

**INSTITUTO FEDERAL DE EDUCAÇÃO
CIÊNCIA E TECNOLOGIA DO RIO GRANDE DO SUL
Campus Ibirubá**

IGOR BERTINATTO

TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO

Análise comparativa do processo produtivo e propriedades mecânicas resultantes dos processos de soldagem manual MIG/MAG e a LASER na união de chapas de aço com baixo teor de carbono para aplicação em máquinas agrícolas.

**Ibirubá
2024**

IGOR BERTINATTO

TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO

Análise comparativa do processo produtivo e propriedades mecânicas resultantes dos processos de soldagem MIG/MAG e a LASER na união de chapas de aço com baixo teor de carbono para aplicação em máquinas agrícolas.

Trabalho de Conclusão de Curso submetido à Banca Examinadora designada pelo Curso de Engenharia Mecânica do Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia, Campus Ibirubá, como requisito parcial à obtenção do título de Bacharel em Engenharia Mecânica.

Área de concentração: Soldagem

Orientador: Prof. Dr. Luciano Machado Cirino

Ibirubá

2024

Bertinatto, Igor

Análise comparativa do processo produtivo e propriedades mecânicas resultantes dos processos de soldagem MIG/MAG e a LASER na união de chapas de aço com baixo teor de carbono para aplicação em máquinas agrícolas. / Igor Bertinatto

Orientador: Prof. Dr. Luciano Machado Cirino

Monografia (graduação) – Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Rio Grande do Sul, Campus Ibirubá, Curso de Graduação em Engenharia Mecânica, Ibirubá 2024.

Soldagem, LASER, MIG/MAG, Comparação, Processo.

Análise comparativa do processo produtivo e propriedades mecânicas resultantes dos processos de soldagem MIG/MAG e a LASER na união de chapas de aço com baixo teor de carbono para aplicação em máquinas agrícolas.

Igor Bertinatto

Trabalho de Conclusão de Curso submetido à Banca Examinadora designada pelo Curso de Engenharia Mecânica do Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia, Campus Ibirubá, como requisito parcial à obtenção do título de Bacharel em Engenharia Mecânica.

Ibirubá, 16 de dezembro de 2024.

Banca Examinadora:

Prof.(orientador) Dr. Luciano Machado Cirino

IFRS campus Ibirubá

Prof. Me. Bruno Nonemacher

IFRS campus Ibirubá

Prof. Dr. Cristiano Kulman

IFRS campus Ibirubá

AGRADECIMENTOS

Agradeço primeiramente a Deus, por me conceder saúde, força e sabedoria ao longo de toda a jornada acadêmica. Sem sua presença em minha vida, este trabalho não teria sido possível.

Aos meus pais, pelo apoio em todos os momentos e pelos ensinamentos que me guiaram até aqui.

Ao meu orientador, pela dedicação e pelos ensinamentos importantes compartilhados durante o desenvolvimento deste trabalho. Sua orientação foi essencial para a realização deste projeto.

Agradeço também a todos os amigos, colegas de curso e professores que, de alguma forma, desenvolveram para minha formação acadêmica e pessoal.

A todos, meu sincero agradecimento.

