliar. Após trabalhar neste modelo, Olsen concluiu que a força exercida pelo gás auxiliar dentro da frente de corte é o fator limitante a afetar a taxa máxima de corte, e não a potência do laser, o que destaca a relevância do gás no processo (OLSEN & ALTING, 1989). Essas limitações são percebidas também no modelo desenvolvido por Vicanek e Simon (VICANEK & SIMON, Momentum and heat transfer of an inert gas jet to the melt in laser cutting, 1987) que demonstram que, ao se processar seções mais grossas, a força do gás auxiliar determina a espessura do derretimento na frente de corte e a velocidade de corte. Se essas forças são fracas, é observado acúmulo de material fundido na frente de corte, causando piora na qualidade da seção cortada (MAS, FABBRO, & GOUÉDARD, 2003).

Figura 71 - ESQUEMA DAS FORÇAS QUE ATUAM SOBRE O MATERIAL FUNDIDO DURANTE O CORTE POR FUSÃO A LASER.



FONTE: Adaptado da figura 1 de (VICANEK, SIMON, URBASSEK, & DECKER, 1987, p. 140)

LEGENDA:  $\varphi$  - ângulo de inclinação da superfície de corte com a vertical.

Partindo da análise dos trabalhos citados para o cálculo de forças envolvidas na remoção de material fundido pelo gás auxiliar, algumas conclusões foram tiradas pelos autores nos trabalhos citados neste item, com ênfase em (WANDERA, SALMINEN, & KUJANPÄÄ, Inert gas cutting of thick-section stainless steel and medium-section aluminum using a high power fiber laser, 2009). Primeiro, todos os trabalhos concordam que a remoção de material fundido é promovida aumentando a velocidade do jato de gás, porém os modelos não capturam inteiramente a física do processo pois não levam em consideração a compressibilidade do gás de assistência. Ao pressupor que o fluxo de gás é laminar, Riveiro julga que tais modelos fazem uma simplificação excessiva devido às grandes velocidades envolvidas na interação do gás

com a peça, portanto grandes desvios das previsões podem ocorrer (RIVEIRO A. , et al., 2019).

#### 7.7.4. Efeito da potência do laser e da velocidade de corte

Com o aumento da potência do laser incidente aumentam também as velocidades máximas de corte alcançáveis. Kujanpää e Wandera (KUJANPÄÄ & WANDERA, 2010) e Sparkes et al. (SPARKES, GROSS, CELOTTO, ZHANG, & O'NEILL, 2008) relataram que, para a qualidade da aresta de corte em aço inoxidável de 6 a 10 mm, a localização do ponto de separação da camada limite se aproxima da aresta de corte inferior com o aumento da velocidade de corte, logo uma menor aderência de escória é experimentada quando se utilizam altas velocidades de corte. A maior perda de densidade de energia da frente de corte ao empregar baixas velocidades aumenta a tendência de aderência da escória na aresta de corte, a conclusão foi que a qualidade da aresta de corte melhorou com o aumento das velocidades de corte (WANDERA, KUJANPÄÄ, & SALMINEN, Laser power requirement for cutting of thicksection steel and effects of processing parameters on mild steel cut quality, 2011).

Há ressalvas e mesmo contradições conforme o tipo de laser utilizado: usando o laser de fibra de itérbio de alto brilho, Wandera et al. observou uma maior tendência de aderência da escória na aresta de corte ao cortar nas velocidades máximas de corte, sendo, portanto, necessário definir a qualidade aceitável da borda de corte de cada processo. Normalmente, a velocidade de corte que oferece a melhor qualidade de aresta cortada é inferior à velocidade máxima alcançável para cortar um determinado material no nível de potência do laser determinado (WANDERA, SALMINEN, & KUJANPÄÄ, Inert gas cutting of thick-section stainless steel and medium-section aluminum using a high power fiber laser, 2009, p. 156). Wandera e Kujanpää salientam a necessidade de se descobrir a *velocidade de corte ideal*, que será a velocidade de corte que oferece a melhor qualidade de corte, especialmente para aplicações onde a qualidade da aresta de corte é de suma importância. A aplicação de velocidades de corte acima ou abaixo da velocidade de corte ideal resulta na aderência da escória na aresta de corte inferior (KUJANPÄÄ & WANDERA, 2010).

No corte de fusão reativa usando um jato de gás de assistência ativa, há uma variação significativa na largura do corte com a velocidade de corte porque a reação exotérmica é muito errática em velocidades de corte lentas, resultando em aumento da queima lateral e alargamento da largura do corte, como ilustrado na Figura 72 . No caso da fusão reativa, há uma redução na ocorrência de ranhuras profundas irregulares na aresta de corte com redução da pressão do gás auxiliar e aumento da velocidade de corte para níveis ótimos. Mas velocidades de corte aumentadas também resultam em má ejeção do material fundido na parte inferior do corte, causando fixação de escória e, nos piores casos, a eventual re-selagem da borda inferior de corte pelo material fundido solidificado (WANDERA C. , Capítulo 18 - Fiber Lasers in Material Processing, 2016).

Figura 72 - EFEITO DA VELOCIDADE DE CORTE NO PADRÃO DE ESTRIAS EM AÇO MACIO DE 15 MM.

**Parâmetros comuns do processo de corte:**

**Potência do laser de fibra: 2 kW, pressão de oxigênio: 1,0 bar, bocal de 2,0 mm, posição focal: -10, Comprimento focal: 190 mm , espessura da peça de 15 mm**



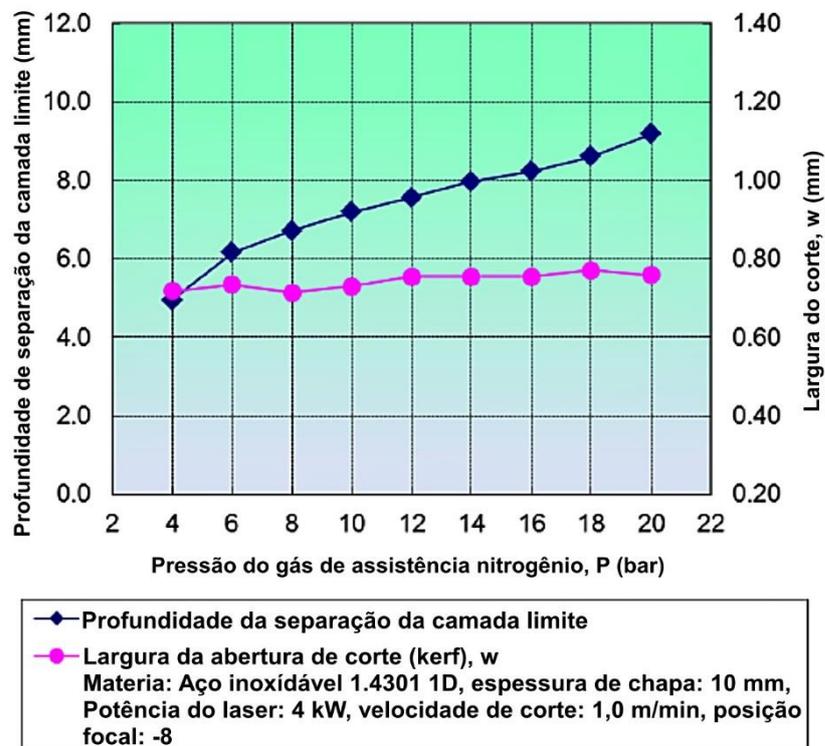
FONTE: Adaptado da figura 8 de (WANDERA C. , Capítulo 18 - Fiber Lasers in Material Processing, 2016, p. 418)

#### 7.7.5. Efeito do tipo e pressão do gás auxiliar

A velocidade do fluxo de fusão aumenta com o aumento da pressão do gás auxiliar, de modo que a espessura do filme derretido diminui com o aumento da pressão do gás auxiliar e o ponto de separação da camada limite se aproxima do fundo da zona de corte.

No caso de corte assistido por gás inerte, Wandera e Kujanpää mostraram que havia uma boa correlação entre a velocidade de fluxo de fusão calculada e a espessura da película de fusão com a localização do ponto de separação da camada limite nas bordas de corte de aço inoxidável de 10 mm feitas usando um laser de fibra de alta potência com um jato de gás auxiliar inerte (WANDERA & KUJANPÄÄ, Characterization of the melt removal rate in laser cutting of thick-section stainless steel, 2010). A Figura 73 mostra que qualidade da borda de corte foi otimizada com aumento na pressão do gás auxiliar para mais de 16 bar, de modo a eliminar a separação da camada limite na borda de corte. Esta mesma Figura 73 mostra que, no corte a laser assistido por gás inerte, a pressão do gás auxiliar não tem efeito na largura do corte. No corte a gás inerte, a fixação da escória na borda de corte e a rugosidade da superfície também é reduzida com o aumento na pressão do gás auxiliar, conforme mostrado na Figura 74.

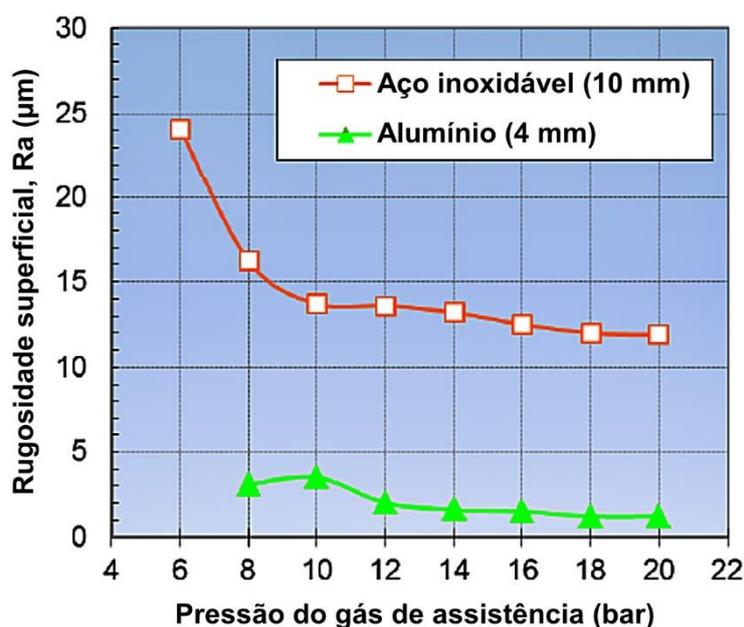
Figura 73 - EFEITO DA PRESSÃO DO GÁS AUXILIAR NA LOCALIZAÇÃO DO PONTO DE SEPARAÇÃO DA CAMADA LIMITE E NA LARGURA DA ABERTURA DE CORTE.



FONTE: Adaptado da figura 9 de (WANDERA C. , Capítulo 18 - Fiber Lasers in Material Processing, 2016, p. 419)

LEGENDA: Efeito da pressão do gás auxiliar na localização do ponto de separação da camada limite e na largura da abertura de corte, no corte a laser assistido por gás inerte.

Figura 74 - VARIAÇÃO DA RUGOSIDADE DA SUPERFÍCIE DAS BORDAS DE CORTE COM A PRESSÃO DE GÁS AUXILIAR.



FONTE: Adaptado da figura 10 de (WANDERA C. , Capítulo 18 - Fiber Lasers in Material Processing, 2016, p. 419)

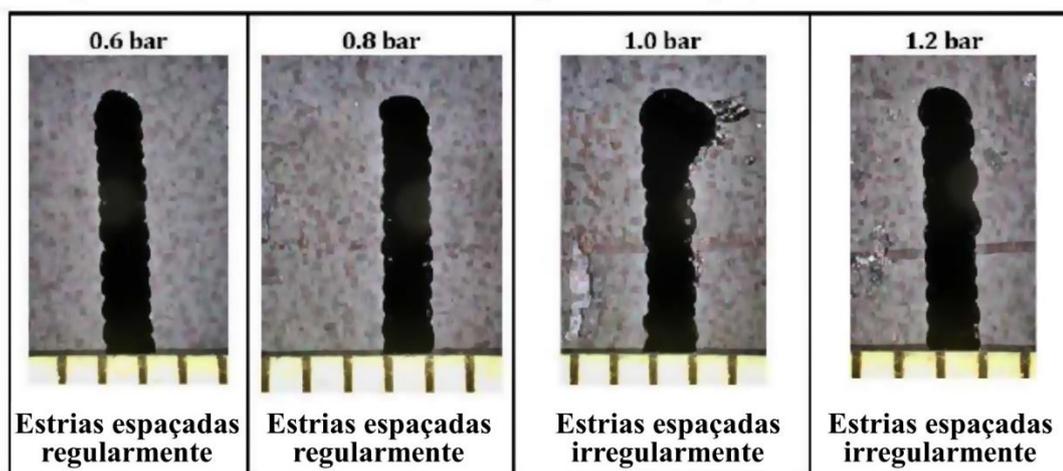
LEGENDA: Variação da rugosidade da superfície das bordas de corte com a pressão de gás auxiliar no corte a laser de fibra em aço inoxidável de 10 mm e alumínio de 4 mm.

No caso da fusão reativa, a natureza dinâmica da reação de oxidação exotérmica que ocorre durante o corte a laser assistido por oxigênio é favorecida pela alta pressão deste gás ativo. Assim, o aumento da pressão resulta em cortes mais amplos e menos uniformes, conforme mostrado na Figura 75 (WANDERA C. , Capítulo 18 - Fiber Lasers in Material Processing, 2016, p. 418). A reação de oxidação exotérmica errática e turbulenta em alta pressão de oxigênio produz estrias profundas e irregulares na borda de corte. Conforme explicado originalmente por Miyamoto e Maruo (MIYAMOTO & MARUO, 1991), são típicas do mecanismo de queima lateral as cristas observadas na borda de corte no corte a laser com oxigênio de aço macio de 15 mm com laser de fibra.

Figura 75 - EFEITO DA PRESSÃO DO GÁS AUXILIAR DE OXIGÊNIO NAS ESTRIAS E LARGURA DE CORTE.

**Parâmetros comuns do processo de corte:**

Laser de fibra 3 kW; 0,8 m/min; bico de 2,0 mm; posição focal -10; comprimento focal de 190 mm; espessura da peça de 15 mm.



FONTE: Adaptado da figura 11 de (WANDERA C. , Capítulo 18 - Fiber Lasers in Material Processing, 2016, p. 420)

LEGENDA: Efeito da pressão do gás auxiliar de oxigênio na largura do *kerf* (abertura de corte) e estrias.

#### 7.7.6. Efeito do diâmetro do bocal

O diâmetro do bocal determina a quantidade de jato de gás auxiliar disponível na frente de corte e, por conseguinte, a eficiência da ejeção do fundido e a extensão da oxidação (CARISTAN, Capítulo 9 - Quality, 2004).

No caso de corte de metal de seção espessa com um jato de gás inerte, o diâmetro do bocal afeta diretamente a localização do ponto de separação da camada limite na aresta de corte: a localização do ponto de separação da camada limite se move em direção à borda de corte inferior com o aumento no diâmetro do bocal por causa do processo de remoção de material fundido aprimorado. Wandera et al. (WANDERA & KUJANPÄÄ, Characterization of the melt removal rate in laser cutting of thick-section stainless steel, 2010) ao caracterizarem o corte de aço inoxidável de seção espessa usando gás inerte, observaram que não há separação de camada limite na borda de corte com o bocal de 2,5 mm de diâmetro.

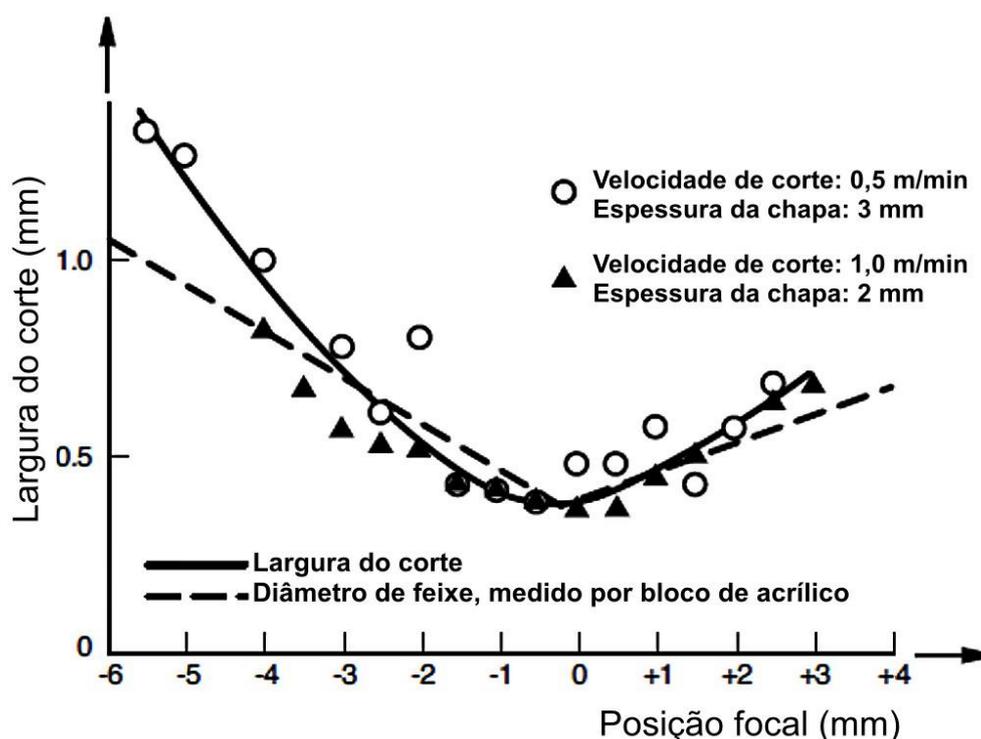
No corte a laser auxiliado por oxigênio, ao contrário, um bocal de tamanho menor melhora a obtenção de uma boa qualidade de corte com um padrão de estriação uniforme mais fino na borda de corte, limitando a extensão da reação de oxidação de queima lateral (CARISTAN, Capítulo 9 - Quality, 2004). No corte a laser de fibra de aço doce de 15 mm usando oxigênio como gás auxiliar, a melhor qualidade de corte foi obtida com um bocal de 1,5 mm de diâmetro e o bocal de 2,5 mm produziu

a pior qualidade de borda de corte (WANDERA, KUJANPÄÄ, & SALMINEN, Laser power requirement for cutting of thicksection steel and effects of processing parameters on mild steel cut quality, 2011).

### 7.7.7. Efeito da posição focal

É essencial ter consistência na localização do ponto focal em relação à superfície da peça devido à divergência do feixe de laser. A posição do ponto focal, por definição, é a localização do mínimo tamanho do ponto focalizado em relação à superfície superior da peça, onde haverá de máxima intensidade de potência. Os melhores resultados - largura mínima de corte - são obtidos quando o ponto focal está sobre a superfície da peça de trabalho ou logo abaixo (Figura 76) (KANNATEY-ASIBU JR., Capítulo 15 - Laser Cutting and Drilling, 2009, p. 493).

Figura 76 - EFEITO DA POSIÇÃO FOCAL NA LARGURA DA ABERTURA PARA UM CORTE DE LIGA DE ALUMÍNIO 7075-T6.



FONTE: Adaptado de (De Masumoto, I., Kutsuna, M., e Ichikawa, K., 1992, p. 7-14), apud figura 15.10 de (KANNATEY-ASIBU JR., Capítulo 15 - Laser Cutting and Drilling, 2009, p. 443)

LEGENDA: Corte de liga de alumínio 7075-T6 com um laser de CO<sub>2</sub> de 1,8 kW e gás auxiliar de argônio.

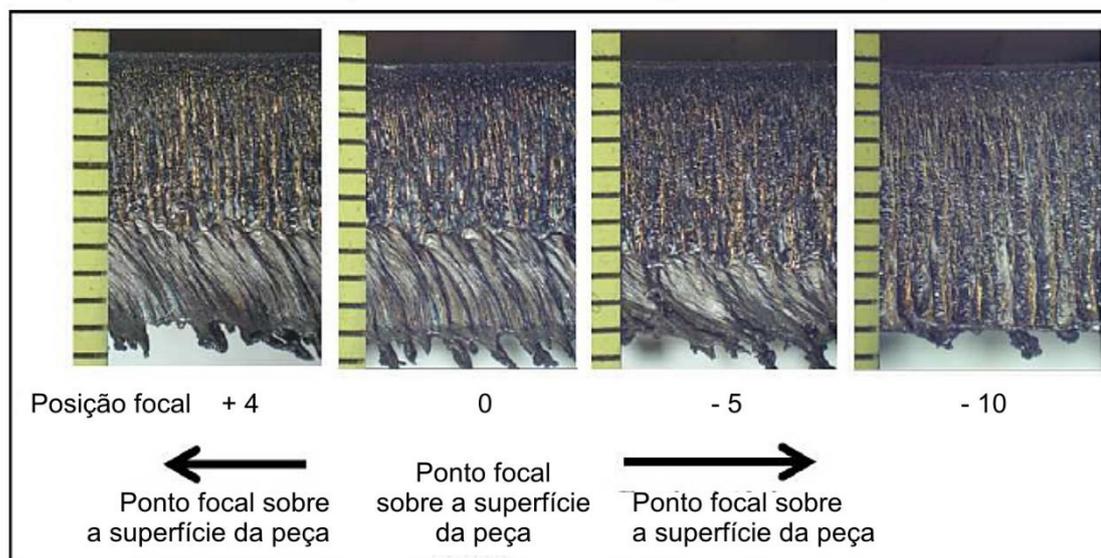
A posição do ponto focal que afeta a intensidade da potência do laser na peça de trabalho influencia o tamanho do corte e afeta o processo de remoção do material

fundido, afetando assim a qualidade da aresta de corte. Para chapas grossas, pode ser preferível que o foco seja posicionado em um terço da espessura da chapa, abaixo da superfície. No caso específico do corte a laser de fibra, considerado pela Doutora Wandera, a posição focal na superfície superior da peça resultou em cortes estreitos, nos quais o mecanismo de remoção do fundido nos cortes estreitos de chapas de seções espessas causa fixação de escória na borda de corte inferior (WANDERA C. , Capítulo 18 - Fiber Lasers in Material Processing, 2016). Assim, ao cortar chapas de seção espessa com laser de fibra, posições focais abaixo da superfície superior da peça de trabalho são essenciais de modo a obter cortes mais largos que permitam a remoção eficiente do material fundido, desde que a intensidade de energia na superfície superior da peça seja suficiente para obter uma penetração completa da peça de trabalho. No corte de uma peça de aço inoxidável de 10 mm usando o laser de fibra, conforme representado na Figura 77, a tendência para fixação de escória na borda de corte inferior é mais significativa com posições de ponto focal localizadas na metade superior da espessura da peça, enquanto as posições focais próximas à superfície inferior da peça de trabalho produzem cortes limpos e livres de escória por causa dos cortes mais largos formados com essas posições focais (STEEN, Capítulo 4 - Laser Welding, 2003).

Figura 77 - EFEITO DA POSIÇÃO DO PONTO FOCAL NA ADERÊNCIA DA ESCÓRIA EM AÇO INOXIDÁVEL DE 10 MM.

**Parâmetros comuns do processo de corte:**

Aço inox de 10mm; Laser de fibra 4 kW; Velocidade de corte: 1,0 m/min, Bico de 2,5 mm; Comprimento focal 254 mm; Gás de assistência nitrogênio a 16 bar de pressão.



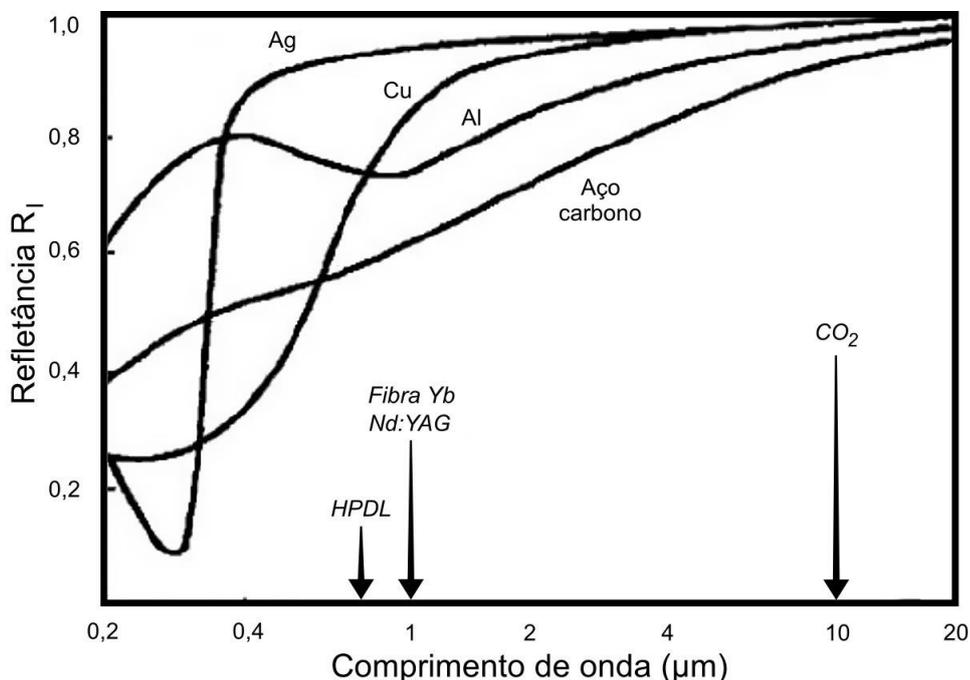
FONTE: Adaptado da figura 10 de (WANDERA, SALMINEN, & KUJANPÄÄ, Inert gas cutting of thick-section stainless steel and medium-section aluminum using a high power fiber laser, 2009, p. 158)

LEGENDA: Corte processado com laser de fibra de itérbio 4kW.

## 7.8. CONSIDERAÇÕES SOBRE MATERIAIS

Nos próximos itens é considerado o comportamento de metais e não-metais quando cortados com laser. A eficácia de um laser no processamento de um determinado material depende das propriedades do material, por exemplo: a absorptividade àquele comprimento de onda (consulte a Tabela 3 – ABSORTIVIDADE ESPECTRAL NORMAL DE MATERIAIS EM COMPRIMENTOS DE ONDA DE LASER IMPORTANTES.), condutividade térmica, pontos de fusão e ebulição, calor da reação e tensão superficial do material fundido (KANNATEY-ASIBU JR., Capítulo 14 - Background on Laser Processing, 2009). A Figura 78 é um gráfico da refletância de prata, cobre, alumínio e aço carbono aos comprimentos de onda de  $2 \cdot 10^{-7}$  a  $2 \cdot 10^{-5}$  m, com indicação da faixa de funcionamento dos lasers de diodo de alta potência (HPDL), laser de fibra e de CO<sub>2</sub>. A Figura 80 considera a refletância de alumínio, cobre, ouro, níquel, platina, ródio, prata, prata com deposição de filme e alumínio com deposição de filme, em comprimentos de onda  $2 \cdot 10^{-7}$  a  $2 \cdot 10^{-6}$  m (QUAZI, et al., 2015). Conforme Equação 7.6,  $A = 1 - R$ , no qual os pares absorptância-reflectância e absorptividade-reflexividade são complementos relativos (para diferença conceitual, consulte o subitem 7.6.1).

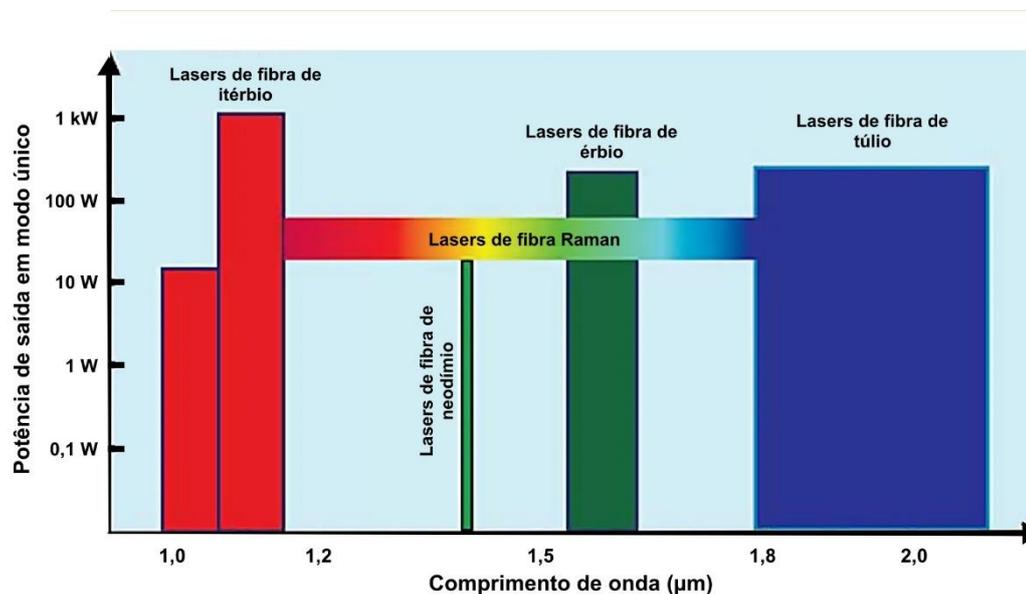
Figura 78 - REFLETÂNCIA ESPECTRAL DE PRATA, COBRE, ALUMÍNIO E AÇO CARBONO AOS COMPRIMENTOS DE ONDA  $2 \cdot 10^{-7}$  A  $2 \cdot 10^{-5}$  M.



FONTE: Adaptado da figura 1 de (QUAZI, et al., 2015, p. 108).

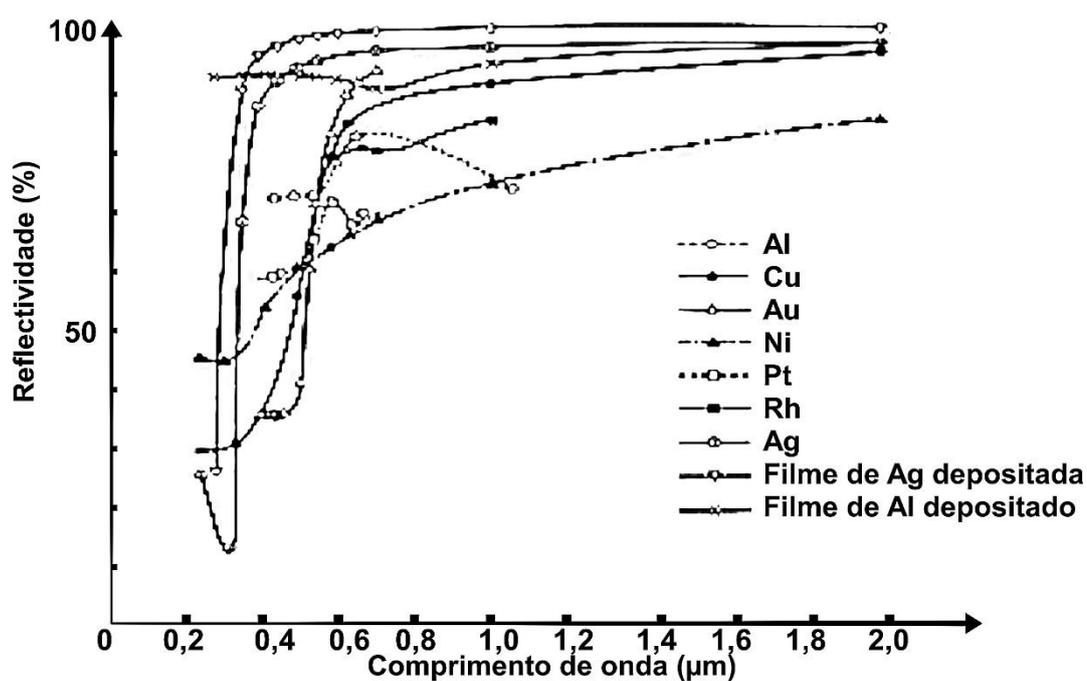
LEGENDA: Indicados os comprimentos de onda de emissão de laser de diodo de alta potência (HPDL); laser de estado sólido granada ítrio alumínio dopada com neodímio (Nd:YAG); laser de fibra dopada de itérbio (Fibra Yb) e laser de dióxido de carbono (CO<sub>2</sub>). Para comparar maiores variedades de emissão dos lasers de fibra, consulte: Figura 79 e Figura 96.

Figura 79 – COMPRIMENTO DE ONDA DE OPERAÇÃO E POTÊNCIA DE SAÍDA EM MODO ÚNICO DOS LASERS DE FIBRA.



FONTE: adaptado de (GENG & JIANG. Fiber Lasers: The 2 μm Market Heats Up. Optics & Photonics News Julho/Agosto de 2014).

Figura 80 - REFLEXIVIDADE DOS PRINCIPAIS METAIS AOS COMPRIMENTOS DE ONDA  $2.10^{-7}$  A  $2.10^{-6}$  M.



FONTE: Adaptado de (KANBE, Tokuzo. Mekki Gijutsu Manyuaru, Associação Japonesa de Padrões).

### 7.8.1. Metais

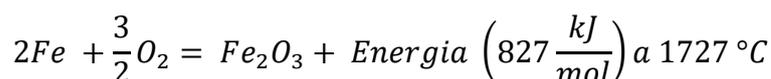
Um resumo dos gases de assistência comumente empregados no corte a laser de alguns metais mais comuns pode ser consultado no Quadro 4.

#### 7.8.1.1. Aço carbono simples

A reação exotérmica entre o oxigênio e o ferro auxilia no processo de corte, assim para corte de aços carbono o processo é normalmente assistido por oxigênio. O gás de assistência reativo resulta em velocidades de corte muito superiores às que poderiam ser obtidas se um gás inerte fosse usado (KANNATEY-ASIBU JR., Capítulo 15 - Laser Cutting and Drilling, 2009, p. 457). As reações exotérmicas são dadas pelas seguintes equações:



Equação 7.9



Equação 7.10

A viscosidade do metal fundido diminui quando oxidado, o que facilita sua remoção pelo jato de gás, assim o corte assistido por oxigênio também ajuda a reduzir a formação de escória (YILBAS & SAHIN, 1995). Um aumento no teor de carbono do aço tende a melhorar a qualidade da aresta, mas com uma maior tendência a trincas na zona afetada pelo calor e formação de martensita. A presença de fósforo e enxofre no aço carbono pode causar queima ao longo da borda cortada (MASHIKHI, POWELL, KAPLAN, & VOISEY, 2011).

#### 7.8.1.2. Aço galvanizado

Kannatey-Asibu Jr. chama atenção ao fato de que o zinco, apesar de ter uma temperatura de fusão 900 K inferior à do aço, sua presença na galvanização aumenta o efeito do “escudo de plasma” e reduz a eficiência do processo. Esse efeito de “escudo de plasma” determina um ponto de saturação à relação de proporcionalidade entre a potência do laser e a velocidade máxima de corte, pois ao atingir tal limite ocorre a absorção do feixe de laser pelo plasma, logo acima da superfície da peça de trabalho. Esse efeito de “escudo de plasma” força um processo mais lento velocidade de corte (KANNATEY-ASIBU JR., Capítulo 15 - Laser Cutting and Drilling, 2009, p. 457). Maiores detalhes sobre efeito de absorção no plasma ou bremsstrahlung inverso estão no subitem 7.6.2. Com a formação de óxido de zinco, que não flui facilmente, o corte a laser de aço galvanizado geralmente resulta em arestas de corte ásperas

(estriada) e escória extensa. Para obter qualidade razoável, normalmente são usadas velocidades de corte mais baixas se comparadas às velocidades usadas em aços não-revestidos, em torno de 20% de diferença na velocidade de corte de produção (CARISTAN, Capítulo 3 - Materials, 2004).

#### 7.8.1.3. Aços inoxidáveis

Em função da pequena zona afetada pelo calor no corte a laser, qualquer impacto que o processo de corte possa ter sobre a resistência à corrosão nas chapas cortadas é mínimo, de acordo com (SHENG & JOSHI, 1995). Ao usar como gás de assistência o oxigênio, o calor da reação resultante não é tão significativo quanto o associado aos aços carbono simples. Isso ocorre pois o filme contendo  $\text{Cr}_2\text{O}_3$ , formado pelo contato do oxigênio e cromo, previne com eficácia a oxidação exotérmica de ferro também no metal fundido no processo de corte, de sorte que o uso de oxigênio como gás auxiliar não gera uma vantagem significativa de calor exotérmico ao corte e, como ônus, gera escamas de corrosão de  $\text{FeO}$  (CARISTAN, Capítulo 3 - Materials, 2004). Assim, as velocidades de corte alcançadas para os aços inoxidáveis são relativamente *menores* do que as dos aços carbono (YILBAS & SAHIN, 1995). O  $\text{Cr}_2\text{O}_3$  tem uma temperatura de fusão mais alta do que o ferro e a película protetora de óxido de cromo se solidifica ao redor de gotículas de metal fundido durante o corte e adere à borda inferior do corte, criando escória.

Os aços inoxidáveis ferríticos e martensíticos tendem a produzir cortes limpos e com arestas suaves, enquanto os aços inoxidáveis austeníticos tendem a apresentar escória saindo da superfície inferior da peça, principalmente devido à alta viscosidade do níquel fundido (AGGOUNE, AMARA, & DEBIANE, 2012). A oxidação do níquel cria uma película preta que reveste a borda de corte e gera porosidade quando soldada. Pelas razões anteriores, o gás auxiliar de nitrogênio neutro é predominantemente usado para corte a laser de aço inoxidável, particularmente para uma redução de escória.

#### 7.8.1.4. Aço liga e aços ferramenta

As bordas produzidas pelo corte a laser de aços de alta-liga, como o AISI 4340, são geralmente limpas e quadradas. Isso decorre principalmente para do controle mais preciso do conteúdo do elemento de liga nesses metais. Os aços ligados respondem bem ao endurecimento a laser (ION, Capítulo 5 - Engineering Materials, 2005).

Da mesma forma, alguns aços para ferramentas são bons candidatos para corte a laser. O corte a laser gera estruturas metaestáveis de martensita e austenita residual nas camadas superficiais, que são capazes de sofrer intenso endurecimento por deformação sob a ação de carga de contato. Como o corte a laser a gás não é acompanhado pelo aparecimento de múltiplas regiões de aquecimento, a

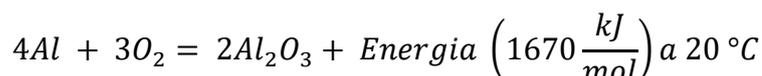
homogeneidade das propriedades é melhorada em toda a superfície de corte (AFANASIEVA, et al., 2016). No entanto, os aços ferramenta à base de tungstênio - grupos T e H - retêm muito calor no estado fundido e, portanto, queimam com frequência. Aços ferramenta com teor de Mn na extremidade alta de 0,5% e teor de S de 0,04% atrapalham o corte a laser o suficiente para reduzir a velocidade de corte e piorar a qualidade da aresta de corte: a escória aderida na borda inferior do corte cresce quase proporcionalmente à espessura do material sendo cortado (CARISTAN, Capítulo 3 - Materials, 2004).

#### 7.8.1.5. Alumínio e suas ligas

O alumínio e suas ligas são altamente refletivos (até 97%) do alto comprimento de onda de 10,6  $\mu\text{m}$  do feixe de laser  $\text{CO}_2$ . Para os lasers de estado sólido e laser de fibra, de 1 a 2  $\mu\text{m}$ , a reflexividade é bem mais contida, conforme Figura 78. Isso, associado à sua condutividade térmica relativamente alta ( $\approx 247 \text{ W / m.K}$ ), dificulta o início do corte de ligas de alumínio. Para cortar ligas de alumínio são necessárias intensidades altas de feixe, obtidas usando superpulsação ou hiperpulsação (discutidos no subitem 7.4.2.6 sobre a forma do feixe). A absorção do feixe de laser na superfície superior pode ser aprimorada usando técnicas de revestimento, sendo considerado eficaz a anodização do alumínio (ASTARITA, et al., 2014) (ZAVECZ, SAIFI, & NOTIS, Metal reflectivity under high-intensity optical radiation, 1975). Isso é feito revestindo o material base com uma camada fina (aproximadamente 20  $\mu\text{m}$ ) de  $\text{Al}_2\text{O}_3$ , que pode ser melhorada com revestimento de grafite.

Mas a reflexão não vem inteiramente da superfície da chapa, é causada sobretudo após a formação da poça de fusão, de modo que simplesmente borrar a superfície da folha com um revestimento não refletivo não eliminará completamente o problema. Como regra geral, a adição de elementos de liga reduz a reflexividade do alumínio ao laser, portanto, o alumínio puro é mais difícil de processar do que uma liga da série 5000 mais tradicional. Para chapas até 5mm de alumínio, a utilização de uma máquina de corte a laser de fibra é a mais indicada, sobretudo por minimizar consequências da reflexão (DAY, 2015).

O alumínio sofre uma reação altamente exotérmica com o oxigênio:



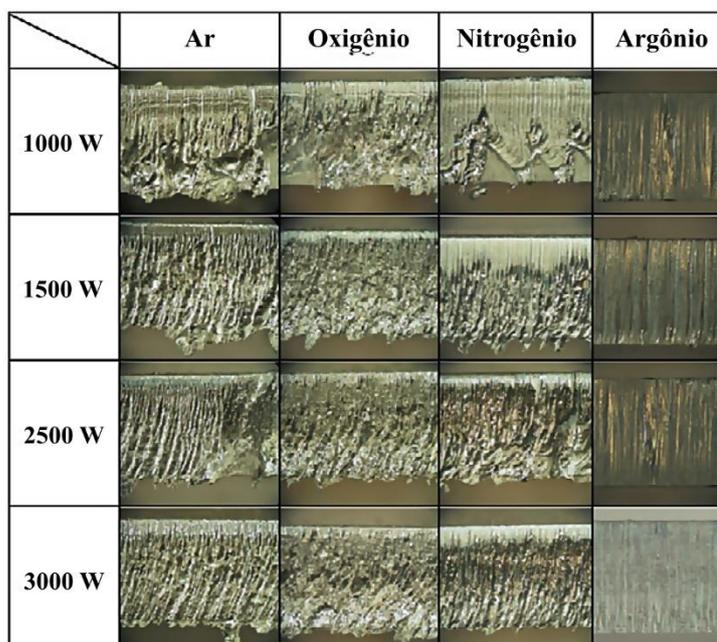
Equação 7.11

o que até certo ponto tende a aumentar as velocidades de corte. No entanto, a reação exotérmica não é tão eficaz no aumento das velocidades de corte para a mesma quantidade de energia liberada em comparação com o caso do ferro uma vez que a camada de óxido resultante, óxido de alumínio ( $\text{Al}_2\text{O}_3$ ), reduz a difusão de átomos para a frente da reação, reduzindo assim a taxa de oxidação de forma semelhante ao cromo presente no aço inoxidável. A camada de óxido é

periodicamente rompida durante o processo de corte pelo jato de oxigênio pressurizado, o que permite que ocorra uma certa quantidade de oxidação. Entretanto, no geral, a função do gás auxiliar no corte desses materiais acaba sendo a mera ejeção do metal fundido, logo a assistência do oxigênio normalmente não é recomendada para o corte de alumínio, sendo preferível a utilização do argônio, que resulta na máxima qualidade da borda, seguido do nitrogênio, sobretudo em chapas de maior espessura ou naquelas em que a qualidade do corte seja crítica (vide Figura 81) (RIVEIRO A. , et al., 2019, p. 46). Para menor custo do processo, porém, o ar atmosférico é geralmente o mais utilizado no corte do alumínio, porém com maior presença de escória a remover (conforme Quadro 4). Isso porque a alta condutividade térmica do material base leva a um derretimento a baixa temperatura, o que pode ser um problema no corte de alumínio no qual a tensão superficial da camada fundida é relativamente alta e, portanto, mais difícil de ejetar, deixando escória na borda inferior do corte (RIVEIRO A. , et al., 2011). A escória formada é facilmente removida por meios mecânicos. A alta condutividade térmica do material de base pode às vezes levar ao superaquecimento de pequenos componentes durante o corte. Isso, combinado com a baixa temperatura de fusão, pode resultar em fusão em larga escala. Isso pode ser evitado pulverizando água ou óleo solúvel no componente durante o corte. A água é mantida afastada pela pressão do jato de gás e resfria o componente por evaporação (CARISTAN, Capítulo 5 - Methods , 2004).

O corte a laser pode produzir rachaduras intergranulares (rachaduras que se propagam preferencialmente ao longo dos limites dos grãos) na superfície de algumas ligas de alumínio, tornando-as inadequadas para os componentes estruturais de aeronaves (KANNATEY-ASIBU JR., Capítulo 15 - Laser Cutting and Drilling, 2009).

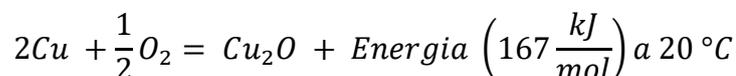
Figura 81 - MICROGRAFIAS ÓPTICAS DA MORFOLOGIA DA SUPERFÍCIE DE BORDA DE CHAPA DE ALUMÍNIO CORTADA A LASER, EM FUNÇÃO DO TIPO DE GÁS DE ASSISTÊNCIA E DA POTÊNCIA DE CORTE



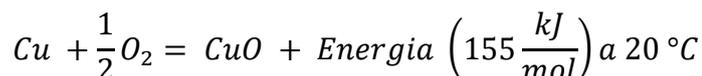
FONTE: Adaptado da figura 3 de (RIVEIRO A. , et al., 2011, p. 551).

#### 7.8.1.6. Cobre e suas ligas

A condutividade térmica ( $\approx 398 \text{ W / m.K}$ ) e a refletividade (até 98,4%) do cobre são ainda maiores que as do alumínio, dificultando ainda mais seu processamento no corte a laser (ZAVECZ, SAIFI, & NOTIS, Metal reflectivity under high-intensity optical radiation, 1975). Aumento na velocidade de corte com o uso do oxigênio deve-se principalmente ao aumento da absorvidade resultante da formação de uma camada de óxido altamente absorvente nas proximidades do corte, já que a reação exotérmica associada ao processo é relativamente pequena:



Equação 7.12



Equação 7.13

Várias ligas de cobre, como latão (Cu+Zn) e bronze (Cu+Sn), são processadas com mais eficácia do que o cobre puro devido a uma reflexividade reduzida e menor condutividade térmica (CARISTAN, Capítulo 3 - Materials, 2004).

### 7.8.1.7. Titânio e suas ligas

A reação exotérmica entre o oxigênio e o titânio quando o gás ativo oxigênio é usado aumenta muito a eficiência do corte e, por conseguinte, as velocidades de corte. Durante o corte térmico com oxigênio, o titânio reage com o O<sub>2</sub> em uma reação altamente exotérmica (Equação 7.14). Por ser um metal altamente reativo, a reação exotérmica fornece 90% da energia do corte (AGGOUNE, AMARA, & DEBIANE, 2012). Ele também reage com gases neutros, como N<sub>2</sub>, em um ambiente no qual as temperaturas sobem acima de 480 ° C. A combustão altamente reativa do titânio pode gerar plumas de chamas explosivas, por isso não se presta a cortes finos e intrincados (CARISTAN, Capítulo 3 - Materials, 2004, p. 59).

A reação com oxigênio é



Equação 7.14

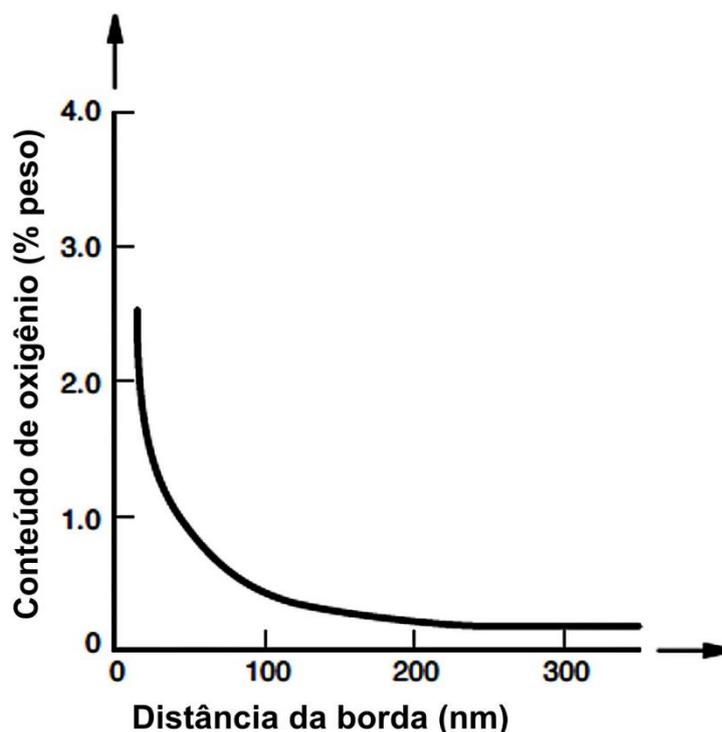
Pela alta velocidade de reação e temperaturas, uma camada de óxido relativamente grossa e quebradiça (da ordem de 1 a 3 mm) é normalmente produzida ao longo da borda de corte. Durante a oxidação em alta temperatura, a migração de oxigênio entre a atmosfera ambiente e as zonas intersticiais entre os átomos de titânio no corpo acima de 885° C é facilitada, produzindo uma borda quebradiça. Em aplicações em que a camada de óxido não seja prejudicial – aplicações em que o titânio seja primariamente utilizado por resistência à corrosão, rigidez e leveza – esse processo de corte com gás ativo O<sub>2</sub> pode ser implementado, entretanto não é o mais comumente usado (CARISTAN, Capítulo 3 - Materials, 2004).

Kannatey-Asibu, no capítulo 15, faz observações especialmente relevantes para aplicações aeroespaciais do titânio, em que é um metal amplamente empregado por suas características de tenacidade, resistência à fadiga e alta relação resistência/peso, propriedades que seriam altamente degradadas pela camada de óxido formada, logo o corte de titânio com auxílio de oxigênio para tais aplicações é indesejável. Recomenda-se cortar titânio a laser com gás auxiliar inerte puro, como argônio (Ar). Isso permite um corte mais preciso de recursos intrincados, pois a oxidação é minimizada, se não eliminada (KANNATEY-ASIBU JR., Capítulo 15 - Laser Cutting and Drilling, 2009, p. 459). A formação de escória é reduzida ou eliminada. As microfissuras ao longo da borda de corte são eliminadas, desde que o corte seja protegido da oxidação em alta temperatura durante e após a interação com um feixe de laser. Uma aparência cinza metálico brilhante indica uma borda de corte de titânio livre de oxidação. A ZTA exibe um aumento de dureza muito menos severo do que o obtido com o corte térmico assistido por oxigênio (CARISTAN, Capítulo 3 - Materials, 2004).

Para aplicações aeroespaciais é preferível usar um auxiliar de gás inerte ao cortar ligas de titânio, mas a uma taxa de corte reduzida que pode ser uma ordem de magnitude inferior à atingível ao usar o assistente de oxigênio, porém existe uma tendência para a formação de escória na parte inferior da aresta de corte nessas

circunstâncias (KANNATEY-ASIBU JR., Capítulo 15 - Laser Cutting and Drilling, 2009, p. 460). Quando uma liga de titânio  $Ti_6Al_4V$  é cortada com um laser usando gás inerte de alta pressão, a variação do conteúdo de oxigênio (e, portanto, de óxido) com a profundidade a partir da aresta de corte é ilustrada na Figura 82.

Figura 82 - ILUSTRAÇÃO DA VARIAÇÃO DO CONTEÚDO DE OXIGÊNIO COM A DISTÂNCIA DA ARESTA DE CORTE.

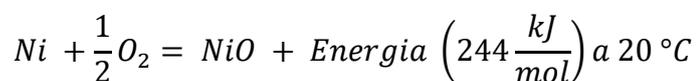


FONTE: Adaptado da figura 6 de (POWELL, FRASS, MENZIES, & FUHR, 1989) apud figura 15.20 (KANNATEY-ASIBU JR., Capítulo 15 - Laser Cutting and Drilling, 2009, p. 459).

LEGENDA: Corte a laser de uma liga de titânio,  $Ti_6Al_4V$ , usando gás inerte argônio de alta pressão.

#### 7.8.1.8. *Níquel e suas ligas*

O níquel puro possui uma condutividade térmica ( $\approx 59 \text{ W / m.K}$ ) e reflexividade (Figura 80) relativamente baixas em comparação com as de cobre e alumínio, propriedades que favorecem seu corte usando lasers de diversos tipos (KANNATEY-ASIBU JR., Capítulo 15 - Laser Cutting and Drilling, 2009, p. 460). O uso do gás de assistência oxigênio melhora as velocidades de corte como resultado da reação exotérmica:



Essa reação é mais eficaz ao cortar ligas de Ni-Fe, mas quando se trata das ligas de níquel, no entanto, Kannatey-Asibu Jr. ressalva que é necessário analisar com cautela a reflexividade e condutividade da liga específica, que podem tornar mais difícil o processamento com lasers.

A alta viscosidade do níquel fundido dificulta sua ejeção e, com frequência, resulta na formação de escória. Alta velocidade de corte é possível, mas com presença de escória e oxidação da borda, o que pode ser relevado em algumas aplicações. Neste caso o gás auxiliar pode ser o O<sub>2</sub> de baixa pressão até 3 bar de pressão absoluta. Ligas de níquel processadas para aplicações da indústria aeroespacial e de energia requerem N<sub>2</sub> de alta pressão (3–10 bar de pressão relativa), com menor velocidade de corte, menos escória e nenhuma oxidação de borda (CARISTAN, Capítulo 3 - Materials, 2004, p. 59).

Kannatey-Asibu Jr. pondera que um número considerável de ligas de níquel podem ser facilmente processados com laser, porém os efeitos metalúrgicos do processo, mesmo na pequena ZTA, impedem seu uso em algumas aplicações aeroespaciais (vide Quadro 4 - TIPOS DE GÁS AUXILIAR TÍPICOS USADOS NO CORTE A LASER INDUSTRIAL DE METAIS.).

### 7.8.2. Não metais

Quadro 7 - MECANISMOS DE CORTE A LASER PARA DIVERSOS MATERIAIS DE ENGENHARIA.

Material	Corte por fusão com gás inerte	Corte por fusão com gás reativo	Vaporização	Degradação química	Riscamento
Ligas ferrosas	✓	✓	✗	✗	✗
Ligas não ferrosas	✓	✓ Ti	✗	✗	✗
Polímeros	✓ Termoplásticos	✓ Termofixos	✓ PMMA	✓ Termofixos	✗
Cerâmica	✓	✗	✗	✗	✓
Vidros	✓	✗	✗	✗	✓
Elastômeros	✗	✗	✗	✓	✗
Compósitos	✓	✗	✗	✓ Madeira	✓

Fonte: adaptado da Tabela 14.1 de (ION, Capítulo 14 - Cutting, 2005)

### 7.8.2.1. *Polímeros*

O intenso raio laser tende a quebrar as cadeias poliméricas no corte destes materiais e, à medida que a resistência do polímero aumenta, há uma tendência para que ocorra carbonização ao longo da borda cortada, pois é necessária mais energia para quebrar as ligações. O poliéster, acrílico (PMMA), polietileno (PE), polipropileno (PP) e o policarbonato (PC) são relativamente mais fáceis de cortar e não há tendência de haver carbonização nas bordas, enquanto com o PVC (cloreto de polivinil), polímero fenólico e poliimida (PI), uma quantidade significativa de material decomposto pode ser encontrada ao longo da borda cortada (STEEN, Capítulo 3 - Laser Cutting, 2003 , p. 139). As arestas produzidas nos termoplásticos parecem polidas resultado da ressolidificação da fusão. Geralmente é preferível usar ar ao invés de oxigênio no corte de materiais poliméricos (KUKREJA, 1988). Alguns polímeros, notavelmente o acrílico - polimetilmetacrilato (PMMA) - são cortados usando o mecanismo de vaporização (ION, Capítulo 14 - Cutting, 2005). Sempre deve-se tomar cuidado para conter vapores perigosos e/ou corrosivos que podem ser gerados no processamento de polímeros (BADONIYA, 2018).

Elastômeros - borracha natural e sintética - são efetivamente cortadas em espessuras de até 19 mm usando lasers e tendem a exibir uma ligeira viscosidade ao longo da borda quando cortadas recentemente (KANNATEY-ASIBU JR., Capítulo 15 - Laser Cutting and Drilling, 2009) (STEEN, Capítulo 3 - Laser Cutting, 2003 , p. 139).

### 7.8.2.2. *Compósitos*

Kannatey-Asibu lembra o fato de que compósitos consistem, por definição, em diferentes materiais, então o autor pondera que as condições de corte determinadas para apenas um dos materiais componentes pode resultar na degradação dos outros materiais durante o corte. É impossível generalizar o processo para materiais que podem ser tão distintos, mas o autor sugere como abordagem para minimizar o problema de degradação realizar o corte em velocidades mais altas usando lasers de maior potência. Quando as propriedades dos materiais constituintes são semelhantes, o material compósito fica mais fácil de processar usando um laser. Em todos os casos, deve-se também ter cuidado ao conter vapores e materiais perigosos (KANNATEY-ASIBU JR., Capítulo 15 - Laser Cutting and Drilling, 2009, p. 460). Uma interessante e abrangente revisão bibliográfica do corte a laser de compósitos de polímeros, de madeira, de fibra de vidro e outros é feita por Badonyia no artigo “*CO<sub>2</sub> Laser Cutting of Different Materials – A Review*” (BADONIYA, 2018).

### 7.8.2.3. *Quartzo e vidro*

O alto coeficiente de expansão térmica em um material frágil como o vidro e pedras naturais resulta em choque térmico, que tende a formar rachaduras nas

bordas. Uma técnica para cortar esses materiais frágeis de alto coeficiente de expansão térmica compreende, primeiramente, a gravação a laser para remover uma pequena quantidade de material da superfície do vidro (*scribing*, riscamento) e, em seguida, fraturar o material ao longo da linha de gravação mediante aplicação de força fletora (STEEN, Capítulo 3 - Laser Cutting, 2003, p. 139). Outra abordagem envolve a fratura térmica controlada, que tira proveito das tensões térmicas localizadas que são configuradas devido ao alto coeficiente de expansão térmica e alta intensidade do feixe para fraturar o material. O processo é bastante controlável, então a fratura segue essencialmente o caminho do feixe (NISAR, LI, & SHEIKH, 2013). O quadro 8, adaptado de (NISAR, LI, & SHEIKH, 2013), compara algumas técnicas para corte a laser de vidro.

O quartzo, alumina, porcelana, amianto e mica, em comparação, possuem um coeficiente de expansão relativamente baixo, que facilita o seu corte (KANNATEY-ASIBU JR., Capítulo 15 - Laser Cutting and Drilling, 2009).

Quadro 8 - UMA COMPARAÇÃO ENTRE AS TÉCNICAS DE CORTE A LASER DE VIDRO.

<b>Riscamento a laser e quebra</b>	<b>Técnica de fratura controlada</b>	<b>Derretimento e evaporação a laser</b>	<b>Lasers de pulso curto</b>
Incorre em danos às bordas	Campos precisos térmicos e de tensão necessários	Acabamento superficial ruim	Faixa de espessura limitada
Escoriação de pré-requisito (opcional)	Escoriação de pré-requisito (opcional)	Nenhuma Escoriação necessária	Escoriação de pré-requisito (opcional)
Balanceamento do traçador (escoriação) e da velocidade de quebra	Desvio de corte nas bordas inicial e final da folha de vidro	Depósitos de vidro derretido	Difícil de controlar a profundidade das microfissuras
Concentração de energia do laser em uma linha estreita	Difícil de controlar a rachadura em altas velocidades	Polimento e retificação necessários	Às vezes, o polimento é necessário
Processo de duas etapas	Processo de uma única etapa	Processo de duas etapas	Varredura múltipla na maioria dos casos

Fonte: Quadro II de (NISAR, LI, & SHEIKH, 2013)

#### 7.8.2.4. Cerâmica

Por serem materiais inerentemente frágeis, cerâmicas são susceptíveis a rachaduras causadas pelos gradientes de alta temperatura transversal associados ao processamento a laser, uma vez que a condutividade térmica de tais materiais diminui rapidamente com o aumento da temperatura, reduz-se significativamente a difusão térmica no corpo da peça de trabalho. Uma solução geralmente empregada consiste em pré-aquecer toda a peça a uma temperatura relativamente alta antes de cortar ou

pré-aquecer somente a região diretamente à frente do feixe de laser, de modo a reduzir o gradiente de temperatura transversal e, por conseguinte, a tendência a rachaduras (KANNATEY-ASIBU JR., Capítulo 15 - Laser Cutting and Drilling, 2009).

A ablação (vide subitem 7.2.3) usa a destruição de ligações químicas induzida por fótons para cortar o material. Os lasers de excímero que emitem luz UV em cerca de 0,3  $\mu\text{m}$  de comprimento de onda cortam e perfuram cerâmicas sem geração significativa de calor (CARISTAN, Capítulo 3 - Materials, 2004). O artigo "*Laser cutting of thick ceramic substrates by controlled fracture technique*" (TSAI & CHEN, 2003) descreve o corte a laser de amostras de cerâmica espessas que foi obtido controlando cuidadosamente a fratura de uma área irradiada. Em outra técnica, Badoniya menciona que um corte "sem trincas", estando o comprimento das micro trincas limitado ao tamanho do grão, pode ser obtido utilizando um processo de corte de alta velocidade e de múltiplas passagens usando um laser CO<sub>2</sub> pulsado (BADONIYA, 2018).

#### 7.8.2.5. *Têxteis*

A indústria têxtil usa feixe de laser para cortar tecidos, decoração, impressão de logotipos, marcação e cortes de padrões muito intrincados. Como um processamento sem contato, a tecnologia laser está sendo aplicada em diversas áreas para a produção de roupas e tratamento de superfície devido às suas vantagens como nenhum contato físico, nenhuma água, corantes e solventes aplicados, alto grau de automação e tratamento rápido e preciso (YUAN, CHEN, & LUZZI, 2017). Para aumentar a produtividade, várias camadas de tecido podem ser empilhadas e cortadas ao mesmo tempo. No entanto, isso faz com que as bordas das camadas individuais fiquem grudadas após o corte, o que pode ser evitado pressionando as camadas para impedir que o gás de corte entre lateralmente (KANNATEY-ASIBU JR., Capítulo 15 - Laser Cutting and Drilling, 2009).

#### 7.8.2.6. *Madeira*

Algumas madeiras são cortadas usando o mecanismo de vaporização, enquanto em outras madeiras ou compósitos de madeira o corte ocorre pelo mecanismo de degradação química, na qual a ação do feixe de laser quebra ligações químicas e forma novos compostos (ION, Capítulo 14 - Cutting, 2005). A madeira pode ser cortada usando lasers de CO<sub>2</sub>, enquanto o uso de um laser de fibra nessa aplicação é muito limitado, pela conclusão do artigo "*The effect of moisture content in fibre laser cutting of pine wood*" de (HERNÁNDEZ-CASTAÑEDA, KURSAD SEZER, & LI, 2011). A taxa de corte tende a aumentar à medida que a densidade e o teor de umidade da madeira diminuem, mas parece ser independente da direção do grão. Um problema frequentemente encontrado é a carbonização da borda cortada durante o corte, porém a extensão da carbonização é geralmente muito pequena - da ordem de microns em profundidade - e diminui com o aumento da velocidade de corte

(KANNATEY-ASIBU JR., Capítulo 15 - Laser Cutting and Drilling, 2009). No caso específico de corte de madeira e compósitos de madeira por meio de feixe de laser, trata-se de um processo complicado pois envolve uma reação química exotérmica e é influenciado por diversos fatores incontrolláveis como: composição, densidade, umidade, condutividade térmica e força de ligação interna (BADONIYA, 2018).

