Thaffarel Barcelos Machado Ribas dos Santos

IMPLEMENTAÇÃO DE UM SISTEMA LASER DE CO2 PARA APLICAÇÕES EM SOLDAGEM

Dissertação submetida ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica da Universidade Federal de Santa Catarina para a obtenção do Grau de Mestre em Engenharia Mecânica.
Orientador: Prof. Régis Henrique Gonçalves e Silva, Dr. Eng.

Ficha de identificação da obra elaborada pelo autor, através do Programa de Geração Automática da Biblioteca Universitária da UFSC.

Santos, Thaffarel Barcelos Machado Ribas dos Implementação de um sistema LASER de CO2 para aplicações em soldagem / Thaffarel Barcelos Machado Ribas dos Santos ; orientador, Régis Henrique Gonçalves e Silva, - Florianópolis, SC, 2018. 132 p.

Dissertação (mestrado) - Universidade Federal de Santa Catarina, Centro Tecnológico, Programa de Pós Graduação em Engenharia Mecânica, Florianópolis, -Florianópolis, SC, 2018.

Inclui referências.

 Engenharia Mecânica. 2. Tecnologia LASER. 3.
 Soldagem LASER CO2. 4. Implementação de sistemas. 5.
 Mapeamento de parâmetros. I. Silva, Régis Henrique Gonçalves e. II. Universidade Federal de Santa Catarina. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica. III. Título.

Thaffarel Barcelos Machado Ribas dos Santos

IMPLEMENTAÇÃO DE UM SISTEMA LASER DE CO2 PARA APLICAÇÕES EM SOLDAGEM

Esta Dissertação foi julgada adequada para obtenção do Título de Mestre em Engenharia Mecânica, e aprovada em sua forma final pelo Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica.

Florianópolis, 26 de Outubro de 2018.

Johny Carlos da Silva, Dr. Eng. Coordenador do Curso

Régis Henrique Gonçalves e Silva, Dr. Eng. – Orientador Universidade Federal de Santa Catarina

Banca Examinadora:

Milton Pereira, Dr. Eng.
Universidade Federal de Santa Catarina

Erwin Werner Teichmann, Dr. Eng.
Instituto Federal de Santa Catarina

Andrês Fabricio Fischdick Acuña, M. Eng.
PETROBRAS

Dedico este trabalho à minha família.

AGRADECIMENTOS

Primeiramente, agradeço a Deus, Criador de tudo, por ter me dado saúde e força para superar as dificuldades;

À Universidade Federal de Santa Catarina, seu corpo docente, direção e administração que oportunizaram a janela que hoje vislumbro um horizonte superior, eivado pela acendrada confiança no mérito e ética aqui presentes;

Ao Prof. Dr. Eng. Régis Henrique Gonçalves e Silva pela orientação, discussões técnicas, esclarecimentos e apoio na elaboração deste trabalho:

A toda equipe de engenheiros, técnicos, estagiários e bolsistas do LABSOLDA pela amizade e pelo suporte em questões mecânicas, elétricas, computacionais, eletrônicas, gráficas e administrativas que contribuíram nas várias etapas do projeto e ajudaram na minha formação pessoal: Alberto Viviani, Luciano Cirino, Cassiano Godinho, Rafael Bernardi, Kaue Riffel, Daniel Galeazzi, Uallas Brito, Arthur Gustavo, Mateus Skowronski, Luiz Eduardo Paes, Larissa Colares, Daniel Ferrari, Fernando Costenaro, Felippe Kalil, Renan Kindermann, Gustavo Sousa, Marcelo Okuyama, Hellinton Direne, Junior Zanini, Fernando Lucas, Arthur Gondim, Ramon Fagundes, Jônathas Alves, Eduardo Bidese, Alisson Rosa, Mario Junior, Cleber Guedes, Eduardo Luz, Rafael Horn, Ramon Meller, Danilo Ribeiro, Rodrigo Machado, Tiago Calegari, Alex Guesser, Alexssander Martins, Douglas Ferronato, Elias Rosa Junior, Caroliny Kammers, Isabel Mattos, Rafael Nunes, Nathan Amorim, Pedro Jaeger, Franciely Atkinson, Giovanna Faraco, Cleide Marqueze, João Andrade, Mateus Schwedersky e Cleber Marques;

Aos integrantes do LMP, Milton Pereira, Jhonattan Gutjahr e ao Cláudio Abílio, pelos conselhos e disposição para ajudar e esclarecer dúvidas sobre o LASER, fundamental para esclarecimentos sobre o assunto.

Agradeço a equipe da TRUMPF, em especial ao Jhonny, Evaldo e ao Ronison pelo auxílio prestado, pela paciência e disponibilidade em me atender e dar assistência que sem dúvida me ajudaram bastante no decorrer do trabalho;

Ao Adrian e ao Adroaldo pela participação e pelo suporte técnico que atuaram diretamente durante o projeto.

Ao programa de Pós Graduação em Engenharia Mecânica da Universidade Federal de Santa Catarina pela oportunidade de fazer parte do mesmo;

Ao CNPq e CAPES, pelo apoio financeiro;

Aos meus pais, Gleides Terezinha Barcelos Machado Ribas dos Santos e Marco Aurélio Ribas dos Santos, pela minha criação, educação, amor, incentivo e apoio incondicional em todos os momentos da minha vida;

Á minha família, minha noiva Patrícia da Silva, pela paciência, apoio, incentivo e motivação; e minha enteada Camily Gabriela da Silva, pelos momentos que me ajudaram a amadurecer como pessoa.

A todos que direta ou indiretamente fizeram parte da minha formação, o meu muito obrigado.

RESUMO

Destaca-se a importância da tecnologia LASER em processamento de materiais, visto sua ampla gama de utilizações, como endurecimento superficial, revestimento, manufatura aditiva, marcação, corte, e soldagem. Além disso, a característica que o torna bastante utilizado nas indústrias é sua capacidade produtiva, uma vez que atinge uma alta qualidade de processamento e uma diminuição do tempo e custo de processo. Essas vantagens suscitam a possibilidade do emprego da soldagem LASER em chapas espessas, como por exemplo, na indústria naval. O processo de soldagem a LASER, conhecido como LASER Beam Welding (LBW), tem seu espaço assegurado nos países desenvolvidos. Entretanto no Brasil, a utilização do LASER em processos de soldagem é pouco difundida devido seu alto custo, tornando seu estudo relevante para o desenvolvimento do setor no país. Dentro deste contexto, é considerado estratégico um programa de enriquecimento de conhecimento científico, tecnológico e aplicativo da soldagem LASER. Este fator motivou a abertura da linha de pesquisa em soldagem LASER do LABSOLDA impulsionada pela doação de um equipamento no escopo de uma colaboração internacional estabelecida. Neste contexto, o trabalho divide-se em dois pilares principais. Primeiramente, é necessária a consolidação de infraestrutura de aplicação, pela implementação de um sistema de soldagem LASER automatizado, composto por um sistema LASER de CO₂ (2,6 kW de potência), respectivo sistema de refrigeração, um sistema de distribuição do feixe e um sistema de movimentação mecanizada, materializando a configuração física de operação. Subsequentemente, se visa a realização de um mapeamento inicial dos principais parâmetros do sistema, como distância focal, velocidade de soldagem, vazão de gás e potência. Desta maneira, se consolidam as bases para esta linha de pesquisa e trabalhos futuros. No decorrer da implementação e integração dos sistemas, fez-se necessário realizar uma série de adaptações e manutenções nos equipamentos. A consolidação da automatização e integração do sistema implementado, foi realizada através do software MACH3 baseado em PC, para definição de trajetórias do sistema de movimentação e acionamentos de comandos do LASER. Em uma avaliação dos resultados obtidos, foi possível implementar operacionalmente o sistema de soldagem com o LASER CO₂ TLF 2600 Turbo, da Trumpf. Em termos do processo, a análise das principais características do equipamento e influência dos parâmetros para o processo de soldagem autógena pode servir como know how parcial para trabalhos futuros, estabelecendo um mapa operacional, em vista da falta de informações na literatura para soldagem nesta faixa de operação.

Palavras-chave: LASER Beam Welding (LBW); LASER de CO_2 ; Integração; Mapeamento de parâmetros.

ABSTRACT

It highlights the importance of LASER technology in processing materials, given its wide range of uses, such as surface hardening, cladding, caracteristic that makes it widely used in industries is its productive capacity, as it achieves a high quality of processing and a reduction of time and cost of process. These advantages give rise to the possibility of using LASER welding in thick plates, such as in the naval industry. The LASER welding process known as LASER Beam Welding (LBW) has its space secured in developed countries. However in Brazil, the use of LA-SER in welding processes is not very widespread due to its high cost, making its study relevant for the development of the sector in the country. Within this context, a program of enrichment of scientific, technological and application knowledge of LASER welding is considered strategic. This factor led to the opening of the LABSOLDA LASER welding research line driven by the donation of an equipment withind the scope of an established international collaboration. In this context, the work is divided into two main pillars. First, it is necessary to consolidate application infrastructure by implementing an automated LASER welding system, consisting of a CO₂ LASER system (2.6 kW power), its cooling system, a beam distribution system and a mechanized movement system, materializing the physical configuration of operation. Subsequently, it is intended to carry out an initial mapping of the main parameters of the system, such as focal length, welding speed, gas flow and power. In this way, the foundations for this line of research and future work are consolidated. During the systems implementation and integration, it was necessary to carry out a series of adaptations and maintenance in the equipment. The consolidation of the automation and integration of the implemented system was carried out through the PC-based MACH3 software for the definition of the drive system trajectories and LASER commands. In an evaluation of the results obtained, it was possible to implement the welding system with the Trumpf LASER CO₂₁ TLF 2600 Turbo. Regarding the process, the analysis of the main caracteristics of the equipment and influence of the parameters for the autogenous welding process can serve as partial know-how for future work, establishing an operational map, due to the lack of information in the welding literature in this range. operation.

Key words: LASER Beam Welding (LBW); CO₂ LASER; Integration; Mapping of parameters.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1: a) Processo de Absorção de Energia; b) Processo de emissão
espontânea através de um fóton; c) Processo de emissão estimulada Fonte:
[8]
Figura 2: Representação esquemática na geração do feixe LASER. Fonte:
[10] (Adaptado)
Figura 3: Seções transversais de modos eletromagnéticos transversais.
Fonte: [11] Adaptado
Figura 4: Representação gráfica dos modos de soldagem, relação
densidade de potência versus penetração. Fonte: [15] (Adaptado) 37
Figura 5: Modo de Soldagem: a) Por Condução de Calor; b) Por
Penetração Profunda (keyhole). Fonte: [4] (Adaptado)
Figura 6: Efeito da taxa de fluxo de gás hélio por supressão de plasma na
profundidade de penetração em aço carbono. Potência LASER 10kW;
Velocidade de soldagem de 1,2 m/min. Comprimento focal de 476 mm.
Fonte: [18]
Figura 7: Defeitos relacionados ao processo LBW. Fonte: [6] (Adaptado).
Figura 8: Espectro Eletromagnético do LASER. Fonte: [5]. (Adaptado)
Figura 9: Aplicações típicas de laser de CO2 na faixa quilowatts. Fonte:
[19]
Figura 10: Estrutura do LASER de fibra. Fonte [22] (Adaptado)
Figura 11: Representação gráfica comprimento de onda versus absorção
da luz. Fonte: [22]
Figura 12: Parâmetros Geométricos do Feixe LASER. Fonte: [23] 50
Figura 13: (a) Módulo Controle/Comando. (b) Módulo Geração (c)
Módulo Refrigeração. Fonte: [Autor]
Figura 14: Módulo de controle/comando. Em (A) Conversor de
frequência com filtro; (B) TASC 200 (controle LASER); (C) Misturador
de gases; (D) Bomba de vácuo e bloco de válvulas; (E) Gerador RF; (F)
Controle de conexão – gerador RF. Fonte: [Autor]
Figura 15: Interface Homem Máquina. Modelo Task 300 SC 520 L da
Siemens. Fonte: [Autor]
Figura 16: Da esquerda para direita: Gás Nitrogênio, Dióxido de Carbono
e Hélio. Responsáveis pela formação do feixe LASER. Fonte: [Autor]61
Figura 17: Representação caminho feixe LASER dentro do ressonador,
de "1 a 8". O espelho "A", de entrada e o "B" o de retorno. Fonte: [32]
(Adaptado)

T' 10 D 1 M/11 1 C ~ T (A) D C' 1 1 /
Figura 18: Ressonador, Módulo de Geração. Em (A) Refrigerador de gás;
(B) tubos de descarga. Fonte: [Autor]
Figura 19: Sistema de Refrigeração Trumpf Laser TLF 2600 Turbo (a)
Circuito de Cobre, (b) Circuito de Alumínio, (c) Conjunto Moto-Bomba,
(d) Bomba de Vácuo e (e) Trocadores de Calor. Fonte: [Autor] 64
Figura 20: (1) Módulo de Geração da Fonte LASER TLF 2600 Turbo. (2)
Braço Articulado (3) Cabeçote de focalização. Fonte: [Autor] 65
Figura 21: Transporte do feixe através de espelhos do ressonador até o
cabeçote de focalização modular LASER. Fonte: [Autor] [13] 66
Figura 22: Configuração espelhos do cabeçote de focalização LASER. (1)
conector de água; (2) placa de montagem; (3) espelho; (4) conector de
água. Fonte: [33]
Figura 23: Ponteira de soldagem CJ2, da fabricante Kugler. (1)
Conectores para alimentação de gás; (2) Tubos de cobre para saída do gás
de proteção. (3) Anel de ajuste para ajuste vertical; (4) Abertura para saída
do feixe LASER. Fonte: [33]
Figura 24: Sistema de Movimentação. Fonte: [Autor]
Figura 25: Bandeja original do sistema de movimentação. Fonte: [Autor]
70
Figura 26: Interface MACH3. Fonte: [Autor]71
Figura 27: Configuração dos sinais de comando dos servos drivers. Fonte.
[Autor]
Figura 28: Programação da rampa de aceleração. Fonte: [Autor] 73
Figura 29: Diagrama de blocos software MACH3. Fonte: [Autor] 73
Figura 30: Parâmetros a serem observados na análise da macrografia.
Fonte: [Autor]
Figura 31: Bancada de ensaios. (a) Módulo de comando/controle. (b)
Módulo de refrigeração. (c) IHM CNC. (d) Sistema de transporte do feixe
(e) Sistema de movimentação. (f) Módulo de geração. (g) Cabeçote de
focalização do feixe. (h) Ponteira de soldagem. (i) Bandeja de fixação
corpo de prova. Fonte [Autor]77
Figura 32: Teste para determinar a distância focal. Fonte: [Autor] 80
Figura 33: Câmera Termográfica SC700. Fonte: [35]
Figura 34: Esquemático para realização da filmagem térmica. Fonte:
[Autor]
Figura 35: Subsistema A. Imagem Frontal. Fonte: [Autor]
Figura 36: Subsistemas A e B. Imagem Traseira. Fonte: [Autor] 86
Figura 37: Funcionamento do sistema secundário de refrigeração. Fonte:
[Autor]
Figura 38: Subsistema B. Trocador de calor, tubulação e válvula
solenoide. Parte Inferior. Fonte [Autor]

Figura 39: Circuito de retorno subsistema B. Fonte [Autor]
Figura 40: Display de Temperatura da Água de Refrigeração do LASER.
Fonte [Autor]90
Figura 41: (a) Circuito Principal. (b) Circuito Secundário ou de Retorno.
Fonte [Autor]
Figura 42: Medição da rotação do eixo do motor. Fonte: [Autor]93
Figura 43: Substituição das mangueiras de transporte de água e gás.
Fonte: [Autor]94
Figura 44: Adaptação mão francesa para fixação do sistema de transporte
do feixe. Fonte: [Autor]95
Figura 45: Adaptações mesa CNC. Barras chatas em X e calços da mesa.
Fonte: [Autor]96
Figura 46: Bandeja nova do sistema de movimentação. Em (a) bases
móveis; (b) furos para fixação das bases móveis; (c) câmara para gás de
purga; (d) conexão pneumática engate rápido. Fonte: [Autor]97
Figura 47: Diagrama de blocos do sistema LASER integrado. Fonte:
[Autor]98
Figura 48: Gabinete v3 e joystick com suas funcionalidades. Fonte:
[Autor]99
Figura 49: Sistema de distribuição de gases. Fonte: [Autor]99
Figura 50: Linha de referência. Posição focal. Fonte: [Autor]101
Figura 51: Teste para determinar a distância focal. Variação da posição
focal de 2mm. Fonte: [Autor]
Figura 52: Teste para determinar a distância focal. Variação da posição
focal de 1mm. Fonte: [Autor]
Figura 53: Gráfico com o comportamento da geometria do cordão
variando a posição focal. Material: Aço carbono SAE 1020 104
Figura 54: Resultados obtidos com a variação da posição focal em aço
carbono. Parâmetros: Potência = 2,6 kW; Velocidade de soldagem = 120
cm/min; Vazão de gás = 20 l/min. Em (a) 105 (-7) mm; (b) 108 (-4) mm;
(c) 111 (-1) mm; (d) 114 (+2) mm; (e) 117 (+5) mm; (f) 120 (+8) mm.
Figura 55: Gráfico com o comportamento da geometria do cordão
variando a posição focal. Material: Aço inoxidável 304 L 106
Figura 56: Geometria do cordão. Resultados obtidos com a variação da
posição focal em aço inoxidável 304L. Parâmetros: Potência = 2,6 kW;
Velocidade de soldagem = 120 cm/min; Vazão de gás = 20 l/min. Em (a)
105 (-7) mm; (b) 108 (-5) mm; (c) 111 (-1) mm; (d) 114 (+4) mm; (e) 117
(+5) mm; (f) 120 (+8) mm
Figura 57: Aspecto superficial. Resultados obtidos com a variação da
posição focal em aço inoxidável 304L. Parâmetros: Potência = 2,6 kW;

Velocidade de soldagem = 120 cm/min; Vazão de gás = 20 l/min. Em (a)
105 (-7) mm; (b) 108 (-5) mm; (c) 111 (-1) mm; (d) 114 (+4) mm; (e) 117
(+5) mm; (f) 120 (+8) mm
Figura 58: Gráfico com o comportamento da geometria do cordão para
diferentes velocidades de soldagem109
Figura 59: Geometria do cordão para diferentes velocidades de soldagem.
Parâmetros: Potência = 2,6 kW; Posição focal = 111 (-1); Vazão de gás =
20 l/min. (a) 30cm/min; (b) 60 cm/min; (c) 90 cm/min; (d) 120 cm/min;
(e) 150 cm/min e (f) 200 cm/min110
Figura 60: Aspecto superficial. Parâmetros: Potência = 2,6 kW; Posição
focal = 111 (-1) mm; Vazão de gás = 20 l/min. Variação da velocidade de
soldagem, em (a) 30cm/min; (b) 60 cm/min; (c) 90 cm/min; (d) 120
cm/min; (e) 150 cm/min e (f) 200 cm/min111
Figura 61: Porosidade no cordão devido ao aprisionamento dos gases pós
solidificação. Potência do LASER = 2600W; Posição focal = 111 (-1)
mm; Vazão de gás = 20 l/min; Em (a) e (b) Velocidade de soldagem: 30
cm/min. Em (c) e (d) velocidade de soldagem igual a 60 cm/min112
Figura 62: Gráfico com o comportamento da geometria do cordão
variando a vazão de gás113
Figura 63: Resultados obtidos com a variação da vazão de gás. Potência
do LASER = 2600W; Posição focal = 111 (-1) mm; Velocidade de
soldagem = 120 cm/min. Em (a) 8 l/min; (b) 12 l/min; (c) 16 l/min; (d) 20
l/min; (e) 24l/min
Figura 64: Resultados obtidos com a variação da vazão de gás Geometria
do cordão. Potência do LASER = 2600W; Posição focal = 111 (-1) mm;
Velocidade de soldagem = 120 cm/min. Em (a) 8 l/min; (b) 12 l/min; (c)
16 l/min; (d) 20 l/min; (e) 24l/min115
Figura 65: Gráfico com o comportamento da geometria do cordão
variando a potência. Aço carbono116
Figura 66: Resultados obtidos com a variação da potência. Aço carbono
SAE 1020. Posição focal = 111 (-1) mm; Vazão de gás = 20 l/min;
Velocidade de soldagem = 120 cm/min. Em (a) 20%; (b) 40% (c) 60%;
(d) 80%; (e) 100%117
Figura 67: Gráfico com o comportamento da geometria do cordão
variando a potência. Aço inoxidável 304L118
Figura 68: Resultados obtidos com a variação da potência. Aço inoxidável
304L. Posição focal = 111 (-1) mm; Vazão de gás = 20 l/min; Velocidade
de soldagem = 120 cm/min. Em (a) 20%; (b) 40% (c) 60%; (d) 80%; (e)
100%
Figura 69: Representação dos trechos envolvidos durante a soldagem.