RESUMO

Este estudo foi realizado em uma empresa situada na região do Alto Jacuí que produz máquinas e implementos agrícolas e recentemente adquiriu um equipamento de soldagem LASER manual e de baixa potência para uso em algumas aplicações dentro da empresa. Como esta versão do processo LASER é pouco conhecido e pouco utilizado na indústria em geral, surgiu a necessidade de se realizar um trabalho prospectivo com o intuito principal de identificar as características do processo, ou seja suas vantagens e desvantagens em relação a um processo bastante conhecido e já estabelecido dentro da empresa que é o MIG/MAG. Dito isto, este estudo visou comparar os processos de soldagem MIG/MAG e LASER (manual e de baixa potência) na soldagem de chapas de aço de baixo carbono e de pequena espessura, levando em consideração a viabilidade técnica e os benefícios de substituir ou complementar o processo atual (MIG/MAG) pelo LASER em aplicações específicas na produção de máquinas e implementos agrícolas dentro desta empresa. Para tanto, a pesquisa se valeu de ensaios mecânicos, ensaios não-destrutivos, abordou questões referentes à qualidade, custos, além de relatar diferenças técnicas e informações relacionadas à segurança, buscando sempre servir de apoio para a tomada de decisões sobre maiores investimento no processo LASER. De forma mais detalhada, foram realizados ensaios mecânicos (tração, dobramento e macrografia) ensaios não destrutivos (visual, líquido penetrante e radiografia) e apoiados por uma estimativa de custos com consumíveis (arame, gás de proteção e energia elétrica). Os resultados mostram que a soldagem a LASER se destaca pela maior velocidade de soldagem, menor deformação térmica, cordão livre de respingos e menor custo com consumíveis. Contudo, apresenta algumas limitações, como a dificuldade no preenchimento de lacunas, o maior custo de aquisição do equipamento, por entregar menor rigidez estrutural ao conjunto e pela ocorrência de microporosidades internas quando utilizado outro gás além do nitrogênio. Para a tomada de decisão, além dos aspectos puramente técnicos, há alguns condicionantes. Por exemplo, a empresa deverá considerar o tipo de aplicação, os requisitos de qualidade e os custos envolvidos na aquisição de novos equipamentos com diferentes características técnicas, treinamento de soldadores, questões de segurança e o tempo de adaptação, aspectos estes que estiveram fora do escopo deste trabalho. Contudo, do ponto de vista técnico, o LASER produz soldas de alta qualidade que passaram em todos os ensaios aos quais foram submetidos, com destaque especial para as soldagens com nitrogênio como gás de proteção. Os custos calculados para as soldagens com LASER foram, em sua maioria, menores em relação à soldagem com MIG/MAG. A única objeção vai para a questão de segurança no trabalho que terá que ser contornada com a aquisição de equipamentos específicos e treinamento dos soldadores, isto se empresa resolver investir neste processo no futuro.

Palavras chave: Soldagem. LASER. MIG/MAG. Comparação. processo.

ABSTRACT

This study was carried out at a company located in the Alto Jacuí region that produces agricultural machinery and implements and recently acquired a manual, low-power LASER welding machine for use in some applications within the company. As this version of the LASER process is little known and little used in industry in general, the need arose to carry out prospective work with the main aim of identifying the characteristics of the process, i.e. its advantages and disadvantages in relation to a process that is well known and already established within the company, which is MIG/MAG. That said, this study aimed to compare the MIG/MAG and LASER welding processes (manual and low-power) in the welding of low-carbon, thin steel plates, taking into account the technical feasibility and benefits of replacing or complementing the current process (MIG/MAG) with LASER in specific applications in the production of agricultural machinery and implements within this company. To this end, the research made use of mechanical tests, non-destructive tests, addressed issues relating to quality, costs, as well as reporting technical differences and safety-related information, always seeking to support decision-making on further investment in the LASER process. In more detail, mechanical tests were carried out (traction, bending and macrography), non-destructive tests (visual, liquid penetrant and radiography) and supported by a cost estimate for consumables (wire, shielding gas and electricity). The results show that LASER welding stands out for its higher welding speed, lower thermal deformation, spatter-free bead and lower consumables costs. However, it has some limitations, such as the difficulty in filling gaps, the higher cost of acquiring the equipment, the lower rigidity of the assembly and the occurrence of internal microporosity when using a gas other than nitrogen. When making a decision, in addition to purely technical aspects, there are a number of constraints. For example, the company will have to consider the type of application, quality requirements and the costs involved in acquiring new equipment with different technical characteristics, training welders, safety issues and adaptation time, all of which were outside the scope of this work. However, from a technical point of view, LASER produces high quality welds that have passed all the tests to which they have been subjected, with special emphasis on welding with nitrogen as a shielding gas. The costs calculated for LASER welding were, for the most part, lower than for MIG/MAG welding. The only objection is the issue of occupational safety, which will have to be overcome by acquiring specific equipment and training the welders, if the company decides to invest in this process in the future.

Key words: Welding. LASER. MIG/MAG. Comparison. process.

