

**UNIVERSIDADE DE CAXIAS DO SUL**  
**ÁREA DO CONHECIMENTO DE CIÊNCIAS EXATAS E ENGENHARIAS**

**FELIPE PANASSOL VANIN**

**DESENVOLVIMENTO E ANÁLISE DE SOLDAGEM ROBOTIZADA HÍBRIDA**  
**LASER-ARCO ELÉTRICO EM RESERVATÓRIOS DE AR**

**CAXIAS DO SUL**

**2023**

**FELIPE PANASSOL VANIN**

**DESENVOLVIMENTO E ANÁLISE DE SOLDAGEM ROBOTIZADA HÍBRIDA  
LASER-ARCO ELÉTRICO EM RESERVATÓRIOS DE AR**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao curso de Engenharia Mecânica da Universidade de Caxias do Sul, como requisito parcial à obtenção do grau de Bacharel em Engenharia Mecânica.

Orientador Prof. Dr. Eng. Alexandre Vieceli

**CAXIAS DO SUL**

**2023**

**FELIPE PANASSOL VANIN**

**ANÁLISE DE SOLDAGEM ROBOTIZADA HÍBRIDA LASER-ARCO ELÉTRICO  
EM RESERVATÓRIOS DE AR**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao curso de Engenharia Mecânica da Universidade de Caxias do Sul, como requisito parcial à obtenção do grau de Bacharel em Engenharia Mecânica.

Orientador Prof. Dr. Eng. Alexandre Vieceli

**Aprovado em 30 de novembro de 2023**

**Banca Examinadora**

---

Prof. Dr. Alexandre Vieceli  
Universidade de Caxias do Sul

---

Prof. Me. Victor Hugo Velasquez Acosta  
Universidade de Caxias do Sul

---

Me. Mairon Figueiredo Marques



## RESUMO

O presente trabalho buscou analisar a viabilidade do processo de soldagem híbrida *laser*-arco elétrico em reservatório de ar, em substituição do atual processo GMAW. Os testes foram realizados em uma célula robotizada desenvolvida no Brasil para a exploração da soldagem híbrida, com as reais dificuldades dos processos de fabricação das indústrias. Foram realizados testes em corpos de prova de mesmo material e espessura do reservatório, utilizando três processos distintos, GMAW, *laser* e HLAW, com o objetivo de comparar a resistência mecânica das soldas, como também buscar parâmetros de soldagem mais próximo do objetivo. O processo *laser* demonstrou alta sensibilidade a variações na junta, já o processo HLAW demonstrou menor sensibilidade. O ensaio de resistência a tração mostrou resultados semelhantes entre os processos. A análise de macrografia evidenciou os diferentes perfis de soldas e mostrou bons resultados que atenderam aos requisitos do projeto. Os melhores parâmetros desenvolvidos nos corpos de provas foram adequados aos reservatórios. Foram realizadas as soldas da calota externa, interna e a longitudinal, contudo as conexões do reservatório não foram soldadas por dificuldades técnicas. Reservatórios foram submetidos a testes de estanqueidade e destrutivo, o qual obtiveram sucesso. Conclui-se que é possível realizar a substituição do processo de soldagem GMAW pelo processo HLAW em reservatórios de ar.

Palavras-chave: soldagem; híbrido; *laser*-GMAW; arco elétrico; HLAW; reservatório.

## ABSTRACT

The present work seeks to analyze the viability of the hybrid laser-electric arc welding process in air reservoir, replacing the current GMAW electric arc welding process. The tests will be carried out in a robotic cell developed in Brazil for the exploration of hybrid welding, with the real difficulties of the industries' manufacturing processes. Tests were carried out on specimens of the same material and tank thickness, using three different processes, GMAW, laser and HLAW, with the aim of comparing the mechanical strength of the welds, as well as looking for welding parameters that were closest to the goal. The laser process showed high sensitivity to variations in the joint, while the HLAW process showed lower sensitivity. The tensile strength test showed similar results between the processes. Macrography analysis showed the different weld profiles and good results that met the project requirements. The best parameters developed in the test specimens were suitable for the reservoirs. The outer shell, inner shell and longitudinal welds were made, but the reservoir connections were not welded due to technical difficulties. The tanks were subjected to watertightness and destructive tests, which were successful. The conclusion is that it is possible to replace the GMAW welding process with the HLAW process on air tanks.

Keywords: welding; hybrid; laser-GMAW; electric arc; HLAW; reservoir.

## LISTA DE FIGURAS

|  |    |
|--|----|
| Figura 1 – Forma de onda da corrente no processo GMAW-P .....  | 15 |
| Figura 2 – Feixe <i>laser</i> e luz normal .....   | 16 |
| Figura 3 – Interação do feixe <i>laser</i> com a poça de fusão .....   | 17 |
| Figura 4 – Esquema do processo de soldagem HLAW .....  | 20 |
| Figura 5 – Comparação de fluxo metal fundido em aço carbono nos métodos <i>leading arc</i> e <i>trailing arc</i> ..... | 22 |
| Figura 6 – Alteração no sentido de alimentação de arame nos processos de soldagem (a) GMAW e (b) HLAW .....            | 22 |
| Figura 7 – Célula Robotizada de Soldagem HLAW Powermig .....   | 27 |
| Figura 8 – Reservatório de ar para sistemas de freios de caminhões .....   | 27 |
| Figura 9 – Fluxograma para desenvolvimento dos testes .....  | 28 |
| Figura 10 – Corpo de Prova 2.2 .....   | 30 |
| Figura 11 – Corpo de Prova 2.4 .....   | 31 |
| Figura 12 – Corpo de Prova 2.7 .....   | 32 |
| Figura 13 – Corpo de Prova 2.10 .....  | 33 |
| Figura 14 – Corpo de Prova 1.13 .....  | 35 |
| Figura 15 – Corpo de Prova 3.6 .....   | 37 |
| Figura 16 – Corpo de Prova 3.6 - Desalinhamento .....  | 38 |
| Figura 17 – Corpo de Prova 3.7 .....   | 38 |
| Figura 18 – Representação dos Corpos de Prova .....  | 39 |
| Figura 19 – Macrografia solda HLAW, GMAW e LBW .....   | 41 |
| Figura 20 – Macrografia solda HLAW – <i>gap</i> 0,5 mm .....   | 42 |
| Figura 21 – Macrografia solda LBW – <i>gap</i> 0,5 mm .....  | 43 |
| Figura 22 – Gráfico Comparativo da Resistência a Tração .....  | 44 |
| Figura 23 – Simulação de acesso das conexões .....   | 46 |
| Figura 24 – Variação de <i>gap</i> .....   | 46 |
| Figura 25 – Solda Longitudinal .....   | 47 |
| Figura 26 – Solda Circunferencial Interna .....  | 48 |
| Figura 27 – Defeitos Solda Circunferencial Interna .....   | 48 |
| Figura 28 – Solda Circunferencial Externa .....  | 49 |
| Figura 29 – Influência do <i>gap</i> .....   | 50 |
| Figura 30 – Solda Longitudinal Externa Final .....   | 51 |

**LISTA DE TABELAS**

|  |    |
|--|----|
| Tabela 1 – Parâmetros Solda Híbrida .....                          | 30 |
| Tabela 2 – Parâmetros Solda GMAW .....                             | 34 |
| Tabela 3 – Parâmetros Solda <i>laser</i> .....                     | 35 |
| Tabela 4 – Comparativo de Resultados de Resistência a Tração ..... | 44 |

**LISTA DE SIGLAS**

|              |  |
|--------------|--|
| TIG          | <i>Tungsten Inert Gas</i>  |
| MIG          | <i>Metal Inert Gas</i>   |
| MAG          | <i>Metal Active Gas</i>  |
| GMAW         | <i>Gas Metal Arc Welding</i>                                       |
| GTAW         | <i>Gas Tungsten Arc Welding</i>                                    |
| LBW          | <i>Laser Beam Welding</i>  |
| HLAW         | <i>Hybrid Laser-Arc Welding</i>                                    |
| GMAW-P       | <i>Pulsed Gas Metal Arc Welding</i>                                |
| <i>Laser</i> | <i>Light Amplification by the Stimulated Emission of Radiation</i> |
| ZTA          | <i>Zona Termicamente Afetada</i>                                   |
| FEM          | <i>Finite Element Method</i>                                       |
| FINEP        | <i>Financiadora de Estudos e Projetos</i>                          |
| LATS         | <i>Laser Arc Technological System</i>                              |
| DLA          | <i>Distância laser-arco</i>  |
| LAMEC        | <i>Laboratório de Ensaio Mecânicos</i>                             |

## SUMÁRIO

|          |   |           |
|----------|---|-----------|
| <b>1</b> | <b>INTRODUÇÃO.....</b>  | <b>11</b> |
| 1.1      | JUSTIFICATIVA .....   | 12        |
| 1.2      | OBJETIVOS .....   | 13        |
| 1.2.1    | <b>Objetivo geral.....</b>                                      | <b>13</b> |
| 1.2.2    | <b>Objetivos específicos.....</b>                               | <b>13</b> |
| <br>     |   |           |
| <b>2</b> | <b>REFERENCIAL TEÓRICO.....</b>                                 | <b>14</b> |
| 2.1      | GMAW ( <i>GAS METAL ARC WELDING</i> ) .....                     | 14        |
| 2.1.1    | <b>Vantagens e limitações do processo de soldagem GMAW.....</b> | <b>15</b> |
| 2.2      | LBW ( <i>LASER BEAM WELDING</i> ).....                          | 16        |
| 2.2.1    | <b>Uso do <i>laser</i> na soldagem.....</b>                     | <b>16</b> |
| 2.2.2    | <b>Vantagens e desvantagens do processo LBW.....</b>            | <b>18</b> |
| 2.3      | HLAW ( <i>HYBRID LASER-ARC WELDING</i> ) .....                  | 18        |
| 2.3.1    | <b>Vantagens e desvantagens do processo HLA W.....</b>          | <b>23</b> |
| 2.4      | O ESTADO DA ARTE DA SOLDAGEM HÍBRIDA LASER-ARCO ELÉTRICO        | 23        |
| <br>     |   |           |
| <b>3</b> | <b>MATERIAIS E MÉTODOS .....</b>                                | <b>26</b> |
| 3.1      | MATERIAIS.....  | 26        |
| 3.2      | MÉTODOS .....   | 28        |
| <br>     |   |           |
| <b>4</b> | <b>RESULTADOS .....</b>   | <b>41</b> |
| 4.1      | MACROGRAFIA .....   | 41        |
| 4.2      | ENSAIO DE TRAÇÃO .....  | 43        |
| 4.3      | RESERVATÓRIOS DE AR.....  | 45        |
| <br>     |   |           |
| <b>5</b> | <b>CONCLUSÃO.....</b>   | <b>52</b> |
| <br>     |   |           |
|          | <b>REFERÊNCIAS .....</b>  | <b>54</b> |

## 1 INTRODUÇÃO

A evolução dos processos na indústria tem ocorrido cada vez mais rápido, em virtude da evolução exponencial da tecnologia, como também do crescente aumento pela necessidade de se produzir com mais eficiência.

Dentre muitos avanços, a robótica tem-se mostrado protagonista, principalmente pelo expressivo padrão de qualidade e alta repetibilidade. Outro fato que tem impulsionado o seu crescimento é a falta de mão de obra qualificada, dificultando a contratação de novos colaboradores e a gestão dos já existentes, principalmente para processos insalubres, como a soldagem. Apesar de um alto valor agregado, os robôs de solda podem operar 24h por dia com a mesma eficiência e qualidade ao longo de muitos anos.

A soldagem robotizada pode utilizar vários processos de soldagem na extremidade do braço robótico, tais como, TIG (*Tungsten Inert Gas*), MIG (*Metal Inert Gas*), MAG (*Metal Active Gas*), entre outros. Ao utilizar a tocha de solda na extremidade do braço robótico obtém-se velocidades de solda maiores em relação a solda manual, já que o robô consegue realizar cordões de solda com maior estabilidade e repetibilidade. Assim, é possível ainda agregar mais valor adicionando eixos externos para movimentação automática do produto, elevando a eficiência do processo e ganho de produtividade em relação ao processo manual. Contudo, os processos de soldagem elencados acima possuem limitações de penetração e velocidade de solda que são inerentes ao processo.

Buscando o aumento da capacidade produtiva, surgiu a soldagem a *laser*, que nos últimos anos, começou a sair dos laboratórios para ingressar aos poucos nas indústrias, porém deparou-se com algumas dificuldades, dentre elas a falta de repetibilidade dos componentes a serem soldados, que antes, num ambiente controlado não se ocorria. Apesar do seu ganho considerável em velocidade de soldagem e penetração em comparação aos processos convencionais, a soldagem a *laser* necessita de uma mínima tolerância e repetibilidade geométrica da junta, tanto em sua abertura (*gap*), quanto em desalinhamento (*high-low*), caracterizando uma alta sensibilidade a erros de processo. Devido a esses fatores, aliados ao alto custo, fez com que difundir esse processo em indústrias comuns se tornasse um grande desafio e, por vezes, inviável.

Ao avaliar as vantagens e desvantagens de cada processo, surgiu a tecnologia denominada soldagem híbrida *laser-arco*, onde a soldagem por arco elétrico e soldagem *laser*

executam a solda na mesma poça de fusão simultaneamente, agregando a alta velocidade e penetração do processo laser, com a maior tolerância a variações geométricas do arco elétrico.

Dessa forma, o presente trabalho busca analisar a viabilidade de substituir a soldagem GMAW (*Gas Metal Arc Welding*) em reservatórios de ar pela soldagem híbrida, avaliando qual será o ganho produtivo e comparando a resistência mecânica das juntas soldadas. Também, serão verificadas como as possíveis imperfeições dos componentes e falta de repetibilidade da junta de solda influenciam no produto.

## 1.1 JUSTIFICATIVA

O crescimento da população global e conseqüentemente o aumento da demanda por insumos e produtos, faz com que, a indústria global necessite de processos mais eficientes, que aliem atributos como agilidade, qualidade, confiança e custos baixos.

Desenvolver tecnologias e aplicá-las em novos sistemas permite a constante evolução nas indústrias. Através de novos processos é possível obter um aumento produtivo, possibilitando a redução de mão de obra, insumos e em alguns casos aumento de qualidade. Porém, é necessário realizar estudos profundos para desenvolver processos que aliem todos esses tributos. Principalmente quando necessita-se aplicar um novo método desenvolvido em laboratório na indústria real, já que, ao fazer essa transição é preciso analisar além do novo processo os impactos nos produtos em que serão aplicados, como também as peculiaridades da indústria em questão.

Processos que utilizam tecnologias inovadoras conseguem atrair com maior facilidade os jovens para o mercado de trabalho, o que auxilia na crescente defasagem de mão de obra qualificada de processos operacionais, principalmente aqueles que envolvem insalubridade, como a soldagem.

Os detalhes descritos anteriormente também são aplicáveis a soldagem híbrida em reservatórios de ar. Através de um estudo minucioso sobre a união da soldagem ao arco elétrico e soldagem a laser é possível definir os melhores parâmetros de ambos os processos para atingir os objetivos. Com os resultados é possível também verificar se os atributos de agilidade, qualidade, confiança e custos menores foram superados em relação aos processos originais.

## 1.2 OBJETIVOS

Os objetivos deste trabalho, divididos em objetivo geral e objetivos específicos, são apresentados a seguir.

### 1.2.1 Objetivo geral

O presente trabalho tem por objetivo, analisar a possibilidade de realizar a substituição do processo robotizado de solda GMAW (*Gas Metal Arc Welding*) pelo processo robotizado de solda híbrida na produção de reservatórios de ar, definindo-se os melhores parâmetros do novo método.

### 1.2.2 Objetivos específicos

São objetivos específicos:

- a) atender os requisitos de velocidade de solda e geometria do cordão;
- b) desenvolver parâmetros de solda que atendam os requisitos;
- c) obter um aumento de 100% em relação a velocidade de solda do processo atual;
- d) comparar a resistência mecânica entre os processos GMAW, HLAW e *laser*.