Figura 70: Gráfico temperatura versus tempo. Parâmetros: Potência do
LASER = 2600W; Posição focal = 111 (-1) mm; Velocidade de soldagem
= 120 cm/min; Vazão de gás = 20 l/ min
Figura 71: Gráfico temperatura versus tempo. Detalhe para o gráfico
obtido para chapa de 6.35 mm. Parâmetros: Potência do LASER =
2600W; Posição focal = 111 (-1) mm; Velocidade de soldagem = 120
cm/min; Vazão de gás = 20 l/ min
Figura 72: Filmagem térmica durante a soldagem sobre chapa de 2 mm
de espessura em potências de 40, 70 e 100% da capacidade máxima.
Parâmetros: Posição focal = 111 (-1) mm; Velocidade de soldagem = 120
cm/min; Vazão de gás = 20 l/ min
Figura 73: Macrografia. Potências em (A) 40%; (B) 70% e (C) 100%.
124

LISTA DE TABELAS

Tabela 1: Potencial de ionização dos gases empregados na soldagem
LASER. Fonte: [11]. (Adaptado)
Tabela 2: Principais características do LASER CO2. Fonte: [19] 46
Tabela 3: Especificações Técnicas LASER TLF 2600 Turbo. Fonte [32]
Tabela 4: Ensaio 0. Parâmetros fixos para determinação da distância
focal79
Tabela 5: Ensaio 1. Caracterização do processo em relação a posição
focal
Tabela 6: Parâmetros para Ensaio 2. Ensaio para caraterização do
processo em relação a velocidade de soldagem
Tabela 7: Parâmetros para Ensaio 3. Variação da vazão de gás
Tabela 8: Ensaio referente a caracterização em relação a potência 82
Tabela 9: Parâmetros utilizados na filmagem térmica. Material: Aço
carbono SAE1020
Tabela 10: Médias e desvios padrão dos resultados obtidos caracterizando
•
o comportamento da geometria do cordão em relação a variação da
posição focal. Aço carbono SAE 1020
Tabela 11: Médias e desvios padrão dos resultados obtidos caracterizando
o comportamento da geometria do cordão em relação a variação da
posição focal. Aço inoxidável 304L
Tabela 12: Médias e desvios padrão dos resultados obtidos com a
velocidade de soldagem
Tabela 13: Médias e desvios padrão dos resultados obtidos caracterizando
o comportamento da geometria do cordão em relação a variação do gás
de proteção.
Tabela 14: Médias e desvios padrão dos resultados obtidos caracterizando
o comportamento da geometria do cordão em relação a variação da
potência do LASER. Aço carbono SAE1020116
Tabela 15: Médias e desvios padrão dos resultados obtidos caracterizando
o comportamento da geometria do cordão em relação a variação da
potência do LASER. Aço Inoxidável 304L118
Tabela 16: Temperaturas máximas para cada trecho para chapas de 3 e
6.35 mm
Tabela 17: Filmagem térmica variando a potência do LASER.
Parâmetros: Posição focal = 111 (-1) mm; Velocidade de soldagem = 120
cm/min; Vazão de gás = 20 1/ min

xxii

LISTA DE ABREVIATURAS E SIMBOLOGIAS

ANSI American National Standards Institute

BPP Beam Parameter Product

CNC Comando Numérico Computadorizado

CO₂ Dióxido de Carbono CW Continuous Wave

IHM Interface Homem Máquina

H₂ Hidrogênio

LABSOLDA Instituto de Soldagem e Mecatrônica LASER Light Amplification by Stimulated Emis-

sion of Radiation

LBW LASER Beam Welding

LMP Laboratório de Mecânica de Precisão

M² Fator de qualidade do feixe

N₂ Nitrogênio

PC Personal Computer

SAE Society of Automotive Enginneers TEM Transverse Electromagnetic Mode

W₀ Cintura ou raio de feixeZTA Zona Termicamente Afetada

Z_R Intervalo ou comprimento de Rayleigh

Θ Divergência do feixeλ Comprimento de onda

xxiv

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	27
1.1	Objetivos	
1.1.1	Objetivo geral	
1.1.2	Objetivos específicos	
2	FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA E TECNOLÓGIO	CA.31
2.1	Aspectos gerais do LASER	
2.2	Princípios físicos envolvidos na geração do LASER.	31
2.3	Aspectos construtivos	
2.4	Modo espacial	
2.5	Tecnologia LASER em processos LBW	35
2.5.1	Características dos parâmetros de operação	38
2.5.2	Imperfeições	
2.5.3	Tipos de LASER	43
2.5.4	Fatores que afetam a interação LASER/Matéria	47
2.5.5	Parâmetros geométricos de um feixe LASER	49
2.5.6	Segurança em sistemas LASER	
2.6	Automação do processo	53
2.6.1	MACH3	54
2.6.2	Sensoriamento	
3	EQUIPAMENTOS, METODOLOGIA E MATERIA	AIS57
3.1	Equipamentos	
3.1.1	LASER TLF 2600 Turbo	57
3.1.2	Sistema de transporte do feixe LASER	64
3.1.3	Sistema automatizado de movimentação	68
3.2	Metodologia e materiais	75
3.2.1	Problemática	75
3.2.2	Metodologia dos ensaios	76
4	RESULTADOS	85
4.1	Geração de infraestrutura para soldagem LASER C	02 .
Adapta	ções e implementação do LASER TLF 2600 Turbo	
4.1.1	Módulo de refrigeração	
4.2	Adaptações do sistema de transporte do feixe	94
4.3	Adaptações no sistema de movimentação	95
4.4	Integração dos sistemas	97
5	MAPEAMENTO DE PARAMETRIZAÇÃO BÁSIO	CA
	SOLDAGEM LASER CO2 COM O SISTEMA	
IMPLE	MENTADO	101
5.1	Ensaios de soldagem	103

5.1.1	Posição focal	103
5.1.2	Velocidade de soldagem	
5.1.3	Vazão de gás	
5.1.4	Potência	
5.1.5	Filmagem termográfica	119
6	CONCLUSÕES	
6.1	Sugestões para trabalhos futuros	126
7	REFERÊNCIAS	129

1 INTRODUÇÃO

O processamento de materiais utilizando o LASER é uma realidade que vem sendo explorada há décadas. Os primeiros trabalhos de pesquisa que conduziram à invenção do feixe LASER foram realizados por Albert Einstein em 1916. No entanto, apenas em 1960, foi gerado o primeiro feixe LASER da história, construído por Theodore Harold Maiman [1] e, em 1964, o LASER de dióxido de carbono (LASER de ${\it CO}_2$) foi desenvolvido pelo engenheiro eletricista Chandra Kumar Naranbhai Patel [2].

O feixe LASER se propaga no ar com pouca divergência, orientando-se por ópticas sem perder ou alterar suas características físicas. Desse modo, a introdução dessa tecnologia nos meios industriais, possibilitou aumentar significativamente as capacidades de processos, qualidades finais, diminuição dos custos produtivos e velocidades de processamento de material para otimizar a produção em vários segmentos de mercado [3].

Como o LASER pode aquecer, fundir e vaporizar qualquer material, ele é utilizado com alguns objetivos, tais como: endurecimento superficial, revestimento (cladding), manufatura aditiva, marcação, corte, soldagem, dentre outros [4]. Dentre os diversos tipos de LASER, o LASER de CO_2 , é utilizado no segmento industrial para processamento de materiais para corte, soldagem, marcação (com baixas potências), aplicáveis a metais e a tecidos [5].

O processo de soldagem a LASER, também conhecido com LBW (LASER *Beam Welding*) é um diferencial no segmento por ser capaz de operar com altas velocidades de soldagem, alta intensidade de energia, possuir alta precisão, zona termicamente afetada (ZTA) com dimensões reduzidas e uma alta relação penetração/largura do cordão [6]. Levando em conta estas características, o processo LASER pode ser aplicado na soldagem de chapas espessas, como por exemplo, na construção naval. As vantagens notáveis são: a diminuição da deformação das chapas, menor ataque metalúrgico e maior produtividade, haja visto que o processo dispensa preparação da junta.

Porém, no Brasil, a utilização do LASER para processo de soldagem é pouco difundida, tornando o seu estudo importante para o desenvolvimento tecnológico do país.

No segmento industrial, os processos baseados no LASER estão diretamente ligados à automação, uma vez que a qualidade final do material, controle dos parâmetros e o custo produtivo são primordiais no pro-

cesso de fabricação, assim como a segurança em um processo. A automação é o uso de qualquer dispositivo mecânico ou eletroeletrônico para controlar máquinas e processos. Dentre eles, podemos citar: controladores lógicos programáveis (CLP), comando numérico computadorizado (CNC), manipuladores cartesianos e robôs antropomórficos.

Nesse contexto, atualmente o Brasil carece de centros especializados para realização de pesquisas nos processos de fabricação com o LA-SER. O principal motivo disto, é o custo elevado para se adquirir o equipamento e montar uma infraestrutura adequada para sua segura e correta operação, especialmente quando se refere a sistemas LASER de alta potência. Além disso, um fator que dificulta a maior difusão de pesquisas na área é a carência de recursos humanos especializados em processos de soldagem e na tecnologia LASER. Apesar disto, existe demanda para pesquisas e desenvolvimento destes processos em diversos setores, como automotivo, bens de consumo, máquinas e equipamentos e construção naval, petróleo e gás. Dentro deste contexto, é considerado estratégico um programa de enriquecimento de conhecimento científico, tecnológico e aplicativos em soldagem LASER e sua inerente automação, de modo a possibilitar não apenas a parametrização, mas também a customização para diferentes condições de soldagem. Este fato motivou a abertura da linha de pesquisa em soldagem LASER no LABSOLDA, impulsionado pela doação de um equipamento no escopo de uma colaboração internacional estabelecida. O estágio inicial das operações demanda fase de consolidação da infraestrutura e de conhecimento tecnológico aplicativos, que será base dos futuros trabalhos. Desta maneira, foram estabelecidos os objetivos do presente trabalho, referentes à criação de uma infraestrutura física de operação, considerando também a segurança do equipamento e do usuário, e parametrizações prévias do sistema integrado.

1.1 Objetivos

1.1.1 Objetivo geral

No contexto tecnológico de processos de soldagem automatizados, onde se busca o desenvolvimento de tecnologias que permitam aumentar a produtividade e qualidade dos processos, define-se como objetivo geral do presente estudo como implantação de infraestrutura de aplicação para soldagem LASER de ${\it CO}_2$, bem como o estabelecimento de uma base de

conhecimento tecnológico e operacional do sistema e processo, configurando o início de uma nova linha de pesquisa do LABSOLDA.

1.1.2 Objetivos específicos

Como objetivos específicos do trabalho definem-se:

- a) Instalação do LASER TLF 2600 Turbo;
- Realizar a integração do equipamento de soldagem LA-SER com um sistema CNC, gerando um sistema integrado para soldagem LASER automatizado;
- Adequar a infraestrutura física da estação de trabalho, pelo desenvolvimento e implementação de dispositivos mecânicos capazes de garantir a configurabilidade do equipamento;
- d) Gerar um mapeamento inicial de parametrização do processo e do sistema, para soldagem, através da avaliação do comportamento dos principais parâmetros, como velocidade de soldagem, vazão de gás, posição focal e potência em aço carbono e aço inoxidável;
- e) Gerar documentação operacional básica, para continuidade das pesquisas em soldagem LASER.

2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA E TECNOLÓGICA

2.1 Aspectos gerais do LASER

O nome LASER vem da abreviação de *Light Amplification by Stimulated Emission of Radiation*, (Amplificação da Luz por Emissão Estimulada de Radiação). Por conceito, o LASER é uma luz monocromática, coerente, além de ser colimada, possibilitando a propagação como um feixe. O LASER, assim como todas outras ondas de luz, é uma forma de onda de radiação eletromagnética. A luz é definida como a radiação eletromagnética que torna os objetos visíveis, ou seja, é captada pelo olho humano. O LASER é radiação num espectro bem mais amplo, do ultravioleta ao infravermelho. A capacidade de enxergar todos os comprimentos de onda do espectro visível varia de pessoa para pessoa, mas por definição, a luz visível tem comprimento de onda entre 400 nm e 700 nm. No entanto, os LASERs podem ter um comprimento de onda que varia aproximadamente de 200 nm a 20.000 nm.

A baixa divergência de um feixe de LASER, tende a concentrar toda a energia disponível em uma região muito pequena, resultando em uma intensidade muito alta [7]. A principal diferença entre os diversos tipos de LASER é o comprimento de onda da radiação eletromagnética gerada, e ele está relacionado com a energia do fóton e, assim exerce uma forte influência na interação do LASER com o material sobre qual incide. Quando a luz LASER incide numa peça, a energia pode ser absorvida, refletida ou transmitida. Tal tecnologia pode ter várias aplicações como citado na introdução deste trabalho.

2.2 Princípios físicos envolvidos na geração do LASER

Para o melhor entendimento da utilização do LBW é necessário compreender alguns conceitos físico-químicos deste processo. O LASER baseia-se no princípio de excitar um número mínimo de elétrons, átomos, íons ou moléculas de um determinado material, podendo ser sólido, líquido ou gasoso, para um nível de energia superior ou chamado de excitado. Quando um elétron deixa o estado excitado e retorna ao estado fundamental o átomo emite um fóton, que pode ser tratado como um pacote de energia.

Esse processo de retorno do átomo para o estado fundamental é chamado de emissão espontânea, liberando um fóton que tem fase e direção aleatória e cujo o comprimento de onda depende da diferença de energia dos dois estados.

A emissão estimulada ocorre quando um fóton externo de energia equivalente colide com um átomo no estado excitado, liberando um segundo fóton imediato, idêntico ao fóton incidente na sua direção, fase, polarização e comprimento de onda.

A Figura 1, representa um esquema do princípio físico que norteia o processo LASER, onde, na Figura 1(a), ocorre a absorção de energia pelo átomo, sendo suficiente para este sair do estado fundamental para o estado excitado, e na Figura 1(b), ocorre o processo de emissão de energia, onde o mesmo átomo excitado retorna para ao estado fundamental. É durante essa transição, que o átomo libera a energia absorvida. Na Figura 1(c), ocorre a emissão estimulada, onde o átomo excitado recebe uma energia externa de um fóton, ocorrendo a estimulação do mesmo para o estado de baixa energia, emitindo assim, o fóton característico do retorno ao nível fundamental junto com o fóton que o estimulou. Esses dois fótons emitidos possuem características coerentes, de mesma energia, direção e fase, característicos da produção do LASER.

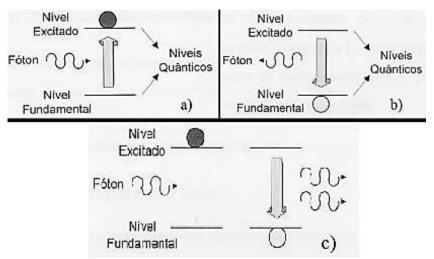


Figura 1: a) Processo de Absorção de Energia; b) Processo de emissão espontânea através de um fóton; c) Processo de emissão estimulada Fonte: [8]

Em determinado meio, esses dois fótons emitidos podem estimular outros átomos, elevando-os para níveis superiores, provocando assim emissão de novos fótons com as mesmas caraterísticas. Desta forma ocorrem inúmeras emissões estimuladas, que comporão a luz com característica de ondas coerentes.

2.3 Aspectos construtivos

Para a construção de uma fonte LASER, são necessários três componentes fundamentais: meio ativo, fonte de bombeamento e o ressonador.

O meio ativo, é o material onde se produz a inversão de população, ou seja, o meio onde se consegue situar mais átomos em um estado excitado que no estado de mais baixa energia [9]. A fonte de bombeamento é o meio que fornece a energia necessária para a excitação dos átomos. A fonte de bombeamento pode ser uma descarga elétrica, uma lâmpada ou outro LASER.

O ressonador tem como função fazer com que os fótons que emergem do meio ativo voltem para ele, produzindo mais e mais emissão estimulada. Dentro do ressonador, ocorrem as inúmeras emissões estimuladas de fótons, resultando na amplificação da luz. A maioria dos átomos deve ser mantida no estado excitado, caracterizando a chamada inversão populacional. Isto deve ser conseguido pela entrada de energia da fonte de bombeamento, que pode ser contínua (Fonte externa de emissão contínua) ou intermitente (Fonte externa de emissão pulsada). Então, com dois espelhos, um 100% reflexivo e outro parcialmente reflexivo produzem deslocamentos repetidos dos fótons, de um lado para o outro, através do comprimento do meio ativo. O sistema de distribuição dessa luz amplificada (LASER) pode ser através de espelhos (ex. LASER de ${\it CO}_2$) ou de fibra óptica. Uma representação esquemática do aspecto construtivo de um LASER pode ser vista na Figura 2.



Figura 2: Representação esquemática na geração do feixe LASER. Fonte: [10] (Adaptado).

2.4 Modo espacial

Dois modos espaciais são comumente usados para descrever o feixe: longitudinal e transversal. Eles são essencialmente independentes um do outro. Os modos longitudinais diferem entre si pela frequência de oscilação e pela distribuição espacial do campo eletromagnético na direção da propagação, já os modos transversais diferem pela frequência e pela distribuição espacial do campo eletromagnético na direção perpendicular à de propagação.

O número do modo longitudinal é normalmente ignorado ao caracterizar o feixe, uma vez que, tem pouca influência nas características e desempenho essenciais do feixe, pois são responsáveis pelas características espectrais do LASER, como largura de banda e coerência. O modo eletromagnético transversal (TEM) é de maior importância, ao passo que determinam parâmetros como divergência, diâmetro e distribuição de energia no feixe. Os modos são denotados TEM_{pl} onde "p" e "l" indicam os zeros da distribuição espacial segundo dois eixos ortogonais x e y.

O TEM descreve a variação da intensidade do feixe com a posição em um plano perpendicular à direção da propagação do feixe. Este caracteriza a intensidade máxima no feixe a partir do seu eixo central. O TEM é determinado pela: geometria da cavidade; alinhamento e espaçamento da óptica da cavidade interna; as propriedades de distribuição e propagação de ganho do meio ativo; e a presença de aberturas no ressonador. A Figura 3 mostra alguns padrões de modo transversal eletromagnético.

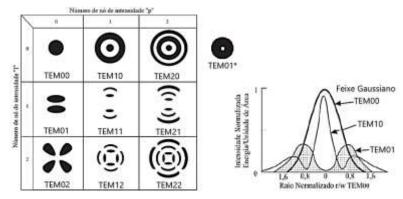


Figura 3: Seções transversais de modos eletromagnéticos transversais. Fonte: [11] (Adaptado).

O modo de menor ordem é chamado de modo fundamental TEM_{00} e é reconhecido por possuir uma distribuição de energia com formato gaussiano, conforme ilustrado na Figura 3. Dessa forma, há uma concentração de energia no centro do feixe, o que também ocorre para o modo TEM_{10} . Estes resultam em uma relação profundidade-largura maior que os modos de ordem superior. Isso se deve principalmente à forma mais concentrada do modo TEM_{00} , que resulta em um raio de feixe focalizado menor. O tamanho de ponto maior de feixes multimodo, no entanto, os torna mais adequados para aplicações de soldagem de topo, uma vez que reduz os requisitos de ajuste. O modo TEM_{01*} é gerado alternando-se dois modos TEM_{01} ortogonais. Devido a essa distribuição de energia do feixe determinada pelos modos transversais magnéticos, os mesmos têm influência direta sobre a geometria do cordão de solda.

2.5 Tecnologia LASER em processos LBW

O processo LBW é um processo de união baseado na fusão localizada do metal de base através do bombardeamento por um feixe de luz concentrada coerente e monocromática de alta intensidade [12]. Devido principalmente à alta concentração de energia possível, pela pequena dimensão do ponto focal (*spot size*), a energia total envolvida no processo de soldagem a LASER, é relativamente pequena comparada com processos tradicionais de arco elétrico e por chama. Isso proporciona algumas vantagens em relação a esses processos que incluem: alta densidade de

potência; zona termicamente afetada (ZTA) menor; velocidades de soldagem altas; entrada de calor concentrada; baixa distorção; não há contaminação por contato; e permite penetração profunda com cordões estreitos. Já como desvantagens são citadas: dificuldade de processar materiais com alta refletividade; investimento inicial ainda é bastante elevados; e dificuldade de operar em campo, devido à infraestrutura necessária à fonte LASER.

Dentre as características citadas, a mais relevante positivamente é a alta densidade de energia que o feixe de LASER oferece, e como mais relevante negativamente está relacionada ao custo. No entanto, o elevado custo deve ser considerado e pode ser absorvido sob a perspectiva de que a inserção de um processo de soldagem a LASER em um meio produtivo pode levar a elevação considerável nas taxas de produção, isto por causa das altas velocidades, profundidade de penetração e baixas distorções na peça, quando comparado a soldagem a arco voltaico, por exemplo [13].

Essa característica de possuir alta densidade de energia pode resultar em um modo de soldagem chamado de *keyhole* durante a soldagem, semelhante ao processo PAW (*Plasma Arc Welding* – Soldagem a Plasma) e EBW (*Electron Beam Welding* – Soldagem por Feixe de Elétrons). As imperfeições mais comuns são *humping*, porosidade e respingos. O perfil do cordão de solda depende de muitos parâmetros do processo de operação e esses parâmetros devem ser escolhidos corretamente para obter o resultado desejado.

Dependendo da irradiação do LASER, ou densidade de energia, o processo de soldagem é regido preferencialmente pelo seguinte mecanismo:

- I. Soldagem por Condução de Calor (*Heat Conduction Welding*) ou *Melt in*;
- II. Soldagem de Penetração Profunda (Keyhole Welding).

Esta irradiação possui uma densidade de potência $[W/cm^2]$, que mede a potência de radiação eletromagnética por unidade de área, isto é, a seção do feixe sobre o material de base. A densidade de potência é influenciada pela potência do LASER e pelo diâmetro do ponto focal que incide sobre a peça. Isto é definido pela Equação (1):

$$Densidade de Potência = \frac{Potência de saída do LASER (W)}{Tamanho do Spot (cm2)}$$
(1)

Densidade de energia ou fluência $[J/cm^2]$ é a energia fornecida por unidade de área num determinado período de tempo (tempo de interação). Definida pela Equação ((2):

$$Fluência = \frac{Potência de saída do LASER (W) x Tempo de Interação (s)}{Tamanho do Spot (cm2)}$$
(2)

Para o processo LBW é necessária uma alta densidade de potência, que varia de 5 x 10⁴ a 10⁷ W/ cm² [14]. Para soldagem por condução de calor, geralmente a intensidade do feixe é inferior a 10⁶ W/ cm². A estes níveis de irradiação, o feixe de LASER é absorvido pelo metal de base, gerando calor que é rapidamente conduzido no metal, fundindo assim a superfície irradiada, porém insuficiente para vaporização e formação do plasma [4]. Esse modo apresenta uma baixa relação de profundidade e largura, condição que é necessária quando se deseja uma penetração limitada na direção da espessura, especialmente para peças sensíveis ao calor. A Figura 4 é uma ilustração gráfica dos modos de soldagem.

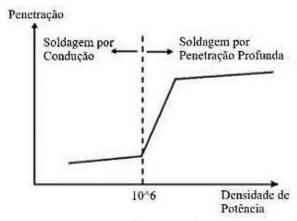


Figura 4: Representação gráfica dos modos de soldagem, relação densidade de potência versus penetração. Fonte: [15] (Adaptado).

Densidade de potência próximas a 10⁶ W/ cm², são consideradas instáveis, uma vez que, os dois modos estão presentes. Isto resulta em mais penetração do que quando há apenas o modo de condução, no entanto, a relação profundidade/largura é aproximadamente igual a 1. Na Figura 5 está representada de forma esquemática os modos de soldagem com suas características.

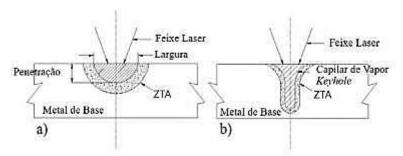


Figura 5: Modo de Soldagem: a) Por Condução de Calor; b) Por Penetração Profunda (*keyhole*). Fonte: [4] (Adaptado).

O modo de soldagem por penetração profunda (keyhole) envolve a vaporização de metais, o que requer um nível de densidade de potência superior a 10⁶ W/cm². A temperatura do substrato será superior ao ponto de ebulição, formando vapor metálico ionizado (plasma). A vaporização intensa provoca um grande aumento da pressão de vapor que perfura uma depressão no metal fundido, formando uma cavidade longa e estreita, chamada de keyhole. Esse modo produz uma relação profundidade/largura maior que 1. O feixe penetra mais profundamente no metal através da cavidade e é refratado e amortecido (reflexão múltipla) enquanto viaja através do vapor [13]. À medida que os raios do feixe atingem a superfície do keyhole, a energia do feixe é parcialmente absorvida na superfície e parcialmente refletida em direção a um novo ponto de interação. Esta sucessão de absorção/ reflexão nas superfícies laterais do capilar, aumenta a absorção total de energia [7]. Nesse caso, o cordão de solda é muito mais profundo do que a soldagem por modo de condução. O perfil de distribuição do feixe de LASER, afeta significativamente a dinâmica do keyhole, portanto, possibilita formação de defeitos como poros [16]. Entretanto, as densidades de potência superiores a 10⁷ W/cm² podem resultar em vaporização excessiva e perda de material.

2.5.1 Características dos parâmetros de operação

A seleção de parâmetros do processo é importante, pois ela regula o processo de soldagem e pode ser modificada para alcançar os resultados de solda específicos. A geometria do cordão de uma junta soldada a LA- SER recebe influência de diversos parâmetros, sejam oriundos do equipamento utilizado para soldagem ou do material que se deseja soldar. Esta qualidade da solda, é fortemente caracterizada pela geometria do cordão de solda, profundidade de penetração e largura do cordão. A precisão da soldagem depende da preparação do material, do ajuste da junta e do alinhamento do feixe para articulação do LASER.