LISTA DE SIGLAS E ABREVIATURAS

ANSI – *American National Standards Institute*

ASTM – *American Society for Testing and Materials*

AWS – *American Welding Society*

CP – Corpo de Prova

CPL – Corpo de Prova soldado com processo LASER

CPM – Corpo de Prova soldado com processo MIG/MAG

CT – Condutividade Térmica

END – Ensaio Não Destrutivo

FBTS – Fundação Brasileira de Tecnologia da Soldagem

GMAW – *Gas Metal Arc Welding* (Soldagem MIG/MAG)

LASER – *Light Amplification by Stimulated Emission of Radiation*

LBW – *Laser Beam Welding* (Soldagem a LASER)

MIG/MAG – *Metal Inert Gas/Metal Active Gas*

PI – Potencial de Ionização

ZTA – Zona Termicamente Afetada

LISTA DE FIGURAS

| | |
|---|----|
| Figura 1 - Classificação em relação a fonte de energia | 16 |
| Figura 2 - Esquema da soldagem por fusão..... | 17 |
| Figura 3 - Processo básico de soldagem MIG/MAG..... | 18 |
| Figura 4 - Principais modos de transferência da soldagem MIG/MAG..... | 19 |
| Figura 5 - Produção do feixe LASER..... | 20 |
| Figura 6 - Sistema de soldagem a LASER | 21 |
| Figura 7 - Influência da velocidade na penetração para diferentes potências de LASER..... | 23 |
| Figura 8 - Modos de soldagem a LASER..... | 24 |
| Figura 9 - Fenômenos típicos da soldagem à LASER. (TRADUÇÃO DOS TERMOS)..... | 26 |
| Figura 10 – (a) Soldas realizadas com processo LASER usando N ₂ e Ar e; (b) Radiografias de solda LASER utilizando N ₂ e Ar. | 27 |
| Figura 11 - Comportamento da relação penetração-largura de acordo com o aumento da potência..... | 28 |
| Figura 12 - Ilustração das geometrias de cordões dos processos MIG/MAG e a LASER | 29 |
| Figura 13 - Tipos de exposição por reflexão do feixe de LASER..... | 31 |
| Figura 14 - Ilustração da sequência de ensaio de líquidos penetrantes | 33 |
| Figura 15 - Ilustração do ensaio de radiografia | 34 |
| Figura 16 - Representação do processo de ensaio de tração..... | 35 |
| Figura 17 - a) fratura altamente dúctil. b) fratura moderadamente dúctil. c) fratura frágil | 36 |
| Figura 18 - Ensaio de dobramento em um corpo de prova de aço | 37 |
| Figura 19 - Ilustração do ensaio de dobramento de face e de raiz..... | 37 |
| Figura 20 - Fluxograma experimental do estudo..... | 40 |
| Figura 21 - Máquina de corte a LASER Trumpf TruLASER 5030 | 42 |
| Figura 22 - Máquina de solda MIG/MAG modelo Speedtec | 45 |
| Figura 23 - Fonte de soldagem LASER manual com alimentador de arame. | 45 |
| Figura 24 - Tipos de abertura de raiz utilizadas nos processos | 46 |
| Figura 25 - Ilustração da aplicação do <i>backing</i> cerâmico | 47 |
| Figura 26 - Forma de fixação dos corpos de prova (junta de topo)..... | 47 |
| Figura 27 - Forma de fixação para soldagem dos corpos de prova (junta de ângulo)..... | 49 |
| Figura 28 - Kit de líquido penetrante..... | 50 |
| Figura 29 - Limpeza da descontinuidade e suas adjacências | 50 |

| | |
|---|----|
| Figura 30 - Penetração do líquido penetrante na descontinuidade | 51 |
| Figura 31 - Remoção do excesso de líquido penetrante | 51 |
| Figura 32 - Aplicação do revelador e aparecimento da indicação da descontinuidade..... | 51 |
| Figura 33 - Orientação para retirada de corpos de prova para ensaio de dobramento e tração para qualificação de procedimento pela norma AWS B2.1/B2.1M:2021. | 53 |
| Figura 34 - Dimensões das amostras para ensaio de tração e dobramento..... | 53 |
| Figura 35 - Corpos de prova de tração e dobramento após serem removidos..... | 54 |
| Figura 36 - Máquina universal de ensaios modelo RPM IWM 40 T. | 55 |
| Figura 37 - Corpos de prova soldados para o ensaio de radiografia..... | 57 |
| Figura 38 - Representação das dimensões de um cordão de solda | 60 |
| Figura 39 - Comparação visual dos cordões de solda a LASER e MIG/MAG..... | 63 |
| Figura 40 - Deformação nos corpos de prova | 64 |
| Figura 41 - Comparação do aspecto visual dos cordões de solda a LASER utilizando dois gases distintos..... | 65 |
| Figura 42 - Corpos de prova após a aplicação do revelador..... | 66 |
| Figura 43 - Macrografia da amostra CPL02..... | 67 |
| Figura 44 - Macrografia da amostra CPL05..... | 67 |
| Figura 45 - Macrografia da amostra CPL03 | 68 |
| Figura 46 - Macrografia da amostra CPL04..... | 68 |
| Figura 47 - Macrografia da amostra CPM02..... | 69 |
| Figura 48 - Macrografia da amostra CPM03..... | 69 |
| Figura 49 - Amostras submetidas ao ensaio de tração..... | 72 |
| Figura 50 - Amostras submetidas ao ensaio de dobramento. | 73 |
| Figura 51 - Resultados do ensaio de radiografia. | 74 |