## 2 REFERENCIAL TEÓRICO

Neste capítulo, pretende-se realizar uma revisão bibliográfica dos principais processos utilizados no desenvolvimento deste trabalho, bem como, a análise do cenário atual das indústrias brasileiras em relação aos processos GMAW (*Gas Metal Arc Welding*), LBW (*Laser Beam Welding*) e HLAW (*Hybrid Laser-Arc Welding*).

### 2.1 GMAW (*GAS METAL ARC WELDING*)

O processo de soldagem GMAW (*Gas Metal Arc Welding*), conhecido também como MIG (*Metal Inert Gas*) e MAG (*Metal Active Gas*) é um processo que utiliza o arco elétrico para aquecer os metais até seu ponto de fusão. Após a formação do arco, o gás de proteção fornecido através da tocha protege a poça de fusão do contato indesejado com o oxigênio do ar ambiente. (SILVA, 2020). Para o processo MIG (*Metal Inert Gas*) utiliza-se gases de proteção inertes, como argônio, hélio ou misturas destes, adequados para a soldagem de metais não ferrosos como alumínio, magnésio, cobre e titânio. Já para o processo MAG (*Metal Active Gas*), indicado para aços não ligados, de liga leve e de alta liga, utiliza-se gases de proteção ativa, ou seja, dióxido de carbono (CO<sub>2</sub>) ou oxigênio (O<sub>2</sub>) adicionados ao argônio. Entretanto, também é possível utilizar CO<sub>2</sub> puro como gás de proteção.

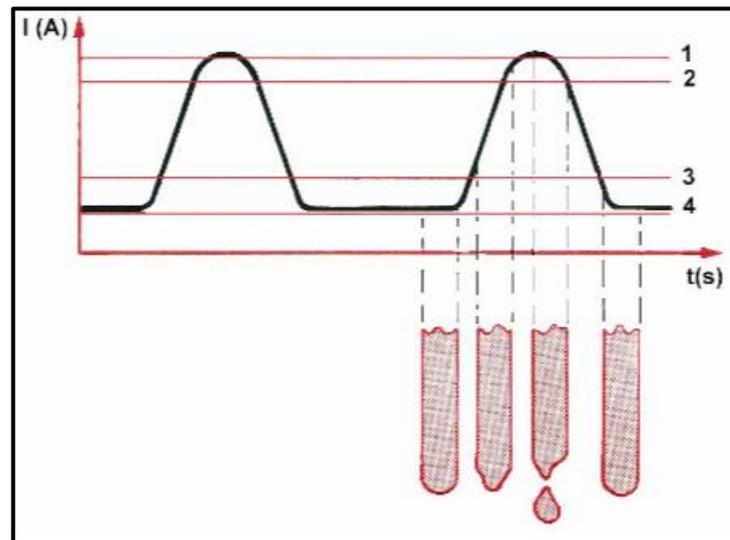
Com o objetivo de reduzir os respingos de solda e eliminar o defeito de fusão incompleta, comum em processos à transferência globular e curto-circuito, surgiu o processo GMAW-P (*Pulsed Gas Metal Arc Welding*). Esse processo consiste em uma variação da transferência por *spray*, de forma altamente controlada, no qual a corrente de soldagem é alternada entre um nível baixo para um nível de alta energia. (NADZAM, 2006)

Conforme observado na figura 1, na tecnologia pulsada, a corrente de pico (1) ultrapassa o modo de transferência globular para uma transferência de pulverização (*spray*), onde, nesse momento, ocorre a transferência de uma única gota de metal fundido, que se destacada do arame de solda e é transferida para a poça de fusão. No nível baixo, a corrente de base (4) atinge um valor menor que a transferência por curto-circuito, fornecendo uma estabilidade ao arco elétrico e início da entrada de energia a junta de solda. (NADZAM, 2006)

A frequência (Hz) do período aumenta de forma proporcional à velocidade de alimentação do arame de solda. Além da frequência e dos valores de corrente, tem-se como parâmetros adicionais o tempo de pulso, que determina o tempo em que a corrente se mantém

no pico, afetando diretamente o volume de gota de metal destacado e a largura do arco elétrico. (SILVA, 2020). Outro parâmetro adicional é o tempo de base, responsável por manter a corrente baixa para que não haja uma transferência de metal, mantendo assim a estabilidade do arco elétrico.

Figura 1 – Forma de onda da corrente no processo GMAW-P



Fonte: Unisanta (2015).

Nota: (1) Pico da corrente de pulso; (2) Corrente de transição; (3) Corrente média de soldagem; (4) Corrente de base

### 2.1.1 Vantagens e limitações do processo de soldagem GMAW

O processo de soldagem GMAW (*Gas Metal Arc Welding*), em especial o processo pulsado apresenta as seguintes vantagens em relação ao demais processos, principalmente quando comparado ao processo de soldagem a *laser* (SILVA, 2020) (NADZAM, 2006):

- a) baixo custo de implementação;
- b) fácil operação e adequação a aplicações robóticas;
- c) maior tolerância a erros de geometria da junta de solda;
- d) níveis de respingos ausentes ou muito baixo;
- e) alta taxa de deposição do material;
- f) flexibilidade para soldagem de diferentes materiais.

Entretanto, o processo apresenta as seguintes limitações em relação ao processo de soldagem a *laser* e híbrido (SILVA, 2020):

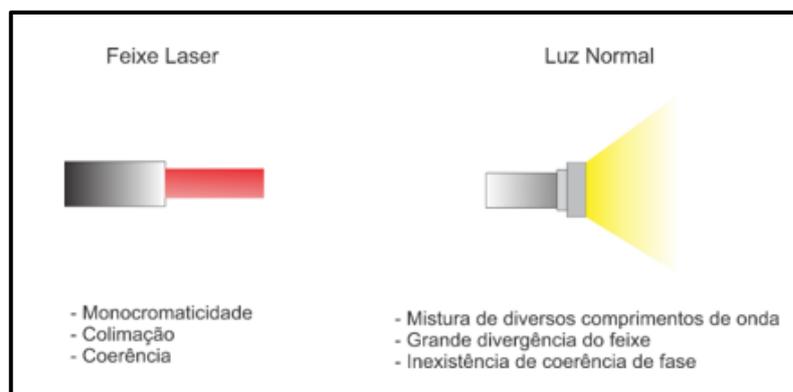
- a) menor velocidade de soldagem;

- b) menor profundidade de penetração;
- c) maior suscetibilidade de distorção e empenamento do produto.

## 2.2 LBW (*LASER BEAM WELDING*)

Conforme descrito por Silva (2020), o *laser* (*Light Amplification by the Stimulated Emission of Radiation*) é um oscilador óptico composto por uma radiação oscilante, amplificada pelo processo de emissão estimulada. Trata-se de um processo natural, onde, se um átomo excitado é atingido por um quantum da mesma energia, expulsará essa energia de forma coerente e na mesma direção. A multiplicação da energia desses átomos excitados, advém do seu enclausuramento quase que total dentro do oscilador, desde que, a agitação mantenha de forma precisa a fase e a frequência necessária. (SILVA, 2020). Por possuir uma pequena divergência, o feixe de *laser* se torna altamente direcional, concentrando uma grande quantidade de energia em um único ponto. Conforme ilustrado na figura 2, diferente da luz comum, o *laser* possui uma característica monocromática, onde, as ondas estão alinhadas e em fase, ou seja, o feixe de *laser* tem o mesmo comprimento de onda, direção e fase, características que denominam o termo “coerência”.

Figura 2 – Feixe *laser* e luz normal



Fonte: Hitz; Hecht (2012 apud Silva, 2020)

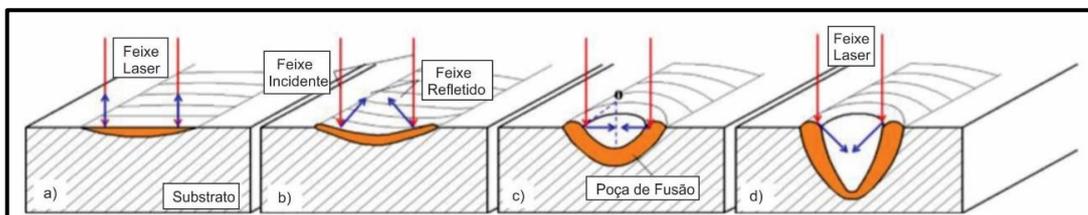
### 2.2.1 Uso do *laser* na soldagem

O processo de soldagem por feixe *laser* ou LBW (*Laser Beam Welding*) se torna atrativo devido a sua elevada densidade de potência gerada com alta estabilidade e controle. Essa característica permite alcançar altos valores de penetração e velocidade de solda em comparação a solda ao arco elétrico.

O processo LBW (*Laser Beam Welding*) é versátil, podendo ser utilizado em diversas aplicações. De forma geral, de acordo com a densidade de potência aplicada, pode ser dividido em duas vertentes. A primeira, empregando menores densidades de potência, obtém-se uma solda com baixa penetração, já que, a energia é absorvida pelo material soldado através de condução e convecções térmicas. (BARBETTA, 2019). Na literatura, esse método é tratado como *laser por condução (melt-in)*, processo com alta estabilidade e bom controle de entrada de calor resultando facilmente em soldas de excelente qualidade, com baixa ou nenhuma formação de respingos e porosidade. Devido ao feixe *laser* ser geralmente mais largo, consegue-se ajustar facilmente os parâmetros podendo utilizar equipamentos com menor qualidade de feixe e custo mais baixo. (BARBETTA, 2020). Suas características fazem com que o *laser por condução* seja utilizado em sua maioria na indústria automotiva, médica e eletrônica. (SILVA, 2020)

Ao aumentar a densidade de potência, tem-se a segunda vertente do processo LBW (*Laser Beam Welding*), onde, a energia de radiação imposta pelo *laser* aquece o material acima da temperatura de evaporação, gerando um fluxo de vapor de metal na poça de fusão. (POPRAWA, 2011). Conforme explica Barbetta (2019), com o aumento da depressão, a reflexão do feixe de laser na superfície da poça de fusão muda de uma reflexão externa, figura 2(a) e 2(b), para uma reflexão interna, figura 2(c) e 2(d). Dessa forma, a reflexão dos feixes *laser* é direcionada para o interior da poça de fusão, gerando um aumento substancial de energia empregada através do confinamento dos feixes de *laser*. Isto resulta no crescimento e estabilização da depressão, passando a se chamar capilar de vapor (SILVA, 2020).

Figura 3 – Interação do feixe *laser* com a poça de fusão



Fonte: Adaptado de NADZAM (2006).

A segunda vertente do processo LBW (*Laser Beam Welding*) resulta em um processo altamente produtivo, com alta velocidade de solda, penetração, estreitas faixas de zona

termicamente afetada (ZTA) e baixo aporte térmico, normalmente conhecido como modo de penetração ou modo *keyhole*. (BARBETTA, 2020)

### 2.2.2 Vantagens e desvantagens do processo LBW

Os dois métodos de soldagem LBW oferecem diversas vantagens em relação aos processos convencionais, tais como (SILVA, 2020) (POPRAWAWE, 2011):

- a) alta velocidade de soldagem;
- b) elevada profundidade de penetração, principalmente no método *keyhole*;
- c) alinhado com sistemas automatizados/robotizados obtém-se alta precisão;
- d) estreitas faixas ZTA e baixo aporte térmico, possibilitando reduzir distorções da peça durante a soldagem;
- e) redução de custos com retrabalhos na solda;
- f) redução de custos através da menor quantidade de metal de adição por conta da redução do chanfro;
- g) possibilidades de soldar matérias dissimilares, e não condutores.

Entretanto, esse avançado processo também tem desvantagens que dificultam sua inserção e consolidação na indústria (SILVA, 2020) (POPRAWAWE, 2011):

- a) custo inicial do equipamento elevado;
- b) maior dificuldade de acesso e posições de solda limitadas;
- c) dificuldade em produtos que apresentam juntas com *gap* elevados e variações dimensionais ao decorrer da junta, exigindo requisitos elevados de preparação do produto;
- d) falta de profissionais com *expertise* para uma adequada parametrização;
- e) com elevadas taxas de resfriamento, tem-se a possibilidade de surgimento de defeitos metalúrgicos.

### 2.3 HLAW (HYBRID LASER-ARC WELDING)

O processo de soldagem híbrida a *laser* é caracterizado por duas fontes de soldagem, trabalhando na mesma poça de fusão simultaneamente, sendo que a segunda fonte é responsável por fornecer calor adicional e, conforme o caso, metal de adição também. A combinação mais utilizada é a fonte *laser* com fonte ao arco elétrico, em especial GMAW (*Gas Metal Arc*

*Welding*). Ao utilizar a fonte GMAW (*Gas Metal Arc Welding*) é possível elevar a penetração e velocidade de solda, como também reduzir a sensibilidade de variações dimensionais ao decorrer da junta, proveniente do processo *laser*. (SILVA, 2020)

No ano de 1978, o Prof. William Steen realizou pela primeira vez na *Imperial College of London*, estudos sobre o processo de soldagem híbrida, utilizando a combinação do processo de *laser* com CO<sub>2</sub> e o processo GTAW (*Gas Tungsten Arc Welding*) demonstrou-se um aumento significativo de velocidade de soldagem (acima de 100% de aumento), profundidade de penetração e estabilidade do processo (SILVA, 2020) (POPRAWA, 2011). Porém, devido principalmente ao elevado custo e a falta de disponibilidade de *lasers* de alta potência, teve-se um desenvolvimento lento do processo de soldagem híbrida. O desenvolvimento do processo HLAW (*Hybrid Laser-Arc Welding*) começa a acelerar na década de 1990 com o avanço na tecnologia de fontes laser de CO<sub>2</sub>, podendo concentrar densidades de potências maiores, até 10<sup>6</sup> W/cm<sup>2</sup>. (SILVA, 2020)

No ano de 2000, no Instituto Fraunhofer (ILT) na Alemanha, houve a primeira implantação de um sistema industrial de soldagem HLAW (*Hybrid Laser-Arc Welding*) para a fabricação de tanques de óleos. Após o êxito dessa instalação pode-se observar uma explosão no desenvolvimento do processo híbrido, em especial nos setores de construção naval e indústria automotiva. (POPRAWA, 2011)

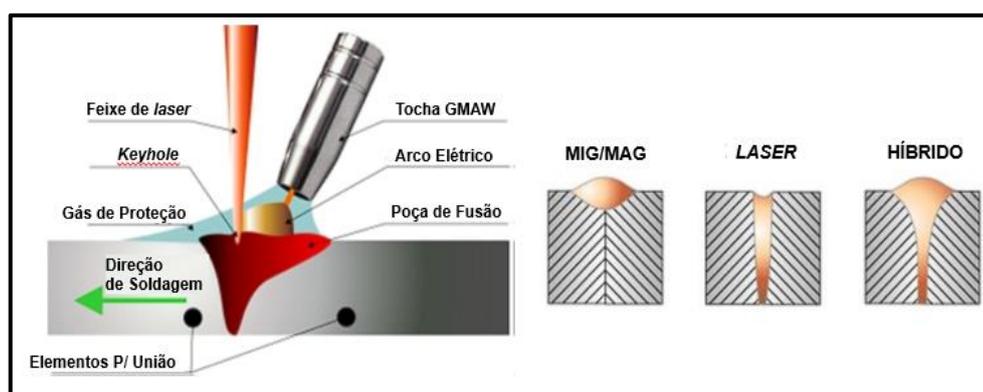
Diversas fontes de *laser* foram desenvolvidas até o momento, sendo que uma das fontes de *laser* mais comuns é a de CO<sub>2</sub>, que é o *laser* de onda contínua de maior potência até o momento, podendo variar de alguns watts a 50 kilowatts ou mais (ACHERJEE, 2018). Outra fonte de *laser* utilizada é a de Nd:YAG (granate de ítrio-alumínio dopado com neodímio), sua potência máxima disponível comercialmente está na faixa de alguns quilowatts. A principal diferença entre as duas fontes está no comprimento de onda, onde a fonte Nd:YAG opera num comprimento de onda de 1,064 μm, enquanto a fonte de CO<sub>2</sub> trabalha com 10,6 μm. (ACHERJEE, 2018). Em termos mais práticos, *lasers* com comprimento de onda mais curtos (Nd:YAG) são indicados para soldagem de metais reflexivos como alumínio e aço inoxidável.