Existem vários parâmetros de operação, em relação às características do feixe, parâmetros tecnológicos e características do material que influenciam para utilização da tecnologia LASER, como:

- a) Características do feixe: potência média (contínua ou pulsada), densidade e distribuição de potência, modo de feixe, ângulo de feixe e comprimento de onda.
- b) Parâmetros tecnológicos: velocidade de soldagem, gás de proteção, posição focal; ângulo de incidência.
- c) Características do material: difusividade térmica, refletividade, soldabilidade, composição química, absortividade, condutividade térmica, calor latente (fusão e vaporização), coeficiente de dilatação térmica, densidade e espessura, acabamento superficial (rugosidade) da região de incidência do feixe.

Porém, para um determinado equipamento LASER contendo configuração óptica fixa e o material que se deseja soldar, potência, velocidade de soldagem e a posição focal em relação à superfície da peça são os principais parâmetros para o estudo da geometria do cordão de solda, além do gás de proteção, uma vez que são os poucos parâmetros os quais o operador pode ter a liberdade de variar para se obter uma geometria do cordão adequada.

O primeiro parâmetro, a potência, possui dois modos de operação para aplicação sobre um material em virtude de propriedades temporais: o modo de emissão contínua (*continuous wave* – CW) e o modo pulsado, sendo este último necessário adicionar parâmetros do processo como duração de pulso, modulação da potência e frequência do pulso. No modo contínuo, a potência na saída do ressonador é constante em virtude da aplicação de uma descarga de corrente elétrica constante no bombeamento do meio ativo do LASER. No modo pulsado, o LASER opera em duas faixas de potência denominadas potência de base e potência de pico. Deste modo, são definidas a duração do pulso e a frequência de pulsação, as quais definem as propriedades e capacidades de saída de potência de uma fonte LASER em regime pulsado.

O segundo parâmetro é a velocidade de soldagem, a qual é um dos parâmetros mais visados na indústria, pois a sua otimização pode fazer grande diferença no tempo de produção, por exemplo, quando se trata de soldagem principalmente de pequenas espessuras em larga escala. A velocidade de soldagem no processo a LASER já é alta se comparada com outros processos de soldagem a arco elétrico, sendo o grande diferencial do processo. Seus efeitos na geometria do cordão, são relativos ao tempo de incidência do feixe de LASER sobre a peça, sendo que, em menores velocidades, o tempo de interação do LASER com a dada porção de material é maior, ocasionando um aumento de penetração, porém este maior tempo de interação também leva maior energia transferida para o material o que pode elevar a distorção. Velocidades elevadas podem originar insuficientes penetrações, enquanto que, baixas velocidades, conduzem a fusões excessivas de metal, provocando vaporização e perda de material com consequente formação de defeitos, como porosidade no cordão.

O terceiro parâmetro é a profundidade de foco que é definida como a distância na qual o feixe focalizado tem aproximadamente a mesma intensidade. O que se deve considerar aqui, é a necessidade de ter densidade de energia suficiente para gerar o *keyhole* e que esta densidade esteja disponível no interior do mesmo para manter a estabilidade. Segundo Steen et al [17], a posição focal deve estar localizada dentro da peça a uma profundidade de cerca de 1 mm da superfície para máxima penetração.

Além dos parâmetros citados anteriormente, podemos citar os gases envolvidos no processo. Os gases têm três funções principais em soldagem a LASER: proteção da poça fundida, supressão plasmática e proteção da óptica. Entretanto, este é chamado apenas de gás de proteção. A proteção da poça fundida, evita a oxidação e a contaminação, o que poderia levar a porosidade e fragilização. A supressão plasmática serve para remover o plasma formado na fusão (ou vaporização) do material. Caso não seja feita a remoção, o efeito é impedir que o feixe atinja a peça, reduzindo a energia absorvida pela solda [11]. O tipo de gás utilizado e seus diferentes potenciais de ionização, proporcionam diferenças na interação feixe/matéria, alterando a transferência de energia. O plasma removido da zona de interação do LASER por um jato de gás, é denominado, gás de assistência. A formação do plasma é proporcional ao potencial de ionização do gás, dessa forma, para reduzir a produção de plasma no keyhole, o gás de assistência mais eficiente, é aquele com um potencial de ionização maior. Os gases também protegem a óptica dos respingos de solda. Uma "faca de ar" comprimido de fluxo rápido, geralmente fica localizada diretamente abaixo da óptica, a fim de protegê-la, desviando as ejecões da solda. Na Tabela 1 está representado o potencial de ionização de alguns gases utilizados na soldagem LASER.

Tabela 1: Potencial de ionização dos gases empregados na soldagem LASER.
Fonte: [11] (Adaptado).

	1 onto [11] (Tauptauo).
GÁS	POTENCIAL DE IONIZAÇÃO (EV)
H_e	24,46
A_r	15,68
N_2	15,65
o_2	12,50
CO_2	14,41

O gás hélio é uma escolha popular para supressão de plasma. Devido ao seu alto potencial de ionização, seu baixo peso molecular (que auxilia na recombinação de elétrons e íons no plasma) e sua alta condutividade térmica (que remove energia da zona de interação). No entanto, sua utilização é comprometida devido seu alto valor de mercado e sua baixa densidade, o que reduz sua capacidade de cobrir e proteger a solda e, portanto, altas taxas de fluxo são necessárias. Em comparação com outros gases de processo, o hélio produz um perfil de cordão de solda estreito, alta penetração, uma ZTA estreita, baixa porosidade e é tolerante a mudanças no procedimento.

O argônio frequentemente substitui o gás hélio, porém o nitrogênio ou dióxido de carbono também podem ser usados. Embora o argônio possua um potencial de ionização mais baixo que o hélio, não é tão eficaz para o controle do plasma, mas com sua densidade dez vezes maior, protege a poça de solda de forma mais eficaz. Sua alta densidade auxilia na remoção do plasma.

Uma pequena zona fundida pode resultar da soldagem no modo de condução. Contudo, com o aumento das taxas de fluxo de gás, um ponto é atingido quando ocorre uma transição para a formação de *keyhole*, com uma penetração profunda resultante. Novos aumentos na taxa de fluxo de gás produzem um aumento linear, mas ligeiro, da penetração. Além de cerca de 40 l/min, o fluxo de gás pode ser vigoroso o suficiente para ejetar o metal fundido da poça de fusão, resultando em uma forma irregular e talvez superficial. O efeito do fluxo de gás supressor na penetração é mostrado na Figura 6.

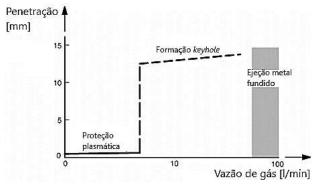


Figura 6: Efeito da taxa de fluxo de gás hélio por supressão de plasma na profundidade de penetração em aço carbono. Potência LASER 10 kW; Velocidade de soldagem de 1,2 m/min. Comprimento focal de 476 mm. Fonte: [18].

2.5.2 Imperfeições

As imperfeições surgem de desvios de um procedimento de soldagem qualificado em relação às propriedades do material, características do feixe de LASER ou parâmetros de processamento. Algumas imperfeições estão associadas com a geometria do cordão de soldas, e podem ser avaliadas a partir de uma inspeção visual, enquanto outras estão escondidas no cordão de solda e podem ser detectadas por métodos não destrutivos. As imperfeições mais comuns são o *humping*, porosidade, respingos [11].

A porosidade na soldagem a LASER pode ser formada por uma série de fatores. O metal líquido pode conter uma quantidade de gases dissolvidos que se aglomeram durante o processo de solidificação. Esses gases podem estar dissolvidos no próprio material, por exemplo, por excesso de hidrogênio, ou podem vir diretamente dos gases de processo. Uma proteção gasosa ineficiente, também gera poros porque o filme de óxido na superfície do líquido se dissocia em altas temperaturas, como aquelas próximas ao *keyhole*. A estabilidade do próprio *keyhole* é essencial para manter um nível baixo de porosidade.

Em altas velocidades de soldagem, pode ocorrer o defeito conhecido por *undercut* representado na Figura 7(a), causado pelo forte fluxo de material fundido em direção ao centro do cordão após a passagem do LASER, onde o material não tem tempo suficiente para se distribuir e solidifica com uma saliência no centro do cordão e com mordeduras na

borda. Já na Figura 7(b), tem-se o defeito *humping* que é outro defeito que ocorre em altas velocidades de soldagem onde ocorre uma série de protuberâncias longitudinais periódicas no cordão de solda, normalmente acompanhados de rebaixos e uma perda de penetração. A Figura 7(c), refere-se a um sulco fundido no metal base adjacente ao cordão de solda, que permanece sem preenchimento pelo metal de solda. Pode ser causado por excesso de energia ou de vazão de gás. É formado se o metal de solda fundido começar a molhar a região sulcada, mas solidificar antes que o sulco possa ser preenchido completamente.

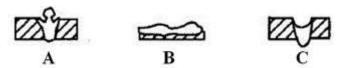


Figura 7: Defeitos relacionados ao processo LBW. Fonte: [6] (Adaptado).

2.5.3 Tipos de LASER

Existem vários tipos de LASER. Eles comumente são classificados de acordo com o estado ou as propriedades físicas do meio ativo [7]. As características de funcionamento podem diferir bastante entre as diversas categorias de LASER, apesar da existência de alguns aspectos comuns a todas. Os comprimentos de onda dos LASER industriais atualmente disponíveis, cobrem toda a gama espectral do infravermelho ao ultravioleta, como mostrado na Figura 8.

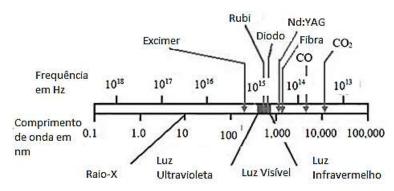


Figura 8: Espectro Eletromagnético do LASER. Fonte: [5] (Adaptado).

Os LASERs típicos que comercialmente estão disponíveis para o processamento de materiais são: a gás e de estado sólido.

2.5.3.1 LASER a gás

Os primeiros LASERs industriais foram os LASER a gás. Estes utilizam fontes de energia de alta tensão e baixa corrente para fornecer a energia necessária para excitar a mistura de gás utilizada como meio ativo. Ainda pode operar em modo contínuo e pulsado [4]. Dentre os tipos de LASER a gás podemos citar o LASER de CO_2 , de Metal-Vapor (HeCd, NeCu e HeAg), e o Excimer. Seus comprimentos de onda variam para cada tipo. O comprimento de onda do LASER de CO_2 é de 10,6 µm. Comumente, esse LASER tem aplicações industriais em processamento de materiais, particularmente para cortes de chapas, metais, plásticos.

Quando comparado as outras fontes LASER, o comprimento de onda do LASER de CO_2 é muito maior. Dessa forma, materiais como alumínio e cobre são de difícil soldagem, tendo em vista sua a alta refletividade ou baixa absortividade para este tipo de LASER. O cobre é inclusive o principal material utilizado nos espelhos dos equipamentos de LASER de CO_2 [11].

O gás usado no LASER de CO_2 é geralmente mistura de dióxido de carbono, hélio e nitrogênio. O dióxido de carbono constitui uma espécie de emissora de radiação, o nitrogênio ajuda a excitar as moléculas de CO_2 e, por sua vez o hélio tem a função de arrefecimento mantendo a inversão da população.

As descargas elétricas excitam a molécula de nitrogênio muito eficazmente. A alta condutividade térmica do hélio, que é cerca de 6x maior do que do CO_2 e do nitrogênio reduz a temperatura do gás. A remoção eficiente do calor residual do gás a LASER e a manutenção da temperatura é a chave para o desempenho do LASER.

Existem alguns tipos de LASER de CO_2 , como por exemplo, o selado, o refrigerado por difusão e o de fluxo rápido. Este último modelo é o estudado nesse trabalho. No LASER de fluxo rápido, para manter o gás LASER arrefecido suficiente para não comprometer o desempenho, o gás é removido da área de descarga, resfriado nos trocadores de calor e retornam a área de descarga por um ventilador de turbina axial. Antes de o gás reentrar na área de descarga, o calor de compressão gerado pelo ventilador de turbina axial é removido num permutador de calor [19]. Os modos espaciais são tipicamente TEM_{00} ou TEM_{01} .

A pressão da mistura de gases entre os espelhos de LASER é geralmente abaixo das condições normais (100-250 hPa), a fim de conseguir uma descarga homogênea. LASER de CO_2 atingem eficiências de 5 a 15%. Estes estão disponíveis com diferentes qualidades de feixe para fornecer as melhores características de feixe para diferentes aplicações. Algumas vezes, sendo utilizado para o processamento de materiais operando em potências médias até 25 kW ou mesmo 100 kW para os laboratórios financiados por pesquisas militares [17]. Aplicações típicas (Figura 9), de longe, é o corte LASER. Outras aplicações incluem soldagem e modificações superficiais.



Figura 9: Aplicações típicas de laser de CO2 na faixa quilowatts. Fonte: [19].

São principalmente adequados para trabalhar em materiais não metálicos e na maior parte dos plásticos, entre os quais podemos citar: madeira, acrílico, vidro, papel, têxteis, couro e pedra [20]. A Tabela 2 mostra uma visão geral das características mais importantes dos LASERs de CO_2 .

		2
CARACTERÍSTICA	FAIXA	VALORES TÍPICOS
EFICIÊNCIA	8 - 15 %	12%
COMPRIMENTO DE ONDA	9 - 11 μΜ	10,6 μΜ
NÍVEIS DE POTÊNCIA	1 MW - 100 kW	10 - 300 W 2 - 10 kW
QUALIDADE DO FEIXE M^2	1 - 10	1.2
DIÂMETRO DO FEIXE	3 - 30 MM	20 MM
DIÂMETRO DO FOCO	15 - 600 μΜ	200 μΜ
POLARIZAÇÃO	-	LINEAR

Tabela 2: Principais características do LASER *CO*₂. Fonte: [19].

2.5.3.2 LASER de estado sólido

Após o advento da primeira operação realizada por um LASER de rubi em 1960, uma variedade de materiais a LASER do estado sólido vem sendo estudados. Houve um avanço significativo de LASER para processamento de materiais nos últimos anos. A maioria dos LASERs de estado sólido emitem radiação na região espectral variando de 400 a 3000 nm. Dentre os tipos de LASER de estado sólido podemos citar dois principais, o LASER de fibra e os semicondutores.

Os LASERs semicondutores, também conhecidos como LASER de diodo, são uma ferramenta importante para o processamento de materiais, pois servem tanto como fonte de bombardeamento para o meio ativo de LASER de estado sólido quanto para aplicação direta no aquecimento de superfícies e soldagem. Esse tipo são dispositivos eficientes para converter energia elétrica em energia óptica. Sua eficiência pode atingir até 50% [21]. São comumente utilizados para comunicação por fibra óptica, leitores de código de barra e ponteiros LASER. As primeiras aplicações de LASER de diodo foram limitadas ao bombeamento de LASER de estado sólido, onde o LASER de diodo substitui a lâmpada.

No LASER de fibra, o feixe é gerado dentro da fibra óptica. A característica construtiva do ressonador é baseada em uma fibra óptica dopada no núcleo e recoberta por um revestimento. Os espelhos nas extremidades da fibra dopada são substituídos por uma grade de Bragg em cada extremidade, sendo totalmente refletiva em uma extremidade, e parcialmente transmissiva na outra extremidade da fibra. Seu comprimento de onda de 1064 nm produz um diâmetro focal extremamente pequeno. Uma característica, é que a luz LASER já está acoplada em uma fibra flexível, de modo que seja facilmente entregue a um elemento de focagem móvel.

A estrutura da fibra utilizada no LASER de fibra exerce grande importância na qualidade da energia gerada. A geometria mais comum é formada por uma estrutura de duplo núcleo conforme mostrado na Figura 10. A estrutura da fibra utilizada no LASER de fibra inclui um núcleo interior dopado, que é o próprio LASER, e um núcleo externo não dopado através do qual a onda eletromagnética é canalizada, possuindo também um revestimento externo. O núcleo externo não dopado recolhe a luz do bombeamento e orienta-se ao longo da fibra. A emissão estimulada gerada na fibra passa através do centro do núcleo externo. O núcleo interno contém o dopante (geralmente Itérbio ou Érbio) que é estimulado a emitir radiação a partir da energia que recebe do bombeamento [22].

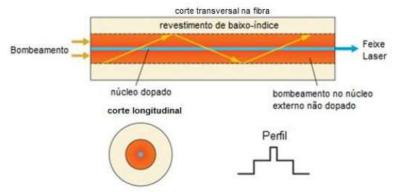


Figura 10: Estrutura do LASER de fibra. Fonte [22] (Adaptado).

Entre inúmeras características, podemos citar: alta qualidade de feixe, (difração limitada), capacidade de gerar feixes com largura de pulso ultracurto, eficiência de saída relativamente alta, cerca de 50% em comparação com cerca de 10 a 30% para o CO₂. Esse tipo de LASER vem crescendo a cada ano, chegando a níveis de potência de até 10 kW de modo único e 50 kW multimodo. Uma motivação adicional para a alta qualidade de feixe é a sua distribuição de intensidade bem definida no plano focal para o uso de elementos de modelagem de feixe.

2.5.4 Fatores que afetam a interação LASER/Matéria

Para o processamento de materiais com a tecnologia LASER, alguns aspectos são importantes a levar em consideração para escolha do equipamento e aplicação do mesmo. A luz incidente na superfície de um

material pode ser absorvida, refletida ou transmitida (exceto em metais), e, em geral, ocorre a combinação desses fenômenos. Alguns fatores são específicos do material, como por exemplo, o índice de refração, índice de absorção, condutividade térmica, condutividade elétrica e calor específico. No entanto, esses efeitos não dependem apenas das propriedades do material e do comprimento de onda da radiação para determinar a refletividade e absortividade. Outros fatores adicionais afetam a interação LASER/matéria como: Propriedades do feixe (comprimento de onda, polarização); condições ambientais (gás de proteção, material que circunda a peça de trabalho); propriedades da superfície (rugosidade, morfologia); geometria da peça de trabalho (espessura, limites da peça de trabalho); mudanças da peça de trabalho e do ambiente induzidas pela potência absorvida do LASER (aquecimento local, mudança de fase, plasma induzido por LASER) [8]. A Figura 11 mostra uma representação gráfica da relação da absortividade dos metais em diferentes comprimentos de onda.

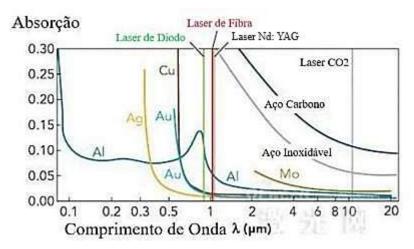


Figura 11: Representação gráfica comprimento de onda versus absorção da luz. Fonte: [23] (Adaptado).

Embora a absorção inicial de um feixe de LASER de ${\it CO}_2$ na superfície metálica seja normalmente inferior a 10%, a absorção pode ser máxima, quando o plasma é formado. Essa absorção pode ocorrer acima da peça de trabalho ou dentro do keyhole. Quando ocorre acima da peça de trabalho, reduz a eficiência do processo de soldagem à medida que uma parte significativa da potência do feixe é então perdida. Pelo contrário, a absorção dentro do keyhole pode aumentar a eficiência do processo. A

formação de plasma é de menor importância quando se solda com um LASER Nd: YAG, por exemplo. Isso ocorre porque o feixe de LASER Nd: YAG é absorvido mais eficientemente em superfícies metálicas, enquanto menos é absorvido pelo plasma [7].

O resultado de um processamento de material com radiação LA-SER é predominantemente determinado pela potência que é absorvida pela peça. Segundo Proprawe [13], essa absorção pode ser medida segundo a Equação (3):

$$A = P_{abs}/P \tag{3}$$

onde, P_{abs} é a potência absorvida e P é a potência de radiação incidente.

A absortividade A pode ter qualquer valor entre 0 e 1. A energia absorvida é geralmente transformada em energia térmica. A maioria dos metais possui uma refletividade alta e, em consequência, uma baixa absorção da radiação eletromagnética. O *keyhole* pode assumir uma geometria que aumente a absorção por multi-reflexão, onde possibilita uma grande profundidade de penetração. Se a densidade do plasma aumenta muito, a energia é absorvida pelo plasma e não chega a peça, interrompendo o processo.

2.5.5 Parâmetros geométricos de um feixe LASER

Dependendo do regime de parâmetros usados, a tecnologia de sistemas e a óptica, as aplicações de fonte de LASER, como perfuração, corte, marcação e soldagem podem ser realizadas. Para o processamento a LASER, um parâmetro essencial do processo é a densidade de potência do LASER, isto é, a potência sobre uma área de ponto focal. Com o produto de parâmetro de feixe é óbvio que, para obter um pequeno raio focal (w_0) e, portanto, uma pequena área focal, diferentes métodos podem ser aplicados: Um sistema de LASER com boa qualidade de feixe pode ser escolhido (pequeno M^2), mas também um comprimento de onda curto ou uma pequena distância focal (isto é, maior ângulo de divergência), em princípio, também possibilitará pequenos pontos focais.

Com base nessa relação, desenvolvimentos de fontes de LASER com excelentes qualidades de feixe são especialmente úteis para o processamento remoto, onde uma grande distância focal e um pequeno tamanho de ponto estão presentes juntos. Além da concentração espacial de energia usando parâmetros de feixe, também medidas de tempo podem

ser tomadas para influenciar a intensidade da radiação LASER: Usando LASER pulsados, a potência média é acumulada opticamente, e os pulsos podem atingir elevada energia de pico. Este, pode ter duração de pulso de até atosegundos. As aplicações para LASER pulsado de pulso ultra curto são específicas para processos envolvendo fenômenos de ablação e sublimação.

A distribuição da intensidade espacial da radiação LASER depende principalmente da fonte do LASER. Dependendo do *design* do ressonador, diferentes modos transversais podem ser emitidos. A distribuição de intensidade mais comum é o feixe gaussiano ou o modo TEM_{00} , que corresponde a M^2 teórico igual a 1 ($M^2=1$). Entretanto, na prática, um feixe real pode ser considerado como gaussiano se apresentar um M^2 menor que 1,3. Como descrito acima, a qualidade dos feixes altos é desejada para diminuir o tamanho do ponto focal, bem como para aumentar a distância de trabalho. Uma motivação adicional para a alta qualidade de feixe, é a sua distribuição de intensidade bem definida no plano focal para o uso de elementos de modelagem de feixe. Na Figura 12, são apresentados alguns parâmetros geométricos do feixe LASER.

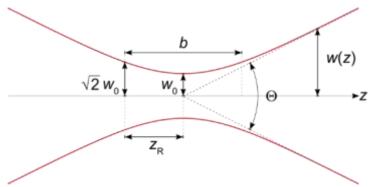


Figura 12: Parâmetros Geométricos do Feixe LASER. Fonte: [24].

Estes parâmetros são descritos como:

Cintura ou raio do feixe (w_0): Medida do tamanho do feixe no seu foco, onde a largura do feixe é a menor e a intensidade de energia na linha central é a maior.

Intervalo ou comprimento de Rayleigh (Z_R) : Distância ao longo da direção de propagação do feixe a partir da cintura até onde o raio da seção transversal aumenta $\sqrt{2}$ vezes, e sua área é duplicada. O parâmetro relacionado é o parâmetro confocal "b", que é duas vezes o comprimento de

Rayleigh. O comprimento de Rayleigh é particularmente importante quando feixes são modelados como feixes gaussianos [25] [26].