LISTA DE TABELAS

| | |
|--|----|
| Tabela 1 - Potencial de ionização e condutividade térmica dos gases de proteção. Siglas: PI = potencial de ionização; CT = condutividade térmica | 26 |
| Tabela 2 - Composição química (% em peso) do material ensaiado..... | 41 |
| Tabela 3 - Propriedades mecânicas do material ensaiado | 41 |
| Tabela 4 - Propriedades mecânicas do arame ER70S-6 segundo norma AWS A 5.18..... | 42 |
| Tabela 5 - Composição química nominal do arame ER70S-6, segundo norma AWS A 5.18. | 42 |
| Tabela 6 - Identificação dos corpos de prova. Siglas: CPL = corpo de prova soldado com LASER; COM = corpo de prova soldado com MIG/MAG | 44 |
| Tabela 7 - Parâmetros de soldagem utilizados. | 46 |
| Tabela 8 - Parâmetros e gases de proteção utilizados na soldagem dos CPs. | 48 |
| Tabela 9 - Identificação dos corpos de prova soldados para os ensaios destrutíveis. Siglas: T = tração; DF = dobramento de face; DR = dobramento de raiz; CPL = corpo de prova para LASER e; CPM = corpo de prova para MIG/MAG | 54 |
| Tabela 10 - Informações sobre as condições de ensaios e procedimentos seguidos. | 56 |
| Tabela 11 - Informações e procedimentos seguidos para o ensaio de macrografia. | 56 |
| Tabela 12 - Dados utilizados para estimativa de custo..... | 58 |
| Tabela 13 - Custos dos consumíveis | 59 |
| Tabela 14 - Características geométricas e descontinuidades presentes em cada amostra. | 70 |
| Tabela 15 - Resultados obtidos das amostras submetidas a ensaio de tração..... | 71 |
| Tabela 16 - Relatório da identificação de descontinuidades e o laudo final. | 73 |
| Tabela 17 - Consumo e custo de arame, gás, e energia elétrica por metro de solda. | 75 |

SUMÁRIO

| | | |
|--------------|--|-----------|
| 1 | INTRODUÇÃO | 13 |
| 1.1 | JUSTIFICATIVA | 14 |
| 1.2 | OBJETIVOS | 15 |
| 1.2.1 | Objetivos específicos | 15 |
| 2 | REFERENCIAL TEÓRICO | 16 |
| 2.1 | SOLDAGEM | 16 |
| 2.1.1 | Soldagem MIG/MAG (GMAW) | 17 |
| 2.1.2 | Soldagem LASER (<i>Laser Beam Welding</i> ou <i>LBW</i>) | 20 |
| 2.1.3 | Gases de proteção | 25 |
| 2.2 | SOLDAGEM LASER (LBW) <i>VERSUS</i> SOLDAGEM MIG/MAG (GMAW) | 27 |
| 2.3 | ENSAIOS PARA QUALIFICAÇÃO DE PROCEDIMENTOS DE SOLDAGEM | 32 |
| 2.3.1 | Ensaios Não destrutivos (END) | 32 |
| 2.3.2 | Ensaios Mecânicos | 34 |
| 2.4 | DESCONTINUIDADES E DEFEITOS NA SOLDAGEM | 38 |
| 3 | METODOLOGIA | 39 |
| 3.1 | METAL DE BASE | 41 |
| 3.2 | METAL DE ADIÇÃO | 42 |
| 3.3 | OBTENÇÃO DOS CORPOS DE PROVA | 42 |
| 3.4 | SOLDAGEM DOS CORPOS DE PROVA | 44 |
| 3.4.1 | Soldagem dos CPs como junta de topo | 46 |
| 3.4.2 | Soldagem dos CPs com junta de ângulo | 48 |
| 3.5 | INSPEÇÃO VISUAL | 49 |
| 3.6 | ENSAIO DE LÍQUIDO PENETRANTE | 49 |
| 3.7 | ENSAIOS DE TRAÇÃO E DOBRAMENTO | 52 |
| 3.8 | MACROGRAFIA | 56 |
| 3.9 | RADIOGRAFIA | 57 |
| 3.10 | CUSTOS | 57 |
| 3.12 | CÁLCULO DOS CUSTOS COM ARAME, GÁS DE PROTEÇÃO E ENERGIA ELÉTRICA | 59 |