#### 7.8.2.7. *Papel e papelão*

Por não gerar fibras quebradas que podem permanecer presas ao papel e interferir na impressão, esta é a principal vantagem do corte a laser de papel e papelão sobre o corte convencional (KANNATEY-ASIBU JR., Capítulo 15 - Laser Cutting and Drilling, 2009).

### 7.9. VANTAGENS E DESVANTAGENS

O corte a laser é mais um método a ser considerado no corte, perfuração, tratamento superficial e solda industrial. Apresenta abundantes vantagens em muitas aplicações, porém mostra-se atualmente inviável em tantas outras. Primeiramente é apresentado o Quadro 9, adaptado da tabela 3.1 de (STEEN, Capítulo 3 - Laser Cutting, 2003 , p. 109), na qual o autor compara méritos e pontos fracos de dez diferentes processos de corte. Já nos subitens seguintes estão elencadas algumas vantagens, desvantagens e comparações a outros processos concorrentes de corte, de maneira mais específica.

Quadro 9 – COMPARAÇÃO DE DIFERENTES PROCESSOS DE CORTE.

<b>Qualidade</b>	<b>Laser</b>	<b>Punção</b>	<b>Plasma</b>	<b>Desbaste</b>	<b>Jato de fluido abrasivo</b>	<b>Eletroerosão</b>	<b>Fresa CNC</b>	<b>Serrar</b>	<b>Usinagem ultrassônica</b>	<b>Oxiacetileno</b>
Taxa de corte	✓	✓	✓	✗	✗	✗	✗		✗	✗
Qualidade da borda	✓	✓	✗	✗	✓	✓	✓	✗	✓	✗
Largura da abertura de corte	✓	✓	✗		✓	✓		✗		

<b>Qualidade</b>	<b>Laser</b>	<b>Punção</b>	<b>Plasma</b>	<b>Desbaste</b>	<b>Jato de fluido abrasivo</b>	<b>Eletroerosão</b>	<b>Fresa CNC</b>	<b>Serrar</b>	<b>Usinagem ultrassônica</b>	<b>Oxiacetileno</b>
Refugo e aparas	✓	✓		✗	✓			✗		✓
Distorção	✓		✗		✓		✓		✓	✗
Ruído	✓	✗	✗		✗					✗
Metal & não metal	✓		✗		✓		✓		✓	
Formas complexas	✓	✗	✓							
Agrupamento de peças	✓	✗			✓					
Múltiplas camadas	✗	✓								
Custo do equipamento	✗				✗			✓		✓
Custo operacional						✗		✓		✓
Alto volume	✓	✓		✗					✗	
Flexibilidade	✓	✗	✓	✓	✓	✗				
Desgaste da ferramenta	✓	✗	✓	✗	✓		✗	✗	✗	✓
Automação	✓	✓	✓	✗	✓	✗	✓			✗
Zona termicamente afetada	✓	✓	✗		✓	✓	✓			✗
Fixação	✓	✗	✓		✓		✗	✗		
Cortes / furos cegos	✓	✓	✓	✓		✗	✗		✗	✓
Borda soldável	✓	✓	✗	✓	✓	✓	✓		✓	✗

Qualidade	Laser	Punção	Plasma	Desbaste	Jato de fluido abrasivo	Eletroerosão	Fresa CNC	Serrar	Usinagem ultrassônica	Oxiacetileno
Troca de ferramenta	✓	✗	✓		✓					

- ✓ Mérito específico  
✗ Desvantagem específica

Fonte: Tabela 3.1 de (STEEN, Capítulo 3 - Laser Cutting, 2003 , p. 109).

### 7.9.1. Vantagens

Elijah Kannatey-Asibu Jr. (KANNATEY-ASIBU JR., Capítulo 15 - Laser Cutting and Drilling, 2009) compara o corte a laser aos processos de corte convencionais - como corte a plasma, usinagem por eletroerosão (EDM), corte por chama oxiacetileno e corte mecânico.

As vantagens *gerais* do corte a laser são as seguintes:

- Resulta em uma largura estreita do corte, reduzindo assim o desperdício. A largura reduzida do corte também torna mais viável a produção de contornos arbitrários.
- Altamente viável para médios, pequenos lotes ou mesmo unitários, como para prototipagem.
- Velocidades de corte relativamente altas.
- Zona termicamente afetada relativamente pequena, pois a entrada total de calor é relativamente pequena. Assim, há pouco dano ao material de base, tornando-o adequado para materiais sensíveis ao calor e inflamáveis. Também há muita pouca distorção e tensão residual.
- É um processo sem contato e, portanto, não há desgaste da ferramenta nem forças mecânicas que possam danificar peças delicadas. A falta de forças mecânicas também implica acessórios menos complexos para manter a peça fixada.
- É um bom processo tanto para materiais altamente deformáveis, como o papel, como também para materiais muito duros e difíceis de cortar, como o diamante.
- Alto grau de flexibilidade (que pode facilitar o corte de geometrias complexas) e baixo nível de ruído.
- As arestas de corte resultantes são quadradas e não arredondadas, como ocorre em muitos outros métodos de corte térmico.

### 7.9.2. Desvantagens

As principais desvantagens do corte a laser, também conforme Kannatey-Asibu Jr. (KANNATEY-ASIBU JR., Capítulo 15 - Laser Cutting and Drilling, 2009), são as seguintes:

- Materiais altamente refletivos e condutores - como ouro, prata, alumínio, cobre, bronze e latão - são difíceis de cortar usando lasers, pois podem refletir o raio para o equipamento e causar prejuízos. Tal situação pode ser amenizada com o uso de revestimentos pouco refletivos, porém a maior reflexividade ocorre quando a poça de fusão é formada, então mesmo o uso de revestimentos é limitado. Por não usarem espelhos, a reflexão do feixe é um problema menor no caso do laser de fibra.
- Materiais endurecíveis podem sofrer alterações das propriedades de maneira crítica com o endurecimento da aresta da peça cortada devido ao derretimento e a têmpera rápida associados ao processo.
- Apesar dos muitos avanços recentes, o corte a laser é tradicionalmente limitado ao corte de materiais finos, ou seja, alguns tantos milímetros de espessura. A alta potência desenvolvida em equipamentos da última década torna possível o corte de espessuras maiores, porém uma boa qualidade de aresta é um desafio.
- Sua capacidade de perfurar materiais, apesar de possível em furos passantes, é limitada pela dificuldade de ejeção do material, sobretudo em grandes profundidades. É difícil, portanto, cortar com precisão as fendas ou furos usando um laser. Cortes ou furos cegos são realizáveis somente em materiais volatizáveis, como madeira e acrílico (STEEN, Capítulo 3 - Laser Cutting, 2003 , p. 108).
- O custo inicial de capital de um sistema de corte a laser é relativamente alto, cerca de duas ordens de grandeza maior que o de um sistema de oxiacetileno (KANNATEY-ASIBU JR., Capítulo 15 - Laser Cutting and Drilling, 2009).
- O processamento de certos materiais (como polímeros) pode resultar na produção de vapores de escapamento perigosos.

### 7.9.3. Comparações

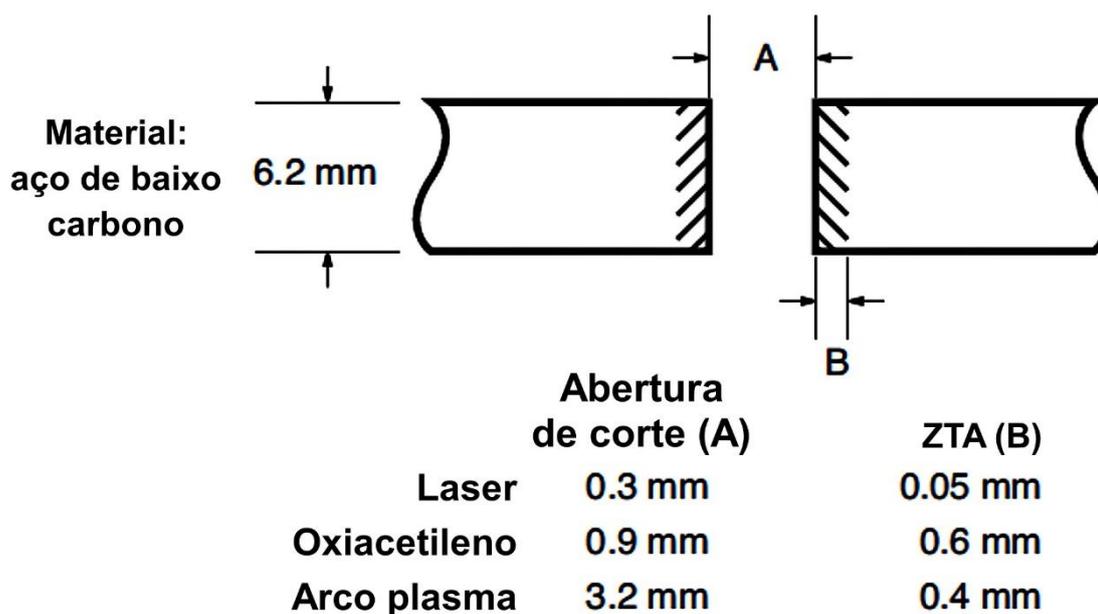
Neste item o corte a laser é comparado com processos alternativos específicos, com informações elencadas pelo Professor Kannatey-Asibu Jr. A Figura 83 começa com uma comparação numérica dos processos térmicos corte a laser, oxiacetileno e arco a plasma. Na Figura 84 há uma comparação gráfica de usinagem por eletroerosão (EDM), corte a laser e corte a arco plasma em relação ao tamanho do corte, precisão, velocidade máxima de corte e tamanho da zona afetada pelo calor.

Comparações adicionais são feitas com usinagem abrasiva a jato de água e punção / desbaste.

### 7.9.3.1. Comparação do corte a laser com corte por arco plasma e oxiacetileno

O tamanho da zona termicamente afetada (ZTA) e a mínima largura de corte que se pode atingir são atributos relevantes para estes três processos térmicos de derretimento e remoção de material. O tamanho da ZTA e a largura mínima de corte são comparados na Figura 83 para os três processos. Para ambos os atributos, no corte de aço de baixo carbono do capítulo 15 do livro de Kannatey-Asibu Jr. (KANNATEY-ASIBU JR., Capítulo 15 - Laser Cutting and Drilling, 2009), o corte a laser mostra-se mais vantajoso, oferecendo a menor largura de corte e minimizando problemas metalúrgicos pela menor profundidade da zona afetada pelo calor (ZTA).

Figura 83 - COMPARAÇÃO DE PROCESSOS DE CORTE TÉRMICO EM AÇO DE BAIXO CARBONO.



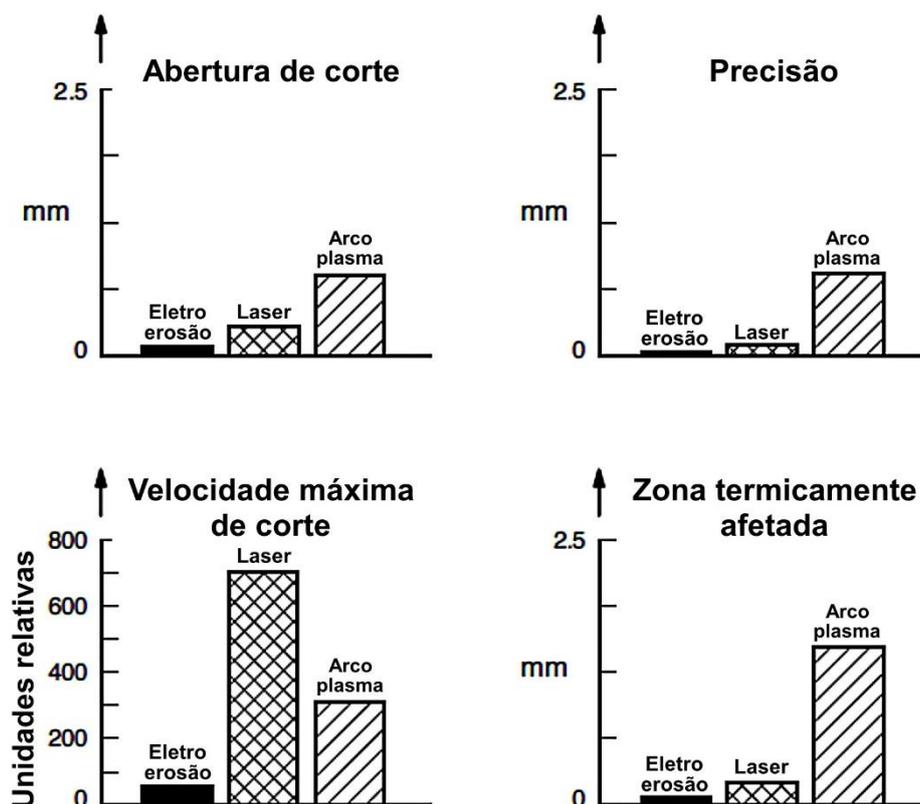
FONTE: Adaptado da figura 15.21 de (KANNATEY-ASIBU JR., Capítulo 15 - Laser Cutting and Drilling, 2009, p. 465).

### 7.9.3.2. Comparação com corte por eletroerosão

Nesta comparação feita por Kannatey-Asibu Jr., ao contrário do subitem anterior em que o corte a laser foi predominante em suas qualidades, no presente caso cada um desses dois processos tem certas vantagens sobre o outro, conforme ilustrado pela Figura 84. O corte por eletroerosão (EDM) é capaz de cortar material

relativamente espesso, resulta em melhor precisão, gera menor largura de corte e menor ZTA do que o corte a laser. As mencionadas vantagens do EDM em precisão, largura de corte e tamanho de ZTA são pequenas, porém, e ao corte a laser cabe a significativa vantagem de ser realizado em velocidades muito mais altas (aproximadamente uma ordem de grandeza).

Figura 84 - COMPARAÇÃO DE PROCESSOS DE USINAGEM POR DESCARGA ELÉTRICA (EDM), CORTE A LASER E CORTE A ARCO DE PLASMA.



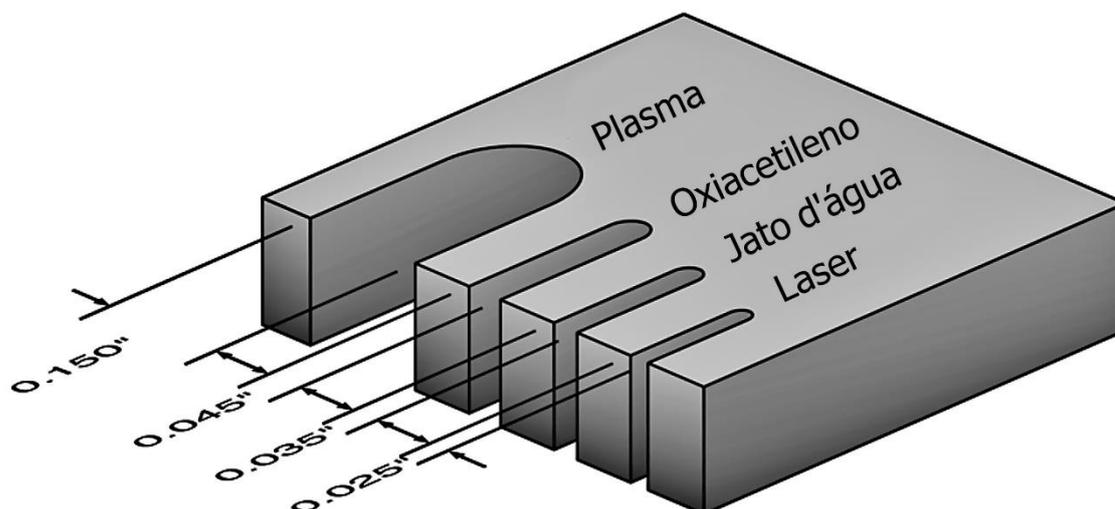
FONTE: Adaptado da figura 15.22 de (KANNATEY-ASIBU JR., Capítulo 15 - Laser Cutting and Drilling, 2009, p. 466).

### 7.9.3.3. Comparação com corte por jato d'água abrasivo

A usinagem com jato de água abrasivo envolve cortar um material usando jato de água de alta pressão. Os tipos de materiais mais comumente cortados com jato de água abrasivo incluem plástico, borracha, compósitos, pedra, ladrilho, alumínio, cobre, latão, titânio, aço inoxidável, aço ferramenta e mais. As principais vantagens é que não produz uma zona termicamente afetada e é capaz de cortar materiais muito mais espessos do que o corte a laser. A largura do corte produzido na usinagem a jato de água, no entanto, é menos precisa do que a associada ao corte a laser (Figura 85). Além disso, a usinagem a jato de água é um processo de contato e, como tal, pode

causar deflexão da peça de trabalho para materiais mais fracos, além de exigir um esquema mais complexo de fixação. A usinagem a jato de água é frequentemente recomendada como o processo de escolha no corte de compósitos, principalmente devido ao efeito térmico do corte a laser.

Figura 85 - LARGURA “KERF” TÍPICA CORTE DE AÇO CARBONO DE 1/2" DE ESPESSURA.



FONTE: Adaptado de (ESAB)

LEGENDA: Comparativo da abertura de corte típica, em polegadas.

#### 7.9.3.4. Comparação com Punção e Desbaste

O corte a laser é altamente flexível por não exigir ferramentas, aí reside a principal vantagem do corte a laser em relação à punção ou desbaste. O corte a laser tem uma vantagem definitiva para execução de pequenas produções, enquanto em volumes de produção mais altos as operações de perfuração tradicionais são muito mais rápidas e vantajosas (KANNATEY-ASIBU JR., Capítulo 15 - Laser Cutting and Drilling, 2009).

### 7.10. CLASSIFICAÇÃO DE SEGURANÇA

Desde o pioneiro laser de Theodore Maiman o perigo do feixe laser foi identificado: podia queimar e perfurar uma lâmina de barbear (ZLATANOV, 2016, p. 20). Atualmente aceita-se que mesmo feixes laser de baixa potência, apenas alguns miliwatts de potência de saída, podem ser perigosos para a visão humana, seja quando atinge o olho diretamente ou após o reflexo em uma superfície brilhante. Em comprimentos de onda em que a córnea e a lente podem focar bem, como é o caso de comprimentos de onda gerados nos lasers YAG, a coerência e a baixa divergência da luz laser significa que ela pode ser focada pelo olho em um ponto extremamente

pequeno na retina, resultando em queimadura localizada e dano permanente em frações de segundos. No caso do laser de CO<sub>2</sub>, seus comprimentos de onda são absorvidos pela córnea e podem levar à perda de visão (CARISTAN, Capítulo 12 - Safety and Environment, 2004).

Figura 86 – SÍMBOLOS DE ADVERTÊNCIA À RADIAÇÃO LASER.

Segurança



FONTE: Adaptado e livremente traduzido de (ZLATANOV, 2016, p. 20).

LEGENDA: Esquerda: Símbolo europeu de advertência de laser necessário para lasers de Classe 2 e superior. À direita: etiqueta de advertência de laser dos EUA, neste caso, para um laser Classe 3B

Os lasers são geralmente rotulados com um número de classe de segurança, que identifica o quão perigoso o laser é, conforme o Quadro 10, adaptado de (YUAN, CHEN, & LUZZI, 2017).

Quadro 10 - CLASSIFICAÇÃO DE SEGURANÇA DO LASER.

Classe	Tipo	Base para classificação
Classe 1	Lasers de baixa potência ou lasers encapsulados	Os lasers são considerados seguros em condições de operação razoavelmente previsíveis, como impressoras a laser, CD players e equipamentos de pesquisa. Não há requisitos de segurança para o uso deste tipo de laser. Inerentemente segura porque a luz está contida em um gabinete.
Classe 1 M	Lasers de baixíssima potência; colimado com grande diâmetro de feixe ou altamente divergente	Seguro em condições de operação razoavelmente previsíveis, mas pode ser perigoso se observado usando óptica de visualização. Exemplo: diodo laser, LED, sistema de comunicação de fibra

Classe	Tipo	Base para classificação
Classe 2	Lasers de baixa potência visíveis, de até 1 mW.	Lasers de baixa potência e são seguros para exposição não intencional, mas um olhar fixo prolongado deve ser evitado. O tempo de reflexo de piscar do olho evitará danos. Estão nessa classe lasers de até 1 mW de potência. Exemplo: Alinhamento HeNe lasers com potências abaixo de 1mW, leitores de bares de supermercado, ponteiros laser.
Classe 2 M	Lasers visíveis de baixa potência; colimado com grande diâmetro de feixe ou altamente divergente	Igual à Classe 2, mas potencialmente perigoso quando instrumentos ópticos são usados
Classe 3R	Lasers de baixa potência, têm geralmente até 5 mW	Seguro quando manuseado com cuidado. Apenas um pequeno risco potencial para exposição acidental. Envolvem um pequeno risco de lesão ocular durante o tempo do reflexo de piscar. Olhar fixamente para esse feixe por vários segundos provavelmente causará danos a um ponto na retina.
Classe 3B	Lasers de média potência	Perigoso quando o olho está exposto, pode causar danos oculares imediatos após a exposição. Use proteção ocular dentro da área de risco ocular nominal (NOHA). Normalmente não há perigo para a pele. Reflexos difusos geralmente seguros.
Classe 4	Lasers de alta potência	Perigoso para visualização intra-feixe direto, refletido direto e refletido difuso. Eles podem causar lesões nos olhos ou na pele e, também, podem constituir um risco de incêndio. Em alguns casos, mesmo a luz dispersa pode causar danos aos olhos e/ou à pele. Muitos lasers industriais e científicos estão nesta classe

Fonte: Adaptado da tabela 3.1 de (YUAN, CHEN, & LUZZI, 2017, p. 46)

Pessoas que trabalham com lasers de classe 3B e classe 4 podem proteger seus olhos com óculos de segurança projetados para absorver a luz de um determinado comprimento de onda. As potências indicadas são válidas para lasers de luz visível e ondas contínuas. Para o caso de lasers pulsados e comprimentos de onda invisíveis, outros limites de energia se aplicam. Lasers infravermelhos com comprimentos de onda maiores do que cerca de 1,4 micrômetros são frequentemente considerados "seguros para os olhos", porque a córnea tende a absorver luz nesses comprimentos de onda, protegendo a retina de danos. O rótulo "seguro para os olhos" pode ser enganoso, pois se aplica apenas a feixes de ondas contínuas de potência relativamente baixa; um laser de alta potência ou Q-comutado nesses comprimentos de onda pode queimar a córnea, causando graves danos aos olhos, mesmo em potência moderada (ZLATANOV, 2016).

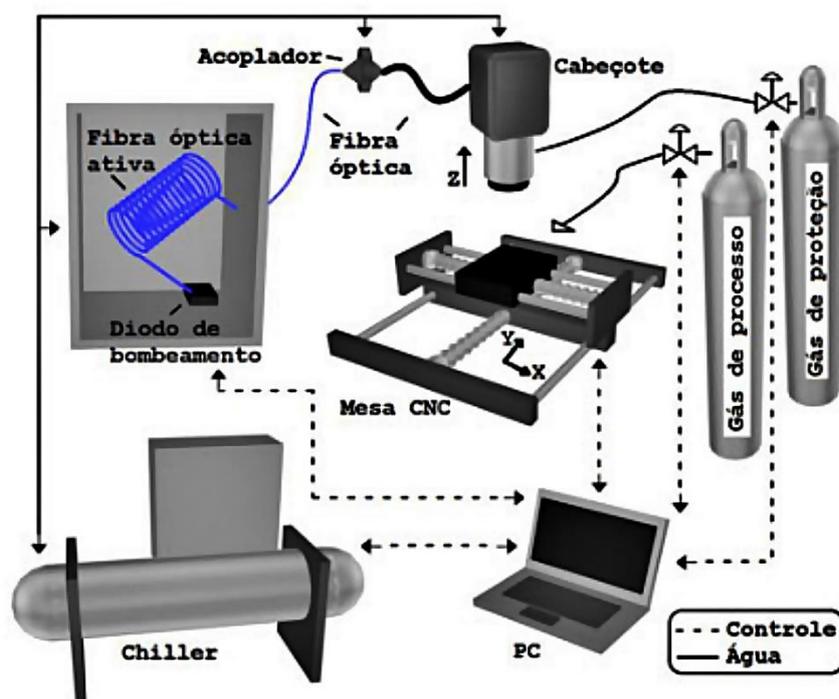
Para evitar danos à saúde dos trabalhadores expostos, fumos resultantes devem ser extraídos por um sistema de sucção integrado ao cabeçote de corte, coletados por filtros de ar integrados e acumulados em recipientes apropriados, a serem descartados adequadamente de acordo com as regulamentações de segurança, saúde e meio ambiente locais. Os vapores e pós de materiais não

metálicos são geralmente tão tóxicos ou mais que os metálicos. Eles incluem óleo para lubrificação, revestimentos orgânicos para proteção de chapas. É necessário revisar as fichas de dados de segurança de material para verificar se tais revestimentos, ao queimar, não irão liberar subprodutos tóxicos como cloreto de hidrogênio e cianeto. Materiais poliméricos, ao serem queimados liberam uma fumaça tóxica de cheiro desagradável, portanto devem ser cortados com precaução adicional, em uma área bem ventilada e / ou usar um elemento de filtro de sucção de ar local para coletar os gases e evitar que se propaguem dentro da instalação (CARISTAN, Capítulo 12 - Safety and Environment, 2004, p. 306).

## 8 LASER DE FIBRA

Os lasers de fibra são lasers de estado sólido em que a fibra óptica é dopada com uma pequena quantidade de terras raras. Diodos são usados para excitar o material gerador (o meio ativo), que emite fótons em certos comprimentos de onda conforme o elemento utilizado na dopagem (COELHO, LIMA, & COSTA, 2013).

Figura 87 - DIAGRAMA DA ESTAÇÃO DE PROCESSAMENTO DE MATERIAIS COM LASER A FIBRA.



FONTE: Figura 1 de (COELHO, LIMA, & COSTA, 2013).

### 8.1. INTRODUÇÃO, HISTÓRICO E PANORAMA ATUAL

Os primeiros registros sobre as aplicações comerciais de lasers no processamento de materiais foram publicados no início dos anos 1970 (HECHT J. , Laser, 2020). Por muitos anos, o laser de CO<sub>2</sub> foi a única escolha possível para soldagem *keyhole* (fechadura, em tradução literal) de penetração profunda (ION, Capítulo 16 - Keyhole Welding, 2005). Quando um laser de estado sólido de ondas contínuas (CW), na forma de laser Nd:YAG bombeado por lâmpada, se tornou comercialmente disponível, deu-se um passo importante: cobriu pelo menos parte do campo de potência do laser de CO<sub>2</sub>, apresentando os benefícios e vantagens da entrega do feixe de laser por fibra óptica à peça de trabalho. Recentemente, a indústria observou melhorias nas duas tecnologias: lasers de CO<sub>2</sub> resfriados por difusão e a

versão bombeada por diodo do laser Nd:YAG, além de desenvolvimentos de fontes de laser totalmente novas, como o laser de diodo direto e lasers de fibra (MELO, SOUSA, BERENDT, HENDOW, & SALCEDO, 2011).

Com a redução das perdas de sinal de fibra óptica a partir da década de 1970 e, principalmente, com o desenvolvimento dos amplificadores de fibra óptica dopados com érbio (EDFA) operando em 1,5  $\mu\text{m}$ , a partir da década de 1980, esta tecnologia passou a receber forte impulso (ZAVECZ, SAIFI, & NOTIS, Metal reflectivity under high-intensity optical radiation, 1975). Tais meios de ganho laser têm, desde o início, despertado interesse para utilização em aplicações que podem ir desde telecomunicações até mapeamento, posicionamento a laser, processamento de materiais, geração de imagens e outras áreas da medicina. Estímulos para o desenvolvimento desta tecnologia em tempos atuais são sua eficiência elevada, ausência de manutenção e alta fiabilidade, qualidade modal excelente e apresentação muito compacta (TÜNNERMANN, et al., 2005).

Com o advento das fibras ópticas de grande área modal (LMA, acrônimo para o termo em idioma inglês *Large Mode Area*) com dupla bainha, avanços muito significativos de potência se tornaram possíveis (ZENTENO, 1993) (MELO, SOUSA, BERENDT, HENDOW, & SALCEDO, 2011). Este laser, que vinha sendo usado por muitos anos em baixa potência, a partir da década 2001-2010 atinge altas potências. Especialmente depois que a potência de saída do laser de fibra ultrapassa 1 kW, a indústria de processamento de materiais ganha interesse nesta nova tecnologia para adicionar ou possivelmente substituir os tradicionais lasers de CO<sub>2</sub> e Nd:YAG usados então. Apesar do constante desenvolvimento científico, somente nesta última década 2011-2020 os lasers de fibra óptica alcançaram posição de destaque no setor (Figura 88). Os lasers de fibra óptica agora competem em muitas aplicações com lasers de estado sólido e de gás convencional e, em muitos casos, já é o candidato mais adequado.

Figura 88 - MERCADO DE PROCESSAMENTO DE LASER DA CHINA POR PRODUTO, 2014 – 2025.

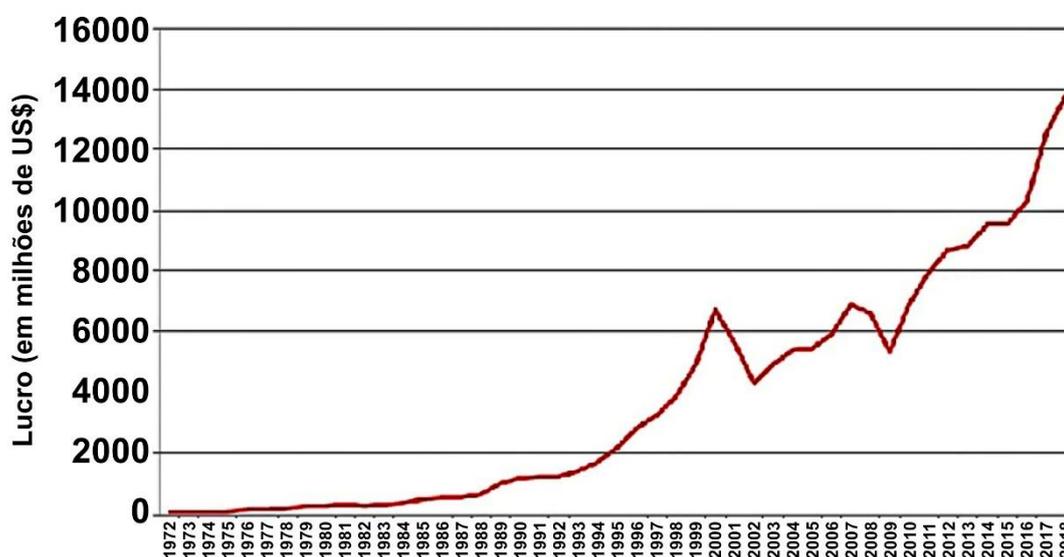


FONTE: Extraído de (GRAND VIEW RESEARCH, 2017).

LEGENDA: valores em milhões de dólares estadunidenses (USD).

A fabricação moderna foi revolucionada por lasers usados em setores como automotivo, aeroespacial e eletrônico para soldar carros, fazer furos em lâminas de turbinas, fabricar peças 3D e marcar metais e plásticos. De acordo com relatório anual *Strategies Unlimited The Worldwide Market for Lasers: Market Review and Forecast 2020* (STRATEGIES UNLIMITED, 2018), as receitas do laser industrial apenas no processamento de materiais chegam a US\$ 4,5 bilhões, representando 30% das receitas totais do mercado do laser em 2018 (Figura 89).

Figura 89 - RELATÓRIO DE MERCADO MUNDIAL DE LASER DE 2019, COM DADOS HISTÓRICOS DE VENDAS ATÉ 2018.



FONTE: Crédito da imagem (Strategies Unlimited e Laser Markets Research).

LEGENDA: valores em milhões de dólares estadunidenses (USD).

Os lasers de fibra mostraram um progresso espetacular em escala de potência e desempenho, tornando-os o negócio de crescimento mais rápido na última década, atualmente no valor de US\$ 2 bilhões (+ 13% de taxa composta anual de crescimento *CAGR*) às custas de tecnologias tradicionais tais como lasers CO<sub>2</sub> (- 1% de taxa composta anual de crescimento *CAGR*) e lasers de estado sólido bombeado por diodo (- 3% de taxa composta anual de crescimento *CAGR*). De acordo com um relatório da *Allied Market Research* citado por Gail Overton em artigo publicado em 2019 na revista *LaserFocusWorld* (OVERTON, 2019), o mercado de laser de fibra, que foi avaliado em US\$ 1,8 bilhões em 2017, está projetado para atingir US\$ 4,4 bilhões em 2025, crescendo a 12% de 2018 a 2025 (*CAGR*, taxa composta anual de crescimento). Espera-se que esse crescimento seja dominado pela crescente demanda por lasers de fibra de alta potência para atender às aplicações existentes,

bem como setores emergentes, como manufatura aditiva (também conhecida como “impressão 3D”) (Technavio Research, 2020).

## 8.2. MECANISMO DE EMISSÃO LASER

Lasers de fibra (não deve ser confundida com lasers *fornecidos por fibra*, no qual a fibra ótica é apenas o mecanismo óptico para entrega da luz) são lasers de estado sólido, onde a fibra dopada com baixos níveis de um elemento de terras raras é o meio de ganho laser, para amplificação da luz. Diodos são usados para estimular o meio de lasers a emitir fótons, o conhecido bombeamento, num comprimento de onda específico conforme o elemento de terras raras usados como dopante. As terras raras, ou lantanídeos, são um conjunto de 15 elementos que ocupam a penúltima linha da tabela periódica. Eles variam de lantânio (La), com um número atômico de 57, a lutécio (Lu), com um número atômico de 71 (URQUHART, 1988, p. 388). O itérbio é geralmente usado em lasers modernos alta potência. Seu comprimento de onda de emissão é aproximadamente o mesmo que o dos lasers Nd:YAG e sua faixa de comprimento de onda é de 1.060 a 1.085 nm (CANNING, 2006) e (NILSSON, et al., 2004). A fibra dopada é envolvida por um material com baixo índice de refração, que atua como um guia de onda para a luz de bombeamento e garante que essa energia seja transferida de maneira ideal para o meio laser. Grades de difração são utilizadas como espelho traseiro e acoplador de saída para formar o ressonador laser, formando assim um laser longo e fino, que pode ser muito compacto devido à flexibilidade da fibra que pode ser enrolada.

A rota de fabricação atualmente preferida para obter potências de saída adequadas para soldagem de metais de penetração profunda é combinando as saídas de uma série dessas unidades modo único disponíveis comercialmente em uma única saída de fibra (Figura 93). Embora essa técnica de combinação de feixes, de propriedade do fabricante do laser, reduza a qualidade do feixe, a redução é relativamente pequena, com o feixe de laser resultante ainda tendo propriedades adequadas para transmissão através de fibras ópticas de pequeno diâmetro e para soldagem.

A geometria longa e fina da fibra permite um resfriamento eficaz e, portanto, é ideal para minimizar os efeitos térmicos da energia de bombeamento (HÜGEL, 2000). Isso, e o ganho inerentemente alto da fonte de laser de fibra, traduz-se em uma alta eficiência de conversão de energia, que é a razão entre a potência óptica disponível na peça e a energia elétrica consumida, que se afirma estar entre 20% e 30% (Quadro 11). Isso é significativamente melhor que a eficiência de conversão de energia de cerca de 8% dos lasers de CO<sub>2</sub> e 3% para os lasers de estado sólido Nd:YAG bombeados por lâmpada. O impacto econômico imediato é duplo, pois é necessária menos energia para operar o laser e, também, para dissipar o calor gerado pelo laser (ZENTENO, 1993, p. 1440). O resfriamento a ar, por exemplo, agora está disponível para lasers de fibra de itérbio de até 2kW, enquanto potências de saída mais altas requerem resfriamento a água (SHINER, 2004).

Quadro 11 - DADOS GERAIS DE DESEMPENHO PARA UMA VARIEDADE DE LASERS.

	Potência	BPP (mm.rad)	Eficiência de conversão de energia (*)	Manutenção
CO <sub>2</sub>	0,5 - 6 kW	6 em corte / 25 em solda	10%	Requerida
Laser de estado sólido com bomba de diodo	0,5 - 6 kW	25 em solda 3D	10%	O laser interrompe a operação se a pilha de diodos falhar
Fibra empacotada	0,5 - 10 kW	0,4 corte / 23 solda	24%	Baixa ou inexistente
Fibra única	0,5 - 10 kW	0,4 corte / 30 solda	24%	Baixa ou inexistente
Disco	0,5 - 6 kW	8 em corte ou solda	15%	Baixa ou inexistente

Notas: (\*) A eficiência de conversão de energia, ou *Wall-Plug Efficiency* (“eficiência na tomada”, em tradução livre) de um sistema a laser é sua eficiência de energia elétrica para óptica total, ou seja, a relação entre a potência de saída óptica e a potência de entrada elétrica consumida.

Fonte: Adaptado da figura 8 de de (O’NEILL, et al., 2004, p. 6).

Quadro 12 - COMPARAÇÃO DE FONTE DE LASER.

	CO <sub>2</sub>	Nd:YAG bombeado a lâmpada	Nd:YAG bombeado a diodo	Fibra de Itérbio (multi-modos)	Yb-YAG disco fino
Meio de ganho laser	Mistura de gases	Bastão cristalino	Bastão cristalino	Fibra dopada	Disco cristalino
Comprimento de onda [μm]	10,6	1,06	1,06	1,07	1,03
Transmissão do feixe	Espelho, lentes	Fibra, lentes	Fibra, lentes	Fibra, lentes	Fibra, lentes
Ø típico da fibra de entrega [μm]	-	600	400	100-200	150-200
Potência de saída (a) [kW]	Até 15kW	Até 4kW	Até 6kW	Até 20kW	Até 4kW
Qualidade típica do feixe (b)	3,7	25	12	12	7
[mm.mrad] (b)	3.7	12	<12	1.8	4
Intervalo de manutenção [*1000 h]	2	0,8 a 1	2 a 5	100 (c)	2 a 5

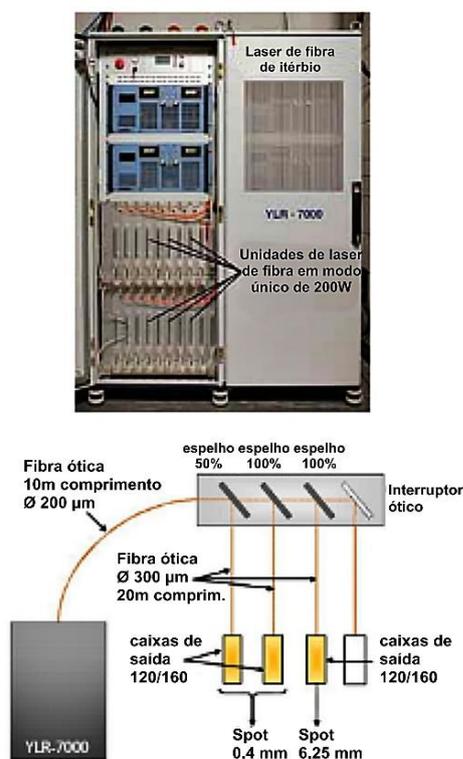
	CO <sub>2</sub>	Nd:YAG bombeado a lâmpada	Nd:YAG bombeado a diodo	Fibra de Itérbio (multi-modos)	Yb-YAG disco fino
<b>Eficiência [%]</b>	5 a 8	3 a 5	10 a 20	20 a 30	10 a 20
<b>Custo aproximado por kW [USD]</b>	60	130-150	150-180	130-150	130-150
<b>Pegada da fonte laser</b>	grande	média	média	pequena	média
<b>Mobilidade laser</b>	baixa	baixa	baixa	alta	baixa

Notas:

- (a) Disponível comercialmente.  
 (b) Os números acima são na máxima potência de saída disponível, os números abaixo são para o mesmo tipo de laser, mas configurado para operação otimizada a 1kW.  
 (c) Declaração do fabricante.

Fonte: Extraído da tabela 1 de (VERHAEGHE & HILTON, 2005)

Figura 90 - UM LASER DE FIBRA DE ITÉRBIO DE 7 KW, COMPREENDENDO MÓDULOS DE FIBRA DE 200W DE MODO ÚNICO E SEU SET-UP ÓTICO.



FONTE: Adaptado das figuras 2 e 3 de (VERHAEGHE & HILTON, 2005).

LEGENDA: Um laser de fibra de itérbio de 7 kw, compreendendo módulos de fibra de 200W de modo único e seu set-up óptico no TWI Ltd.The Welding Institute, Reino Unido.

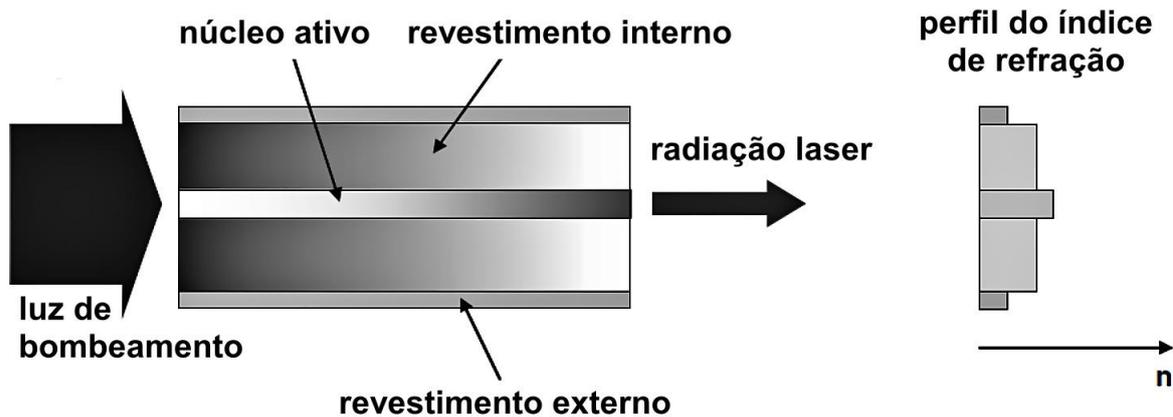
### 8.3. LASER DE FIBRA DE ALTA POTÊNCIA DE ITÉRBIO

A essência do design do laser de fibra de alta potência (um laser de estado sólido) é o *resfriamento aprimorado do meio ativo* do laser, o que permite obter maior potência de saída com alta qualidade de feixe. Conforme relata Petring et al., com as mais altas potência de saída da fonte de laser de fibra atingidas a partir da década 2001-2010, multiplicou-se o interesse no uso do laser de fibra de alto brilho em aplicações de processamento de materiais, especialmente corte e soldagem de metais (PETRING, SCHNEIDER, WOLF, & NAZERY, 2008). Entre os íons de terras raras usados em lasers de fibra, o itérbio é altamente absorvente da radiação do bombeamento e é preferido como material dopante para o laser de fibra de alta potência pois fornece potência de saída em kilowatts adequada ao processamento do material (MÜLLER, KIRCHHOF, REICHEL, & UNGER, 2006). Opera na faixa espectral de 1.060 a 1.080 nm, de alta absorvidade nas ligas metálicas mais utilizadas (Figura 78 e Figura 80).

A estrutura do laser de fibra de itérbio de alta potência inclui uma fibra de vidro de revestimento duplo com uma região central na qual os íons de itérbio que são o meio de ganho do laser são depositados. Para confinar a luz do bombeamento na região central do núcleo, dopada com íons de itérbio, esta região central é a que apresenta maior índice de refração e está cercada por duas regiões de revestimento com índice de refração progressivamente decrescente: um revestimento interno de menor índice de refração do que o núcleo e que, por sua vez, é circundado por um revestimento externo de um índice de refração ainda mais baixo, formando uma fibra de índice de etapas (Figura 91 e Figura 92a). A luz de bombeamento das matrizes de diodo laser de alta potência é guiada para o revestimento interno (conhecido como revestimento do bombeamento) e essa luz de bombeamento é confinada no revestimento interno pelo revestimento externo com menor índice de refração (Figura 92b). O confinamento dos raios de luz de bombeamento na região do núcleo da fibra - sujeito a algumas perdas por absorção ou espalhamento - mantém a intensidade da luz de bombeamento se propagando na fibra ao longo de vários metros de comprimento, excitando e sendo absorvida pelos íons de itérbio na região central da fibra, resultando na emissão estimulada laser pelos íons de itérbio (que é o meio de ganho) (TÜNNERMANN, et al., 2005). A emissão estimulada resultante da ação laser é guiada dentro da região central, acumulando altas intensidades antes de finalmente emergir como um feixe de laser de alta potência na faixa espectral do infravermelho próximo, de 1.060 a 1.080 nm (NILSSON, et al., 2004). A densidade de potência do feixe de saída é muito alta graças ao pequeno diâmetro do núcleo das fibras modo único (3 a 10  $\mu\text{m}$ ). De acordo com Jarman (JARMAN, 1996), o uso do revestimento de bombeamento (o revestimento interno que conduz a luz de bombeamento) no laser de fibra de itérbio de alta potência resolve (ou atenua significativamente) os problemas térmicos que afetam a estabilidade dos lasers Nd:YAG de alta potência: a variação do índice de refração com a temperatura. A temperatura no núcleo da fibra é determinada principalmente pelo transporte de calor através da superfície externa da fibra (LIMPERT, et al., 2003). Como a geometria do laser de fibra expõe uma grande área de superfície por unidade de volume, isso ajuda no resfriamento dos lasers de fibra (HECHT J. , PHOTONIC FRONTIERS: FIBER LASERS: Fiber lasers ramp up the

power, 2009). Esse o mecanismo de resfriamento aprimorado, típico do laser de fibra, permite que um laser de estado sólido atinja uma qualidade de feixe próximo ao limite máximo imposto pela difração e com alta potência de saída (HÜGEL, 2000).

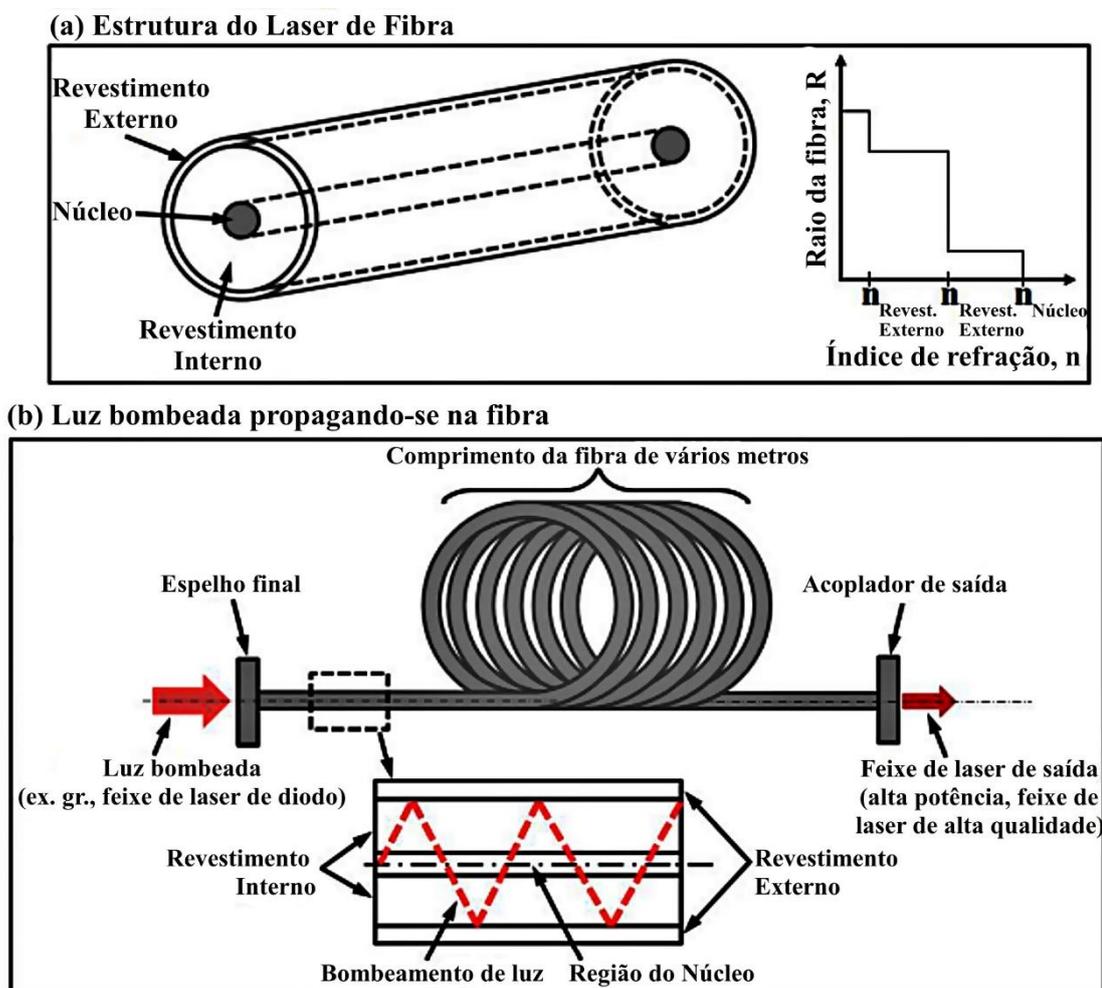
Figura 91 - O CONCEITO DE FIBRA DE REVESTIMENTO DUPLO.



FONTE: Adaptado da figura 2 de (TÜNNERMANN, et al., 2005, p. S684).

LEGENDA: n - índice de refração.

Figura 92 - UMA ILUSTRAÇÃO ESQUEMÁTICA DA FIBRA DE REVESTIMENTO DUPLO.



FONTE: Adaptado da figura 1 de (WANDERA C. , Capítulo 18 - Fiber Lasers in Material Processing, 2016, p. 403).

LEGENDA:  $n$  - índice de refração.

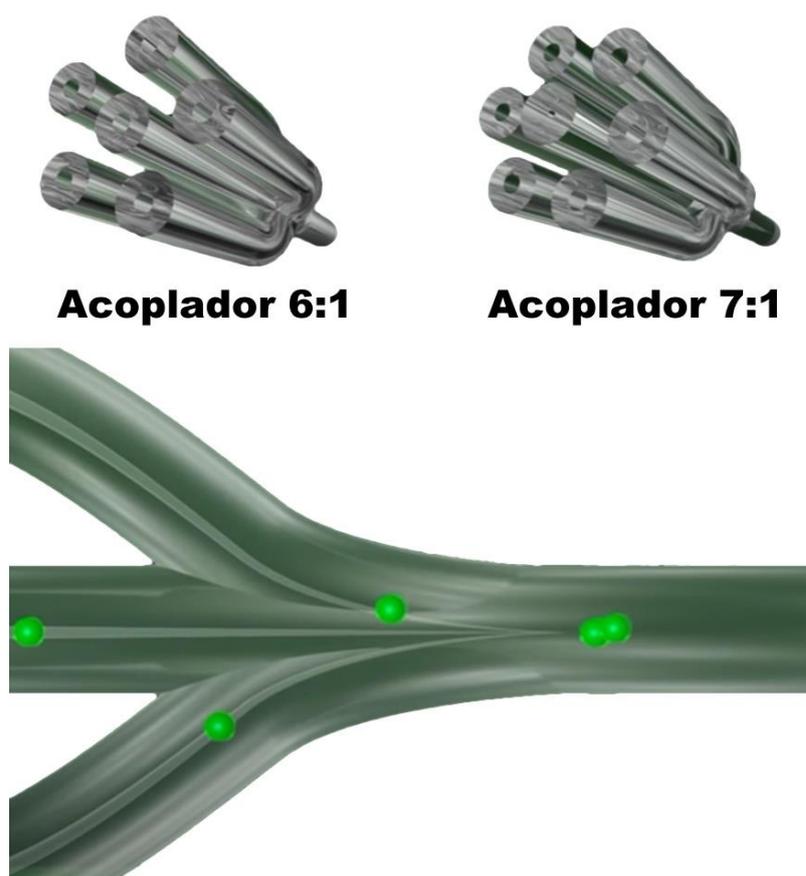
## 8.4. RECURSOS

O laser de fibra de itérbio de alto brilho combina características que resultam em maior flexibilidade e desempenho em aplicações de processamento de materiais: oferece *alta potência de saída*, *alta qualidade de feixe* e seu *comprimento de onda* está no infravermelho próximo - operando na faixa espectral de 1.060 a 1.080 nm. Estas características do laser de fibra de itérbio introduziram uma fonte laser de estado sólido em aplicações como corte e soldagem de metais de seção grossa - que antes eram consideradas impraticáveis para o laser de estado sólido Nd:YAG tradicional, devido a sua qualidade de feixe limitada com alta potência de saída (NILSSON, et al., 2004). Estas características são explicadas nos subitens 8.4.1, 8.4.2 e 8.4.3 (WANDERA C. , Capítulo 18 - Fiber Lasers in Material Processing, 2016, p. 402).

#### 8.4.1. Potência de saída

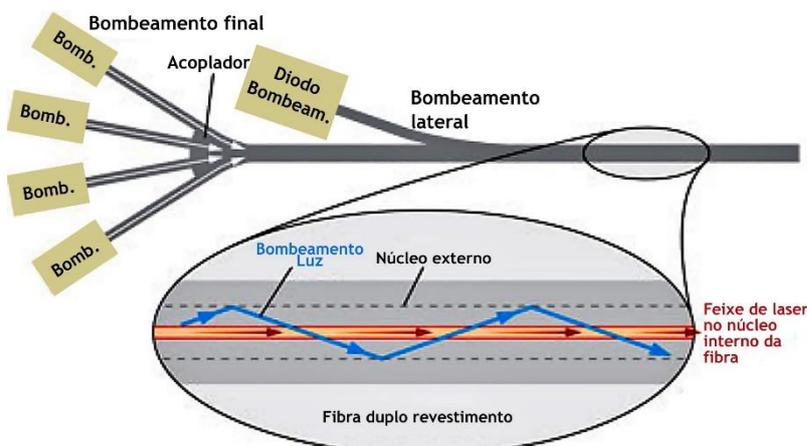
A disponibilidade de lasers de diodo de alta potência como fontes de bombeamento para lasers de fibra e as melhorias no design do laser de fibra permitiram o dimensionamento de potência de lasers de fibra dopados com íons de itérbio ( $\text{Yb}^{3+}$ ) para produzir potências acima de 1 kW em operação contínua (CW) com qualidade de feixe próximo ao limite máximo imposto pela difração (JEONG, SAHU, PAYNE, & NILSSON, 2004). Além disso, técnicas de combinação de feixe de laser também são usadas para o dimensionamento de potência do laser de fibra de itérbio, agrupando vários elementos de laser de fibra de modo único para fornecer até 10 kW de potência em modo múltiplo. Consequentemente, os lasers de fibra de itérbio com uma potência superior a 10 kilowatt estão agora disponíveis para aplicações de processamento de materiais, como demonstrado na Figura 93 (IPG Photonics, 2010).

Figura 93 - COMBINAÇÃO DE FEIXES PARA MODO MÚLTIPLO.



FONTE: Adaptado de (IPG Photonics, 2010).

Figura 94 – ESQUEMA DE BOMBEAMENTO NA EXTREMIDADE OU LATERAL PARA O LASER DE FIBRA, GERALMENTE COM ACOPLAMENTO DE MÚLTIPLOS LASERS.



FONTE: Adaptado da figura 2 de (HECHT J. , FIBER LASERS: Fiber lasers: The state of the art, 2012).

LEGENDA: Um laser de fibra pode ser bombeado na extremidade com um ou mais lasers, ou bombeado lateralmente (geralmente com muitos lasers) por luz de bomba de acoplamento lateral no núcleo externo.

#### 8.4.2. Qualidade de feixe e sua focabilidade

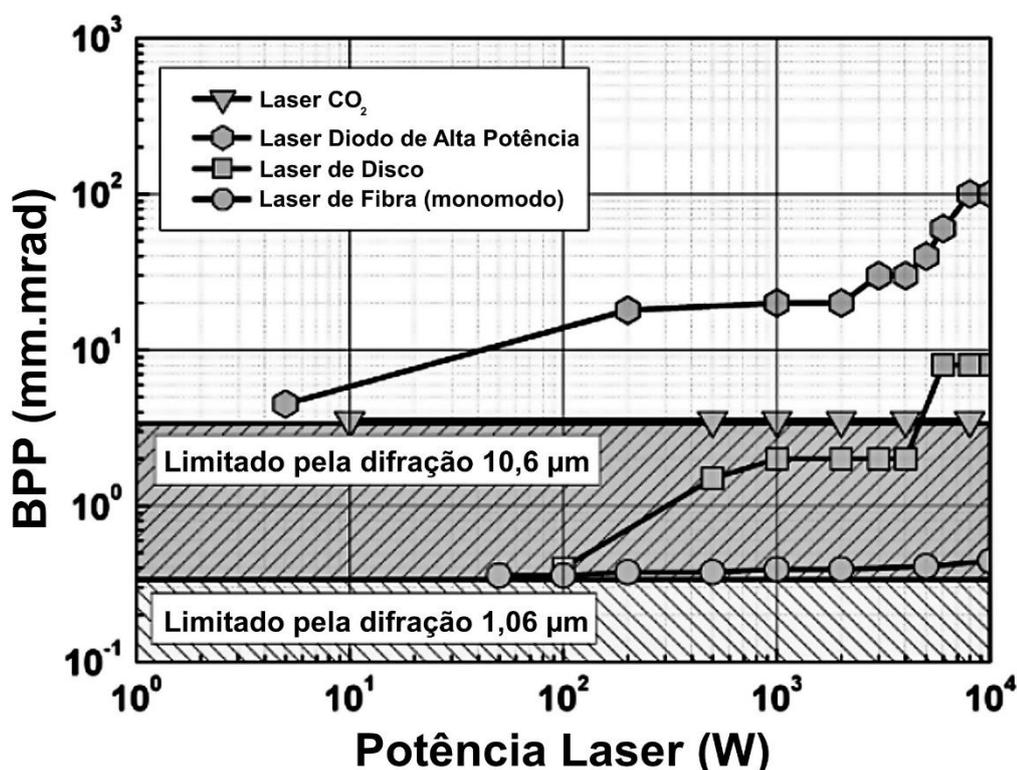
Um raio laser pode ser caracterizado por um ângulo de divergência e um diâmetro do raio. A qualidade do feixe é definida como a razão entre a largura do feixe e o ângulo de divergência do feixe real em relação ao esperado para um feixe perfeito (para o qual a forma de propagação é uma hipérbole). A qualidade do feixe de um laser de estado sólido é geralmente chamada de BPP (acrônimo do termo em língua inglesa *beam parameter product*, ou produto do parâmetro do feixe, em tradução livre). É definido como o produto do raio do feixe (medido na cintura do feixe) e o meio-ângulo de divergência do feixe (medido no campo distante), de acordo com o padrão ISO para propagação de feixes de laser, conforme Equação 8.1, geralmente em mm\*miliradianos, no qual um valor baixo que significa uma qualidade de feixe alto (STEEN, Capítulo 2 - Basic Laser Optics, 2003 ).

Na relação dada na Equação 8.1,  $\lambda$  é o comprimento de onda do feixe de laser e  $M^2$  é o fator de qualidade do feixe (diz-se que o feixe é “ $M^2$  vezes o limite de difração”) que informa quanto maior a BPP do feixe de laser em consideração é comparada ao melhor e mais baixo valor de  $BPP = \lambda/\pi$  para o modo Gaussian  $TEM_{00}$  básico (limite de difração), onde  $M^2 = 1$  (BEYER, MAHRLE, LÜTKE, STANDFUSS, & BRUECKNER, 2012).

$$BPP = \left(\frac{\lambda}{\pi}\right) * M^2 \quad [mm * mrad]$$

A Figura 95 fornece uma comparação do BPP para laser de fibra (modo único), laser de disco, laser de diodo de alta potência e laser a gás de CO<sub>2</sub>.

Figura 95 - PRODUTO DE PARÂMETRO DE FEIXE "BPP" DE SISTEMAS DE LASER DE ESTADO SÓLIDO (FIBRA E DISCO), DE CO<sub>2</sub> E DE DIODO DISPONÍVEIS ATUALMENTE.



FONTE: Adaptado da figura 1 (a) de (BEYER, MAHRLE, LÜTKE, STANDFUSS, & BRUECKNER, 2012).

A focabilidade do feixe de laser é um requisito importante para sua utilização em aplicações de corte e soldagem. A qualidade de feixe próximo ao limite de difração (ou seja, qualidade de feixe alto denotada por baixa BPP) é essencial para focalizar o feixe de laser em um pequeno tamanho de ponto focal para fornecer uma intensidade de energia muito alta necessária para o processamento de metais de seção espessa na alta velocidade de processamento necessária. A alta intensidade de potência permite a fusão da peça de trabalho na zona de interação do material a laser a uma alta velocidade de processamento (DAURELIO, 1985). Assim, a qualidade do raio laser, denotada por seu BPP, é o parâmetro crítico que influencia a focabilidade do raio laser. A Equação 8.2 fornece a relação entre o BPP do feixe de laser e o tamanho mínimo do ponto focalizado  $df$ , para focar a óptica da distância focal  $f$ , e um diâmetro bruto do feixe na óptica de focagem  $D$  (HÜGEL, 2000).

$$df = \left(\frac{4f}{D}\right) * BPP$$

## Equação 8.2

A profundidade do foco é a distância efetiva sobre a qual o diâmetro mínimo do feixe focalizado é mantido, com intensidade de potência máxima, na qual é possível obter um corte satisfatório (CARISTAN, Capítulo 5 - Methods , 2004, p. 171). Uma profundidade de foco mais longa é essencial para uma boa qualidade da aresta de corte, sobretudo no corte de metal de seção espessa (conforme autores citados no subitem 7.7.7). Para uma determinada qualidade de feixe de laser, a Equação 8.3 fornece a relação entre a distância focal da óptica de focagem  $f$ , e a profundidade do foco  $dz$ , que mostra que o uso de uma maior distância focal de óptica aumenta ao quadrado a profundidade do foco (HÜGEL, 2000). No entanto, o tamanho mínimo do ponto focalizado também é diretamente proporcional à distância focal (consulte a Equação 8.2), de modo que o uso de ópticas de maior distância focal para focar o feixe de laser resulta em um tamanho maior do ponto focalizado com intensidade de potência reduzida. Segundo a Doutora Wandera, esta é uma razão pela qual o laser de fibra de alto brilho se destaca, pois seu baixo BPP permite o uso de óptica de foco de longa distância focal para obter uma profundidade de foco longa sem comprometer muito o mínimo tamanho do ponto que pode ser focalizado.

$$dz = 4 * \left(\frac{f}{D}\right)^2 * BPP$$

## Equação 8.3

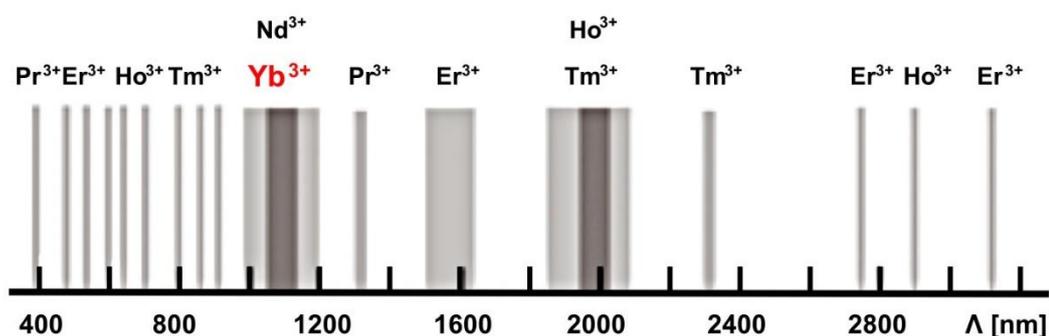
onde:  $dz$  é a profundidade do foco,  $f$  é a distância focal da ótica de foco,  $D$  é o diâmetro bruto do feixe na ótica de foco e  $BPP$  é o produto do parâmetro do feixe de laser incidente (WANDERA C. , Capítulo 18 - Fiber Lasers in Material Processing, 2016, p. 404).