Divergência do feixe (Θ) : Longe da cintura, o feixe assume o formato de um cone. A divergência é dada pelo ângulo do tronco do cone. Pelo fato da divergência ser inversamente proporcional ao tamanho da cintura, para um dado comprimento de onda λ , um feixe gaussiano que é focado em uma área pequena diverge rapidamente quando se propaga para longe do foco. Em contrapartida, para minimizar a divergência de um feixe LASER no campo distante (e aumentar sua intensidade de pico em distâncias maiores) ele deve ter uma seção transversal grande (w_0) na cintura (e assim um grande diâmetro onde é lançado, de forma que $w_{(Z)}$ nunca seja inferior a w0.

<u>BPP</u> (*Beam Parameter Product*): Produto entre o ângulo de divergência de um feixe e o raio do feixe no foco. O BBP quantifica a qualidade de um feixe LASER e quão bem ele pode ser focado. Quanto menor o BPP, melhor a qualidade do feixe.

 $\underline{M^2}$ (Fator de qualidade do feixe): M^2 é chamado fator de qualidade de feixe ou fator de propagação de feixe e é uma medida comum da qualidade de um feixe de LASER. Ele fornece um meio quantitativo para estabelecer quão bem um determinado feixe de LASER se concentrará ou divergirá e será sempre relativo a uma condição limitada por difração do mesmo tamanho de feixe e comprimento de onda. Representa o grau de variação de um feixe com relação a um feixe gaussiano ideal. Calculado pela razão entre o BPP do feixe e o BPP de um feixe gaussiano com o mesmo comprimento de onda. Admensional.

2.5.6 Segurança em sistemas LASER

Um aspecto que deve ser levado em consideração no projeto e implementação de sistemas que utilizem LASER é a segurança, tanto dos operadores e pessoas no entorno do equipamento, quanto do próprio sistema e seu local de instalação. Operações com LASER de alta potência, por exemplo, podem oferecer riscos que podem gerar sequelas irreversíveis. O Brasil ainda não possui normas específicas relacionadas a ambientes que operem LASER, portanto normas internacionais, como a ANSI Z136, são utilizadas como base para determinar o nível de segurança em ambientes que utilizam essa tecnologia [3].

O primeiro fator a ser observado quando relacionado à segurança destes sistemas em relação ao risco do feixe LASER para o operador e

pessoas próximas é a característica da luz LASER, no que diz respeito ao comprimento de onda e potência. Segundo a norma ANSI Z136, a classificação dos LASER se dá de acordo com a capacidade de produzir danos em indivíduos expostos, principalmente riscos biológicos para o olho ou à pele, são elas: Classe 1 e 1M; Classe 2 e 2M; Classe 3; Classe 3M e Classe 4 [27].

- A. Classe 1 e 1M: LASER visível ou invisível. Não oferece risco a pele e aos olhos. Incapaz de causar lesão por contato direto com o feixe.
- B. Classe 2 e 2M: LASER com radiação visível de baixa potência, não podendo exceder 1x10⁻³W. A incidência direta nos olhos é proibida por esta norma.
- C. Classe 3: Radiação visível ou invisível entre a faixa de potência de 1x10⁻³ e 5x10⁻³W. Não é recomendada que operações sejam feita a olho nu e nem com auxílio de binóculos, podendo causar lesão na retina.
- D. Classe 3B: Faixa de potência de 5x 10⁻³ a 500x 10⁻³ W, considerado potência média e capaz de produzir lesão quando incidido diretamente nos olhos.
- E. Classe 4: Podem causar lesão a pele e aos olhos. Produzem reflexão direta e difusa oferecendo risco de incêndio. Pertencem a essa classe LASER com potências superioras a 0,5 W.

Além da relação do comprimento de onda e potência do LASER para classificação da segurança do sistema LASER, para que haja uma correta adequação do sistema de segurança deve se avaliar aspectos como: Capacidade do LASER ou sistema causarem lesões cutânea e/ou ocular; Efeito gerado durante o processo, causada pela interação entre o feixe LASER e o material (oxidação rápida, rápida ionização, geração de gás contaminado); A característica de acesso de pessoas ao local de realização do processo (irrestrito, restrito, controlado, excluído ou inacessível); Possibilidade de exposição de pessoas à radiação a luz LASER.

Os efeitos biológicos da luz LASER no olho, dependem do comprimento de onda, uma vez que a luz de diferentes comprimentos de onda difere sua capacidade de penetrar através de componentes oculares do olho. Dessa forma, o equipamento de proteção individual mais utilizado, são óculos de proteção específicos para o comprimento de onda do LASER. Para classes de LASER a partir da 3M, o uso de óculos de proteção é obrigatório [28] e [29] As regiões dos olhos afetadas pela incidência do feixe variam para cada comprimento de onda. Radiações com comprimento de onda entre 700 nm e 10000 nm, podem causar queimaduras e

ressecamento da pele, em casos em que haja exposição excessiva ou potência seja demasiadamente elevada [26].

2.6 Automação do processo

Os processos LASER são altamente dependentes das tecnologias de automação de máquinas, pois não é usual efetuar um processo LASER de forma manual. Em um ambiente industrial isto é ainda mais claro, onde o ideal é que haja um controle bastante restrito dos parâmetros do processo para que este seja otimizado e se torne econômico e tecnicamente viável. Neste contexto, se inserem sistemas robóticos, seriais e paralelos, assim como sistemas comandados numericamente, que têm se destacado.

Sistemas automatizados de movimentação possuem diferentes construções físicas conforme características desejadas em sua aplicação final. Neste segmento de máquinas, podem ser incluídas desde aquelas que executam trajetórias simples, até aquelas que apresentam diversos graus de liberdade. Contudo, a explanação desse trabalho se limitará a posicionadores cartesianos.

Em máquinas de movimento cartesiano, os eixos descrevem trajetórias lineares perpendiculares entre si e são capazes de atingir um volume de trabalho que é resultado do produto dos cursos efetivos dos eixos principais denominados $X,\ Y$ e Z. Para esse trabalho convenciona-se que a interseção dos eixos X e Y forma o plano de movimentação horizontal, enquanto o eixo Z atua no sentido vertical.

A utilização de controladores CNC baseados em PC para automatização de máquinas, é bastante utilizado devida à facilidade de operação e configuração, onde tem função de interpolar dados relacionados a geometria que se deseja produzir e transformá-la em ações realizadas pelo sistema responsável pela execução física do processo. Estes comandos são instalados no sistema de forma simples, com baixo custo e tem desempenho aprimorado com o emprego de placas de controle de movimento. O computador é responsável pelo processamento do sistema operacional, interface com o usuário e interpretador de código G. A placa de controle de movimento é responsável por gerar os sinais que comandarão os servomotores.

Ao contrário de alguns sistemas de comando CNC industriais, o comando CNC baseado em PC consegue atuar com qualquer tipo de servomotor que seja comandado com sinais de passo e direção, ou mesmo com sinais analógicos, desde que utilizada uma placa de controle de mo-

vimento ou *hardware* similar que forneça esta habilidade. Porém não oferecem a mesma robustez que comandos CNC industriais, visto que estes têm todo seu *hardware* e *software* desenvolvidos exclusivamente para este fim, sendo adequados quase que exclusivamente aos seus motores.

Um dos exemplos de controladores CNC voltados para arquitetura baseadas em PC denomina-se MACH3, que será utilizado nesse trabalho, utilizando um computador com sistema operacional Windows XP, AMD Athlon(tm) II X2 250, 3.00 GHz, com 3,25 G de memória RAM como hospedeiro deste programa.

2.6.1 MACH3

Trata-se de um *software* operacional que transforma um computador pessoal em um controlador de máquina CNC. Com recursos avançados, o MACH3 roda no sistema operacional Windows para controlar os motores de tração (motor de passo e servo), e processando o código G. Este programa é utilizado para a edição e controle de trajetórias, sendo este, executado no sistema operacional Windows XP. O controlador CNC MACH3 é destinado à execução de código G criado pelo usuário ou por outro programa do tipo CAM e não possui uma programação de trajetória automática inclusa. É possível adicionar funções que gerem código G por intermédio de interfaces customizadas [30].

A conexão entre o PC e a máquina CNC ocorre por intermédio de placas de interface com comunicação via porta paralela (um padrão que utiliza conectores do tipo DB25), podendo interpolar até seis eixos de movimento além de um eixo árvore. Originalmente, a porta paralela foi desenvolvida para comunicação com impressora, sendo assimilada para outros periféricos. Segundo a empresa Artsoft Sistemas [31], o crescente desuso da porta paralela exige a utilização de placas controladoras de movimento com Barramento Serial Universal (USB - *Universal Serial Bus*) ou Ethernet para comunicação.

A tela inicial apresentada pelo programa é intuitiva mesmo possuindo diversos comandos, sua configuração é simples e oferece também sistemas de diagnósticos que auxiliam na configuração. Sua interface pode ser criada ou modificada para tornar mais adequada com o tipo de sistema de posicionamento com auxílio de programas específicos para tal.

2.6.2 Sensoriamento

O desenvolvimento das tecnologias no escopo da Indústria 4.0, onde o avanço acontece de maneira exponencial, faz com que máquinas possam ser enxergadas como uma peça inteligente dentro de um grande sistema. Neste escopo, cada estação de trabalho gera informações para as estações subsequentes de processamento, que subsidiarão, tanto ajustes *inline* de parâmetros de processamento, como contribuirão para o controle de qualidade e rastreamento. As informações sobre o processamento também podem ser aplicadas a sistemas adaptativos para correção *online*, em tempo real, do processo em andamento. As correções podem ser de parâmetros de potência ou movimentação (seguimento de junta, por exemplo). Tais informações são disponibilizadas por sensores e sistemas de monitoramento, sendo um dos exemplos aplicados em soldagem LASER a vídeo termografia [32]. Neste contexto, em vista da disponibilidade da tecnologia na infraestrutura do LABSOLDA, será realizado estudo prévio sobre seu desempenho e aplicabilidade para as condições do trabalho.

3 EQUIPAMENTOS, METODOLOGIA E MATERIAIS

3.1 Equipamentos

3.1.1 LASER TLF 2600 Turbo

O equipamento LASER TLF 2600 Turbo, oriundo da Alemanha, era utilizado em centros de pesquisa e desenvolvimento e industrias para processos de soldagem automatizados. Devido ao desenvolvimento do país, crescimento tecnológico, busca de melhorias em procedimento de soldagem e mobilidade, o equipamento foi substituído por um LASER de outra natureza. Firmada a parceria do LABSOLDA com o centro de pesquisa Schweißtechnische Lehr und Versuchsanstalt München (SLV München), o equipamento veio para o Brasil como forma de doação e incentivo a pesquisa e desenvolvimento do processo de soldagem LASER no país.

O LASER TLF 2600 Turbo é um exemplo de LASER a gás, mais precisamente um LASER do tipo CO_2 da fabricante alemã Trumpf, que possui capacidade de operar com potência máxima de 2600 Watts, em modo pulsado e contínuo. Para formação do feixe, é utilizada uma mistura dos gases hélio, nitrogênio e dióxido de carbono com um consumo individual de 6,0/2,0/e 0,5 [l/min] respectivamente [33]. Além dessas características, na Tabela 3, estão representadas algumas outras especificações técnicas sobre o equipamento.

Tabela 3: Especificações Técnicas LASER TL	F 2600 Turbo. Fonte [33]
ECDECIPICA CÕES TÉCNICAS	TI E 2600 TUDDO

ESPECIFICAÇÕES TECNICAS	TLF 2600 TURBO
COMPRIMENTO DE ONDA	10.6 μM
POTÊNCIA MÁXIMA	2600 W
FAIXA DE POTÊNCIA AJUSTÁVEL	5 - 100%
ESTABILIDADE DE SAÍDA	+- 2%
DIÂMETRO DO FEIXE SAÍDA RESSONADOR	15 MM
QUALIDADE DO FEIXE K, (M ²)	0,6 (1,67)
BPP	6 MM X MRAD
ÂNGULO DE DIVERGÊNCIA	< 1.0 MRAD
DISTRIBUIÇÃO DE POTÊNCIA	TEM01*
FREQUÊNCIA DE PULSO	100 HZ - 100 KHZ
LARGURA DE PULSO	10 μs - CW

O sistema LASER possui de três módulos que compõe o equipamento: o módulo de controle/comando; o de geração e o de refrigeração. Além dos módulos, o sistema ainda conta com três cilindros de gases (Hélio, Nitrogênio e Dióxido de Carbono). O módulo de controle/comando possui dimensões 1200 x 2000 x 800 mm (Comprimento x Altura x Profundidade), e é o módulo que possui toda a programação responsável pelo funcionamento da máquina. O módulo de geração, com dimensões 1000 x 600 x 1150 mm, representa o módulo onde ocorre a inversão populacional, gerando o feixe LASER. Por fim o módulo de refrigeração, com as dimensões de 1800 x 1800 x 800 mm, é o módulo com a finalidade de garantir estabilidade térmica em todo sistema dentro dos limites de tolerância estabelecidos. Na Figura 13 podem ser observados os três módulos.



Figura 13: (a) Módulo Controle/Comando. (b) Módulo Geração (c) Módulo Refrigeração. Fonte: [Autor].

3.1.1.1 Módulo de controle/comando

O módulo de controle/ comando é responsável pelo gerenciamento do comportamento dos dispositivos da máquina. O módulo de controle/comando está representado na Figura 14.

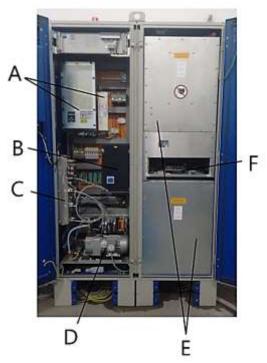


Figura 14: Módulo de controle/comando. Em (A) Conversor de frequência com filtro; (B) TASC 200 (controle LASER); (C) Misturador de gases; (D) Bomba de vácuo e bloco de válvulas; (E) Gerador RF; (F) Controle de conexão – gerador RF. Fonte: [Autor].

Este módulo contém alguns componentes, como: blocos de válvulas, misturador de gases, bomba de vácuo, gerador RF e o IHM. O gerador RF tem a finalidade de converter a potência da linha de entrada de baixa frequência em energia elétrica de alta frequência (13,56 MHz) para estimulação do meio ativo, onde é mantida em modulação constante. Além disso, possui a interface entre homem-máquina (IHM), que é responsável

pelo interfaceamento entre o usuário e a máquina. Geralmente, é composta por uma tela, botões diversos para o comando da máquina e teclados alfanuméricos. Esta interface é indispensável no sistema, pois através dela é possível verificar o *status* da máquina durante a execução do processo, como por exemplo: frequência de pulso, potência instantânea, dentre outras informações, dependendo do processo que está em execução e das configurações atribuídas pelo fabricante da máquina ou pelo seu usuário. Além disso, os problemas e alarmes são exibidos na tela.

Na Figura 15 está representada a IHM do LASER TLF 2600 Turbo, um IHM com sistema operacional MS DOS 3.30, interface de usuário baseada em GEM (*Graphical Environment Manager*) [33], em um painel de controle modelo TASK 300 SC 520 L da fabricante SIEMENS.



Figura 15: Interface Homem Máquina. Modelo Task 300 SC 520 L da Siemens. Fonte: [Autor].

3.1.1.2 Suprimento de gás

Os gases hélio, nitrogênio e dióxido de carbono são fornecidos ao ressonador de cilindro de gás individualmente e misturados em um misturador de gases de forma automática pelo sistema. A mistura de gás resultante é alimentada em um tanque de acumulador conforme as condições de ajuste do limite de pressão. O gás hélio serve como gás de controle/piloto para regular a pressão dos gases remanescentes do LASER. O nitrogênio tem duas funções: Como uma presença em proporção no suprimento de gás e para acionar o obturador (shutter).

O ressonador é preenchido até a pressão atmosférica (~1100hPa) quando desligado. Quando o LASER é iniciado, o sistema é evacuado até a pressão inicial especificada. Uma vez atingida essa pressão, a mistura de gás é direcionada ao ressonador até que a pressão do sistema seja atingida (~120hPa) e só assim a turbina de circulação de gás é ativada. A pressão da mistura de gases entre os espelhos de LASER é geralmente abaixo das condições normais (100-250 hPa), a fim de conseguir uma descarga homogênea. O LASER está pronto para operação quando a turbina atingi sua velocidade nominal. Na Figura 16 representa o conjunto de cilindros de gases do equipamento responsável pela formação do feixe LASER.



Figura 16: Da esquerda para direita: Gás Nitrogênio, Dióxido de Carbono e Hélio. Responsáveis pela formação do feixe LASER. Fonte: [Autor].

3.1.1.3 Módulo de geração

O módulo de geração, é assim denominado, pois se trata do módulo onde ocorre a inversão populacional, ou seja, a geração da luz LASER. Este módulo possui o ressonador, equipamento com a finalidade de produção do feixe LASER. É composto de dez espelhos planos, sendo oito deles fixos sem possibilidade de ajustes, e estão localizados no interior do ressonador com finalidade de refração do feixe, e outros dois espelhos, um de entrada e outro de retorno, que aceitam ajustes finos para direcionar o foco do feixe, conforme a Figura 17.

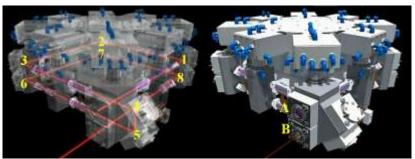


Figura 17: Representação caminho feixe LASER dentro do ressonador, de "1 a 8". O espelho "A", de entrada e o "B" o de retorno. Fonte: [33] (Adaptado).

A mistura de gás necessária para o funcionamento do LASER é fornecida para os estágios superior (1-2-3-4) e inferior (5-6-7-8) do ressonador, pela unidade do misturador de gás através dos coletores de entrada localizados nos quatro cantos do ressonador, fluindo para dentro através dos tubos de descarga. Uma turbina transporta a mistura de gás para as entradas de gás nos tubos de descarga. Em ambos os estágios, o caminho de descarga, é subdividido em 8 seções separadas, resultando em um total de 16 tubos de descarga de igual comprimento. Então esse gás aquecido, é coletado pelos coletores de escape e retornado à câmara de pressão da turbina, por meio de conduítes de retorno com refrigeração central e resfriamento interno. O gás resfriado, então se junta ao circuito geral de fluxo de gás. O ressonador do LASER TLF 2600 Turbo pode ser visto na Figura 18.

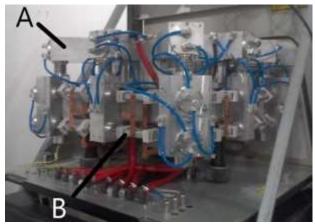


Figura 18: Ressonador, Módulo de Geração. Em (A) Refrigerador de gás; (B) tubos de descarga. Fonte: [Autor].

3.1.1.4 Módulo de refrigeração

O módulo de refrigeração é um sistema que tem por finalidade manter a temperatura desejada durante todo o processo e evitar o aquecimento dos componentes. No caso do LASER TLF 2600 Turbo, os componentes de alumínio (maioria dos componentes) e os de cobre (espelhos principalmente). Para isso o equipamento possui um tanque bipartido, um de 80 L para o circuito de cobre e outro com capacidade de 380 L, para o circuito de alumínio. No sistema de refrigeração, o fluido de bombeamento utilizado é água deionizada, ou seja, água sem condutividade elétrica. A troca de calor é por convecção. Além disso, o sistema conta com um conjunto moto-bomba, uma bomba de vácuo e trocadores de calor, como representado na Figura 19.



Figura 19: Sistema de Refrigeração Trumpf Laser TLF 2600 Turbo (a) Circuito de Cobre, (b) Circuito de Alumínio, (c) Conjunto Moto-Bomba, (d) Bomba de Vácuo e (e) Trocadores de Calor. Fonte: [Autor].

3.1.2 Sistema de transporte do feixe LASER

O LASER TLF 2600 Turbo é capaz de gerar o feixe LASER dentro do ressonador. Porém, é necessário realizar o transporte desse feixe do gerador para seu ponto de aplicação. Geralmente, são dois os principais tipos de sistema de distribuição de feixe: modo de distribuição de feixe por espelhos e o modo através da fibra óptica [7]. A radiação do LASER de CO_2 não pode ser conduzida por fibra óptica por conta da absortividade da fibra para o comprimento de onda. Para o transporte do feixe LASER de CO_2 são utilizados espelhos, então foi necessário adaptar um mecanismo articulado na saída do ressonador, para tornar possível direcionar o feixe. Esse mecanismo foi batizado de braço articulado, e possui em seu interior sete espelhos de cobre, devido à alta reflexão deste material para o comprimento de onda gerado pela fonte. O braço articulado foi instalado na saída do ressonador e posicionado com ajuda de um balancim (Figura 20) para movimentação. Além desse braço articulado, o mecanismo conta com um cabeçote de focalização modular LASER, da empresa *Kugler*

[34] instalado na extremidade. Os espelhos têm como função direcionar o feixe da saída do ressonador até o cabeçote de focalização. O cabeçote de focalização conta com uma removível de soldagem. O sistema de transporte do feixe LASER pode ser visto na Figura 20.



Figura 20: (1) Módulo de Geração da Fonte LASER TLF 2600 Turbo. (2) Braço Articulado (3) Cabeçote de focalização. Fonte: [Autor].

3.1.2.1 Cabeçote de focalização LASER

i. Espelho

O cabeçote de focalização LASER utilizado é o LK390W da fabricante *Kugler*, configurável para soldagem ou para corte. Ele incorpora dois espelhos para deflexão e modelagem do feixe. Cada espelho é montado em uma placa de suporte. As placas de suporte incorporam um padrão de furação e encaixam nos furos, onde são presas aos blocos de montagem do módulo de base. Ambos os espelhos são arrefecidos a água.

Os espelhos são revestidos de cobre e molibdênio, com refletividade de 98,6%. Os 1,4% restantes da potência do LASER são absorvidos

pelo espelho, aquecendo-o [34]. A Figura 21 mostra o caminho que o feixe percorre no braço articulado até o cabeçote de focalização modular LASER.

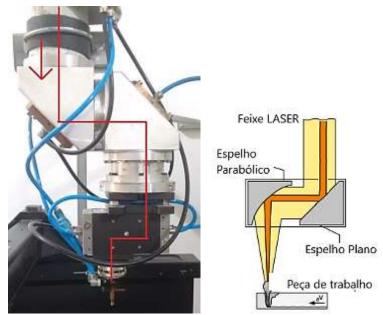


Figura 21: Transporte do feixe através de espelhos do ressonador até o cabeçote de focalização modular LASER. Fonte: [13] (Adaptado).

O primeiro espelho do cabeçote de focalização é um espelho plano. Ele é inclinado em 45° em relação ao eixo do feixe LASER, 'deslocando o feixe em 90° em direção ao segundo espelho.

O segundo espelho é um espelho de foco parabólico. O espelho de foco também é inclinado em 45° em relação ao eixo do feixe e também desvia o eixo do feixe de LASER em 90°. Entretanto, ele focaliza o feixe colimado. A distância focal do espelho focal (f) é igual a 150 mm. Ambos os espelhos possuem um diâmetro de 49,5 mm. Na Figura 22 está a representação dos espelhos do cabeçote.