| | | |
|----------|------------------------------------|-----------|
| 4 | RESULTADOS..... | 62 |
| 4.1 | INSPEÇÃO VISUAL | 62 |
| 4.2 | ENSAIO DE LÍQUIDO PENETRANTE | 65 |
| 4.3 | MACROGRAFIA | 66 |
| 4.4 | ENSAIO DE TRAÇÃO | 70 |
| 4.5 | ENSAIO DE DOBRAMENTO | 72 |
| 4.6 | RADIOGRAFIA | 74 |
| 4.7 | CUSTOS | 75 |
| 5 | CONCLUSÃO | 77 |

1 INTRODUÇÃO

O setor de máquinas agrícolas desempenha um importante papel na economia global, sendo responsável por fornecer equipamentos para a produção de alimentos. A relevância desse setor se intensifica à medida que a população mundial cresce e a demanda por alimentos aumenta, exigindo uma constante inovação e aprimoramento tecnológico para atender às necessidades do mercado. Segundo Contini e Aragão (2021), os dados indicam que em 2020 o Brasil alimentou 772,3 milhões de pessoas, sendo 212,2 milhões da população brasileira e mais 560,1 milhões de outros países, pela exportação de grãos e carne bovina convertida em grãos.

Deste modo, pode-se afirmar que aproximadamente 10% da população mundial possui como fonte alimentar a produção brasileira. Dentro desse contexto, a competitividade entre as empresas fabricantes de máquinas agrícolas é acirrada. De acordo com o Econodata (2023) existem 2.540 empresas envolvidas no ramo de tratores e implementos agrícolas instaladas no Brasil, sendo a maioria envolvida com venda e aluguel, mas muitas delas envolvidas com a manufatura (mesmo o Econodata não dando maiores informações a respeito do número exato de fabricantes, apenas o número de empresas envolvidas, já dá uma dimensão desse mercado). A busca por diferenciais competitivos passa pela adoção de novas tecnologias que possibilitem aumentar a produtividade, não apenas em termos de volume de produção, mas também em eficiência e qualidade. Produzir conforme a demanda, com o menor custo possível e mantendo altos padrões de qualidade, tornou-se uma prioridade estratégica para as empresas que desejam se manter relevantes no mercado.

As empresas desse ramo têm desenvolvido diversos projetos voltados para a melhoria de seus processos produtivos, sendo um deles a adoção de tecnologias de soldagem mais avançadas, pois trata-se de um processo fundamental na fabricação de máquinas agrícolas e impacta diretamente a qualidade e durabilidade dos produtos finais.

Atualmente, estas empresas utilizam predominantemente o processo de soldagem MIG/MAG (*Metal Inert Gas/Metal Active Gas*), conhecido pela sua versatilidade e eficiência na união de chapas de aço com baixo teor de carbono. A introdução da soldagem a LASER (*Light Amplification by Stimulated Emission of Radiation*) surge como uma alternativa, oferecendo várias vantagens e algumas limitações. Uma das vantagens são maior precisão, menor distorção térmica, maior velocidade de soldagem e a possibilidade de automação em larga escala. Essas características podem resultar em uma produção mais rápida e com menor retrabalho, atendendo às exigências de custo e qualidade de maneira mais eficaz. A desvantagem maior reside no alto investimento para a implementação e algumas limitações

técnicas do processo. Neste âmbito, surgiu dentro de uma empresa de máquinas e implementos agrícolas da região do Alto Jacuí (Rio Grande do Sul), a possibilidade da utilização de um sistema LASER manual e de baixa potência para soldagem de chapas de menor espessura (até 6 mm) em substituição ao processo MIG/MAG. A substituição visa a melhoria do processo produtivo, aproveitando as vantagens do processo LASER neste contexto, mas levando em consideração as possíveis dificuldades que venha a se encontrar no curto prazo.