## 8.4.3. Comprimento de onda

Os lasers de fibra foram feitos para operar em uma variedade de comprimentos de onda, incluindo as importantes bandas de 1300 nm, 1550 nm e as regiões de 2 a 3 micrômetros no infravermelho. A absorção do feixe de laser pelos metais aumenta em comprimentos de onda em direção às regiões visível e ultravioleta, mas diminui para comprimentos de onda infravermelhos mais longos (vide figuras Figura 78, Figura 80 e a Tabela 3). Os espectros dos íons de terras raras e a natureza dos materiais hospedeiros tornam possíveis a emissividade em tais comprimentos de onda, conforme ilustrado pela Figura 96 (URQUHART, 1988). O laser de fibra de itérbio de alto brilho emite em comprimento de onda de 1030 a 1100 nm, localizado no infravermelho próximo, região de maior capacidade de absorção por metais do que o laser de CO<sub>2</sub>, que está no infravermelho médio e aproximando-se do infravermelho distante (WANDERA C. , Capítulo 18 - Fiber Lasers in Material Processing, 2016). Isso ocorre pois os fótons mais energéticos da radiação do comprimento de onda mais curto do laser de fibra de itérbio podem ser absorvidos por um número maior de elétrons na estrutura do metal, de tal modo que a reflexividade da superfície do metal diminua e a absorvidade seja grandemente aumentada,

conforme Equação 7.6 (STEEN, Capítulo 2 - Basic Laser Optics, 2003 ). Além disso, quando comparado ao laser de CO<sub>2</sub>, o comprimento de onda do laser de fibra de itérbio e de estado sólido Nd:YAG oferece menor sensibilidade aos plasmas induzidos por laser durante o processamento de materiais, crítico no caso de soldagem, já que a absorção bremsstrahlung inversa pelo plasma produzido durante a soldagem a laser é menor para a radiação de 1,03 a 1,10  $\mu\text{m}$  na qual emitem tanto o laser de fibra dopado com itérbio como também do laser de estado sólido Nd:YAG, em comparação à radiação de 10,6  $\mu\text{m}$  do laser de CO<sub>2</sub> (HÜGEL, 2000).

Figura 96 - BANDAS DE EMISSÃO DOS DIFERENTES ÍONS TERRAS RARAS, EM NANÔMETROS.

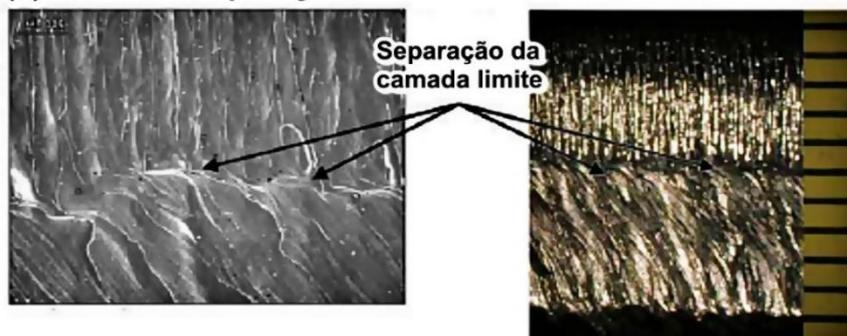
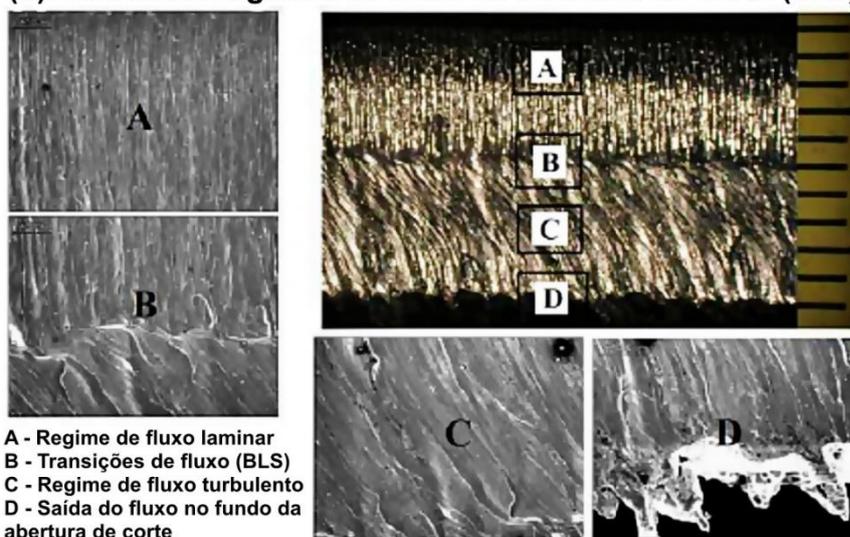


FONTE: Adaptado da figura 6 de (MELO, SOUSA, BERENDT, HENDOW, & SALCEDO, 2011, p. 24).

## 8.5. DESEMPENHO NO CORTE DE METAIS

De maneira idêntica às outras tecnologias de corte a laser, as velocidades de corte máximas alcançáveis, as máximas profundidades de corte possíveis e a qualidade da aresta de corte atingível são as métricas usadas na avaliação do desempenho do sistema a laser de fibra no corte de metal. Tais características são regidas por vários parâmetros relacionados ao sistema de laser, especificação da peça de trabalho e processo de corte (BEYER, MAHRLE, LÜTKE, STANDFUSS, & BRUECKNER, 2012). Para o corte de um metal específico de uma dada espessura, os parâmetros do processo de corte podem ser alterados pelo operador, a fim de otimizar o processo de corte visando obter um corte de alta qualidade e que possa ser executado a uma velocidade de corte ajustada para melhor produtividade.

Figura 97 - IMAGEM DE MICROSCOPIA ELETRÔNICA DE VARREDURA DA SEPARAÇÃO DA CAMADA LIMITE EM UMA BORDA DE CORTE.

**(a) Ponto de separação da camada limite****(b) Diferentes regimes de fluxo na abertura do corte (kerf)**

FONTE: Adaptado da figura 4 de (WANDERA C. , Capítulo 18 - Fiber Lasers in Material Processing, 2016).

LEGENDA: Imagem de microscopia eletrônica de varredura da separação da camada limite em uma borda de corte de aço inoxidável de 10 mm.

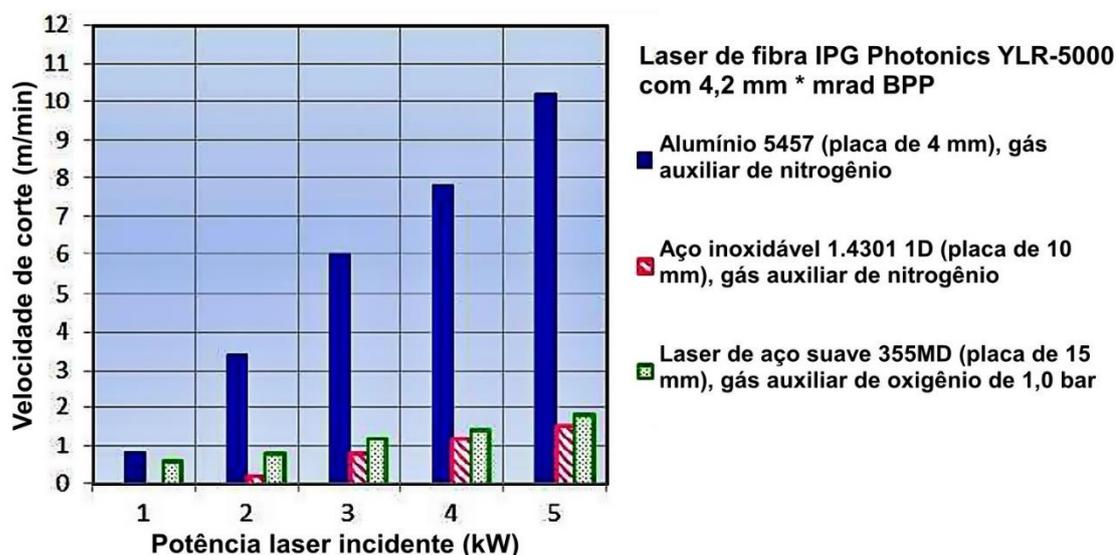
### 8.5.1. Velocidade máxima alcançável

Para um determinado nível de potência do laser, a velocidade máxima de corte possível será a mais alta na qual as arestas de corte resultem totalmente separadas. Wandera et al. (WANDERA, KUJANPÄÄ, & SALMINEN, Laser power requirement for cutting of thicksection steel and effects of processing parameters on mild steel cut quality, 2011) e (WANDERA, SALMINEN, & KUJANPÄÄ, Inert gas cutting of thick-section stainless steel and medium-section aluminum using a high power fiber laser, 2009), em ambos os artigos, testaram em diferentes níveis de potência de um aparelho de laser de fibra as velocidades máximas de corte possíveis para três diferentes materiais: aço inoxidável de 10 mm, aço macio de 15 mm e alumínio de 4 mm, conforme apresentado na Figura 98. Usando 5 kW de potência do laser de fibra, aço inoxidável de 10 mm de espessura pôde ser cortado a uma

velocidade máxima de corte de 1,5 m/min com jato de gás auxiliar de nitrogênio. Na mesma potência e com oxigênio, aço macio de 15 mm de espessura pode ser cortado a uma velocidade de corte de 1,8 m/min, enquanto ainda em 5 kW uma chapa de alumínio com espessura de 4 mm pode ser cortada a 10,2 m/min com jato de gás auxiliar de nitrogênio. Uma comparação das velocidades de corte a laser de fibra e laser de CO<sub>2</sub> no corte de aço macio de 15 mm e aço inoxidável de 10 mm mostrou que as velocidades de corte a laser de fibra eram 1,3 vezes maiores que as velocidades de corte a laser de CO<sub>2</sub> para o mesmo nível de potência (consulte Figura 99). Resultado semelhante é relatado por Sparkes et al. (SPARKES, GROSS, CELOTTO, ZHANG, & O'NEILL, 2008) no corte de aço inoxidável de 6 a 10 mm, com velocidades de corte do laser de fibra até 1,5 vezes maior que as do laser de CO<sub>2</sub>. Wandera et al. (WANDERA, SALMINEN, OLSEN, & KUJANPÄÄ, 2006) também investigaram o corte de aço inoxidável de 1 a 6 mm usando um laser de fibra com qualidade de feixe BPP de 2,5 mm.mrad e relataram mais do que o dobro de velocidades de corte na espessura da peça de 1 a 4 mm em comparação com as velocidades de corte a laser de CO<sub>2</sub>. É importante ressaltar que, com o aumento da espessura da peça de metal, o laser de CO<sub>2</sub> começa a apresentar vantagens, a diferença de velocidade de corte entre o laser de fibra e o laser de CO<sub>2</sub> reduz com o aumento da espessura da peça de metal e o CO<sub>2</sub> pode ser superior no corte de chapas mais espessas.

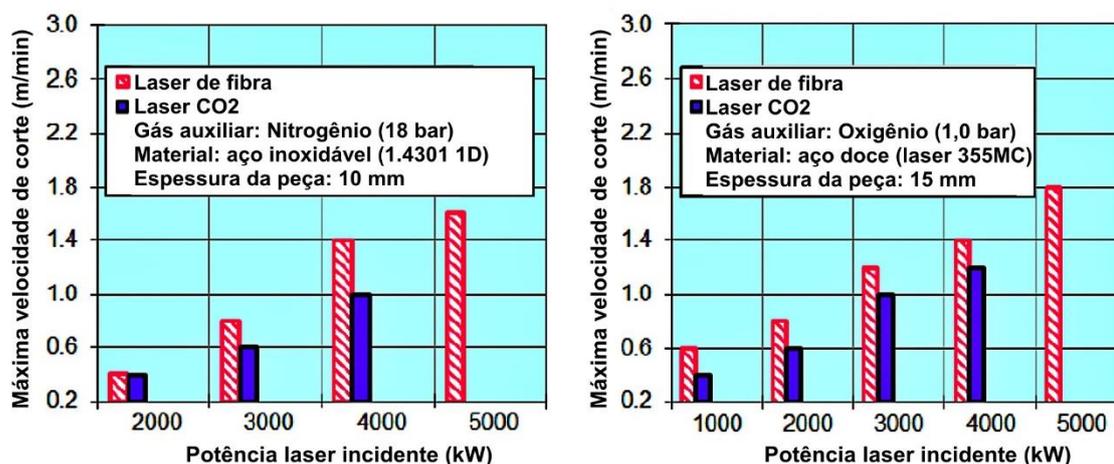
O aumento da velocidade de corte possível é uma indicação de uma maior absorvidade das peças de metal ao feixe de laser de fibra pela peça de metal, em comparação com a absorção do laser de CO<sub>2</sub>, sendo essa a conclusão de Wandera et al. e de Sparkes et al. A eficiência de fusão de um determinado laser aumenta com o acréscimo da absorvidade, uma vez que uma proporção maior da radiação incidente do laser é absorvida pelo material e utilizada na fusão do volume do corte durante o corte. Devido à redução na proporção do feixe de laser absorvido que é perdido por condução ao substrato metálico com velocidades de corte mais altas, o aumento potencial na velocidade de corte ao usar o laser de fibra de itérbio de alta potência aumenta a eficiência de fusão porque as perdas de energia de condução a partir da frente de corte diminui com o aumento da velocidade de corte.

Figura 98 - VELOCIDADES MÁXIMAS DE CORTE ALCANÇÁVEIS USANDO O LASER DE FIBRA DE ITÉRBIO.



FONTE: Adaptado da figura 5 de (WANDERA C. , Capítulo 18 - Fiber Lasers in Material Processing, 2016).

Figura 99 – COMPARATIVO DAS VELOCIDADES MÁXIMAS DE CORTE PARA CORTE DE AÇO INOXIDÁVEL ENTRE LASER DE CO<sub>2</sub> E LASER DE FIBRA.



FONTE: Adaptador da figura 6 de (WANDERA C. , Capítulo 18 - Fiber Lasers in Material Processing, 2016).

LEGENDA: Velocidades máximas de corte para corte de aço inoxidável de 10 mm e aço macio de 15 mm.

## 8.6. COMPARATIVO DO LASER DE FIBRA COM O LASER CO<sub>2</sub>

Conforme narrado no item 8.1, o grande salto em potência do laser de fibra que ocorreu durante a década de 2001-2010 forneceu o argumento para que o laser de fibra assumisse a liderança de mercado na década seguinte (GRAND VIEW RESEARCH, 2017).

Resumidamente, a luz laser de fibra é criada por bancos de diodos bombeiam os íons de terras raras do qual o vidro da fibra ótica é dopado, que seria seu meio de ganho. A luz é canalizada e amplificada através de um cabo de fibra ótica semelhante ao usado para a transferência de dados. A luz amplificada, ao sair do cabo de fibra, é colimada ou endireitada e depois focalizada por uma lente no material a ser cortado. Nenhuma peça móvel ou espelhos na fonte geradora de luz, ao contrário de um ressonador de CO<sub>2</sub> convencional ou laser de disco. A própria fibra ótica entrega a radiação à lente de focagem, isso tem uma vantagem distinta em termos de redução de requisitos de manutenção e custos operacionais. A lente de foco, ao contrário de uma máquina convencional de laser de CO<sub>2</sub>, é vedada na cabeça de corte e, portanto, não é um item consumível. Isto melhora sua capacidade de cortar materiais refletivos sem medo de reflexos que danifiquem a máquina, assim cobre, latão e alumínio podem ser cortados sem problemas.

A criação da luz é 300% mais eficiente do que através de um laser tradicional de CO<sub>2</sub> (Quadro 12) e a entrega é muito mais simples, sem espelhos óticos caros. A eficiência elétrica (de conversão de energia) é 140% maior do que o laser de CO<sub>2</sub>, conforme Quadro 11, resultando em custos operacionais consideravelmente mais baixos. Os intervalos de manutenção são 50% mais longos e custos de manutenção 50% mais baixos (VERHAEGHE & HILTON, 2005).

As velocidades máximas de corte para chapas de 4 a 15 mm, mencionadas no subitem 8.5.1, são ainda mais altas ao cortar material fino. Comparado com a mesma máquina de CO<sub>2</sub> de 4 kW, o laser de fibra é três vezes mais rápido em um corte reto de 1 mm em aço macio, galvanizado ou aço inoxidável e duas vezes mais rápido ao cortar 2 mm (SPARKES, GROSS, CELOTTO, ZHANG, & O'NEILL, 2008).

As desvantagens do laser de fibra em comparação com o CO<sub>2</sub> estão relacionadas principalmente à velocidade de corte no processamento de materiais mais espessos. Acima de 5 mm, o corte a laser de CO<sub>2</sub> pode ser mais rápido em linha reta e, também, tem tempos de perfuração muito mais rápidos no início do corte. Há também a vantagem de um acabamento de superfície mais suave com a máquina de CO<sub>2</sub> ao cortar materiais mais espessos.

## 8.7. PONDERAÇÕES SOBRE A TECNOLOGIA DE CORTE A LASER DE FIBRA

O desempenho do sistema de laser de fibra de itérbio de alto brilho no corte de metal foi amplamente avaliado no corte de aço inoxidável, aço-carbono e alumínio nos artigos citados neste capítulo, com especial menção à dedicação da Professora Catherine Wandera e seus colaboradores ao estudo do corte de metais com laser de fibra. É de especial relevância a comparação desta tecnologia com o laser de CO<sub>2</sub>, o qual o laser de fibra tem paulatinamente substituído em algumas aplicações nas últimas

duas décadas (OVERTON, 2019). As velocidades máximas de corte e a espessura máxima da peça de trabalho que pode ser cortada com o laser de fibra são amplamente governadas por uma série de parâmetros do processo de corte que afetam o processo de remoção do material fundido e influenciam a qualidade da aresta de corte resultante (WANDERA, SALMINEN, & KUJANPÄÄ, Inert gas cutting of thick-section stainless steel and medium-section aluminum using a high power fiber laser, 2009, p. 160) (WANDERA & KUJANPÄÄ, Characterization of the melt removal rate in laser cutting of thick-section stainless steel, 2010, p. 68). Velocidades de corte excessivamente maiores em cortes finos a médios (espessura da folha de menos de 6 mm) foram realizados com o laser de fibra de itérbio em comparação com o laser de CO<sub>2</sub>. No entanto, uma redução drástica na velocidade máxima de corte foi relatada no corte de metal de seção espessa (espessura da folha acima de 6 mm) usando o laser de fibra de itérbio devido à deterioração na qualidade da aresta de corte na velocidade máxima de corte (WANDERA, SALMINEN, OLSEN, & KUJANPÄÄ, 2006, p. 219). A otimização dos parâmetros do processo de corte para melhorar a qualidade da aresta de corte no corte de metal de seção espessa em altas velocidades de corte usando o laser de fibra de itérbio mostrou que a velocidade de corte máxima aplicável é influenciada pelo processo de remoção de fusão.

O calcanhar de Aquiles do aumento de performance para esta tecnologia de corte reside na remoção da fusão: fontes de laser emitindo feixes de fótons alta potência e alta qualidade estão prontas para serem usadas na indústria, no entanto o potencial de novas fontes de laser de alto brilho tal como os de fibra não são ainda completamente aplicados devido à remoção ineficiente de material fundido pelos jatos de gás gerados pelos bocais convencionais. O aumento da eficiência deste processo de remoção deverá ditar o ritmo dos avanços neste processo de usinagem durante este século XXI.

## 9 MÁQUINA DE CORTE A LASER DE FIBRA SENFENG SF1313G 750W

A máquina de corte a laser Senfeng SF 1313G-Series de 750W em funcionamento no Laboratório de Usinagem do Departamento de Engenharia Mecânica da Universidade Federal do Paraná (Figura 100) foi adquirida no ano de 2020 como parte de um grande investimento em novos e modernos equipamentos, acompanhado da reforma de estrutura elétrica e de fornecimento de ar comprimido, que o Laboratório de Usinagem do Departamento de Engenharia Mecânica da UFPR – o LABUSIG – recebeu graças aos esforços do seu coordenador, o Prof. Dr. Dalberto Dias da Costa, e do seu vice-coordenador Prof. Dr. Claudimir José Rebeyka. Com a conclusão da reforma supramencionada, sua entrega técnica foi realizada no dia 15 de outubro de 2021.

Figura 100 - MÁQUINA DE CORTE A LASER DE FIBRA SENFENG SF-1313G-SERIES 750 W APÓS ENTREGA TÉCNICA NO LABORATÓRIO DE USINAGEM DA UFPR.



FONTE: O autor (2022).

A SF1313G 750 watts é considerada uma máquina de corte a laser de fibra de dimensão compacta, com uma área de trabalho de 1300 \* 1300 mm, e uma potência adequada para corte de metais de espessura fina a média (SENFENG, Original Instructions no.2 - Maintenance Manual V7.19 - 1313G-Series Fiber Laser Cutting Machine, 2017; SENFENG USA Laser Technology Co., 2021). A natureza do corte a laser permite explorar o corte de chapas mais espessas tendo à disposição potência menor que o idel, porém as técnicas atuais relatam baixas “velocidades máximas de corte” e possivelmente qualidade inferior da aresta resultante. É sugestão deste autor que outros colegas pesquisem o desempenho desta máquina de corte

para diferentes metais e espessuras, buscando parâmetros adequados para obter boa qualidade de aresta a uma velocidade de corte que viabilize seu uso industrial.

SENFENG LEIMING LASER é um dos maiores fabricantes de equipamentos a laser na China e se especializou em P&D, fabricação e venda de vários equipamentos de processamento a laser de alta potência, incluindo máquinas de corte a laser de alta potência, máquinas de solda a laser e processamento a laser multifuncional máquinas. SENFENG LEIMING LASER se dedica a fornecer aos clientes uma solução personalizada e profissional para sistemas de processamento a laser. Máquinas de corte a laser de potência total, máquinas de marcação a laser e máquinas de processamento a laser são os produtos estrela da empresa, amplamente utilizados nas indústrias de metalurgia do aço, metais não ferrosos, automóveis e peças, aeroespacial, eletrônica militar, instrumentação de precisão, fabricação de máquinas, hardware ferramentas, circuitos integrados, energia solar e assim por diante (SENFENG, Original Instructions no.1 - User Manual V6.17 - 1313G-Series Fiber Laser Cutting Machine, 2017, p. 6).

Esta máquina a laser é totalmente coberta, o que ajuda a prevenir a radiação espalhada, atenção à segurança especialmente bem-vinda no ambiente de laboratório em que está instalada. O carregamento das chapas se faz puxando a mesa pela abertura da porta dianteira. Esse procedimento deve ser sempre adotado ao carregar chapas, de modo a evitar choques e danos ao cabeçote ou outro mecanismo interno. Informações do site estadunidense da empresa Jinan Senfeng alegam que a SF1313G *“passa todas as certificações de qualidade e eficiência (aprovado com o selo CE da TÜV). É um dos produtos mais populares da Europa, e por um bom motivo”* (SENFENG USA Laser Technology Co., 2021)

A modernização dos equipamentos hoje disponíveis no Laboratório de Usinagem da UFPR foi bem sincronizada pela coordenação para ocorrer em paralelo à reforma de estrutura elétrica e da rede de ar comprimido que atende os novos equipamentos. Ainda que o ar comprimido na SF 1313G esteja sendo utilizado somente para acionamento do cilindro que prende a mesa e não como gás de assistência durante o corte (justificado no subitem 9.1.1, maiores detalhes no subitem 11.5.1 e Figura 205), o funcionamento da máquina de corte a laser exige alta qualidade do ar utilizado, seco e livre de impurezas que possam ser maiores do que  $1 \cdot 10^{-8}$  m (SENFENG, Original Instructions no.1 - User Manual V6.17 - 1313G-Series Fiber Laser Cutting Machine, 2017, p. 20). Para tal, além da reforma da rede de ar comprimido, uma nova central de tratamento de ar foi instalada, com detalhamento no item 9.1.1.

Necessitando do fornecimento de 15 kVA para o funcionamento do equipamento de corte e periféricos, a fonte de alimentação é trifásica 380V, conforme informado no Quadro 13, portanto para isso a máquina de corte a laser está acompanhada de fábrica por um transformador de gabinete sobre rodízios como item periférico, com maiores detalhes e foto no item 9.1.3.

Quadro 13 - ESPECIFICAÇÕES TÉCNICAS DA MÁQUINA SENFENG SF 1313G 750W.

<b>Indicador</b>	<b>1313G-Series</b>
Potência da fonte laser (W)	750
Tamanho da placa (mm)	3000 * 1500 (2500 * 1300)
Curso do eixo X (mm)	3000 (2500)
Curso do eixo Y (mm)	1500
Curso do eixo Z (mm)	220
Precisão de posicionamento dos eixos X e Y (mm)	± 0,03 / 1000
Precisão de posicionamento repetido nos eixos X e Y (mm)	± 0,02 / 1000
Máx. velocidade de corte (mm / min)	120000
CNC (software CAM)	CypCut
Carga máxima da mesa de trabalho (kg)	800
Peso da máquina (tonelada)	4,5
Dimensões (mm)	4630 * 2670 * 1960
Potência do painel de controle (com laser de 1000 W)	15KVA
Sistema elétrico	trifásico
Tensão nominal da fonte de alimentação	380V
Frequência	50HZ
Classificação de proteção de energia total	IP54

Fonte: Extraído do quadro "Appendix A Technical Specifications" do (SENFENG, Original Instructions no.1 - User Manual V6.17 - 1313G-Series Fiber Laser Cutting Machine, 2017, p. 81).

Apesar de ser considerado que no corte a laser, à diferença de outros métodos de usinagem, não há desgaste de ferramentas (RIVEIRO A. , et al., 2019), existe, porém, progressiva agressão a alguns itens durante o uso que necessitam de inspeção e troca eventual. Os itens consumíveis e vulneráveis estão listados no Quadro 14. O acesso à lente para substituição é mostrado no subitem 9.2, enquanto a troca de bocais está ilustrado no subitem 9.3.

Quadro 14 - LISTA DE MATERIAIS CONSUMÍVEIS E VULNERÁVEIS.

<b>Modelo</b>	<b>Nome</b>	<b>Detalhes</b>
Consumível	Bocal	Em condições normais de uso, a vida útil varia de 15 dias a 6 meses, dependendo do material e da espessura da placa cortada.
Consumível	Anel cerâmico	Em condições normais de uso, a vida útil varia de 6 a 12 meses, dependendo do material e da espessura da placa cortada.
Consumível	Lente protetora	Em condições normais de uso, a vida útil varia de 15 dias a 6 meses, dependendo do material e da espessura da placa cortada.
Parte vulnerável	Fio amplificador	

Modelo	Nome	Detalhes
Parte vulnerável	Lente de foco	

Fonte: Extraído do quadro “Appendix B List of Consumables and Vulnerable Parts” do (SENFENG, Original Instructions no.1 - User Manual V6.17 - 1313G-Series Fiber Laser Cutting Machine, 2017, p. 82).

A amplificação de radiação dentro da fibra de vidro na fonte laser e a concentração espacial desta energia através de focalização no cabeçote é o que permite a utilização do laser como método de usinagem. Mas a geração de calor no processo é intrínseca, assim há necessidade de circulação e refrigeração desta água, o que é assegurado por um refrigerador de água fornecido como equipamento periférico. Este equipamento é frequentemente aludido pelo seu termo no idioma inglês - *chiller* - sendo um equipamento específico que fornece água circulante de refrigeração para a fonte do laser e as lentes do cabeçote de corte. O volume da água é  $\geq 12$  L/min. Somente água pura de alta qualidade ou água destilada pode ser usada como água circulante de resfriamento (SENFENG, Original Instructions no.1 - User Manual V6.17 - 1313G-Series Fiber Laser Cutting Machine, 2017, p. 11). Fotos e detalhes em 9.1.2.

## 9.1. EQUIPAMENTOS PERIFÉRICOS

O funcionamento do processo de corte a laser realizado pela máquina SENFENG SF1313G 750W depende de alguns equipamentos periféricos. Estes demandam acionamento prévio e alguns cuidados e manutenção específica.

### 9.1.1. Sistema compressão, tratamento e distribuição de ar atmosférico via rede de ar comprimido

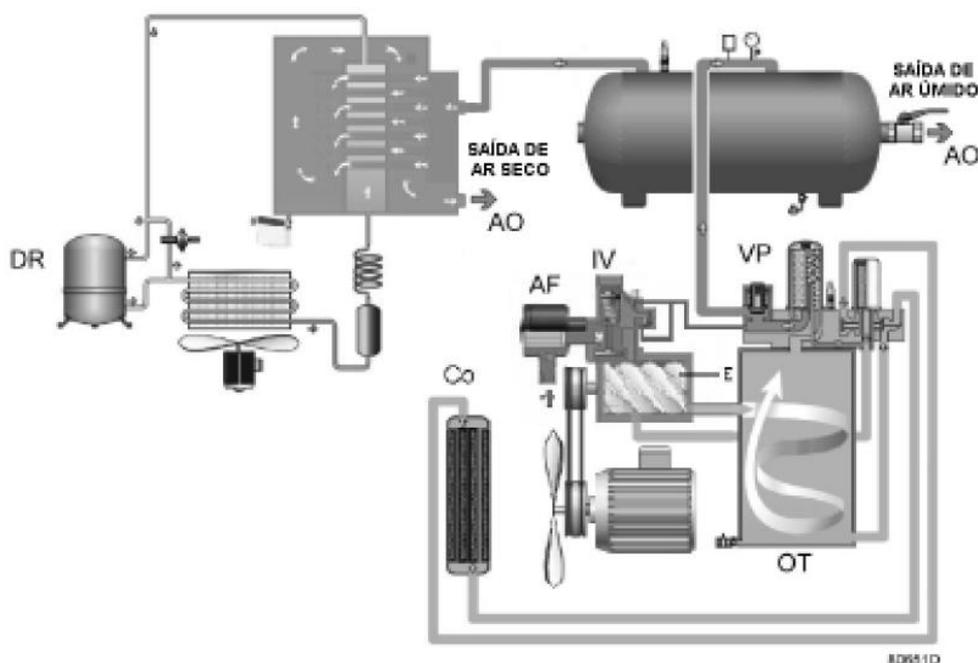
O ar pressurizado fornecido à máquina de corte precisar ter excelentes qualidades: baixíssima umidade, filtragem avançada de particulados, pressão efetiva igual ou maior do que 8 bar para travamento da mesa e maior do que 15 bar se utilizado como gás de assistência de corte, sendo que neste último caso precisa atender também a critério de vazão significativa.

Na instalação da máquina de corte no Laboratório de Usinagem optou-se por não utilizar o ar atmosférico comprimido como gás de corte, pois sua composição que mistura um quinto de O<sub>2</sub> a quatro quintos de N<sub>2</sub> não atinge um compromisso ideal para o corte de nenhum metal. Conforme o manual do fabricante da máquina de corte Senfeng SF1313G, o uso do ar atmosférico comprimido como gás de assistência de corte deve ser feito apenas em processos em que a qualidade de aresta e a repetibilidade não sejam critérios muito restritivos. Para fins didáticos e de pesquisa,

é mais interessante trabalhar com gases cujas características de pureza sejam bem definidas.

O compressor de ar atmosférico que temos a disposição no Laboratório de Usinagem é do tipo “parafuso”, marca e modelo Atlas Copco G7 FF (*Full-Feature*). Seu motor de 10,0 hp (7,0 kW) trifásico fornece até 10,3 bar de pressão efetiva, com uma capacidade de vazão máxima (FAD) de 69,6 m<sup>3</sup>/h. Seu nível de ruído quando em funcionamento é de 69 dB(A). Este compressor está montado sobre um reservatório de 200 litros. Além do compressor, o sistema de tratamento - descrito como *Full-Feature* pelo fabricante - tem um secador de ar por refrigeração integrado no mesmo gabinete, sobre o reservatório.

Figura 101 - FLUXO DE AR DO COMPRESSOR A PARAFUSO ATLAS COPCO G7 FF (FULL-FEATURE, COM SECADOR DE AR INTEGRADO E MONTADO SOBRE O RESERVATÓRIO).



FONTE: Adaptado de. (Atlas Copco, Maio de 2019, p. 11).

A Figura 101 ilustra o caminho do ar captado do ambiente até a saída para os filtros e a rede de ar comprimido. O ar é captado através do filtro (AF) e da válvula de entrada aberta (IV) para o elemento compressor (E) é comprimido. O ar comprimido e o óleo fluem para o separador/reservatório de óleo (OT). O ar é descarregado através da válvula de pressão mínima (Vp) para o reservatório de ar (AR). O ar úmido que vem do reservatório (AR) vai do secador de ar (DR) para a saída de ar seco (AO).

Com a abertura da válvula em (AO), o ar seco é conduzido pela mangueira a um pré-filtro (0,1 microm) e um pós-filtro de coalescentes (0,01 microm) – fixados à parede imediatamente atrás do compressor / secador, no canto inferior esquerdo da Figura 102 – antes de ser fornecido à rede de ar comprimido. Um purgador automático no centro da rede de ar comprimido faz a exaustão de umidade condensada na linha.

A rede de ar comprimido tem uma saída destinada à máquina de corte a laser fixado à parede imediatamente atrás desta última, conforme destaque no canto inferior direito da Figura 102. Esta válvula deve ser sempre aberta antes de iniciar a máquina de corte a laser.

Figura 102 - SISTEMA DE COMPRESSÃO E TRATAMENTO DE AR PARA FORNECIMENTO À REDE DE AR COMPRIMIDO.



FONTE: O autor (2022).

O ar comprimido a 10 bar, limpo e seco, é conectado à entrada “Air” no lateral direita da máquina de corte a laser, conforme ilustrado pelo retângulo azul na Figura 205. O ar comprimido na disposição que temos instalada é usada apenas para o cilindro de travamento da mesa. A pressão de operação é ajustada pela válvula reguladora de pressão correspondente.

#### 9.1.2. Refrigerador da água em dois canais.

Retira calor de forma independente a água que circula pelo cabeçote de corte e da água que circula em torno da fonte de laser (Figura 106), onde efetivamente ocorre a amplificação da radiação.

O refrigerador - comumente referido também pela sua tradução em idioma inglês *chiller* - é mantido a todo tempo com a chave na posição “On” (detalhe 1 na Figura 103). Como o refrigerador está conectado ao transformador, ele estará efetivamente sem alimentação de energia até o último seja acionado no comando giratório “Main Switch” no comando da máquina, assim que o primeiro pode ser mantido com sua chave ligada a todo instante.

Figura 103 - REFRIGERADOR DA ÁGUA EM DOIS CANAIS, PARA RETIRAR CALOR DA FONTE LASER E DO CABEÇOTE DE CORTE.



FONTE: O autor (2022).

O volume da água é  $\geq 12$  L/min. Somente água pura de alta qualidade ou água destilada pode ser usada como água circulante de resfriamento (SENFENG, Original Instructions no.1 - User Manual V6.17 - 1313G-Series Fiber Laser Cutting Machine, 2017, p. 11). Os dois fluxos de água podem ter sua temperatura controlada independentemente, nos mostradores digitais na região frontal.

*Low temperature* (ponto 2 na Figura 103) controla a temperatura da fonte laser, localizado na parte traseira esquerda e inferior da máquina – vide Figura 106. Deve ser mantido a 25° C.

*High temperature* (ponto 3 na Figura 103) controla a temperatura do cabeçote de corte. Deve ser mantido a 25° C.

Um visor localizado na parte traseira do *chiller* permite verificar o nível da água (conforme detalhe 4 Figura 103), que deve ser completado com água desmineralizada, se necessário, pela tampa mostrada no detalhe 5 da mesma Figura 103.

### 9.1.3. Transformador elétrico.

Para a potência de 15 kVA, o equipamento de corte a laser e seus periféricos necessitam de fonte de alimentação trifásica de 380V, conforme Quadro 13, portanto a máquina de corte a laser está acompanhada de fábrica por um transformador de gabinete sobre rodízios como equipamento periférico, mostrado na Figura 104. A alimentação ao transformador se dá pelo acionamento dos disjuntores “Geral Barramento I” e “Laser” no quadro de disjuntores nº 2 do laboratório, com detalhe no subitem VII, página 207, capítulo 10.

Figura 104 – TRANSFORMADOR ELÉTRICO TRIFÁSICO SHANGHAI XISHUN ELECTRIC CO. LTD.



FONTE: O autor (2022).

### 9.1.4. Exaustor de fumos e gases tóxicos.

O laser desta máquina é um gerador de laser de fibra, que gera gases de escape durante o corte, portanto, os extratores de ar devem ser ligados durante o corte para que a fumaça e o gás de trabalho do laser gerados durante o processamento sejam descarregados para o exterior através do tubo de exaustão.

Isso é feito acionando o exaustor de gases pelo botão de partida, no quadro de comando deste.

Antes da operação, equipamentos de ventilação, filtros de manga para coleta de poeira e exaustão devem ser instalados para preservar a função pulmonar do operador (SENFENG, Original Instructions no.2 - Maintenance Manual V7.19 - 1313G-Series Fiber Laser Cutting Machine, 2017, p. 16).

Figura 105 - EXAUSTOR DE FUMOS E GASES TÓXICOS PROVENIENTES DE CORTE.



FONTE: O autor (2022).

#### 9.1.5. Fonte de laser.

Apesar de estar montada na máquina de corte e ser acionado pela sequência de acionamento desta, é conveniente descrever a fonte de laser e sua posição.

A máquina de corte a laser Senfeng SF 13131G usa a fonte de laser RFL-C750 do fabricante Raycus. Emite laser em onda contínua (CW), posteriormente convertida em um feixe pulsado.

Amplifica e emite radiação no infravermelho, com o comprimento de onda 1075 a 1085 nm, sintonizável. A potência é 750 W. Está acessível pela tampa no canto inferior esquerdo na região traseira da máquina, mostrado na Figura 106.

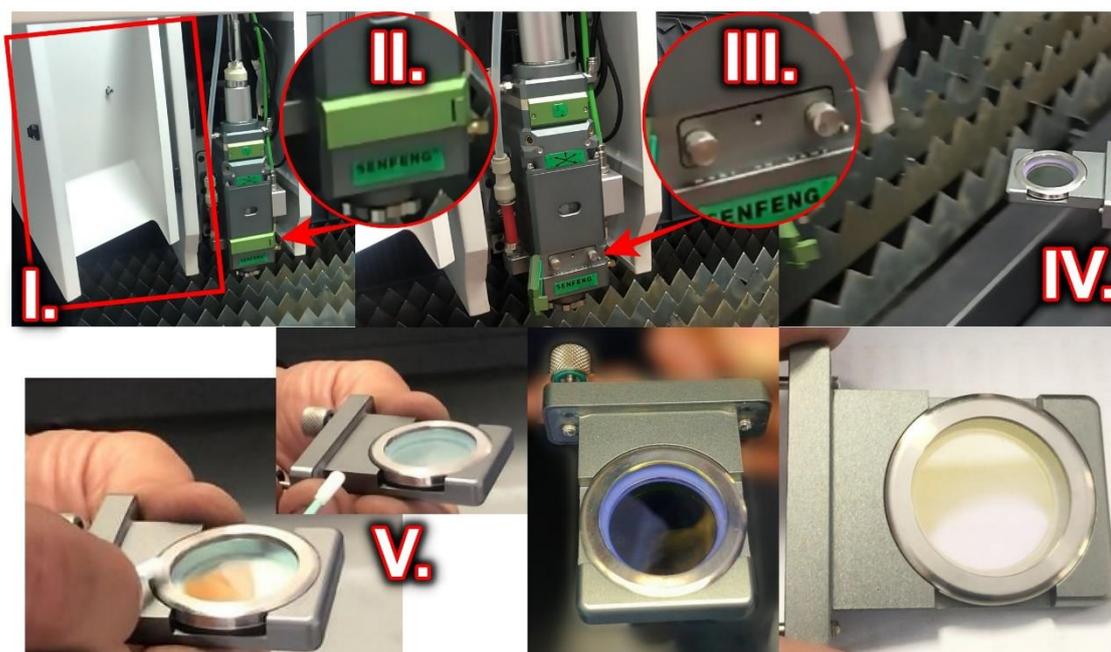
Figura 106 - FONTE LASER DE FIBRA RAYCUS RFL-C750.



FONTE: O autor (2022).

## 9.2. LIMPEZA DALENTE

Figura 107 - INSTRUÇÃO DE RETIRADA DO SUPORTE DALENTE, PARA LIMPEZA OU TROCA.



**ATENÇÃO: Segure a lente na posição pela borda metálica ao virar, pois não estará presa à gaveta !!**

FONTE: O autor (2022).

A Figura 107 ilustra um passo-a-passo para retirada da gaveta de suporte da lente. Os itens estão referenciados por numerais romano na Figura 107 e explicados abaixo.

- I. Abra a tampa do cabeçote;
- II. Solte a presilha;
- III. Desrosqueie ambos os parafusos até soltar a gaveta;
- IV. Puxe a gaveta da lente pela cabeça dos parafusos;
- V. Limpe com uma haste de algodão apropriada que não solte fiapos (conforme instrução detalhada no item 9.2.29.2.1) ou com papel especial para limpeza de lentes, conforme instrução do item 9.2.1.

Ao limpar o verso da lente, **SEGURE-A NO LUGAR PELA BORDA METÁLICA, POIS A LENTE MONTADA NO ANEL NÃO ESTARÁ PRESA PODERÁ CAIR.**

9.2.1. Para limpar a lente com papel para lentes.

Estas instruções foram fielmente transcritas do manual 2 da máquina de corte a laser Senfeng SF1313G (Reliablelaser, 2020, p. 26).

- I. Coloque o papel da lente na superfície da lente e derrame 2 ~ 3 gotas de álcool de alta pureza ou acetona de alta pureza no papel da lente e, em seguida, puxe com cuidado e devagar o papel da lente horizontalmente na direção próxima ao operador. Repita esta operação várias vezes até que a superfície da lente esteja limpa.
- II. Se a lente estiver muito suja, dobre o papel da lente 2 ou 3 vezes e repita as etapas acima até que a lente esteja limpa.

*É proibido passar um papel para lentes seco diretamente sobre a lente.*

9.2.2. Para limpar a lente com hastes de algodão.

Estas instruções foram fielmente transcritas pela tradução livre do manual 2 da máquina de corte a laser Senfeng SF1313G .

- I. Limpe a poeira da superfície da lente com uma pistola de sopro.
- II. Use uma haste de algodão nova, de modelo apropriado para limpeza de lentes, que não solte fiapos. Umedeça em álcool de alta pureza ou acetona de alta pureza para esfregar a lente. A esfrega deve começar do ponto central da lente e seguir um movimento circular até a borda da lente. Em seguida, use outra haste de algodão nova e umedecida para repetir a operação acima até que a lente esteja limpa.
- III. Remova o álcool ou acetona residual da superfície da lente e tome cuidado para não arranhar a superfície da lente.

- IV. Após a etapa de limpeza ser concluída, leve a lente para um local com luz suficiente. Se o reflexo da lente for bom, a lente está limpa. Se o reflexo da lente não for bom, continue a limpar a lente.
- V. Coloque a lente limpa no suporte da lente de acordo com as etapas descritas acima.

### 9.3. MONTAGEM DO BOCAL DE CORTE.

A cada novo processo de corte que envolva mudança do material e espessura da chapa, sobretudo aqueles que exijam troca do gás de assistência, exigirá a consideração da troca do bocal. A escolha do diâmetro do bocal é um processo que demanda a mesma pesquisa de textos acadêmicos, ensaios empíricos e experiência do que qualquer outro dos importantes parâmetros definidos na janela LAYER PARAMETER SETTINGS, discutido em detalhes no item 11.5.

Sem adentrar em considerações mais específicas como o formato interno do bocal, a mera opção por diferentes diâmetros, combinado com a pressão do gás de assistência, determinará a velocidade do fluxo: baixo, subsônico ou supersônico.

A troca, porém, é um procedimento bastante simples, basta desrosquear o atual e rosquear o novo bocal no lugar.

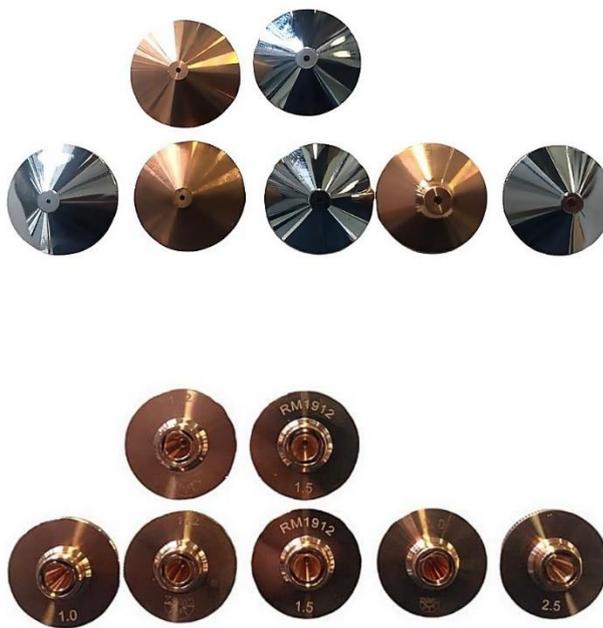
Apesar de simples, é um procedimento que deve ser realizado com máxima cautela com a segurança. É de extrema importância recordar que a troca deve ser realizada *antes da calibração do sensor capacitivo*, uma vez que a mudança do bocal pode alterar o comprimento total do cabeçote de corte e comprometer a distância da referência Z0. O ideal é substituir ainda com a máquina de corte desligada, já que apesar dos redundantes sensores que detectam a aproximação do operador ao cabeçote e acionam um alarme que interrompe o laser de corte, um disparo acidental de laser de marcação, possível de realizar com cabeçote parado – *laser burst*, o mesmo disparo usado para aferir a concentricidade do feixe de laser com o bocal – seria perfurante a todos os tecidos humanos. Ao realizar com a máquina ligada, é recomendado ter acionado antes o botão SHUTTER, o ponteiro laser vermelho de baixa potência perfeitamente visível, pois um disparo LASER BURST somente seria possível após desligar o SHUTTER, então ter esse ponteiro laser vermelho ligado é uma camada adicional de segurança.

Acompanha a máquina de corte a laser sete bocais para corte com assistência de O<sub>2</sub>, diferenciando-se visualmente pelo formato anelar e por serem em sua maior parte de menor diâmetro.

- 1 bocal anelar de 1,0mm de diâmetro;
- 2 bocais anelares de 1,2mm de diâmetro;
- 2 bocais anelares de 1,5mm de diâmetro;
- 1 bocal anelar de 2,0mm de diâmetro;
- 1 bocal anelar de 2,5mm de diâmetro.

Os sete são mostrados na Figura 108.

Figura 108 - BICOS DE CORTE PARA USO DE GÁS DE ASSISTÊNCIA OXIGÊNIO.



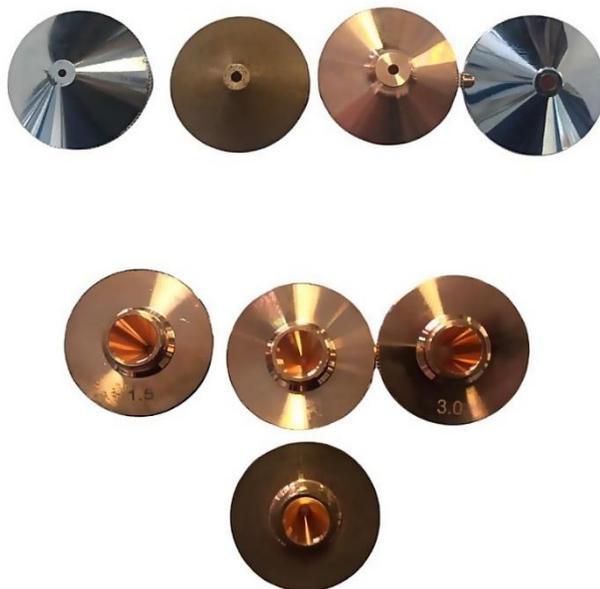
FONTE: O autor (2022).

Os bocais de corte para uso com nitrogênio, por sua vez, são quatro (4) e do tipo cônico, com diâmetro de bico significativamente mais largo, o que faz sentido ao considerar que a pressão usada no corte assistido com nitrogênio é bem maior.

- 1 bocal cônico de 1,5mm de diâmetro;
- 2 bocais cônicos de 2,0mm de diâmetro;
- 1 bocal cônico de 3,0mm de diâmetro.

Os quatro são mostrados na Figura 109.

Figura 109 - BICOS DE CORTE PARA USO DE GÁS DE ASSISTÊNCIA NITROGÊNIO.



FONTE: O autor (2022).

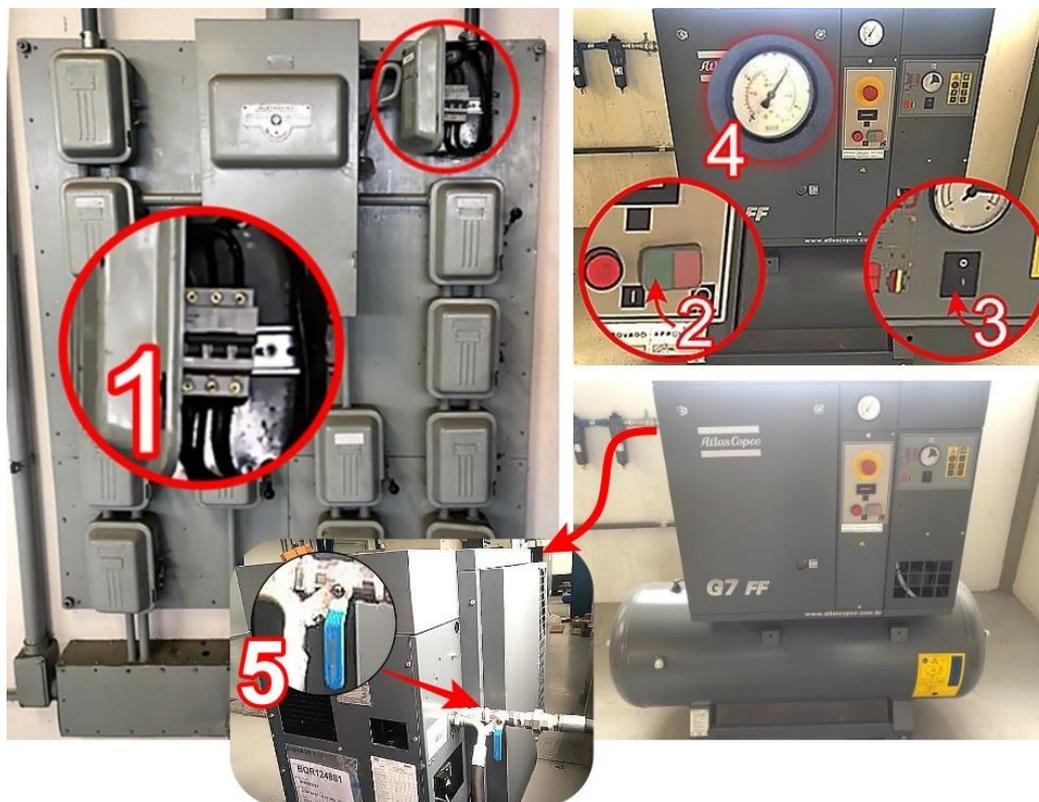
## **10 SEQUÊNCIA DE ACIONAMENTO DA MÁQUINA DE CORTE A LASER DO LABOTARÓRIO DE USINAGEM**

A intenção deste capítulo é documentar as etapas recomendadas para acionamento da máquina de corte a laser, começando pela ordem de acionamento dos seus periféricos, aferimentos de rotina (tensão, temperatura e nível de água de circulação, volumes dos gases e suas pressões), seleção do gás de corte, abertura de válvulas do sistema de fornecimento de ar comprimido, carregamento da chapa, sensoriamento da posição da chapa e outros tantos detalhes, até o ponto em que a máquina esteja preparada e pronta para iniciar uma tarefa de corte. Detalhes sobre o software CAM Recomenda-se seguir esta rotina de tarefas ao acionar e desativar, para não esquecer nenhuma etapa necessária ao correto funcionamento da máquina de corte a laser SENFENG SF1313G 750W.

Há também um vídeo produzido pelo autor como complemento ao capítulo 10 desta monografia demonstrando a mesma rotina de acionamento. O link atualizado para acesso ao vídeo será disponibilizado no site do Laboratório de Usinagem do Departamento de Engenharia Mecânica da Universidade Federal do Paraná (DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA MECÂNICA DA UFPR, s.d.).

- I. Ligar o compressor de ar no quadro de disjuntores nº 3 do laboratório – detalhe 1 na Figura 110 - e depois no botão de acionamento no compressor (indicado no detalhe 2 da Figura 110). A pressão deve ser estar regulada para ser mantida a 10 bar (1 MPa), conforme manômetro apontado no destaque 4 da mesma figura;

Figura 110 - DETALHES PARA ACIONAMENTO DO COMPRESSOR E SECADOR DE AR PARA FORNECIMENTO À REDE DE AR COMPRIMIDO.



FONTE: O autor (2022).

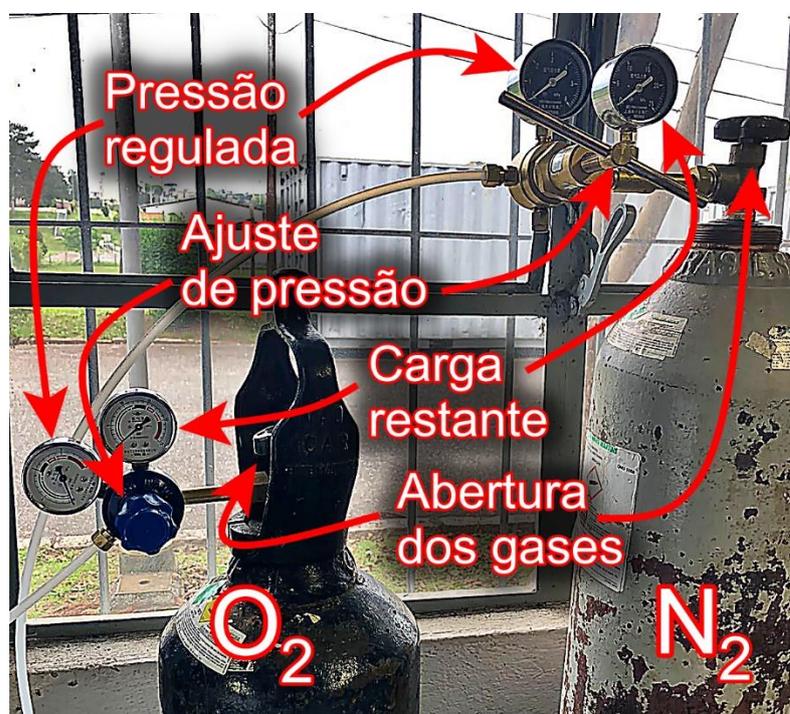
- II. Verificar se o secador de ar (acima do cilindro, ao lado do compressor) está ligado – detalhe 3 da Figura 110;
- III. Abrir o registro localizado na parte traseira do compressor, que libera o ar comprimido para passar pelos filtros e em seguida à rede de ar comprimido do laboratório – no detalhe 5 da Figura 110;
- IV. Abrir a saída da rede de ar comprimido para fornecimento à máquina de corte, por meio da abertura do registro localizado imediatamente atrás da máquina de corte, retratada na Figura 111;
- V. Figura 111 - VÁLVULA DE SAÍDA DA REDE DE AR COMPRIMIDO PARA FORNECIMENTO À MÁQUINA DE CORTE A LASER.



FONTE: O autor (2022).

- VI. Abrir o registro do cilindro de gás que será usado como gás de assistência - O<sub>2</sub> ou N<sub>2</sub>, apenas o que será utilizado no atual processo de corte. O manômetro à direita em qualquer dos cilindros indica por meio de pressão a presença dos gases no respectivo cilindro e o manômetro à esquerda mostra a pressão de trabalho regulada (pressão manométrica) que está sendo fornecida à respectiva mangueira e entrando na máquina de corte a laser;

Figura 112 - DETALHES DOS CILINDROS DE OXIGÊNIO E DE NITROGÊNIO UTILIZADOS COMO GÁS DE ASSISTÊNCIA DO CORTE.



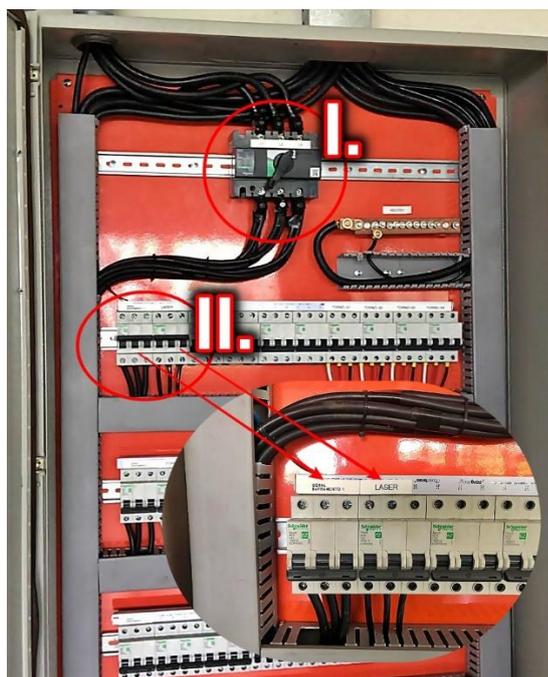
FONTE: O autor (2022).

- a. A pressão do O<sub>2</sub> deve ser mantida em 10 bar (1 MPa), no manômetro especificado na Figura 112, mas será posteriormente regulada diretamente na máquina de corte a laser por meio de uma válvula proporcional. A pressão desejada deve ser parametrizada na janela LAYER PARAMETER SETTINGS, selecionando oxigênio em GAS TYPE e uma pressão inferior à fornecida pelo cilindro na opção GAS PRESSURE;
- b. Se o gás de corte utilizado for nitrogênio, a pressão deve ser regulada DIRETAMENTE NA ALAVANCA ROTATIVA e verificada no manômetro à esquerda do cilindro de N<sub>2</sub>, conforme ilustrado na Figura 112. Esta pressão ali ajustada será fornecida *diretamente* ao cabeçote da máquina de corte a laser como gás auxiliar de corte. NO CASO DO

NITROGÊNIO, NÃO HÁ REGULAGEM POSTERIOR DENTRO DA MÁQUINA DE CORTE, NÃO HÁ VÁLVULA PROPORCIONAL PARA ESTE GÁS, desta forma a pressão do N<sub>2</sub> fornecido no cabeçote é esta regulada diretamente na saída do cilindro;

- VII. No quadro de disjuntores nº 2 do laboratório, verificar se a chave geral está acionada (destacada como I na Figura 113). Em seguida, ligar dos disjuntores GERAL BARRAMENTO I e LASER (II na Figura 113);

Figura 113 - QUADRO DE DISJUNTORES 2. ACIONAMENTO DO GERAL BARRAMENTO I E LASER.



FONTE: O autor (2022).

- VIII. No transformador ao lado da máquina de corte a laser, ligar o disjuntor;

Figura 114 - TRANSFORMADOR 380V / 220V.



FONTE: O autor (2022).

- IX. Ligar o exaustor de fumos e gases (Figura 115). Seu acionamento se dá pela chave de partida no quadro de comando deste, na parede atrás da máquina de corte a laser;

Figura 115 - EXAUSTOR DE FUMOS E GASES TÓXICOS PROVENIENTES DA FUSÃO DE MATERIAIS NO CORTE A LASER.

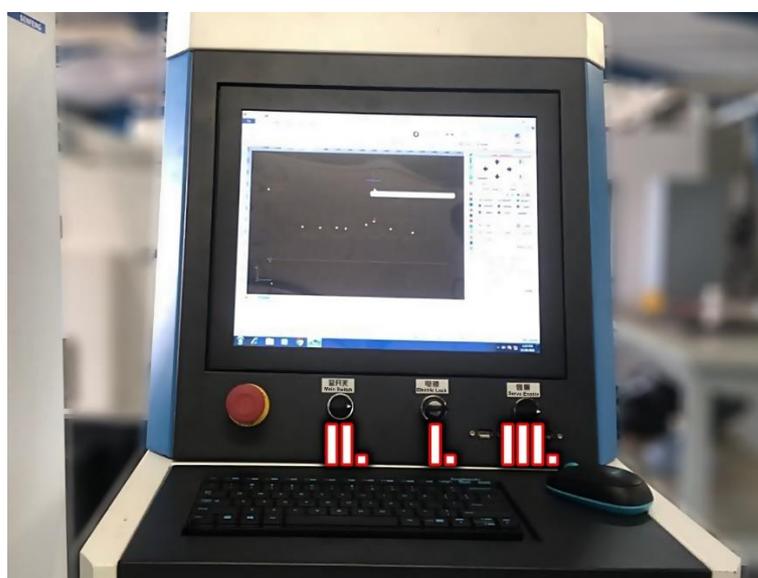


FONTE: O autor (2022).

- X. Havendo necessidade de troca do bocal, o momento mais seguro de realizar a troca é agora, antes de inicializar a máquina, conforme explicado no item 9.3;

- XI. No painel de operação da máquina, acionar, na ordem:
- Electric Lock – Com a chave (marcado como I na Figura 116);
  - Main Switch – O refrigerador (*chiller*) da água que circula no cabeçote e do fluxo que circula pela fonte laser, que deve ser mantido com sua chave na posição ON, pois de fato só iniciará a circulação de água de resfriamento com o acionamento deste *Main Switch*. O computador inicializa (detalhe II na Figura 116);
  - Servo Enable – Inicialização dos drives dos servos (marcado como III na Figura 116).

Figura 116 - SEQUÊNCIA DE ACIONAMENTO NO PAINEL DA MÁQUINA.



FONTE: O autor (2022).

- XII. Abrir o software CAM “CypCut Laser Cutting Systems” no atalho na área de trabalho.



- XIII. Ao iniciar o CypCut, atentar para a mensagem do sistema que informa a necessidade de localizar a origem: “You must return ORG after starting!”. Uma das três opções deve ser selecionada:

- ORG (correction machine coordinates)*

Calibrar a origem XY, voltando à origem da máquina para zerar as referências. Também pode ser feito na guia CNC, botão RETURN ORIGIN, opção ALL AXIS.

- ORG, then return zero point*

Calibrar a origem XY (zerar as referências) e voltar ao ponto zero na chapa. É a opção mais comumente selecionada ao iniciar a máquina de corte a laser.

c. *ORG, then locate the interruption point*

Caso o corte tenha sido interrompido numa queda de energia, calibra a origem e volta ao ponto de corte onde parou.

XIV. Verificar o alinhamento do feixe de laser com o bocal de direcionamento dos gases:

- a. Cobrir a ponta do bocal dos gases com uma fita adesiva e reafixar o bocal no cabeçote de corte.
- b. No controle (COMANDO REMOTO), desligar a luz indicativa (botão SHUTTER, detalhe I na Figura 117) e disparar rapidamente o feixe de laser (botão LASER, detalhe II na Figura 117).