Entretanto, as duas fontes descritas anteriormente apresentam baixa eficiência eletro-óptica, entre 2% e 20% (ACHERJEE, 2018). Outras fontes de *lasers* com maior eficiência eletro-óptica são os *lasers* de fibra e disco que apresentam uma eficiência entre 20% e 40%. Esses tipos de *lasers* também apresentam outras vantagens, como alta potência de saída, melhor qualidade óptica, tamanho do equipamento compacto, elevada potência de pico e baixo consumo kW/h, em comparação aos *lasers* de CO<sub>2</sub> e Nd:YAG (ACHERJEE, 2018). O *laser* de

fibra vem ganhando destaque nos últimos anos com o aumento da potência de saída e a alta qualidade do feixe, tornando-se atrativo, não somente no processo de soldagem híbrida, mas também no processo de soldagem a *laser* e no processo de corte de materiais.

Ao combinar um feixe de *laser* de alta densidade de energia a um arco elétrico, obtém-se o processo conhecido como processo de soldagem a laser de arco aumentado, denominado também como processo de soldagem híbrido *laser*-arco elétrico (HLAW). O cordão de solda proveniente desse processo resulta geralmente em duas zonas distintas de fusão caracterizada por uma forma semelhante a um cálice, a zona superior, com uma região mais larga, formada principalmente através do arco elétrico, e a zona inferior, mais fina, formada principalmente pelo *laser*, conforme ilustrado na figura 4 (ACHERJEE, 2018).

Figura 4 – Esquema do processo de soldagem HLAW



Fonte: Adaptado de ACHERJEE (2018).

No processo de soldagem híbrido *laser*-arco elétrico, o feixe de *laser* é utilizado como fonte de calor principal, interagindo na mesma poça de fusão com uma fonte de calor secundária. Nesse caso, com o arco elétrico, ao utilizar essa fonte de calor secundária, consegue-se reduzir a potência de *laser* necessária para uma mesma penetração. Para a fonte de soldagem ao arco elétrico, geralmente, opta-se pelo modo de transferência pulsada, devido ao alto controle da formação do arco elétrico e da gota de metal depositado, auxiliando na estabilidade do processo e na baixa geração de respingos de solda (ACHERJEE, 2018).

A interação simultânea de dois processos de soldagem distintos em uma mesma poça de fusão torna consideravelmente complexa a parametrização das variáveis envolvidas, já que, além das variáveis de cada processo, têm-se também variáveis adicionais provenientes dessa união.

Dentre os diversos parâmetros, destacam-se: a potência do laser, responsável por produzir o *keyhole* e garantir a penetração profunda; a distância entre o feixe de *laser* e o arco elétrico, que afeta diretamente a geometria do cordão de solda; a relação entre velocidade de soldagem e alimentação do arame, auxiliando na estabilidade do processo na poça de fusão; os tipos de gases de proteção e suas composições, que influenciam na formação do perfil de solda e as características mecânicas resultantes; e a preparação da junta, afetando diretamente a qualidade da solda e implantação do processo. Observa-se, que um pequeno *gap* controlado entre 0,6 e 1 mm pode ser benéfico no processo híbrido, já que essa abertura facilita o alcance do metal fundido na parte inferior da junta, melhorando a homogeneidade e a diluição na poça de fusão, resultando em uma penetração e velocidade de solda mais altas (ACHERJEE, 2018).

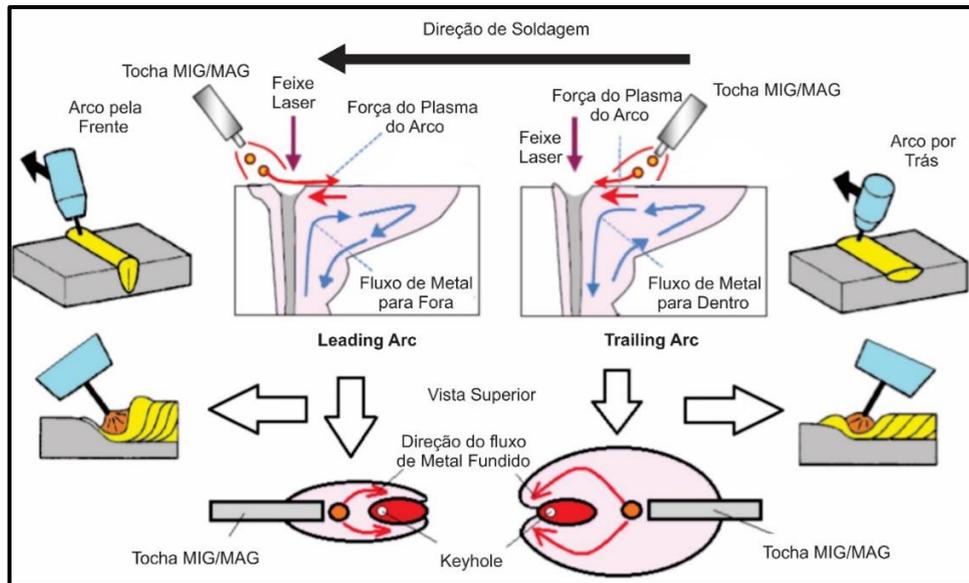
Outro ponto importante a ser observado no processo HLAW (*Hybrid Laser-Arc Welding*) é o posicionamento do cabeçote *laser* em relação ao cabeçote ao arco elétrico. É possível utilizar duas formas de posicionamento distintos, desde que ambos interajam na mesma poça de fusão: paraxial e coaxial (ACHERJEE, 2018).

Ainda no arranjo paraxial, há duas formas de posicionamento da tocha em relação ao *laser*. A configuração conhecida como *leading arc*, em que a tocha de soldagem a arco elétrico é posicionada em frente ao feixe *laser*; ou *trailing arc*, em que o arco é posicionado atrás do feixe *laser*, também conhecido como *leading laser* (ACHERJEE, 2018).

O arranjo paraxial é sempre preferível, já que se trata de um processo mais fácil de ser aplicado, podendo utilizar recursos de *laser* e GMAW (*Gas Metal Arc Welding*) sem grandes modificações. No entanto, no processo coaxial se faz necessária a utilização do eletrodo oco, com o objetivo de permitir a transmissão do feixe *laser* pelo seu interior, sendo assim, tanto o feixe de *laser* quanto o arco elétrico compartilham um eixo central comum de energia aplicada (ACHERJEE, 2018).

Conforme ilustrado na figura 5, o método *leading arc* apresenta uma maior penetração de solda, devido ao fato de que antes do material ser atingido pelo feixe *laser* ele já se encontra fundido, exigindo menor energia para atingir o *keyhole*, ocasionando também um aumento de absorção da energia proveniente do feixe *laser* (TSUKAMOTO; SUGINO; ARAKANE, 2008, apud SILVA, 2020). O método *trailing arc* apresenta uma maior largura de cordão e cenário favorável ao fornecimento mais homogêneo de elementos micro ligados do arame de solda, em contrapartida, para juntas de soldas com *gap* o arranjo *leading arc* é que apresenta um metal de solda mais homogênea (ZHAO et al., 2009).

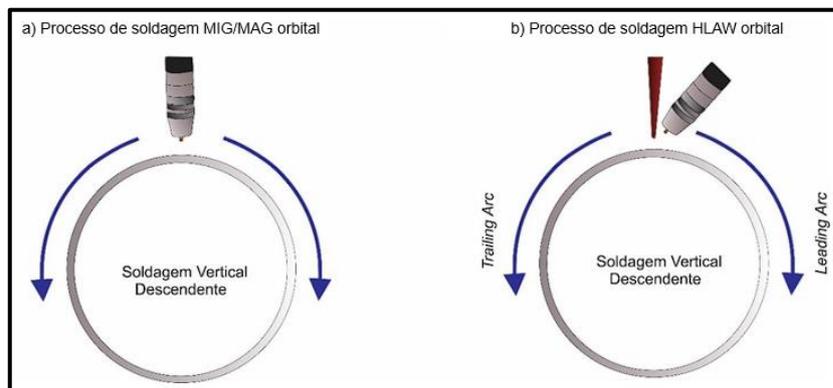
Figura 5 – Comparação de fluxo metal fundido em aço carbono nos métodos *leading arc* e *trailing arc*



Fonte: adaptado de Tsukamoto; Sugino; Arakane (2008) apud SILVA (2020).

Outra diferença para os processos convencionais, principalmente em relação ao processo GMAW (*Gas Metal Arc Welding*), está na alteração do sentido de alimentação do arame de acordo com o posicionamento do cabeçote na junta de solda, conforme ilustrado na figura 6. (SILVA, 2020) Isto pode gerar diferentes microestruturas em um único produto, ocasionando resultados operacionais e mecânicos inesperados.

Figura 6 – Alteração no sentido de alimentação de arame nos processos de soldagem (a) GMAW e (b) HLAW



Fonte: Adaptado de Silva (2020).

Ao alterar o sentido de avanço do cabeçote do processo (b) HLAW (*Hybrid Laser-Arc Welding*), ilustrado na figura 6, ocorrerá a mudança da microestrutura da junta de solda gradada,

já que, ao deslocar o cabeçote para a esquerda obtém-se uma junta de solda de maior largura e menor profundidade, proveniente do método *trailing arc*, porém ao deslocar para a direita obtém-se um junta de menor largura e maior profundidade, resultante do método *leading arc*. Diferente do processo (a) GMAW (*Gas Metal Arc Welding*), em que essa alteração não implica na mudança da junta de solda, mantendo os parâmetros.

### 2.3.1 Vantagens e desvantagens do processo HLAW

O processo de soldagem híbrida *laser*-arco oferece diversas vantagens, sendo as principais (SILVA, 2020) (ACHERJEE, 2018):

- a) alta velocidade de soldagem;
- b) elevada profundidade de penetração, com alta deposição de material;
- c) maior tolerância geométrica da junta a ser soldada em comparação a soldagem unicamente a *laser*;
- d) redução de custos globais de fabricação;
- e) possibilidade de soldar metais ferrosos e não ferrosos e com diferentes espessuras;
- f) menor aporte térmico.

Entretanto o processo também apresenta algumas dificuldades para implantação nas mais diversas indústrias, principalmente no Brasil, tais como:

- a) alta complexidade de parametrização;
- b) elevado custo de aquisição;
- c) processo relativamente novo, com muitas informações a serem exploradas;
- d) poucas empresas e profissionais com *expertise*;
- e) complexidade maior para acesso adequado dos cabeçotes a junta de solda.

## 2.4 O ESTADO DA ARTE DA SOLDAGEM HÍBRIDA LASER-ARCO ELÉTRICO

Fernandes et al. (2020) investigou a retração transversal e a distorção angular proveniente da soldagem híbrida *laser*-arco em aço de alta resistência estrutural com *laser* de fibra Yb de 20 kW e máquina de solda MAG de 250-500 A, arame de solda de Ø1,6 mm e gás de proteção 100% CO<sub>2</sub>. Os parâmetros analisados para o *laser* foram: potência do *laser* e a velocidade de soldagem; para a máquina de solda arco elétrico foram: tensão e corrente. De acordo com experimentos iniciais, foi observado que, para a mesma quantidade de calor e com

uma penetração menor, o processo *trailing arc* gera uma distorção angular menor do que o processo *leading arc*. Com o avanço dos experimentos, foi confirmado que, com o aumento da entrada de calor, tem-se o aumento da distorção angular e da contração transversal; diminuindo-se a velocidade de soldagem, tem-se um aumento também da distorção angular. Em comparação com os processos de soldagem convencionais, a soldagem híbrida *laser*-arco necessita de uma menor entrada de calor na junta de solda, minimizando a retração transversal (ACHERJEE, 2018).

Haxuan et al. (2021) realizaram pesquisa sobre a influência do *gap* em junta de topo na soldagem híbrida *laser*-arco. O estudo foi realizado em aço de baixa liga e alta resistência, com arame de solda Ø1,2 mm cobreado de alta resistência e gás de proteção com argônio puro (MIG). Os principais equipamentos utilizados foram: um *laser* de fibra IPG YLS 5000 da *IPG Photonics*, uma máquina de solda KempAre 450MIG e um braço robótico de 6 eixos KB 50 HA da Kuka. A melhor distância encontrada, entre o *laser* e o arame de solda, foi de 0,5 mm para um chapa com espessura de 3 mm. Foi observado que a tensão do arco elétrico afeta a formação e penetração da solda. Com o aumento da tensão tem-se também o aumento significativo da profundidade de penetração, porém, há também o colapso da superfície de soldagem, que se deteriora gradativamente. O aumento da distância entre o *laser* e o arame obtém uma melhora no preenchimento do *gap*, entretanto aumenta também a instabilidade do processo; o mesmo acontece com o aumento de velocidade de alimentação do arame de solda. Quando a distância entre o *laser* e o arame é igual a zero tem-se a melhor estabilidade de soldagem e a mais rápida transferência da gota, entretanto, quando analisados os demais fatores, como preenchimento da junta, formação da solda e defeito na costura de soldagem, como fusão incompleta e porosidade, o *gap* de 0,5 mm foi o que obteve melhor resultado.

Churiaque et al. (2021) propuseram melhorias para soldagem HLAW (*Hybrid Laser-Arc Welding*) para juntas tipo T no segmento de construção naval. Os equipamentos principais utilizados foram o *laser* de disco TruDisk 16002 de 16kW e uma máquina de solda Qineo Pulse 600, com corrente máxima de 600 A. Foram realizados testes em aço de alta resistência ASTM A131, grau EH36 na posição de soldagem horizontal, com dois tipos de arame de solda, ambos com Ø1,2 mm (Union K52 Ni, ERSO S-G, denominado FW1 e o WDI 16 SG, ER70 S-6, denominado FW2), conforme norma AWS. Para espessura de chama de 8 mm, o arame FW2 com parâmetros ajustados de velocidade de solda, alta potência do feixe *laser* e com baixos ângulos da tocha apresentou soldas que atenderam o padrão de qualidade exigido pela indústria naval, incluindo testes não destrutivos, análise metalográfica das seções e as medições de

distorções do produto experimentais. Tais medições obtiveram uma excelente concordância com simulações FEM (*Finite Element Method*) realizadas no software SYSWELD da empresa *Pacific Engineering Systems International*, permitindo estimar a distribuição de temperatura, as distorções da alma e da base e tensões residuais. De acordo com os autores, foram obtidas soldas com sucesso pela primeira vez na posição horizontal, em juntas tipo T com penetração total de 8 mm, sem chanfro, aplicável industrialmente em um único passe com *gap* de 0 mm. Soldas foram realizadas a uma velocidade de até 2,2 m/min, ou seja, 1,76 vezes maior do que o relatado anteriormente na literatura revisada pelos autores (CHURIAQUE et al., 2021).

Bunaziv et al. (2021) realizaram uma revisão profunda do estado da arte referente a soldagem *laser*-arco em ligas de alumínio. As principais conclusões foram: (a) o modo *keyhole* de soldagem híbrida pode oferecer um aumento considerável de produtividade de 10 à 20 vezes em comparação com a soldagem GMAW (*Gas Metal Arc Welding*) convencional, entretanto, as soldas são propensas a imperfeições e defeitos críticos, como trincas e porosidade; (b) a porosidade pode ser minimizada otimizando os parâmetros do processo, um desafio devido a muitos parâmetros presentes na soldagem *laser*-arco e a interação que ocorre entre eles, podendo assim, ser um processo demorado; (c) a soldagem híbrida oferece vantagens pela possibilidade de manipulação de duas entradas de calor e pelo uso de material de adição, entretanto é necessário o desenvolvimento de novos materiais de enchimento, com o objetivo de melhorar as propriedades mecânicas resultantes e a resistência a corrosão.