A perspectiva de implementar sistemas de soldagem a LASER de baixa potência e, possivelmente, de maior potência no longo prazo, totalmente automatizado, reflete a busca por inovação e melhoria contínua. Ao investigar as características de cada método de soldagem e suas implicações na qualidade final das soldas realizadas, este trabalho fornecerá informações preliminares para não só para a empresa em questão, mas contribuirá para que outras tomem suas decisões estratégicas, visando aprimorar os processos produtivos e, conseqüentemente, fortalecer a posição no competitivo mercado de máquinas agrícolas.

1.1 JUSTIFICATIVA

A escolha do tema é motivada pela necessidade crescente de melhorias na eficiência produtiva e na qualidade das soldas em setores industriais, como o de máquinas e implementos agrícolas, mais especificamente, de uma empresa da região com grande experiência no ramo.

O estudo comparativo entre os processos de soldagem MIG/MAG e a LASER é relevante, pois aborda a possibilidade de diminuição de retrabalho e aumento da produtividade. O processo de soldagem a LASER, por exemplo, apresenta vantagens significativas, especialmente para chapas de menor espessura, proporcionando soldas mais rápidas, com menor distorção térmica e menor incidência de descontinuidades. Dessa forma, há uma potencial diminuição de custos devido à menor necessidade de correções e acabamentos após a soldagem. Isso justifica a necessidade de conhecer melhor os processos e submeter as soldas à ensaios para avaliação de suas propriedades mecânicas. Por outro lado, o processo de soldagem MIG/MAG é bastante conhecido, com boa capacidade de produção, é versátil e automatizável, além da facilidade de operação e da quantidade razoável de soldadores qualificados no mercado.

Em termos de perspectivas futuras, o trabalho serve também como um estudo inicial ou exploratório para a aplicação de sistemas de soldagem a LASER robotizados de maior potência, em larga escala. Essa abordagem permite antecipar os desafios e benefícios da ampliação do uso da tecnologia a LASER, que pode oferecer soluções ainda mais eficientes e econômicas para a indústria de máquinas agrícolas.

1.2 OBJETIVOS

Este estudo tem como objetivo realizar uma análise comparativa entre os processos de soldagem MIG/MAG e a LASER, focado no processo produtivo e nas propriedades mecânicas resultantes de soldas realizadas com ambos os processos, aplicados em chapas aços de baixo teor de carbono, de pequena espessura e com a finalidade de avaliar a viabilidade e os benefícios da substituição ou complementação do processo atual pela soldagem a LASER em algumas aplicações específicas dentro do processo produtivo de uma empresa de máquinas e implementos agrícolas. A pesquisa busca investigar aspectos como resistência à tração, dobramento, diferenças operacionais entre cada processo, custos, e aspectos segurança e qualidade. A comparação visa identificar as vantagens e desvantagens de cada processo, contribuindo para uma melhor compreensão técnica sobre o processo LASER e contribuir para a tomada de decisão da empresa em investir neste “novo” processo ou não.

1.2.1 Objetivos específicos

Os objetivos específicos são:

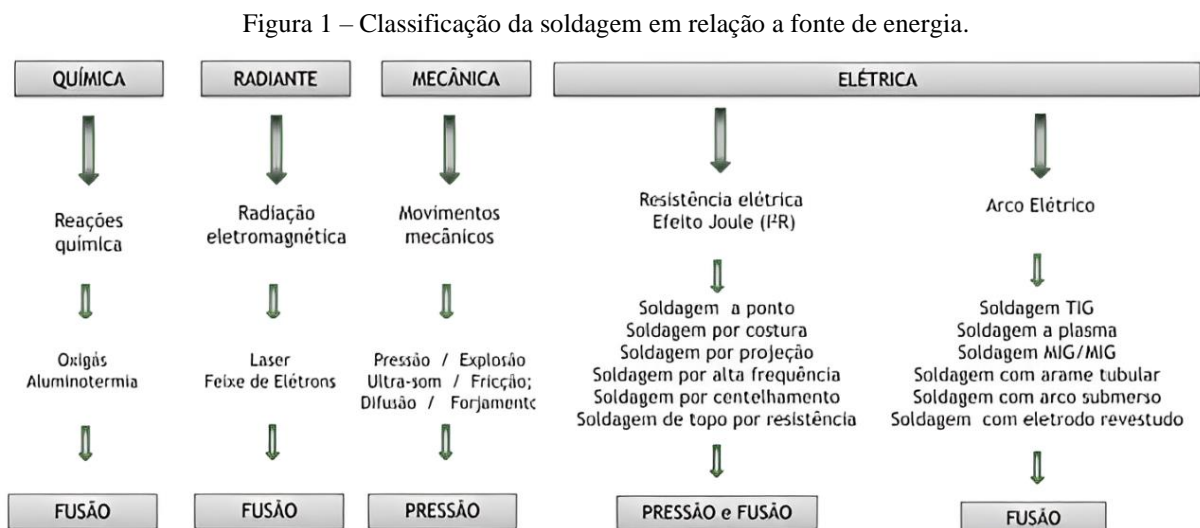
- Estudar sobre os processos de soldagem, buscando maior entendimento sobre as características dos processos de soldagem MIG/MAG e a LASER;
- Avaliar a existência de benefícios e limitações relacionados ao processo produtivo e as propriedades mecânicas obtidas pela soldagem a LASER em relação a soldagem MIG/MAG;
- Verificar se a soldagem LASER atende os requisitos mecânicos e de segurança, que a indústria de máquinas e implementos agrícolas impõe em seus processos e componentes;
- Servir como um estudo inicial para a implementação do processo manual e para a possibilidade da utilização do processo LASER em escala maior dentro da empresa.

2 REFERENCIAL TEÓRICO

Este capítulo apresenta a fundamentação teórica referente aos processos de soldagem, e demais assuntos que serão abordados ao longo do trabalho, facilitando o entendimento do leitor.

2.1 SOLDAGEM

Segundo a AWS (*American Welding Society*), a soldagem é uma operação com o objetivo de obter a coalescência localizada, produzida pelo aquecimento até uma temperatura adequada, com ou sem a aplicação de pressão e de metal de adição (AWS, 2009). Os processos de soldagem mais comuns podem ser classificados de acordo com a fonte de energia utilizada para unir os materiais, conforme indicado na Figura 1.

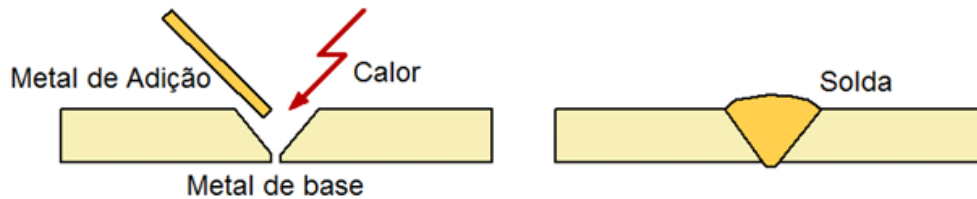


Fonte: Adaptado de Felizardo (2016)

A soldagem por fusão é uma das mais utilizadas e dentro desta classificação estão os processos de soldagem a arco (que utilizam o arco elétrico como fonte de energia) e são os mais significativos para a indústria de máquinas e implementos agrícolas atualmente. Devido à propensão do material fundido a reagir com os gases presentes na atmosfera, a maioria dos processos de soldagem por fusão emprega algum tipo de proteção para minimizar essas reações. De acordo com Modenesi, Marques e Santos (2012), os processos de soldagem por fusão envolvem a aplicação de calor na área onde a junção será realizada, o que provoca a fusão do metal de base e, se for o caso, do metal de adição. A união entre as partes é então alcançada, mediante a solidificação do metal fundido, eliminando as interfaces.

A Figura 2 mostra o esquema da soldagem por fusão onde se considera uma junta de topo com chanfro. Para realizar a união por soldagem dos dois membros da junta, será necessário um metal de adição, uma fonte de calor (neste contexto, o arco elétrico) e a partir disso será feito o preenchimento da junta, possivelmente em mais de um passe de solda.