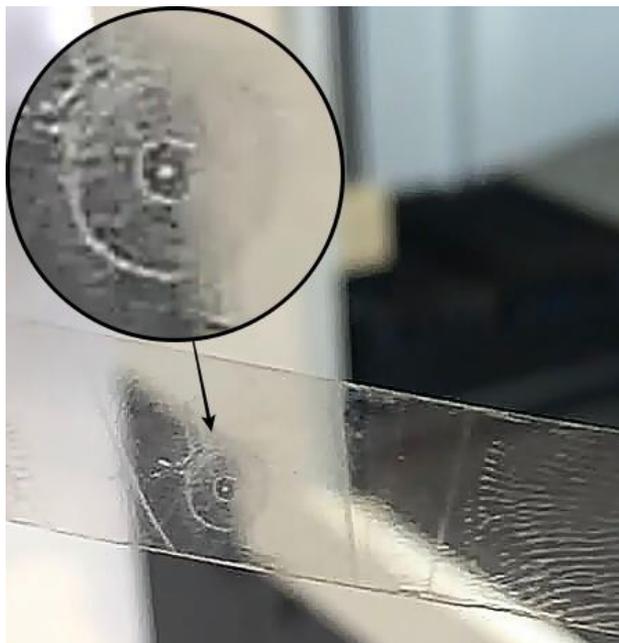
Figura 117 - DISPARO DE LASER COM CABEÇOTE PARADO, PARA MARCAÇÃO (LASER BURST).



FONTE: O autor (2022).

- c. Conferir a concentricidade entre o furo aberto pelo laser na fita adesiva e a marca do bocal.

Figura 118 - TESTE DE CONCENTRICIDADE DO FEIXE LASER COM O BOCAL.



FONTE: O autor (2022).

- XV. Localizar a origem do eixo Z – a superfície superior da chapa posicionada sobre a mesa de corte – através da calibração do sensor capacitivo.
- Acionar o ponteiro de laser vermelho, meramente indicativo, pressionando o botão SHUTTER no controle remoto (conforme detalhe I na Figura 119) ou o mesmo botão no painel *NC Control* do software;
  - Com os botões de movimentação do cabeçote no plano XY - as setas no controle remoto (conforme detalhe II na Figura 119) ou no módulo de controle de trabalho no software - posicionar em um local sobre a chapa.
  - Com os botões de movimentação do cabeçote em altura, eixo Z, mostrado no detalhe III na Figura 119, trazer o cabeçote de 10 a 15mm de distância da chapa. Atenção: não aproximar demais da chapa a ponto de causar colisão do bocal com esta, o que é passível de ocorrer antes da calibração da capacitância e pode danificar o cabeçote.

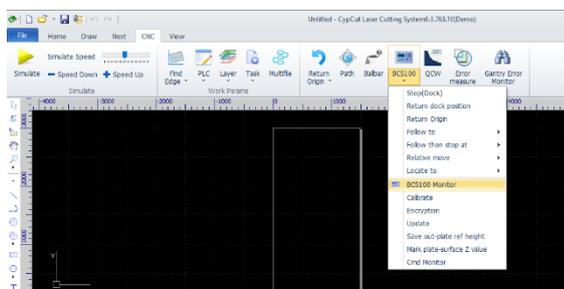
Figura 119 - ACIONAMENTO DO PONTEIRO LASER INDICATIVO (SHUTTER) E MOVIMENTAÇÃO DO CABEÇOTE NO PLANO XY E NA ALTURA Z.



FONTE: O autor (2022).

- d. Na aba CNC, clicar na parte inferior do botão BCS100 para abrir o menu *drop down*, onde deve selecionar a opção BCS100 Monitor, segundo mostrado na Figura 120.

Figura 120 - INSTRUÇÃO PARA ABERTURA DA FERRAMENTA DE CALIBRAÇÃO DO SENSOR CAPACITIVO BCS100 MONITOR.



FONTE: O autor (2022).

- e. Na janela que se abre, do BCS100 Monitor, selecionar opção [F1] CALIBRATE e ENT. Na próxima tela, clicar sobre o número 2 no teclado numérico mostrado na tela – [2] CAPACITANCE CALIBRATION - confirmar no botão ENT. Aguardar a realização da calibração, que ao ser concluída com sucesso gera a mensagem CALIBRATE OK na tela. Consulte a Figura 121.

Figura 121 - CALIBRAÇÃO DO SENSOR CAPACITIVO BCS100, PELA JANELA BCS100 MONITOR.



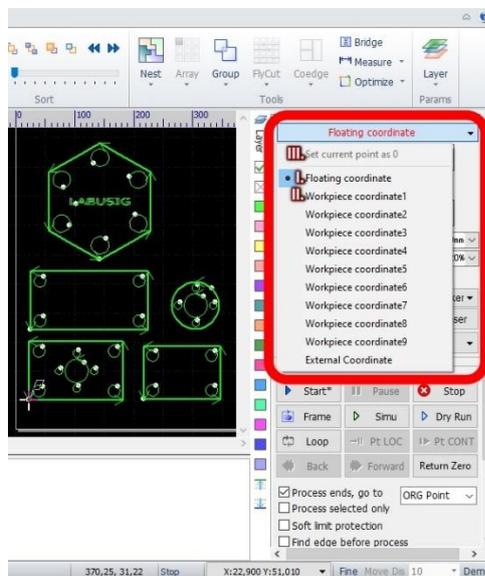
FONTE: O autor (2022).

#### XVI. O ponto zero do plano.

No sistema de coordenadas flutuante (FLOATING COORDINATE) - indicado pelo detalhe I na Figura 122 - a posição do cabeçote atual será assumida como sendo o ponto zero do programa.

Caso use um sistema de coordenadas da peça de trabalho (WORKPIECE COORDINATE), basta selecionar a "WORKPIECE COORDINATE *i*" no menu *drop down* mostrado abaixo do detalhe II da Figura 122, movimentar o cabeçote até o ponto que deseja fixar o ponto zero da "WORKPIECE COORDINATE *i*" e, abrindo mais uma vez o menu *drop down*, selecionar "SET CURRENT POINT AS 0". Aquele ponto desta forma marcado será o ponto zero daquele sistema de coordenadas da peça de trabalho *i* (*i* variando de 1 a 9). Para maiores detalhes, consultar os subitens 11.3.1 e 11.3.2.

Figura 122 - SELEÇÃO DO SISTEMA DE COORDENADAS PARA A TAREFA - FLUTUANTE OU DA PEÇA.

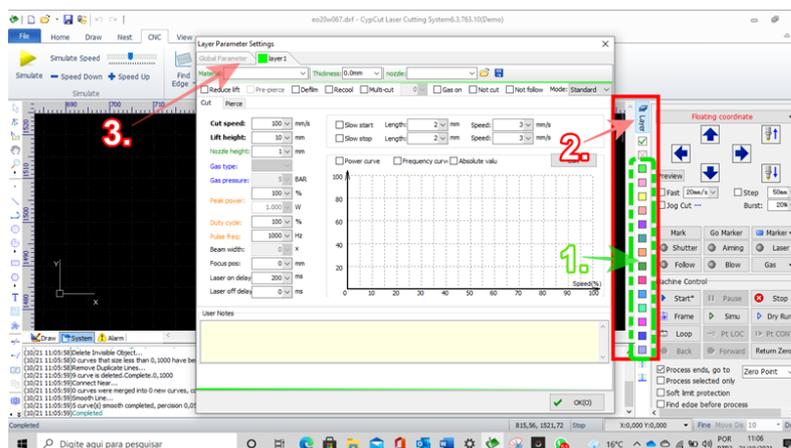


FONTE: O autor (2022).

XVII. Agora é necessário configurar as camadas de corte. Por padrão, há uma camada apenas inicialmente, a verde. Se houver diferentes parâmetros de corte a fazer na peça (como corte e gravação). Clique sobre uma outra cor - diferente da verde – para adicionar outra camada (LAYER) que poderá ter parâmetros de corte específicos (destaque 1 na Figura 123).

Para inserir os parâmetros, clique no botão LAYER - destaque 2 na Figura 123 – para abrir a janela LAYER PARAMETER SETTINGS - destaque 3 na mesma figura– aonde cada cor selecionada é uma aba independente para inserir os parâmetros para cada camada. No caso mostrado na Figura 123, apenas uma camada foi selecionada em 1, assim que apenas a aba correspondente a ela está mostrada no detalhe 3.

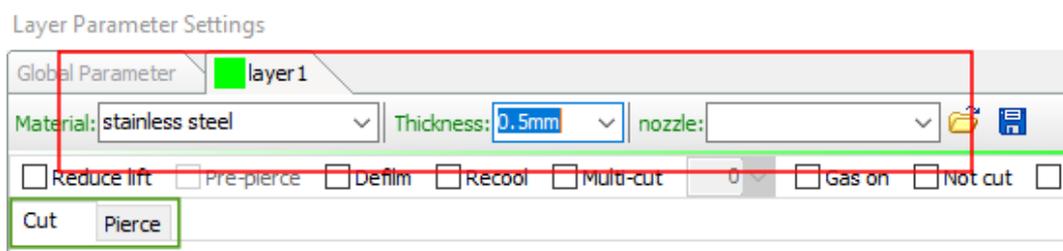
Figura 123 - POSIÇÃO DO MENU VERTICAL DE CAMADAS PARA PARAMETRIZAÇÃO DO CORTE E DA PERFURAÇÃO INICIAL.



FONTE: O autor (2022).

- a. Primeiramente, na parte superior da janela de LAYER (retângulo vermelho na Figura 124), definir o material (MATERIAL), a espessura da chapa (THICKNESS) e o tipo/diâmetro de bocal (NOZZLE). *Estes dados por si só não alteram em nada a dinâmica do corte, servem apenas para referência, mas são de fato informação fundamental já que a camada de parâmetro pode ser salva e carregada em operações futuras com o mesmo material e espessura, de modo a servir como repertório de experiências de processo ao identificar exatamente a que se aplica. Repetir exatamente os mesmos parâmetros para outro tipo de material, chapa com distinta espessura e utilizando um bocal diferente seria simplesmente ilógico.*

Figura 124 - IDENTIFICAÇÃO DO MATERIAL, ESPESSURA E BOCAL A QUE SE DESTINA OS PARÂMETROS DA CAMADA.



FONTE: O autor (2022).

- b. Há duas abas, a de corte (CUT) e a de furação inicial (PIERCE), destacadas pelo retângulo verde na Figura 124.
- i. Na aba CUT, esses são os parâmetros mais importantes:

**ATENÇÃO ÀS UNIDADES, QUE PODEM SER ALTERADAS NA ABA “GLOBAL PARAMETER” da janela “LAYER PARAMETER SETTINGS”, conforme detalhado no subitem 11.5.4.**

- Velocidade de corte (CUT SPEED) [mm/s];
- Tipo de gás de assistência (GAS TYPE);
- Pressão do gás de assistência (GAS PRESSURE) [bar] [MPa\*10] - para O<sub>2</sub>, a pressão fornecida na entrada será regulada por uma válvula proporcional para atingir este valor. Para N<sub>2</sub>, não há válvula proporcional, então deve informar aqui a pressão que está saindo do cilindro;
- Potência de pico (PEAK POWER) [% W] e potência do ciclo (DUTY CICLE) [% W] - O resultado da potência será  $750W * PEAK POWER * DUTY CICLE$

- Ponto focal (FOCUS POS ou CUT FOCUS, dependendo da versão) [mm] - é a localização em relação à superfície superior da chapa. Para colocar o foco dentro da espessura da chapa ou em sua superfície inferior, deve-se informar valores negativos;
  - Altura do bocal (NOZZLE HEIGHT) [mm] - altura mantida durante a operação de corte, medida da ponta do bocal até a superfície da peça;
  - Distância de stand off (LIFT HEIGHT) [mm] - altura a ser utilizada durante a movimentação, importante para evitar colisão com regiões mais altas da chapa ou algum calço, por exemplo.
  - LASER ON DELAY [ms] - retardo entre o disparo do laser e o início do deslocamento.
  - LASER OFF DELAY [ms] - retardo entre o final do deslocamento e a interrupção do feixe laser.
- ii. Na etapa de perfuração (PIERCE) programa-se a estratégia para obter o furo passante inicial. Antes do furo passante, o material fundido não poderá ser ejetado pela parte inferior da chapa como necessário. Se iniciar já com a máxima potência, pode mesmo ser esguichado para cima em direção ao cabeçote e espalhado sobre a chapa, sobretudo em chapas mais espessas.

Na aba PIERCE, cuja posição está destacada também no quadro verde na Figura 124, inserem-se os parâmetros necessários para obter a perfuração inicial da chapa. Pode ser necessário definir vários estágios, cada qual com uma duração especificada e seus parâmetros particulares, até que se obtenha o furo passante que permite a ejeção de fundido na superfície inferior. Somente então será possível prosseguir com o corte que ocorre mediante o movimento do cabeçote, este atendendo os parâmetros ajustados na aba CUT. Nessa fase é necessário configurar parâmetros com atenção, a estratégia é iniciar com menor potência e maior distância do cabeçote à chapa, para evitar respingos de metal fundido. Pode-se utilizar de um a três estágios - selecionados no botão 1-STAGE, 2-STAGE ou 3-STAGE - conforme a espessura da chapa. Somente em caso de chapas de pequena espessura, a depender também do material, a etapa de perfuração seria dispensável. Neste último caso a seleção seria NO PIERCE.

## 11 TUTORIAL PARA REFERÊNCIA E USO DO SOFTWARE CAM CYPCUT LASER CUTTING SYSTEM

O CypCut é *software* de assistência à manufatura (dito CAM) utilizado na interface que integra as complexas funções CNC (sigla para “controle numérico computadorizado”) da máquina de corte a laser de fibra Senfeng a um projeto trazido de um *software* de desenho (estes, comumente conhecidos pela sigla CAD). Na realidade, o CypCut possui também ferramentas de desenho relevantes.

A intenção da última seção desta monografia, o seu capítulo **Erro! Fonte de referência não encontrada.**, é familiarizar o usuário com a interface do *software* CAM CypCut, de modo que a consulta ao texto e imagens, em paralelo com a manipulação do *software* instalado na máquina de corte ou uma cópia da versão V6.3.763.10 para simulação permitirá ao usuário realizar as tarefas mais comuns e operar o processo de corte. Esta cópia para simulação tem sido disponibilizada e pode ser descarregada na página do criador do *software* (Friendess Co., Ltd., 2021).

Esse texto foi produzido com base nas seções 3 e 4 do 3º Manual Instruções da máquina de corte a laser Senfeng (SENFENG, Original Instructions no.3 - Operation Manual - 1313G-Series Fiber Laser Cutting Machine, 2017, pp. 10-84) e com consulta à *playlist* de 52 vídeos “*CypCut Software Tutorial*”, do canal de Youtube Caroline Reliablelaser (Reliablelaser, 2020). Os vídeos são em mandarim e tiveram sua legenda automática extraída, em mandarim, pela nova ferramenta do site Youtube. Posteriormente traduzidos ao inglês, os 52 vídeos daquela *playlist* foram fonte para este tutorial.

### 11.1. DISPOSIÇÃO DAS PRINCIPAIS ÁREAS NA TELA DO SOFTWARE

Abra o *software* CypCut Laser Cutting System, pelo *menu Iniciar* :> *CypCut Laser Cutting System* > *CypCut Laser Cutting System* ou pelo atalho na área de trabalho, mostrado na Figura 125.

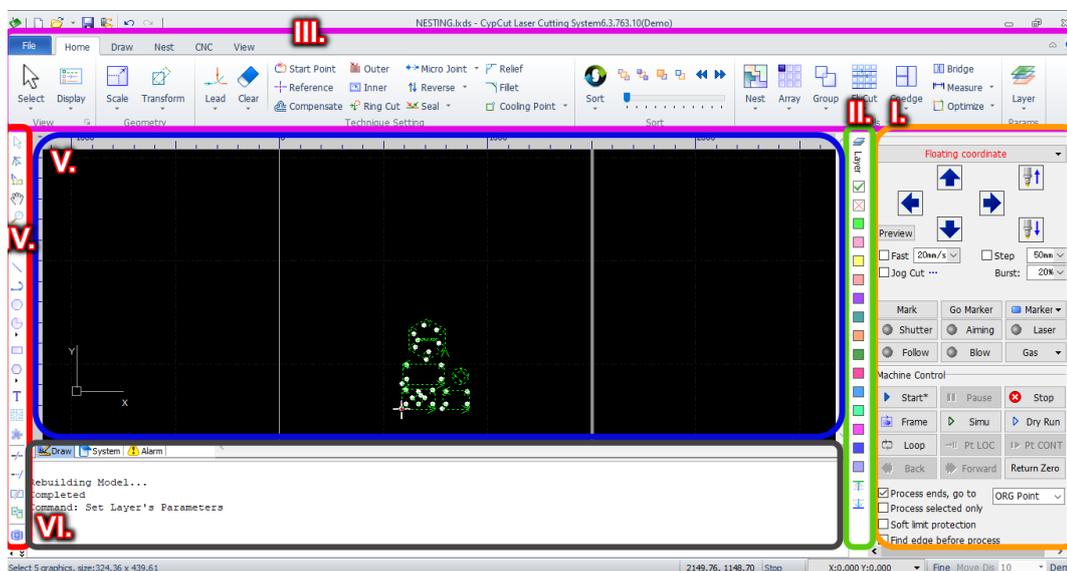
Figura 125 - ÍCONE DE ATALHO DO SOFTWARE CYPCUT.



FONTE: O autor (2022).

A disposição dos principais grupos de operação e comando na tela do software obedece ao ilustrado pela Figura 126.

Figura 126 - DISPOSIÇÃO DA JANELA PRINCIPAL DO SOFTWARE CYPCUT.



FONTE: O autor (2022).

**MACHINE CONTROL** - À esquerda da tela, no quadro de cor laranja marcado como destaque I na Figura 126, temos o módulo de controle de processo, também chamado de MACHINE CONTROL. A maior parte das funções desse MACHINE CONTROL estão repetidos no controle remoto, para fácil acesso.

**ABAS DE FERRAMENTAS** - Na região superior da tela (quadro púrpura no destaque III na Figura 126), temos acessos aos diversos comandos que compõem o

software em suas minúcias, acessíveis por botões, menus e submenus, que por sua vez estão distribuídos e organizados de forma intuitiva nas abas FILE, HOME, DRAW, NEST, CNC e VIEW.

**PARÂMETROS DE CORTE** - O acesso aos parâmetros de corte e de marcação, organizados como camadas codificadas por cores, estão acessíveis pelo menu vertical à direita da representação da área gráfica, no quadro verde claro, destaque II.

**BARRA DE ATALHOS** - Na lateral esquerda da representação gráfica do plano XY, no menu vertical destacado na Figura 126 com a marcação IV, temos atalhos para algumas das funções mais usadas – seleção, edição de nó, sequenciamento do corte, zoom e de desenho.

**PLANO DE TRABALHO XY** - A grande área central no destaque V é a representação gráfica da mesa de trabalho, representado o plano XY.

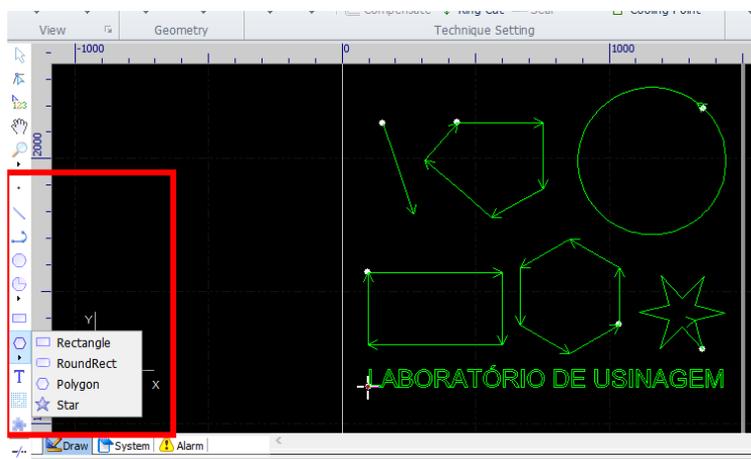
**LOG DE TEXTO** - Abaixo dele, o *log* COMMAND HISTORY OF CAD, um log de texto que também pode ser usado como diálogo para simplificar algumas configurações, mostrado no quadro cinza destaque VI da Figura 126.

#### 11.1.1. Barra de atalhos - menu vertical esquerdo.

##### 11.1.1.1. Atalhos para desenhos – região central do menu vertical esquerdo.

- I. A barra vertical localizada à esquerda da tela, em sua parte central, permite desenhar rapidamente linhas (LINES), linhas poligonais (POLYLINE), círculos (CIRCLES), retângulos (RECTANGLES), retângulos com filetes (ROUND RECT), polígonos (POLYGON) e estrelas (STAR). Sua posição na tela do software CypCut está destacado pelo retângulo vermelho na Figura 127.

Figura 127 - ABA LATERAL COM ATALHOS PARA DESENHOS.

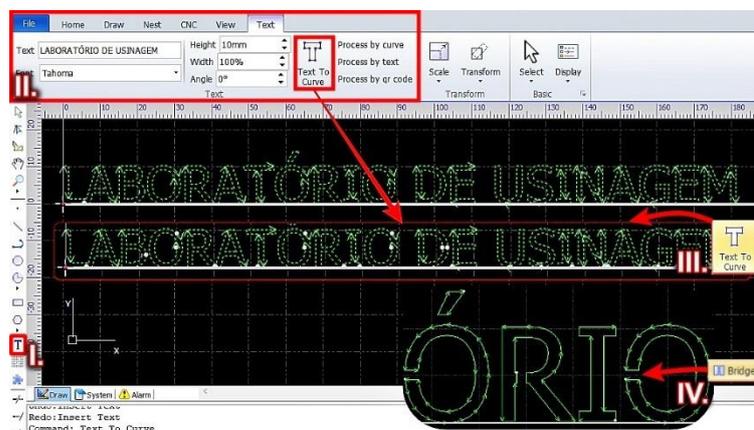


FONTE: O autor (2022).

- II. O atalho para textos (TEXT). Clicando no atalho mostrado no detalhe I da Figura 127, abre-se a aba TEXT na região das abas principais. Basta digitar, formatar e dimensionar naquela aba, no detalhe II da Figura 127. Após ter certeza de que o texto está satisfatório, converta o texto em curvas de corte através do botão TEXT TO CURVE (detalhe III da mesma figura), para as letras possam ser convertidas em curvas de corte normais e modificadas como tal. Uma vez convertido, não será possível retornar futuramente ao formato de texto para alguma modificação. Para isso, precisaria ser refeito.

Caso o interesse seja em obter as letras como peças ou realizar a marcação a laser do texto, a simples curva de corte obtida é suficiente. No caso em que se objective um corte vazado do texto (numa placa, por exemplo), algumas letras terão que ter regiões unidas por uma conexão de material (BRIDGE, mostrado no detalhe IV ainda na Figura 127) para não perderem áreas cercadas por recorte vazado, como o centro da letra “O”, por exemplo. Maiores detalhes em 11.2.2.21.

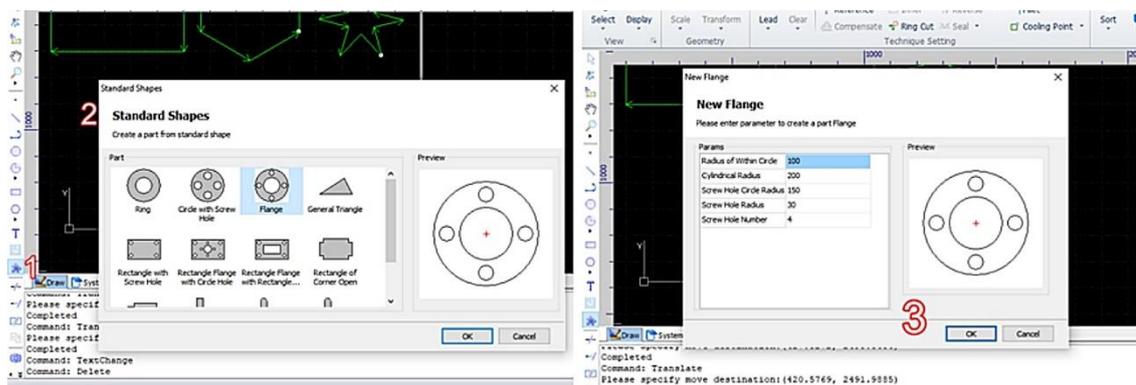
Figura 128 - ATALHO E FERRAMENTAS DE TEXTO.



FONTE: O autor (2022).

- III. Formas padrão (STANDARD SHAPES) – são conjuntos de curvas fechadas que representam o corte de peças de uso comum. Podem ter suas características alteradas, conforme mostrado na Figura 129.

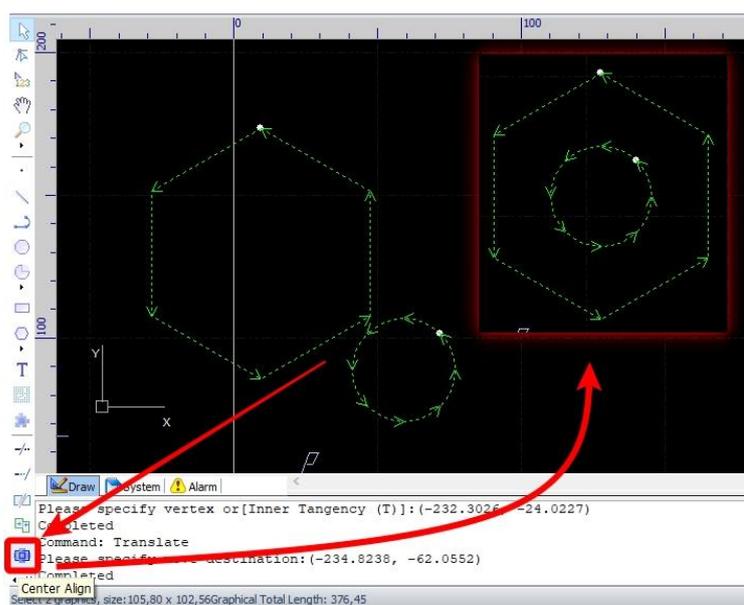
Figura 129 - INSERÇÃO DE FORMAS (PEÇAS) PADRÃO.



IV. FONTE: O autor (2022).

- V. Centralizar (CENTER ALIGN) - sua operação é intuitiva, alinha as curvas fechadas selecionadas em X e Y simultaneamente, como exemplificado na Figura 130.

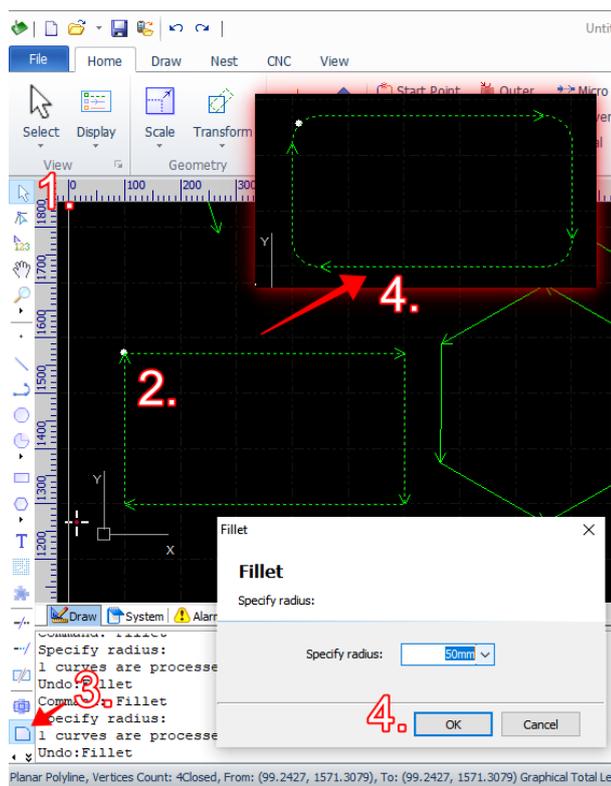
Figura 130 - CENTRALIZAÇÃO DE CURVAS.



FONTE: O autor (2022).

- VI. Filete de arredondamento de vértices (ROUNDED) - para adoçar um vértice com um filete de raio determinado. Também de uso intuitivo, conforme demonstrado na Figura 131.

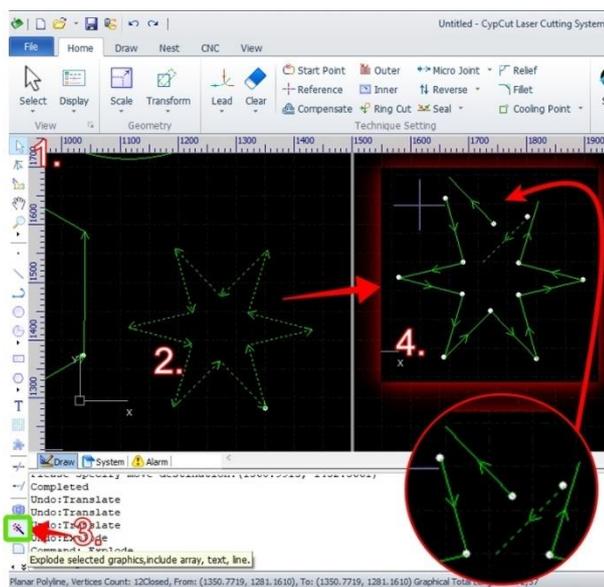
Figura 131 – ATALHO PARA A FERRAMENTA DE FILETE.



FONTE: O autor (2022).

- VII. Explodir gráficos selecionados – segmenta uma curva fechada de corte em diversos segmentos de retas e arcos, tornando-a aberta. Um exemplo de aplicação tem sua sequência de aplicação numerada e mostrada na Figura 132. Permite trabalhar com liberdade, apagar segmentos, mas o gráfico terá que ser unido novamente para uma curva fechada antes que o software possa cortá-lo corretamente. Para isso, sugere-se aplicar a ferramenta NODE EDIT no menu de atalhos (consulte subitem 0) ou JOIN LINE, esta última encontrada na aba DRAW (detalhes no subitem 0).

Figura 132 - COMANDO EXPLODIR GRÁFICO.

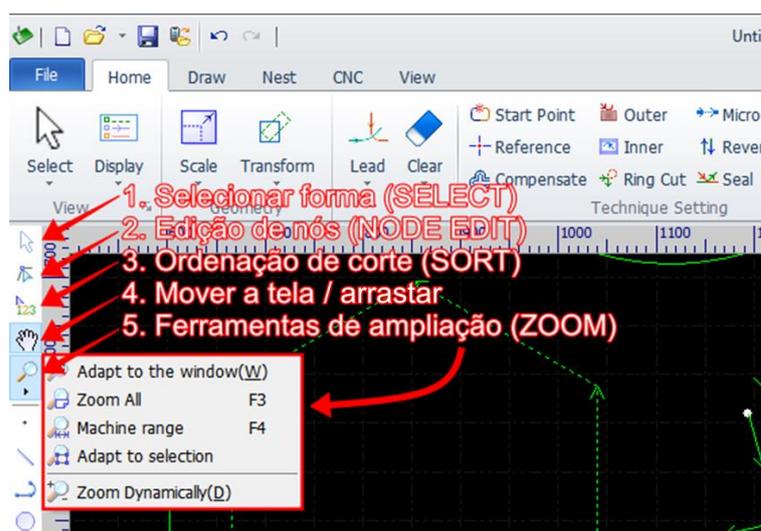


FONTE: O autor (2022).

#### 11.1.1.2. Atalhos para funções frequentes – região superior do menu vertical esquerdo.

Ainda no menu vertical ao lado direito, algumas funções frequentemente acessadas estão convenientemente localizadas, como mostra a Figura 133.

Figura 133 - BARRA DE ATALHO PARA FUNÇÕES FREQUENTES.



FONTE: O autor (2022).

É importante destacar a posição conveniente do botão de seleção (SELECT, destaque 1 da Figura 133) e o botão mover tela / arrastar (DRAG, destaque 4 da Figura 133). O botão mover/ arrastar é intuitivo e dispensa maiores explicações.

O botão de seleção tem aqui um atalho, mas suas funções mais específicas detalhadas em 11.2.2.1.

O botão de ampliação (ZOOM, destaque 5 e no quadro vermelho da Figura 133) é acessível somente nesta posição. As funções são:

- Adaptar-se à janela. Clique nesta opção e, com o mouse, delimite o perímetro da área a ampliar;
- Ampliação para visualizar todos os gráficos abertos;
- Ampliação para a região da mesa da máquina;
- Ampliação para visualizar os itens selecionados;
- Ampliação/redução ajustável pelo usuário.

### Edição de nós (NODE EDIT).

O botão que permite acesso a edição de nós nos gráficos mostrados na área gráfica é acessível pelo botão NODE EDIT, destaque 2 da Figura 133.

Um gráfico mostrado na área gráfica representa uma curva de corte, que por sua vez servirá como recorte interno ou como contorno de uma peça que esteja sendo produzida. Uma curva de corte “aberta” representa um gráfico defeituoso, não há sentido em produzir um corte que não permita o descolamento da chapa. Um exemplo de curva aberta é mostrado na Figura 134.

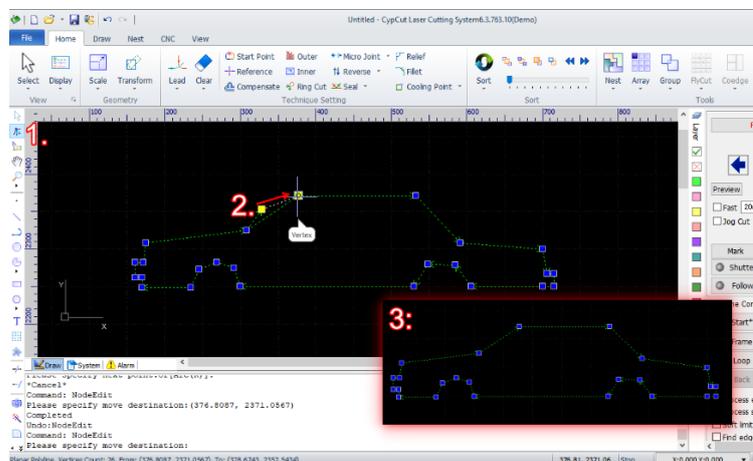
Figura 134 - EXEMPLO DE CURVA DE CORTE “ABERTA”, DEFEITUOSA.



FONTE: O autor (2022).

Com a ferramenta de edição de nós, a Figura 134 pode ser consertada, meramente movendo os nós que estão nas extremidades da curva aberta um sobre o outro, de modo a que o software entenda que devem ser unidos, combinados, fechando a curva. As etapas são mostradas na Figura 135, seguindo a ordem numérica crescente.

Figura 135 - EDIÇÃO DE NÓS, UNIÃO DE EXTREMIDADES PARA FECHAMENTO DE UMA CURVA DE CORTE.



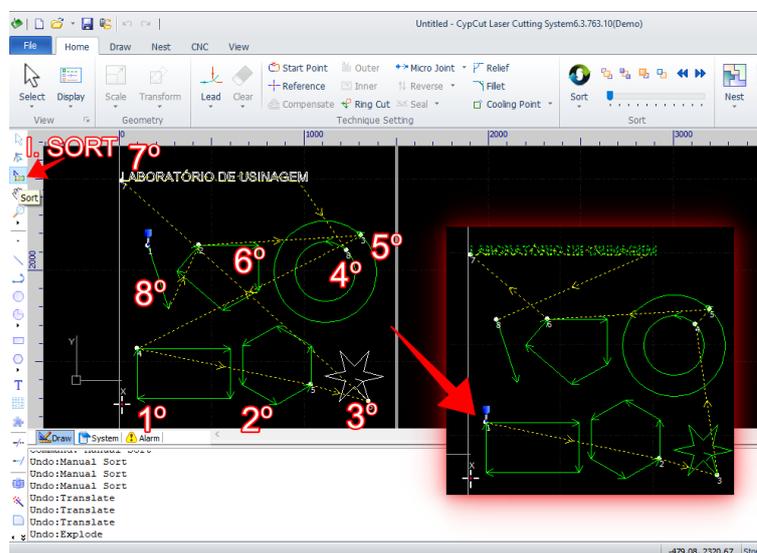
FONTE: O autor (2022).

### Reordenação de sequência de corte (3 - SORT).

O botão que permite acesso a reordenar a sequência de corte entre as diversas curvas de corte é acessível pelo botão SORT, destaque 2 da Figura 133.

Ao clicar no botão SORT e, em seguida, clicar nos gráficos na ordem indicada na Figura 136, altera-se a sequência original de corte indicada na figura à esquerda (linha, pentágono irregular, círculo maior, retângulo etc.) pela sequência indicada no quadro destacado à direita da mesma Figura 136 (retângulo, hexágono, estrela, círculo menor, círculo maior, pentágono irregular, texto e linha).

Figura 136 - REORDENAÇÃO DA SEQUÊNCIA DE CORTE.



FONTE: O autor (2022).

## 11.2. ABAS PRINCIPAIS

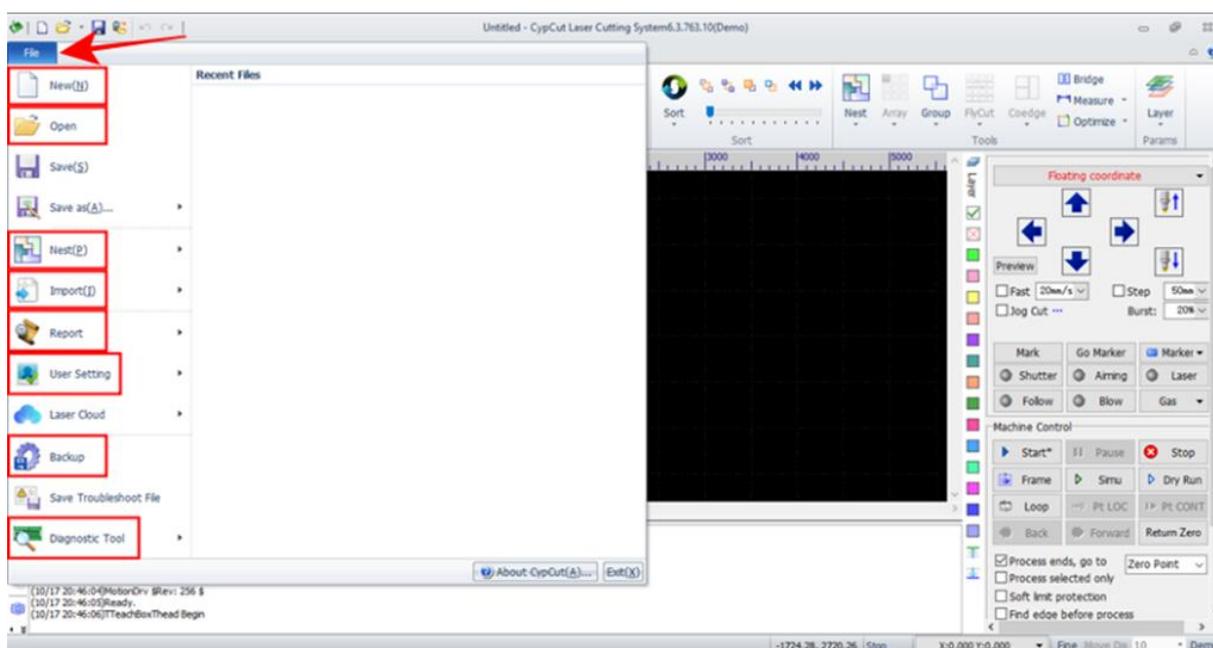
As funções básicas serão mostradas a seguir, aba a aba.

### 11.2.1. Aba FILE

A primeira aba é a FILE, no canto superior esquerdo.

As duas primeiras opções do menu sob a aba FILE permitem iniciar um novo desenho (NEW) ou abrir um arquivo - padrão .lxd ou .dxf - provenientes de um software CAD em (OPEN).

Figura 137 - ABA FILE.



FONTE: O autor (2022).

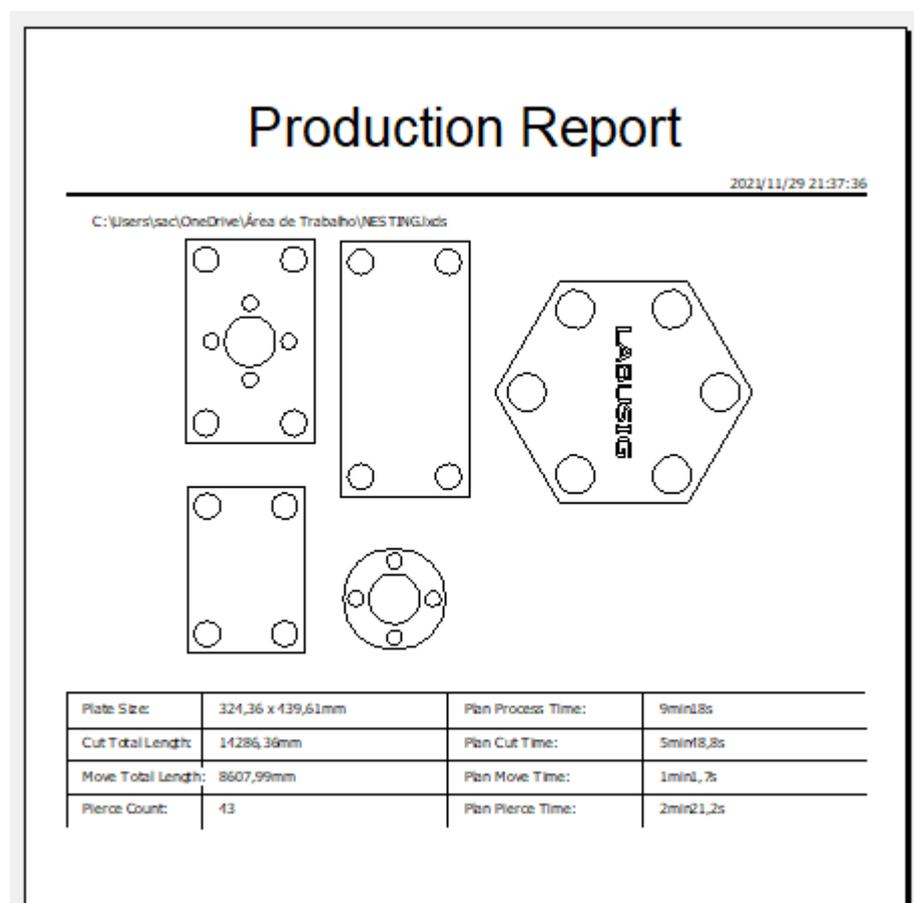
A quinta opção do menu, NEST, será apresentado com detalhes no subitem 11.2.3.7. Resumidamente será o posicionamento de peças para máximo aproveitamento da chapa;

IMPORT é a opção para importar o desenho de um software de terceiros;

REPORT cria relatórios de processo (TASK REPORT) ou relatórios de aproveitamento de chapa (NEST REPORT).

O TASK REPORT apresenta estatísticas como dimensões, comprimento de corte e tempos estimados. Vide representação na Figura 138.

Figura 138 - RELATÓRIO DA TAREFA DE CORTE (TASK REPORT).



FONTE: O autor (2022).

O USE REPORT é um relatório de utilização da máquina de corte e é gerado apenas na versão do software instalada na máquina de corte. Fornece dados estatísticos - como o tempo de acionamento do laser – num período (datas) e para um turno de trabalho (horário) selecionados previamente.

USER SETTING para configuração de parâmetros do usuário, nas abas OPTIMIZE (otimização) e DRAWING (desenho):

A guia OPTIMIZE promove uma otimização automática de arquivos importados de softwares de terceiros: deletar gráficos menores do que um valor determinado, remover linhas duplicadas, combinar linhas próximas, auto suavização, unidades do arquivo importado, auto explosão de montagens, conversão de texto em curvas, mapear para abrir um arquivo em várias camadas.

Configurações básicas da guia DRAWING são sobretudo hábitos do usuário ao desenhar no software: Mostrar coordenadas; colocar a origem no ponto de

referência; mostrar a régua; mostrar o caminho do corte; exibir grade; captura automática; precisão e cursor; cores e fontes.

O botão BACKUP cria um arquivo de recuperação da ferramenta de configuração de máquina, PLC (controlador lógico programável) e parâmetros globais.

O botão DIAGNOSTIC TOOL apresenta informações sobre a placa, calibração e controle dos gases, monitor do controle remoto e testes de corte (realizados na entrega da máquina).

### 11.2.2. Aba principal de configuração do processo de corte (HOME)

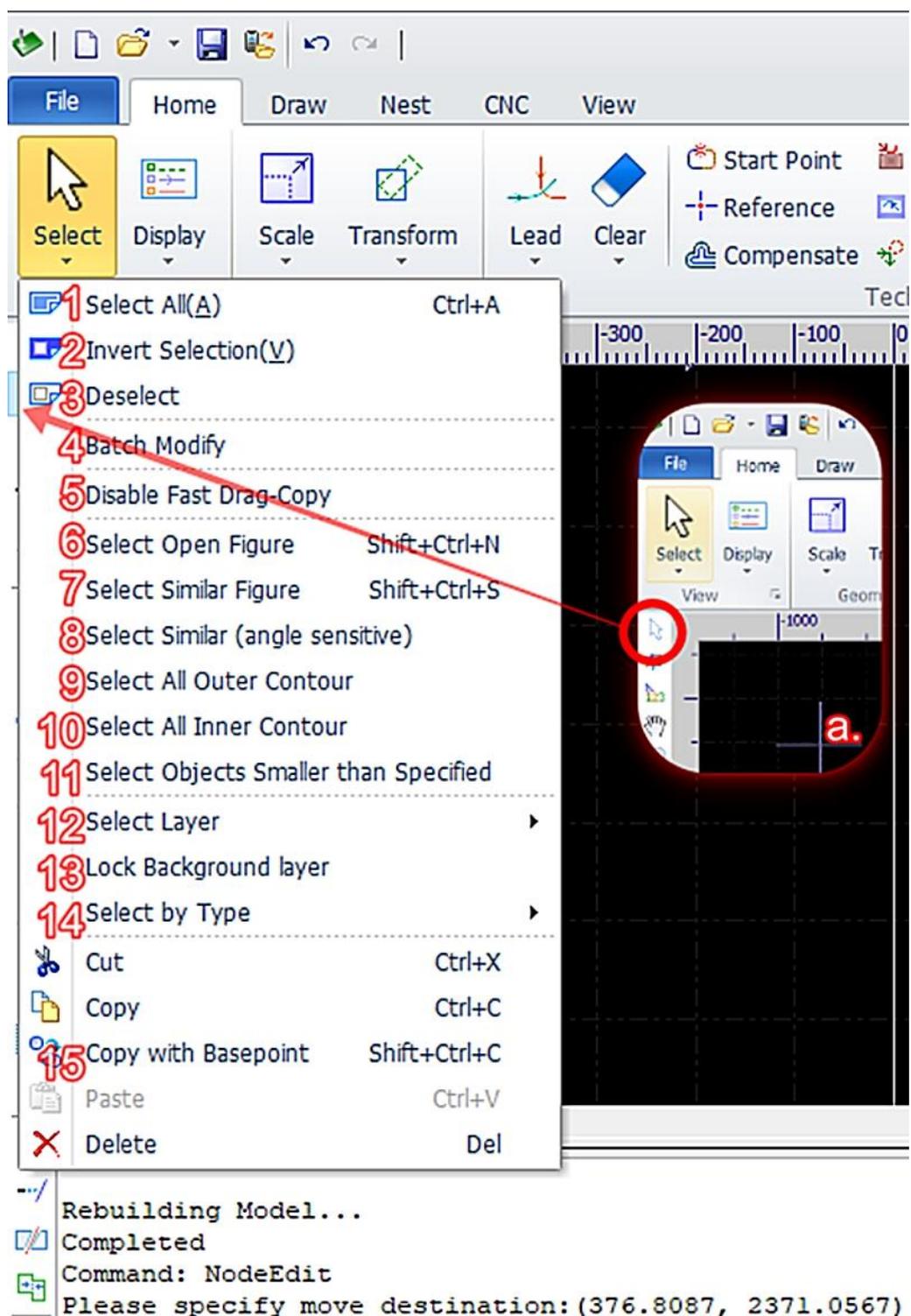
#### 11.2.2.1. Ferramentas de seleção (aba HOME, botão SELECT).

Funciona de maneira intuitiva como em diversos softwares. Ao clicar e arrastar o ponteiro de seleção da esquerda para a direita, somente gráficos inteiramente cobertos na área descrita são selecionados.

Caso clique e arraste da direita para a esquerda, todos os gráficos inteiramente ou parcialmente cobertos pela área descrita no clicar e arrastar serão selecionados.

Além da ferramenta tradicional de seleção (o ponteiro, no destaque 1 da Figura 133), há um menu suspenso (aba HOME, menu SELECT) com outras possíveis funções de seleção que facilitam o trabalho, como mostradas na Figura 139.

Figura 139 - FERRAMENTAS ESPECIAIS DE SELEÇÃO.



FONTE: O autor (2022).

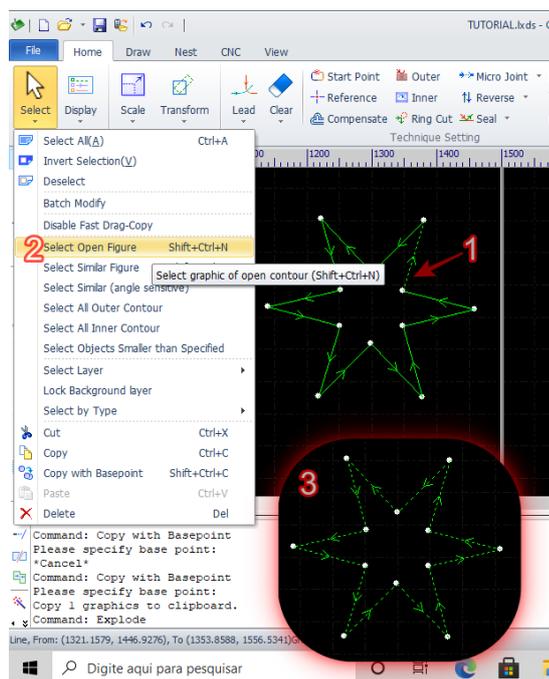
Na Figura 139, os itens numerados de 1 a 15 são explicados nas menções abaixo:

1 – Selecionar tudo, também pelo atalho Ctrl+a;

- 2 – Inverter os itens selecionados;
- 3 – Desmarcar itens;
- 4 – Modificar em lote - selecione uma forma e realize modificações, que serão então aplicadas a todas as formas semelhantes àquela;
- 5 – Desabilitar arrasta-cópia;
- 6 – Selecionar figura explodida (vide explicação no subitem 11.1.1.1.VII). Para exemplo, consulte a Figura 140;
- 7 – Selecionar formas similares, exemplo mostrado na Figura 141;
- 8 – Seleção de ângulos similares;
- 9 – Selecionar todo o contorno externo;
- 10 – Selecionar todo o contorno interno;
- 11 – Selecionar objetos menores que o marcado;
- 12 – Alterar Camada (LAYER) – Permite visualizar e fazer operações em um LAYER de operação específico, aplicável somente àquele LAYER, codificado em diferentes cores (vide explicação no item 11.5);
- 13 – Travar a camada (LAYER) de fundo. Figuras assinalada à camada de fundo (BACKGROUND LAYER), ao selecionar esta opção as figuras nesta camada não poderão sofrer nenhuma alteração, para evitar modificações acidentais;
- 14 – Selecionar por tipo: polilinhas, círculos, curvas bézier ou texto;
- 15 – Copiar com ponto base.

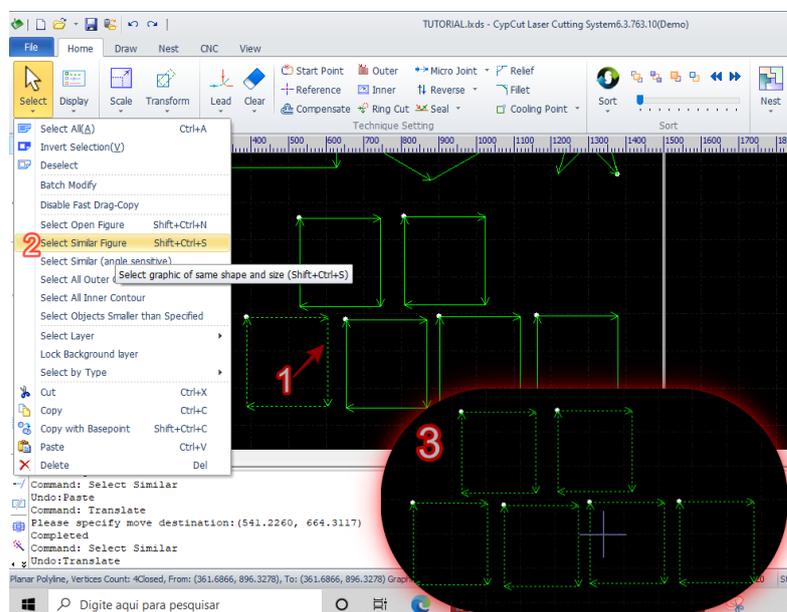
Após a seleção, pode-se agarrar e arrastar com o mouse ou aplicar comandos comuns e intuitivos, tais como recortar (Ctrl+x), copiar (Ctrl+c), duplicar (Shift+Ctrl+c) e apagar (Del).

Figura 140 – SELECIONAR UMA FIGURA ABERTA OU EXPLODIDA (SELECT OPEN FIGURE).



FONTE: O autor (2022).

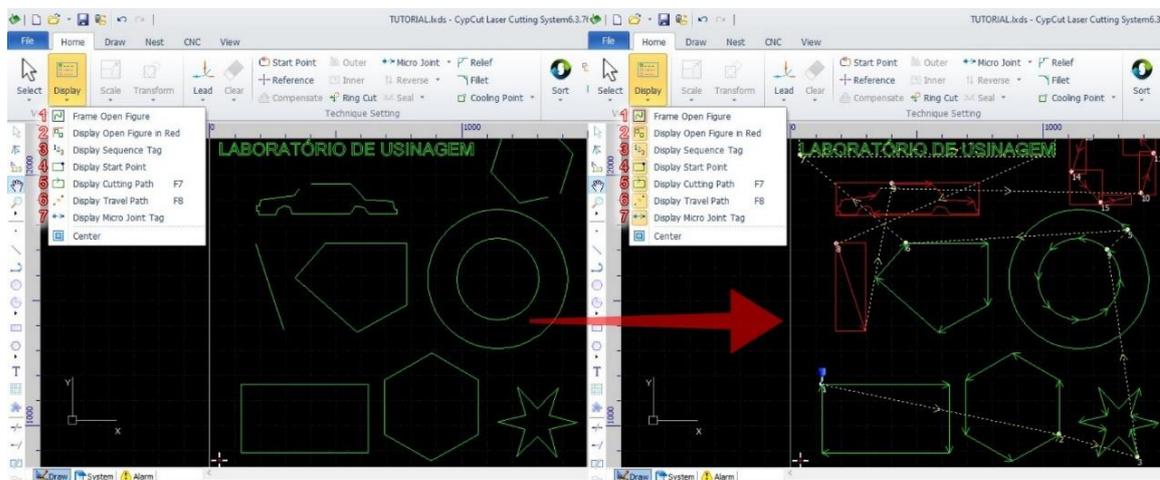
Figura 141 – SELECIONAR TODAS AS FIGURAS SEMELHANTES (SELECT SIMILAR FIGURE).



FONTE: O autor (2022).

### 11.2.2.2. Ferramentas e opções de visualização (aba HOME, menu DISPLAY).

Figura 142 - OPÇÕES AVANÇADAS DE VISUALIZAÇÃO E DESTAQUE A DETALHES DO GRÁFICO EM PROCESSO.



FONTE: O autor (2022).

Na Figura 142, os itens numerados de 1 a 7 são explicados nas menções abaixo:

1 – FRAME OPEN FIGURE: Envolve com um retângulo as figuras abertas, cujo corte resultante será incompleto. Serve para chamar atenção a figuras que precisam ser modificadas para seu completo corte, erro que pode ocorrer com gráficos importados de outros programas;

2 – DISPLAY OPEN FIGURE IN RED: Altera para vermelho a cor de figuras abertas, pelo mesmo motivo anterior;

3 – DISPLAY SEQUENCE TAG: Numera a sequência de corte de cada figura;

4 – DISPLAY START POINT: Mostra, por meio de um ponto branco por figura, o ponto de início de corte em cada uma delas;

5 – DISPLAY CUTTING PATH: Indica o sentido em que será feito o corte, por meio de setas;

6 – DISPLAY TRAVEL PATH: Mostra como será feita a movimentação descrita pela cabeça de corte, entre o ponto final de corte de uma figura e o ponto de início da próxima figura (4), conforme a sequência numérica indicada em (3);

7 – DISPLAY MICRO JOINT TAG: Indica a posição dos “micro joints”, micro junções, pontos que podem ser inseridos no desenho para que o corte ali seja incompleto, para evitar que a área dentro do corte caia da chapa. Estas micro junções podem ser inseridos manualmente, consulte subitem 11.2.2.9.

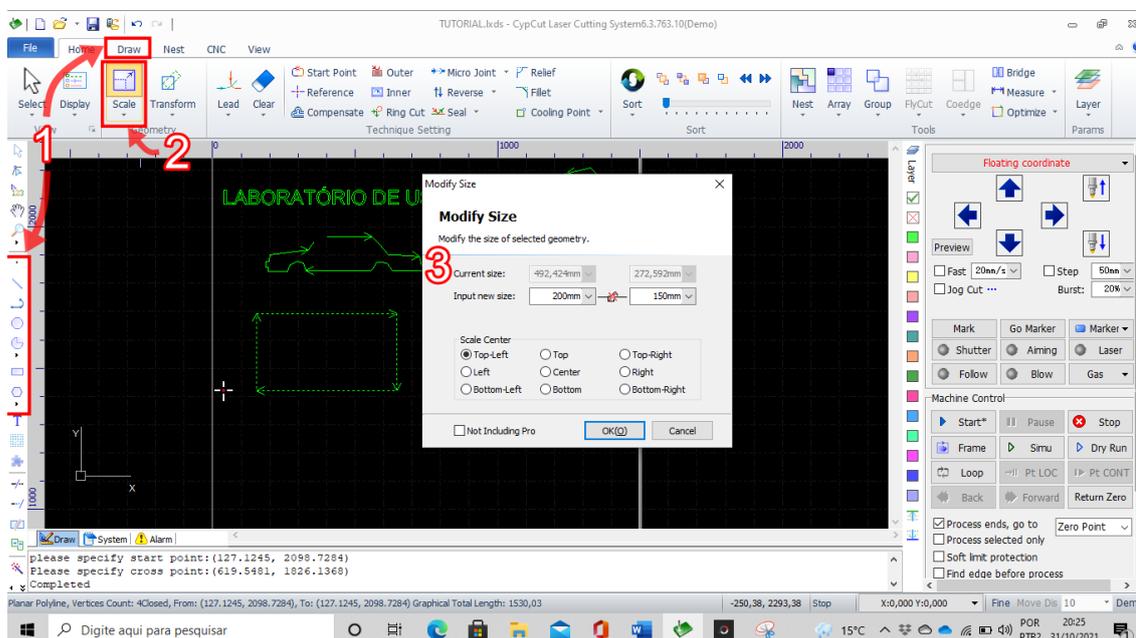
### 11.2.2.3. Ferramentas de redimensionamento (aba HOME, botão SCALE).

1 – Após adicionar um desenho pelos menus indicados no detalhe 1 da Figura 143, suas dimensões podem ser modificadas;

2 – Selecione o gráfico a se redimensionar e clique sobre o botão SCALE dentro da aba HOME (detalhe numerado 2 da Figura 143);

3 - Na janela que se abre serão mostradas as dimensões horizontais e verticais atuais (CURRENT SIZE), abaixo o campo para inserir a nova dimensão desejada (INPUT NEW SIZE), horizontal à esquerda e vertical à direita e, entre elas, a figura de um cadeado determina se o programa deve respeitar as proporções originais ou se as dimensões verticais e horizontais devem ser redimensionadas de forma independente. Abaixo, nos botões de seleção, deve-se determinar se o centro de escala deve ser o centro geométrico do desenho (CENTER) ou se o ponto de referência a manter fixo pode ser qualquer um dos outros oito pontos, como superior esquerdo (TOP-LEFT), inferior e centro horizontal (BOTTOM), margem direita e centro vertical (RIGHT) etc.

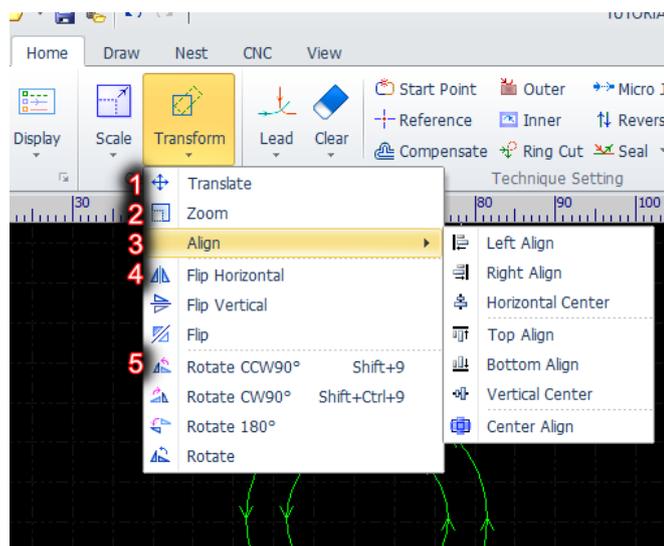
Figura 143 - Ferramenta De Redimensionamento (SCALE).



FONTE: O autor (2022).

### 11.2.2.4. Ferramentas de transformações (aba HOME, botão TRANSFORM).

Figura 144 - FERRAMENTAS DE TRANSFORMAÇÕES E ROTAÇÃO.



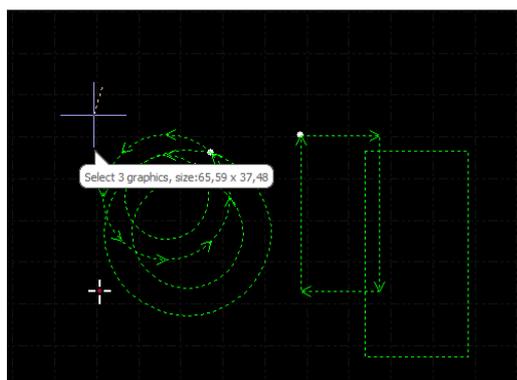
FONTE: O autor (2022).

Na Figura 144, os itens numerados de 1 a 5 são explicados nas menções abaixo:

1 – TRANSLATE – Traslada o gráfico selecionado

2 – ZOOM – aumenta ou diminui gráficos selecionados mantendo escala de dimensões e distâncias entre si, conforme exemplo da Figura 145.

Figura 145 - MUDANÇA DE ESCALA MANUAL (BOTÃO ZOOM NO MENU TRANSFORM).



FONTE: O autor (2022).

3 – ALIGN – Selecione duas ou mais gráficos para alinhá-los, primeiramente, na HORIZONTAL: esquerda (LEFT ALIGN), direita (RIGHT ALIGN) ou no centro da horizontal (HORIZONTAL CENTER). As outras três opções são do alinhamento VERTICAL: superior (TOP ALIGN), inferior

(BOTTOM ALIGN) ou ao centro vertical (VERTICAL CENTER). O último botão é o alinhamento central vertical e horizontal simultâneo (CENTER ALIGN), semelhante ao botão de atalho no canto esquerdo da tela, mostrado em.

4 – FLIP – vira as figuras em um eixo vertical Y e horizontal X, mostrados no plano do desenho;

5 – ROTATE – rotaciona as figuras em um eixo Z, normal ao plano de desenho.