Turichin et al. (2017) realizaram estudos sobre a soldagem HLAW (*Hybrid Laser-Arc Welding*) em aços de alta resistência no segmento de construção naval. Foi utilizado o equipamento de soldagem híbrida LATS (*Laser Arc Technological System*) composto por uma mesa de soldagem semelhante a máquina de corte a *laser*, com fonte *laser* de fibra de itérbio LS-16 com potência máxima de saída de 16 kW, uma unidade de refrigeração Riedel PC400 e máquina de solda EWM Taurus 551 Synergie S FDW. O aumento da distância entre o feixe de *laser* e o arco elétrico apresentou cordões de solda com estrutura frágil, devido à maior velocidade de resfriamento e ausência dos elementos de liga do arame de solda com o metal base. Também foram observados defeitos internos de solda provenientes da falta de potência para refundição do metal de solda. Foram realizados testes em corpos de prova com juntas em T, angulares e de topo com aço RS E36 com espessura de 7 mm, 14 mm, 20 mm, e 45 mm e obtidos resultados positivos aprovados pelo Registro Marítimo Russo de Navegação, possibilitando a implementação da soldagem HLAW (*Hybrid Laser-Arc Welding*) nos estaleiros de fabricação de navios.

### 3 MATERIAIS E MÉTODOS

O presente trabalho teve o desafio de realizar a soldagem de reservatórios de ar para sistemas de freios de caminhões, por meio do processo HLAW (*Hybrid Laser-Arc Welding*), e avaliar os ganhos obtidos em relação ao processo GMAW (*Gas Metal Arc Welding*). Primeiramente foram realizados testes em corpos de prova e executado o ensaio de tração e macrografia, após foram adequados os testes nos reservatórios e efetuado os testes de estanqueidade e destrutivo. O capítulo a seguir irá abordar os materiais e métodos utilizados para atingir soldas realizadas pelo processo HLAW (*Hybrid Laser-Arc Welding*) conforme requisitos abaixo.

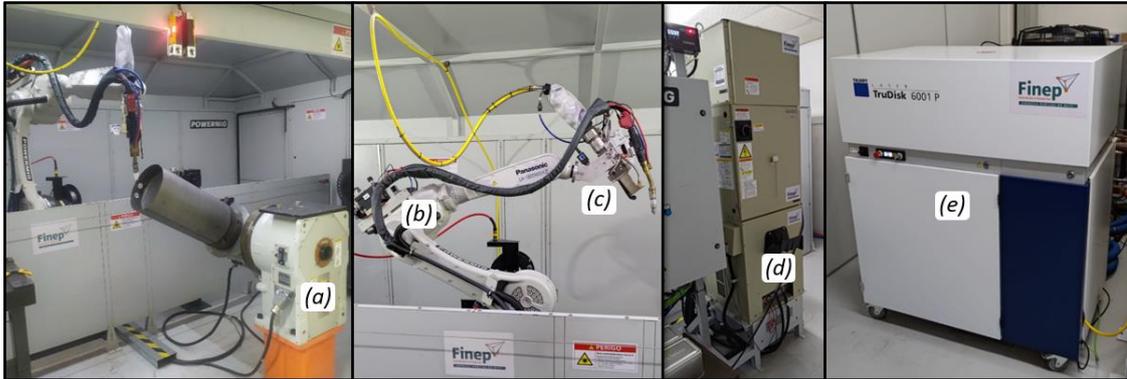
O capítulo a seguir irá abordar os materiais e métodos utilizados para atingir soldas realizadas pelo processo HLAW (*Hybrid Laser-Arc Welding*) conforme requisitos abaixo:

- a) velocidade de solda mínima de 1,5 m/min, porém com o objetivo de 3,5 m/min;
- b) reforço máximo de solda de 0,5 mm na raiz;
- c) desejável reforço aproximado de solda de 0,5 mm na face da junta;
- d) penetração de solda total para a junta de topo;
- e) atender ao teste de estanqueidade e de resistência mecânica.

#### 3.1 MATERIAIS

O estudo ocorreu na empresa Powermig Automação e Soldagem LTDA, situada em Caxias do Sul – RS. Utilizou-se a célula robotizada de soldagem híbrida desenvolvida pela Powermig e com o apoio do FINEP, conforme figura 7, composta por um braço robótico modelo LA-1800 (b) com fonte de solda TAWERS 450A (d), ambos da empresa Panasonic, fonte *laser* TruDisk 6001 (e) com cabeçote BEO D70 (c), da empresa Trumpf, e posicionador orbital Panasonic modelo RJC (a).

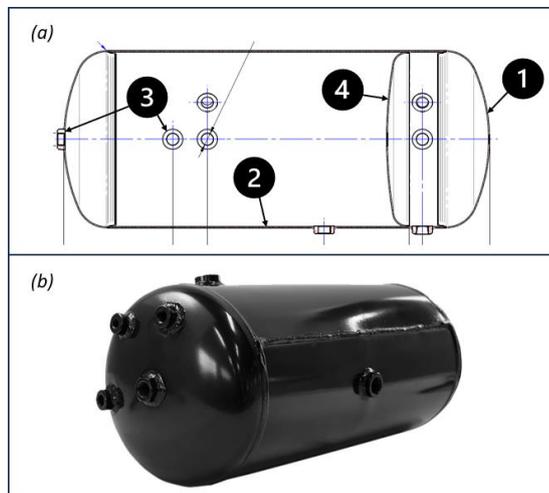
Figura 7 – Célula Robotizada de Soldagem HLAW Powermig



Fonte: Autor (2023).

Os produtos soldados foram reservatórios de ar para sistemas de freio de caminhões, ilustrado na figura 8 (b), os quais são produzidos com chapas de aço SAE 1012, com espessura de 2,25 mm. Existem diversos modelos de reservatórios com diferentes dimensões, mas, com modelos construtivos semelhantes. Conforme figura 8 (a), a estrutura é constituída, basicamente, da calota externa, item 1, o corpo, item 2, as conexões, item 3, sendo que alguns reservatórios apresentam a calota interna, item 4. Os testes abrangeram as soldas circunferencial da calota externa, uma junta em forma de meio “V”, a solda longitudinal do corpo, uma junta tipo topo, a solda circunferencial da calota interna e a solda das conexões, ambas juntas consideradas tipo filete. Conforme requisito do cliente, utilizou-se o arame de solda ER70S-6, bitola  $\varnothing 1,0$  mm não cobreado. Como gás de proteção, optou-se pela mistura de 80% argônio e 20% dióxido de carbono.

Figura 8 – Reservatório de ar para sistemas de freios de caminhões



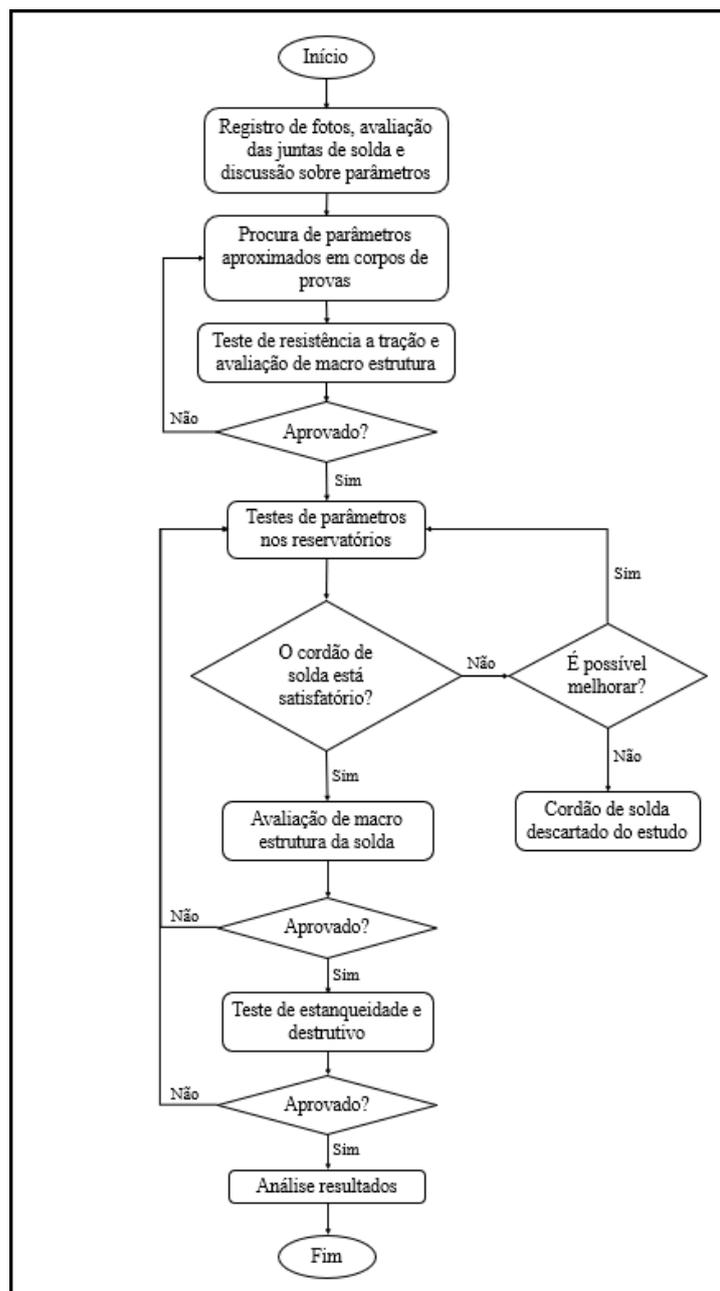
Fonte: (a) Powermig (2023); (b) TOWER PARTS (2018).

Nota: (1) Calota externa; (2) Corpo; (3) Conexões; (4) Calota interna.

### 3.2 MÉTODOS

O desenvolvimento dos testes seguiu fluxograma ilustrado na figura 9. O primeiro passo foi realizar a avaliação das peças enviadas pelo cliente, em especial a qualidade e repetibilidade da montagem do produto, sendo o valor do *gap*, e sua variação, o principal fator observado.

Figura 9 – Fluxograma para desenvolvimento dos testes



Fonte: Autor (2023).

Devido a quantidade limitada de peças que o cliente disponibilizou do produto, foram efetuados os primeiros testes em corpos de prova de mesmo material e espessura dos reservatórios, buscando simular a junta de topo. Dessa forma, foi possível encontrar parâmetros mais próximos do resultado esperado, sem consumir tantas peças do cliente. Foram cortadas 40 chapas de 150 mm de largura por 350 mm comprimento, e após foi realizado o ponteamto nas extremidades de duas chapas com o cabeçote *laser* da célula híbrida, obtendo-se 20 corpos de prova para os testes iniciais.

O método escolhido para realizar a soldagem foi o *leading arc*, devido a facilidade maior em estabilizar o arco e a possibilidade de reduzir a potência do *laser* com o arco elétrico liderando à frente. No processo ao arco elétrico, utilizou-se o método GMAW-P (*Pulsed Gas Metal Arc Welding*), devido a estabilidade do arco elétrico, boa penetração e baixo nível de respingos.

Com o objetivo de diminuir as variáveis analisadas, para os testes iniciais, fixou-se a distância entre a ponta do arame e o bico de contato em 20 mm, o desfoque do laser em -2 mm, o ângulo *laser*-arco em 36° e a distância entre o feixe *laser* e o arco elétrico (DLA) em 3 mm. Esses valores haviam apresentado bons resultados em testes preliminares realizados pela Powermig.

Dessa forma, foram utilizados, como parâmetros, a posição de soldagem, potência do *laser*, corrente e tensão da fonte GMAW (*Gas Metal Arc Welding*), velocidade de alimentação de arame e a velocidade de solda. Essa última foi fixada, como meta, em 3,5 m/min, porém com possibilidade de reduzi-la, caso não fosse possível obter os resultados necessários. Após realizados os primeiros testes, observou-se certa instabilidade entre o arco elétrico e o feixe *laser*, mesmo com alguns ajustes de parâmetros. Dessa forma, para buscar uma melhor interação entre o feixe *laser* e o arco elétrico, foi alterada a DLA de 3 mm para 2 mm, mostrando melhor resultado.

Conforme tabela 1, iniciaram-se os testes com uma potência do feixe *laser* de 5,5 kW, corrente de 220A, tensão de 25,4V e velocidade de alimentação de arame de 13,3 m/min.

Tabela 1 – Parâmetros Solda Híbrida

| Corpo de Prova | Potência (kW) | Corrente (A) | Tensão (V) | Velocidade (m/min) | Vel. Arame (m/min) | GAP (mm) | Posição (graus) |
|----------------|---------------|--------------|------------|--------------------|--------------------|----------|-----------------|
| 2.1            | 5,5           | 220          | 25,4       | 3,5                | 13,3               | 0        | 45°             |
| 2.2            | 5,5           | 220          | 25,4       | 3,5                | 13,3               | 0        | 45°             |
| 2.3            | 5,5           | 260          | 26,1       | 3,5                | 15,8               | 0        | 45°             |
| 2.4            | 5,5           | 260          | 26,1       | 3,5                | 15,8               | 0        | 45°             |
| 2.5            | 5,5           | 260          | 26,1       | 3,5                | 17,3               | 0        | 45°             |
| 2.6            | 5,5           | 300          | 26,8       | 3,5                | 18,0               | 0        | 45°             |
| 2.7            | 5,5           | 260          | 26,1       | 3,5                | 16,5               | 0        | 30°             |
| 2.8            | 5,5           | 260          | 25,1       | 3,5                | 16,5               | 0        | 30°             |
| 2.9            | 5,5           | 240          | 25,8       | 3,5                | 15,2               | 0        | 30°             |
| 2.10           | 5,5           | 220          | 25,4       | 3,5                | 14,0               | 0        | 30°             |
| 2.11           | 5,5           | 220          | 25,4       | 3,5                | 14,0               | 0,5      | 30°             |
| 2.12           | 5,5           | 220          | 25,4       | 3,5                | 14,0               | 0,9      | 30°             |

Fonte: Autor (2023).

Para esse conjunto de parâmetros, obteve-se uma boa estabilidade da raiz, porém apresentou na face superior, uma retração na região central do cordão, proveniente da falta de material depositado, conforme figura 10.

Figura 10 – Corpo de Prova 2.2



Fonte: Autor (2023).

Para melhorar a face superior da solda, foi aumentado o valor da corrente para 260A. Naturalmente, o valor de tensão e velocidade do arame também aumentaram, de forma que o resultado foi um cordão com certa instabilidade e menor largura, mas com maior reforço superior e inferior. O início do cordão também apresentou defeitos conforme figura 11, supostamente devido ao fato que, no início do cordão, o metal base se encontra em temperatura ambiente, que em virtude da alta velocidade de soldagem, não há tempo suficiente para o metal

base aquecer até a temperatura que facilite a fusão com o metal de adição. Para resolução desse defeito foi incluído, no programa de soldagem, um *delay* de 0,5s entre a abertura do arco elétrico e o deslocamento do robô, o que melhorou a estabilidade no início do cordão.

Figura 11 – Corpo de Prova 2.4



Fonte: Autor (2023).

Outra alteração realizada para a soldagem do corpo de prova 2.5 foi aumentar a velocidade de alimentação do arame, mantendo a corrente e a tensão utilizada anteriormente. Até então, havia-se utilizado o valor de tensão e alimentação padrão para a corrente e arame de solda, entretanto por haver uma segunda fonte de energia interagindo na poça de fusão simultaneamente, percebeu-se a necessidade de aumentar a alimentação de arame, buscando atender à energia imposta pelos dois mecanismos de soldagem. Com essa alteração, o cordão de solda apresentou um aumento do reforço superior, porém apresentando também instabilidade ao longo do cordão. Na tentativa seguinte, aumentou-se a corrente para 300A, o que não gerou melhorias no cordão.

O próximo passo para melhorar os resultados, foi reduzir a inclinação da peça de 45° para 30° com o objetivo de espalhar mais o metal de solda e melhorar a estabilidade do arco. Para o corpo de prova 2.7 foi reduzida a corrente de solda para 260A e utilizada a velocidade de alimentação do arame em 16,5 m/min. Conforme figura 12, o cordão não apresentou mais a depressão na região central da face superior e manteve um bom reforço em ambas as faces, entretanto apresentou mordedura nas laterais do cordão de solda.

Figura 12 – Corpo de Prova 2.7



Fonte: Autor (2023).

No corpo de prova 2.8, foi reduzida em 1,0V a tensão e mantidos os demais parâmetros. Não houve alterações significativas nos resultados, apenas uma pequena redução na largura do cordão. No próximo corpo de prova, reduziu-se a corrente para 240A com a velocidade de alimentação de arame em 15,2 m/min, mas também não houve alterações significativas no resultado.