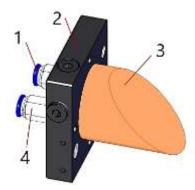


Figura 22: Configuração espelhos do cabeçote de focalização LASER. (1) conector de água; (2) placa de montagem; (3) espelho; (4) conector de água. Fonte: [34].

ii. Ponteira de Soldagem

Em aplicação de soldagem, o cabeçote possui uma ponteira removível de soldagem modelo CJ2, da fabricante *Kugler*, mostrada na Figura 23. Essa ponteira possui três conectores. Os dois da extremidade dedicados a alimentação de gás de proteção ao processo através dos tubos de cobre, e o conector central, dedicado a alimentação do gás de assistência, onde o mesmo é direcionado a um ângulo reto em relação à direção do feixe a fim de gerar uma cortina de ar para reduzir o risco de danos à óptica de foco causados por vapores e/ou respingos de metal.

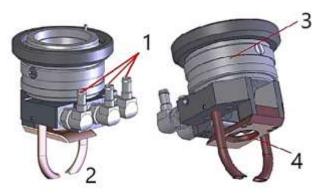


Figura 23: Ponteira de soldagem CJ2, da fabricante *Kugler*. (1) Conectores para alimentação de gás; (2) Tubos de cobre para saída do gás de proteção. (3) Anel de ajuste para ajuste vertical; (4) Abertura para saída do feixe LASER. Fonte: [34].

3.1.3 Sistema automatizado de movimentação

3.1.3.1 Sistema de movimentação

Para compor uma máquina CNC, tratando-se de qualquer processo de fabricação, é necessário que haja um sistema mecânico de movimentação (de "n" eixos), acionado por motores, rotativos ou lineares, permitindo a movimentação relativa entre o efetuador final do processo e a peça a ser trabalhada. Sistemas automatizados de movimentação, possuem diferentes construções físicas conforme as características desejadas na sua aplicação final. Em máquinas de movimentação cartesianas, os eixos descrevem trajetórias lineares perpendiculares entre si e são capazes de atingir um volume de trabalho, que é resultado do produto dos cursos efetivos dos eixos principais denominados X, Y e Z. Esses sistemas têm diversas aplicações, possuindo posicionadores com diferentes formas e funções, formados por componentes destinados a guiar e transmitir movimento conforme as demandas de projeto.

Para o processo LBW, foi utilizado um sistema de movimentação cartesiano projetado e desenvolvido pelo LABSOLDA, batizado MCS1000. Esse sistema é composto de três (3) eixos, cada um capaz de traçar trajetórias lineares perpendiculares entre si, onde dois eixos (X e Y) formam o plano de movimentação horizontal, enquanto o eixo Z atua no sentido vertical. As dimensões da mesa CNC são aproximadamente 1600 x 1600 x 1200 mm (largura x comprimento x altura) e os cursos tem cerca de 1000 x 1000 x 50 mm (X x Y x Z). A Figura 24 mostra uma modelagem CAD do sistema de movimentação.

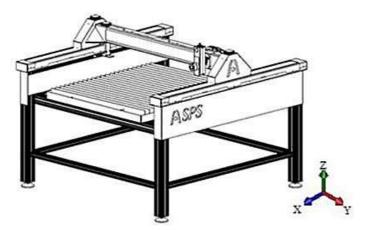


Figura 24: Sistema de Movimentação. Fonte: [Autor].

Para utilização do sistema automatizado de movimentação como um sistema integrado a uma fonte LASER é necessário que o conjunto seja estável e preciso, uma vez que o processo LBW necessita de alto nível de estabilidade para garantir a qualidade do processo. Embora inicialmente o sistema de movimentação fosse projetado como mesa de corte, o mesmo foi adaptado para a soldagem. Portanto, fez-se necessário adequar a mesa para garantr a estabilidade. As adaptações realizadas serão descritas na seção "Resultados".

Para realização dos ensaios, o sistema de movimentação utilizado dispunha de uma bandeja de alumínio com área de trabalho de aproximadamente 300 x 200 x 3 mm. Essas dimensões relativamente pequenas em relação ao sistema como um todo minimiza os erros adivindos do alinhamento entre eixos, inclinação da mesa, garantindo a posição focal uniforme durante o processamento. A bandeja tem por finalidade servir de suporte para colocar/fixar o corpo de prova para processamento com o LASER. Essa bandeja pode ser observada na Figura 25.



Figura 25: Bandeja original do sistema de movimentação. Fonte: [Autor].

3.1.3.2 Controlador CNC baseado em PC

Além do sistema de movimentação cartesiana, é necessário um sistema de controle para determinar os movimentos a serem feitos pela mesa. Nos ambientes industriais, assim como nos acadêmicos, notam-se crescentes discussões a respeito da evolução dos comandos numéricos, na qual vem despontando os chamados CNC de arquitetura aberta, ao invés da arquitetura fechada, onde nessa, o sistema não permite que o usuário acesse as configurações ou modifique-as uma vez bloqueadas pelo fabricante. O principal objetivo da arquitetura aberta, é facilitar a implementação e integração de aplicações específicas, através de aberturas de interface. Isto resulta em uma redução de custos e aumento de flexibilidade, pois softwares podem ser reusados e algoritmos específicos de usuários ou aplicações podem ser integradas. Para os fornecedores de controles e de máquinas-ferramenta, a arquitetura aberta permite o reuso de softwares, facilita a implementação de controles específicos de clientes, possibilita maior flexibilidade e facilidade na utilização de hardwares, utilizando-os de forma mais eficiente e de acordo com os interesses de seus clientes. Um exemplo de arquitetura aberta é o CNC baseado em PC.

Devido aos recursos e avanços crescentes em torno do PC, o uso dessa tecnologia apresenta vantagens técnicas em termos de *software* e *hardware*. O PC, quando necessário, pode ainda ser potencializado por placas dedicadas responsáveis pelo processamento de dados ou geração de sinais elétricos específicos. Alguns *softwares* como LINUX e MACH3

são utilizados como controladores CNC na arquitetura aberta baseada em PC, este último escolhido para este trabalho.

O MACH3, possui uma interface genérica padrão de comando destinada às operações de torneamento ou fresamento (Figura 26(a)). Entretanto, para esse trabalho, um gabinete V4 foi modificado para o layout da Figura 26(b), especialmente para reproduzir os movimentos da mesa CNC MCS1000.



Figura 26: Interface MACH3. Fonte: [Autor].

A conexão entre o PC e a máquina CNC ocorre por intermédio de placas de interface com comunicação via porta paralela. A função de cada pino da porta paralela pode ser facilmente configurada, sendo dividido em basicamente três tipos sinais, de acionamento de motor, de entrada e de saída. A comunicação com os drivers dos motores e com a placa de isolamento de sinais é feita através da porta paralela. Existe um limite inicial de 5 sinais de entrada e 12 sinais de saída, porém é possível aumentar este número adicionando mais portas paralelas ao PC.

Os sinais de saída são utilizados para comandar os 3 motores, sendo 3 sinais de passo (*Step*) e 3 de direção (*Dir*). Os sinais de entrada são utilizados para o controle remoto *joystick* e para o *play/plause* da trajetória. Essa configuração dos sinais de comando dos servos *drivers* é mostrada na Figura 27. Nesta programação, determinou-se, por exemplo, que o servo *driver* do servo motor X recebe os sinais do pino 4 e pino 5 da porta paralela 1, sendo que significam respectivamente o sinal de passos (*step*) e de direção (*dir*) para a velocidade de deslocamento.

Signal	Enabled	Step Pin#	Dir Pinat	Dir LowActive	Step Low Ac	Step Port	Dir Port
X Axis	4	4	5	4	K	1	1
Y Axis	4	8	9	M	×	1	1
Z Axis	4	6	7	4	×	1	1
A Axis	M	5	9	M	×	1	1
B Axis	×	a	0	M	×	0	0
C Axis	×	0	0	M	K	0	0
Spindle	N.	1	14	K	K	1	1

Figura 27: Configuração dos sinais de comando dos servos *drivers*. Fonte. [Autor].

Segundo Carvalho [35], o *software* MACH3 proporciona também a determinação da rampa de aceleração dos motores (Figura 28), o que torna factível o melhor aproveitamento do desempenho dos motores. Em tal programação é ajustada a relação de transmissão com a quantidade de passos necessários para um deslocamento linear de 1 mm, considerandose todas as transmissões e a resolução do *encoder*. A configuração das acelerações e desacelerações, rampas de velocidade, velocidades máximas e das relações de transmissão de cada eixo é realizada de forma simples e rápida [30].

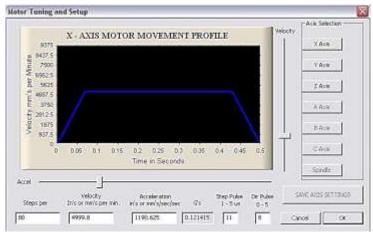


Figura 28: Programação da rampa de aceleração. Fonte: [Autor].

Para entender o funcionamento de cada parte no processo foi desenvolvido um diagrama de blocos, conforme Figura 29.

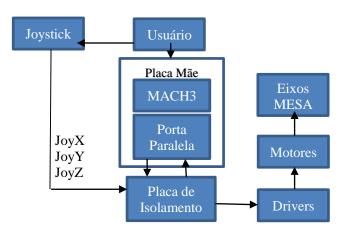


Figura 29: Diagrama de blocos software MACH3. Fonte: [Autor].

A interface do usuário com a máquina, se dá através da interface com o MACH3 pelo computador. No computador estão alguns componentes como a placa mãe, onde se insere o *software*, assim como a porta paralela. Além disso, a placa de isolamento e os *drivers* que acionam os motores que transformam o movimento rotacional em movimento linear

dos eixos da mesa CNC. O sistema conta também com o *joystick*, que serve para controlar remotamente os eixos x, y e z.

3.2 Metodologia e materiais

3.2.1 Problemática

Este trabalho possui duas facetas: a primeira abordará uma análise dos sistemas (LASER, transporte do feixe e o sistema de movimentação separadamente) com ênfase do sistema LASER, assim como a integração dos sistemas (LASER e CNC) e configuração física de operação (dispositivos). Para tal análise, será realizado um estudo de antecedentes sobre o equipamento (incluindo relatos e referências de usuários que operaram a máquina, assim como o histórico de operação do mesmo em relação ao seu funcionamento), além de uma verificação crítica em cada módulo para conhecer o equipamento e identificar possíveis problemas observados durante sua instalação. Este mapeamento permite atuar em cada problema para conseguir um funcionamento pleno da máquina. Após a instalação e adaptações necessárias será realizada a automatização dos sistemas, integrando-os. A segunda faceta é realizar um mapeamento de operação do sistema LASER para processos de soldagem em aço carbono e aço inoxidável, variando seus principais parâmetros como: potência, posição focal, velocidade de soldagem e gás de proteção. Ambas as facetas serão abordadas nas seções "Resultados" e "Mapeamento de parametrização básica para soldagem LASER de CO2 com sistema implementado" respectivamente.

O foco inicial (operacionalização do sistema integrado) consiste na análise individual (mecânica e elétrica) dos componentes, via observações e testes *inloco* e estudo das respectivas documentações; projetos, construção e montagem mecânica de dispositivos e adaptações; projetos, desenvolvimento e instalação de subsistemas eletroeletrônicos (conectores, módulos de comunicação, *software*) e projeto mecatrônico (sistemas de acionamento). Deve-se atender tanto requisitos operacionais, como repetitividade e rigidez de manipulação, integridade do sistema, *triggers* e temporizações, como de segurança, como o intertravamento, emergência, e fim de curso. A metodologia dos ensaios será descrita abaixo, no item "procedimentos experimentais".

3.2.2 Metodologia dos ensaios

3.2.2.1 Análise das soldas

A validação e verificação da qualidade do cordão de solda serão feita por meio da inspeção visual, assim como análise de macrografias. Para verificar a macroestrutura, é necessária a preparação metalográfica de segmentos dos corpos de prova. Para análise dos resultados referentes, será retirada uma amostra do cordão de solda, seja por meio da serra fita, ou serra manual. Cada corpo de prova soldado, com cerca de 150 mm de comprimento, será cortado transversalmente distante 75 mm do início do cordão para garantir que não haja eventuais instabilidades decorrentes do início do processo. Em seguida, será necessária a realização de um acabamento superficial, realizado através de lixas de granulação 80, 320, 400, 600 e 1200, em sequência, com a finalidade de reduzir a rugosidade. cujo principal objetivo, é conseguir uma superfície plana, com rugosidade baixa e com orientação desejada. O polimento das amostras é feito com a Alumina de 1 µm, até atingir a qualidade da superfície desejada. Somente após essas etapas, deve ser autorizada a realização do ataque químico. Para este trabalho, será utilizado Nital 6% (94% álcool etílico absoluto e 6% ácido nítrico) para o aço carbono, e o reagente Burble (20 ml de ácido clorídrico, 20 ml de água destilada e 4g de sulfato de cobre) para o aço inoxidável. O ataque químico é feito por imersão da amostra durante um período de aproximadamente 15 segundos, e assim a macroestrutura do cordão é revelada.

Após o ataque, as amostras são submetidas a um banho de água corrente e álcool etílico, para remoção total do reagente químico. Depois, as amostras são secadas e protegidas com algodão para serem analisadas. Então, as amostras são fotografadas e posteriormente feitas as observações e análises de resultados obtidos com ajuda do *software* de análise de imagens "IMAGE J". Este *software*, permite mensurar as áreas delimitadas em imagens, sendo necessário realizar para cada imagem, uma calibração de uma distância conhecida. Para todas as medições realizadas, a calibração será realizada, utilizando como referência a espessura do metal. Os parâmetros observados na macrografia são a largura fundida da superfície, a penetração máxima e a área fundida, conforme a Figura 30.

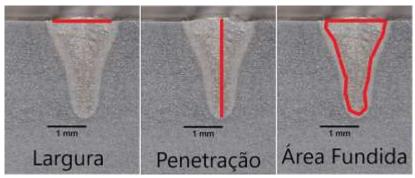


Figura 30: Parâmetros a serem observados na análise da macrografia. Fonte: [Autor].

3.2.2.2 Bancada experimental

Os ensaios de caracterização serão executados na bancada experimental, conforme Figura 31 onde estão em destaque os principais componentes.

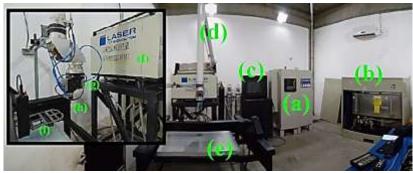


Figura 31: Bancada de ensaios. (a) Módulo de comando/controle. (b) Módulo de refrigeração. (c) IHM CNC. (d) Sistema de transporte do feixe (e) Sistema de movimentação. (f) Módulo de geração. (g) Cabeçote de focalização do feixe. (h) Ponteira de soldagem. (i) Bandeja de fixação corpo de prova. Fonte [Autor].

Além dos equipamentos destacados na Figura 31, podem ainda ser citados os cilindros de gás, assim como o sistema de refrigeração externo.

3.2.2.3 Materiais

Devido à grande utilização na indústria em geral e se tratar de um material com uma boa absortividade do LASER, o aço com baixo teor de carbono SAE 1020, foi escolhido para realização dos ensaios. Além disso, é um material que possui um baixo custo de mercado em relação aos outros materiais. Além do aço carbono, serão realizados alguns ensaios com aço inoxidável 304 L, no intuito de averiguar o comportamento do LASER também com esse tipo de material.

Embora não se conheça o real potencial do equipamento, sabe-se que a interação do LASER de CO_2 em metais possui uma absortividade mais baixa do que em materiais orgânicos por exemplo. Portanto, para realização dos ensaios, serão utilizados corpos de provas de dimensões $200 \times 76,2$ (3") $\times 6,35$ (1/4") mm para aço carbono. E corpos de prova de $200 \times 63 \times 4$ mm para o aço inoxidável. Todos os ensaios na posição plana.

O gás de proteção utilizado será o argônio, uma vez que, é o segundo com maior energia de ionização, atrás somente do gás hélio, que não será utilizado devido seu alto custo de mercado. Entretanto serão feitos testes para determinar a melhor vazão para o processo.

A posição do cabeçote de focalização em relação a peça, será de 90 graus, fazendo com que o feixe LASER incida perpendicularmente em relação ao corpo de prova.

3.2.2.4 Procedimentos experimentais

Os experimentos de soldagem se darão em três etapas: determinação da distância focal, ensaios de soldagem e filmagem térmica, que serão descritas nos itens I, II e III respectivamente.

I. Ensaios para análise do LASER

Para caracterização do equipamento, se optou primeiramente em determinar a distância focal do cabeçote de focalização para determinar o ponto com maior incidência de energia e descobrir os limites do equipamento LASER ao interagir com a matéria. Embora o fabricante do cabeçote óptico, *Kugler* [34], tenha especificado que a distância focal do espelho parabólico fosse igual a 150 mm em relação ao espelho, não indicava a partir de que ponto este valor devia ser referenciado.

Portanto, se fez necessário determinar um ponto de referência para identificar a posição do ponto focal. Para tal procedimento considerou-se a limitação da mesa CNC para com a ponteira de soldagem. Essa limitação se dá através do curso máximo/mínimo do posicionador Z da mesa, que se desloca verticalmente em relação à ponteira de soldagem. Entretanto, como a ponteira de soldagem não possui uma superfície plana para medição entre as partes e o espelho focal localiza-se dentro do cabeçote de focalização, isso impede que se obtenha uma correta medição do ponto focal. Portanto, será fixada como referência, a base do cabeçote de focalização para medição das distâncias. A distância máxima e mínima entre a bandeja de trabalho da mesa CNC e o ponto de referência admissíveis, são 124 e 104 mm respectivamente. Os parâmetros ajustáveis no LASER são a potência, frequência de pulsação e o tempo de exposição, que são escolhidos para este ensaio conforme a Tabela 4.

Tabela 4: Ensaio 0. Parâmetros fixos para determinação da distância focal.							
POTÊNCIA MÉDIA FREQUÊNCIA TEMPO DE EXPOSIÇÃO							
DO LASER [%]	DO PULSO [HZ]	[MS]					
10	50.000	500					

Para determinar a distância focal, será utilizada uma potência de LASER equivalente a 10% do seu total, ou seja, 260 W, com uma frequência de pulso de 50.000 Hz. Esse parâmetro de frequência será utilizado em todos os outros ensaios neste trabalho. O material a ser utilizado para o ensaio, será um material orgânico de papelão, com dimensões de 200 mm x 275 mm x 1 mm, onde será fixada uma folha de papel ofício (Figura 32) a fim de se observar a incidência do LASER. Será disparado um feixe LASER pontual durante um tempo de exposição fixo de 500 ms, variando a distância de referência com incrementos de 2 mm em cada ensaio entre os valores de 104 a 124 mm. Após determinada a distância focal, a medição dos valores fora da posição focal, serão mensurados quão distante estão da posição focal e serão acrescidos um sinal de (+) para valores maiores que a distância focal e (-) para valores menores.

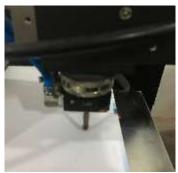


Figura 32: Teste para determinar a distância focal. Fonte: [Autor].

Os resultados do experimento serão descritos em detalhes na seção 5 deste trabalho. Com a determinação da distância focal de referência, inicia-se uma investigação dos limites do equipamento para os parâmetros de entrada.

II. <u>Ensaios de soldagem</u>

A segunda parte do trabalho consiste em realizar um mapeamento de operação com aplicabilidade em soldagem autógena LASER. A metodologia de ensaios utilizada no trabalho, consiste na realização de ensaios controlados em aço carbono e aço inoxidável, com base na fundamentação teórica aqui estudada buscando caracterizar o equipamento LASER.

Será necessária uma bateria de ensaios e analises, para verificar a influência dos parâmetros variáveis de entrada. Para cada parâmetro (posição focal, velocidade de soldagem, gás de proteção, e potência) serão repetidos três ensaios para quantificar e qualificar a repetitividade do processo LASER. Avaliando o comportamento sobre o aspecto visual do cordão como efeitos de interação do LASER com a matéria. A verificação da qualidade e a medição dos parâmetros de saída, será realizada através de inspeção visual e da avaliação da macrografia.

Por motivos de desconhecimento do real potencial do equipamento, sendo muito amplo, não se teve uma base preliminar para realização dos ensaios. Entretanto, se busca um mapeamento claro e preciso para que possa servir de referência para trabalhos futuros.

Os ensaios serão realizados na condição "sobre chapa". A escolha desta abordagem, tem por objetivo, reduzir descontinuidades, como distorções na peça e possíveis influências, devido à fixação e desalinhamento

das mesmas, além de tornar mais simples e rápido a realização dos ensaios.

a) Ensaio 1: Posição focal

O ensaio número 1, prevê a variação da distância focal. O ensaio determinará o comportamento do feixe LASER na medida em que se afasta do ponto focal já definido em ensaios anteriores. Isso ajudará na escolha da posição focal para uma determinada aplicação. Em casos que se necessite de uma densidade de energia menor, pode-se posicionar o objeto de trabalho fora do foco, ou vice-versa. Na Tabela 5 estão representados os parâmetros fixos utilizados neste ensaio.

Tabela 5: Ensaio 1. Caracterização do processo em relação a posição focal.

POTÊNCIA MÉDIA DO LASER [%]	VELOCIDADE DE SOLDAGEM [CM/ MIN]	VAZÃO DO GÁS DE ASSISTÊNCIA AR COMPRIMIDO [BAR]	VAZÃO DO GÁS DE PROTEÇÃO ARGÔNIO [L/ MIN]
100	120	0,5	20

b) Ensaio 2: Caracterização e influência da velocidade de soldagem na geometria do cordão

Na Tabela 6 estão detalhados os parâmetros utilizados no ensaio 2, que visa caracterizar a influência da velocidade de soldagem na geometria do cordão, em termos da largura, profundidade de penetração e área fundida. O gás de assistência para proteção da óptica, será o ar comprimido a uma vazão de 0,5 Bar e o gás de proteção utilizado no processo será o Argônio. A vazão de gás escolhida é um valor utilizado por autores da literatura.

Tabela 6: Parâmetros para Ensaio 2. Ensaio para caraterização do processo em relação a velocidade de soldagem.

POTÊNCIA MÉDIA DO LASER [%]	VAZAO DO GÁS DE PROTEÇÃO ARGÔNIO [L/ MIN]	VAZÃO DO GÁS DE ASSISTÊNCIA AR COMPRIMIDO [BAR]	POSIÇÃO FOCAL [MM]
100	20	0,5	111 (-1)

Para o ensaio 2 serão realizados cordões sobre chapa variando a velocidade de soldagem em 30, 60, 90, 120, 150 e 200 cm/min. Após, será

realizada a análise superficial do cordão, como também, a análise geométrica através da metalografia.

c) Ensaio 3: Vazão de gás

O ensaio 3, contará com a variação da vazão do gás de proteção para avaliar a influência dele na supressão plasmática, a qual influencia na penetração. Segundo Behler et al [18], quanto maior a vazão de gás, melhor a supressão plasmática e melhor vai ser a interação do LASER com a matéria. O ensaio 3, será realizando segundo os parâmetros fixos da Tabela 7.

Tabela 7: Parâmetros para Ensaio 3. Variação da vazão de gás.

POTÊNCIA MÉDIA DO LASER [%]	VELOCIDADE DE SOLDAGEM [CM/ MIN]	VAZÃO DO GÁS DE ASSISTÊNCIA AR COMPRIMIDO [BAR]	POSIÇÃO FOCAL [MM]
100	120	0,5	111 (-1)

Serão realizadas 3 repetições de cada ensaio, variando o comportamento do gás na geometria do cordão, variando de 8 l/min a 24 l/min, com um incremento de 4 l/min entre ensaios. Após o ensaio, será realizada uma análise superficial do cordão, assim como, realizada uma verificação metalográfica

d) Ensaio 4: Potência

O ensaio 4, varia a potência entregue pelo LASER, de 20% a 100%, com incrementos de 20 % cada ensaio. Os parâmetros mantidos constantes, estão descritos na Tabela 8.