#### 11.2.2.5. Linha de prolongamento para entrada e saída da curva de corte (aba HOME, botão LEAD LINE).

Como a região de início do corte resulta numa pior qualidade de aresta – estrias maiores e escória aderida - devido ao processo necessário de perfuração inicial (PIERCE), geralmente deseja-se iniciar o corte em um ponto ligeiramente afastado da borda de corte definitiva, a partir da área da superfície que será desprezada no aproveitamento da chapa. Habitualmente inicia-se o corte

Figura 146 - JANELA DE CONFIGURAÇÃO LEAD LINE.

Lead Line Setting

**Lead Line**  
Lead line settings.

Lead In

1 Type: Line + Arc Length: 5mm  
Angle: None Radius: 1mm  
2  Add small hole Hole Radius: 0,5mm  
Line  
Arc  
Line + Arc

Lead Out

Type: None Length: 4mm  
Angle: 30° Radius: 1mm  
3  Lead out laser off

Lead Position

4  Lead Position  
 Introduce from part tip  
 Introduce from long edge  
 Set by universal (0~1) param 0,00  
 Change leads type, remain position

Options

Closed figure only  
 Outer contour only  Inner contour only  
 Check Lead

OK(O) Cancel

FONTE: O autor (2022).

Na Figura 146, os itens numerados de 1 a 4 são explicados nas menções abaixo:

1 – TYPE, escolhe-se entre linha, arco ou linha e arco. LENGTH, o comprimento desta linha ou curva de início de corte. ANGLE é o ângulo entre a linha LEAD LINE e a linha de corte e RADIUS o raio de curva prescrita entre a LEAD LINE e a linha de corte (a linha das arestas da peça).

Observe que este ângulo e raio só serão respeitados caso opte-se por interceptar a LEAD LINE no meio de uma linha de corte (opção INTRODUCE FROM LONG EDGE no menu LEAD POSITION, detalhe 4 na Figura 146).

2 – Selecionando esta opção, inicia-se o corte fazendo um círculo até a perfuração, então prosseguindo com a linha LEAD até a região efetiva de corte. Esta opção ADD SMALL HOLE AT LEAD LINE é especialmente recomendado em caso de aço inoxidável mais espesso.

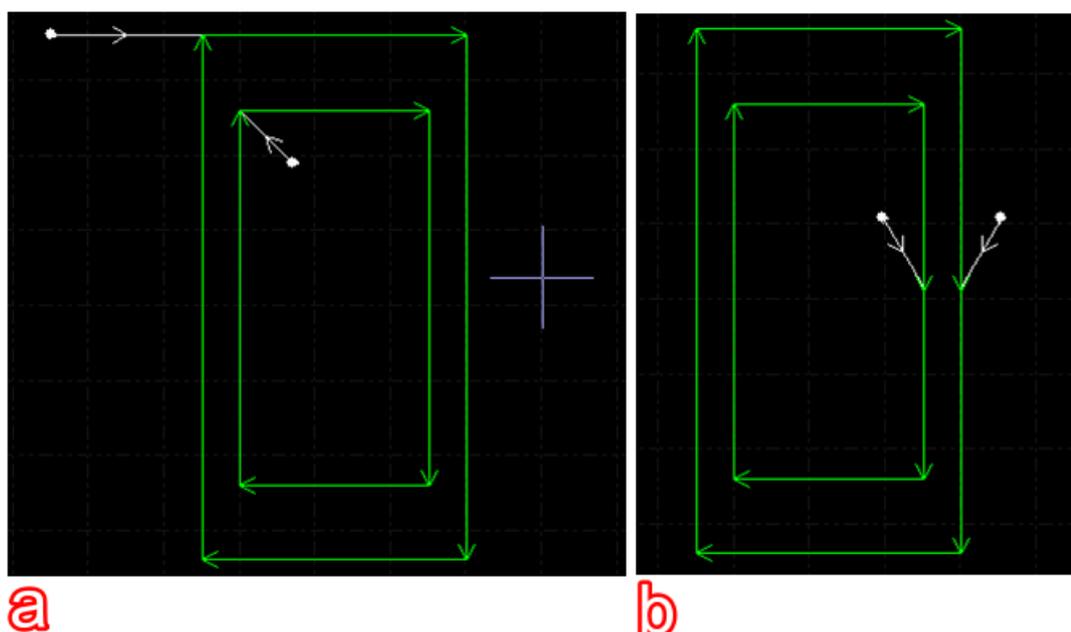
3 – Marcando esta caixa, o laser segue novamente a LEAD LINE ao final do corte, distanciando-se da área de interesse de corte e volta ao início da LEAD LINE. É especialmente interessante essa opção pois, exatamente na região de fim de corte normal, quando as peças terminam seu corte, as peças tendem a dobrar na região da última junção ao cair da chapa, podendo ser danificada por um raio incidente, mesmo durante o tempo extremamente curto necessário para interrupção da incidência do laser. Nestes casos, se esta caixa estiver marcada, o cabeçote estará rapidamente se afastando da peça neste tempo de interrupção do feixe, evitando qualquer dano, por menor que seja. Nos casos em que o corte é incompleto, isto é, quando opta-se por deixar uma micro junção para que a peça não se destaque da chapa e instruído para que o corte comece e termine em uma das micro junções (consulte subitem 11.2.2.9), nestes casos a linha de início e de final (LEAD IN e LEAD OUT) serão diferentes.

4 – LEAD POSITION – pode-se iniciar o corte em um dos vértices (INTRODUCE FROM PART TIP) ou pelo meio de sua reta ou curva mais longa (INTRODUCE FROM LONG EDGE).

Caso opte-se aqui por introduzir o LEAD LINE pelo vértice (INTRODUCE FROM PART TIP), ele entrará sempre paralelo à uma das linhas do vértice caso a peça resultante esteja na área interna ou em um ângulo de 45 graus se a peça resultante seja externa ao corte (Figura 147.a).

Caso opte-se por introduzir o LEAD LINE pelo meio de sua reta ou curva mais longa (INTRODUCE FORM LONG EDGE), então o posicionamento do LEAD LINE respeitará o ângulo e raio definido anteriormente em LEAD IN ou LEAD OUT (Figura 147.b).

Figura 147 - POSIÇÃO DE LEAD LINE.



FONTE: O autor (2022).

Cada vez que esta janela de LEAD LINE é confirmada e fechada no botão OK, o software CAM CypCut faz automaticamente uma verificação de que a LEAD LINE recém configurada não irá interceptar outra linha de corte ativa da própria figura ou das suas vizinhas, mostrando a notificação LEAD IN CHECK PASSED se estiver tudo dentro do previsto.

Caso haja um erro em que a LEAD LINE intercepte uma linha de corte, esta mensagem será mostrada. Na atual versão do software esta janela permanece em mandarim, podendo ser corrigida em versões futuras. Mas marcando a caixa de seleção superior você *autoriza a modificação* da posição do LEAD LINE (detalhe 1 da Figura 148). Se marcar a caixa de seleção inferior, você autoriza a *alterar o comprimento* da LEAD LINE (detalhe 2 da Figura 148). Se marcar uma opção ou ambas e confirmar com o botão de confirmação (da esquerda, no detalhe 3 da Figura 148) o CypCut tentará reposicionar e redimensionar para evitar a interseção. Se tiver sucesso, mostra a mensagem (detalhe 4 da Figura 148). De todos os modos, caso a correção automática não resolva ou não seja satisfatória, é possível selecionar um ou mais LEAD LINES em conflito e aplicar modificações individuais que afetarão apenas as selecionadas.

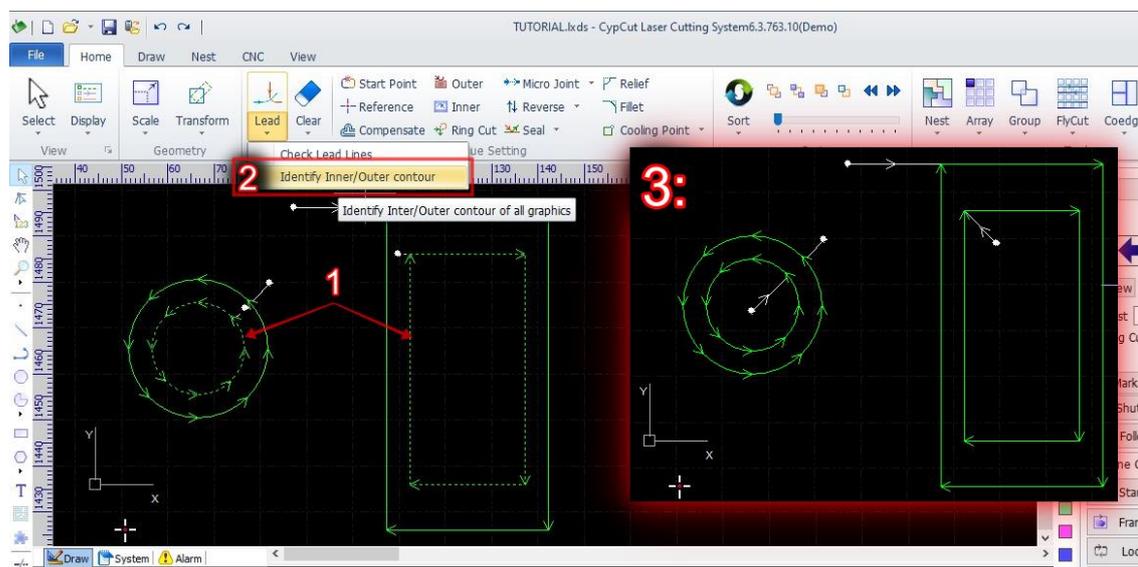
Figura 148 - CORREÇÃO AUTOMÁTICA DE LEAD LINE, POSIÇÃO E COMPRIMENTO.



FONTE: O autor (2022).

Esta verificação não garante que a peça a ser aproveitada esteja corretamente distinguida no desenho entre o que é contorno e o que é recorte interno. Neste caso, por exemplo, as peças de interesse são obviamente as molduras resultantes na área resultante entre os dois retângulos e na área resultante entre os dois círculos. Ao manter a posição de LEAD LINE como estão na Figura 148, as peças seriam danificadas.

Figura 149 - CORREÇÃO DE LEAD LINE.



FONTE: O autor (2022).

Para corrigir, basta selecionar os trechos de corte cujo início está incorreto, conforme destaque 1 da Figura 149. Para selecionar mais de um, basta manter pressionado Shift.

Em seguida, na aba HOME, clique na área abaixo do botão LEAD e selecione IDENTIFY INNER/OUTER CONTOUR. No perímetro de corte selecionado o software inverterá sua percepção do que é externo e interno à peça resultante, assim inverterá a posição de LEAD LINE, que obviamente deve partir do externo da peça.

Para alterar o tipo de LEAD LINE sem alterar a posição atual destas, marque a opção CHANGE LEADS TYPE, REMAIN POSITION.

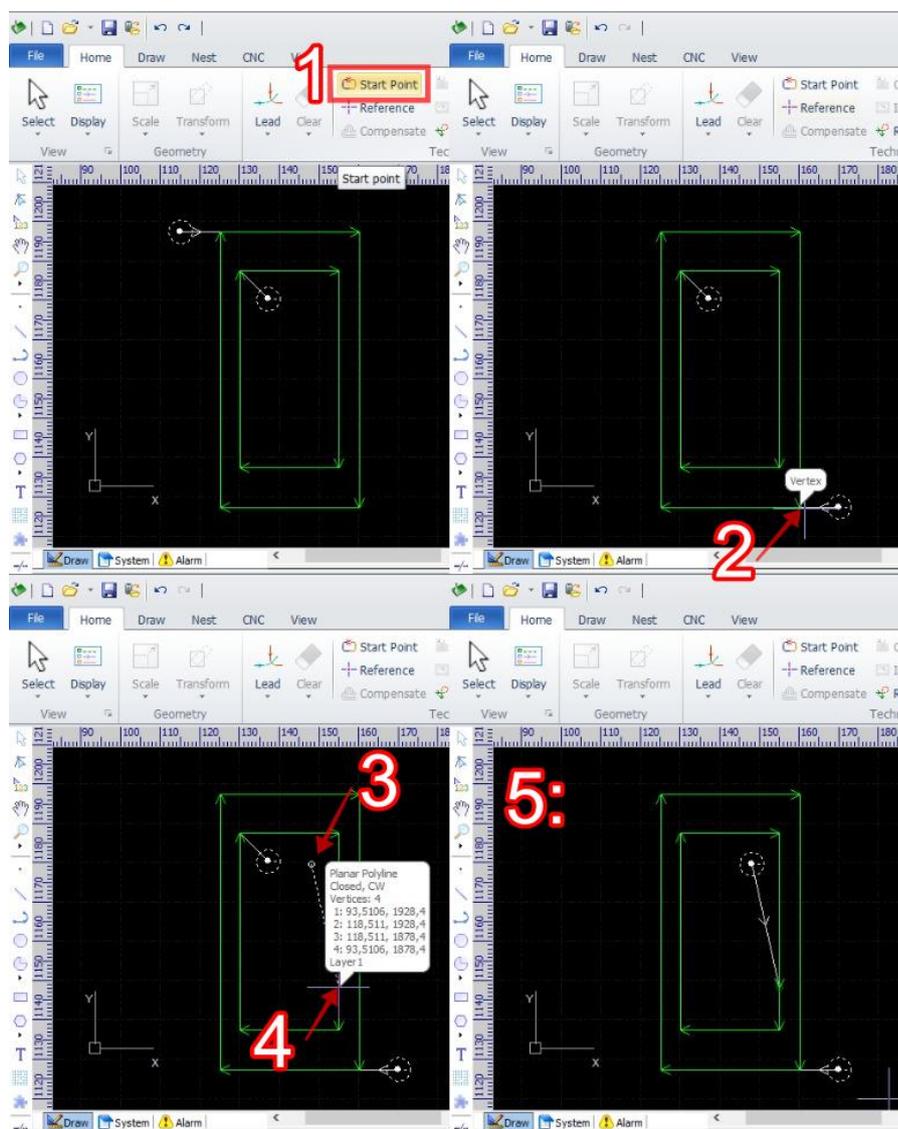
#### *11.2.2.6. Ponto de perfuração para início de corte (aba HOME, botão START POINT).*

Podemos usar este botão para determinar manualmente o ponto de início de corte (com as configurações de LEAD LINE vigentes ou até mesmo definir a trajetória do LEAD LINE, comprimento e ângulos, diretamente).

Para posicionar onde será o início de corte no contorno da peça, clique no botão START POINT (detalhe 1 na Figura 150) e clique diretamente no ponto desejado em cima da trajetória de corte que define uma aresta a ser cortada (detalhe 2 na Figura 150, clicando diretamente no vértice).

Caso queira posicionar tanto a posição de início do LEAD LINE quanto o ponto de conexão desta com a linha que define uma aresta de corte, clique em START POINT, clique num ponto fora da peça onde deseja iniciar o LEAD LINE (detalhe 3 na Figura 150) e por último clique sobre a linha, no ponto em que o LEAD LINE deve intersecionar e iniciar o corte da aresta da peça (detalhe 4 na Figura 150). O resultado está no quadrante inferior esquerdo da Figura 150, detalhe 5. Perceba que no contorno mudamos apenas o vértice de entrada, enquanto no recorte interno mudamos manualmente de vértice para o meio da aresta, definindo um comprimento e um ângulo com dois cliques.

Figura 150 - FUNÇÃO START POINT.



FONTE: O autor (2022).

#### 11.2.2.7. Compensação dimensional de largura da frente de corte (aba HOME, botão COMPENSATE).

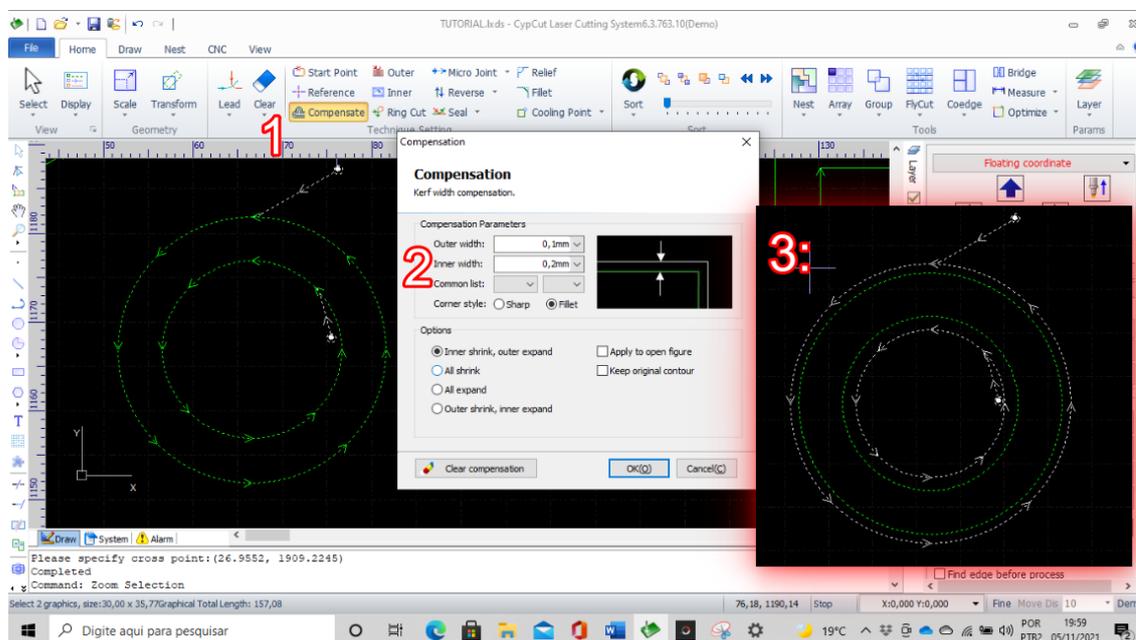
Como o corte a laser produz uma abertura com largura característica (geralmente referido como *kerf*, seu termo em idioma inglês) indispensável para que o fluxo de gás auxiliar penetre e ejetar o metal fundido, também porque esta largura do *kerf* pode variar conforme a posição do foco, espessura e tipo de metal, dentre outros fatores, será necessário compensar esta largura. Caso contrário as dimensões da peça resultante serão diferentes do projeto: contornos resultarão mais estreitos e os recortes internos, mais largos.

Conhecendo a largura do *kerf* e compensando-o ao realizar o corte, o software buscará coincidir a extremidade da abertura do corte com a linha que representa a

aresta da peça. Além de informar a largura de *kerf* – o que pode ser determinado através de um corte teste na chapa de trabalho – será necessário determinar nos gráficos que representam um caminho de corte o que é o lado interno e o lado externo da peça, para que a largura de *kerf* e a remoção do material seja feita exclusivamente no lado externo.

O processo é intuitivo. Basta selecionar as bordas, clicar no botão COMPENSATE na aba HOME (detalhe 1 na Figura 151), na janela que se abre (detalhe 2 na Figura 151) determina-se o *offset* para contornos externos (OUTER WIDTH) e, de maneira independente, o afastamento em bordas internas (INNER WIDTH). Atenção ao fato de que as medidas informadas ali devem corresponder à METADE DA ABERTURA DE KERF, já que é a distância entre o ponto focal do laser – que estará sempre no meio do *kerf* – e a aresta a ser produzida. Por isso informa-se a metade da largura do *kerf*. Por padrão a lógica é, em OPTIONS, selecionar para encolher nos recortes internos e expandir nos contornos (INNER SHRINK, OUTER EXPAND), mas se por qualquer motivo seja conveniente, é possível fazer regras diferentes em OPTIONS. O resultado, neste caso com afastamentos diferentes na parte interna e externa para fins demonstrativos, pode ser observado no detalhe 3 na Figura 151.

Figura 151 - COMPENSAÇÃO DIMENSIONAL DE LARGURA DA FRENTE DE CORTE (COMPENSATE).



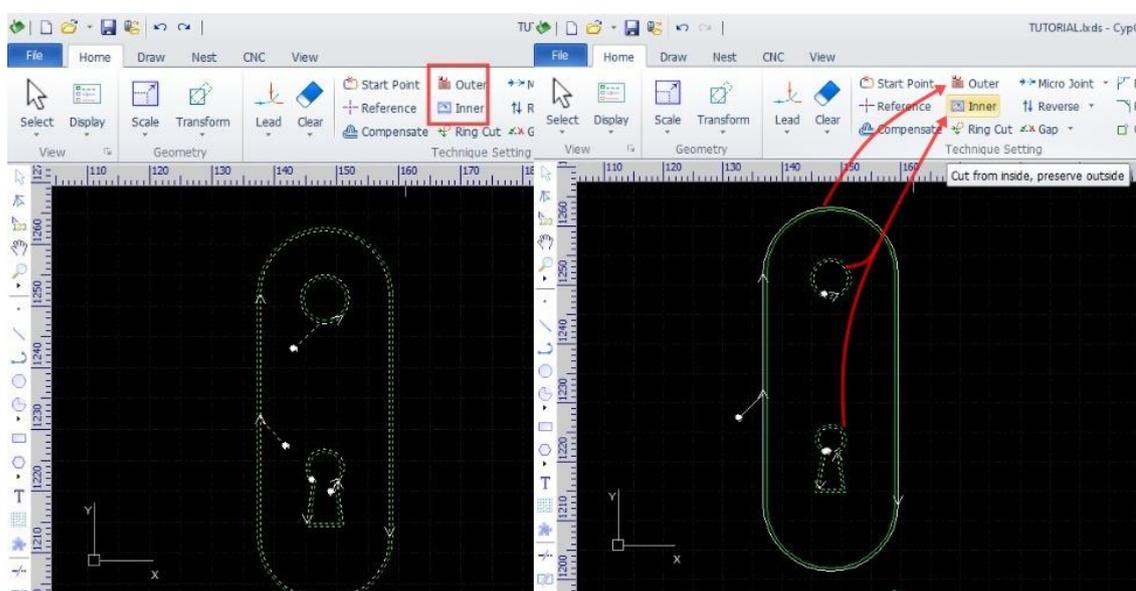
FONTE: O autor (2022).

#### 11.2.2.8. Correção de interpretação de contornos (aba HOME, botão OUTER) e recortes (aba HOME, botão INNER).

Na figura abaixo, uma moldura de fechadura, o software interpretou de forma a peça e seus recortes. Para alterar, basta selecionar as figuras que representam os caminhos de corte dos recortes internos e, no menu HOME, clicar sobre o botão INNER. Em seguida, selecionar o contorno e clicar em OUTER, conforme Figura 152.

Observe que a LEAD POSITION não é corrigido automaticamente por este recurso, apenas o *offset* de compensação de largura de *kerf*. Para corrigir a posição da LEAD LINE, na aba HOME, clique na área abaixo do botão LEAD e selecione IDENTIFY INNER/OUTER CONTOUR.

Figura 152 - CORREÇÃO DE INTERPRETAÇÃO DE CONTOURNO EXTERNO (OUTER) E RECORTES INTERNOS (INNER).



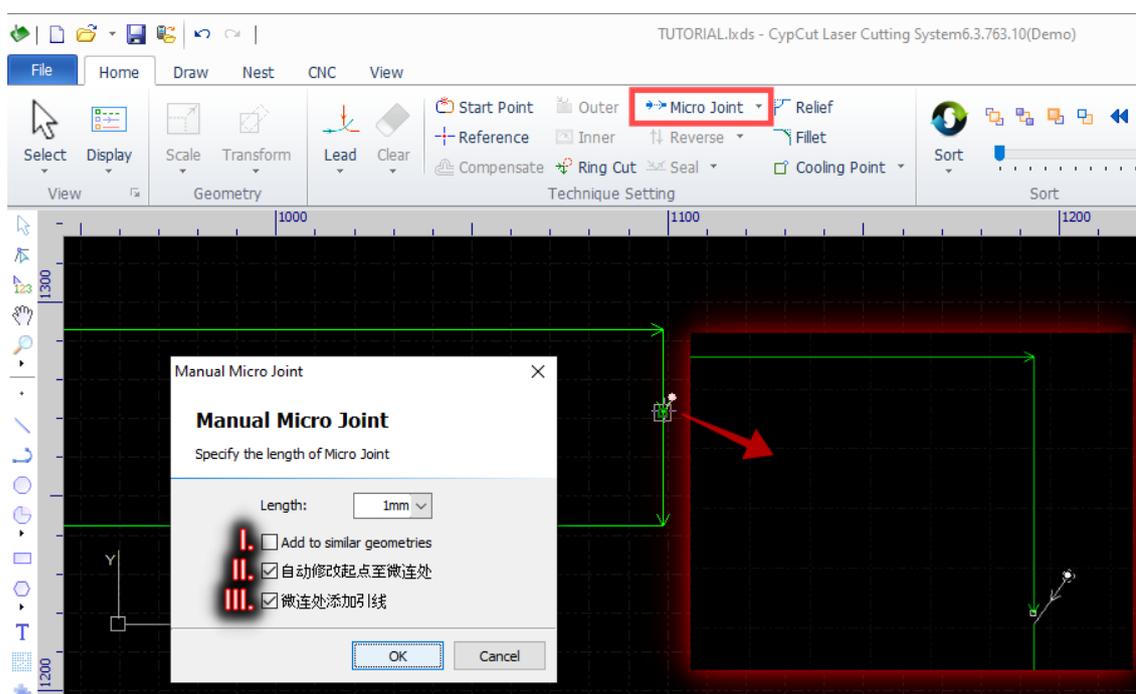
FONTE: O autor (2022).

#### 11.2.2.9. Inserção de micro junções para evitar deformação térmica no corte de peças esbeltas (aba HOME, botão MICRO JOINT).

Ao recortar peças compridas e esguias em chapas mais esbeltas, é comum que elas entorçam ao centro pelo efeito térmico do corte. Isso causa que a cabeça de corte precise subir repentinamente, mudando o ponto focal e prejudicando a qualidade de corte. Isso pode ser revolido adicionando micro junções às duas extremidades.

Para adicionar manualmente micro junções, basta clicar no botão MICRO JOINT no menu HOME, clicar na posição do corte em que se deseja adicionar e uma janela de configuração se abrirá, conforme Figura 153.

Figura 153 - INSERÇÃO MANUAL DE MICRO JUNÇÕES.



FONTE: O autor (2022).

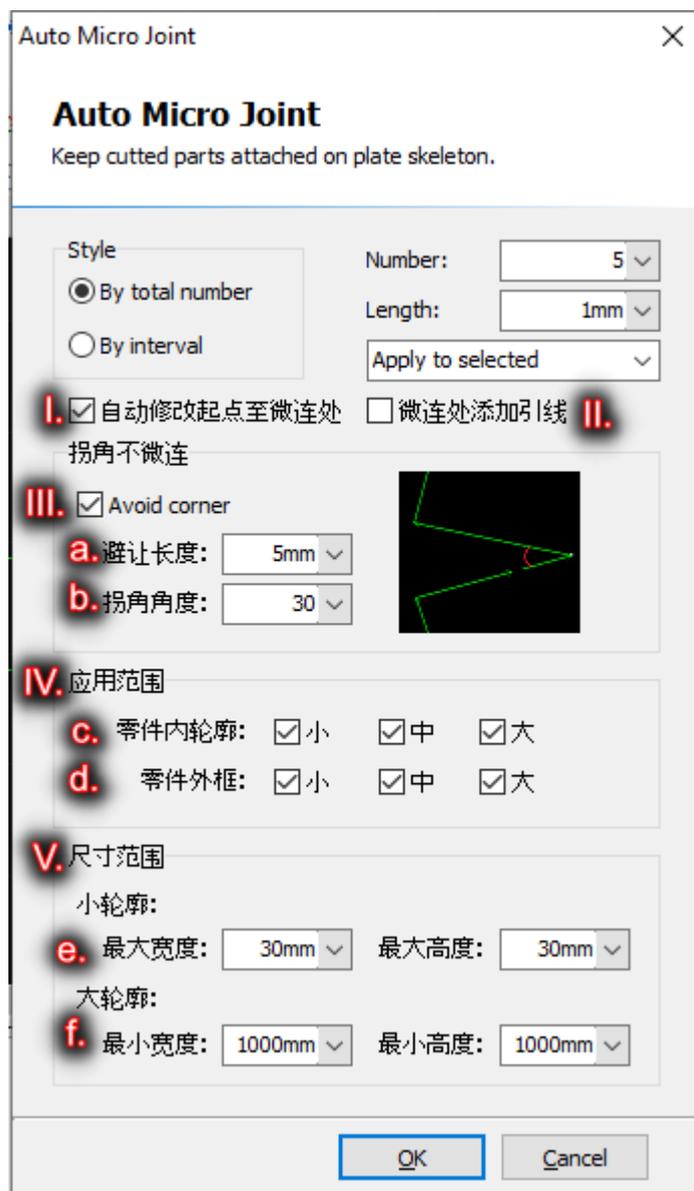
As opções mostradas na janela e destacadas na Figura 153, além da espessura da micro junção, são:

- (I) Adicionar a geometrias semelhantes;
- (II) Modificar o ponto de início do corte para coincidir com a micro junção;
- (III) Adicionar LEAD LINE à micro junção.

Para excluir uma micro junção, basta clicar no botão MICRO JOINT, segurar pressionado o botão “Shift” e clicar sobre a micro junção a excluir.

A janela de inserção automática de micro junções é mostrada na Figura 154.

Figura 154 - INSERÇÃO AUTOMÁTICA DE AUTO JUNÇÕES.



FONTE: O autor (2022).

Inserção por um número absoluto ou por intervalo; o comprimento da união na auto junção e se será aplicado somente aos cortes selecionados ou a todos os gráficos.

Na Figura 154, os itens numerados de I a V são explicados nas menções abaixo:

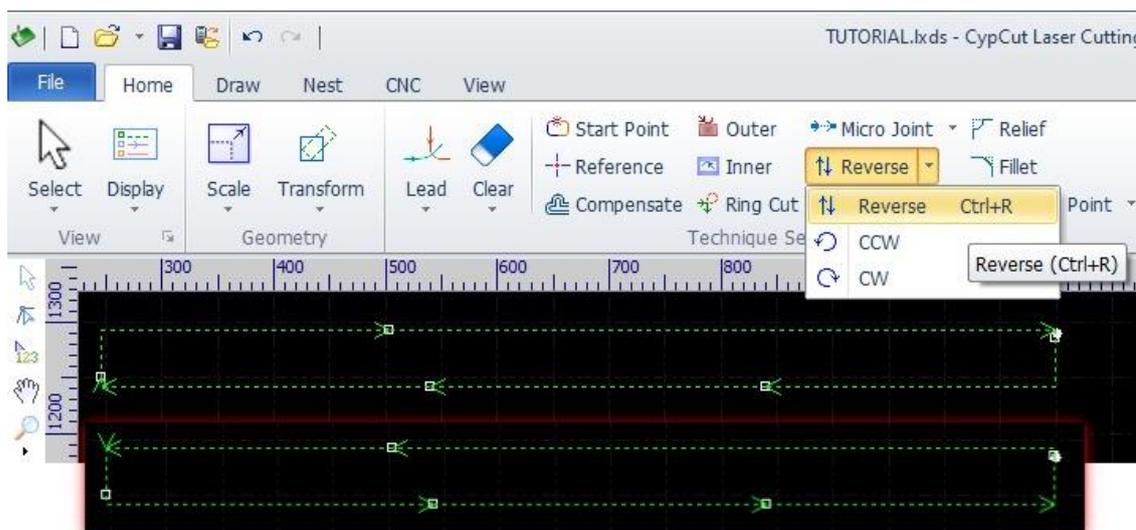
- I. Voltar para modificar automaticamente o ponto de partida para a micro junção
- II. Adicionar LEAD LINES às micro junções
- III. Evitar cantos

- a. Distância mínima até os cantos
- b. Ângulo de canto
- IV. Âmbito de aplicação
  - c. Contornos (pequenos, médios, grandes)
  - d. Recortes internos (pequenos, médios, grandes)
- V. Faixa de tamanho
  - e. Contornos pequenos (largura máxima e altura máxima)
  - f. Grandes esboços (largura mínima e altura mínima)

#### 11.2.2.10. Inverter sentido de corte (aba HOME, botão REVERSE).

Inverte o sentido atual ou define especificamente como anti-horário ou horário. Sua utilidade é mostrada na Figura 155.

Figura 155 – INVERSÃO DO SENTIDO DE CORTE, HORÁRIO OU ANTI-HORÁRIO.

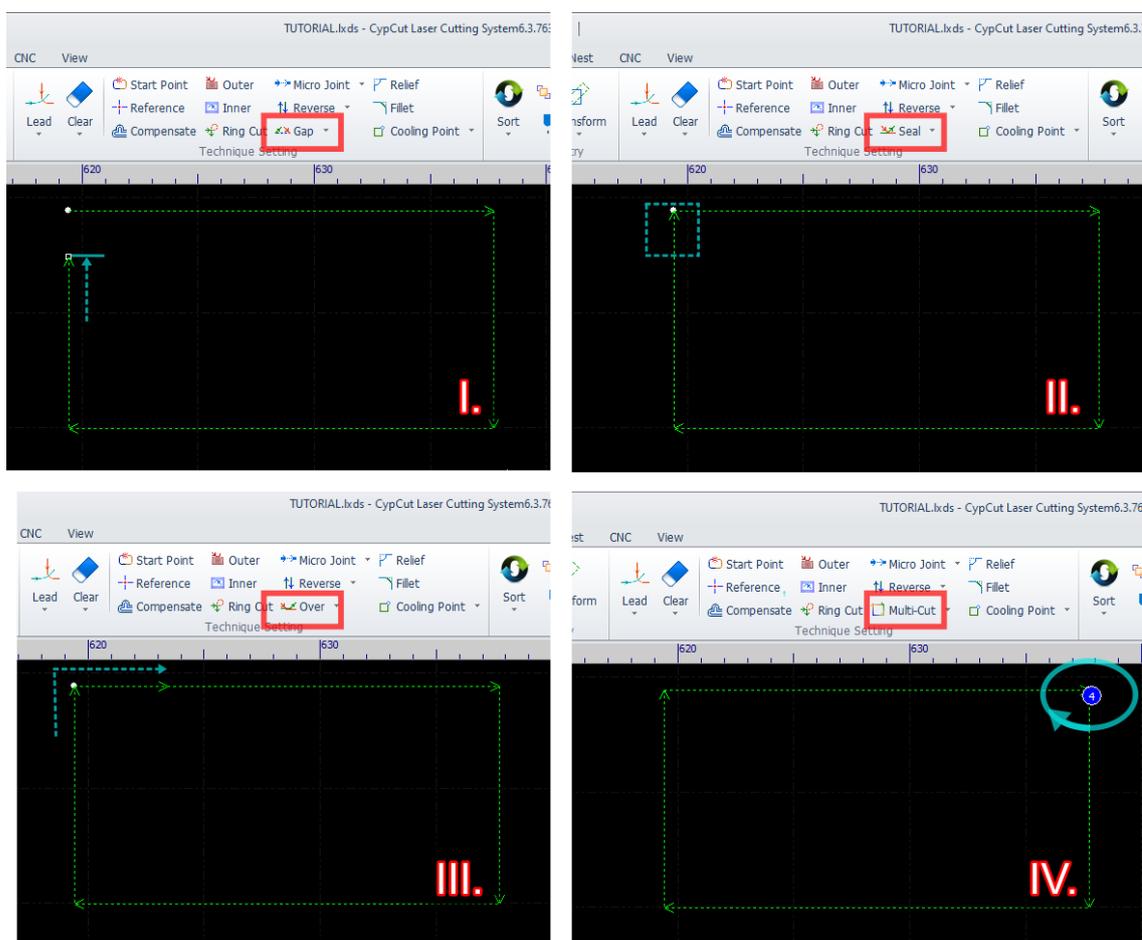


FONTE: O autor (2022).

#### 11.2.2.11. Funções para abrir um vão (GAP), fechar um vão (SEAL), sobrecorte (OVER) e multicorte (MULTI).

O botão mostrado em destaque na Figura 156 permite deixar vãos numa curva de corte, uma espécie de junta que evita que a peça se desprenda da chapa. Permite também fechar novamente a curva eliminando o vão, definir uma distância de sobrecorte ou produzir marcação em diversos passes, para uma marcação aprofundada.

Figura 156 - FUNÇÕES GAP, SEAL, OVER E MULTI.



FONTE: O autor (2022).

Vãos (aba HOME, botão GAP, no detalhe I da Figura 156) – Interrompe o corte antes de completar a curva de corte, pela distância especificada, algo semelhante a micro junção.

Fechar vãos (aba HOME, botão SEAL, no detalhe II da Figura 156) - Reverte a função GAP, fechando o corte completamente.

Definir sobrecorte (aba HOME, botão OVER CUT no detalhe III da Figura 156) – Passa o ponto de finalização do corte, continuam a realizar o corte pela distância especificada.

Marcação em múltiplos passes (aba HOME, botão MULTI CUT, no detalhe IV da Figura 156) – Repete o caminho de corte completo pelo número de vezes especificado – múltiplos passes - o que geralmente é feito em processos de marcação a laser para aumentar sua profundidade.

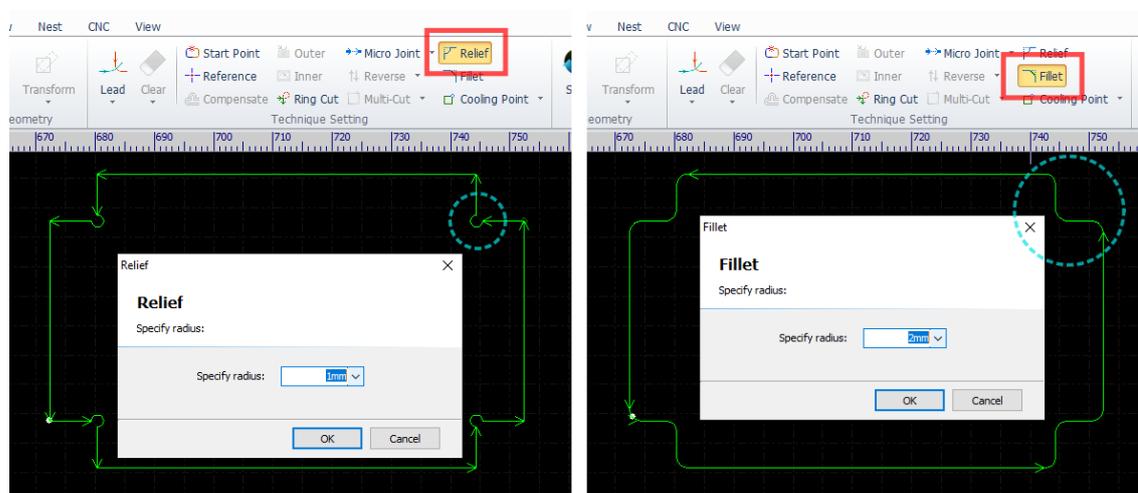
11.2.2.12. Ferramenta para inserção de alívio (aba HOME, botão RELIEF). e filete (aba HOME, botão FILLET).

Alívios (aba HOME, botão RELIEF) são artifícios principalmente aplicados a cantos que serão sujeitos a dobra posterior. Vide exemplo da metade esquerda da Figura 157.

Filetes (aba HOME, botão FILLET) são os arredondamentos de cantos vivos, internos ou externos.

Para ambos, basta clicar no botão correspondente, selecionar o raio e clicar em cada canto em que deseja aplicar alívios ou filetes. Filetes estão destacados na Figura 157, à direita.

Figura 157 - APLICAR ALÍVIOS E FILETES.



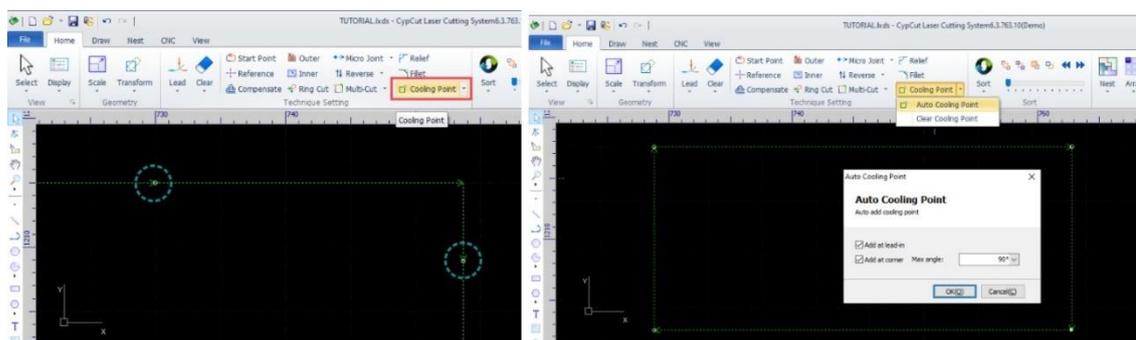
FONTE: O autor (2022).

### 11.2.2.13. Pontos de resfriamento (aba HOME, botão COOLING POINT).

Ao se adicionar pontos de resfriamento ao gráfico que representa um corte, quando a máquina chegar a estes pontos irá interromper momentaneamente a incidência do laser e apenas soprar gás de assistência, justamente para diminuir a temperatura e algum efeito térmico indesejável. Pode ser feito manualmente, basta clicar no botão em COOLING POINT e depois em pontos sobre a linha de corte. Para excluir algum ponto de resfriamento, basta clicar em COOLING POINT e, segurando o botão “Shift” no teclado, clicar sobre o ponto a excluir.

O AUTO COOLING POINT, aberto pelo menu lateral do botão COOLING POINT na aba HOME, permite adicionar estes pontos de dissipação de calor à região do LEAD-IN e aos cantos, de forma automática.

FIGURA 158 - PONTOS DE RESFRIAMENTO.



FONTE: O autor (2022).

#### 11.2.2.14. Corte de cantos afilados com a descrição de laço pelo cabeçote (menu HOME, botão RING CUT).

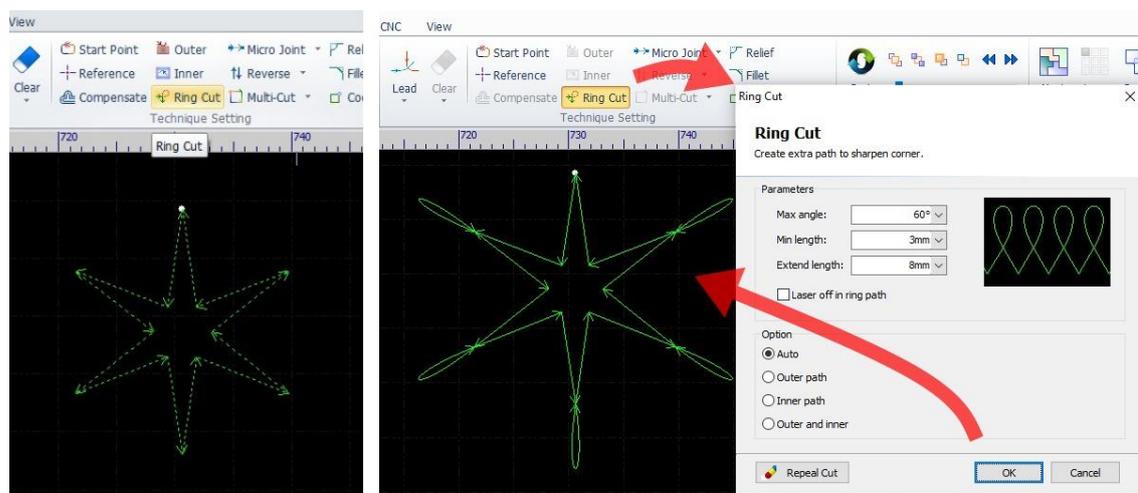
Ao recortar um canto agudo, afilado, a descrição de um laço pela cabeça de corte produz uma borda mais afilada do que o que se obteria pelo método convencional, em que um adoçamento deste canto tenderia a ocorrer.

As configurações da janela que se abre ao clicar em RING CUT são bem intuitivas: o ângulo máximo que se deseja utilizar o caminho de corte “anelar” (cortes em ângulos bem abertos dispensam a função dessa ferramenta), o mínimo comprimento e a máxima extensão nas três primeiras caixas de seleção da janela, como mostrado na Figura 159.

O *checkbox* logo abaixo é para escolher que o feixe laser deve ficar desligado quando descrevendo a região anelar. O padrão desmarcado seria que ele estivesse ligado e cortando a todo tempo.

Nos botões de seleção na posição inferior da janela do RING CUT, identificada como OPTION, pode-se optar para que a utilização da ferramenta de recorte anelar seja aplicado automaticamente ou definir manualmente a aplicar-se somente em contornos externos, somente em recortes internos ou em ambos. A janela de configuração do RING CUT está ilustrada na Figura 159.

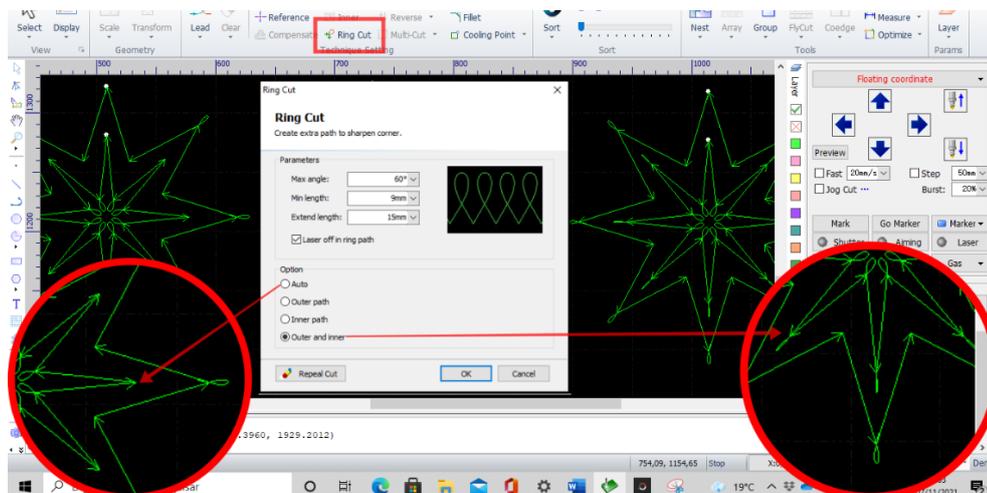
Figura 159 - FERRAMENTA PARA PRODUZIR CANTOS AFILADOS.



FONTE: O autor (2022).

Na Figura 160, o octograma será resultante do recorte de contorno externo (corretamente especificado ao software como contorno ao selecionar esta curva de corte e clicar em “OUTER”) e por um recorte interno de outro octograma, de ângulos ainda menores (sua condição de recorte interno é corretamente especificado ao software ao selecioná-lo e clicar em “INNER”). Como os ângulos medidos internamente na peça são menores do que 60 graus prescritos em MAX ANGLE, ao selecionarmos OPTION > AUTO o software vai realizar o percurso anelar somente na região externa à peça, caso retratado à esquerda da Figura 160. Se optarmos por OUTER AND INNER, o software vai descrever o percurso anelar em qualquer ângulo menor ou igual ao prescrito, mesmo que para dentro da peça. Cabe lembrar, entretanto, que como existe o *checkbox* para desligar o feixe enquanto descreve o percurso anelar, mesmo no último caso OUTER AND INNER o percurso pode ser descrito sem danificar a peça.

Figura 160 - OPÇÕES DE APLICAÇÃO DA FERRAMENTA RING CUT PARA PRODUIZIR VÉRTICES AFILADOS.



FONTE: O autor (2022).

#### 11.2.2.15. Posicionamento do ponto de referência da peça (aba HOME, botão REFERENCE).

Antes de iniciar um corte, devemos ligar o ponteiro de laser vermelho através do botão SHUTTER no controle remoto da máquina de corte a laser (detalhe I da Figura 161), utilizar as setas direcionais (detalhe II da Figura 161) para apontar para um ponto na chapa que irá corresponder ao ponto zero do corte que iremos iniciar. Para verificarmos que a área que será realizado o corte está corretamente posicionada, pressiona-se então o FRAME (detalhe III da Figura 161) que irá descrever na chapa a região que emoldura a área de corte dos gráficos na tela.

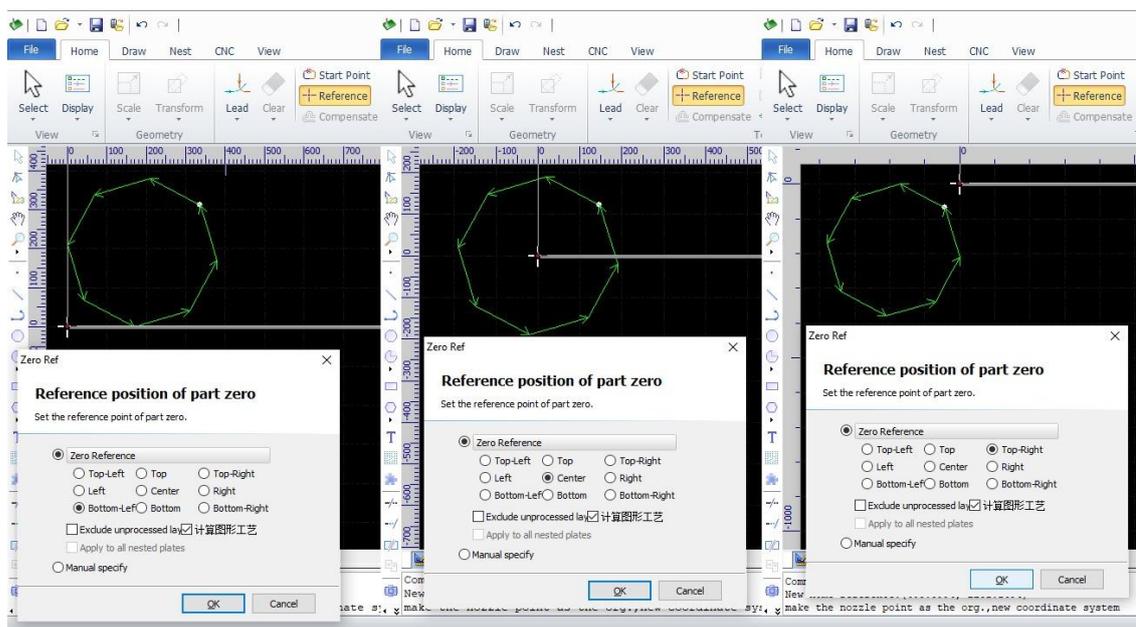
Figura 161 - POSICIONAMENTO DO PONTO ZERO DA PEÇA NA CHAPA.



FONTE: O autor (2022).

Esse ponto que posicionamos o cabeçote de corte sobre a chapa antes do início do corte será interpretado pelo software como sendo a referência, o “ponto zero” da peça. A posição mais intuitiva seria imaginar que os gráficos estão dispostos no primeiro quadrante de um plano cartesiano, logo posicionar a referência de “ponto zero” que este ponto esteja no canto inferior esquerdo ( $X_0, Y_0$ ) é o mais comum (à esquerda na Figura 162). Mas há situações em que alterar esta referência pode ser interessante, como no caso que estejamos buscando o máximo aproveitamento de uma chapa a partir de sua parte superior direita, por exemplo. Neste caso é mais lógico colocar o zero da peça naquela posição (à direita na Figura 162) e teremos certeza de que nenhum trabalho de corte se processará acima ou mais à direita daquela referência, o que será confirmado se clicarmos em FRAME no controle (o destaque III no controle mostrado na Figura 161).

Figura 162 - REFERENCIANDO O "PONTO ZERO" DA PEÇA COM O BOTÃO REFERENCE.

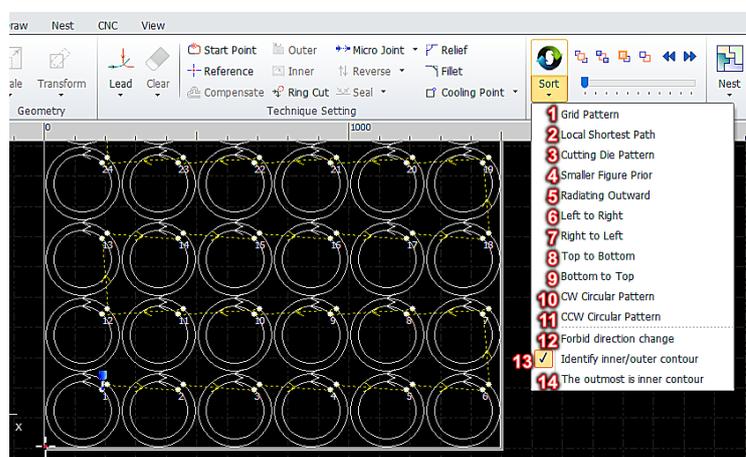


FONTE: O autor (2022).

#### 11.2.2.16. Ordenamento de corte (aba HOME, botão SORT).

Ao realizar recorte com máximo aproveitamento de uma chapa, a sequência em que os cortes serão realizados é de suma importância. Assegurar menor tempo da máquina em movimentação entre um END POINT e o próximo START POINT é um dos mais importantes, mas há questões ainda mais básicas como o de evitar que o corte no contorno seja feito antes dos recortes internos, o que inevitavelmente danificaria a peça.

Figura 163 - OPÇÕES DE ORDENAÇÃO AUTOMÁTICA DA SEQUÊNCIA DE CORTE.



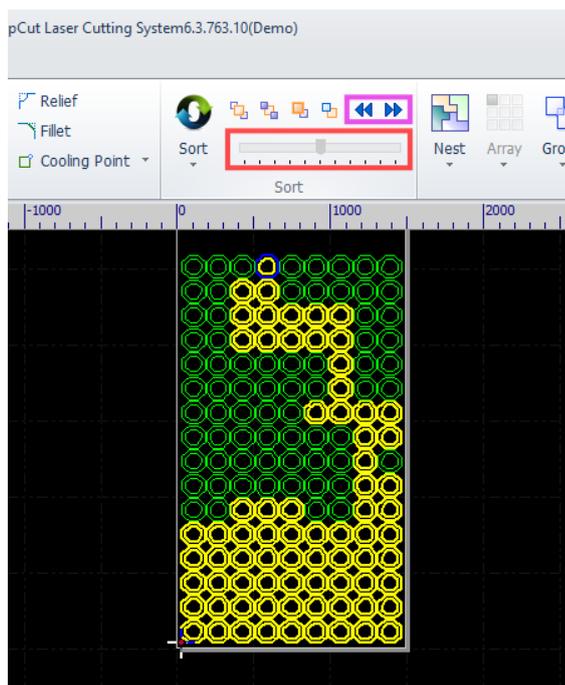
FONTE: O autor (2022).

A Figura 163 mostra as diversas opções oferecidas pelo software para ordenar de forma automática o corte. Os itens numerados de 1 a 14 na Figura 163 estão referenciados pelo número e livremente traduzidos abaixo. A interpretação é intuitiva e qualquer dúvida pode ser sanada simulando as diversas possibilidades.

1. Padrão de grade
2. Menor caminho local
3. Padrão da matriz de corte
4. Prioridade para figuras menores
5. Irradiar para fora
6. Da esquerda para a direita
7. Da direita para a esquerda
8. De cima para baixo
9. De baixo para cima
10. Padrão circular horário
11. Padrão circular anti-horário
12. Proibir mudança de direção
13. Identificar contornos externos e recortes internos
14. O mais externo será recorte interno

Deslocando o botão horizontal (destaque na caixa vermelha da Figura 164) na o software mostrará a ordem prevista de progresso do corte da chapa. Os botões em destaque na caixa lilás na mesma figura avançam ou retrocedem, corte a corte.

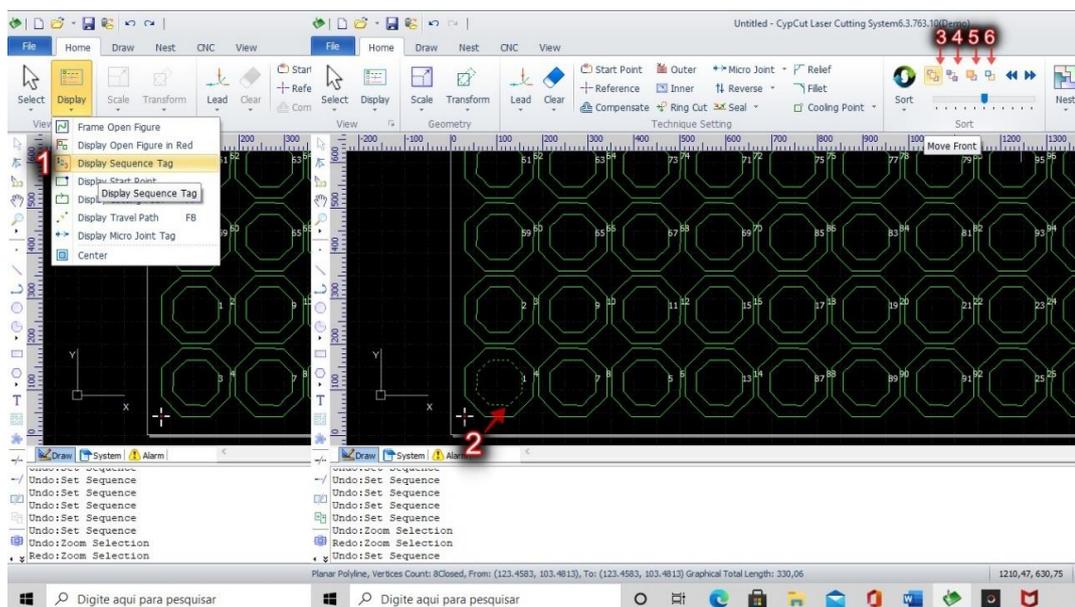
Figura 164 - ORDEM PREVISTA DE CORTE.



FONTE: O autor (2022).

Para rearranjar manualmente os cortes, primeiramente mostre a numeração da ordem de corte na opção DISPLAY SEQUENCE TAG no menu *drop-down* abaixo do botão DISPLAY dentro da aba HOME (detalhe 2 na Figura 165 e detalhe 3 na Figura 142). Em seguida, selecione o corte que deseja rearranjar a ordem (detalhe 2 na Figura 165) e utilize um dos quatro botões na Figura 165: tornar o primeiro (destaque 3 na Figura 165); tornar o último (4); mover para anterior (5) ou mover para posterior (6).

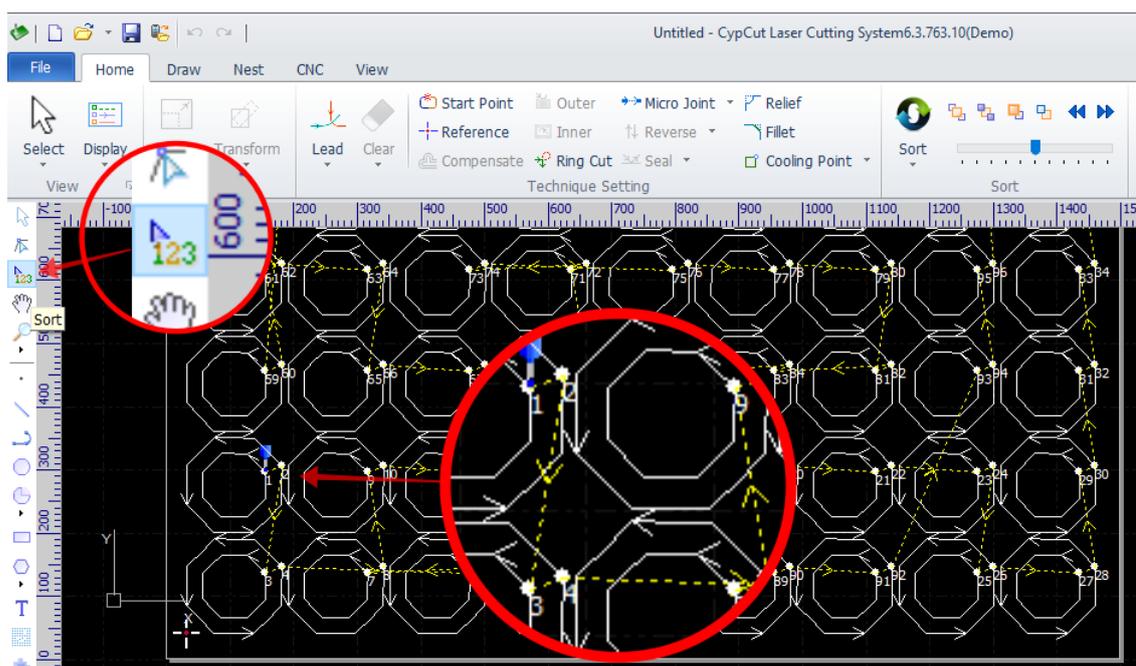
Figura 165 - REARRANJO MANUAL DA ORDEM DE CORTE.



FONTE: O autor (2022).

Se as estratégias ordenamento de corte automáticas não resolverem a contento, é possível visualizar a ordem e reordená-las manualmente, pelo botão SORT no menu vertical sempre à esquerda na tela (conforme destaque da Figura 166), conforme já mencionado no subitem 0.

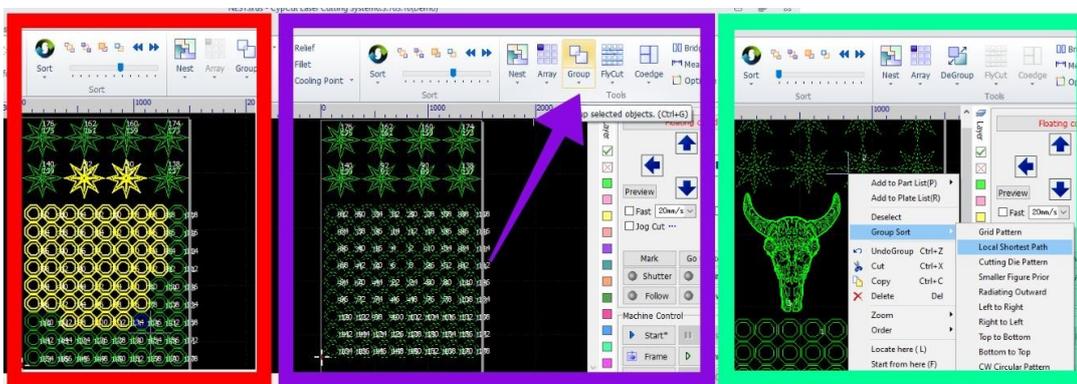
Figura 166 - ORDENAMENTO MANUAL PELO BOTÃO SORT À ESQUERDA DA TELA.



FONTE: O autor (2022).

Em alguns casos, num único trabalho reúne-se diferentes tipos de peças. Manter apenas uma estratégia de ordenamento pode ser impossível ou ilógico. Nestes casos, convém agrupá-las (basta selecionar todas que compõem um grupo e clicar no botão GROUP, conforme destacado na caixa em lilás, no centro da Figura 167). Finalmente, basta selecionar um grupo e clicar com o botão direito do mouse, estando o grupo selecionado. No menu que se abre a quarta opção é “GROUP SORT”. Lá, novamente, estão listadas as 11 estratégias de ordenação, mas que desta vez se aplicarão somente aos cortes daquele grupo (na caixa em verde claro na Figura 167).

Figura 167 - AGRUPANDO PEÇAS PARA MELHOR ORDENAMENTO DE CORTE.



FONTE: O autor (2022).