O conjunto de parâmetro que apresentou melhor resultado foi o utilizado no corpo de prova 2.10. Nesse caso, retornou-se para corrente e tensão inicial, mas, foi aumentada a velocidade de alimentação do arame para 14,0 m/min e soldado na posição de 30°. Assim, conforme figura 13, foi possível obter um cordão de solda estável, sem defeitos de soldas, com reforço superior próximo a 0,5 mm e reforço na raiz inferior a 0,5 mm. Esses parâmetros também foram replicados em corpos de prova com *gap* de 0,5 mm e *gap* de 0,9 mm com o objetivo de verificar o comportamento do resultado, caso houvesse a presença não prevista de *gap* em uma junta de solda. Para o *gap* de 0,5 mm o cordão de solda manteve-se estável, com bom aspecto visual, manteve também o reforço na raiz, porém com uma pequena redução no reforço da face superior. Já para o *gap* de 0,9 mm, apesar do bom reforço inferior, o cordão de solda apresentou certa instabilidade em alguns pontos, o reforço superior foi mínimo, e furou a chapa na abertura do arco, proveniente do *delay* inserido anteriormente.

Figura 13 – Corpo de Prova 2.10



Fonte: Autor (2023).

Com o objetivo de comparar, principalmente, a resistência mecânica entre os processos, foram realizados também testes em corpos de prova com soldas GMAW (*Gas Metal Arc Welding*) e laser.

Os testes de solda ao arco elétrico foram realizados com o método GMAW-P (*Pulsed Gas Metal Arc Welding*), assim como no processo híbrido. Conforme tabela 2, iniciaram-se os testes com corrente de 250A, sem *gap* e com as chapas na posição de 45°, o que resultou em uma solda com excesso de largura, que escorreu durante o processo. Para os corpos de prova seguintes, alterou-se a posição da peça para 0° com o objetivo de não escorrer a solda e manter uma boa penetração, porém, mesmo na posição plana, a solda ao arco elétrico apresentou baixa penetração. Dessa forma, foi alterado o *gap* para 0,5 mm para auxiliar na penetração da solda, sem a necessidade de gerar reforço superior excessivo, possibilitando também utilizar velocidade de solda mais rápida do que a utilizada no primeiro corpo de prova.

Tabela 2 – Parâmetros Solda GMAW

| <b>Corpo de Prova</b> | <b>Corrente (A)</b> | <b>Tensão (V)</b> | <b>Velocidade (m/min)</b> | <b>GAP (mm)</b> | <b>Posição (graus)</b> |
|-----------------------|---------------------|-------------------|---------------------------|-----------------|------------------------|
| 1.1                   | 250,0               | 26,0              | 0,7                       | 0,0             | 45,0                   |
| 1.2                   | 220,0               | 25,4              | 0,7                       | 0,5             | 0,0                    |
| 1.3                   | 250,0               | 25,9              | 0,8                       | 0,5             | 0,0                    |
| 1.4                   | 200,0               | 25,1              | 0,8                       | 0,5             | 0,0                    |
| 1.5                   | 180,0               | 24,5              | 0,8                       | 0,5             | 0,0                    |
| 1.6                   | 180,0               | 24,5              | 0,9                       | 0,5             | 0,0                    |
| 1.7                   | 180,0               | 24,5              | 1,0                       | 0,5             | 0,0                    |
| 1.8                   | 180,0               | 25,0              | 1,0                       | 0,5             | 0,0                    |
| 1.9                   | 180,0               | 25,0              | 1,0                       | 0,5             | 0,0                    |
| 1.10                  | 180,0               | 25,0              | 1,0                       | 0,5             | 0,0                    |
| 1.11                  | 180,0               | 25,5              | 1,0                       | 0,5             | 0,0                    |
| 1.12                  | 180,0               | 25,5              | 1,1                       | 0,5             | 0,0                    |
| 1.13                  | 180,0               | 25,5              | 1,0                       | 0,5             | 0,0                    |

Fonte: Autor (2023).

Na sequência dos testes, reduziu-se a corrente até 180A no corpo de prova 1.5, onde o cordão de solda ficou com aspecto visual melhor, mantendo a penetração total, porém ainda apresentando reforço superior excessivo. Já que, com 180A manteve-se penetração total e excesso de material, buscou-se aumentar a velocidade de solda para diminuir o excesso de reforço superior. Assim, com velocidade de 1,0 m/min foi possível obter uma solda com aparência razoável, porém com falta de penetração em alguns pontos. Para os corpos de prova 1.8 e 1.9 houve falha de gás, então foram desconsiderados.

Com o objetivo de aumentar a penetração e melhorar o aspecto visual da solda, aumentou-se o valor de tensão para 25V, o que garantiu penetração total ao longo de todo o cordão e melhora no aspecto visual. Para o corpo de prova 1.11, aumentou-se a tensão para 25,5V, o que gerou um cordão de solda mais uniforme. Na tentativa de ter um conjunto de parâmetros mais produtivo, aumentou-se a velocidade de solda para 1,1 m/min, de modo que o resultado foi um cordão de solda com bom aspecto visual na face superior, porém apresentou instabilidade na raiz da solda, com alguns pontos sem a penetração total. Conclui-se que o corpo de prova 1.11 apresentou o melhor conjunto de parâmetros, sendo replicado em uma chapa inteira (corpo de prova 1.13), conforme observado na figura 14, obteve-se estabilidade e penetração total ao longo de todo o cordão de solda.

Figura 14 – Corpo de Prova 1.13



Fonte: Autor (2023).

Na célula de soldagem híbrida, também foram realizados os testes com soldagem a *laser*, com parâmetros conforme tabela 3. Foi o processo com maior facilidade de ser parametrizado.

Tabela 3 – Parâmetros Solda *laser*

| Corpo de Prova | Potência (kW) | Velocidade (m/min) | Vel. Arame (m/min) | GAP (mm) | Ø Arame (mm) |
|----------------|---------------|--------------------|--------------------|----------|--------------|
| 3.1            | 6,0           | 4,0                | 4,0                | 0,0      | 1,0          |
| 3.2            | 5,0           | 4,0                | 3,5                | 0,0      | 1,0          |
| 3.3            | 5,5           | 4,0                | 3,5                | 0,0      | 1,0          |
| 3.4            | 5,5           | 4,0                | 3,5                | 0,0      | 0,8          |
| 3.5            | 5,5           | 4,0                | 4,5                | 0,0      | 0,8          |
| 3.6            | 6,0           | 4,0                | 4,5                | 0,0      | 0,8          |
| 3.7            | 6,0           | 4,0                | 4,5                | 0,5      | 0,8          |

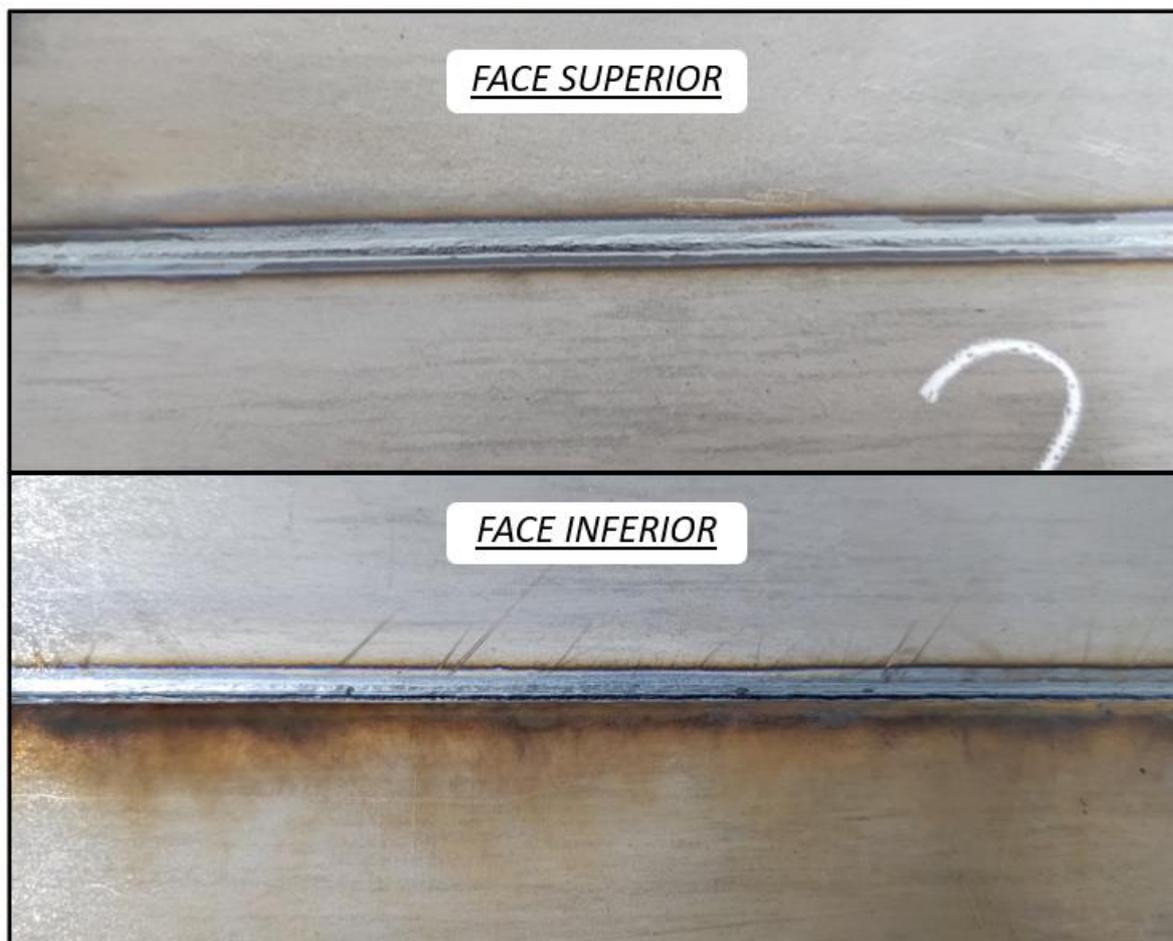
Fonte: Autor (2023).

Iniciaram-se os testes na posição plana, com a máxima potência do *laser* de 6 kW, uma velocidade de solda de 4,0 m/min e velocidade de alimentação do arame de 4,0 m/min. O resultado foi um cordão de solda com penetração total, porém furou a chapa no meio do cordão. No teste seguinte, reduziu-se a potência e a velocidade de alimentação de arame, mantendo a velocidade de solda, o que gerou falta de penetração total em alguns pontos. Dessa forma, nos três corpos de prova seguintes, foi utilizada uma potência intermediária (5,5 kW) entre o primeiro e o segundo teste, mantida a velocidade de solda e alterada a velocidade de alimentação de arame. Um teste parcial, com os parâmetros do corpo de prova 3.3 mostrou-se promissor, com bom aspecto visual e penetração total, porém ao replicá-lo em uma chapa inteira, apresentou arame colado em alguns pontos, possivelmente proveniente da falta de fusão do arame em alta velocidade de soldagem. A hipótese levantada é que não havia energia o suficiente para fundir o arame de Ø1,0 mm com penetração total à velocidade de solda de 4,0 m/min.

A primeira alternativa foi alterar a bitola do arame para Ø0,8 mm, mantendo a especificação do arame, ER70S-6. Dessa forma, no teste 3.4 utilizaram-se os mesmos parâmetros que anteriormente. A mudança do arame resolveu o problema de arame colado, porém, como havia menos material sendo depositado, o cordão de solda não apresentou penetração total em alguns pontos e não gerou reforço na face superior.

No próximo teste aumentou-se a velocidade de alimentação de arame para 4,5 m/min, mantendo a potência de 5,5 kW, resultando em uma solda côncava na face superior e permanecendo a falta de penetração em alguns pontos, principalmente onde a junta tinha um pequeno desalinhamento (*high-low*) entre as chapas. Desse modo, no corpo de prova 3.6 aumentou-se a potência para 6,0 kW, mantendo demais parâmetros, cujo resultado foi uma solda com bom aspecto visual, reforço superior adequado para solda a *laser* e penetração total, conforme figura 15.

Figura 15 – Corpo de Prova 3.6

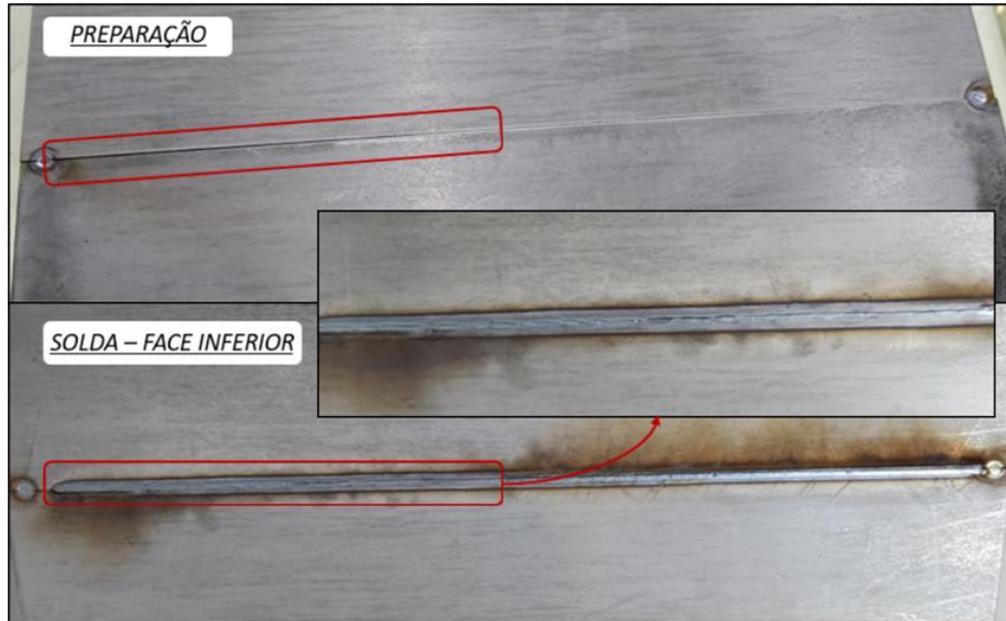


Fonte: Autor (2023).

Outro fator, observado no corpo de prova 3.6, foi a sensibilidade da soldagem a *laser* ao desalinhamento (*high-low*) entre as chapas, conforme ilustrado na figura 16. O início da junta apresentou desnivelamento, o que gerou instabilidade na raiz da solda. Já com a junta nivelada, a raiz da junta ficou estável, conforme observa-se na figura 15, face inferior.

Com o objetivo de avaliar a sensibilidade da soldagem a *laser* em juntas com *gap*, foi realizada a soldagem com os mesmos parâmetros do corpo de prova 3.6 em uma junta com 0,5 mm de *gap*, o que resultou em um cordão de solda com falta de material na face superior, gerando uma solda côncava, conforme figura 17. Para esse corpo de prova houve dificuldade para realizar o ponteamto, sendo necessário aplicar de dois a três feixes em um mesmo local para efetuar-lo.