Tabela 8: Ensaio referente a caracterização em relação a potência.

POSIÇÃO FOCAL [MM]	VELOCIDADE DE SOLDAGEM [CM/ MIN]	VAZÃO DO GÁS DE ASSISTÊNCIA AR COMPRIMIDO [BAR]	VAZAO DO GÁS DE PROTEÇÃO ARGÔNIO [L/ MIN]
111 (-1)	120	0,5	20

III. Filmagem térmica

O ensaio 5 consiste em uma avaliação do comportamento do processamento em termos de temperatura. A câmera de filmagem termográfica do fabricante FLIRTM modelo SC 7000 (Figura 33) possui um tempo de integração de 3 μs a 20000 μs programável e resolução da taxa de quadros 0,1 Hz passo.



Figura 33: Câmera termográfica SC700. Fonte: [36].

Para este ensaio, a câmera térmica será posicionada sob o corpo de prova (Figura 34), com a finalidade de filmar o comportamento da temperatura sob o cordão. Para não haver um contato direto do feixe LASER com a lente da câmera, a câmera e posicionada fora da linha de ataque do feixe LASER, aproximadamente a 200 mm de distância, conforme Figura 34.

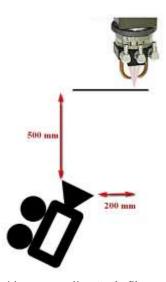


Figura 34: Esquemático para realização da filmagem térmica. Fonte: [Autor].

Será realizado um cordão sobre chapa em aço carbono SAE1020, afim de avaliar as temperaturas e o comportamento dessa variável sobre o material. O objetivo é verificar o comportamento térmico do material à incidência do LASER, correlacionando-o com a penetração. Para isso, serão realizados ensaios em três espessuras diferentes (2, 3 e 6,35 mm). Isso permitirá verificar o gradiente de temperatura ao longo do processo, assim como, as taxas de resfriamento para as diferentes espessuras. Além disso, permitirá avaliar a aplicabilidade do LASER nestas condições. Os parâmetros mantidos constantes utilizados estão descritos na Tabela 9. A potência média utilizada nos ensaios será igual a 100%, para os ensaios em chapas de 3 e 6,35 mm. Já para chapas de 2 mm, serão utilizados três faixas de potências diferentes, 40, 70 e 100%. Esses níveis de potência diferentes, permitirão avaliar o comportamento da temperatura para condição aquecimento superficial (40%), keyhole sem penetração total (70%) e keyhole com penetração total (100%). Para cada ensaio, serão realizados 3 repetições e posteriormente retirada as médias dos valores para traçar um o gráfico do comportamento destas variáveis.

Tabela 9: Parâmetros utilizados na filmagem térmica. Material: Aço carbono SAE1020

VAZÃO DO GÁS DE PROTEÇÃO ARGÔNIO [L/ MIN]	VAZÃO DO GÁS DE ASSISTÊNCIA AR COMPRIMIDO [BAR]	VELOCIDADE DE SOLDAGEM [CM/MIN]	POSIÇÃO FOCAL [MM]
20	0,5	120	111 (-1)

4 RESULTADOS

4.1 Geração de infraestrutura para soldagem LASER CO₂. Adaptações e implementação do LASER TLF 2600 Turbo

4.1.1 Módulo de refrigeração

4.1.1.1 Sistemas alternativos de refrigeração

A unidade de refrigeração do sistema é do tipo água-água, sendo que estava, originalmente, instalada em uma infraestrutura predial que dispunha de uma rede de água refrigerada e torres de arrefecimento externas. O Instituto de Petróleo, Energia e Gás (InPetro), onde o sistema foi instalado na UFSC, não dispõe de uma rede interna de água. Desta maneira, foi necessário um reprojeto global e implementação de um subsistema adicional, um *chiller*, para refrigerar o fluido refrigerante do sistema LASER.

O novo sistema, devido ao espaço físico disponível e a poluição sonora que fazia, foi instalado fora da sala de operação do LASER, em um piso superior cerca de aproximadamente 4 metros de altura. Tratavase de um sistema composto por dois subsistemas, A e B (Figura 35 e Figura 36). O subsistema A, composto por uma caixa d'água Fortlev 2000 litros, uma moto-bomba Dancor (motor monofásico de ½ CV com 2 polos e uma bomba do tipo autoescorvante PF-17C) e um *chiller* Ft 100 Akesa. Já o subsistema B, composto pela mesma caixa d'água e uma moto-bomba (motor de indução monofásico mod E56 e uma bomba Schineider ASP 56). O subsistema A, é um sistema independente, cuja finalidade única é resfriar a água da caixa d'água.



Figura 35: Subsistema A. Imagem Frontal. Fonte: [Autor].

A Figura 36, mostra o funcionamento do subsistema A. A bomba d'água (2) succiona água a temperatura ambiente do reservatório de água (1) e a transporta através da tubulação até o chiller (3), onde o mesmo refrigera a água (em torno de 16.5° C) e a devolve para o reservatório começando o ciclo novamente.



Figura 36: Subsistemas A e B. Imagem Traseira. Fonte: [Autor].

O subsistema B, é um subsistema que realiza a troca de calor com o sistema principal de refrigeração do LASER. O acionamento da motobomba é independente. O subsistema B funciona da seguinte maneira: Ao acionar a moto-bomba (4), conforme Figura 36, a bomba succiona a água da caixa d'água e a mesma é transportada pela tubulação até o trocador de calor do sistema de refrigeração principal do LASER, onde dali, a água

retorna para a caixa d'água. O diagrama de blocos Figura 37 mostra o reprojeto do sistema secundário de refrigeração.

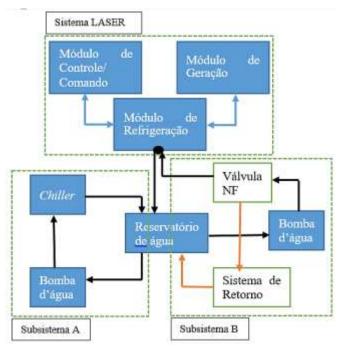


Figura 37: Funcionamento do sistema secundário de refrigeração. Fonte: [Autor].

Conforme o diagrama, pode se observar que o subsistema A, refrigera a água do reservatório através do *chiller*. O subsistema B, succiona essa água refrigerada e transporta para o módulo de refrigeração do LASER, onde a água passa (caso a válvula solenoide esteja aberta) pela tubulação atrás dos reservatórios de água do LASER, onde a transferência de calor é realizada por convecção, ou seja, as águas dos sistemas não se misturam. Caso a válvula esteja fechada, a água retorna para o reservatório.

Na Figura 38, mostra as tubulações de escoamento da água do subsistema B, onde nota-se que elas passam pelo trocador de calor e ajudam na refrigeração do sistema principal. Porém antes de a água entrar no trocador de calor, existe uma válvula solenoide 2 vias Danfoss.NF (Figura 38(c)). Essa válvula solenoide é operada eletromecanicamente. Além disso, possui duas portas e são denominadas normalmente fechada, pois

essas portas estão isoladas uma da outra impedindo o fluxo do fluido. O reservatório da água do sistema de refrigeração do LASER TLF 2600 turbo possui um termostato que monitora a temperatura da água. Quando a temperatura está acima da recomendada (20° C), um sinal elétrico é enviado para o solenoide para energiza-lo, então as portas se conectam, e o fluido pode fluir entre elas.



Figura 38: Subsistema B. Trocador de calor, tubulação e válvula solenoide.

Parte Inferior. Fonte [Autor].

A temperatura ideal da água para operação do LASER TLF 2600 Turbo deve estar em torno de 20° C, conforme fabricante. Quando a temperatura de refrigeração de 20° C é atingida, a válvula solenoide é desenergizada e retorna para sua posição original, normalmente fechada. Entretanto, a bomba d'água do subsistema B de refrigeração continua a bombear água. Com a válvula solenoide fechada, a pressão interna do subsistema B aumenta gradativamente, podendo romper os componentes. A partir disso foi criado um circuito de alívio no subsistema B, a fim de aliviar a carga gerada no eixo da bomba conforme a Figura 39.



Figura 39: Circuito de retorno subsistema B. Fonte [Autor].

O circuito de retorno do subsistema B foi instalado com base em dois critérios. O primeiro, era evitar que a carga no eixo do motor fosse excessiva e o segundo, era em relação a pressão entre os circuitos, para garantir que o fluido escoasse pelo circuito principal quando a válvula solenoide estivesse aberta. Para isso, foi instalado uma válvula de esfera no circuito de retorno para controlar a pressão.

Após concluída a instalação do sistema secundário de refrigeração, foram realizados testes com o equipamento LASER, a fim de validar as novas instalações. Observou-se que, ao energizar o equipamento LASER, a temperatura mostrada no display do LASER, conforme Figura 40, não estava dentro das especificações. A temperatura igual a 39.2° C, representa a temperatura da água que entra no ressonador, que deve estar entre 20 e 25° C. Já a temperatura igual a 38,1° C representa a temperatura da água que retorna do gerador, que não deve passar de 30° C.



Figura 40: Display de Temperatura da Água de Refrigeração do LASER. Fonte [Autor].

Essa temperatura foi registrada após alguns minutos com o equipamento energizado, o que foi levado a concluir, que o sistema secundário de refrigeração não havia obtido êxito. Entretanto, paralelamente foi observado um sobreaquecimento do motor elétrico do conjunto moto-bomba e consequente desarmamento, o que fazia com que a bomba d'água parasse de bombear água e refrigerar os outros módulos. Fato esse que foi levado em consideração para questionar se o problema era no sistema implementado. O problema comprometia o funcionamento do equipamento.

4.1.1.2 Conjunto moto-bomba

O módulo de refrigeração do equipamento LASER TLF 2600 turbo, possui um conjunto moto-bomba que tem por finalidade promover a circulação da água por dentro de todo sistema, agindo assim no resfriamento do mesmo durante o processo, evitando o sobreaquecimento dos componentes.

Esse conjunto moto-bomba da fabricante *Grundfos* possui um motor trifásico de 1,5 kW de potência, com capacidade de operar em duas ciclagens de frequência (50 e 60 Hz) e uma bomba centrifuga CRN-4-80 A-P-G BUBE com uma vazão nominal de 6 m³/h e uma velocidade nominal de 2900 rpm.

Originalmente o equipamento foi dimensionado para operar em uma rede de 50 Hz (2900 rpm) de frequência. Quando operado na rede de 60 Hz, um problema de sobreaquecimento no motor elétrico da bomba foi detectado. Então, foi levantada a hipótese de que o sobreaquecimento estava acontecendo pelo fato de a bomba d'água estar sendo operada fora da ciclagem recomendada. Isso faz com que a vazão e a pressão sejam maiores do que aquelas especificadas pelo fabricante. Segundo o fabricante, estaria havendo um excesso de corrente elétrica no motor elétrico, pois o ponto de operação da bomba estaria fora de projeto. Essa faixa de operação fora da zona ótima de trabalho, faz com que o disjuntor de proteção do motor elétrico desarme antes de queimá-lo, protegendo-o. Para corrigir este problema, foi modificado o layout da saída da bomba d'água, de tal forma, que se pudesse reduzir a vazão na saída da bomba, para que assim diminuísse a rotação do motor e consequentemente a corrente elétrica gerada atingindo um ponto dentro do previsto pela placa de identificação do motor. Porém a redução da vazão provocada por esse estrangulamento na saída da bomba, ainda assim deveria atender a refrigeração do sistema LASER. Para isso, foram realizadas modificações de layout conforme descritos a seguir.

Quando se fala de bomba centrífuga, é necessário observar, tanto a vazão, como a pressão. Portanto, além de monitorar o tempo, se observou que a pressão do sistema aumentava conforme reduzia a vazão. Esse aumento da pressão ocasionou uma maior carga no eixo do motor. Porém esse efeito era pouco notado, pois a redução da vazão transparecia essa carga. Portanto, se reduzisse a diferença de pressão entre a entrada e saída da bomba, a carga no eixo do motor diminuiria, contribuindo para o motor trabalhar mais aliviado. Pensando por esse lado foi desenvolvido um novo layout na saída da bomba (Figura 41).

Conforme testes preliminares observou-se uma série de fatores que poderiam estar causando o desarme do disjuntor, seja a corrente elétrica excessiva, a alta perda de carga no sistema, a alta vazão de água na saída da bomba, a rotação do motor, a diferença de pressão, etc. Em relação ao fluido, o escoamento através da bomba centrífuga é dependente da pressão, quanto maior a diferença de pressão entre a entrada e saída da bomba, menor vai ser a velocidade de escoamento do fluido na saída para uma mesma vazão, o que causa uma carga no eixo do motor fazendo com que o motor precise de uma força maior para escoar o fluido. E por isso, o aumento da corrente elétrica e sobreaquecimento. Essa carga é aliviada quando diminui a vazão na saída da bomba, porém o fluido é insuficiente para refrigerar o sistema. Portanto, para esse novo layout, o foco foi na diferença de pressão. Na saída da bomba foi adaptado um sistema que

apresenta dois circuitos interligados. Um circuito principal, que permite que o fluido circule para o sistema LASER e um circuito secundário ou de retorno, onde o fluido retorna para o reservatório diretamente. O principal é composto por mangueiras de borracha de bitola 1 ½" IBIRA hidroar resistente a pressões até 300 psi (~20 Bar) e um manômetro seco Genebre (0-16 Bar). O circuito de retorno é composto por um registro de gaveta DOCOL bruto, com acionador do tipo volante, resistente a 13 Bar de pressão e uma mangueira de sucção bitola 1 ¼" capaz de suportar 6 Bar. Esse último, que tem por finalidade, além de possibilitar o retorno do fluido direto para o reservatório, controlar a pressão do sistema para que a vazão seja necessária para refrigerar o sistema LASER. O circuito principal e o secundário estão representados na Figura 41(a) e Figura 41(b) respectivamente.





Figura 41: (a) Circuito Principal. (b) Circuito Secundário ou de Retorno. Fonte [Autor].

O novo layout tinha por finalidade controlar a diferença de pressão entre a entrada e a saída da bomba. O controle da pressão se dava através do registro de gaveta, que quando totalmente fechado, a pressão interna do sistema era máxima e igual a 7 Bar, e isso gerava uma diferença de pressão muito grande para o sistema, uma vez que, na entrada é a pressão atmosférica, causando uma carga muito grande no eixo do motor. Então, foram realizados testes abrindo o registro de gaveta e monitorando a pressão resultante, além da corrente elétrica. Os resultados obtidos foram satisfatórios para pressões em torno de 3.8 Bar, ou seja, o conjunto motobomba não desarmava pois estava dentro das especificações técnicas do fabricante. A vazão da água era suficiente para refrigerar o sistema LA-SER. Em relação a corrente elétrica do motor, ela se manteve em torno de

4,0 A, o que significa uma corrente dentro da tolerância especificada pelo motor. Além disso, foi possível aferir a frequência de rotação do eixo do motor, com o intuito de verificar a carga sobre o eixo do motor (Figura 42), através da lâmpada estroboscópica, modelo TC-5050 da fabricante ICEL.



Figura 42: Medição da rotação do eixo do motor. Fonte: [Autor].

Pela Figura 42, pode-se observar que a rotação do eixo do motor estava em torno de 3250 rpm, ou seja, para um motor trifásico operando em 60 Hz a velocidade do eixo está próxima da nominal (3500 rpm) o que significa que o eixo está operando aliviado.

Além das adaptações realizadas no módulo de refrigeração para que fosse possível operar o LASER TLF 2600 Turbo, foi necessária também uma manutenção preventiva no equipamento, como a deionização da água de refrigeração.

Para o bom funcionamento do processo LASER, é necessário que a água esteja deionizada, ou seja, com mínima condutividade elétrica a fim de não influenciar no processo. A faixa aceitável de condutividade elétrica da água varia conforme modelo de máquina. Segundo o fabricante TRUMPF, o ideal para o LASER TLF 2600 Turbo, é, no máximo 20 $\mu\text{S/cm}$ (microSiemens por centímetro). A substituição da água deionizada deve ser realizada num período de 12 meses.

4.2 Adaptações do sistema de transporte do feixe

No contexto do sistema de transporte do feixe, foi necessário realizar duas adaptações para deixar o sistema mais operacional e estável. A primeira modificação, foi em relação as mangueiras de água e gás do sistema, pois as mesmas se tornavam frágeis e se rompiam facilmente quando o sistema LASER era colocado em funcionamento como mostrado na Figura 43. O motivo disso, foi devido a fragilidade e ressecamento das mangueiras pelo tempo, necessitando uma substituição das mesmas por mangueiras novas.



Figura 43: Substituição das mangueiras de transporte de água e gás. Fonte: [Autor].

O procedimento seria realizado com o cabeçote fixo, com movimentação da peça de trabalho. Portanto, a segunda modificação foi o reforço para deixar o sistema de transporte de feixe mais estável uma vez que o mesmo era bastante sensível e podia deslocar e/ou atrapalhar no desenvolvimento do processo se tornando indispensável fixar o sistema. Na Figura 44 pode ser observado a adaptação realizada.



Figura 44: Adaptação mão francesa para fixação do sistema de transporte do feixe. Fonte: [Autor].

4.3 Adaptações no sistema de movimentação

O sistema de movimentação, necessitou de algumas modificações pare melhoria do processo LBW, como rigidez e robustez, para melhorar as incertezas. A primeira adaptação realizada, foram a adição dos calços da mesa, para melhorar a planicidade da mesma com o solo. Além disso, foram colocadas barras chatas em X, para dar a estabilidade lateral a mesa. Essas adaptações podem ser observadas na Figura 45.



Figura 45: Adaptações mesa CNC. Barras chatas em X e calços da mesa. Fonte: [Autor].

Em relação à bandeja de ensaios, alguns ensaios foram realizados a fim de valida-la. O ensaio consistiu em realizar um cordão de solda sobre um corpo de prova de aço inoxidável com dimensões 200 x 100 x 1 mm. Para isso, foram utilizados o eixo Y, para movimentação no sentido longitudinal do cordão de solda e o eixo Z, para movimentação no sentido vertical, uma vez que, o cabeçote de focalização LASER com a ponteira de soldagem era fixo, consequentemente quem devia se mover era a mesa.

No entanto, a bandeja não se mostrou satisfatória, uma vez que, ao realizar o processo de soldagem, obteve-se uma penetração total e as partes (corpo de prova e bandeja) se fundiam. Outro problema foi observado em relação à bandeja, por ela ser feita de alumínio, material altamente reflexivo a luz LASER, se tornava perigoso o processamento de material sobre ela.

Para resolver o problema, foi desenvolvido uma nova concepção para aplicação de processos LBW com o intuito de satisfazer as condições necessárias para se obter um cordão de qualidade. Um critério utilizado para a concepção do novo protótipo, foi a adaptação de uma câmara parcialmente vedada abaixo da estrutura da bandeja para que pudesse introduzir um gás de purga, na parte inferior do cordão, a fim de impedir a oxidação do material em processamento de chapas de aço inoxidável. Outra melhoria, foi a fixação do corpo de prova, uma vez que, no processamento de chapas finas, elas têm forte tendência ao empenamento. Na Figura 46, pode ser observado a nova bandeja v2.

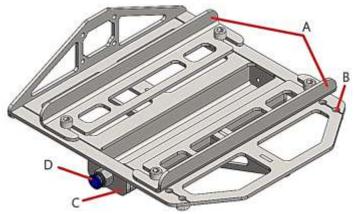


Figura 46: Bandeja nova do sistema de movimentação. Em (a) bases móveis; (b) furos para fixação das bases móveis; (c) câmara para gás de purga; (d) conexão pneumática engate rápido. Fonte: [Autor].

Como pode ser observado na Figura 46, a bandeja conta com uma câmara abaixo dela para preenchê-la com gás de purga, geralmente com gás argônio, além de duas bases móveis, sendo uma delas com ajuste de três níveis, dependendo do comprimento da chapa a ser fixada. Para utilização em chapas de aço carbono, não é necessário gás de purga, porém o vão serve para não fundir as partes durante o processo.

4.4 Integração dos sistemas

Para consolidação e pleno funcionamento dos três sistemas, se fez necessário realizar a integração entre eles para funcionamento do sistema de soldagem LASER como um todo. Para isso realizou-se um estudo da parte elétrica do equipamento LASER para verificar os conectores destinados a comunicação externa com outra máquina. Embora com dificuldade em relação ao entendimento sobre o funcionamento elétrico do equipamento, uma vez que, os manuais eram de difícil interpretação. Segundo o diagrama elétrico do equipamento [37] a porta para comunicação externa era a porta X55. Entretanto não se tinha muita informação sobre essa porta. Serviu como base para começar os testes, onde foram realizados alguns testes de continuidade para descobrir onde estariam os principais conectores para o disparo do feixe LASER, assim como, a abertura do

Shutter. Com sucesso, foi determinado a porta que disparava o LASER e abertura do *Shutter*.

Essa comunicação depois de integrada, ficou conforme o diagrama de blocos da Figura 47.

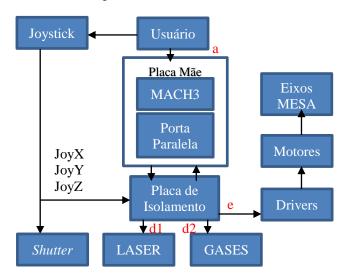


Figura 47: Diagrama de blocos do sistema LASER integrado. Fonte: [Autor].

Essa comunicação é controlada pelo MACH3, via porta paralela, onde se optou em utilizar as duas saídas da porta para adaptar a abertura do *Shutter* e o disparo junto com o início da trajetória. Isso pode ser visto na Figura 48, onde estão elencadas algumas funções que podem ser correlacionadas no diagrama de bloco na Figura 47.

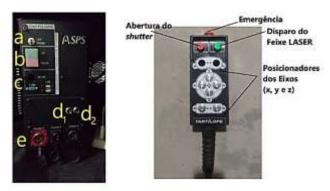


Figura 48: Gabinete v3 e *joystick* com suas funcionalidades. Fonte: [Autor].

A chave representada pela letra (a) da Figura 48, representa a chave liga/desliga geral do gabinete; em (b), representa os botões liga/desliga dos drivers; em (c), são entradas para montagem do computador, como USB's, conector mouse, teclado e vga para o monitor; em (d), são os conectores destinados a alimentação de gás (d1) e o disparo do LASER (d2); em (e), são os conectores destinados a movimentação dos motores da mesa CNC.

Para controlar a alimentação dos gases foram instalados duas válvulas solenoides de 24v normalmente fechada. Esse controle foi adicionado no programa do MACH3, o qual quando iniciado, envia um sinal elétrico para o solenoide para liberar os gases, tanto o gás de proteção, como o gás de assistência. Na Figura 49, pode ser visto o sistema de controle de alimentação de gás.



Figura 49: Sistema de distribuição de gases. Fonte: [Autor].

5 MAPEAMENTO DE PARAMETRIZAÇÃO BÁSICA PARA SOLDAGEM LASER CO_2 COM O SISTEMA IMPLEMENTADO

Nesta seção, serão descritos detalhadamente, os resultados obtidos e as discussões sobre a interação do processo LBW autógeno em aço estrutural e aço inoxidável. Primeiramente em relação à determinação do ponto focal do cabeçote de focalização, em seguida os experimentos de caracterização do sistema LASER implementado.