#### 11.2.2.17. Matriz de repetição de formas (aba HOME, botão ARRAY).

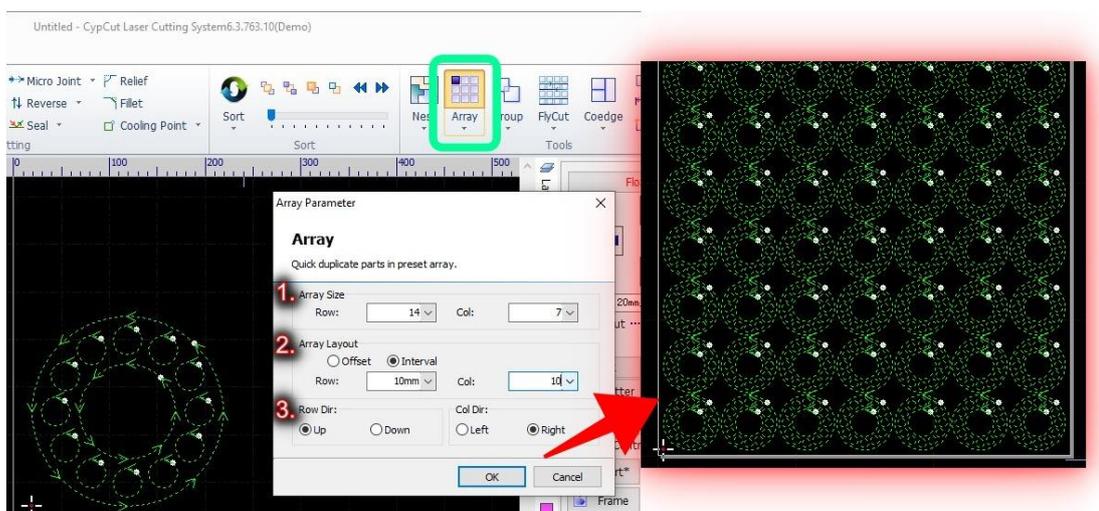
Este comando copia os cortes selecionados e repete-os numa matriz, em linhas e colunas, a um afastamento predeterminado.

No detalhe 1 da Figura 168 configuramos o tamanho da matriz, à esquerda em linhas e à direita o número de colunas.

No detalhe 2 da Figura 168, se no botão de opção a escolha for por OFFSET (distância entre o centro das figuras, vertical em ROW e horizontal em COL). Neste caso, os gráficos repetidos podem interseccionar caso o *offset* informado seja menor que a dimensão do gráfico. Se no botão de opção a escolha for por ou INTERVAL, informa-se a distância de afastamento entre a borda de uma figura e a sua próxima cópia. Neste último caso não há possibilidade de que um corte interseccione o anterior.

No detalhe 3 da Figura 168 opta-se pelo sentido de cópia na direção vertical (ROW UP/DOWN) e pelo sentido na direção horizontal (COLUMN RIGHT/LEFT) de reprodução do gráfico.

Figura 168 - FERRAMENTA DE CÓPIA EM MATRIZ, COMANDO ARRAY.

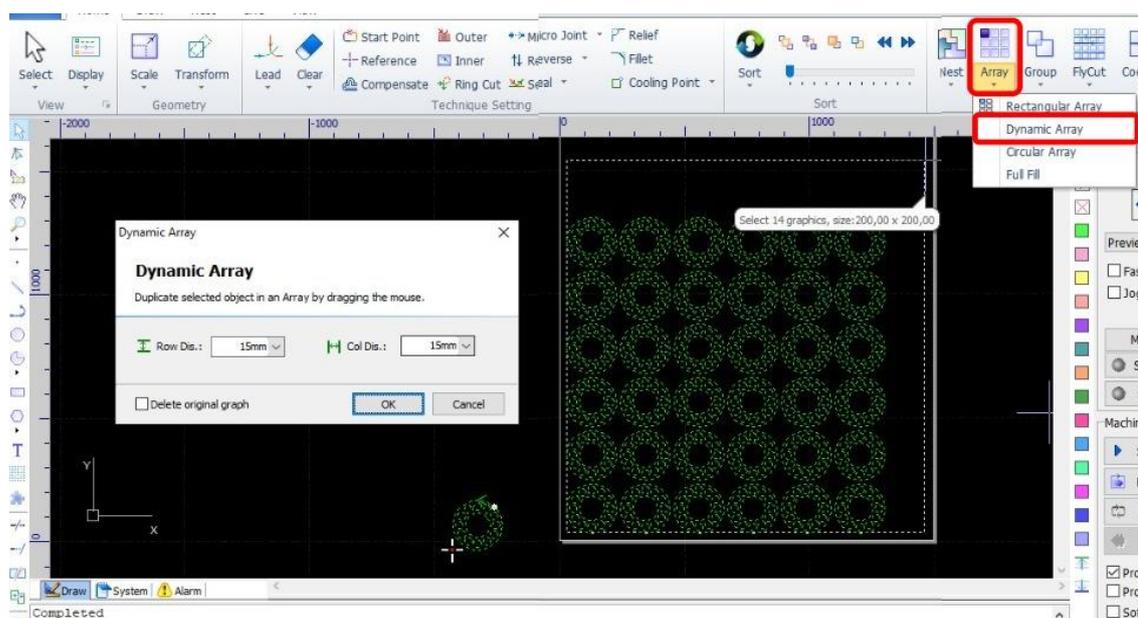


FONTE: O autor (2022).

**Ajuste dinâmico do tamanho da matriz de repetição (aba HOME, menu ARRAY, opção DYNAMIC ARRAY).**

Clicando na região inferior do botão ARRAY na aba HOME, há a opção DYNAMIC ARRAY, no destaque da Figura 169. Com esta opção é possível dimensionar a matriz de forma dinâmica com o arraste do mouse. Basta definir o afastamento vertical (ROW DIS.) e o afastamento horizontal (COL DIS.).

Figura 169 - DIMENSIONAMENTO DINÂMICO DE MATRIZ, COMANDO DYNAMIC ARRAY.

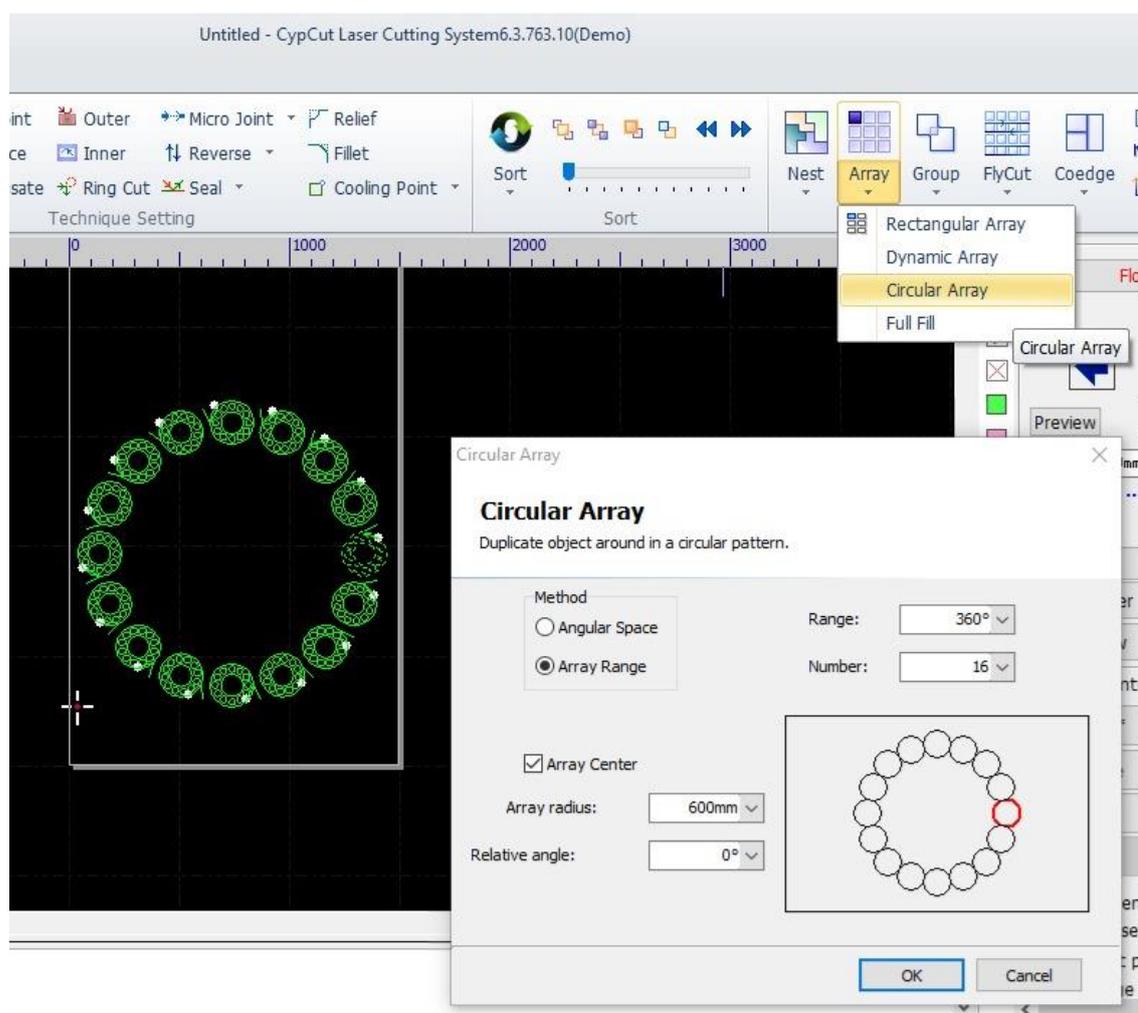


FONTE: O autor (2022).

### Arranjo circular de repetição (aba HOME, menu ARRAY, opção CIRCULAR ARRAY).

Clicando na região inferior do botão ARRAY na aba HOME, há a opção CIRCULAR ARRAY - destaque da Figura 170 – na qual a cópia do gráfico pode ser feita em forma circular. As definições ali são intuitivas: ângulo no qual se fará a repetição (RANGE), o número de repetições igualmente espaçadas que dividirão o círculo (ou semicírculo, conforme o ângulo definido em RANGE), o raio (RADIUS) e a posição de início da primeira cópia, em graus, em relação ao um círculo trigonométrico (RELATIVE ANGLE).

Figura 170 - CÓPIA CIRCULAR, OPÇÃO CIRCULAR ARRAY.



FONTE: O autor (2022).

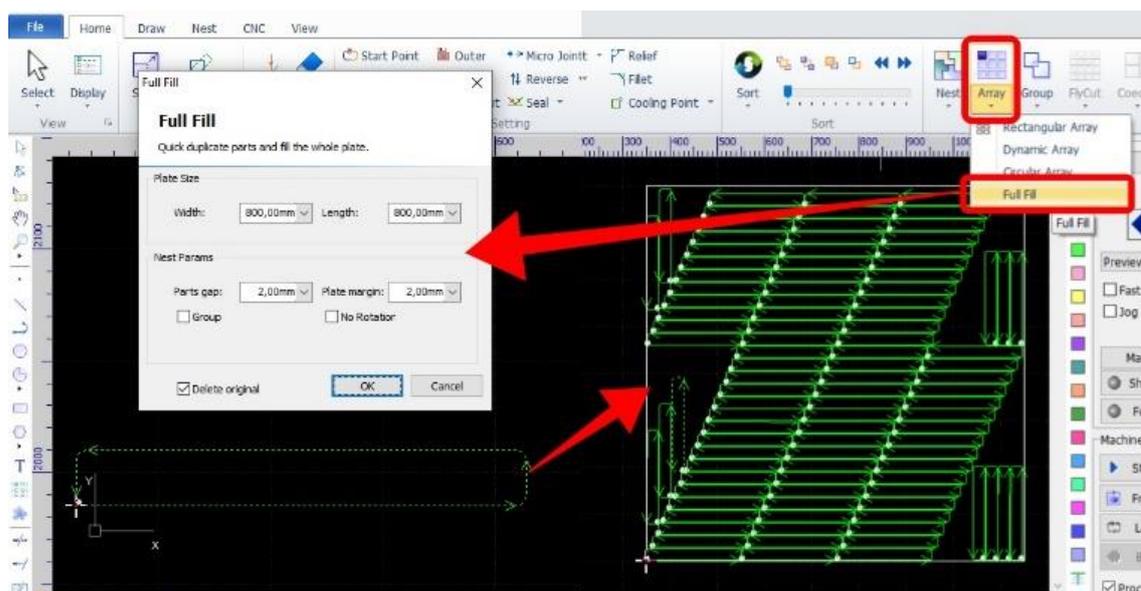
### Função de preenchimento de chapa (aba HOME, menu ARRAY, opção FULL FILL).

Selecione um gráfico que representa uma peça a ser repetida até encher uma chapa. Selecione a opção FULL FILL, no menu abaixo do botão ARRAY, na aba HOME. A sequência é ilustrada pela Figura 171.

Na janela, basta informar as dimensões da chapa, largura e comprimento, respectivamente em WIDTH e LENGTH. PARTS GAP é o distanciamento padrão entre peças, em todas as direções. PARTS MARGIN é a distância das margens da chapa.

Nos checkboxes pode-se optar por agrupar (GROUP), impedir encaixe rotacionado (NO ROTATION) e apagar a peça original (DELETE ORIGINAL).

Figura 171 - FERRAMENTA DE PREENCHIMENTO AUTOMÁTICO DA CHAPA (MENU ARRAY, OPÇÃO FULL FILL).



FONTE: O autor (2022).

#### 11.2.2.18. Corte volante (aba Home, botão FLYCUT).

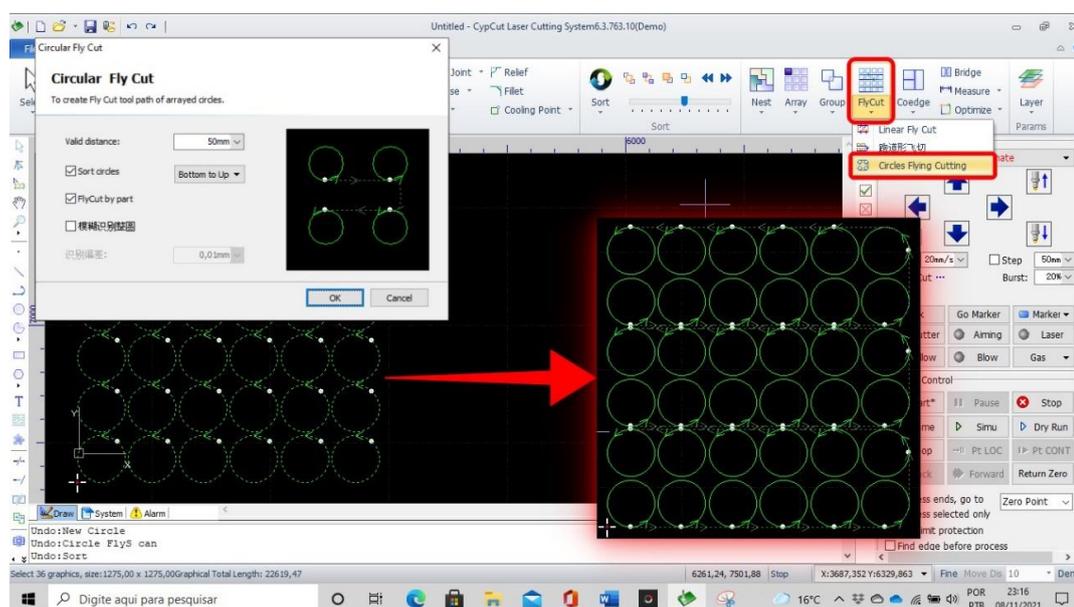
Ao realizar corte de círculos ou retângulos de pequena dimensão em alta quantidade, há grande desperdício de tempo entre perfuração inicial e movimentação de cabeçote, fortes acelerações e desacelerações.

Para estes casos há uma técnica conhecida como corte volante, FLYCUT. Nesta técnica o cabeçote irá fazer um caminho de corte contínuo entre as peças a partir da primeira perfuração.

## Corte volante de formas circulares (aba HOME, menu FLYCUT, opção CIRCLES FLYING CUTTING).

Para realizar volante de formas circulares, selecione a matriz de círculos e, abrindo o menu clicando abaixo do botão FLYCUT na aba HOME, selecione CIRCLES FLYING CUTTING (vide detalhe na Figura 172).

Figura 172 - CORTE VOLANTE DE MATRIZ DE FORMAS CIRCULARES (CIRCULAR FLYING CUTTING).

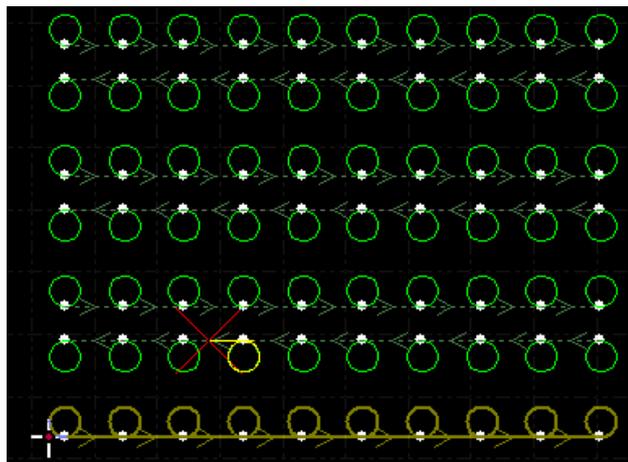


FONTE: O autor (2022).

Na janela que se abre, em VALID DISTANCE determine a distância máxima (entre as extremidades dos círculos) no qual o software vai reconhecer círculos contíguos. Na Figura 173, a matriz construída tem 45mm de distância entre as extremidades dos círculos (de uma coluna à próxima) e 55mm de distanciamento entre círculos de uma linha para a superior. Por esta razão, ao colocarmos VALID DISTANCE de 50mm, as contiguidades entre círculos na horizontal foram localizadas, enquanto na vertical não houve conexão.

Na caixa de seleção SORT CIRCLES, opta-se por uma estratégia (Caminho mais curto, irradiar, esquerda para direita, direita para esquerda, cima para baixo, baixo para cima, sentido horário ou anti-horário).

Figura 173 - OBSERVAÇÃO QUANTO À DISTÂNCIA MÁXIMAS ENTRE FIGURAS PARA FLYCUT.



FONTE: O autor (2022).

Na caixa de seleção FLY CUT BY PART o software apenas realizará o corte volante em peças idênticas. Abaixo, em caracteres chineses nessa versão do CypCut, “reconhecimento difuso de todo o círculo” e, na caixa, deve-se definir “desvio de reconhecimento”. Marcando esta opção, o software vai buscar formatos arredondados (como as elipses à esquerda da Figura 174) que, dentro de um certo desvio, serão transformados em círculos perfeitos e incluídos na estratégia de corte volante de formas circulares (CIRCULAR FLY CUT).

Figura 174 - RECONHECIMENTO DE FORMAS ARREDONDADAS PARA CORTE VOLANTE DE FORMAS CIRCULARES.



FONTE: O autor (2022).

**Corte volante linear (aba HOME, menu FLYCUT, opção LINEAR FLY CUT).**

Retângulos e mesmo polígonos irregulares podem também ser feitos por corte volante, nestes casos segmentos lineares que cortam primeiro as linhas e depois as colunas, ou vice-versa, fatiando a chapa em uma e depois noutra direção.

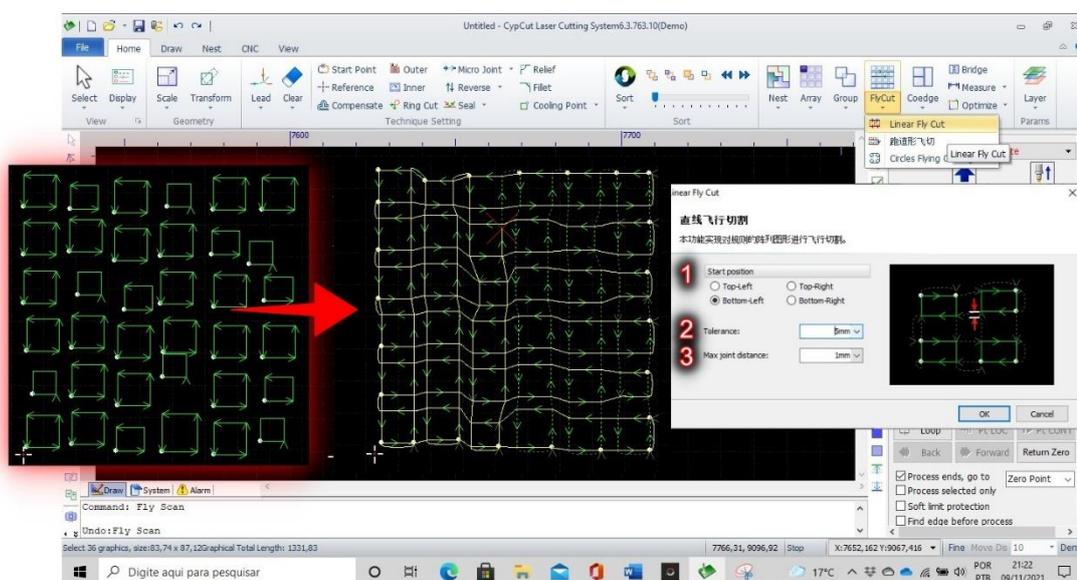
A janela de configuração de corte volante linear demanda poucas configurações:

No detalhe 1 da Figura 175, escolha a região de início do corte, entre os quatro possíveis extremos da matriz.

No detalhe 2 da Figura 175, determine a desvio máximo dentro de uma linha ou coluna o software considerará como compondo ainda a matriz a ser criada pelo CypCut. Assim o software poderá fatiar figuras que não são perfeitamente alinhadas, de dimensões diferentes e mesmo polígonos ligeiramente irregulares, contanto que possam ser compartimentadas na forma de uma matriz. O valor de desvio determina quanto um segmento pode desviar numa direção entre a borda de uma peça e a próxima.

Como esta técnica produz peças compridas e esguias em uma direção antes de fatiá-la na direção oposta, é comum que elas entortem ao centro pelo efeito térmico do corte. Isso causa que a cabeça de corte precise subir repentinamente, mudando o ponto focal e prejudicando a qualidade de corte. Para evitar, o software automaticamente adiciona juntas (JOINTS) em pontos favoráveis para manter o material estirado. É semelhante ao efeito das micro junções(MICRO JOINTS), porém neste caso ficarão em áreas fora das peças finais produzidas e, portanto, não precisam ser tão estreitas. No detalhe 3 da Figura 175, informa-se a distância máxima entre juntas e o software os posicionarão automaticamente, representados por um ponto branco.

Figura 175 - Corte volante por linhas (LINEAR FLYCUT).



FONTE: O autor (2022).

### 11.2.2.19. Compartilhamento de arestas (aba HOME, botão COEDGE).

Compartilhar arestas (COEDGE) é um método de corte que preza por minimizar do desperdício de área da chapa. É interessante realizar quando o contorno é compartilhado exatamente por repetidas peças, como retângulos comuns (por comuns, entenda-se sem arredondamentos nos cantos).

É necessário considerar e compensar manualmente a largura de corte perdida no *kerf* (volume de material fundido e ejetado na frente de corte).

GRID PATTERN – padrão de grade. Fatia todos os contornos internos, primeiro numa direção horizontal, depois na vertical e finaliza com as bordas. São inseridas juntas automaticamente para manter o material estirado. No detalhe “a” da Figura 176.

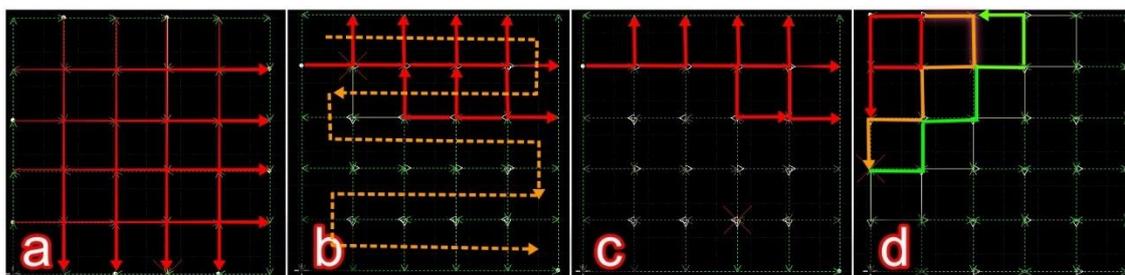
S PATTERN – as peças vão sendo recortadas uma a uma, contíguas, percorrendo toda uma linha num sentido, depois a linha abaixo no outro sentido, formando um padrão S ou “cobra” (*snake pattern*). Diminui a possibilidade de que a chapa se deforme por efeito térmico. No detalhe “b” da Figura 176.

BORDER LAST – Semelhante ao S PATTERN pois vai recortando as peças uma a uma, porém as peças que ficam contíguas ao contorno externo da matriz terão este corte dos limites externos executados por último. No detalhe “c” da Figura 176.

BORDER FIRST – O corte dos limites externos é executado primeiro, depois as demais peças vão sendo recortadas uma a uma.

STEP – Começa recortando a primeira peça de um dos extremos, depois vai percorrendo a chapa descolando as figuras contíguas na diagonal, duas, três etc. No detalhe “d” da Figura 176.

Figura 176 - ESTRATÉGIAS DE CORTE PARA COMPARTILHAMENTO DE CONTORNO EXTERNO (COEDGE).

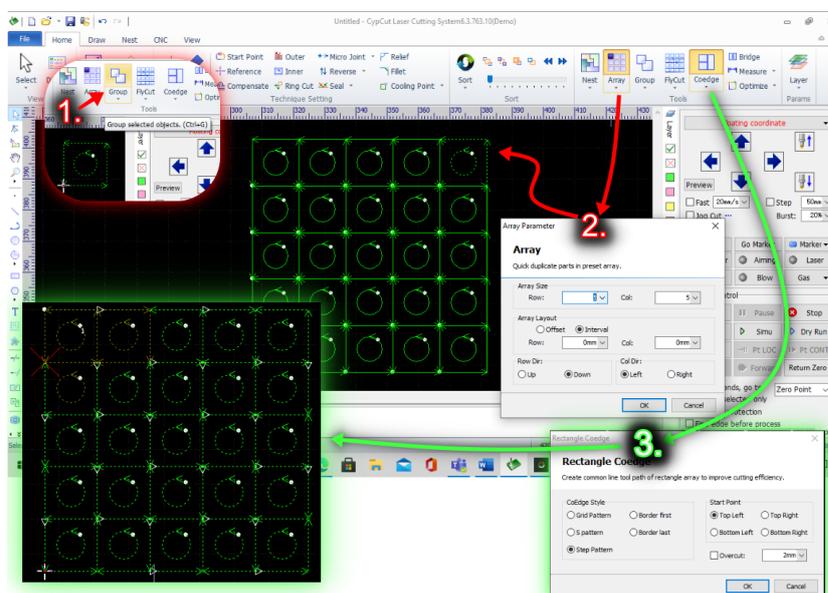


FONTE: O autor (2022).

Se a peça tiver um recorte interno, é necessário que o software faça o recorte interno de cada peça antes dos seus contornos. Para que o software entenda a sequência, primeiramente agrupe o corte do recorte e o corte de contorno da peça individual (conforme detalhe “1” na Figura 177). Depois construa a matriz de repetição da peça sem nenhum espaço entre elas (na janela de configuração ARRAY, informar o valor “0mm” em ARRAY LAYOUT, conforme detalhe “2” na Figura 177).

Finalmente, clique no botão COEDGE e escolha uma estratégia de ordem de corte (conforme detalhe “3” na Figura 177).

Figura 177 - COMPARTILHAMENTO DE CONTORNOS EM PEÇAS COM RECORTE INTERNO.

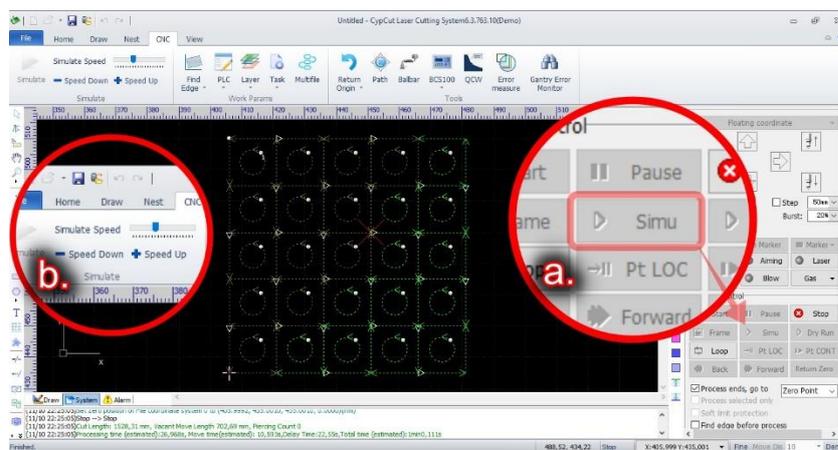


FONTE: O autor (2022).

#### 11.2.2.20. Simulação gráfica processo de corte (botão SIMU no MACHINE CONTROLS).

Caso deseje simular a operação de corte - visualizar a sequência e o caminho de corte – para conferir se a estratégia de ordem de corte produzirá as peças esperadas, use o botão SIMU no painel direito (detalhe “a” na Figura 178) ou pelo mesmo botão SIMU na aba CNC, aonde há um painel que permite avançar ou diminuir a velocidade de simulação (detalhe “b” na Figura 178).

Figura 178 - SIMULAÇÃO VISUAL DE SEQUÊNCIA E CAMINHO DE CORTE.

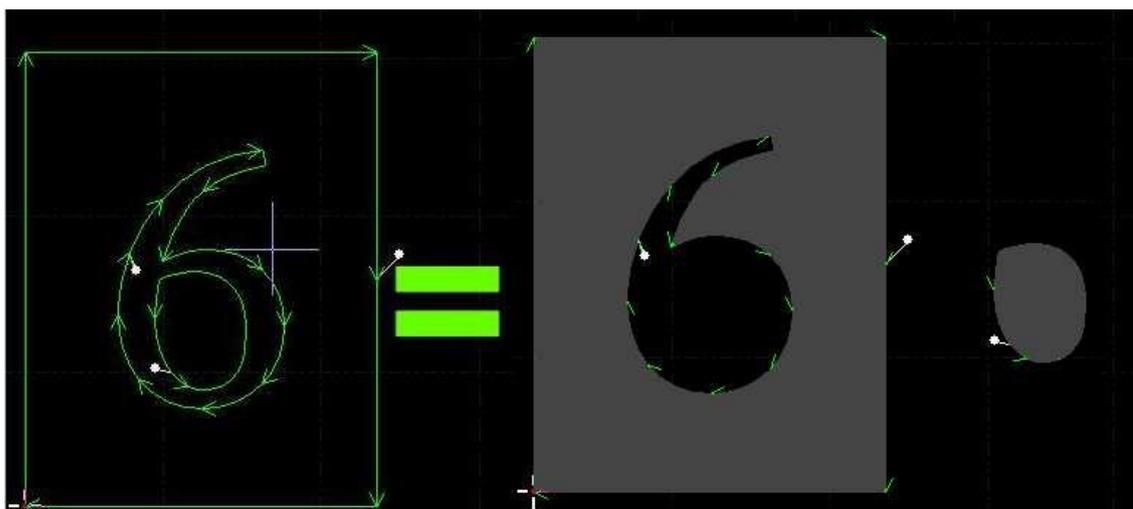


FONTE: O autor (2022).

#### 11.2.2.21. Conexão de material (aba HOME, botão BRIDGE).

Ferramenta necessária para realizar corte “vazado”, que tem o efeito de um negativo de corte. As conexões são “pontes” de material que são necessárias para manter posicionadas partes internas em peças que são feitas com corte vazado. Veja o exemplo da Figura 179, em que a área central do “6” que se deseja cortar vazado numa chapa não teria nenhuma fixação à parte final.

Figura 179 - DEFEITO DECORRENTE DA REALIZAÇÃO DE CORTES VAZADOS QUANDO HÁ UMA ÁREA FLUTUANTE.

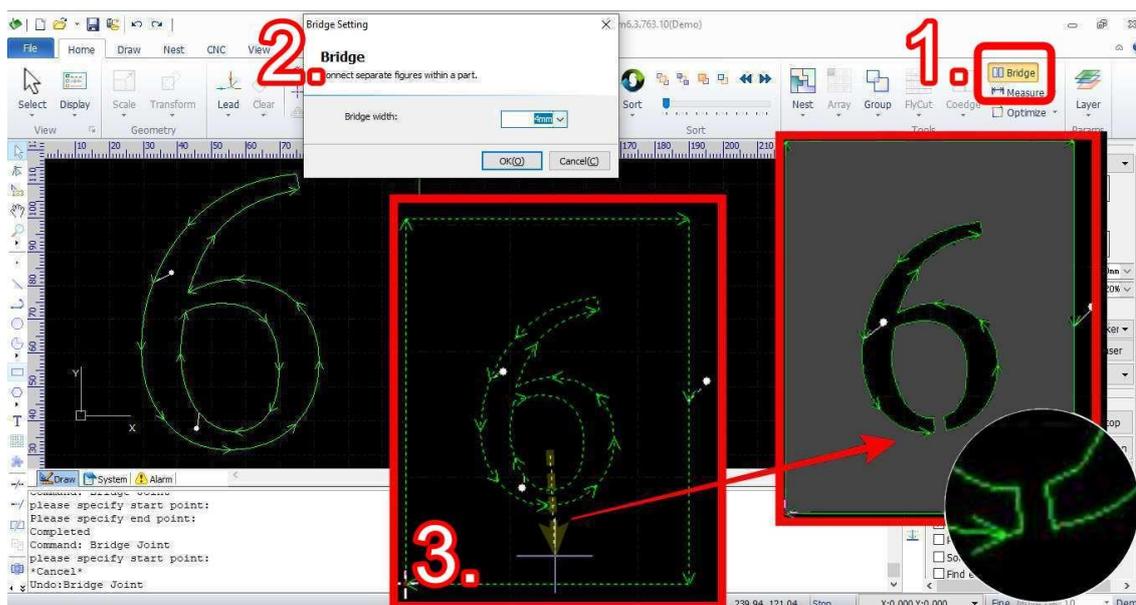


FONTE: O autor (2022).

A solução é a ferramenta BRIDGE, do CypCut. Selecione os cortes, clique no botão BRIDGE na aba HOME (detalhe 1 da Figura 180). Na janela que se abre, digite

a espessura dessa ponte de material. Finalmente, trace uma linha na região em que se deseja incluir a conexão de material (BRIDGE). Finalmente, não esqueça de verificar que o software entende qual corte será um recorte interno e qual define o contorno. Para tal, basta clicar na linha de recorte interno (o “6”, neste caso e clicar em INNER. Depois clique no retângulo que será a borda externa da placa e clique no botão OUTER. Ambos estão na aba HOME.

Figura 180 - CONEXÃO DE MATERIAL PARA REALIZAÇÃO DE CORTES VAZADOS.

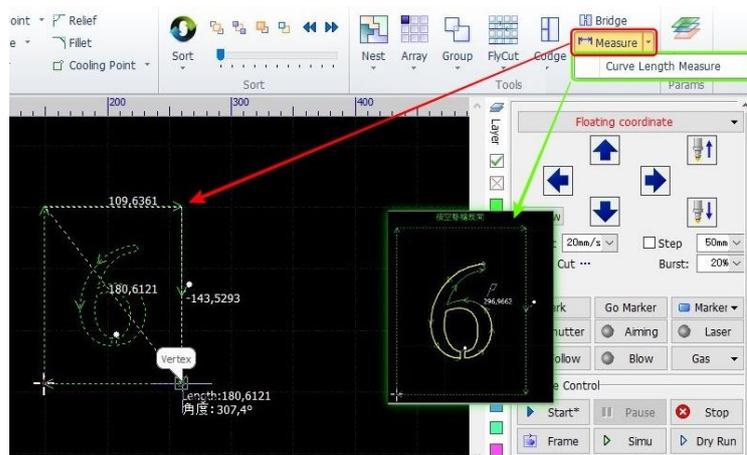


FONTE: O autor (2022).

#### 11.2.2.22. Ferramenta de medição (aba HOME, botão MEASURE).

Há duas ferramentas. MEASURE fornece distâncias lineares e ângulos, enquanto CURVE LENGHT MEASURE mede as distâncias envolvidas em curvas de corte. A aplicação de ambas é intuitiva, conforme Figura 181.

Figura 181 - FERRAMENTA DE MEDIDA E DE COMPRIMENTO DE CURVA DE CORTE.



FONTE: O autor (2022).

### 11.2.3. Aba de desenho (DRAW)

Ao lado direito da aba HOME, no menu horizontal superior, está a aba DRAW.

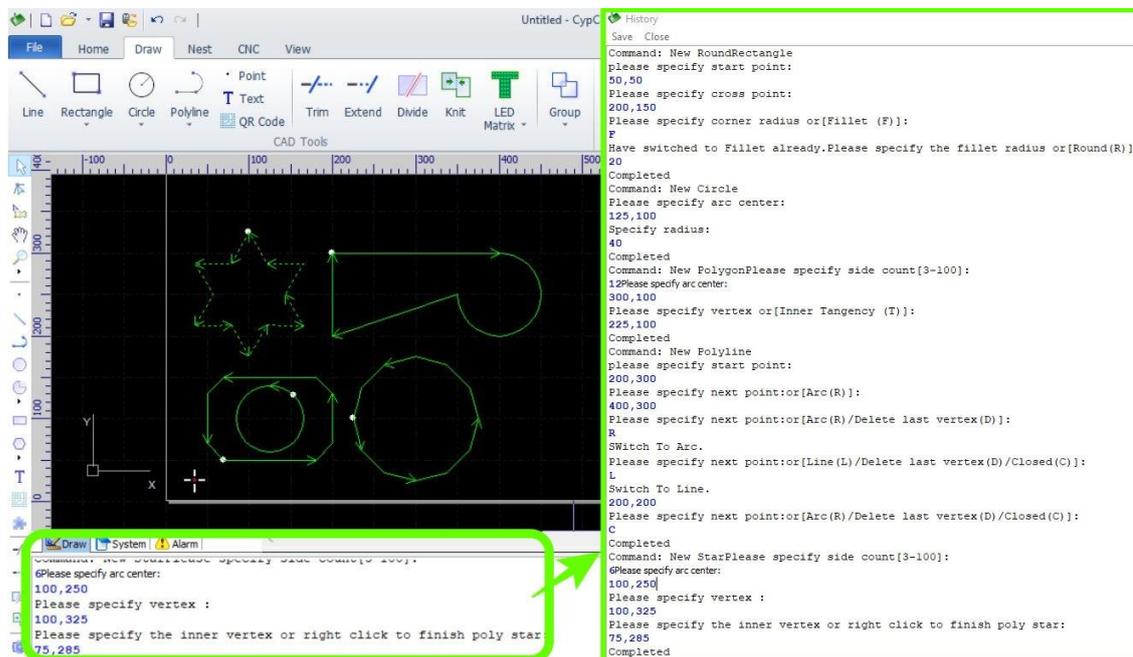
Replicando as funções dos botões no menu vertical esquerdo em sua região central, conforme já esmiuçado no subitem 11.1.1.1, adiciona apenas mais algumas funções úteis principalmente em corrigir defeitos comuns ao importar alguns arquivos de diferentes softwares CAD.

Usando comandos intuitivos, é possível criar gráficos 2D representativos dos cortes que constroem uma peça e até mesmo dispensar o uso de outros softwares CAD, com a combinação destes comandos de desenho, redimensionar, alinhar, replicar etc.

O comando menos intuitivo ao desenhar no CypCut é definir dimensões. Depois de criar a forma na aba DRAW é necessário selecionar a forma e alternar para a aba HOME para encontrar o botão SCALE.

Para tornar mais rápido, é possível utilizar o log “COMMAND HISTORY OF CAD”, visível na parte inferior central da tela, ao selecionar a aba DRAW ali na região do LOG, conforme Figura 182. Basta selecionar a forma a se desenhar e ler a pergunta feita pelo software, na última linha do HISTORY COMMAND MENU. Basta digitar o que o software pede e confirmar com a tecla “Enter” do teclado. Observe que o separador de decimais é o ponto, enquanto a vírgula é usada para distinguir as coordenadas, na ordem “X.xx,Y.yy”. Caso o Cypcut ofereça uma opção de alternar, a letra que confirma a alteração de tipo de input (de um ponto que define o próximo ponto de uma *poline* para um círculo, por exemplo).

Figura 182 - LOG COM A HISTÓRIA DE COMANDOS DE CRIAÇÃO OU REPRODUÇÃO A PARTIR DE UMA VISTA 2D.



FONTE: O autor (2022).

### 11.2.3.1. Correção à forma do círculo aplicável a arquivos importados de softwares CAD externos.

No menu *drop down* que se abre abaixo do botão CIRCLE nesta aba DRAW, os dois últimos comandos são relevantes para quando se faz a importação de um arquivo gerado por um software externo de CAD, pois algumas formas são mal interpretadas e precisam ser corrigidas:

REPLACE CIRCLE WITH POINT (Figura 183, detalhe “a”) – Substitui círculos muito pequenos por pontos. Na janela que se abre determina-se o tamanho de círculo a ser substituído por pontos. No botão de seleção, escolhe-se se o valor digitado se refere a diâmetro (D) ou raio (R).

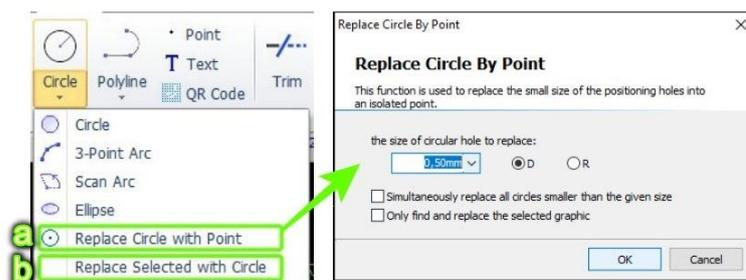
No *checkbox* nesta mesma janela:

SIMULTANEOUSLY REPLACE ALL CIRCLES SMALLER THAN THE GIVEN SIZE – Se marcado, a substituição vai se aplicar a todos os círculos de dimensão igual ou menor à dimensão informada acima, não apenas àqueles que tem aquela exata dimensão.

ONLY FIND AND REPLACE THE SELECTED GRAFICS – Por padrão, essa substituição de círculos pequenos por pontos se aplicaria a círculos encontrados em todo o arquivo. Caso deseje que esta substituição se aplique aos que estão selecionados, é necessário marcar essa seleção.

REPLACE SELECTED WITH CIRCLE (Figura 183, detalhe “b”) – Quando é feita importação de arquivos “.plt”, uma forma criada como círculo no Corel Draw acaba sendo importada como um polígono. Basta selecioná-las todas (mantendo o botão “Shift” pressionado para selecionar múltiplas) e confirmar a transformação da forma em círculos.

Figura 183 - FERRAMENTAS DE CÍRCULO RELEVANTES PARA CORREÇÃO DE IMPORTAÇÕES DE ARQUIVOS CAD.

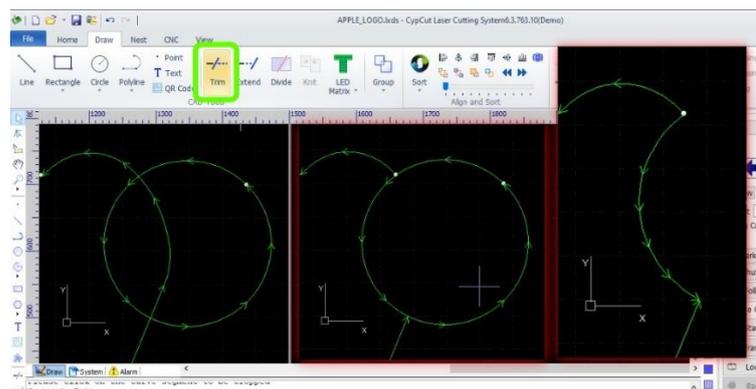


FONTE: O autor (2022).

### 11.2.3.2. Aparar linhas (aba DRAW, botão TRIM).

Quando curvas se interseccionam, é possível apará-las. Basta selecionar o botão TRIM e clicar no segmento de reta a apagar.

Figura 184 - APARAR LINHAS (TRIM).

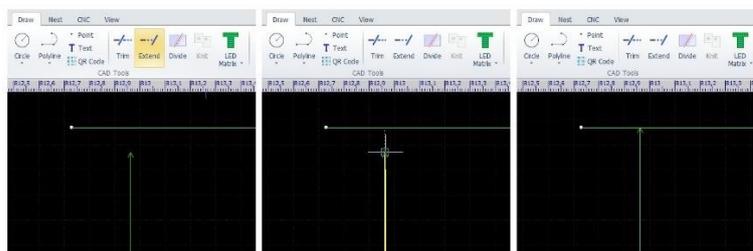


FONTE: O autor (2022).

### 11.2.3.3. Extender linhas (aba DRAW, botão EXTEND).

Aplicável segmentos de retas, prolonga a mesma até intersecionar uma próxima curva. Vide exemplo da aplicação na Figura 185.

Figura 185 - EXTENDER LINHAS (EXTEND).

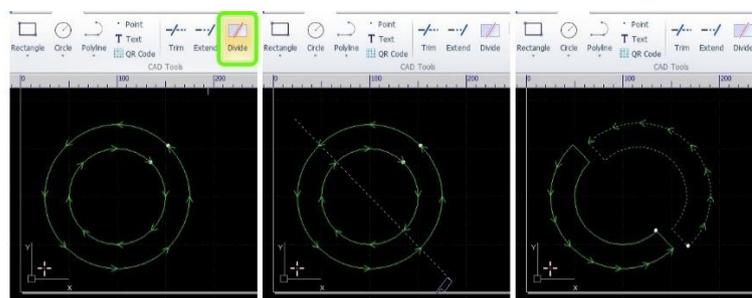


FONTE: O autor (2022).

#### 11.2.3.4. Fatiar formas (aba DRAW, botão DIVIDE).

Divide a forma na linha desejada, mantendo fechados os contornos de ambas as metades.

Figura 186 - FATIAR FORMA (DIVIDE).

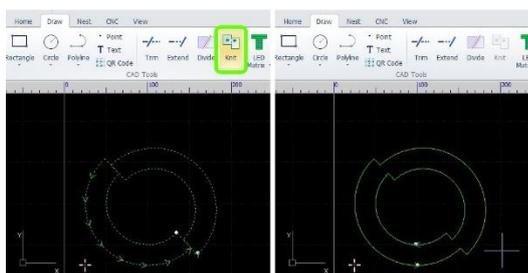


FONTE: O autor (2022).

#### 11.2.3.5. União de formas (aba DRAW, botão KNIT)

Faz a “costura” de duas formas, inicialmente fechadas e próximas.

Figura 187 - UNIÃO DE FORMAS (KNIT).

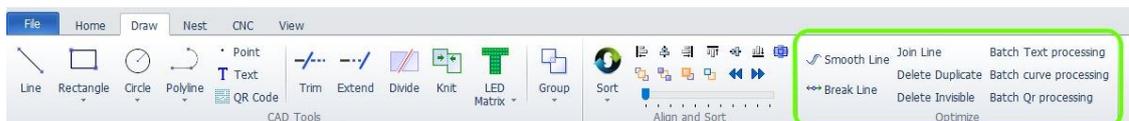


FONTE: O autor (2022).

### 11.2.3.6. Ferramentas de otimização.

Na aba DRAW, à direita, há ferramentas de otimização reunidas em OPTIMIZE

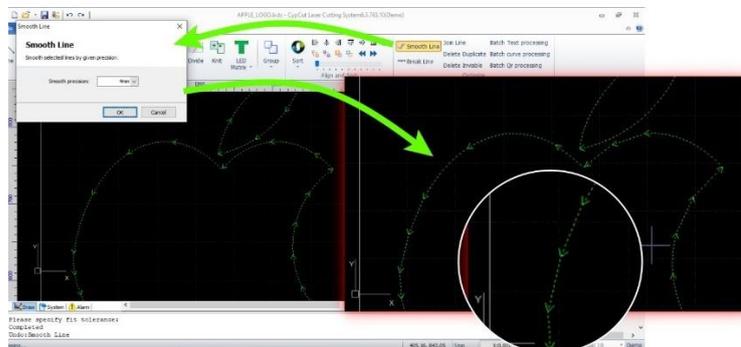
Figura 188 - FERRAMENTAS DE OTIMIZAÇÃO.



#### Segmentação de curva em retas (aba DRAW, botão SMOOTH LINE)

A ferramenta SMOOTH LINE transforma arredondamentos de raios muito grandes em segmentos de retas com suaves ângulos.

Figura 189 - SEGMENTAÇÃO DE CURVAS EM RETAS (SMOOTH LINE).



FONTE: O autor (2022).

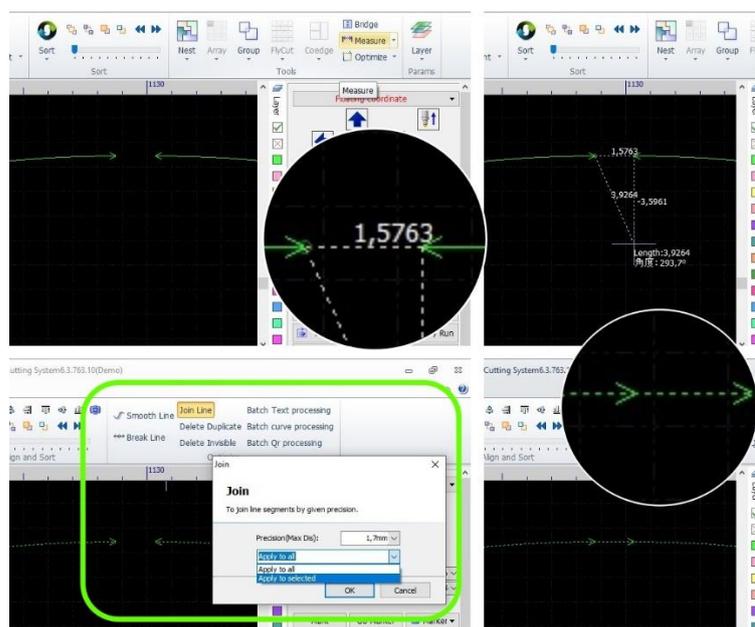
#### Quebra de linha (aba DRAW, botão BREAK LINE)

Clique no botão BREAK LINE e clique num ponto sobre uma linha para seccioná-la. Clique num segundo ponto para realizar uma explosão do segmento de linha, podendo movê-lo, apagá-lo etc.

#### União de linhas (aba DRAW, botão JOIN LINE)

Correção automática de pequenos vazios (*gaps*) entre linhas de um gráfico.

Figura 190 - FERRAMENTA DE UNIÃO DE PEQUENOS VAZIOS ENTRE LINHAS (JOIN LINE).



FONTE: O autor (2022).

Apagar duplicadas (DELETE DUPLICATE) – apaga automaticamente formas duplicadas e sobrepostas dentro da seleção.

Apagar invisíveis (DELETE INVISIBLE) – apaga elementos que não contribuem ao corte por estarem cobertos, sobrepostos por outra forma.

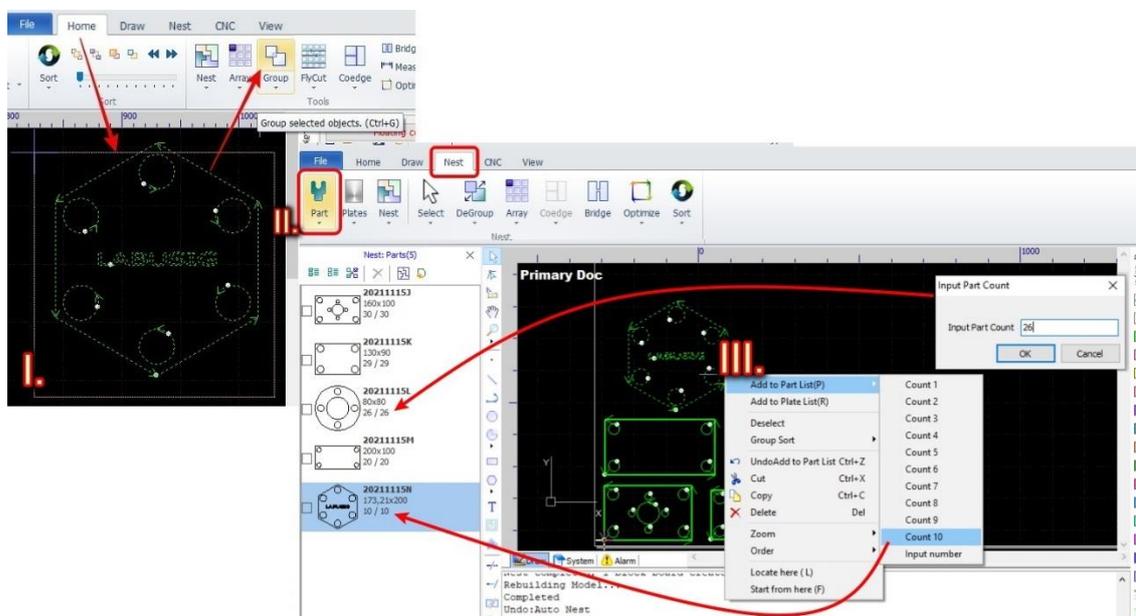
#### 11.2.3.7. *Aba de organização das peças para máximo aproveitamento da chapa (NEST)*

Partindo de um layout com 5 peças diferentes, neste caso criados no próprio CypCut, o cuidado inicial é que as formas que definem curvas de cortes que compõem uma peça devem ser agrupados pelo botão GROUP na aba HOME (detalhe I na Figura 191).

Em seguida, na aba NEST, adicionaremos cada uma das figuras agrupadas à relação de peças (detalhe II na Figura 191). Para isso, basta clicar com o botão direito sobre o grupo, no menu que se abre abrir o submenu em ADD TO PART LIST e então selecionar um valor para a quantidade desta peça específica que deve ser

produzida nesta empreitada, relativo às outras peças (detalhe I na Figura 191). Se necessário, vá em INPUT NUMBER e digite a quantidade.

Figura 191 - ORGANIZAÇÃO DA DISPOSIÇÃO DAS PEÇAS PARA MÁXIMO APROVEITAMENTO DE CHAPÁ (NESTING / PARTS).



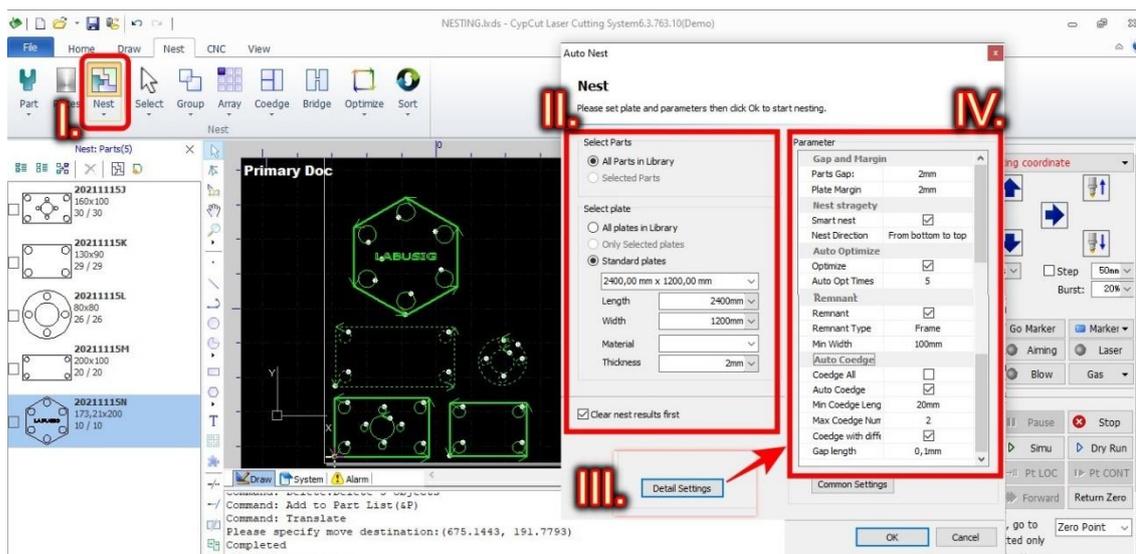
FONTE: O autor (2022).

Agora, ao clicar no botão NEST na mesma aba NEST (detalhe I na Figura 192), abre-se a janela AUTO NEST. À esquerda, selecione se a tarefa irá se aplicar a todas as peças listadas pelo processo explicado na Figura 191 ou apenas à momentaneamente selecionada. Em SELECT PLATE, informe as dimensões da chapa de trabalho (detalhe II na Figura 192). Para inserirmos os parâmetros de *nesting*

detalhado, clique no botão **DETAIL SETTINGS** no canto inferior direito da janela **AUTO NEST** (detalhe III na Figura 192).

Abrindo os parâmetros completos pelo botão **DETAIL SETTINGS** abrimos o **dropdown** mostrado no detalhe IV na Figura 192.

Figura 192 - PARÂMETROS PARA PROTOCOLO INTELIGENTE DE APROVEITAMENTO DE CHAPA (AUTO NEST).



FONTE: O autor (2022).

### 11.2.3.8. Parâmetros para o protocolo inteligente de aproveitamento de chapa (AUTO NEST).

Os parâmetros a serem informados ao protocolo de máximo aproveitamento do software são agrupados em quatro tópicos, cuja compreensão é corriqueira e dispensa maiores explicações.

#### **Afastamento entre as peças e das margens (GAP AND MARGIN).**

- PARTS GAP - distanciamento entre peças, válido quando não ocorre compartilhamento de arestas (COEDGE).
- PLATE MARGIN - afastamento da margem da chapa.

#### **Estratégia de aproveitamento (NEST STRATEGY).**

- SMART NEST - Protocolo inteligente de aproveitamento de chapa do software.
- NEST DIRECTION - Direção de nesting.

**Otimização automática (AUTO OPTIMIZE).**

- OPTIMIZE – Otimização.
- AUTO OPT TIMES - Número de repetição do protocolo de otimização.

**Remanescentes (REMNANT).**

- REMNANT TYPE - Tipo de forma remanescente preferencial na chapa.
- MIN WIDTH - Largura mínima de remanescente reaproveitável.

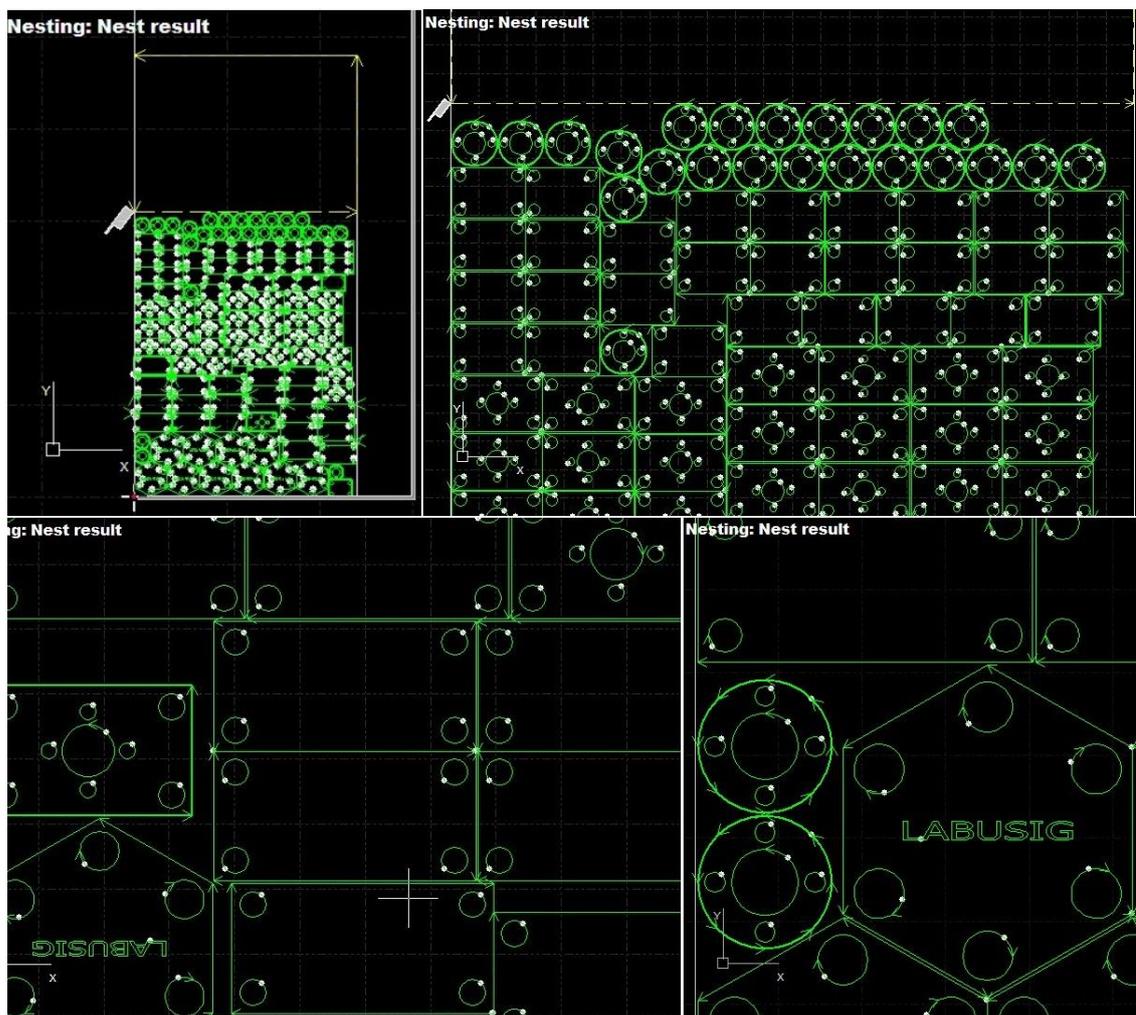
**Compartilhamento automático de arestas (AUTO COEDGE).**

- COEDGE ALL - Forçar o máximo compartilhamento de arestas.
- AUTO COEDGE - Compartilhamento automático de arestas. Realiza o COEDGE somente em regiões julgadas propícias.
- MIN COEDGE LENGTH - Comprimento mínimo de compartilhamento de aresta.
- MAX COEDGE NUMBER – Número máximo de arestas compartilhadas por peça.
- COEDGE WITH DIFFERENT - Compartilhar arestas em peças diferentes.
- GAP LENGTH – Comprimento dos vazios.

O resultado deste AUTO NEST é mostrado na Figura 193. Perceba que a quantidade de repetições de cada peça seguiu o determinado ao relacionar as peças, conforme a Figura 191. Algumas arestas foram compartilhadas, conforme o software julgou propício.

Por ser o objetivo aqui destacar a utilização da ferramenta de AUTO NEST, não foram realizados procedimentos anteriores necessários, como a compensação da largura esperada de corte (COMPENSATE) explicado no subitem 11.2.2.7 e Figura 151, conexão de material em cortes vazados no texto (BRIDGE) conforme subitem 11.2.2.21 e Figura 180.

Figura 193 - RESULTADO DO APROVEITAMENTO AUTOMÁTICO DA CHAPA (AUTO NEST).



FONTE: O autor (2022).

#### 11.2.4. Aba CNC

##### 11.2.4.1. Busca das bordas da chapa com o sensor capacitivo (BCS100 FIND EDGE).

Ao colocar a chapa sobre a mesa, certamente haverá desvios em relação a um alinhamento perfeito, no qual as arestas devem estar paralelas aos eixos X e Y. Como o distanciamento das bordas (PLATE MARGIN) configurado na etapa de AUTO NEST é geralmente pequeno, para evitar desperdícios, é importante que o software conheça o exato posicionamento da chapa e compense qualquer desalinhamento.

Utilizando seu sensor capacitivo BCS100 - o mesmo que deve ser calibrado em relação ao ponto zero no eixo Z ao iniciar e carregar uma nova chapa na máquina - a máquina de corte laser irá localizar as bordas da chapa sobre a mesa.