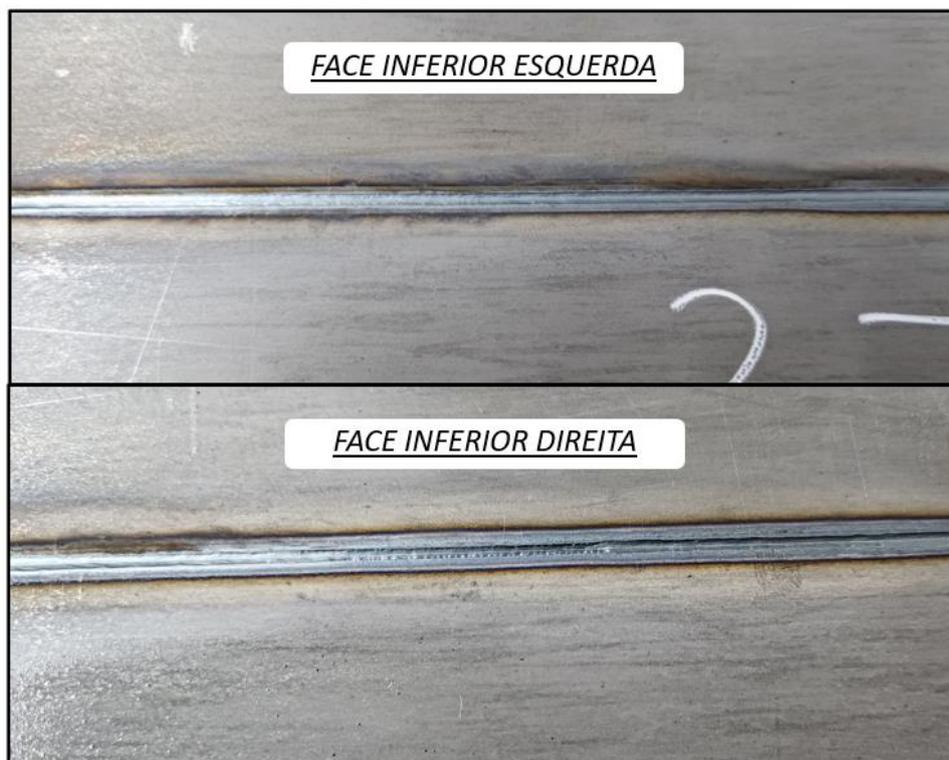
Figura 16 – Corpo de Prova 3.6 - Desalinhamento



Fonte: Autor (2023).

O máximo *gap* indicado para soldagem a *laser* é a metade do diâmetro da fibra óptica. Sabendo-se que a fibra utilizada na célula robotizada foi de 0,6 mm, o *gap* indicado seria de 0,3 mm, o que justifica certa dificuldade em uma junta com *gap* de 0,5 mm.

Figura 17 – Corpo de Prova 3.7



Fonte: Autor (2023).

Com a finalização dos testes nos corpos de prova, a próxima etapa foi dos ensaios de resistência a tração e análise de macroestrutura no Laboratório de Mecânica (LAMEC) na UCS.

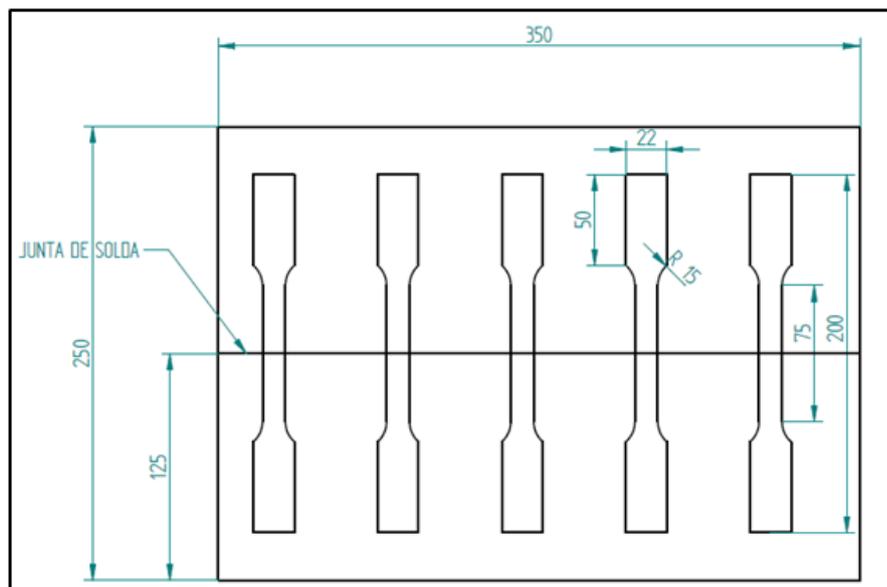
Para o teste de resistência a tração foram selecionados os melhores resultados obtidos dos três processos citados anteriormente, sendo eles:

- a) processo de soldagem híbrido: 2.10 e 2.11;
- b) processo de soldagem ao arco elétrico: 1.13;
- c) processo de soldagem *laser*: 3.6 e 3.7.

Definidos os corpos de prova, atendeu-se a geometria e dimensões, conforme norma NBR 6673. Como a espessura do material é menor que 5 mm, foi utilizada a largura da seção útil com 15 mm e o comprimento de 75 mm; a largura da cabeça foi de 22 mm e o comprimento 50 mm, totalizando um corpo de prova com 200 mm. Os ensaios foram realizados conforme norma ASME seção IX QW-150/2017.

Na figura 18 é possível observar a representação dos corpos de prova distribuídos nas chapas soldadas, onde foram extraídos cinco corpos de prova por chapa. Também, foram retiradas uma amostra por chapa, entre os corpos de prova, para realizar a macrografia, com o objetivo de avaliar a qualidade da solda obtida para cada cordão efetuado, e buscar possíveis defeitos de soldagem, como: porosidades, mordeduras e falta de penetração.

Figura 18 – Representação dos Corpos de Prova



Fonte: Autor (2023).

A macrografia é feita por uma sequência de lixamentos da face a ser analisada, com lixas de granulometria 120, 320, 400 e 600, para depois polir com pasta de diamante. Por último, realiza-se o ataque químico com Nital 2%. A análise é feita em amplitudes de até 40x.

Após resultados satisfatórios nos corpos de prova, o próximo passo foi replicar os resultados diretamente nos reservatórios. Com o objetivo de reduzir o consumo de peças, foram realizados os primeiros testes de forma fracionada nos cordões de solda. A fim de buscar resultados assertivos, foi realizado um primeiro conjunto de testes em cinco reservatórios e apresentado ao cliente.

O cliente optou por realizar o teste destrutivo e o de estanqueidade com os melhores resultados dos primeiros testes. Por meio da pressurização do reservatório a 22,5 bar, o teste de estanqueidade verifica a existência ou não de vazamentos, com auxílio de um manômetro. Se a pressão se manter constante por um tempo pré-definido o reservatório está aprovado, porém se houver perda de pressão, o reservatório está reprovado.

O teste destrutivo consiste em aplicar pressão no reservatório até ocasionar a falha. O modelo de reservatório testado tem uma pressão de trabalho de até 15 bar, mas por questões de segurança, utiliza-se 22,5 bar para validação de produção em série e, para análise amostral ou mudança de processo, solicita-se no mínimo 75 bar para ser aprovado no teste destrutivo. Com o objetivo melhorar os resultados, o cliente enviou mais cinco reservatórios para finalização dos testes.

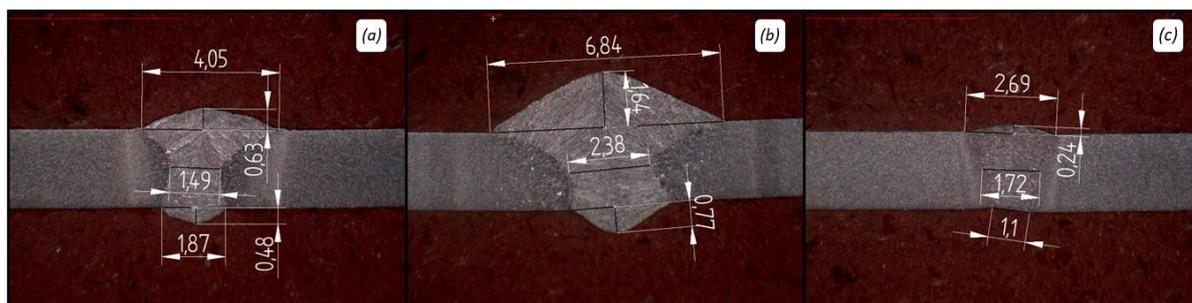
## 4 RESULTADOS

Nesse capítulo são abordadas as análises dos resultados obtidos, separados em macrografia e ensaio a tração, que foram realizados pelo Laboratório de Ensaio Mecânico (LAMEC/UCS), bem como os testes nos reservatórios de ar, efetuados na empresa Powermig.

### 4.1 MACROGRAFIA

A macrografia das amostras de cada cordão de solda apresentou os resultados esperados. O cordão de solda HLAW (*Hybrid Laser-Arc Welding*) sem *gap*, corpo de prova 2.10, conforme figura 19 (a), apresentou uma geometria em forma de cálice, com a parte superior mais larga e a parte inferior mais estreita, confirmando geometria comum gerada pelo processo híbrido, descrito no capítulo 2.3. Obteve-se um bom reforço superior e inferior, sendo a altura na face de 0,63 mm e na raiz de 0,48 mm, atendendo aos requisitos do projeto. A altura na face superior está num limite aceitável, visto que, na secção analisada, a junta não apresentou desalinhamento e *gap*. O cordão de solda não apresentou defeitos, como mordedura e porosidade.

Figura 19 – Macrografia solda HLAW, GMAW e LBW



Fonte: Autor (2023).

Nota: (a) Solda HLAW sem *gap*; (b) Solda GMAW *gap* 0,5 mm; (c) Solda LBW sem *gap*

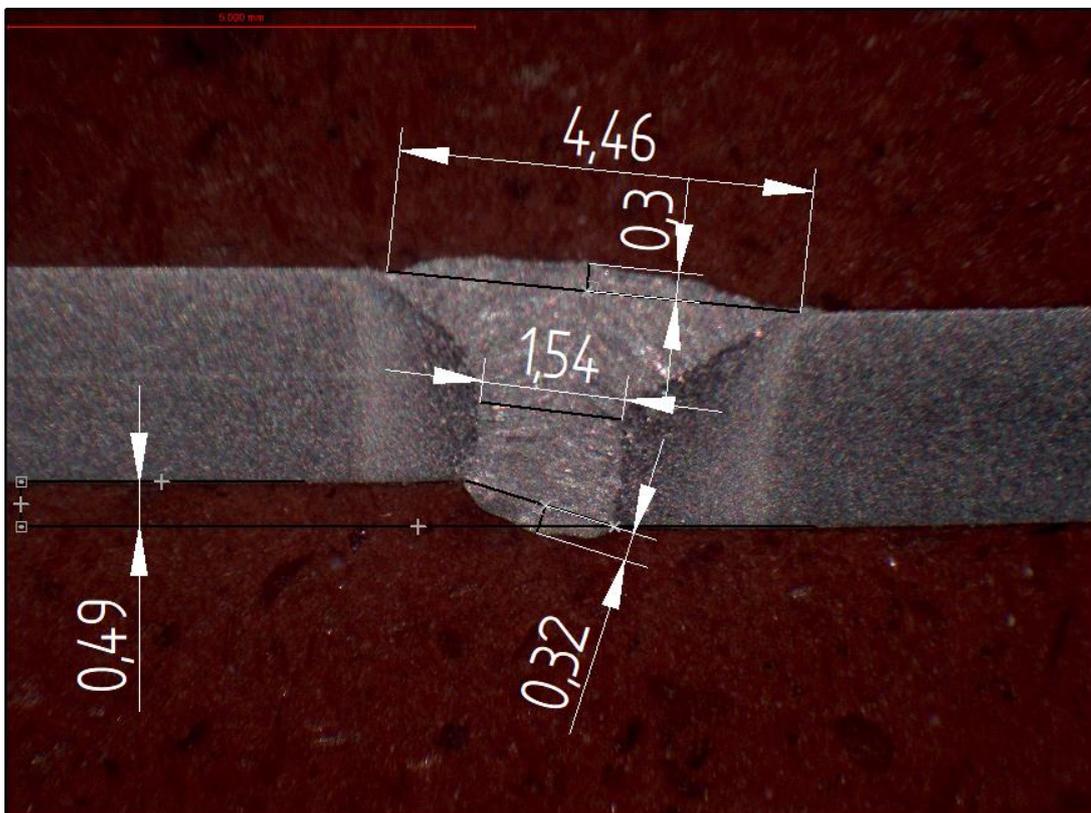
Conforme esperado, comparado com o processo HLAW (*Hybrid Laser-Arc Welding*) em sua melhor condição, sem *gap*, a junta de solda gerada pelo processo GMAW (*Gas Metal Arc Welding*) apresentou maior largura e altura do cordão. Obteve-se um aumento 69% na largura da face superior, 60% na largura interna, 160% no reforço superior e 60% no reforço inferior. Conforme figura 19 (b), o reforço inferior foi de 0,77 mm (acima dos 0,5 mm solicitado), sendo necessário realizar alguns ajustes posteriores, nos parâmetros, para reduzir esse valor. A largura e altura do reforço superior mostraram-se excessivas, porém essa

geometria é comum no processo GMAW (*Gas Metal Arc Welding*). O cordão de solda não apresentou defeitos de solda.

Conforme figura 19 (c), a solda realizada pelo processo *laser*, em uma junta sem *gap*, resultou em uma menor altura e largura do cordão em relação ao processo híbrido. Obteve-se uma redução de 34% na largura da face e 62% na altura do reforço superior, e a largura interna da solda apresentou um aumento de 15%. A solda teve penetração total, mas com reforço inferior próximo a zero, não apresentou defeitos de solda.

A macrografia do corpo de prova 2.11, junta com *gap* de 0,5 mm soldada com os mesmos parâmetros da junta sem *gap* revelou uma junta de solda com desalinhamento entre as chapas de 0,49 mm; a junta apresentou menor reforço superior e inferior, porém com maior largura. O cordão de solda também não apresentou defeitos de solda como mordedura e porosidade. Apesar das alterações em relação à junta sem *gap*, mesmo a junta de solda contendo irregularidades, também estaria aprovada, já que apresentou um reforço superior próximo ao objetivo de 0,5 mm, penetração total ao longo de todo o cordão, reforço na raiz menor que o limite solicitado e sem defeitos de solda.

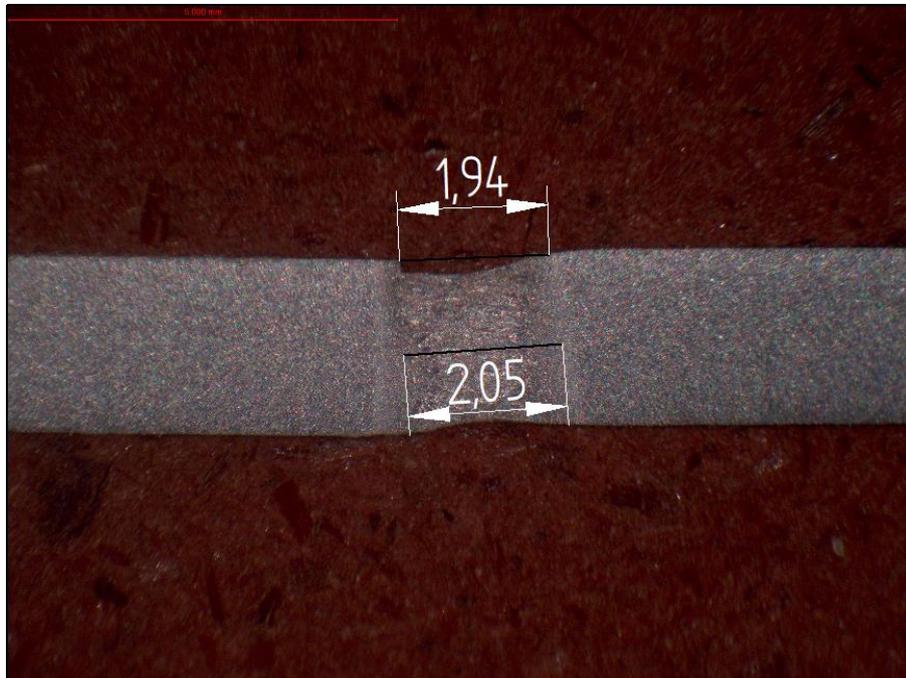
Figura 20 – Macrografia solda HLAW – *gap* 0,5 mm



Fonte: Autor (2023).

A figura 21 ilustra a macrografia do corpo de prova 3.7, soldado com os mesmos parâmetros do corpo de prova 3.6, porém com *gap* de 0,5 mm. A solda apresentou falta de material na face superior e inferior, gerando depressão em ambos os lados, a redução da seção e a falta de preenchimento resultam em um concentrador de tensões. Na face superior esquerda observa-se a lateral do metal base sem a diluição com o metal de solda, provocando um canto vivo na junta de solda. Com esse teste, comprovou-se a sensibilidade do processo *laser*, que para um bom resultado, necessita de uma junta com preparo sem *gap* e sem desnivelamento entre as chapas.