Para determinar a posição focal do cabeçote de focalização com a maior intensidade de energia, foram seguidos alguns parâmetros, como a posição do feixe em relação a peça de trabalho, que foi mantida em 90°. Esse alinhamento garante que a distância entre feixe e peça, forme um plano perpendicular entre as partes. Segundo o fabricante, a distância focal da óptica utilizada é igual a 150 mm. Entretanto, essa medida é imprecisa devido ao fato de a óptica (espelho parabólico), estar no interior do cabeçote. Portanto, foi estabelecido um referencial para fazer os experimentos, como pode ser visto na Figura 50.



Figura 50: Linha de referência. Posição focal. Fonte: [Autor].

O ensaio consistiu em posicionar o material orgânico sob o cabeçote de focalização e então fazer disparos com o feixe com uma potência de 10% (cerca de 260 W) durante um tempo igual a 500 ms. A distância

variou com os limites máximo e mínimo permitido da mesa CNC, de 124 a 104 mm. Na Figura 51, pode ser observado os resultados.

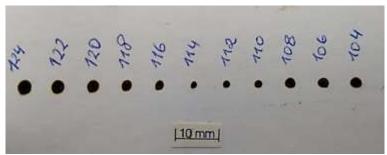


Figura 51: Teste para determinar a distância focal. Variação da posição focal de 2mm. Fonte: [Autor].

Pela Figura 51, nota-se que a distância focal encontrava entre os valores de 110 e 116 mm, onde o *spot size* era o menor possível. Então foi realizado um segundo ensaio, para determinar, de fato, qual a distância do ponto focal (Figura 52).

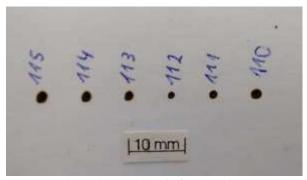


Figura 52: Teste para determinar a distância focal. Variação da posição focal de 1mm. Fonte: [Autor].

No segundo teste variando a posição focal de 1 mm entre os valores que apresentaram o menor *spot size* (Figura 52), foi possível determinar a distância focal igual a 112 mm em relação a linha de referência, com um diâmetro do feixe igual a 500 µm. Sendo assim, a distância com maior densidade de potência.

5.1 Ensaios de soldagem

5.1.1 Posição focal

Os ensaios de soldagem para determinar os efeitos relacionados à geometria do cordão com a variação da posição focal, foram realizados tanto para o aço carbono, como para o aço inoxidável. Foram feitos experimentos variando a posição focal de 105 mm (distante -7 mm do ponto focal) a 120 mm (distante a +8 mm do ponto focal) com potência de 2600 W, velocidade de soldagem de 120 cm/ min e vazão de gás igual a 20 l/ min.

5.1.1.1 Aço carbono

De modo a simplificar a interpretação dos resultados obtidos, uma vez que, foram realizadas três repetições para cada ensaio, foi criada uma tabela com valores médios e seus respectivos desvios padrão e gerado um gráfico a partir das aquisições dos valores de largura, penetração e área fundida durante a análise de macrografia dos ensaios em aço carbono.. Tais representações estão mostradas na Tabela 10 e Figura 53 respectivamente.

Tabela 10: Médias e desvios padrão dos resultados obtidos caracterizando o comportamento da geometria do cordão em relação a variação da posição focal.

Aço carbono SAE 1020.

PF [mm]	LS [mm]	\overline{x}	D.V.	AF [mm ²]	\overline{x}	D.V.	P [mm]	\overline{x}	D.V.
105 (-7)		0,89	0,06		0,16	0,03		0,28	0,04
108 (-4)		0,76	0,02		0,19	0,01		0,36	0,03
111 (-1)		1,34	0,08		1,55	0,06		2,56	0,13
114 (+2)		1,12	0,01		1,73	0,08		2,50	0,06
117 (+5)		1,22	0,10		1,03	0,03		1,27	0,11
120 (+8)		0,79	0,04		0,18	0,02		0,38	0,06

onde: PF: posição focal; LS: largura da superfície; \bar{x} : média; D.V.: desvio padrão; AF: área fundida; P: penetração.

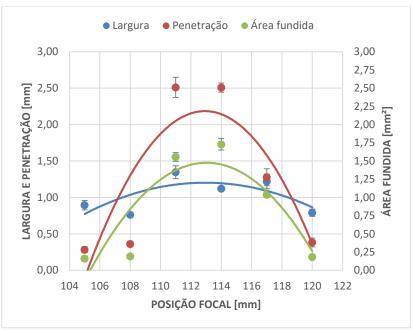


Figura 53: Gráfico com o comportamento da geometria do cordão variando a posição focal. Material: Aço carbono SAE 1020.

No gráfico da Figura 53, gerado a partir da avaliação das macrografias, observa-se uma maior penetração na posição focal igual a 111 mm, ou seja, (-1) de valor médio igual a 2,56 mm. Nota-se, que para os parâmetros avaliados, a penetração é o parâmetro mais sensível ao processo, podendo variar de apenas um aquecimento superficial para posições focais mais afastadas do *spot size*, para até, a formação do *keyhole* com penetrações de 2,56 mm para posições mais próximas. Já para os demais parâmetros, largura e área fundida, o comportamento durante o processo não são tão sensíveis, variando cerca de 0,58 e 1,57 mm, respectivamente.

A caracterização da referência para posição focal permitiu conhecer o comportamento das variáveis como potência e velocidade constantes, em diferentes posições focais. Em todos os experimentos, não houve presença de trincas e porosidade, o processo foi considerado estável e não houve perda de material nos testes. A Figura 54, mostra a geometria do cordão, onde é possível ver o comportamento da incidência do LASER em diferentes posições focais.

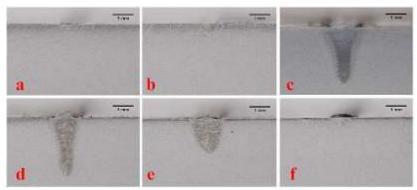


Figura 54: Resultados obtidos com a variação da posição focal em aço carbono. Parâmetros: Potência = 2,6 kW; Velocidade de soldagem = 120 cm/min; Vazão de gás = 20 l/min. Em (a) 105 (-7) mm; (b) 108 (-4) mm; (c) 111 (-1) mm; (d) 114 (+2) mm; (e) 117 (+5) mm; (f) 120 (+8) mm.

Observa-se pela Figura 54, que a geometria do cordão varia significativamente com variação da posição focal. Essa mudança brusca no comportamento da geometria, pode ser explicada pelo fato de que a óptica do sistema LASER possui uma pequena distância focal, de valor igual a 150 mm. Distâncias focais pequenas geram grandes mudanças na geometria do cordão, uma vez que, possuem um ângulo de divergência muito grande. A intensidade do feixe diminui quando se propaga para longe do foco. Esse comportamento vale tanto para valores negativos ou positivos em relação ao *spot size*.

5.1.1.2 Aço inoxidável

De modo a simplificar a interpretação dos resultados obtidos, para os ensaios em aço inoxidável 304L, foi criada uma tabela com valores médios e seus respectivos desvios padrão e gerado um gráfico a partir das aquisições dos valores de largura, penetração e área fundida durante a análise de macrografia. Tais representações estão mostradas na Tabela 11 e Figura 55 respectivamente.

Tabela 11: Médias e desvios padrão dos resultados obtidos caracterizando o comportamento da geometria do cordão em relação a variação da posição focal.

Aco inoxidável 3041.

PF [mm]	LS [mm]	\overline{x}	D.V.	AF [mm²]	\overline{x}	D.V.	P [mm]	\overline{x}	D.V.
105 (-7)		0,20	0,00		0,00	0,00		0,00	0,00
108 (-4)		1,41	0,07		1,34	0,13		1,86	0,20
111 (-1)		1,36	0,04		2,11	0,14		3,18	0,06
114 (+2)		1,13	0,10		1,73	0,05		2,82	0,06
117 (+5)		1,16	0,03		1,30	0,18		1,83	0,03
120 (+8)		0,86	0,03		0,26	0,02		0,44	0,00

onde: PF: posição focal; LS: largura da superfície; \bar{x} : média; D.V.: desvio padrão; AF: área fundida; P: penetração.

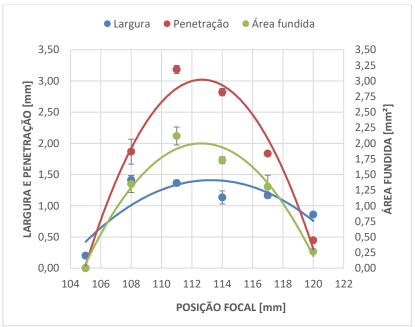


Figura 55: Gráfico com o comportamento da geometria do cordão variando a posição focal. Material: Aço inoxidável 304 L

Segundo o gráfico da Figura 55, é possível observar que a penetração obteve uma profundidade maior na posição focal igual a 111 (-1) mm, o que estaria de acordo com a literatura, onde diz que o ponto focal dentro

da peça resultaria em uma penetração maior. Assim como no ensaio em aco carbono, a penetração se mostrou mais sensível do que os outros parâmetros. Entretanto a profundidade de penetração obtida no aço inoxidável foi igual a 3,18 mm, enquanto que no aço carbono, foi igual a 2,56 mm. Uma diferença de 0,62 mm. Essa diferença de profundidade de penetração pode ser explicada com base na espessura dos materiais. Para um mesmo material, o fluxo de calor ocorre de forma mais rápida para espessuras maiores, gerando uma dissipação de calor maior na peça, consequentemente uma menor penetração. Além disso, as caraterísticas do material influenciam na interação, como: coeficiente de expansão, condutividade térmica, refletividade/absortividade. Para a mesma espessura, o aço carbono apresentaria uma maior penetração do que o aço inoxidável, uma vez que, possui uma condutividade térmica maior, por exemplo. A geometria do cordão obteve uma razão de aspecto maior que 1, ou seja, penetração maior que largura, caracterizando um modo de soldagem keyhole, fato que pode ser observado na Figura 56.

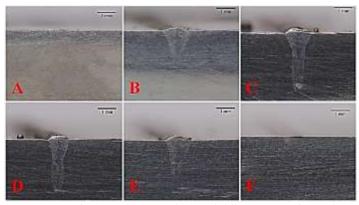


Figura 56: Geometria do cordão. Resultados obtidos com a variação da posição focal em aço inoxidável 304L. Parâmetros: Potência = 2,6 kW; Velocidade de soldagem = 120 cm/min; Vazão de gás = 20 l/min. Em (a) 105 (-7) mm; (b) 108 (-4) mm; (c) 111 (-1) mm; (d) 114 (+2) mm; (e) 117 (+5) mm; (f) 120 (+8) mm.

O aspecto superficial dos respectivos cordões mostrados na Figura 56 é apresentados na Figura 57.

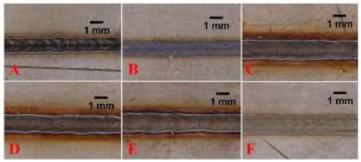


Figura 57: Aspecto superficial. Resultados obtidos com a variação da posição focal em aço inoxidável 304L. Parâmetros: Potência = 2,6 kW; Velocidade de soldagem = 120 cm/min; Vazão de gás = 20 l/min. Em (a) 105 (-7) mm; (b) 108 (-4) mm; (c) 111 (-1) mm; (d) 114 (+2) mm; (e) 117 (+5) mm; (f) 120 (+8) mm.

O aspecto superficial do cordão para posição foca igual a -7 e +8 possui uma baixa densidade de energia causando apenas aquecimento superficial. Os cordões não apresentaram descontinuidades, trincas ou porosidade ao longo da solda.

5.1.2 Velocidade de soldagem

5.1.2.1 Aço carbono

O ensaio consistiu em variar a velocidade de soldagem a fim de determinar uma faixa de operação do equipamento. Tal faixa de operação vai servir como base futura para aplicações específicas. De modo a simplificar a interpretação dos resultados obtidos foi criada uma tabela com valores médios e seus respectivos desvios padrão e gerado um gráfico a partir das aquisições dos valores de largura, penetração e área fundida durante a análise de macrografia. Tais representações são observadas na Tabela 12 e Figura 58.

				30144	igeiii.				
VS [cm/ min]	LS [mm]	\overline{x}	D.V.	AF [mm²]	\overline{x}	D.V.	P [mm]	\overline{x}	D.V.
30		2,91	0,02		5,13	0,09		3,07	0,05
60		1,96	0,08		3,35	0,04		3,03	0,09
90		1,72	0,03		2,48	0,07		2,56	0,04
120		1,48	0,07		1,65	0,10		2,40	0,01
150		1,21	0,12		1,47	0,04		2,31	0,05
200		1,03	0,04		1,10	0,04		1,81	0,15

Tabela 12: Médias e desvios padrão dos resultados obtidos com a velocidade de soldagem

onde: VS: velocidade de soldagem; LS: largura da superfície; \bar{x} : média; D.V.: desvio padrão; AF: área fundida; P: penetração.

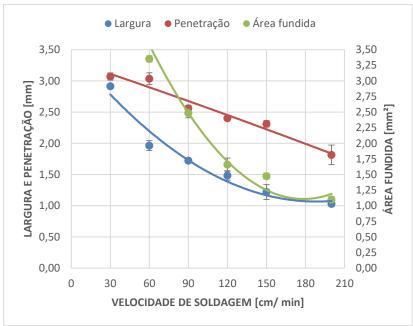


Figura 58: Gráfico com o comportamento da geometria do cordão para diferentes velocidades de soldagem.

Observa-se no gráfico da Figura 58, que a geometria do cordão de solda varia com a mudança na velocidade de soldagem. Em velocidades de soldagem menores o tempo de interação do LASER com a matéria é maior, o que gera uma densidade de energia maior, ocasionando uma área fundida, largura de cordão e profundidade de penetração maiores do que em velocidades superiores. Entretanto, a alta densidade de energia, causa a vaporização excessiva do material de base, ocorrendo a absorção do feixe LASER pelo plasma, acima da peça de trabalho, reduzindo a eficiência. A penetração diminui com o aumento da velocidade de soldagem de forma linear, o que corrobora com a literatura. Embora isso ocorra, altas velocidades de soldagem em processos LASER, é uma vantagem que se destaca em relação a processos a arco. Nota-se, que em velocidades a partir de 90 cm/min, a área fundida é menor do que a penetração. Isso ocorre, devido a energia absorvida. Quando a absorção inicial do feixe ocorre dentro do *keyhole*, há um aumento na eficiência do processo.

As geometrias dos cordões estão apresentados na Figura 59, onde observa-se o comportamento descrito no texto acima em relação absorção do feixe pelo material e a área fundida. Para todas as velocidades de soldagem, a razão de aspecto se manteve maior que 1.

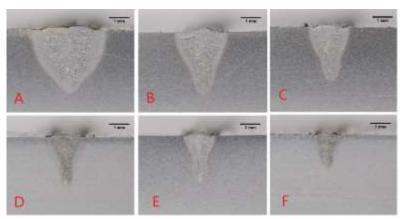


Figura 59: Geometria do cordão para diferentes velocidades de soldagem. Parâmetros: Potência = 2,6 kW; Posição focal = 111 (-1); Vazão de gás = 20 l/min. (a) 30cm/min; (b) 60 cm/min; (c) 90 cm/min; (d) 120 cm/min; (e) 150 cm/min e (f) 200 cm/min.

O aspecto superficial dos cordões (Figura 60) apresentaram uma qualidade aceitável para todos os ensaios, ou seja, o processo se manteve estável durante o processamento.

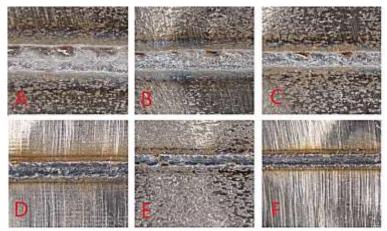


Figura 60: Aspecto superficial. Parâmetros: Potência = 2,6 kW; Posição focal = 111 (-1) mm; Vazão de gás = 20 l/min. Variação da velocidade de soldagem, em (a) 30cm/ min; (b) 60 cm/min; (c) 90 cm/min; (d) 120 cm/min; (e) 150 cm/min e (f) 200 cm/min.

Em relação aos defeitos, observou-se ocorrência de respingos mais acentuados nos experimentos com velocidades de 30 cm/min. Além disso, para velocidades baixas, foram detectadas descontinuidades como poros (Figura 61). Esse defeito pode ocorrer a partir da vaporização excessiva do metal de base gerada devido à alta densidade de energia, o que faz com que os gases gerados no interior da poça, não consigam migrar para fora dela aprisionando-os.

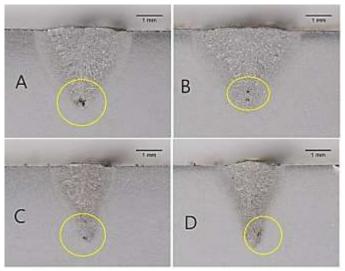


Figura 61: Porosidade no cordão devido ao aprisionamento dos gases pós solidificação. Potência do LASER = 2600W; Posição focal = 111 (-1) mm; Vazão de gás = 20 l/min; Em (a) e (b) Velocidade de soldagem: 30 cm/min. Em (c) e (d) velocidade de soldagem igual a 60 cm/min.

A caracterização do processo para velocidade de soldagem permitiu identificar uma faixa de operação útil para aplicação do LASER de ${\it CO}_2$ para aplicação em soldagem.

5.1.3 Vazão de gás

5.1.3.1 Aço carbono

Para vazão de gás, foram realizados três ensaios iguais nas mesmas condições para cada valor de vazão de gás. Os parâmetros fixos foram: potência de 2600 W, posição focal igual 111 (-1), velocidade de soldagem de 120 cm /min para todos os ensaios. De modo a simplificar a interpretação dos resultados obtidos foi criada uma tabela com valores médios e seus respectivos desvios padrão e gerado um gráfico a partir das aquisições dos valores de largura, penetração e área fundida obtidos na análise de macrografia. Tais representações são observadas na Tabela 13 e Figura 62.

Tabela 13: Médias e desvios padrão dos resultados obtidos caracterizando o comportamento da geometria do cordão em relação a variação do gás de proteção.

Q [l/ min]	LS [mm]	\overline{x}	D.V.	AF [mm²]	\overline{x}	D.V.	P [mm]	\overline{x}	D.V.
8		0,97	0,03	8	0,13	0,02	8	0,19	0,00
12		1,11	0,08	12	1,37	0,01	12	2,05	0,17
16		1,48	0,08	16	1,59	0,01	16	2,32	0,14
20		1,48	0,07	20	1,60	0,08	20	2,50	0,03
24		1,29	0,05	24	1,76	0,02	24	2,56	0,14

onde: Q: vazão de gás; LS: largura da superfície; \bar{x} : média; D.V.: desvio padrão; AF: área fundida; P: penetração.

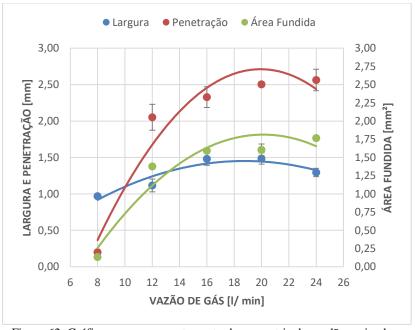


Figura 62: Gráfico com o comportamento da geometria do cordão variando a vazão de gás.

O gás de proteção tem papel importante na remoção do plasma formado pela fusão do material. Entretanto, para vazões de gás menores, o plasma absorve o feixe LASER impedindo que o mesmo incida no alvo. O gráfico da Figura 62, gerado a partir da avaliação das macrografias,

obteve um comportamento que comprova esse fenômeno. O gás argônio promoveu uma proteção adequada da poça de fusão, tanto em termos de proteção atmosférica da poça, assim como supressão plasmática.

Observa-se que o parâmetro de profundidade de penetração tem uma sensibilidade maior, com o aumento da vazão de gás, do que a largura e a área fundida, uma vez que, o argônio atinge vazão suficiente para remover o plasma sob o feixe LASER, gerando uma maior penetração. Porém, a diferença de penetração entre as vazões de gás de 24 a 16 l/min são de 0,24 mm. O que resulta em um valor pequeno, que não altera significativamente a geometria do cordão, sendo uma vazão economicamente menos viável. Já a largura não sofre grandes variações.

Em relação a geometria do cordão, o cordão foi ficando mais largo a medida que se aumentava a vazão de gás, conforme gráfico acima e a Figura 63. Entretanto, para baixa vazão de gás, pode ocorrer porosidade como pode ser visto na Figura 64(b), uma vez que, a vazão de gás não é suficiente para proteger a poça contra gases atmosféricos.

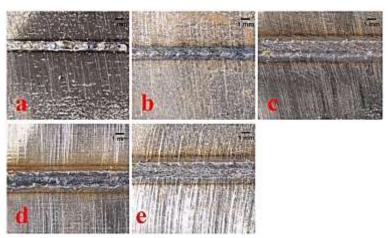


Figura 63: Resultados obtidos com a variação da vazão de gás. Potência do LA-SER = 2600W; Posição focal = 111 (-1) mm; Velocidade de soldagem = 120 cm/min. Em (a) 8 l/min; (b) 12 l/min; (c) 16 l/min; (d) 20 l/min; (e) 24l/min.

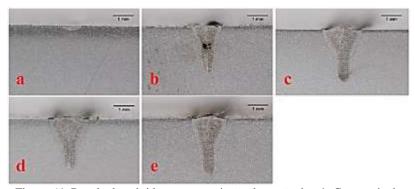


Figura 64: Resultados obtidos com a variação da vazão de gás Geometria do cordão. Potência do LASER = 2600 W; Posição focal = 111 (-1) mm; Velocidade de soldagem = 120 cm/min. Em (a) 8 l/min; (b) 12 l/min; (c) 16 l/min; (d) 20 l/min; (e) 24l/min.

5.1.4 Potência

O ensaio para caracterização da potência do LASER, fez-se necessário para determinar os limites geométricos extremos do cordão de solda em relação a potência inserida pelo LASER. Os experimentos foram realizados com o aço carbono e com o aço inoxidável e serão descritos abaixo.

5.1.4.1 Aço carbono

Os resultados obtidos pelo processamento LASER em aço carbono estão representados na Tabela 14 e Figura 65. De modo a simplificar a interpretação dos resultados obtidos foi criada uma tabela com valores médios e seus respectivos desvios padrão e gerado um gráfico a partir das aquisições dos valores de largura, penetração e área fundida durante a análise de macrografia.

Tabela 14: Médias e desvios padrão dos resultados obtidos caracterizando o comportamento da geometria do cordão em relação a variação da potência do LASER. Aco carbono SAE1020.

POT [%]	LS [mm]	\overline{x}	D.V.	AF [mm²]	\overline{x}	D.V.	P [mm]	\overline{x}	D.V.
20		0,00	0,00		0,00	0,00		0,00	0,00
40		0,46	0,05		0,10	0,02		0,36	0,06
60		1,12	0,09		0,77	0,04		1,37	0,06
80		1,26	0,02		1,37	0,00		2,10	0,02
100		1,47	0,03		1,75	0,02		2,56	0,13

onde: POT: potência do LASER em %; LS: largura da superfície; \bar{x} : média; D.V.: desvio padrão; AF: área fundida; P: penetração.