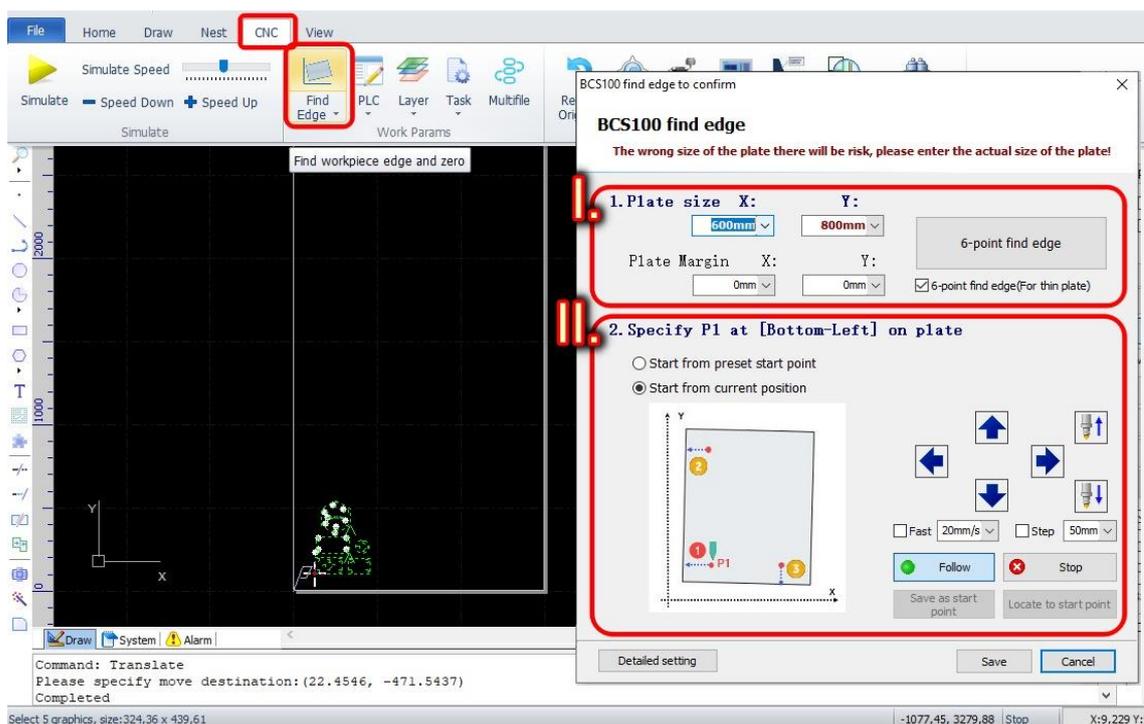
A primeira providência consiste em medir com precisão a chapa e informar ao software na parte “1” da janela de BCS100 FIND EDGE, no detalhe I da Figura 194. O eixo X é paralelo à parte frontal. Depois podemos configurar uma margem adicional, a fim de compensar alguma irregularidade. O habitual é que o sensor capacitivo BCS100 localize três extremos da chapa e com isso conheça o posicionamento total desta. Em chapas esbeltas, estreitas, convém marcar o botão de seleção 6-POINT FIND EDGE, para uma dose adicional de precisão.

Na parte inferior da janela de BCS100 FIND EDGE, no detalhe II da Figura 194, vamos localizar o ponto P1 na chapa, a partir do qual ele se distanciará a distância informada em PLATE SIZE X e PLATE SIZE Y para encontrar os outros dois (ou cinco) pontos para triangular a topologia da chapa.

Nos botões de escolha, pode-se selecionar entre “START FROM PRESET START POINT” para iniciar em um ponto já preestabelecido ou “START FROM CURRENT POSITION”, a opção mais habitual, no qual o software interpreta o posicionamento do cabeçote quando se clica SAVE como sendo o P1. É necessário, portanto, posicionar o cabeçote naquele ponto. Com o ponteiro laser “SHUTTER” acionado, use as setas nesta janela ou no controle remoto para navegar o cabeçote até a borda inferior esquerda, mantendo apenas poucos milímetros de distância da borda (a posição exata da borda é o sensor que irá localizar).

Feito isso, basta clicar em SAVE para que o sensor capacitivo procure os outros pontos de modo a triangular a topologia da chapa, como ilustrado também naquela janela.

Figura 194 - BUSCA DAS BORDAS DA CHAPA COM O SENSOR CAPACITIVO (BCS100 FIND EDGE).



FONTE: O autor (2022).

### 11.3. MÓDULO DE CONTROLE DE TRABALHO.

Agora será apresentado o módulo de controle de trabalho, constantemente à direita da tela no software CypCut.

#### 11.3.1. Sistema de coordenadas flutuante.

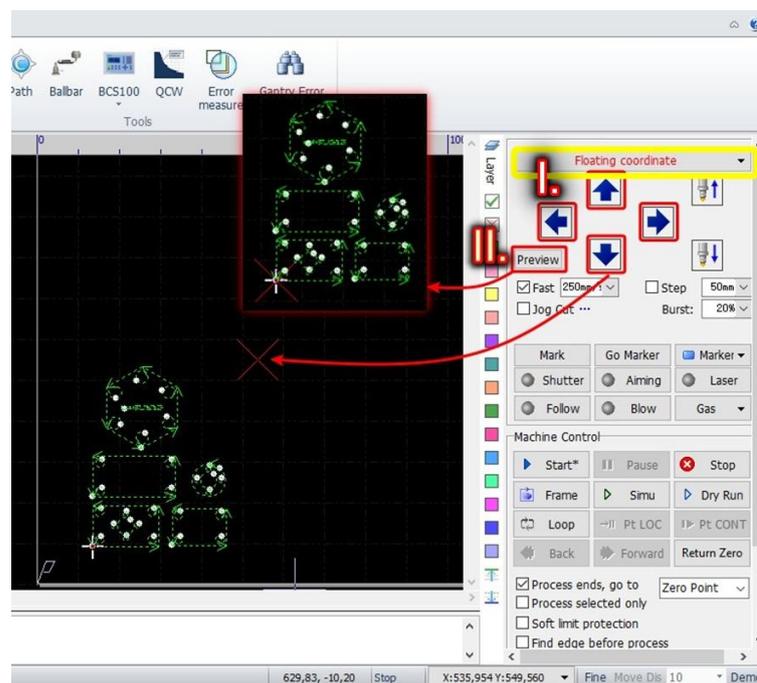
O X grande vermelho na tela é a posição do cabeçote na área de trabalho, onde será a origem do Sistema de Coordenadas Flutuante. É possível movê-lo manualmente através das quatro setas grandes no módulo de controle de trabalho (detalhe I da Figura 195), que fazem a mesma função que as setas direcionais do controle remoto (mostrados no detalhe 2 da Figura 161). No sistema de coordenadas flutuante, a posição do cabeçote atual é considerada o ponto zero do programa.

A cruz branca no canto esquerdo dos gráficos é referência da peça, o qual pode ser movido com o botão REF na aba HOME, exemplificado na Figura 162.

Clicando em PREVIEW (detalhe II da Figura 195), a peça e sua referência serão trasladadas para coincidir com a posição do Sistema de Coordenadas da Flutuante.

Para pequenos lotes, produção mais flexível, é interessante determinar manualmente a região de corte sobre a chapa (e pressionando a tecla FRAME no controle remoto com o ponteiro SHUTTER ligado para certificar-se que os cortes ocorrerão em uma área de chapa. Para usar esta coordenada flutuante, selecione FLOATING COORDINATE no menu *drop down* no topo do controle da área de trabalho, destacado no quadro em amarelo na Figura 195. O ponto de referência de início e final da tarefa (REF) será qualquer região para a qual tenha movido o cabeçote.

Figura 195 - SISTEMA DE COORDENADAS FLUTUANTE E SISTEMA DE COORDENADAS DE REFERÊNCIA DA PEÇA.



FONTE: O autor (2022).

Note que este difere da “origem” de referência da máquina. A “origem” é aquele ponto no canto direito, próximo à porta dianteira, para o qual a máquina move seu cabeçote de modo a zerar suas referências. Sempre que iniciar a máquina de corte a laser Senfeng SF1313G e abrir o software CAM CypCut, este executará a rotina de localizar a “origem” (para maiores detalhes, consulte o passo XII do capítulo 10).

### 11.3.2. Sistema de coordenadas da peça.

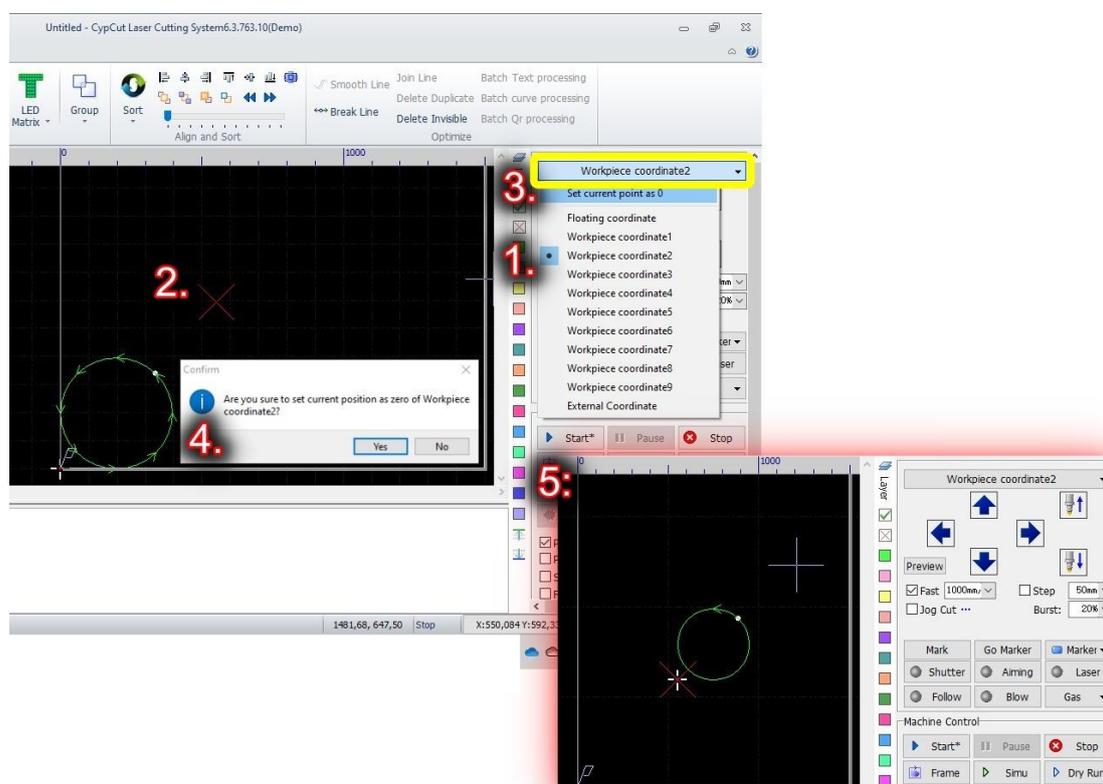
Quando se trabalha com lotes, onde se colocam chapas iguais e sempre numa mesma posição, pode ser interessante definir uma coordenada como o “ponto zero da peça”, que não será aleatório como no caso do sistema de coordenadas flutuantes.

Além do sistema de coordenadas flutuante, do ponto de referência da peça e da origem mencionados no item 11.3.1, existe o “Ponto Zero Mecânico” da máquina - em (X0, Y0) - que está no canto inferior esquerdo da mesa, pois ali está a origem do plano cartesiano reproduzido na tela. Por padrão, ao selecionar no menu *drop down* a opção “WORKPIECE COORDINATE i”, este será coincidente com o “Ponto Zero Mecânico” até que se defina uma nova posição, então para ali o cabeçote irá retornar após a finalização de uma tarefa de corte.

Para incluir posições alternativas nas posições WORKPIECE COORDINATE *i* (*i* variando de 1 a 9), basta defini-las e salvar. No menu *drop down* acima da área de

controle de trabalho, selecione o número do atalho WORKPIECE COORDINATE no qual deseja salvar esta posição alternativa (vide o detalhe 1 na Figura 196). Em seguida, navegue com o cabeçote até a posição desejada, como no detalhe 2. Voltando ao menu *drop down* acima da área de controle de trabalho, selecione agora “SET CURRENT POINT AS 0” e confirme na janela que se abrirá (detalhes 3 e 4 na Figura 196). Agora, toda vez que esteja selecionada a coordenada “WORKPIECE COORDINATE 2”.

Figura 196 - ALTERAÇÃO DA COORDENADA DA PEÇA WORKPIECE COORDINATE PARA POSIÇÕES DIFERENTES DO “PONTO ZERO MECÂNICO”.



FONTE: O autor (2022).

### 11.3.3. Botões de navegação para movimentação do cabeçote (JOG).

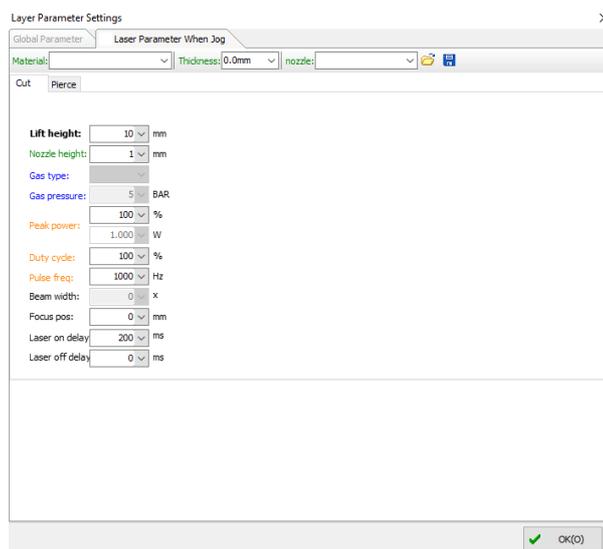
Os botões presentes na área destacada no polígono amarelo, destaque I da Figura 197, realiza a movimentação do cabeçote em X, Y e Z, da mesma forma que os botões destacados em II no controle remoto, reproduzido na região direita da Figura 197.

Logo abaixo, destacados no quadro verde, destaque III da Figura 197, estão controles de velocidade de movimentação. Se o botão de seleção FAST estiver *desmarcado*, o campo à sua imediata direita será a velocidade de deslocamento padrão em mm/s (20 mm/s no exemplo destaque IV da Figura 197). Se estiver



camadas de parâmetros, seus valores devem ser determinados de forma empírica - conforme liga do metal e sua espessura, dentre outras particularidades – com a ressalva de que no corte JOG CUT não seria relevante a qualidade ou produtividade.

Figura 198 - PARÂMETROS DE CORTE PARA A CAMADA DE CORTE JOG CUT, OU CORTE COM TRAJETÓRIA DEFINIDA MANUALMENTE.



FONTE: O autor (2022).

#### 11.3.5. Disparo do laser com o cabeçote parado para fins de marcação (BURST).

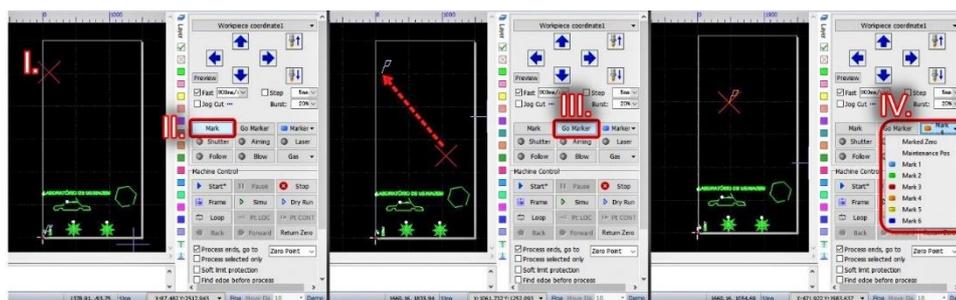
No campo BURST ajusta-se o percentual de potência do laser (em relação aos 750W máximos) que será usado quando é feito um disparo de feixe laser com cabeçote parado. Esse disparo se produz ao pressionar o botão LASER no controle remoto ou no módulo de controle de trabalho, ambos destacados em um quadrado rosa na mesma Figura 197. Os 20% em relação à potência total de 750W desta máquina de corte Senfeng 1313-G seriam, obviamente, 150W. Geralmente utiliza-se 10% a 20% de potência para marcação de chapas, que é a função habitual para justificar o uso de disparo com o cabeçote parado.

#### 11.3.6. Marcadores de posição

Quando utilizamos o sistema de coordenadas flutuantes, a referência (REF) dos gráficos de corte serão sempre o posicionamento do cabeçote. Em alguns casos, porém, é interessante ter marcadores de posição, sobretudo para se usar em conjunto com o FLOATING COORDINATES.

O uso é simples e intuitivo. Basta posicionar o cabeçote na posição que se deseja marcar (detalhe I da Figura 199) e clicar no botão MARK (detalhe II). Quanto o cabeçote estiver em uma posição aleatória e se desejar retornar ao marcador, clique em GO MARKER. É possível colocar seis diferentes marcadores, identificados por uma cor, conforme o menu *drop down* destacado no detalhe IV da Figura 199.

Figura 199 - MARCADORES DE POSIÇÃO PARA DESLOCAMENTO DO CABEÇOTE.



FONTE: O autor (2022).

### 11.3.7. Luz indicadora a laser vermelho, disparo do laser para marcação, distância calibrada da chapa no eixo Z, liberação de gás e seleção do tipo do gás de assistência.

Estes comandos diversos estão posicionados numa região central do módulo de controle de trabalho, destacado no retângulo vermelho na Figura 200.

AIMING mostra um ponteiro laser (baixíssima potência) na cor vermelha, que projeta sobre a chapa na posição exata que o cabeçote esteja posicionado.

LASER causa um disparo do laser de corte na posição em que o cabeçote esteja, com intensidade que se definiu no campo BURST.

SHUTTER interrompe emissão de laser de corte e do laser do ponteiro.

FOLLOW é a ferramenta que utiliza o sensor capacitivo para continuamente medir e corrigir a altura de superfície de chapa, corrigindo pequenas irregularidades através da movimentação do cabeçote no eixo Z. Por padrão, esta ferramenta deve ser usada durante o corte. Realizar corte sem esta correção é possível, desacionando-a, entretanto neste caso é imprescindível ter certeza que a chapa não apresenta nenhuma irregularidade superficial. Como a distância do bocal à chapa é questão de milímetro, alguma irregularidade na superfície pode causar o choque do bocal com a chapa e, eventualmente, danos físicos ao cabeçote. Ao realizar a ferramenta DRY CUT para simular o corte com a movimentação do cabeçote em X e Y - porém sem a emissão do laser nem liberação do gás de corte – por padrão o cabeçote não é movimentado em Z, entretanto é possível

BLOW abre o jato de gás de assistência. Pode ser usado para exaurir resquícios do gás anterior quando se troca o gás de assistência ou para verificar se o

gás está aberto e em pressão suficiente. Caso não esteja, um alarme irá informar que não há gás ou está em pressão insuficiente, denotando necessidade de substituir.

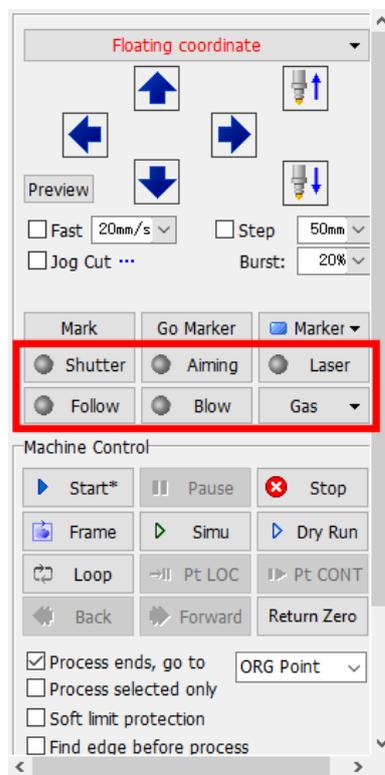
GAS é o botão de seleção do gás de assistência, oxigênio ou nitrogênio.

Há duas entradas de gases de assistência na máquina, marcados com “O<sub>2</sub>” e “N<sub>2</sub>” no painel lateral direito, na parte traseira. O ar comprimido fornecido na entrada “Air” não é usado como assistência no corte, tem função de travamento de mesa apenas.

Caso seja considerado interessante usar no corte um gás neutro como o argônio ou mesmo ar atmosférico, eles entrarão na máquina pela posição “N<sub>2</sub>” e a máquina interpretará como sendo nitrogênio simplesmente.

O oxigênio fornecido à máquina pode ter sua pressão regulada dentro do software CypCut, nos LAYERS de parâmetros, enquanto o nitrogênio será fornecido ao cabeçote na mesma pressão que sai do cilindro, não há nenhum regulador de pressão para gases conectados à entrada “N<sub>2</sub>”.

Figura 200 - COMANDOS DE PONTEIRO LASER, DISPARO DO LASER PARA MARCAÇÃO, DISTÂNCIA CALIBRADA DA CHAPA NO EIXO Z, SELEÇÃO E LIBERAÇÃO DE GÁS DE ASSISTÊNCIA.

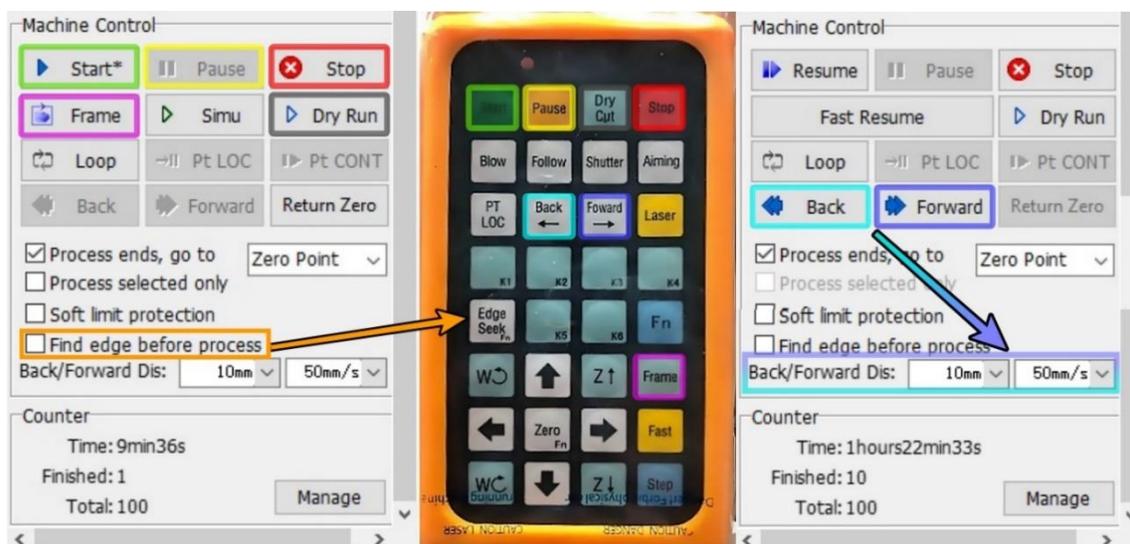


FONTE: O autor (2022).

#### 11.4. MÓDULO DE CONTROLE DE OPERAÇÕES MACHINE CONTROL.

Em seguida, na metade inferior do módulo de controle de trabalho, temos o MACHINE CONTROL, controles NC que efetivamente iniciam a operação.

Figura 201 - BOTÕES DO MACHINE CONTROL E SUAS POSIÇÕES NO CONTROLE REMOTO.

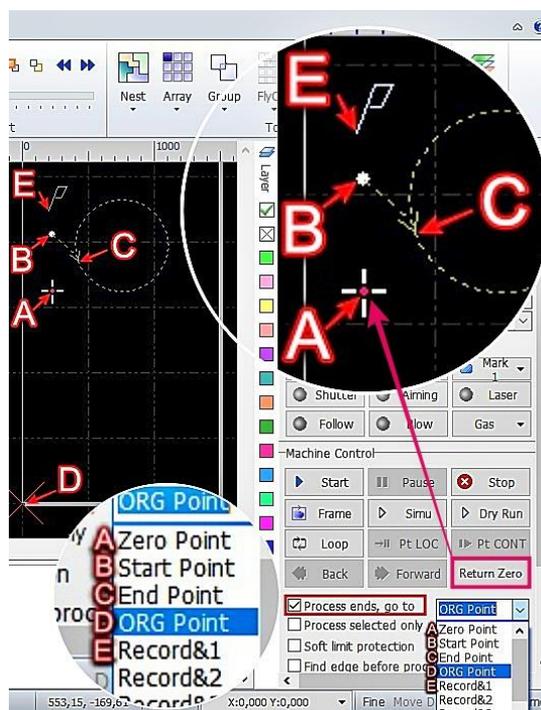


FONTE: O autor (2022).

START, PAUSE e STOP comportam-se de maneira intuitiva, destacados em verde, amarelo e vermelho na Figura 201. É boa prática pousar o dedo sobre o controle de forma que o PAUSE possa ser rapidamente acionado em casos de parada urgente.

A diferença principal entre o STOP e o PAUSE é que este último permite retomar a operação da região que interrompeu, enquanto o primeiro, STOP, aborta totalmente a operação iniciada. Ao se clicar START depois de ter clicado em STOP, o cabeçote irá retornar ao “ponto zero”, “ponto de início”, origem ou algum dos marcadores. Esta região ao qual o cabeçote irá se deslocar após finalizar a operação é definido ao marcar a opção PROCESS ENDS, GO TO e selecionar uma das opções do menu *drop down*, conforme ilustrado na Figura 202.

Figura 202 - POSICIONAMENTO DO CABEÇOTE AO FINAL DO PROCESSO.



FONTE: O autor (2022).

Em qualquer ponto, é possível retornar o cabeçote para a posição “ponto zero” clicando em RETURN ZERO, destacado no quadro magenta da Figura 202.

Clicando sobre PAUSE, o layout do MACHINE CONTROL altera-se levemente, mostrando a disposição ilustrada no quadro à direita na Figura 201. A posição anteriormente ocupada por START passa a ser ocupada pela opção RESUME, para retomar a operação, e a posição logo abaixo pelo FAST RESUME.

O botão RESUME deve ser utilizado na maioria dos casos. Ao clicar RESUME para retomar, de forma automática o software vai voltar alguns milímetros, conforme distância designada em “RESUME, STEP BACK” dentro da aba GLOBAL PARAMETERS na janela LAYERS, vide Figura 215. Se optar por FAST RESUME, o processo de corte não regredirá esta distância, mas a probabilidade de marcas no corte são bem maiores.

Os botões BACK e FORWARD são habilitados. Estes botões adiantam ou retrocedem o cabeçote no caminho descrito pela curva numa distância e velocidade previamente ajustadas no campo BACK/FORWARD DISTANCE, em destaque no quadro ciano e lilás na Figura 201. O avanço ou retrocesso se produz apenas na posição do cabeçote, sem corte. Para continuar do ponto desejado, clique em RESUME ou FAST RESUME.

Caso a operação tenha sido interrompida por algum motivo fortuito, como uma queda de energia, é possível conduzir o cabeçote até a posição do processo em que este foi interrompido. Basta iniciar um novo processo com o botão START, pausar imediatamente no início (PAUSE) e conduzir o cabeçote através do botão FORWARD

até a fase em que houve a interrupção. Em seguida, pressionando RESUME, a operação será retomada a partir dali.

#### 11.4.1. Repetição cíclica da operação de corte (LOOP).

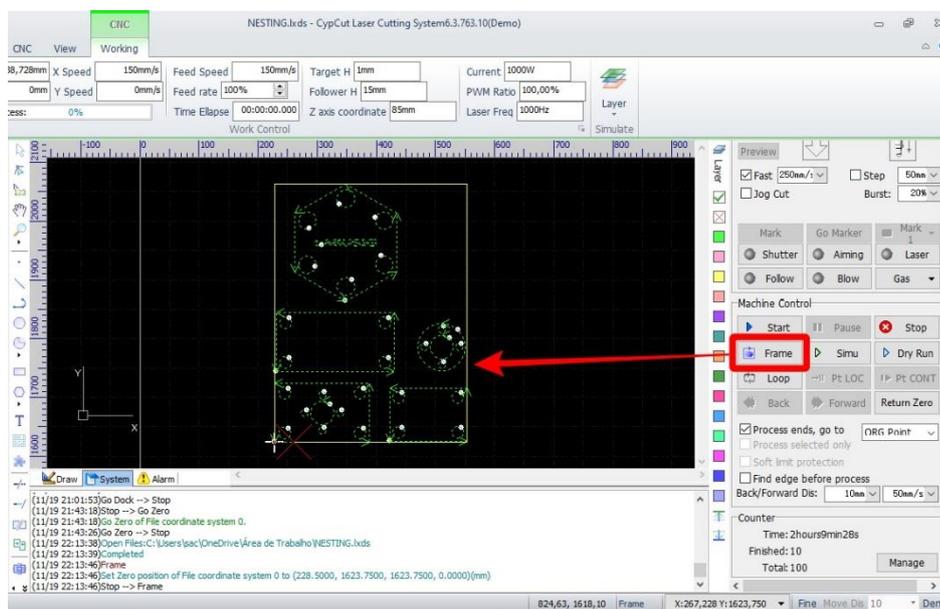
O LOOP é a repetição cíclica da operação de corte, partindo sempre do mesmo “ponto zero”. Em uma janela LOOP SET configura-se o número de repetições da operação e o intervalo entre elas. Não é uma ferramenta frequentemente utilizada pois uma tarefa a ser repetida de forma automática e periódica tem que prever uma solução externa - também automática - para a substituição da chapa.

#### 11.4.2. Delimitação visual da área prevista de corte sobre a chapa com o indicador de laser vermelho (FRAME).

O botão FRAME, por outro lado, é um dos mais utilizados, sobretudo quando se usa o sistema de coordenadas flutuantes que assume o “ponto zero” em qualquer lugar que o cabeçote seja deslocado. Por essa flexibilidade, é sempre importante verificar se a área de corte estará inteiramente dentro da chapa. Suas posições, tanto no painel MACHINE CONTROL quanto no controle remoto, estão destacados em púrpura na Figura 201.

Ao clicar no botão FRAME, o cabeçote irá descrever um retângulo cujo perímetro emoldura a área necessária para realizar o corte dos gráficos que compõem esta operação de corte, seja apenas uma simples forma, várias formas agrupadas ou dezenas de repetições devido ao NESTING. Na representação gráfica da mesa mostrada na Figura 203, o perímetro do retângulo está mostrado em amarelo. Olhar este retângulo na área gráfica do software não tem nenhum significado, pois o objetivo é olhar diretamente na chapa. Primeiro acione o botão AIMING para que o ponteiro laser vermelho seja mostrado exatamente na posição de incidência do feixe de laser de corte. Em seguida, abra a porta dianteira da máquina de corte para observar a chapa que está sobre a mesa de corte. Posicione o cabeçote na região desejada para o “ponto zero” (se está utilizando FLOATING COORDINATES) e pressione o botão FRAME no MACHINE CONTROL ou no controle remoto. Observe o perímetro que delimita a região da operação de corte descrito pelo ponteiro laser para certificar-se que está inteiramente dentro área da chapa.

Figura 203 - REPRESENTAÇÃO GRÁFICA DO PERÍMETRO DA ÁREA DE CORTE, BOTÃO FRAME.



FONTE: O autor (2022).

Outras opções nesta região do MACHINE CONTROL são:

#### 11.4.3. Processar somente os cortes selecionados (PROCESS SELECTED ONLY).

De modo geral, todos os cortes representados graficamente como desenhos que estejam sendo mostrados na tela irão compor uma operação de corte. No exemplo da Figura 203, o software somente dará por concluída a operação de corte quando todas as cinco peças ali mostradas - cada uma delas definida pelo agrupamento de formas que representam recortes internos e contornos – tiver sido finalizada. Ao marcar PROCESS SELECTED ONLY, entretanto, o software entenderá que a operação de corte consistirá apenas das figuras selecionadas. Uma vez recortada a(s) forma(s) selecionada(s), o software dará por finalizada aquela tarefa.

#### 11.4.4. Busca das bordas da chapa com o sensor capacitivo antes do início da operação de corte (FIND EDGE BEFORE PROCESS).

Torna o processo automático de verificação do alinhamento da chapa pelo sensor capacitivo BCS100 obrigatório antes de iniciar a operação. Maiores detalhes em sobre a busca de bordas com o sensor capacitivo, consulte o subitem 11.2.4.1.

## 11.5. MENU DE PARAMETRIZAÇÃO DO CORTE POR MEIO DE CAMADAS (LAYER).

Clicando no botão LAYER no menu vertical entre o módulo de controle de trabalho e a área gráfica de representação do plano XY da mesa, temos acesso à janela LAYER PARAMETER SETTINGS. Esta janela é dividida em duas abas: em PIERCE são configurados parâmetros usados para a perfuração inicial da chapa em cada START POINT ou LEAD IN, portanto. Já na aba CUT são os parâmetros usados durante o corte após a perfuração. Os parâmetros de corte que condicionam o processo, discutidos na seção secundária 7.4, são aqui configurados.

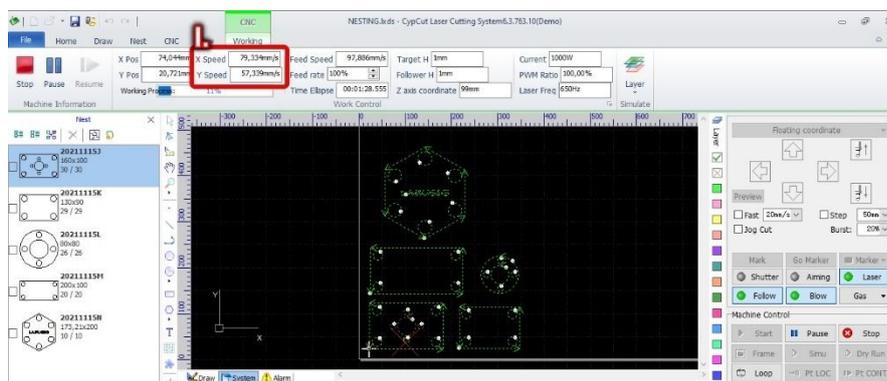
### 11.5.1. Parâmetros válidos para corte desenvolvido, após a perfuração inicial (janela LAYER, aba CUT).

Iniciando pela parametrização do corte, na aba CUT da janela LAYER PARAMETER SETTINGS (vide destaque II da Figura 207), os parâmetros aqui informados serão aplicados ao corte desenvolvido, isto é, produzido pela incidência do foco do laser e a movimentação do cabeçote, o que só é possível após a perfuração inicial que permitirá a ejeção do fundido pela superfície traseira da chapa.

Os parâmetros, como mostrado na Figura 207, são:

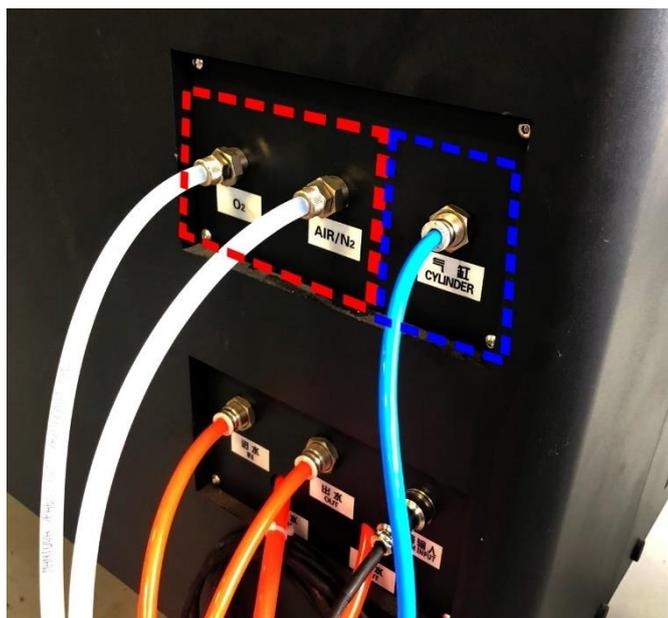
- Velocidade de corte (CUT SPEED) [mm/s] – representa a *máxima* velocidade obtida pela interpolação em X e Y. Esta velocidade não é constante, há constante aceleração e desaceleração. Esta velocidade decomposta no plano é mostrada a cada instante do processo de corte, como ilustrado pela Figura 204;
- Altura de movimentação (LIFT HEIGHT) [mm] – ao movimentar o cabeçote entre um corte e outro, o cabeçote será elevado no eixo Z nesta magnitude;
- Altura do bocal durante o corte (NOZZLE HEIGHT) [mm] – a distância entre a chapa e o bocal, mantido com auxílio do sensor capacitivo para compensar pequenas irregularidades de planicidade;
- Tipo de gás de assistência (GAS TYPE) – selecione aqui qual das duas entradas de gás (O<sub>2</sub> ou N<sub>2</sub>) que será dirigido ao bocal de corte. As duas entradas estão na lateral direita, na parte traseira, ilustrado na Figura 205. Caso seja utilizado ar comprimido como gás de assistência, deve ser conectado na entrada N<sub>2</sub> em substituição ao cilindro de nitrogênio. Para todos os efeitos, o software considerará o ar comprimido como nitrogênio, lembrando que neste caso a pressão do nitrogênio ou ar comprimido disponibilizado nessa entrada será a mesma pressão liberada no bocal, sem nenhuma regulagem posterior.

Figura 204 - VELOCIDADE INSTANTÂNEA DE CORTE, DECOMPOSTA NO PLANO XY.



FONTE: O autor (2022).

Figura 205 - ENTRADA LATERAL DE GASES. NA ÁREA MARCADA COM O POLÍGONO VERMELHO, OS GASES UTILIZADOS PARA CORTE, SENDO OXIGÊNIO À ESQUERDA E DE NITROGÊNIO (OU AR COMPRIMIDO) À DIREITA. MARCADO COM O POLÍGONO AZUL, A ENTRADA CYLINDER, DE AR COMPRIMIDO LIMPO E SECO USADO PARA O CILINDRO DE APERTO DA BANCADA.

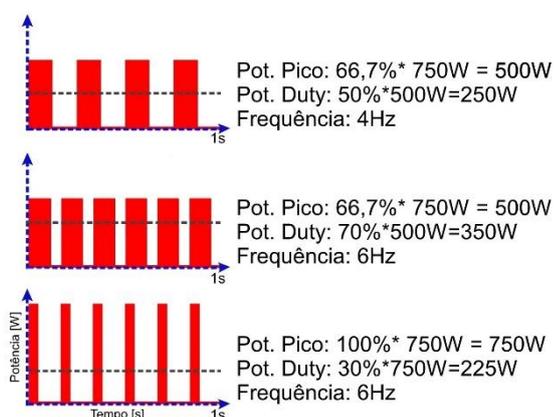


FONTE: O autor (2022).

- Pressão do gás de assistência (GAS PRESSURE) [bar] – para o oxigênio fornecido na entrada específica - O<sub>2</sub>, mostrada na Figura 205 - sua pressão será regulada a este valor por uma válvula proporcional. Caso o gás de assistência esteja sendo fornecido pela entrada N<sub>2</sub> (nitrogênio, ar comprimido, argônio) deve ser informada a pressão que está regulada no cilindro/rede, mas a máquina não fará nenhum ajuste de pressão;
- Potência de pico (PEAK POWER) [% W] e potência de corte (DUTY CICLE) [% W];

- O fornecimento da emissão laser pulsado obedece uma onda quadrada. O conceito de PEAK POWER, DUTY POWER e FREQUENCY estão ilustrados na Figura 206.

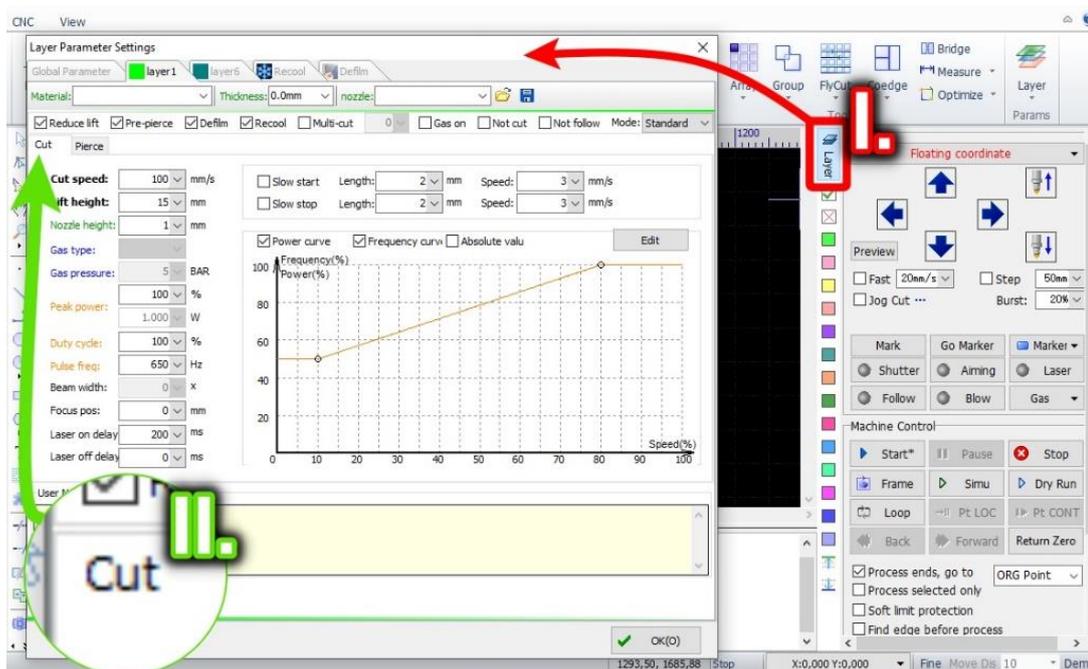
Figura 206 - REPRESENTAÇÃO GRÁFICA DE EMISSÃO PULSADA DA RADIAÇÃO LASER, CONCEITUANDO POTÊNCIA DE PICO, POTÊNCIA DE CORTE (DUTY) E FREQUÊNCIA.



FONTE: O autor (2022).

- Ponto focal (FOCUS POS ou CUT FOCUS, dependendo da versão) [mm] - É a localização em relação à superfície superior da chapa. Para colocar o foco dentro da espessura da chapa ou em sua superfície inferior, deve-se informar valores negativos;
- LASER ON DELAY [ms] - retardo entre o posicionamento do cabeçote na altura de corte (CUT HEIGHT) e o início disparo do laser e liberação do gás.
- LASER OFF DELAY [ms] - retardo entre o final do deslocamento e a interrupção do feixe laser, para compensar retardo do servo motor e assegurar qualidade de corte.
- SLOW START [mm] e [mm/s] – destinado a acontecer durante linha de entrada (LEAD IN), pela distância (LENGTH) designada o cabeçote irá movimentar-se a uma menor velocidade (SPEED), também ali determinada.
- SLOW STOP [mm] e [mm/s] – se marcada a opção, a operação final do corte, idealmente em LEAD OUT, ocorrerá a menor velocidade.

Figura 207 - JANELA DE PARAMETRIZAÇÃO EM CAMADAS, LAYER PARAMETER SETTINGS.

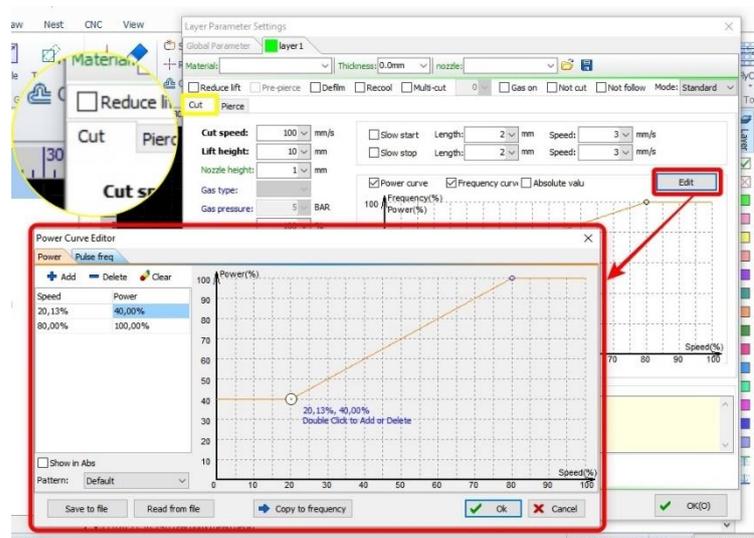


FONTE: O autor (2022).

#### 11.5.1.1. Edição de curva de potência (POWER CURVE EDITOR).

A velocidade de corte diminui drasticamente em mudanças direcionais, como ao recortar cantos, então é conveniente atenuar a potência incidente quando a velocidade diminui para evitar “queimar” os cantos. O gráfico central, marcando as opções POWER CURVE e FREQUENCY CURVE, mostra o comportamento da potência em relação à velocidade interpolada no plano XY (percentual ou absoluta). Para acesso à edição, basta clicar no botão EDIT, conforme destaque da Figura 208, e manipular diretamente os pontos no gráfico, salvando em seguida.

Figura 208 - EDIÇÃO DA CURVA DE POTÊNCIA EM FUNÇÃO DA VELOCIDADE DE CORTE.



FONTE: O autor (2022).

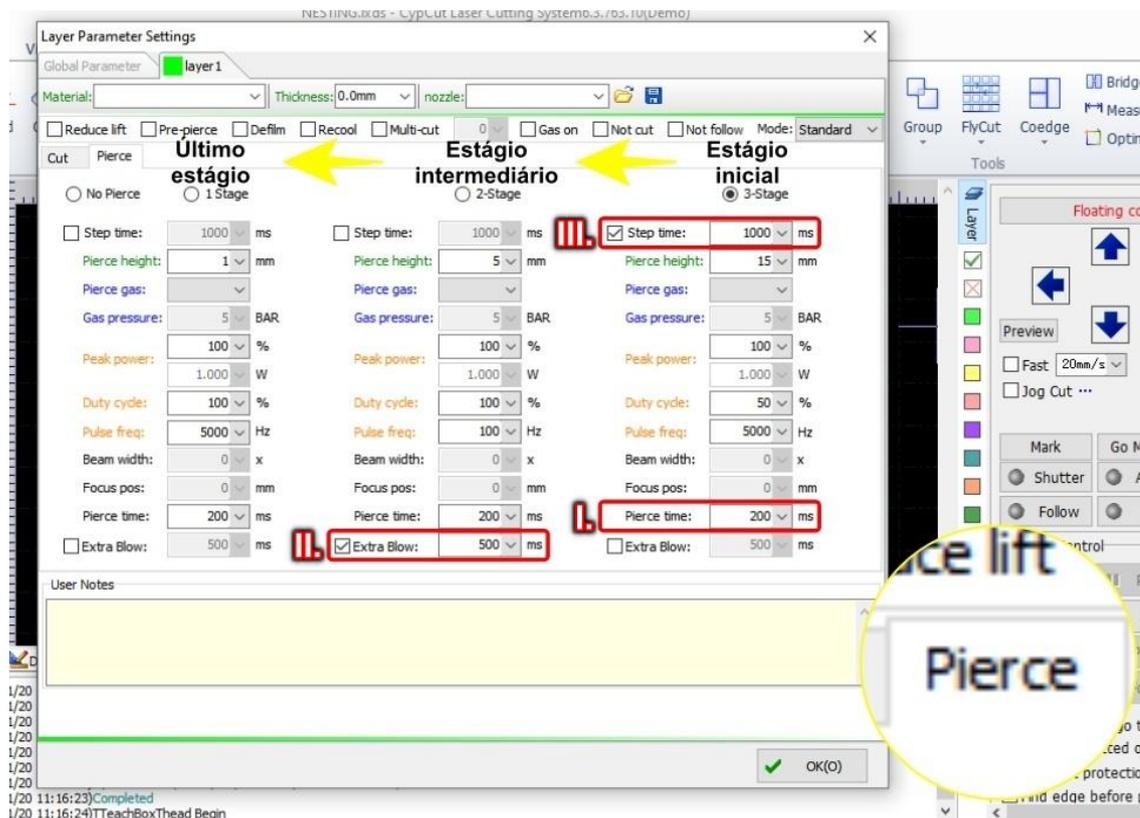
#### 11.5.2. Parâmetros válidos para obter a perfuração inicial (janela LAYER, aba PIERCE).

Ao início de cada curva a ser cortada - idealmente na região de LEAD IN, fora da peça - é necessário fazer um furo passante para que a ejeção do metal fundido ocorra pela região traseira da chapa. Até que se obtenha esse furo passante, há perigo muito maior de que o metal fundido espirre sobre o bocal e a lente, então parâmetros específicos para perfuração podem ser definidos.

Clicando na aba PIERCE, há um botão de seleção com as opções "NO PIERCE", "1 STAGE", "2 STAGES" ou "3 STAGES".

Chapas de espessura realmente muito pequenas podem ser cortadas sem preocupar-se em configurações especiais para a perfuração, mas à medida que a espessura da chapa aumenta podem ser necessários vários estágios para obter a perfuração de forma ideal.

Figura 209 - PARÂMETROS ESPECÍFICOS PARA PERFURAÇÃO DA CHAPA EM MÚLTIPLOS ESTÁGIOS.



FONTE: O autor (2022).

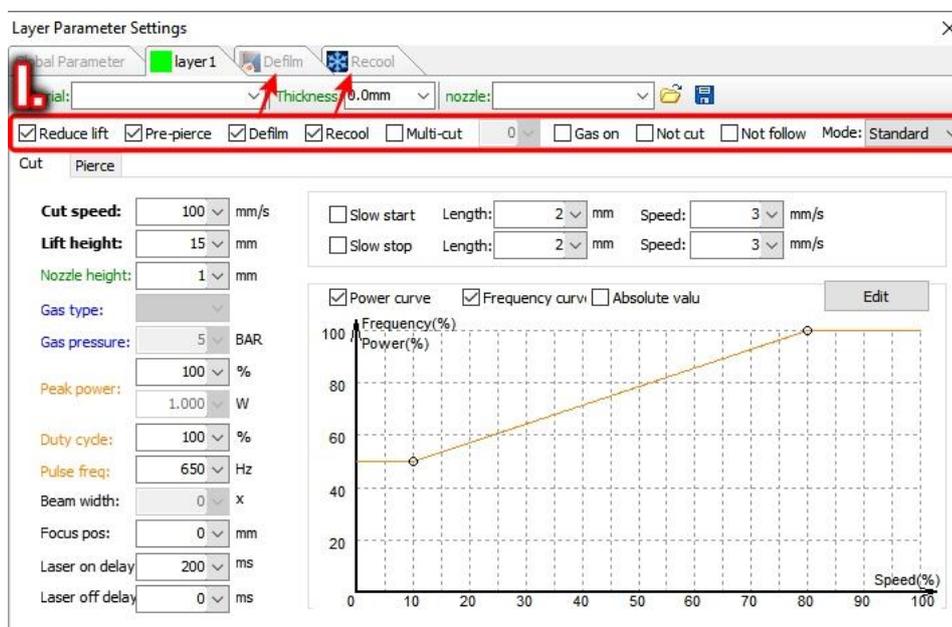
Os parâmetros são semelhantes àqueles configuráveis na aba CUT. As diferenças principais residem em:

- **PIERCE TIME**, destaque I da Figura 209, é o tempo efetivo de emissão do laser à altura **PIERCE HEIGHT** definida em cada estágio, sem movimentação do cabeçote em Z;
- **EXTRA BLOW** é um intervalo opcional de liberação do gás de assistência sem emissão do laser, destinado ao resfriamento da região de corte. Para utilizá-lo, marque a caixa de seleção e defina o tempo destacado em II da Figura 209;
- **STEP TIME** (ou **PROGRESSIVE TIME**), opcional, é usado para se definir com exatidão o intervalo de movimentação do cabeçote no eixo Z, entre o **PIERCE HEIGHT** do estágio atual até altura do cabeçote para o próximo estágio. Para utilizá-lo, marque a caixa de seleção e defina o tempo na região destacada III da Figura 209.

### 11.5.3. Opções especiais do processo.

A parametrização de corte tem ainda mais funções especiais que podem ser selecionadas marcando a opção desejada na barra localizada no detalhe I da Figura 210.

Figura 210 - PARÂMETROS ESPECIAIS.

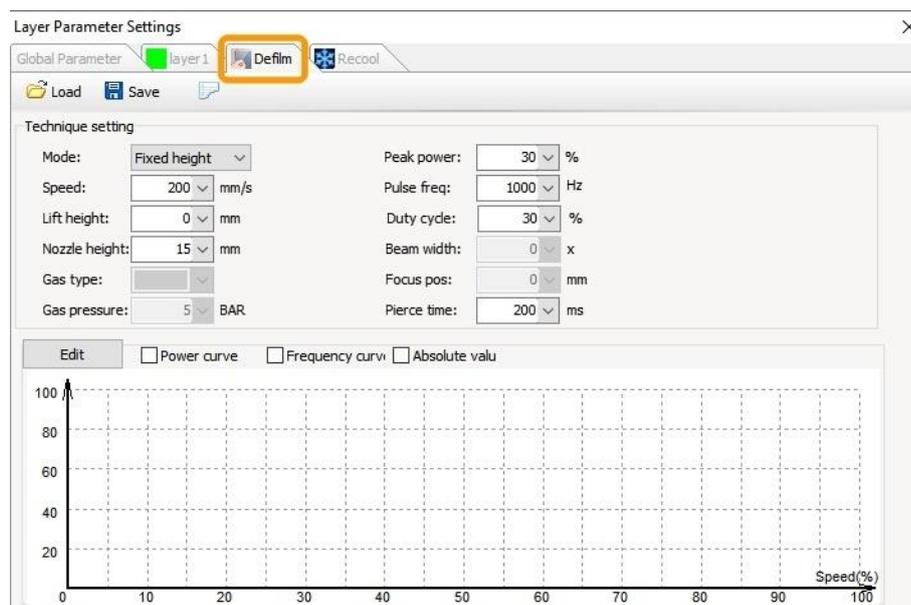


FONTE: O autor (2022).

### 11.5.3.1. Vaporização de película polimérica (DEFILM).

Ao processar aço inoxidável e outros aços especiais, é comum que venham cobertos por uma película polimérica de proteção. A ferramenta DEFILM irá vaporizar esta película para evitar que sua presença prejudique a qualidade de corte. Conforme exemplo mostrado com destaque DEFILM na Figura 212, todos os gráficos serão percorridos previamente a uma potência mais baixa (no exemplo, 300W, 30% da potência máxima de 1000W) com objetivo único de vaporizar a película polimérica superficial. Ao marcar esta opção na barra localizada no detalhe I da Figura 210, abre-se uma nova aba na janela LAYER PARAMETER SETTINGS para definir a técnica de processamento da vaporização. Como os parâmetros são de conceito comum ao processo, recomenda-se consultar o fabricante pela técnica de vaporização ou determinar por meios empíricos. Será o primeiro passo a ser efetivado no corte de uma peça, todas as curvas que compõem a peça sendo processada serão percorridas com o processo de DEFILM antes de prosseguir para as perfurações e cortes da chapa.

Figura 211 - CONFIGURAÇÃO DA TÉCNICA DE VAPORIZAÇÃO DE PELÍCULA DE PROTEÇÃO.

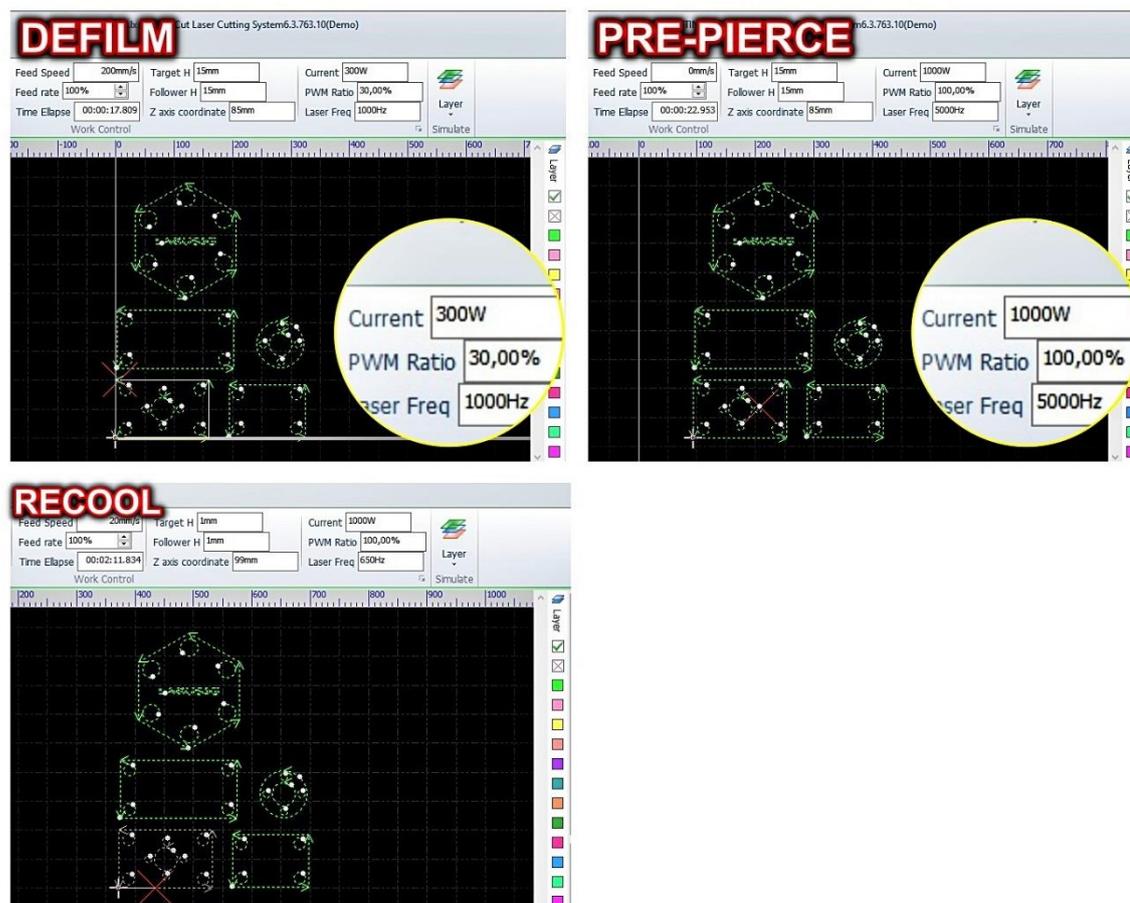


FONTE: O autor (2022).

#### 11.5.3.2. Perfuração de todos os furos passantes como tarefa prévia ao corte (PRE-PIERCE).

Marcando esta opção, todos os furos passantes necessários ao início do corte de cada curva que compõem a peça que está sendo processada (representados pelos pontos brancos no gráfico de cada peça) serão perfurados antes de voltar à referência da peça e iniciar o corte. Depois de realizar os estágios de perfuração em cada ponto START POINT, com ou sem LEAD IN, o processo voltará à referência da peça que está sendo processada para só então fazer o corte das curvas representadas por gráficos. Conforme exemplo mostrado com destaque PRE-PIERCE na Figura 212, o software comanda a máquina a realizar cada um dos estágios programados na aba PIERCE para obter o furo passante em cada START POINT da peça que está sendo processada. Seria o segundo passo a ser efetivado no corte de uma peça (seguindo ao processo de DEFILM, se selecionado), quando todas as perfurações necessárias para a peça sendo processada sejam realizadas antes de prosseguir para o corte.

Figura 212 - FERRAMENTA DE VAPORIZAÇÃO DE PELÍCULA PROTETIVA, PERFURAÇÃO PRÉVIA E PASSE DE RESFRIAMENTO.

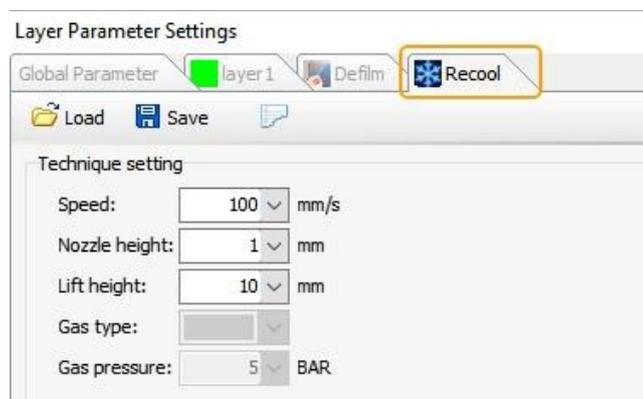


FONTE: O autor (2022).

### 11.5.3.3. *Passe adicional para resfriamento (RECOOL).*

Ferramenta que resfria o corte recém-aberto. Após realizar o corte de uma curva fechada, esta ferramenta fará o cabeçote percorrer mais uma vez a curva recentemente cortada apenas para resfriá-la, isto é, apenas com liberação do gás de assistência e sem incidência de laser. Somente após percorrer pela segunda vez o recorte interno ou contorno em questão é que o cabeçote chegará ao END POINT daquela curva, para então ser trasladado ao START POINT da curva seguinte. Ao marcar esta opção na barra localizada no detalhe I da Figura 210, abre-se a aba RECOOL na janela LAYER PARAMETER SETTINGS para definir parâmetros de resfriamento, conforme ilustrado na Figura 213.

Figura 213 - CONFIGURAÇÃO DA TÉCNICA DE RESFRIAMENTO DE CORTE RECÉM REALIZADO (RECOOL).

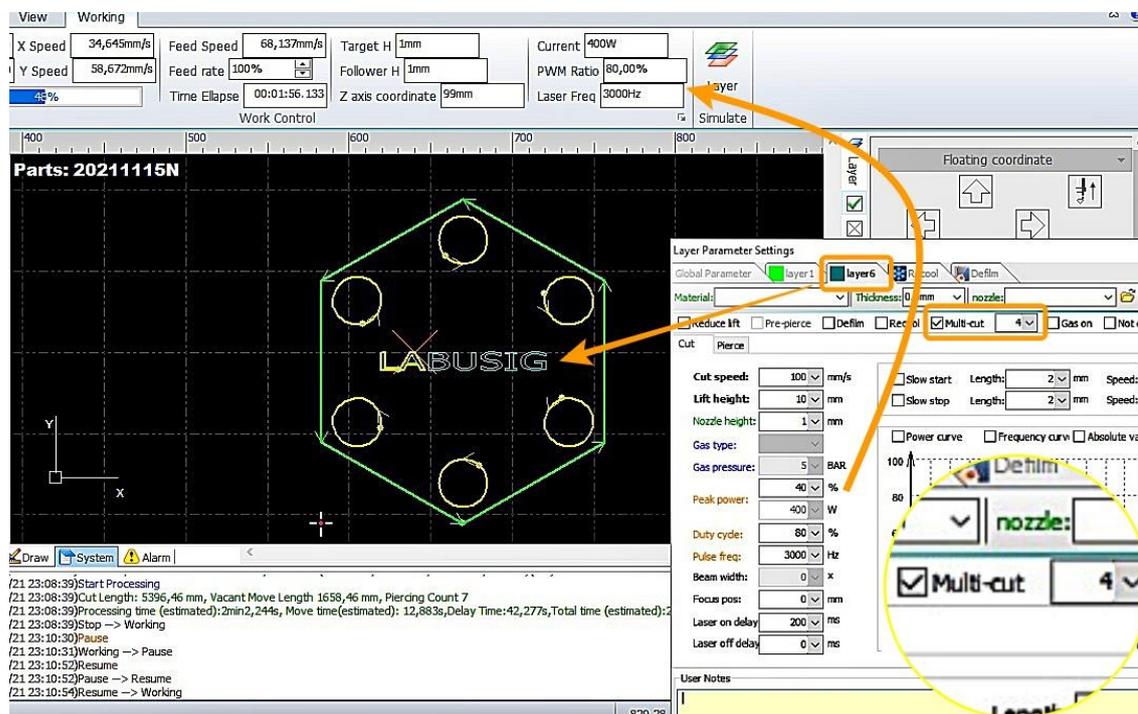


FONTE: O autor (2022).