Figura 21 – Macrografia solda LBW – *gap* 0,5 mm



Fonte: Autor (2023).

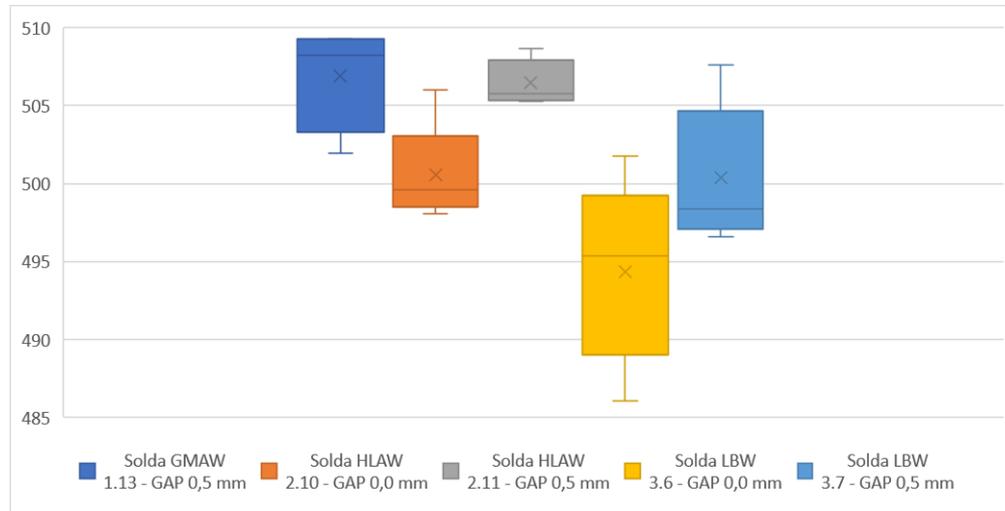
## 4.2 ENSAIO DE TRAÇÃO

Através dos valores obtidos por meio do relatório de tração, foi possível gerar uma tabela comparativa da resistência à tração dos diferentes processos de soldagem, com o objetivo de analisar a resistência suportada em relação a área da seção.

Através do gráfico representado na figura 22, é possível verificar que os valores de tensão ficaram próximos a 500 MPa. De acordo com o relatório, todas as rupturas ocorreram

no metal base, afirmando que a resistência da solda e da zona termicamente afeta (ZTA) estava superior ao do material.

Figura 22 – Gráfico Comparativo da Resistência a Tração



Fonte: Autor (2023).

Conforme tabela 4, todos os processos apresentaram uma boa repetibilidade de resultados, sendo, o corpo de prova 2.11 com o menor desvio padrão de 1,4 MPa, representando cerca de 0,28% da média das tensões máximas respectivas. O corpo de prova 3.6 foi o que apresentou maior desvio padrão, 5,8 MPa, cerca de 1,18% da média das tensões máximas correspondentes, possivelmente em decorrência da instabilidade do cordão de solda.

Tabela 4 – Comparativo de Resultados de Resistência a Tração

|                                  | <b>GMAW<br/>CP 1.13<br/>Gap 0,5 mm</b> | <b>HLAW<br/>CP 2.10<br/>Sem gap</b> | <b>HLAW<br/>CP 2.11<br/>Gap 0,5 mm</b> | <b>LBW<br/>CP 3.6<br/>Sem gap</b>  | <b>LBW<br/>CP 3.7<br/>Gap 0,5 mm</b> |
|----------------------------------|--|-------------------------------------|--|------------------------------------|--------------------------------------|
| <b>Identificação</b>             | <b>Tensão<br/>Máxima<br/>(MPa)</b>     | <b>Tensão<br/>Máxima<br/>(MPa)</b>  | <b>Tensão<br/>Máxima<br/>(MPa)</b>     | <b>Tensão<br/>Máxima<br/>(MPa)</b> | <b>Tensão<br/>Máxima<br/>(MPa)</b>   |
| <b>CP 1</b>                      | 509                                    | 499                                 | 507                                    | 486                                | 498                                  |
| <b>CP 2</b>                      | 509                                    | 506                                 | 506                                    | 492                                | 498                                  |
| <b>CP 3</b>                      | 502                                    | 498                                 | 505                                    | 497                                | 502                                  |
| <b>CP 4</b>                      | 507                                    | 500                                 | 509                                    | 502                                | 497                                  |
| <b>CP 5</b>                      | -                                      | 500                                 | 505                                    | 495                                | 508                                  |
| <b>Média - Tensão<br/>Máxima</b> | <b>507</b>                             | <b>501</b>                          | <b>506</b>                             | <b>494</b>                         | <b>500</b>                           |
| <b>Desvio Padrão</b>             | <b>3,4</b>                             | <b>3,1</b>                          | <b>1,4</b>                             | <b>5,8</b>                         | <b>4,5</b>                           |

Fonte: Autor (2023).

Nota: CP: Corpo de prova

Um resultado inesperado ocorreu com o corpo de prova 3.7, na solda realizada pelo processo *laser*, em uma junta com *gap* de 0,5 mm. Mesmo havendo falta de material na junta, e não apresentando reforço na raiz, obteve-se uma resistência semelhante as demais, entretanto apresentou o segundo maior desvio padrão, proveniente possivelmente da instabilidade ao longo do cordão de solda. Apesar da resistência a tração semelhante, é provável que, ao realizar um ensaio de dobramento ou fadiga, por exemplo, esse corpo de prova colapse em menor tempo que os demais.

Importante enfatizar que as soldas realizadas pelo processo híbrido e *laser*, apesar de terem uma largura consideravelmente menor, apresentaram uma resistência a tração semelhante à solda realizada pelo processo GMAW (*Gas Metal Arc Welding*).

O ensaio de dobramento e/ou fadiga seriam interessantes para a continuidade do estudo buscando avaliar e comparar o comportamento dos diferentes perfis de solda gerados. Dessa forma, os estudos para implantação do processo de soldagem HLAW (*Hybrid Laser-Arc Welding*) estaria mais completo, avaliando mais variáveis e obtendo maior segurança na utilização em outros produtos que requerem esse tipo de junta soldada.

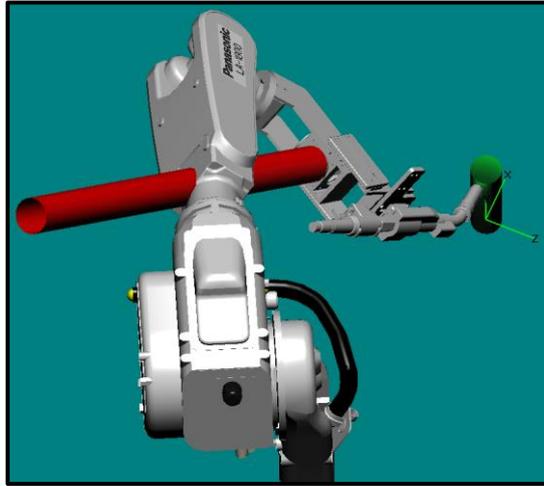
#### 4.3 RESERVATÓRIOS DE AR

Devido a questões de acesso do conjunto tocha mais cabeçote laser, tornou-se difícil soldar as conexões com os recursos disponíveis. Conforme figura 6, para manter a geometria do cordão, a tocha GMAW (*Gas Metal Arc Welding*) precisa estar sempre a frente do cabeçote *laser*, no sentido da solda. Para efetuar a circunferência completa, há limitação dos eixos do robô ou interferência dos cabos do cabeçote e tocha com o braço robótico. Problema semelhante ocorre no processo robotizado de soldagem TIG com adição de material.

Na figura 23 é possível verificar em uma simulação de acesso *off-line* das conexões (cilindro verde), que ao tentar finalizar o cordão de solda ocorre a colisão dos cabos do cabeçote *laser* (cilindro vermelho) com o braço robótico.

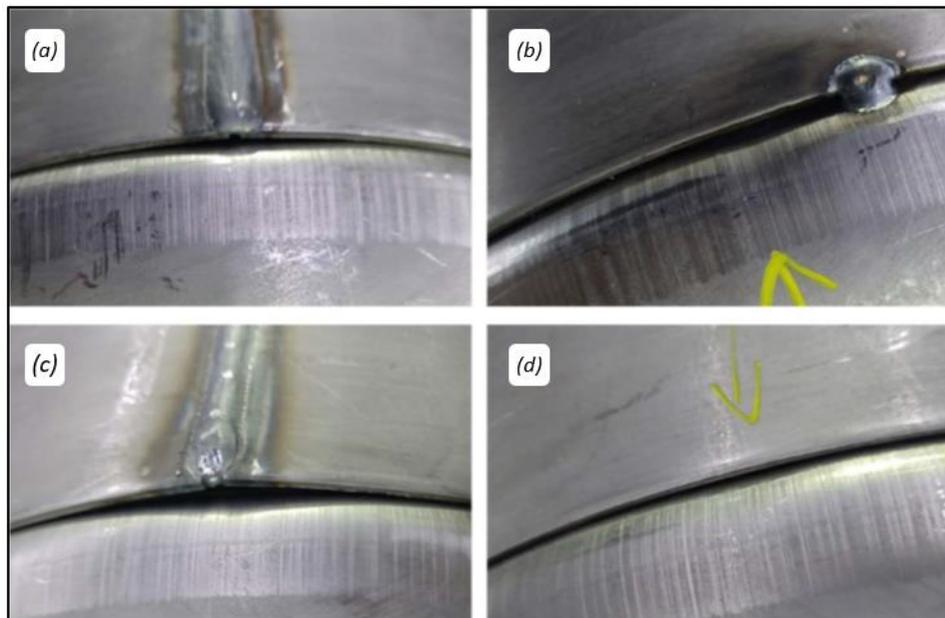
Para solução do problema, seria necessário um sétimo eixo no punho do braço robótico realizando a rotação da tocha GMAW (*Gas Metal Arc Welding*) ao redor do cabeçote *laser*, semelhante às soluções já existentes para solda TIG (*Tungsten Inert Gas*) robotizada. Como a solda das conexões representam menor volume de solda que as demais, o indicado é realizar a soldagem em um processo posterior, utilizando somente o arco elétrico.

Figura 23 – Simulação de acesso das conexões



Fonte: Autor (2023).

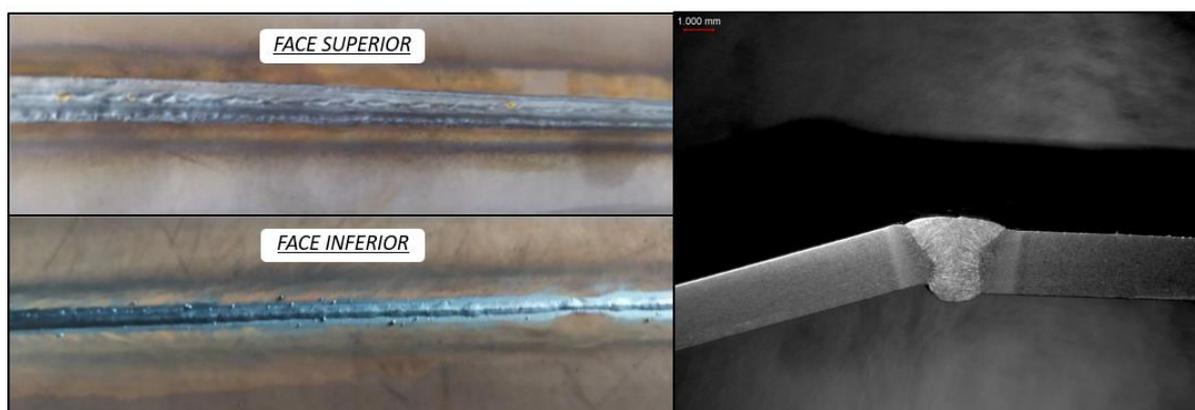
Conforme figura 24, algumas peças apresentaram variação de *gap* na junta da calota externa. O indicado para a produção em série é a construção de um dispositivo em que seja realizada a soldagem diretamente na célula, sem o processo de ponteamento, com o objetivo de garantir a posição dos componentes e a fixação durante a soldagem. Eliminar a etapa de ponteamento tornará o processo mais produtivo, além de eliminar possíveis interferências que os pontos de solda possam gerar nos cordões.

Figura 24 – Variação de *gap*

Fonte: Autor (2023).

Nos primeiros cinco reservatórios foram realizados treze testes de parâmetros na solda longitudinal, observando-se que as juntas do corpo do reservatório apresentaram alguns desalinhamentos, sendo um ponto de dificuldade. Contudo, conforme figura 25, foi possível obter a uma velocidade de solda de 3,5 m/min, penetração total, com regularidade na face e na raiz do cordão, sendo necessário melhorar o aspecto visual da solda. Os parâmetros escolhidos no capítulo três se mantiveram os mesmos, com exceção da alimentação do arame, que foi utilizada a padrão sugerida pela fonte de solda, velocidade de 13,3 m/min, com o objetivo de entregar o menor cordão de solda possível, visando a redução de custo de arame de solda. A alteração foi feita com o objetivo de entregar o mínimo cordão de solda possível, visando maximizar a redução de custos de arame de solda.

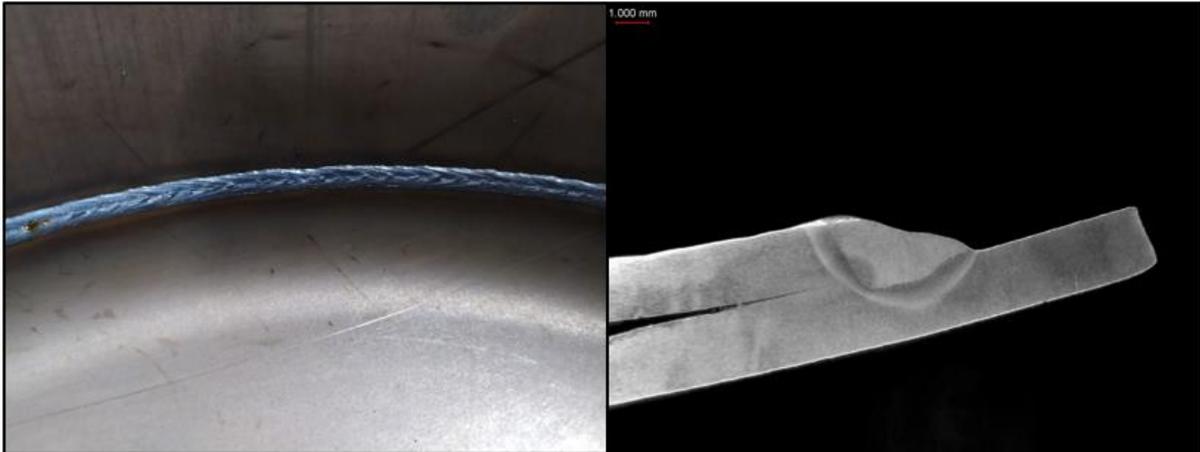
Figura 25 – Solda Longitudinal



Fonte: Powermig (2023).

Foram realizados seis testes de parâmetros na solda circunferencial. Como esse tipo de junta é diferente da solda longitudinal, foi necessário alterar os parâmetros. O melhor resultado obtido foi na posição descendente com auxílio do posicionador de giro, utilizando a potência de 2,5 kW, corrente de 220A e velocidade de solda de 3,5 m/min, sendo que os demais parâmetros foram mantidos como sigilo do processo. Conforme figura 26, o resultado foi um cordão com penetração parcial, boa largura e sem defeito de mordedura.

Figura 26 – Solda Circunferencial Interna



Fonte: Powermig (2023).

Os testes realizados na circunferencial interna atenderam parcialmente os requisitos da aplicação. Conforme figura 27, foram encontradas porosidades nas regiões de fechamento de arco e nas regiões de sobreposição sobre o ponto de solda da etapa de ponteamento. Uma das hipóteses é de que tenha permanecido óleo, da operação de conformação, retido entre as chapas da calota e do corpo do reservatório.

Figura 27 – Defeitos Solda Circunferencial Interna



Fonte: Powermig (2023).