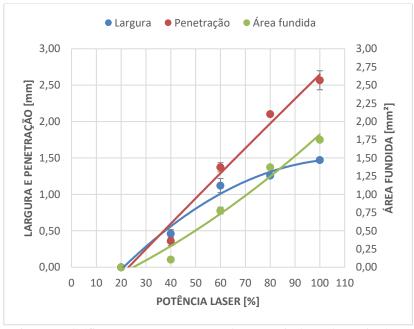


Figura 65: Gráfico com o comportamento da geometria do cordão variando a potência. Aço carbono.

O gráfico da Figura 65, gerado a partir da avaliação das macrografias, nota-se uma relativa linearidade entre potência e penetração para as mesmas condições de ensaio. Valores de 20%, não se obteve penetração para nenhum dos três ensaios. A partir de 60%, houve formação do *keyhole*, sem porosidade, sem respingos e nem perda de material. Houveram penetrações a partir de 40% de potência. Potência essa, suficiente para vaporizar o material. Penetração igual a 0,37 mm para 40% (Figura 66(b)), e de 2,56 mm para 100% de potência (Figura 66(e)).

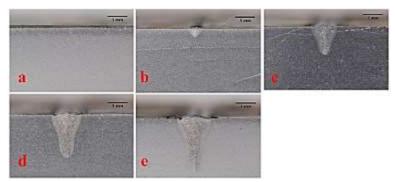


Figura 66: Resultados obtidos com a variação da potência. Aço carbono SAE 1020. Posição focal = 111 (-1) mm; Vazão de gás = 20 l/min; Velocidade de soldagem = 120 cm/min. Em (a) 20%; (b) 40% (c) 60%; (d) 80%; (e) 100%.

5.1.4.2 Aço inoxidável

Para o mapeamento do procedimento de soldagem para aço inoxidável se obteve os resultados que estão representados a seguir. De modo a simplificar a interpretação dos resultados obtidos foi criada uma segunda tabela com valores médios e seus respectivos desvios padrão e gerado um gráfico a partir das aquisições dos valores de largura, penetração e área fundida durante a análise de macrografia. Tais representações estão mostradas na Tabela 15 e Figura 67 respectivamente.

Tabela 15: Médias e desvios padrão dos resultados obtidos caracterizando o comportamento da geometria do cordão em relação a variação da potência do LASER. Aco Inoxidável 304L.

POT [%]	LS [mm]	\overline{x}	D.V.	AF [mm ²]	\overline{x}	D.V.	P [mm]	\overline{x}	D.V.
20		0,00	0,00		0,00	0,00		0,00	0,00
40		0,86	0,03		0,54	0,05		1,08	0,05
60		1,23	0,05		1,10	0,09		1,87	0,08
80		1,39	0,01		1,70	0,11		2,70	0,09
100		1,47	0,01		2,07	0,00		3,07	0,06

onde: POT: potência do LASER em %; LS: largura da superfície; \bar{x} : média; D.V.: desvio padrão; AF: área fundida; P: penetração.

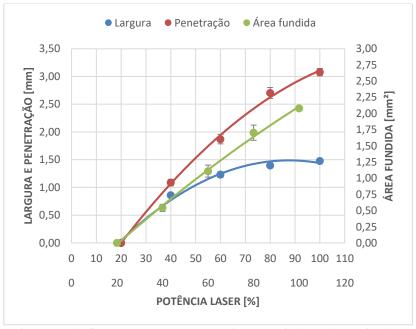


Figura 67: Gráfico com o comportamento da geometria do cordão variando a potência. Aço inoxidável 304L.

De acordo com o gráfico da Figura 67, observa-se o comportamento dos parâmetros de saída quando se varia a potência. Ocorre um acréscimo praticamente linear com o aumento da potência, o que também ocorre com a área fundida. Em valores de 20% de potência, não se obteve penetração, apenas um aquecimento da superfície. Já em potências de

100%, se obteve profundidade de penetração médias de 3,07 mm. Assim como ensaios anteriores de aço carbono x aço inoxidável, se obteve uma maior penetração para o aço inoxidável, uma vez que, se utilizou chapas de espessura menor para o aço mais nobre. A Figura 68 mostra a geometria do cordão para cada faixa de potência.

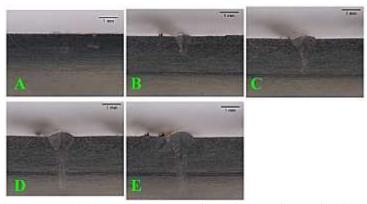


Figura 68: Resultados obtidos com a variação da potência. Aço inoxidável 304L. Posição focal = 111 (-1) mm; Vazão de gás = 20 l/min; Velocidade de soldagem = 120 cm/min. Em (a) 20%; (b) 40% (c) 60%; (d) 80%; (e) 100%.

Observa-se que a largura do cordão na superfície vai diminuindo e a profundidade de penetração vai aumentando caracterizando um modo de soldagem *keyhole*.

5.1.5 Filmagem termográfica

O equipamento LASER apresenta um *delay* entre o deslocamento da mesa CNC a o disparo do feixe. O efeito térmico deste fato, pode ser observado durante as filmagens térmicas. Os gráficos resultantes através da média dos valores obtidos a partir das filmagens térmicas, apresentaram três trechos. No início do cordão, nota-se uma maior temperatura devido a esse *delay* do deslocamento, o que resulta em uma maior densidade de energia. Durante a soldagem, a temperatura tende a diminuir e se estabilizar em uma faixa de operação. Ao término do processo, ocorre novamente o *delay*, só que dessa vez no tempo ao cessar o disparo. Esses trechos foram denominados trecho 1, 2 e 3 respectivamente, e podem ser vistos na Figura 69.

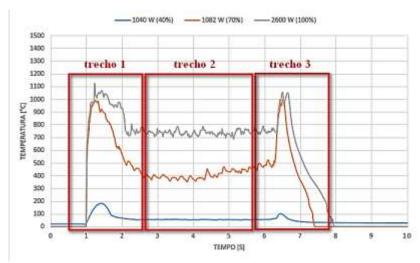


Figura 69: Representação dos trechos envolvidos durante a soldagem.

Os resultados da filmagem térmica, foram obtidos realizando ensaios em faixas de medição diferentes para melhor analisar os resultados. Para chapas de 2 e 3 mm de espessura a faixa de medição da câmera utilizada foi entre a temperatura de 300 a 1500 °C. Já para medição da chapa de 6,35 mm de espessura, foi necessário reduzir a faixa de medição da câmera térmica para 0 a 300 °C, para que fosse possível analisar melhor os resultados. Esses resultados foram exportados para uma planilha *excel* e foi gerado um gráfico de linhas.

5.1.5.1 Análise em termos da espessura do material

A temperatura máxima obtida através das imagens retiradas a partir filmagem térmica realizada durante a soldagem em chapas de 3 e 6,35 mm de espessura, podem ser observadas, na Figura 70. A Figura 71, mostra de forma amplificada, o comportamento da temperatura para o ensaio em chapa de 6,35 mm.

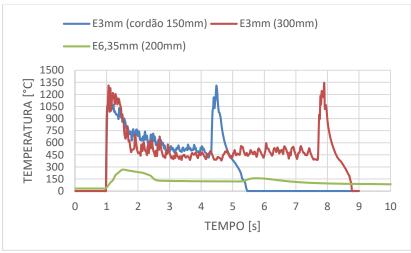


Figura 70: Gráfico temperatura versus tempo. Parâmetros: Potência do LASER = 2600W; Posição focal = 111 (-1) mm; Velocidade de soldagem = 120 cm/min; Vazão de gás = 20 l/ min.

No ensaio E3 (cordão 150 mm) representado no gráfico da Figura 70, nota-se um cordão de comprimento pequeno, o que impossibilitou identificar a faixa de operação onde a temperatura se estabiliza. Portanto, foi necessário realizar um cordão de maior comprimento (300 mm) e, assim, identificar a faixa de temperatura a qual se mantém estável durante a soldagem para espessura de 3 mm. O mesmo foi realizado para o ensaio com chapa de 6,35 mm de espessura. Na Figura 71, está mostrado de forma mais ampla, o comportamento da temperatura para espessura de 6,35 mm, mostrado anteriormente na Figura 70.

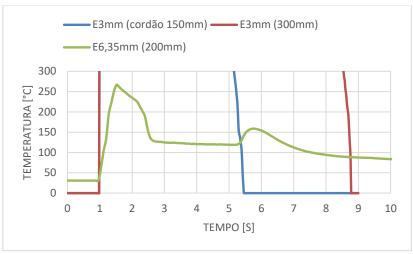


Figura 71: Gráfico temperatura versus tempo. Detalhe para o gráfico obtido para chapa de 6.35 mm. Parâmetros: Potência do LASER = 2600W; Posição focal = 111 (-1) mm; Velocidade de soldagem = 120 cm/min; Vazão de gás = 20 l/ min.

Os valores máximos de temperatura em cada trecho do cordão estão descritos na Tabela 16.

Tabela 16: Temperaturas máximas para cada trecho para chapas de 3 e 6.35 mm.

TEMPERATURA MÁXIMA	E3MM (CORDÃO 150 MM)	E3MM (CORDÃO 300 MM)	E3MM (CORDÃO 200 MM)
TRECHO1	1209,80 °C	1308,28 °C	266,36 °C
TRECHO2	742,06 °C	674,69 °C	136,65 °C
TRECHO3	1307,00 °C	1341,25 °C	158,75 °C

Nota-se que a temperatura média durante o processo varia de acordo com a espessura do material, para chapa de 3 mm a temperatura manteve-se próximo a 670 °C, enquanto que para espessura maior, a temperatura ficou em torno de 130 °C. Isso pode ser justificado, pelo fato do LASER de CO_2 atingir uma penetração máxima conforme os parâmetros utilizados nos ensaios foram de aproximadamente de 2,5 mm, limitação do tamanho do *keyhole*. Outro fator que pode ser considerado para essa diferença de temperatura, é a transferência de calor, onde para espessuras maiores, há uma maior dissipação de calor do que em espessuras menores.

Observa-se que no trecho 3, onde representa o término do processo, a taxa de resfriamento é mais lenta para espessura de 6,35 mm do que para chapa de 3 mm.

5.1.5.2 Análise em termos da potência

A filmagem térmica em chapas de 2 mm de espessura com o intuito de verificar o comportamento da temperatura em relação a potência obteve os resultados que estão representados no gráfico da Figura 72.

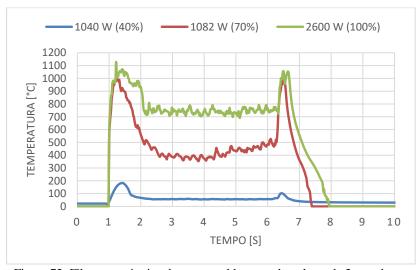


Figura 72: Filmagem térmica durante a soldagem sobre chapa de 2 mm de espessura em potências de 40, 70 e 100% da capacidade máxima. Parâmetros: Posição focal = 111 (-1) mm; Velocidade de soldagem = 120 cm/min; Vazão de gás = 20 l/ min.

Nota-se que a variação da potência tem influência no comportamento da temperatura. Pode-se afirmar que dependendo da energia entregue a peça, pode haver a formação do *keyhole* ou não. Para potência de 40%, observa-se um aquecimento superficial na chapa, chegando a temperaturas próximas a 70 °C, enquanto que para potências maiores, ocorre a formação do *keyhole*, podendo chegar a valores médios de aproximadamente 750 °C em 100 % de potência. Valores máximos retirados do gráfico da Figura 72 podem ser observados na Tabela 17.

Tabela 17: Filmagem térmica variando a potência do LASER. Parâmetros: Posição focal = 111 (-1) mm; Velocidade de soldagem = 120 cm/min; Vazão de gás = 20 l/ min.

TEMPERATURA MÁXIMA	40%	70%	100%
TRECHO1	181,77 °C	995,67 °C	1128,77 °C
TRECHO2	67,24 °C	526,77 °C	791,94 °C
TRECHO3	99,58 °C	1001,57 °C	1057,19 °C

Além disso, podemos correlacionar a temperatura com a penetração. Foi retirado uma amostra do cordão de solda no trecho 2 para avaliação em termos da penetração (Figura 73). Como dito anteriormente o comportamento do cordão em temperaturas próximas a 70° C, ocorre um aquecimento superficial sem penetração aparente. Entretanto, para potências maiores, obteve-se temperaturas próximas a 450 °C para potências de 70%, resultando em uma penetração de 1,11 mm. Em potência de 100%, obteve-se uma temperatura média de 750 °C com penetração total.

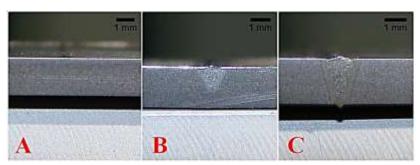


Figura 73: Macrografia. Potências em (A) 40%; (B) 70% e (C) 100%.

6 CONCLUSÕES

O trabalho estabeleceu as bases tecnológicas (implementação e caracterização de infraestrutura) e de conhecimento (mapeamento preliminar de influências de parâmetros) para uma nova linha de pesquisa do LABSOLDA, com a instalação de um sistema integrado LASER para processos de soldagem. Percebe-se ampliação das possibilidades de projetos e fortalecimento da formação de alunos e possibilidades de parcerias internas e externas. Em termos aplicativos, resulta em uma linha alternativa adicional para soldagem de elevada velocidade e de geometrias de pequeno porte.

Em uma avaliação acerca dos resultados obtidos, é possível concluir que foi possível a operacionalização do LASER CO_2 TLF 2600 Turbo, da Trumpf, incluindo soluções para o reprojeto do sistema de refrigeração, projeto de dispositivos mecânicos para o sistema de transmissão do feixe e integração eletromecânica com o CNC.

Em termos do processo, a caracterização prévia das influências dos parâmetros, permitiu um mapeamento de referência, que vem a preencher lacunas da literatura (que trata praticamente exclusivamente de potências mais altas em soldagem LASER de CO_2), considerando também as condições locais de aplicação (características específicas do sistema reprojetado). Acerca da morfologia do cordão de solda, em termos da variação dos principais parâmetros do processo LBW (distância focal, velocidade de soldagem, vazão de gás e potência), observou-se que em todos os casos, a profundidade de penetração foi o parâmetro morfológico mais sensível, tendo variações significantes no cordão de solda. Esse comportamento está diretamente relacionado na interação do feixe LASER com a matéria.

Para posições focais próximas ao *spot size*, tem-se uma maior concentração de energia, gerando uma maior penetração.

Sobre a velocidade de soldagem, observou-se que quanto maior foi a velocidade de soldagem, menor vai ser a penetração, entretanto, a eficiência do processo tornou-se viável para valores acima de 90 cm/min, quando há a formação do *keyhole*, com uma razão de aspecto maior que 1.

Sobre os gases de proteção, os resultados obtidos corroboraram com a literatura, onde diz que com o aumento da vazão de gás, há um aumento na profundidade de penetração. Isso ocorre, pelo fato de que o gás de proteção ajuda na supressão plasmática, ou seja, o gás de proteção

ajuda na remoção do plasma formado acima da peça de trabalho, ocorrendo a incidência do feixe diretamente na peça.

Sobre a potência, observou-se um acréscimo quase que linearmente da penetração com o aumento da potência.

Em todos os experimentos, não houve presença de trincas e porosidade, o processo LBW foi considerado estável e não houve perda de material. Exceto para o ensaio de vazão de gás, onde ocorreu porosidade, que pode ser explicado pela insuficiência de gás de proteção na poça fundida.

A correlação da penetração em termos da temperatura obtida através da videotermografia podem ser vistas como uma possível aplicação futura em sistemas de monitoração, inspeção e controle do processo.

6.1 Sugestões para trabalhos futuros

Com a base de experiência adquira durante a realização do trabalho, alguns pontos são válidos citar para engrandecer e contribuir para o avanço das pesquisas em soldagem a LASER de \mathcal{CO}_2 .

Embora estudos mais aprofundados sobre o comportamento da interação LASER ${\it CO}_2/$ matéria em materiais metálicos devem ser buscados para cada vez mais aperfeiçoar as técnicas e o desenvolvimento da tecnologia.

Portanto, seguem algumas recomendações:

- O emprego do processo em chapas de pequena espessura foi de grande valia para caracterizar o sistema. Entretanto, nota-se a possibilidade de ensaios em chapas espessas, uma vez que, os resultados mostram características e possibilidades que podem ser proveitosas. Por exemplo, menor deformação nas chapas, menor ataque metalúrgico (ZTA estreita), e maior produtividade. Embora diversos ramos da indústria possam se beneficiar com estes desenvolvimentos, tem-se como alvo inicial a construção naval, que tipicamente emprega chapas de várias espessuras e diferentes ligas.
- Para garantir a qualidade e repetitividade do processo, se sugere o desenvolvimento de tecnologias para medir, controlar em tempo real a distância focal e manter constante durante todo o processo;

- Verificar o comportamento e realizar um mapeamento de parametrização em materiais mais nobres, como outras classes de aços inoxidáveis, alumínio;
- Sugere-se adicionalmente, o desenvolvimento de sistemas periféricos, que fortaleçam cada vez mais a capacidade da infraestrutura LASER de CO₂ para abrigar P&D em soldagem e corte LA-SER na UFSC.
- Sugere-se um desenvolvimento de uma IHM única para o controle dos movimentos da mesa CNC como o controle dos parâmetros do LASER.
- Para um controle mais preciso do alinhamento da junta, sugerese a instalação de um LASER pointer no sistema LASER;
- Sugere-se o desenvolvimento de uma infraestrutura capaz de realizar mais de um processo com a tecnologia LASER, com um LASER Scanner:
- Desenvolvimento de uma infraestrutura onde o transporte do feixe seja móvel em relação a peça de trabalho, como um robô antropomórfico;
- Sugere-se o desenvolvimento da técnica e tecnologia auxiliar para operações de corte;

7 REFERÊNCIAS

- [1] MAIMAN, T. H. **Optical And Microwave optical experiments in ruby**. Physical Review Letters, Malibu, v. 4, n. 11, p. 564-566, 1960.
- [2] PATEL, C.; KUMAR, N. Continuous Wave Laser Action on Vibrational Rotational Transistions of CO2. Physical Review, v. 136, n. 5A, 1964.
- [3] GUTJAHR, J. **Desenvolvimento e implementação de um** sistema CNC, modular e reconfigurável, para processos LASER. Dissertação (Mestrado em Engenharia) Universidade Federal de Santa Catarina. Florianópolis, p. 196. 2016.
- [4] AKHTAR, S. Laser in Manufacturing, 2012. p. 306.
- [5] FENDRICH, M. A. Desenvolvimento do Processo de Recuperação em Canhões LASER CO2 de Vidro Selado. Monografia Universidade Federal de Santa Catarina. Florianópolis, p. 63. 2007.
- [6] SILVEIRA, G. V. Efeito da Alteração dos Parâmetros do Processo LASER sobre a Geometria do Cordão de Solda. Monografia - Univerisdade Federal do Rio Grande do Sul. Porto Alegre, p. 56. 2012.
- [7] ASIBU JR., E. K. **Principles of LASER Materials Processing**, p. 803, 2009.
- [8] O. Svelto, **Principles of LASERs**, 2 ed., D. C. Hanna, Ed., New York: Plenum Press, 1982.
- [9] HECHT, J. **The LASER Guidebook**. 2. ed. McGraw Hill, 1992.
- [10] SCHAEFFER, R. Introduction to LASER Meterials Processing, Pelham, p. 86, 2007.
- [11] ION, J. C.; , C.; , F. LASER Processing Of Engineering Materials.:, 2005.
- [12] MODENESI, P. J.; MARQUES, P. V. **Soldagem I** Introdução aos Processos de Soldagem, Belo Horizonte, p. 51, 2006.
- [13] POPRAWE, R. **Tailored Light 2**. 1. ed. Aachen: Springer, 2011. 604 p.

- [14] SVENUNGSSON, J.; CHOQUET, I.; KAPLAN, A. LASER Welding Process a Review of Keyhole Welding Modelling. **Physics Procedia**, v. 78, p. 182-191, 2015.
- [15] MIYACHI, A. LASER Welding Modes: Conduction, Transition & Keyhole Welding. Amada Miyachi America, 2016. Disponivel em: http://info.amadamiyachi.com/blog/conduction-transition-and-keyhole-welding-modes. Acesso em: Junho 2017.
- [16] VOLPP, J.; VOLLERTSEN, F. Modeling Keyhole Oscilations During LASER Deep Penetration Welding at Different Spatial LASER Intensity Distributions. Production Engineering, v. 9, n. 2, p. 167-178, 2015.
- [17] STEEN, W. M.; MAZUMDER, J. LASER Material Processing. 4. ed. London: Springer, 2010. 576 p. Disponivel em: http://link.springer.com/10.1007/978-1-84996-062-5
- [18] BEHLER, K.; E, B.; R, S. **High Power CO2 Laser Systems and Applications**, p. 165. 1988.
- [19] INJEYAH, H.; GOODNO, G. D. **High Power LASER Handbook**. New York. 2011.
- [20] Comparação entre os diferentes tipos de LASER.

 Trotec: LASER. Disponivel em:
 https://www.troteclaser.com/pt/tutoriais-exemplos/perguntas-frequentes/tipos-de-laser/. Acesso em: Maio 2017.
- [21] WINTNER, E. **Semiconductor LASERs**. New York: v. 1, 1998.
- [22] HECTH J. "Fiber LASERs: **The state of the art**," LASER Focus World Magazine, 2012. [Online]. Disponível em: https://www.laserfocusworld.com/articles/print/volume-48/issue-04/features/the-state-of-the-art.html. [Acesso em 09 Novembro 2018].
- [23] LARCOMBE, D. **Fiber Versus CO2 LASER Cutting**. Industrial LASER Solutions, 2013.

- [24] **Comprimento de Rayleigh**, 2 julho 2018. Disponivel em: https://pt.wikipedia.org/wiki/Comprimento_de_Rayleigh >.
- [25] SIEGAM, A. E. LASERs. University Science Books, 1986. 664–669 p.
- [26] DAMASK, J. N. **Polarization Optics in Telecommunications**. Springer, 2004. 221–223 p.
- [27] AMERICAN NATIONAL STANDARDS INSTITUTE **ANSI Z136.1**. Protective Equipment. USA. 2009.
- [28] "AMERICAN NATIONAL STANDARDS INSTITUTE **ANSI Z136.7**," USA, 2009.
- [29] "AMERICAN NATIONAL STANDARDS INSTITUTE **ANSI Z136.8**," USA, 2009.
- [30] SILVA, F. C. Desenvolvimento de algorítmos para geração de trajetórias de revestimento por soldagem automatizada aplicados em caldeiras de usinas termoelétricas. Dissertação (Mestrado em Engenharia) Universidade Federal de Santa Catarina. Florianópolis, p. 108. 2012.
- [31] "ARTSOFT USA," **Mach3 CNC** Control Software Installation and Configuration, 2010.
- [32] USINOR. Welded Blanks Characterization and implementation. USINOR Auto Groupe Usinor. France. 2000.
- [33] LASERTECHNIK, T. Operating Instructions TLF 2600 Turbo. 1993.
- [34] GMBH, K. Modular LASER Focusing Head Lk300w Instruction Manual. 2013
- [35] CARVALHO, R. S. Robô cnc para a automação da soldagem mig/mag em posições e situações de extrema dificuldade. Dissertação (Mestrado em Engenharia) Universidade Federal de Santa Catarina. Florianópolis, p. 136, 2009.
- [36] FLIR. **FLIR SC 7000 series**. Disponivel em: http://www.flir.co.uk/cs/display/?id=42576>. Acesso em: julho 2018.
- [37] TRUMPF. Schaltplan Diagrama elétrico. p. 66. 1994.