#### 11.5.3.4. Passes múltiplos para marcação profunda (MULTI-CUT).

Apesar do nome dado à ferramenta, MULTI-CUT é destinado à marcação e não ao corte. Os gráficos a serem marcados sobre a peça devem estar em uma camada de parâmetros exclusivo para tarefas de marcação, cuja determinação pode ser feita empiricamente por meio de testes com o metal. Múltiplos passes, conforme quantidade especificada em MULTI-CUT, são realizados sucessivamente em cada curva fechada do gráfico antes de passar à curva seguinte. A Figura 214 ilustra a utilização da ferramenta na gravação de um texto.

Figura 214 - MARCAÇÃO DE PEÇA A LASER COM MÚLTIPLOS PASSES, FERRAMENTA MULTICUT.



FONTE: O autor (2022).

### 11.5.3.5. Outras opções especiais de processo.

Movimentação curta em altura reduzida (REDUCE LIFT) - marcando esta opção, o cabeçote não subirá à altura definida LIFT HEIGHT para movimentos curtos, fará a movimentação permanecendo na altura de corte (NOZZLE HEIGHT).

GAS ON – marcando esta opção, durante toda a execução daquela camada (LAYER) o gás será expelido continuamente, isto é, o software comanda a máquina a não fechar os gases durante a movimentação de uma curva de corte à próxima.

NOT CUT – desabilita o corte naquela camada.

NOT FOLLOW – desabilita os movimentos do cabeçote no eixo Z. Atenção: irá emitir radiação laser e liberar gás de assistência em posição de cabeçote alta (LIFT HEIGHT), assim que o uso dessa função dificilmente é justificável.

MODE – a orientação é manter em modo STANDARD. As outras opções FIXED HEIGHT - em que o corte ocorrerá a uma altura fixa sem a função FOLLOW do sensor capacitivo agindo no eixo Z – ou OUT OF PLATE, que inicia e termina o corte fora da chapa, são ambos para usuários avançados pois o risco de danificações ao equipamento é altíssimo.

#### 11.5.4. Parâmetros globais e seleção do sistema de unidades (aba GLOBAL PARAMETERS na janela LAYER PARAMETER SETTINGS)

Outra possibilidade na janela de LAYER PARAMETER SETTINGS é alterar parâmetros globais,

O maior destaque dessa aba GLOBAL PARAMETERS é a alteração de unidades, destacadas no quadro de cor laranja na Figura 215.

A maioria dos outros parâmetros globais, por sua vez, não devem ser alterados sem perfeito conhecimento dos efeitos e consideração das consequências.

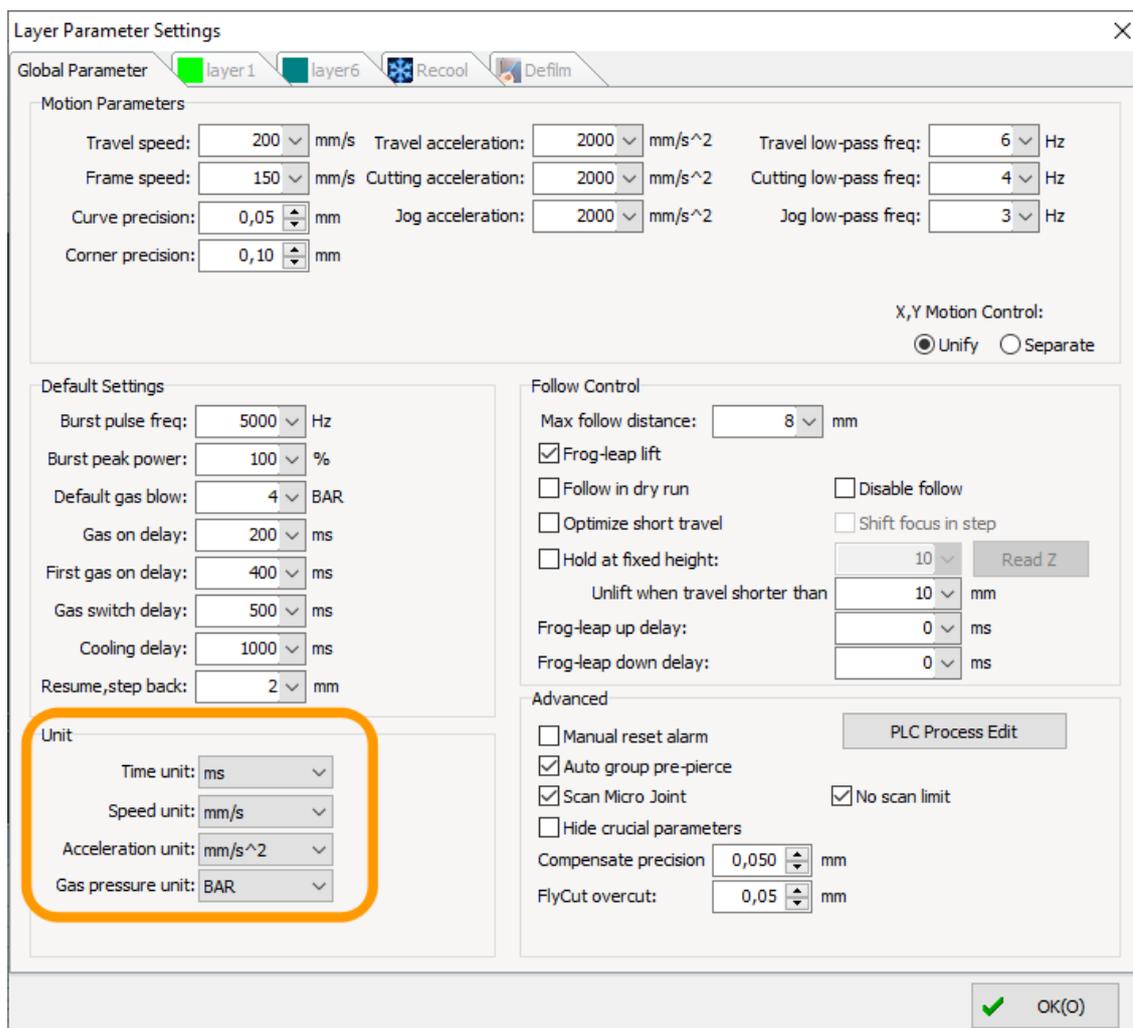
No terço superior, podemos alterar:

- Velocidade de movimentação automática entre os cortes TRAVEL SPEED;
- Aceleração da movimentação automática, de obediência aos botões de movimentação ou aceleração durante o corte TRAVEL/JOG/CUT ACCELERATION;
- Frequência passa-baixa. É a derivada da aceleração em relação ao tempo,  $dA/dt$ . Quanto maior a frequência, maior  $dA/dt$ . Em campos distintos, pode-se alterar  $dA/dt$  na movimentação automática, na obediência aos botões de movimentação ou de corte TRAVEL/JOG/CUT LOW-PASS FREQUENCY.

Alterar estes valores pode danificar os mecanismos de movimentação.

Precisão de curva e de cantos CURVE/CORNER PRECISION também podem ser refinados em GLOBAL PARAMETERS, porém com perdas de velocidade que, ademais, devem ser consideradas para evitar queimas dos cantos, através do gráfico da curva potência X velocidade.

Figura 215 - ABA DE PARÂMETROS GLOBAIS, COM DESTAQUE A ALTERAÇÕES DE UNIDADES.



FONTE: O autor (2022).

No terço central, à esquerda, temos o quadro DEFAULT SETTINGS.

Neste quadro podem ser alterados a frequência padrão de emissão do laser, potência de pico do disparo "burst", com o cabeçote parado, geralmente usado em marcação. Esse valor de potência de pico será diminuído percentualmente pelo valor previsto no campo BURST, este localizado no módulo de controle de trabalho, destaque III da Figura 197. Outras configurações modificáveis aqui são a pressão padrão de disparo do gás mediante o uso do botão BLOW (DEFAULT GAS BLOW) e atrasos de liberação do gás também podem ser alterados aqui.

Interessante conhecer a função do "RESUME, STEP BACK". Ao clicar em RESUME, o software regressará a distância aqui determinada para então retomar o corte, de forma a evitar distorções à qualidade de corte que podem ocorrer se não houver esse pequeno retorno. Essa é a diferença entre os botões RESUME e FAST RESUME nos botões do módulo de controle de trabalho (consulte a Figura 201).

No quadro FOLLOW CONTROL são configurações que se aplicam à movimentação do cabeçote no eixo Z, evitando choques com a chapa através da calibração do sensor de capacitância cada vez que se coloca uma chapa. Como o risco de choque com a chapa é alto pela incorreta configuração, recomenda-se não alterar nada sem buscar maiores referências. Como exceção, é interessante explicar a função FROG-LEAP LIFT, em que as movimentações do cabeçote entre duas curvas de corte no plano XY ocorrem enquanto o cabeçote levanta em Z, da altura NOZZLE HEIGHT de corte para a altura LIFT HEIGHT de movimentação. Se FROG-LEAP LIFT não estiver selecionado, o cabeçote vai primeiro subir à altura LIFT HEIGHT para só então movimentar-se em XY, o que diminui a velocidade do processo.

No quadro ADVANCED, no terço inferior direito, é possível optar por:

MANUAL RESET ALARM – quando um alarme é disparado, somente a intervenção manual do usuário para rearmá-lo permitirá a continuidade do processo;

AUTO GROUP PRE-PIERCE – conforme explicado na função PRE-PIERCE dentro das configurações especiais da janela de camada de parâmetros <FAZER O LINK>, a perfuração prévia de todos os START POINTS ocorre peça a peça (ou grupo a grupo). Isso significa que os furos passantes, quando furados previamente pela ferramenta PRE-PIERCE, são feitos apenas naquela peça em que o software está trabalhando. Terminada a furação daquela peça em processamento, o software fará o seu corte. Ao iniciar a próxima peça (ou gráficos unidos por GROUP), novamente fará os furos passantes e, depois, corte. Este comportamento é pelo fato de que esta opção AUTO GROUP PRE-PIERCE, por padrão, está marcada. Se desmarcar esta opção, o software fará o *PRE-PIERCE em TODA A CHAPA, de todas as peças, grupos, nesting*, antes de voltar ao ponto zero e, só então, começar a cortar.

COMPENSATE PRECISION – a compensação da largura da abertura do *kerf* (frente de corte) costuma a ser algo de décimos ou mesmo centésimos de milímetros, sobretudo se o corte foi bem configurado produzir um corte estreito que permita, entretanto, a completa ejeção do metal fundido pela superfície traseira. Conforme as tolerâncias dimensionais que precisam ser atingidas, um maior refino na precisão dessa compensação pode ser obtido alterando o valor de COMPENSATE PRECISION, entretanto o processo cobrará esta maior precisão em tempos maiores de processamento.

FLYCUT OVERCUT – ao realizar FLYCUT, sobretudo em formas retangulares, existe a possibilidade de que algumas peças não caiam da chapa, mas permaneçam unidas por uma pequena “ponte” de material. Para evitar este efeito indesejado, o FLYCUT prevê um sobrecorte para evitá-lo. O valor padrão de 0,05 mm pode ser alterado aqui.

Edição do controle lógico de processo (PLC PROCESS EDIT) – prevendo possível manutenção futura a ser realizada por pessoal treinado, menciono a senha padrão “61259023”, obtida em contato com a SENFENG. Estes parâmetros não devem jamais ser alterados sem conhecimento e revisão profunda. Sua alteração pode levar a danos sérios e irreversíveis à máquina.

Essas configurações globais tiveram seus valores finamente ajustados pelo fabricante pensando em velocidade de processo, qualidade de corte e durabilidade da máquina. Como já foi ressaltado em mais de uma ocasião, somente devem ser alteradas se o operador tiver perfeita noção das consequências. Uma edição equivocada do PLC Process Edit é ainda mais grave e pode ser irreversível.

## 12 CONCLUSÃO

A compreensão das propriedades físico-químicas da matéria no século XIX e o entendimento da física quântica no início do século XX permitiu domínio e manipulação das propriedades da radiação, sua seleção e amplificação, tendo diversos usos sido desenvolvidos.

Particularmente como processo de usinagem, por ser um processo inerentemente CNC, sem desgaste de ferramenta e de baixa manutenção, o corte a laser encontra seu habitat ideal nas indústrias 4.0.

O desafio maior para o bom uso desta tecnologia é a determinação dos parâmetros ideais de corte, que combinem qualidade, produtividade, economia dos gases de corte e da matéria prima.

Por ser a tecnologia de corte a laser *de fibra* ainda recente e, apesar disso, já a mais difundida no mercado (demonstrado pela Figura 88), mostra-se muito acertada sua escolha de tecnologia para a máquina de corte a laser Senfeng SF 1313G 750W adquirida durante a reforma e modernização do Laboratório de Usinagem do Departamento de Engenharia Mecânica da UFPR no ano de 2021, que tem por seu coordenador o Prof. Dr. Dalberto Dias da Costa.

Fica como sugestão de futuros trabalhos a realização de ensaios com diferentes ligas metálicas, chapas de diferentes espessuras, buscando aprimorar técnicas e recomendar parâmetros de corte para obter máxima qualidade de aresta aliada com uma produtividade relevante à aplicação industrial, ensaios válidos para máquinas de corte a laser de fibra de 750W, têm grande atratividade para pequenas e médias indústrias por sua imensa versatilidade. Reunir sugestões de parâmetro de corte que se apliquem ao corte a laser de fibra é relevante pois trata-se de uma tecnologia que se difundiu sobretudo na última década, sendo que a literatura existente sobre o corte a laser é muito extensa, porém a maior parte foi publicada quando sequer existia emissão a laser de fibra ótica. Conforme estudos consultados e referenciados sobretudo no Capítulo 8 - LASER DE FIBRA - a tecnologia de amplificação da radiação no sistema laser utilizado pode representar significativas alterações de comportamento e resultado do corte entre as principais tecnologias referenciadas - laser a gás, laser de estado sólido e laser a fibra.

### 13 BIBLIOGRAFIA

- AFANASIEVA, L. E., BARABONOVA, I. A., RATKEVICH, G. V., NOVOSELOVA, M. V., M., & R., G. (2016). Surface micromorphology and abrasive wear resistance of tool steel after gas-laser cutting. *Journal of Surface Investigation. X-Ray, Synchrotron and Neutron Techniques*, 10, 1231–1238.
- AGGOUNE, S., AMARA, E., & DEBIANE, M. (2012). Effects of velocity and nature of the inert assist gas on the stainless steel laser cut quality. *6ª Conferência Internacional sobre Teoria e Aplicações da Engenharia Térmica*. Istambul, Turquia.
- Albert Einstein – Prêmio Nobel de Física de 1921*. (1921). Fonte: NobelPrize.org Nobel Media AB: <https://www.nobelprize.org/prizes/physics/1921/einstein/facts/>
- ARBULU, R., & RIGUES, R. (26 de 08 de 2021). *SpaceX cumpre promessa e adiciona lasers aos satélites da Starlink*. Fonte: Olhar Digital: <https://olhardigital.com.br/2021/08/25/ciencia-e-espaco/spacex-leva-tecnologia-a-laser-para-a-starlink/>
- Arthur Holly Compton – Prêmio Nobel de Física de 1927*. (1927). Fonte: NobelPrize.org. Nobel Media AB: <https://www.nobelprize.org/prizes/physics/1927/compton/facts/>
- ASHOORI, V., SHAYGANMANESH, M., & RADMARD, S. (31 de Outubro de 2012). *Heat Generation and Removal in Solid State Lasers*. Fonte: IntechOpen Limited: <https://www.intechopen.com/books/an-overview-of-heat-transfer-phenomena/heat-generation-and-removal-in-solid-state-lasers>
- ASTARITA, A., GENNA, S., LEONE, C., MINUTOLO, C., PARADISO, V., & SQUILACCE, A. (2014). Laser Cutting of Aluminium Sheets with a Superficial Cold Spray Titanium Coating. . . 10. *Key Engineering Materials*, 611-612 , 794-803.
- Atlas Copco. (Maio de 2019). 2.2 Fluxo de ar. Em *Manual de Instruções dos Compressores de Parafuso Rotativo com Injeção de Óleo G2-7* (p. 11).
- BADONIYA, P. (2018). CO2 Laser Cutting of Different Materials – A Review. *International Journal of Engineering and Technical Research*. 5., 2103-2115. .
- BASOV, N. G., & PROKHOROV, A. M. (1954). Application of molecular beams to the radio spectroscopic study of the rotation spectra of molecules. *Zhurnal Eksperimentalnoi i Teoreticheskoi Fiziki*, 27, p. 431.
- BEYER, E., MAHRLE, A., LÜTKE, M., STANDFUSS, J., & BRUECKNER, F. (2012). Innovation in high power fiber laser applications. *Progress in Biomedical Optics and Imaging - Proceedings of SPIE*, vol. 8237, 26-.
- BLOEMBERGEN, N. (2001). Laser: The Inventor, the Nobel Laureate, and the Thirty-Year Patent War. SCHUSTER, Nick Taylor Simon. *Physics Today*, 54, 9, 56–56.

- BOHR, N. (1934). *Atomic Theory and the Description of Nature*. Cambridge, R.U.: Cambridge University Press.
- BROD, D., BRASIER, R. E., & PARKS, J. (Agosto de 1969). A powerful CO2 cutting tool. *Laser Focus*, p. 36.
- CANNING, J. (2006). Fiber lasers and related technologies. *Optics Lasers Eng* 2006;44(7):647 –76.] e [Nilsson J, Clarkson WA, Selvas R, Sahu JK, Turner PW, Alam S-U, Grudin AB. High-power wavelength-tunable cladding-pumped rare-earth-doped silica fiber lasers. *Optics and Lasers in Engineering Journal* 44(7), 647 –676.
- CARISTAN, C. L. (2004). Capítulo 12 - Safety and Environment. Em C. L. CARISTAN, *Laser Cutting Guide for Manufacturing* (pp. 301-311). Dearborn, MI, E. U. A.: Society of Manufacturing Engineers (SME).
- CARISTAN, C. L. (2004). Capítulo 3 - Materials. Em C. L. CARISTAN, *Laser Cutting Guide for Manufacturing* (pp. 55-82). Dearborn, MI, E. U. A.: Society of Manufacturing Engineers (SME).
- CARISTAN, C. L. (2004). Capítulo 5 - Methods . Em C. L. CARISTAN, *Laser Cutting Guide for Manufacturing* (pp. 209-244). Dearborn, MI, E. U. A.: Society of Manufacturing Engineers (SME).
- CARISTAN, C. L. (2004). Capítulo 9 - Quality. Em C. L. CARISTAN, *Laser Cutting Guide for Manufacturing* (pp. 209-244). Dearborn, MI, E. U. A.: Society of Manufacturing Engineers (SME).
- CARISTAN, C. L. (2004). *Laser Cutting Guide for Manufacturing*. Dearborn, MI, E. U. A.: Society of Manufacturing Engineers (SME).
- CARVALHO, J. C. (29 de Outubro de 2020). *Luz e cor - Como se faz a interação da luz com a matéria?* Fonte: UOL Educação: <https://educacao.uol.com.br/disciplinas/quimica/luz-e-cor-2-como-se-faz-a-interacao-da-luz-com-a-materia.htm>
- CASEY, H. C., & PANISH, M. B. (1994). *Heterostructure Lasers Part A and B*. Nova Iorque, E. U. A.: Academic Press.
- CHALK, S. J. (2019). Glossary of terms used in photochemistry, 3a edição. Em A. D. McNAUGHT, & A. WILKINSON, *IUPAC. Compendium of Chemical Terminology, the "Gold Book". 2a edição, 1997.* (p. 293). Oxford, R. U.: Blackwell Scientific Publications. Fonte: <https://goldbook.iupac.org/>
- CHEN, G., DING, Z., HSU, S.-B., KIM, M., & ZHOU, J. (Fevereiro de 2006). Mathematical analysis of a Bohr atom model. *Journal of Mathematical Physics* 47.
- CHEN, L., YAMASHITA, S., HAMASAKI, M., MANAKA, H., & OBARA, K. (13 de Junho de 2014). Formation Processes of Zinc Excimer Thin Films Due to Ion-Recombination Processes. *Journal of Applied Mathematics and Physics, Vol.2 No.7*, pp. 903-974.

- CHEN, S. L. (1999). Effects of high-pressure assistant-gas flow on high-power CO<sub>2</sub> laser cutting. *Journal of Materials Processing Technology*, 88, 57-66.
- CLAPAUD, A. (20 de Fevereiro de 2018). *Les lasers industriels à l'heure de la maturité*. Fonte: INDUSTRIE TECHNOLOGIES: <https://www.industrie-techno.com/article/les-lasers-industriels-a-l-heure-de-la-maturite.52348>
- COELHO, B. N., LIMA, M. S., & COSTA, A. R. (2013). Soldagem do aço inoxidável AISI 316 com laser à fibra de alta potência: influência dos parâmetros operacionais na micro dureza e na susceptibilidade à corrosão eletrolítica dos cordões de solda. *Revista Matéria*, v. 18, n.3, 1338-1349.
- DAURELIO, G. (1985). Processo di Taglio a Laser CO<sub>2</sub> di Laminati di Rame : Stato dell'Arte e Nuove Possibilità. *Meccanica*, 45 - 57.
- DAVIDOVICH, L. (Dezembro de 2015). Os quanta de luz e a ótica quântica. *Revista Brasileira de Ensino da Física*, v. 37, n. 4, 4205-1 - 4205-12. Fonte: [http://www.scielo.br/scielo.php?script=sci\\_arttext&pid=S1806-11172015000400205&lng=en&nrm=iso](http://www.scielo.br/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1806-11172015000400205&lng=en&nrm=iso)
- DAVIS, C. C. (2014). Capítulo 7 - Control of laser oscillators. Em C. C. DAVIS, *Lasers and Electro-optics: Fundamentals and Engineering* (pp. 132-152). Cambridge, R. U.: Cambridge University Press.
- DAY, C. (22 de Janeiro de 2015). *Cutting Reflective Metals – Overcoming Issues with Laser Cutting*. Fonte: DAY Steel - Cutting & Profiling Guides, Laser, Waterjet.: <https://www.daysteel.co.uk/news/category/cutting-profiling-guides/>
- DEACON, D. A., ELIAS, L. R., MADEY, J. M., RAMIAN, G. J., SCHWETTMAN, H. A., & SMITH, T. I. (1977). First Operation of a Free-Electron Laser. *Physical Review Letters*, 38, 892.
- DEMIRBAS, U., & ACAR, D. A. (2016). Continuous-wave, quasi-continuous-wave, gain-switched, and femtosecond burst-mode operation of multi-mode diode-pumped Cr:LiSAF lasers. *ResearchGate*, pp. 2105-2113.
- DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA MECÂNICA DA UFPR. (s.d.). *LABORATÓRIO DE USINAGEM DO DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA MECÂNICA DA UFPR*. Fonte: Labusig: <http://www.labusig.ufpr.br/>
- DICKEY, F. M., & HOLSWADE, S. C. (2000). Gaussian Beam Shaping: Diffraction Theory and Design. Em F. M. DICKEY, & S. C. HOLSWADE, *Laser beam shaping: theory and techniques* (p. (Optical Science and Engineering) ). Nova Iorque, NY, E. U. A.: Marcell Dekker, Inc.
- EINSTEIN, A. (1917). Zur Quantentheorie der Strahlung. *Physikalische Zeitschrift*, 18, pp. 121–128.
- EISBERG, R., & RESNICK, R. (1979). Cap.3 O postulado de De Broglie – Propriedades ondulatórias das partículas. Em R. EISBERG, & R. RESNICK, *Física Quântica – Átomos, Moléculas, Sólidos, Núcleos e Partículas*. Rio de Janeiro: Elsevier Editora.

- EISBERG, R., & RESNICK, R. (1979). Cap.4 O modelo de Bohr para o átomo. Em R. EISBERG, & R. RESNICK, *Física Quântica – Átomos, Moléculas, Sólidos, Núcleos e Partículas*. Rio de Janeiro: Campus.
- EKSPONG, G. (Março de 1999). The Dual Nature of Light, as Reflected in the Nobel Archive. *Proceedings of the American Philosophical Society*, 143, pp. 42-49.
- ESAB. (s.d.). *What is cutting kerf?* Fonte: ESAB KNOWLEDGE CENTER: <https://www.esabna.com/us/en/education/blog/what-is-cutting-kerf.cfm>
- European Data Relay Satellite System (EDRS) Overview*. (s.d.). Fonte: European Space Agency: <https://artes.esa.int/edrs/overview>
- FEIN, G. S. (8 de Abril de 2011). MLD Test Moves Navy a Step Closer to Lasers for Ship Self-Defense. Arlington, Virgínia, E.U.A. Fonte: Office of Naval Research Corporate Strategic Communications: <https://www.onr.navy.mil/en/Media-Center/Press-Releases/2011/Maritime-Laser-MLD-Test>
- FIERET, J., TERRY, M., & WARD, B. (1986). Aerodynamic interactions during laser cutting. Em W. W. DULEY, & R. WEEKS, *Laser Processing: Fundamentals, Applications, and Systems Engineering* (pp. 53-62). Québec, Québec, Canadá: SPIE.
- FRANCK, J., & REICHE, F. (1920). Über Helium und Parhelium. *Zeitschrift für Physik*, 1, 154–160.
- Friendess Co., Ltd. (28 de 04 de 2021). *CypCut Laser Cutting Software V6.3.763.10*. Fonte: Friendess Co., Ltd.: <https://www.fscut.com/en/soft/cypcut/>
- GARCÍA-LÓPEZ, E., MEDRANO-TELLES, A., IBARRA-MEDINA, J., SILLER, H., & RODRIGUEZ, C. (26 de Dezembro de 2017). Experimental Study of Back Wall Dross and Surface Roughness in Fiber Laser Microcutting of 316L Miniature Tubes. *Micromachines vol. 9*, 1-4.
- GORDON, J. P., ZEIGER, H. J., & TOWNES, C. H. (1955). The maser – new type of microwave amplifier, frequency standard, and spectrometer. *Physical Review*, 99, pp. 1264 – 1274.
- GOSWAMI, G., & KUMAR, D. (1988). Laser materials processing. . *Bulletin of Materials Science*, 11, 213–224.
- GRAND VIEW RESEARCH. (Março de 2017). *Laser Processing Market Size, Share & Trends Analysis Report By Product (Gas, Solid-state, Fiber), By Process (Material Processing, Marking, Micro-Processing), By Application And Segment Forecasts, 2018 - 2025*. Fonte: Grand View Research: <https://www.grandviewresearch.com/industry-analysis/laser-processing-market>
- HECHT, J. (01 de Outubro de 2007). *PHOTONIC FRONTIERS: PHOTONIC-CRYSTAL LASERS - Photonic crystals make nanocavity lasers*. Fonte: Laser Focus World: <https://www.laserfocusworld.com/optics/article/16552847/photonic-frontiers-photonicc>

- HECHT, J. (1 de Dezembro de 2009). *PHOTONIC FRONTIERS: FIBER LASERS: Fiber lasers ramp up the power*. Fonte: Laser Focus World: <https://www.laserfocusworld.com/fiber-optics/article/16551164/photonic-frontiers-fiber-lasers-fiber-lasers-ramp-up-the-power>
- HECHT, J. (1 de Abril de 2012). *FIBER LASERS: Fiber lasers: The state of the art*. Fonte: Laser Focus World: <https://www.laserfocusworld.com/test-measurement/spectroscopy/article/16549567/fiber-lasers-fiber-lasers-the-state-of-the-art>
- HECHT, J. (02 de Junho de 2020). *Laser*. Fonte: Encyclopædia Britannica: <https://www.britannica.com/technology/laser/History>
- HERNÁNDEZ-CASTAÑEDA, J. C., KURSAD SEZER, H., & LI, L. (2011). The effect of moisture content in fibre laser cutting of pine wood. *Optics and Lasers in Engineering*, 49(9-10), 1139–1152.
- HERZIGER, G., KREUTZ, E. W., & WISSENBACH, K. (12 de Novembro de 1986). Fundamentals Of Laser Processing Of Materials. *Laser Processing: Fundamentals, Applications, and Systems Engineering Vol.668*, pp. 53-62.
- HILLTON, P. A. (20-22 de Agosto de 2007). *The early days of laser cutting*. Fonte: The Welding Institute: <https://www.twi-global.com/technical-knowledge/published-papers/the-early-days-of-laser-cutting-august-2007>
- HO, C., & WEI, P. (2001). Absorption in a paraboloid of revolution-shaped welding or drilling cavity irradiated by a polarized laser beam. *Metallurgical and Materials Transactions B*. 32, 603-614.
- HODGSON, N., & WEBER, H. (2005). Stable Resonators; Resonators on the Stability Limits; Unstable Resonators. Em N. HODGSON, & H. WEBER, *Laser Resonators and Beam Propagation, Fundamentals, Advanced Concepts and Applications* (pp. 219 – 337). Springer Science.
- HOULDCROFT, P. T. (1970). *Estados Unidos da América Patente Nº US3612814A*.
- HÜGEL, H. (2000). New solid-state lasers and their application potentials. *Optics and Lasers in Engineering*, 34(4-6), 213–229.
- IMADA, M., NODA, S., CHUTINAN, A., & TOKUDA, T. (Maio de 1999). Coherent two-dimensional lasing action in surface-emitting laser with triangular-lattice photonic crystal structure. *Applied Physics Letters* 75, pp.316 , 316. Kyoto, Japão: Department of Electronic Science and Engineering.
- ION, J. C. (2005). Capítulo 14 - Cutting. Em J. C. ION, *Laser Processing of Engineering Materials* (pp. 347-383). Oxônia, Reino Unido: Butterworth-Heinemann.
- ION, J. C. (2005). Capítulo 16 - Keyhole Welding. Em J. C. ION, *Laser Processing of Engineering Materials* (pp. 395-455). Oxônia, Reino Unido: Butterworth-Heinemann.

- ION, J. C. (2005). Capítulo 5 - Engineering Materials. Em J. C. ION, *Laser Processing of Engineering Materials* (pp. 139-177). Oxônia, Reino Unido: Butterworth-Heinemann.
- IPG Photonics. (10 de Maio de 2010). *Materials Processing: Single mode fiber lasers, Multi mode fiber lasers*. Fonte: IPG Photonics: [http://www.ipgphotonics.com/apps\\_materials.htm](http://www.ipgphotonics.com/apps_materials.htm)
- ISO 9013. (2017). *Corte térmico - Classificação dos cortes térmicos, especificação geométrica dos produtos e tolerâncias relativas à qualidade*. Genebra, Suíça: Comitê Europeu de Normalização.
- ITAYA, K., SUGAWARA, H., & HATAKOSHI, G.-i. (2 de Abril de 1994). InGaAlP visible light laser diodes and light-emitting diodes. *Journal of Crystal Growth, Volume 138, Edições 1–4*, pp. 768-775.
- JARMAN, R. H. (1996). Novel optical fiber lasers. *Current Opinion in Solid State and Materials Science, 1(2)*, 199–203.
- JAVAN, A., & BENNET Jr, W. R. (1960). *Estados Unidos da América Patente Nº 3.149.290*.
- JAVAN, A., BENNET Jr., W. R., & HERRIOTT, D. R. (1961). Population Inversion and Continuous Optical Maser Oscillation in a Gas Discharge Containing a He-Ne Mixture. *Physical Review Letters* 6, 106-110.
- JELÍNKOVÁ, H., & ŠULC, J. (2013). 2 Laser characteristics. Em H. JELÍNKOVÁ, & J. ŠULC, *Lasers for Medical Applications* (pp. 17-46). Praga, Tchéquia.: Woodhead Publishing.
- JEONG, Y., SAHU, J. K., PAYNE, D. N., & NILSSON, J. (2004). Ytterbium-doped large-core fiber laser with 1.36 kW continuous-wave output power. *Optics Express, 12(25)*, 6088-6092.
- JONES, N. (12 de Setembro de 2018). How to stop data centres from gobbling up the world's electricity. *Nature Magazine*, 163-166 . Fonte: Nature, 561: <https://www.nature.com/articles/d41586-018-06610-y>
- KANNATEY-ASIBU JR., E. (2009). Capítulo 1 - Laser Generation. Em E. KANNATEY-ASIBU JR., *Principles of Laser Materials Processing* (pp. 3-25). Hoboken, NJ, E. U. A.: John Wiley & Sons, Inc.
- KANNATEY-ASIBU JR., E. (2009). Capítulo 11 - The Microstructure. Em E. KANNATEY-ASIBU JR., *Principles of Laser Materials Processing* (p. 302). Hoboken, NJ, E. U. A.: John Wiley & Sons, Inc.
- KANNATEY-ASIBU JR., E. (2009). Capítulo 14 - Background on Laser Processing. Em E. KANNATEY-ASIBU JR., *Principles of Laser Materials Processing* (pp. 409-430). Hoboken, NJ, E. U. A.: John Wiley & Sons, Inc.
- KANNATEY-ASIBU JR., E. (2009). Capítulo 15 - Laser Cutting and Drilling. Em E. KANNATEY-ASIBU JR., *Principles of Laser Materials Processing* (pp. 431-501). Hoboken, NJ, E. U. A.: John Wiley & Sons, Inc.

- KANNATEY-ASIBU JR., E. (2009). Capítulo 2 - Optical Resonators. Em E. KANNATEY-ASIBU JR., *Principles of Laser Material Processing* (pp. 26-62). Hoboken, NJ, E. U. A.: John Wiley & Sons, Inc.
- KANNATEY-ASIBU JR., E. (2009). Capítulo 6 - Beam Modification. Em E. KANNATEY-ASIBU JR., *Principles of Laser Materials Processing* (pp. 96-117). Hoboken, NJ, E. U. A.: John Wiley & Sons, Inc.
- KANNATEY-ASIBU JR., E. (2009). Capítulo 8 - Types of Lasers. Em E. KANNATEY-ASIBU JR., *Principles of Laser Materials Processing* (pp. 135-187). Hoboken, NJ, E. U. A.: John Wiley & Sons, Inc.
- KANNATEY-ASIBU JR., E. (2009). Capítulo 9 - Beam Delivery. Em E. KANNATEY-ASIBU JR., *Principles of Laser Materials Processing* (pp. 188-230). Hoboken, NJ, E. U. A.: John Wiley & Sons, Inc.
- KAPLAN, A. F. (2002). *Theoretical analysis of laser beam cutting*. Aachen, Alemanha: Shaker Verlag, GmbH.
- KASPER, J. V., & PIMENTEL, G. C. (1965). HCl Chemical Laser. *Physical Review Letters*. 14 (10), 352–354.
- KATZIR, A. (1993). Capítulo 1 - Introduction. Em A. KATZIR, *Lasers and Optical Fibers in Medicine* (pp. 1-14). Tel Aviv, Israel: Universidade de Tel Aviv.
- KATZIR, A. (1993). Capítulo 9 - Clinical Applications of Fiberoptic Laser Systems. Em A. KATZIR, *Lasers and Optical Fibers in Medicine* (pp. 237–291). Tel Aviv, Israel: Universidade de Tel Aviv.
- KAWASUMI, H. (1990). Laser processing in Japan. Em M. R. LEVITT, D. BELFORTE, & L. BELLEVILLE, *Industrial Laser Annual Handbook* (pp. 141–143). Tulsa, OK, E. U. A.: Pennwell Books.
- KELLENS, K., RODRIGUES, G. C., DEWULF, W., & DUFLOU, J. (2014). Energy and Resource Efficiency of Laser Cutting Processes. *8th International Conference on Photonic Technologies LANE 2014*. (pp. 854–864). Leuven, Bélgica: Universidade Católica de Leuven, Departamento de Engenharia Mecânica.
- KLEPPNER, D. (2005). Relendo Einstein sobre radiação. *Revista Brasileira de Ensino Física* vol.27, n.1, 87-91.
- KOECHNER, W. (1999). *Solid-State Laser Engineering*. Berlim: Springer-Verlag .
- KOPFERMANN, H. L. (1928). Experimental Proof of 'Negative Dispersion". *Nature* 122, 438–439.
- KOSTRON, H., & HASAN, T. (2016). Photodynamic Medicine. Em H. KOSTRON, & T. HASAN, *Photodynamic Medicine From Bench to Clinic* (pp. VII - IX). Londres, Reino Unido: Royal Society of Chemistry.
- KUJANPÄÄ, V., & WANDERA, C. (2010). Characterization of the melt removal rate in laser cutting of thick-section stainless steel. *Journal of Laser Applications*. 22, 62-70.

- KUKREJA, L. M. (1988). Laser processing of polymers: an overview. *Bulletin of Materials Science*, 11, 225-238.
- LARCOMBE, D. (13 de Novembro de 2013). *Fiber versus CO2 laser cutting. Bystronic explains the different attributes of each laser for laser cutting and gives job shop examples.* Fonte: Industrial Laser Solutions for Manufacturing: <https://www.industrial-lasers.com/cutting/article/16486898/fiber-versus-co2-laser-cutting#:~:text=Briefly%2C%20fiber%20laser%20light%20is,the%20material%20to%20be%20cut>
- LASER RHÔNE ALPES. (Maio de 2019). *Le laser industriel: trois usages pour une technologie.* Fonte: Revista Laser Magazine: <https://www.laser-rhone-alpes.com/magazine/technologie-laser/usages-laser-industriel/>
- LIMPERT, J., SCHREIBER, T., LIEM, A., NOLTE, S., ZELLMER, H., . . . TÜNNERMANN, A. (2003). Thermo-optical properties of air-clad photonic crystal fiber lasers in high power operation. *Optics Express* 11(22), 2982–2990.
- LUKISHOVA, S. G. (2010). *Valentin A. Fabrikant: negative absorption, his 1951 patent application for amplification of electromagnetic radiation (ultraviolet, visible, infrared and radio spectral regions) and his experiments.* Fonte: Journal of the European Optical Society Vol.5: [https://www.jeos.org/index.php/jeos\\_rp/article/view/10045s](https://www.jeos.org/index.php/jeos_rp/article/view/10045s)
- MachineMFG. (2 de Agosto de 2019). *The ultimate guide to fiber laser cutting.* Fonte: MachineMfg: <https://www.machinemfg.com/fiber-laser-cutting/>
- MAIMAN FOUNDATION. (31 de Outubro de 2020). *About Theodore Maiman.* Fonte: Laser Inventor. Creator of the world's first laser: <http://www.laserinventor.com/bio.html>
- MAIMAN, T. H. (1960). Optical and microwave- optical experiments in ruby . *Physical Review Letters*, 4 , 11 , 564 – 566.
- MAIMAN, T. H. (1960). Stimulated optical radiation in ruby. *Nature* , 187 , 4736, 493 – 494.
- MAIMAN, T. H. (1965). *Estados Unidos da América Patente Nº US3353115A.*
- MAIMAN, T. H. (2000). *The Laser Odyssey.* Laser Press.
- MAJUMDAR, . K. (2005). Free-space laser communication performance in the atmospheric channel. *Journal of Optical and Fiber Communications Reports*, 2(4), 345–396.
- MAS, C., FABBRO, R., & GOUÉDARD, Y. (2003). Steady-state laser cutting modeling. *Journal of Laser Applications*, 15, 145–152.
- MASHIKHI, S., POWELL, J., KAPLAN, A., & VOISEY, K. (2011). Heat affected zones and oxidation marks in fiber laser–oxygen cutting of mild steel. *Journal of Laser Applications*. 23.

- MASSIMO, A. R., & MAJED, C. (2007). The European X-ray free-electron laser. Technical design report. Hamburgo , Alemanha: DESY XFEL Project Group; European XFEL Project Team; Deutsches Elektronen-Synchrotron (DESY).
- MCCLUNEY, R. (2003). Radiometry and Photometry. *Encyclopedia of Physical Science and Technology*, 731–758.
- MELO, M., SOUSA, J. M., BERENDT, M. O., HENDOW, S. T., & SALCEDO, J. R. (2011). Lasers de Fibra Óptica de Alta Potência: conceito, limitações e aplicações. *Revista Para os físicos e amigos da física. vol.34-n .1*, 22-26. Fonte: [www.gazetadefisica.spf.pt](http://www.gazetadefisica.spf.pt)
- MEUNIER, P.-M. (13 de Novembro de 2015). Lasers à usage militaire : où en sont les développements? *Revista ENDERI - Entreprise Défense Relations Internationales*.
- MICRONORA. (Janeiro de 2012). Le laser s'invite dans tous les secteurs de l'industrie. *Revista Micronora Informations, 127 - Revue du Salon International des Microtechniques*. Besançon, França: Imprimerie de Champagne/Langres. Fonte: Micronora: [https://www.micronora.com/micronora\\_infos/127.pdf](https://www.micronora.com/micronora_infos/127.pdf)
- MIYAMOTO, I., & MARUO, H. (1991). Mechanism of laser cutting. *Welding in the World, Le Soudage Dans Le Monde. 29*, 283-294.
- MORDON, S. (1995). Actions thermiques des lasers. Em J. P. CHAVOIN, *Éd. Encyclopédie des Lasers en médecine et en chirurgie* (pp. 199-214 ). Pádua, Itália: Piccin Nuova Libreria SpA.
- MORDON, S. (2010). Applications médicales du laser. *Reflets de la physique*, 65-69.
- MÜLLER, H.-R., KIRCHHOF, J., REICHEL, V., & UNGER, S. (2006). Fibers for high-power lasers and amplifiers. *Comptes Rendus Physique 7(2)*, 154 –62.
- MUTHUKRISHNAN, A., SCULLY, M., & ZUBAIRY, M. (2003). The concept of the photon - Revisited. *Optics and Photonics News. 14*, 18-27.
- NASSAR, A., NASSAR, E., & YOUNIS, M. (2016). Effect of laser cutting parameters on surface roughness of stainless steel 307. *Leonardo Electronic Journal of Practices and Technologies. 15.*, 127-136.
- NELSON, D., COLLINS, R., & KAISER, W. (Dezembro de 2009). *Bell Labs and the ruby laser*. Fonte: *Physics Today* 63: <https://physicstoday.scitation.org/doi/10.1063/1.3293412>
- NILSSON, J., CLARKSON, W. A., SELVAS, R., SAHU, J. K., ALAM, S.-U., & GRUNDININ, A. B. (2004). High-power wavelength-tunable cladding-pumped rare-earth-doped silica fiber lasers. *Optical Fiber Technology 10 (1)*, 5 –30.
- NISAR, S., LI, L., & SHEIKH, M. (2013). Laser Glass Cutting Techniques - A Review. *Journal of Laser Applications. 25*, 11.
- NIZIEV, V., & NESTEROV-MUELLER, A. (1999). Influence of beam polarization on laser cutting efficiency. *Journal of Physics D: Applied Physics. 32.*, 1455.

- NODA, S., YOKOYAMA, M., IMADA, M., CHUTINAN, A., & MOCHIZUKI, M. (10 de Agosto de 2001). Polarization Mode Control of Two-Dimensional Photonic Crystal Laser by Unit Cell Structure Design. *Science*, pp. 1123-1125.
- O'NEILL, W., SPARKES, M., VARNHAM, M. H., BIRCH, M., WOODS, S., & HARKER, A. (2004). High Power High Brightness Industrial Fiber Laser Technology. *ICALEO 2004 23rd International Congress on Laser Materials Processing and Laser Microfabrication*. San Francisco, CA, E. U. A.: Laser Institute of America ICALEO® 2004: .
- OLSEN, F. (2006). An evaluation of the cutting potential of different types of high power lasers. *ICALEO® 2006: 25th International Congress on Laser Materials Processing and Laser Microfabrication*, (pp. 188–196). Scottsdale, AZ, E. U. A.
- OLSEN, F. O., & ALTING, L. (1989). Cutting Front Formation in Laser Cutting. *CIRP Annals, Volume 38, Edição 1*, 215-218.
- OLSON, M. (2012). History of Laser Weapon Research. *Leading Edge, Volume 7, Edição 4*, 26-35.
- ORISHICH, A. M., KOVALEV, O., ZAITSEV, A. V., MALIKOV, A. G., YUDIN, P. V., & SHULYATYEV, V. (2008). Double-nozzle control of a subsonic gas flow in the conditions of gas-laser cutting. *ICALEO 2008 - 27º Congresso Internacional de Aplicações de Lasers e Eletro-Óptica, Anais do Congresso*, (pp. 611-614). Temecula, Califórnia, E. U. A.
- OVERTON, G. (16 de Março de 2019). *2019 Market for Lasers report now available from SU and Laser Markets Research*. Fonte: Revista LaserFocusWorld Magazine: <https://www.laserfocusworld.com/lasers-sources/article/16566775/2019-market-for-lasers-report-now-available-from-su-and-laser-markets-research>
- PALANDI, J., FIGUEIREDO, D. B., DENARDIN, J. C., & MAGNAGO, P. R. (2010). *Física Moderna (Caderno Didático)*. Santa Maria: Departamento de Física/CCNE/UFSM.
- Pentagon beams over military laser test Laser U.S. wants to determine vulnerability of satellites. (20 de Outubro de 1997). Fonte: CNN.com U.S. News: <https://web.archive.org/web/20071230052044/http://www.cnn.com/US/9710/20/pentagon.laser/>
- PETRING, D., SCHNEIDER, F., WOLF, N., & NAZERY, V. (2008). The relevance of brightness for high power laser cutting and welding. *ICALEO 2008 ICALEO® 2008: 27th International Congress on Laser Materials Processing, Laser Microprocessing and Nanomanufacturing*, (pp. 95–103). Temecula, CA, E. U. A.
- PHIPPS, C. R. (2011). *Laser ablation and its applications*. Londres, Reino Unido: Springer.
- POLANYI, J. C. (1961). Proposal for an Infrared Maser Dependent on Vibrational Excitation. *Journal of Chemical Physics*. 34, 347–348.

- POWELL, J., FRASS, K., MENZIES, I. A., & FUHR, H. (1989). CO2 Laser Cutting Of Non-Ferrous Metals. High Power CO2 Laser Systems and Applications. *SPIE 1988 Intl Congress on Optical Science and Engineering* (pp. 156-163). Hamburgo, Alemanha: SPIE Proceedings.
- POWELL, J., IVARSON, A., KAMALU, J., BRODÉN, G., & MAGNUSSON, C. (1992). The role of oxygen purity in laser cutting of mild steel. *International Congress on Applications of Lasers & Electro-Optics* (p. 433). Orlando, FL, E. U. A: Laser Institute of America ICALEO®.
- POWELL, J., PETRING, D., KUMAR, R., MASHIKHI, S., KAPLAN, A., & VOISEY, K. (2008). Laser-oxygen cutting of mild steel: The thermodynamics of the oxidation reaction. *Journal of Physics D: Applied Physics*. 42.
- Prêmio Nobel em física 1964 - Charles Hard Townes, Nicolay Gennadiyevich Basov, Aleksandr Mikhailovich Prokhorov. (1964). *NobelPrize.org Nobel Media AG*, p. <https://www.nobelprize.org/prizes/physics/1964/summary/>.
- Prince Louis-Victor Pierre Raymond de Broglie - Prêmio Nobel de Física 1929. (1929).  
Fonte: NobelPrize.org Nobel Media AB:  
<https://www.nobelprize.org/prizes/physics/1929/summary/>
- Pura Física. (10 de Outubro de 2017). *Ondas e luz: Polarização da luz [Arquivo de vídeo]*. Fonte: YouTube: <https://www.youtube.com/watch?v=AiAOFnVq0Yo>
- QUAZI, M. M., FAZAL, M. A., HASEEB, A. S., YUSOF, F., MASJUKI, H. H., & ARSLAN, A. (2015). Laser-based Surface Modifications of Aluminum and its Alloys. *Critical Reviews in Solid State and Materials Sciences*, 41, 106–131.
- READY, J. F., & FARSON, D. F. (2001). Capítulo - Laser cutting. Em J. F. READY, & D. F. FARSON, *LIA Handbook of Laser Materials Processing* (pp. 425-470). Orlando, FL, E. U. A.: Laser Institute of America.
- READY, J. F., & FARSON, D. F. (2001). *LIA Handbook of Laser Materials Processing*. Orlando, FL, E. U. A.: Laser Institute of America.
- Reliablelaser, C. (22 de Novembro de 2020). *Cypcut software tutorial* . Fonte: YouTube:  
<https://www.youtube.com/playlist?list=PLenSq5aEVJlxfHDhQhlqvV9JyXlg1SN2o>
- RIVEIRO, A., QUINTERO, F., BOUTINGUIZA, M., DEL VAL, J., COMESAÑA, R., LUSQUIÑOS, F., & POU, J. (2019). Laser Cutting: A Review on the Influence of Assist Gas. Vigo, Galícia, Espanha: Departamento de Física Aplicada da Universidade de Vigo.
- RIVEIRO, A., QUINTERO, F., LUSQUIÑOS, F., COMESAÑA, R., DEL VAL, J., & POU, J. (2011). The Role of the Assist Gas Nature in Laser Cutting of Aluminum Alloys. . *Physics Procedia*, 12, 548–554.
- ROSO, N. A., MOREIRA, R. d., & OLIVEIRA, J. E. (Setembro de 2014). High Power Laser Weapons and Operational Implications. *Journal of Aerospace*

- Technology and Management*, v. 6, n. 3, 231-236. São José dos Campos, SP, Brasil.
- SALEH, B. E., & TEICH, M. C. (1991). *Fundamentals of Photonics, 2 Volume Set, 3rd Edition*. Nova Iorque, EUA: Wiley.
- SANTOS, R. (8 de Setembro de 2017). *Ondas longitudinais e transversais [Arquivo de vídeo]*. Fonte: YouTube: <https://www.youtube.com/watch?v=2-F-BaqJ61U>
- SARRI, G. (12 de Agosto de 2015). *World's most powerful laser is 2,000 trillion watts – but what's it for?* Fonte: The Conversation: <https://theconversation.com/worlds-most-powerful-laser-is-2-000-trillion-watts-but-whats-it-for-45891>
- SCHAWLOW, A. L., & TOWNES, C. H. (1958). Infrared and Optical Masers. *Physical Review*, 112, edição 6, 1940-1949.
- SCHULZ, W., BECKER, D., FRANKE, J., KEMMERLING, R., & HERZINGER, G. (1993). Heat conduction losses in laser cutting of metals. *Journal of Physics D: Applied Physics*, Volume 26, Número 9, 1357-1363.
- SCHULZ, W., KOSTRYKIN, V. N., MICHEL, J., PETRING, D., & KREUTZ, E. W. (1999). Dynamics of ripple formation and melt flow in laser beam cutting. *Journal of Physics D: Applied Physics*, 32, 1219–1228.
- Scientific American. (4 de Janeiro de 1999). *The Laser at (About) 40*. Fonte: Scientific American: <https://www.scientificamerican.com/article/the-laser-at-about-40/>
- SENFENG. (2017). *Original Instructions no.1 - User Manual V6.17 - 1313G-Series Fiber Laser Cutting Machine*. Jinan, China.
- SENFENG. (2017). *Original Instructions no.2 - Maintenance Manual V7.19 - 1313G-Series Fiber Laser Cutting Machine*. Jinan, China.
- SENFENG. (2017). *Original Instructions no.3 - Operation Manual - 1313G-Series Fiber Laser Cutting Machine*. Jinan, China.
- Senfeng Laser. (Version: V6.17). 4.3.4.2 Relationship between the Focus Position and the Cutting Section. Em *Original Instructions - User Manual no.1 - 1313G-Series Fiber Laser Cutting Machine* (pp. 66-67). Jinan, China.
- SENFENG USA Laser Technology Co. (30 de Novembro de 2021). *SF1313G – Small Fiber Laser Cutting Machine*. Fonte: SENFENG USA OFFICIAL WEBSITE: <https://www.senfenglaserusa.com/product/small-fiber-laser-cutting-machine/>
- SHARP, C. (1987). CO<sub>2</sub> laser cutting of highly reflective materials. *The 39th International Congress on Applications of Lasers & Electro-Optics (ICALEO® 1987)* (pp. 149-153). San Diego, CA. E. U. A.: Springer Verlag.
- SHEAHAN, M. (28 de Novembro de 2014). Europe's space-based, laser-powered data highway passes early test. *Reuters*. Fonte: Reuters: <https://cn.reuters.com/article/space-europe-laser/europes-space-based-laser-powered-data-highway-passes-early-test-idINL6N0TG1LG20141128>

- SHENG, P. S., & JOSHI, V. S. (1995). Analysis of heat-affected zone formation for laser cutting of stainless steel. *Journal of Materials Processing Technology*, 53, 879–892.
- SHIN, J. S., YONG OH, S., PARK, H., CHUNG, C.-M., SEON, S., KIM, T.-S., . . . LEE, J. (Agosto de 2018). Cutting performance of thick steel plates up to 150 mm in thickness and large size pipes with a 10-kW fiber laser for dismantling of nuclear facilities. Daejeon, Coréia do Sul: Korea Atomic Energy Research Institute.  
 Fonte: Science Direct:  
<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0306454918304407>
- SHIN, J. S., YONG OH, S., PARK, H., CHUNG, C.-M., SEON, S., KIM, T.-S., . . . MOON, J.-K. (2017). High-speed fiber laser cutting of thick stainless steel for dismantling tasks. *Optics & Laser Technology*, Volume 94, 244-247.
- SHINER, B. (2004). kW fibre lasers for material processing markets. 23. Fonte: AILU Association of Industrial Laser Users:  
[http://www.ailu.org.uk/laser\\_technology/the\\_laser\\_user\\_magazine/articles/kw\\_fibre\\_lasers\\_for\\_material\\_processing\\_markets.html](http://www.ailu.org.uk/laser_technology/the_laser_user_magazine/articles/kw_fibre_lasers_for_material_processing_markets.html)
- SIEGMAN, A. E. (1986). *Lasers*. Mill Valley, CA, EUA: University Science Books.
- SILFVAST, W. T. (2004). *Laser fundamentals*. Cambridge, R.U.: Cambridge University Press.
- SILVA JR., J. S. (17 de Outubro de 2020). *O que é polarização?* Fonte: Brasil Escola:  
<https://brasilecola.uol.com.br/o-que-e/fisica/o-que-e-polarizacao.htm>
- SILVA, D. C. (s.d.). *Interação Luz-Matéria*. Fonte: Site Mundo Educação:  
<https://mundoeducacao.uol.com.br/fisica/interacao-luzmateria.htm>
- SILVA, M. R. (Maio de 2018). LASER Femtosegundo: Evolução, eficácia e segurança na cirurgia da catarata. . Porto, Portugal: Ciências Biomédicas Abel Salazar da Universidade do Porto.
- SPARKES, M., GROSS, M., CELOTTO, S., ZHANG, T., & O'NEILL, W. (2008). Practical and theoretical investigations into inert gas cutting of 304 stainless steel using a high brightness fiber laser. *Journal of Laser Applications*, 20, 59–67.
- STEEN, W. M. (2003 ). Capítulo 2 - Basic Laser Optics. Em W. M. STEEN, *Laser Material Processing, Terceira Edição* (pp. 107-152 ). Londres, Reino Unido : Springer.
- STEEN, W. M. (2003 ). Capítulo 3 - Laser Cutting. Em W. M. STEEN, *Laser Material Processing, Terceira Edição* (pp. 107-152). Londres, Reino Unido : Springer.
- STEEN, W. M. (2003). Capítulo 1 - Background and General Applications. Em W. M. STEEN, *Laser Materials Processing, Terceira Edição* (pp. 11-60). Londres, Reino Unido: Springer.
- STEEN, W. M. (2003). Capítulo 4 - Laser Welding. Em W. M. STEEN, *Laser Material Processing, Terceira Edição* (pp. 157-199). Londres, Reino Unido: Springer.

- STEEN, W. M. (2003). Fusion Cutting - Melt and Blow. Em W. M. STEEN, *Laser Material Processing, Terceira Edição* (pp. 114-122, 137). Londres, Reino Unido: Springer.
- STRATEGIES UNLIMITED. (2018). *The Worldwide Market for Lasers: Market Review and Forecast 2020. The Worldwide Market for Lasers Trends and Five-Year Forecast (2019 – 2025)*. Nashua, NH, E. U. A.: PennWell.
- SULLIVAN, A. B., & HOULDCROFT, P. T. (Agosto de 1967). Gas-Jet Laser Cutting. *British Welding Journal*.
- SVELTO, O. (1970 ). Capítulo 5 - CW and Transient Laser Behavior. Em O. SVELTO, *Principi dei Laser* (pp. 145-200). Milão, Itália: Tamburini.
- SVELTO, O. (1970 ). Capítulo 8 - Laser Beam Transformation. Em O. SVELTO, *Principi dei Laser* (pp. 297-334). Milão, Itália: Tamburini.
- SVELTO, O. (1970). Capítulo 6 - Types of Lasers. Em O. SVELTO, *Principi dei Laser* (pp. 201-268). Milão, Itália: Tamburini.
- SVELTO, O. (1970). *Principi dei Laser*. Milão: Tamburini.
- SYED, A. A., MOHSIN, M., & ZUBAIR ALI, S. M. (2020). Survey and technological analysis of laser and its defense applications. *KeAi Defense Technology*.
- Technavio Research. (02 de Março de 2020). *Fiber Laser Market 2020-2024 | Demand for Additive Manufacturing to Boost Growth | Technavio*. Fonte: Business Wire: <https://www.businesswire.com/news/home/20200302005720/en/Fiber-Laser-Market-2020-2024-Demand-for-Additive-Manufacturing-to-Boost-Growth-Technavio>
- THOSS, A. (24 de Março de 2020). *Global laser markets: Insights & forecasts 2019 was a year with very mixed results for the laser manufacturing community*. Fonte: LaserFocusWorld: <https://www.laserfocusworld.com/lasers-sources/article/14168521/global-laser-markets-insights-forecasts>
- TOZER, B. A. (1986). The industrial laser annual handbook: edição 1986. *Optics & Laser Technology*, 18, 324.
- TRUMPF GROUP. (s.d.). *Sublimation cutting. High-quality edges for precision cutting*. Fonte: Trumpf Group: [https://www.trumpf.com/en\\_CA/applications/laser-cutting/sublimation-cutting/](https://www.trumpf.com/en_CA/applications/laser-cutting/sublimation-cutting/)
- TSAI, C.-H., & CHEN, H.-W. (2003). Laser cutting of thick ceramic substrates by controlled fracture technique. *Journal of Materials Processing Technology*, Vol. 136, 229- 239.
- TÜNNERMANN, A., SCHREIBER, T., RÖSER, F., LIEM, A., HÖFER, S., ZELLMER, H., . . . LIMPERT, J. (2005). The renaissance and bright future of fibre lasers. *Journal of Physics B: Atomic, Molecular and Optical Physics*, vol. 38, no. 9, S681–S693.

- TÜNNERMANN, A., WREDE, K., & WELLEGEHAUSEN, B. (1990). Generation of high peak power excimer laser radiation by pulse shortening. *Applied Physics B*, 50, pp. 361–364.
- U.S. Navy Laser Versus UAVs... Laser Wins... (24 de Junho de 2009). Fonte: Milsat Magazine, Satnews Daily: <http://www.satnews.com/story.php?number=1272864526>
- URQUHART, P. (1988). Review of rare earth doped fibre lasers and amplifiers. *IEE Proceedings - Optoelectronics*, 135(6), 385-407.
- VERHAEGHE, G., & HILTON, P. (14 e 15 de Julho de 2005). Battle of the Sources - Using a High-Power Yb-Fibre Laser for Welding Steel and Aluminium. Praga, Tchêquia. Fonte: TWI The Welding Institute: <https://www.twi-global.com/technical-knowledge/published-papers/battle-of-the-sources-using-a-high-power-yb-fibre-laser-for-welding-steel-and-aluminium-july-2005>
- VICANEK, M., & SIMON, G. (1987). Momentum and heat transfer of an inert gas jet to the melt in laser cutting. *Journal of Physics D: Applied Physics*, 20, 1191–1196.
- VICANEK, M., SIMON, G., URBASSEK, H. M., & DECKER, I. (1987). Hydrodynamical instability of melt flow in laser cutting. *Journal of Physics D: Applied Physics*, Volume 20, Número 1, 481–488.
- WANDERA, C. (2016). Capítulo 18 - Fiber Lasers in Material Processing. Em M. PAUL, *Fiber Laser* (pp. 401-426). Londres, Reino Unido: IntechOpen Limited.
- WANDERA, C., & KUJANPÄÄ, V. (2010). Characterization of the melt removal rate in laser cutting of thick-section stainless steel. *Journal of Laser Applications*, 22, 62–70.
- WANDERA, C., KUJANPÄÄ, V., & SALMINEN, A. (2011). Laser power requirement for cutting of thicksection steel and effects of processing parameters on mild steel cut quality. *Journal of Engineering Manufacture, Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers 2011;225*, 651–661.
- WANDERA, C., SALMINEN, A., & KUJANPÄÄ, V. (2009). Inert gas cutting of thick-section stainless steel and medium-section aluminum using a high power fiber laser. *Journal of Laser Applications*. 21.
- WANDERA, C., SALMINEN, A., OLSEN, F. O., & KUJANPÄÄ, V. (2006). Cutting of stainless steel with fiber and disk laser. *ICALEO 2006 International Congress on Applications of Lasers & Electro-Optics* (p. 404). Scottsdale, AZ, E. U. A.: Laser Institute of America.
- WATSON, J. (1992). Fundamentals of photonics. *Optics and Laser Technology*, 24, 177.
- WEBER, J. (1953). Amplification of microwave radiation by substances not in thermal equilibrium. *Transactions of the IRE Professional Group on Electron Devices*, 3, pp. 1-4.

- WEBER, M. J. (1999). *Handbook of Laser Wavelengths*. Boca Raton, FL, EUA.: CRC Press.
- WELCH, A. J., TORRES, J. H., & CHEONG, W. F. (1989). Laser physics and laser-tissue interaction. *Texas Heart Institute Journal*, 16, 141-149.
- Wikimedia Commons. (15 de Maio de 2008). *Electromagnetic spectrum*. Fonte: Wikimedia Commons - transferido por Penubag: <https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Electromagnetic-Spectrum.png>
- Wikimedia Commons, U. G. (3 de Julho de 2009). *Diagram of a ruby laser from LLNL document "Laser Programs, the first 25 years"*. Fonte: Wikimedia Commons : [https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Ruby\\_laser.jpg](https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Ruby_laser.jpg)
- YARIV, A. (1989). *Quantum Electronics, 3a edição*. Nova Iorque, E. U. A.: Wiley.
- YILBAS, B. S. (1997). Laser heating process and experimental validation. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 40, 1131-1143.
- YILBAS, B., & SAHIN, A. (1995). Oxygen assisted laser cutting mechanism—a laminar boundary layer approach including the combustion process. *Optics and Laser Technology Journal*. 27, 175-184.
- YUAN, G., CHEN, Z., & LUZZI, D. (2017). Application of Laser Technology in Fashion Industry . *Springer Series in Fashion Business*, 43–56.
- ZAVECZ, T. E., SAIFI, M. A., & NOTIS, M. (1975). Metal reflectivity under high-intensity optical radiation. *Applied Physics Letters*, 26, 165–168.
- ZAVECZ, T. E., SAIFI, M. A., & NOTIS, M. (1975). Metal reflectivity under high-intensity optical radiation. *Applied Physics Letters*, 26, 165–168.
- ZENTENO, L. (1993). High-power double-clad fiber lasers. *Journal of Lightwave Technology*, 11(9), 1435–1446.
- ZLATANOV, N. (2016). *Lasers and laser applications*. Washington, D.C., EUA: IEEE Computer Society.