Nota: (a) Porosidade sobre ponto de solda; (b) Porosidade sobre fechamento de arco.

Para a solda da calota externa fez-se necessário testes de vinte e sete parâmetros diferentes para chegar a uma condição próxima da ideal. O teste que apresentou melhor resultado ocorreu na posição descendente, a uma velocidade de solda 3,5 m/min, com 3,5 kW de potência e 220A. O cordão apresentou estabilidade, com boa penetração e largura, porém, conforme figura 28, formou uma depressão da face superior da solda, proveniente da falta de metal de adição em relação à alta velocidade de soldagem, além de um princípio de mordedura. Com o objetivo de eliminar a depressão, alguns dos testes foram realizados com uma corrente

e velocidade de alimentação do arame maior, porém apresentaram início de mordedura em alguns pontos.

Figura 28 – Solda Circunferencial Externa



Fonte: Autor (2023).

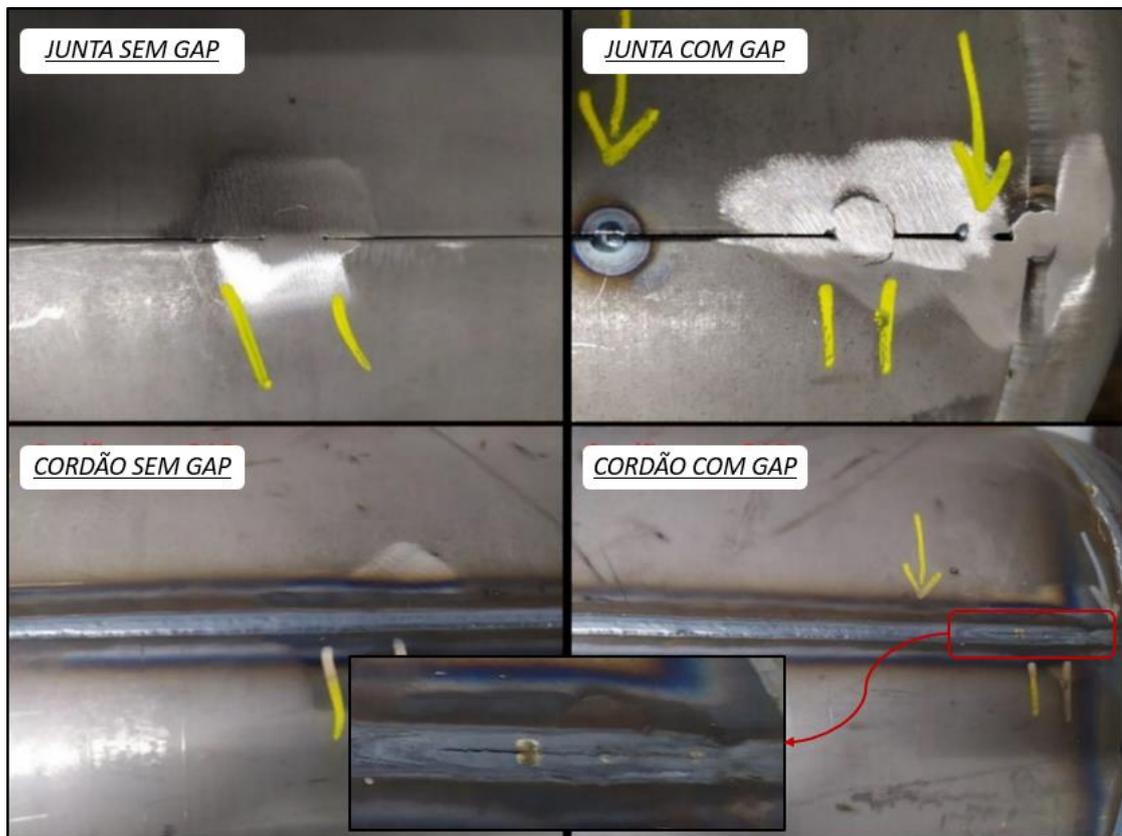
Nota: (a) Depressão; (b) Mordedura.

Na região da junta de topo, o corpo do reservatório apresenta uma variação de geometria devido à operação de calandragem, gerando variação do *gap* ao longo da junta de solda conforme ilustrado na figura 24 (c). Observou-se a presença de porosidade em uma das peças, além de variações na geometria do cordão devido às variações de formato da junta.

Os melhores resultados foram apresentados ao cliente para uma análise inicial, que solicitou para aumentar, em todas as juntas, a razão entre a altura pela largura do cordão. Na solda longitudinal também solicitou aumentar o reforço na face superior com o objetivo de passar a impressão de maior robustez para o cliente final, mesmo a solda atual atendendo aos requisitos. Para a solda interna foi solicitado eliminar os defeitos de porosidade e melhorar a emenda final do cordão, visto que o cliente informou que, no processo atual, os reservatórios são soldados sem defeitos, mesmo com resquícios de óleo. E para a solda externa é necessário resolver o problema de depressão na face superior.

Cliente optou por submeter três reservatórios soldados completamente ao teste destrutivo e de estanqueidade, em ambos, todos foram aprovados.

Um dos reservatórios testados continha uma retração na face superior, no final da solda longitudinal, semelhante ao observado na figura 29, para esse reservatório a falha ocorreu na região da retração a uma pressão de 90 bar, ultrapassando a pressão solicitada de 75 bar. Nos demais reservatórios, a falha ocorreu na região do material base com uma pressão acima de 90 bar, comprovando a resistência das soldas efetuadas.

Figura 29 – Influência do *gap*

Fonte: Powermig (2023).

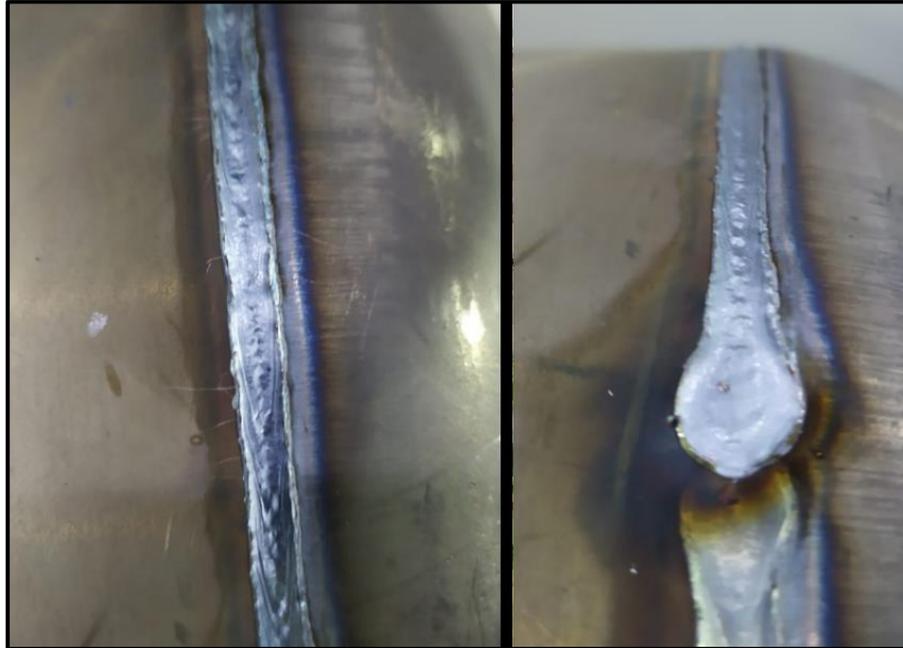
Na segunda etapa, testes nos outros cinco reservatórios enviados posteriormente, conseguiu-se atender aos requisitos do cliente na solda longitudinal, a uma velocidade de solda de 3,5 m/min e, como o objetivo era incrementar o reforço superior, aumentou-se a corrente para 240A, tensão para 26,8V e velocidade de alimentação de arame para 16 m/min. Dessa forma, foi possível depositar mais material na parte superior da junta de solda, alcançando o aumento do reforço superior necessário e mantendo-se o reforço na raiz abaixo dos 0,5 mm.

A variação de *gap* nas juntas longitudinais afetou a geometria dos cordões de solda. Conforme figura 29, observa-se um maior *gap* no final da junta, que foi responsável por gerar uma retração na região central da face superior do cordão de solda. Para não alterar a geometria do cordão e obter uma solda mais uniforme, com bom aspecto visual em todo seu comprimento, é essencial uma junta com *gap* mais estável.

Descobriu-se que o defeito de porosidade gerado era proveniente da falta de vazão do gás de proteção, pois ao aumentar a vazão de gás em conjunto com ponteamto menores, foi possível estabilizar a solda circunferencial interna.

Na solda circular externa, através do aumento da corrente para 260A, alinhado com o aumento da velocidade de alimentação de arame e redução da inclinação da tocha, obteve-se um cordão de solda com bom reforço superior e uma emenda final do cordão adequada, conforme figura 30. A velocidade de solda se manteve igual, 3,5 m/min.

Figura 30 – Solda Longitudinal Externa Final



Fonte: Autor (2023).

## 5 CONCLUSÃO

De acordo com o desenvolvimento do presente trabalho e com os dados obtidos, conclui-se que é possível realizar a substituição do processo de soldagem GMAW (*Gas Metal Arc Welding*) pelo processo HLAW (*Hybrid Laser-Arc Welding*) em reservatórios de ar, desde que se mantenha a repetibilidade da preparação da junta, com o *gap* o mais uniforme possível e abaixo de 0,5 mm. Para um melhor resultado, também é necessário que as chapas fiquem alinhadas, tendo um limite de 0,5 mm de desalinhamento.

Através dos diversos testes efetuados, foram obtidos parâmetros que atenderam aos requisitos iniciais. A velocidade de solda em todas as juntas foi de 3,5 m/min, 250% a mais em relação ao melhor conjunto de parâmetros encontrado na solda ao arco elétrico. Obteve-se penetração total na solda de topo, com reforço na raiz de 0,48 mm na condição sem *gap* e 0,32 mm na condição com *gap* de 0,5 mm; o reforço superior também atingiu os valores requisitados.

Os três reservatórios testados suportaram uma pressão superior a 90 bar, acima da pressão de 75 bar solicitada. Dessa forma, o processo proposto teve êxito no teste destrutivo e de estanqueidade, mesmo que os parâmetros utilizados nesse reservatório ainda tiveram melhorias posteriormente.

O teste de resistência a tração revelou que mesmo com geometrias diferentes, as soldas efetuadas pelos processos híbrido e *laser* obtiveram valores semelhantes a solda ao arco elétrico, os corpos de prova soldados através dos três processos distintos suportaram uma tensão próxima a 500 MPa. Comprovou-se a alta sensibilidade com a preparação de junta ao soldar com o processo *laser*, apresentando falhas em uma junta com *gap* de 0,5 mm, considerando parâmetros definidos para uma junta sem *gap*. Entretanto, o processo híbrido conseguiu absorver essas variações de *gap*, qualificando-o como um processo mais flexível com relação à preparação de junta que o processo *laser*. Conforme previsto, o processo GMAW (*Gas Metal Arc Welding*) ainda se mantém com o maior poder de absorção de variação na junta de solda, comparado aos outros dois processos.

O alto ganho produtivo alcançado com a alta velocidade de soldagem resulta em uma redução de mão de obra, além de uma diminuição considerável de metal de adição e gás de proteção. Esses fatores, alinhados com menor tempo de produção, podem auxiliar na viabilidade de implantar um sistema robotizado híbrido, que necessita de um valor agregado cerca de 3,5 vezes maior que o processo ao arco elétrico convencional.

Com o objetivo de avaliar a viabilidade financeira da implementação do processo proposto, sugere-se como sequência do presente trabalho uma análise aprofundada sobre a redução de custo de produção do reservatório com o novo processo em comparação ao processo atual.

Outra sugestão para a sequência do trabalho, seria realizar o comparativo da resistência mecânica ao dobramento e a fadiga de corpos de prova soldados com o processo HLAW, GMAW e, se possível, o processo *laser*. Dessa forma, pode-se avaliar em outros tipos de produtos, uma substituição do processo convencional pelos novos processos, como também, ampliar o conhecimento e domínio dessas novas tecnologias.

## REFERÊNCIAS

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **Produtos planos de aço - Determinação das propriedades mecânicas à tração: método de ensaio**. Rio de Janeiro: ABNT, 1981. 14 f.

ACHERJEE, Bappa, Hybrid laser arc welding: State-of-art review. **Optics and Laser Technology**, Mesra, v. 99, p. 60-71, 1 fev. 2018.  
<https://doi.org/10.1016/j.optlastec.2017.09.038>

BARBETTA, Luiz Delagnelo. **Application of the High-Current Spray Transfer Buried Arc in Hybrid Laser-Arc Welding**. 2019. Tese (Doutorado em Engenharia Mecânica) – Universidade Federal de Santa Catarina. Florianópolis, 2019.

BUNAZIV, I.; AKSELSEN, O.M.; REN, X.; NYHUS, B.; ERIKSSON, M. Laser. Beam and Laser-Arc Hybrid Welding of Aluminium Alloys. **Metals**, v. 11(1150), 21 jul. 2021.  
<https://doi.org/10.3390/met11081150>

CHURIAQUE, C.; SÁNCHEZ-AMAYA, J.M.; ÜNSTÜNDAĞ, Ö.; PORRUA-LARA, M.; GUMENYUK, A.; RETHMEIER, M. Improvements of hybrid laser arc welding for shipbuilding T-joints with 2F position of 8 mm thick steel. **Optics & Laser Technology**, Cádiz, v. 143 (107284), 5 jun. 2021. <https://doi.org/10.1016/j.optlastec.2021.107284>

FERNANDES, C.A.; DO VALE, N.L.; DE ABREU SANTOS, T.F; et al. **Investigation of transverse shrinkage and angular distortion caused by hybrid laser-arc welding**. Int J Adv Manuf Technol 107, 4705–4711 (2020). <https://doi.org/10.1007/s00170-020-05343-5>

HAXUAN, Huan; PEILEI, Zhang; HUA, Yan; ZHENGJUN, Liu; ZHISHUI, Yu; DI, Wu; HAICHUAN, Shi; YINGTAO, Tian. Research on weld formation mechanism of laser-MIG arc hybrid welding with butt gap. **Optics & Laser Technology**, Shanghai, v. 133 (106530), jan 2021. <https://doi.org/10.1016/j.optlastec.2020.106530>

NADZAM, Jeff (ed). **GMAW Welding Guide**, Gas Metal Arc Welding: Carbon, Low Alloy, and Stainless Steel and Aluminium. Cleveland, OH: Lincoln Electric, 2006.

POPRAWA, Reinhart. **Tailored Light 2: Laser Application Technology**. 1. ed. Berlin: Springer, 2011.

SILVA, Rafael Gomes Nunes. **Desenvolvimento e avaliação do processo de soldagem híbrida laser-gmaw (hlaw): um avanço na consolidação de processos de soldagem de alta penetração**. 2020. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) – Universidade Federal de Santa Catarina. Florianópolis, 2020.

TOWER PARTS. 51713.png, 2018, 2 imagens, 1476x1476 pixels. Disponível em: <<https://towerparts.com.br/shop/ar/tanque-de-ar-15/>>. Acesso em: 25 de junho de 2023.

TURICHIN, G.; KUZNETSOV, M.; TSIBULSKIY, I.; FIRSOVA, A.; Hybrid Laser-Arc Welding of the High-Strength Shipbuilding Steels: Equipment and Technology. **Physics Procedia**, Aalborg, v. 89, p. 156-163, ago. 2017. <https://doi.org/10.1016/j.phpro.2017.08.005>.

UNISANTA. Capítulo 8: Soldagem MIG/MAG. Docplayer, 2015. Disponível em: <  
<https://tecnoblog.net/responde/referencia-site-abnt-artigos/>>. Acesso em: 06 de dezembro de 2023.

ZHAO, L.; SUGINO, T.; ARAKANE1, G.; TSUKAMOTO, S.; Influence of welding parameters on distribution of wire feeding elements in CO<sub>2</sub> laser GMA hybrid welding. **Science and Technology of Welding and Joining**, Japan, v. 14, n. 5, 5 mar. 2009