Figura 2 - Esquema da soldagem por fusão.



Fonte: Modenesi, Marques e Santos (2012)

2.1.1 Soldagem MIG/MAG (GMAW)

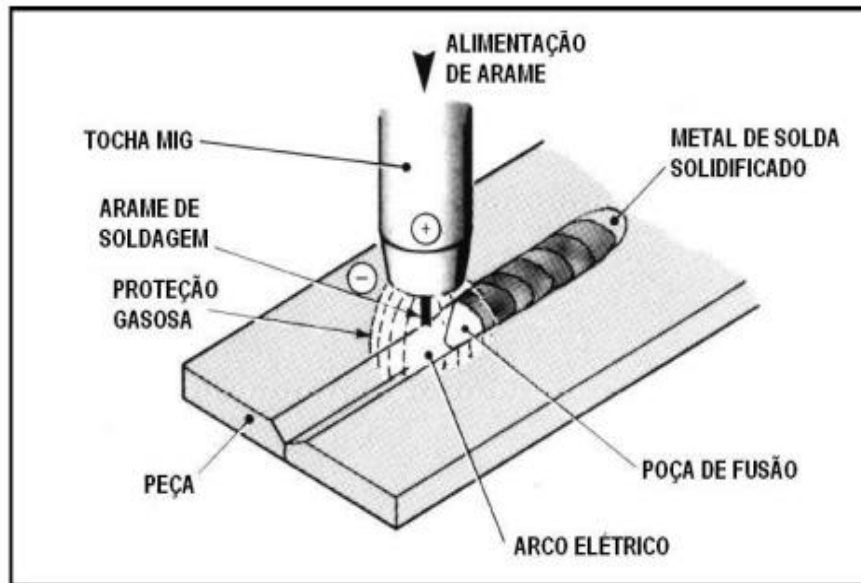
A processo de soldagem GMAW, (sigla adotada pela *American Welding Society*), que significa *Gas Metal Arc Welding*, mais popularmente chamado de soldagem MIG/MAG, é um processo de soldagem muito utilizado pelas indústrias automotivas, construção civil, naval e aeroespacial. Da mesma forma, o MIG/MAG é o processo de soldagem mais utilizado no setor de implementos agrícolas. É um processo de soldagem a arco elétrico que utiliza um eletrodo sem revestimento em forma de arame, este alimentado de forma contínua e a região da solda é protegida por gases geralmente fornecidos em cilindros. Esse processo é amplamente utilizado devido à sua versatilidade, capacidade de produzir solda de qualidade em variadas espessuras de chapa, principalmente em aços estruturais com baixo teor de carbono.

Segundo a ESAB (2005), o conceito de GMAW foi introduzido no início de 1920, e, somente após 1948 tornou-se comercialmente viável. O processo funciona com corrente contínua com polaridade reversa (CC+, ou seja, arame no polo positivo e peça no polo negativo). A corrente contínua com polaridade direta (CC-, ou seja, arame no polo negativo e a peça no polo positivo) é raramente utilizada devido a deficiência na transferência do arame fundido para o metal de base, gerando excesso de respingos e instabilidade de arco. Normalmente são utilizados parâmetros de soldagem que variam de 50A a 600A e 15V a 32V.

Atualmente o processo torna possível a soldagem de vários materiais como aços, alumínio e suas ligas, aços inoxidáveis, cobre e outros, além de permitir a soldagem em todas as posições apenas com modificações nos parâmetros, sem necessidade de troca de eletrodos, arames etc.

O processo ocorre à medida que um arco elétrico é formado entre a peça e um consumível na forma de arame. O arco funde o arame de forma contínua à medida que este é alimentado à poça de fusão. O metal de solda é protegido da atmosfera pelo fluxo de um gás ou uma mistura de gases inertes ou ativos (ESAB, 2005). A Figura 3 mostra a apresentação básica deste processo de soldagem.

Figura 3 - Processo básico de soldagem MIG/MAG.



Fonte: Manual ESAB (2005)

O processo de soldagem MIG/MAG possui três modos básicos de transferência de metal. Estes modos indicam a forma que ocorre a transferência do metal do arame para a poça de fusão. São eles, curto-circuito (*short-arc*), globular (*globular*) e aerossol (*spray-arc*) e segundo Scotti e Ponomarev (2008), explica-se da seguinte forma:

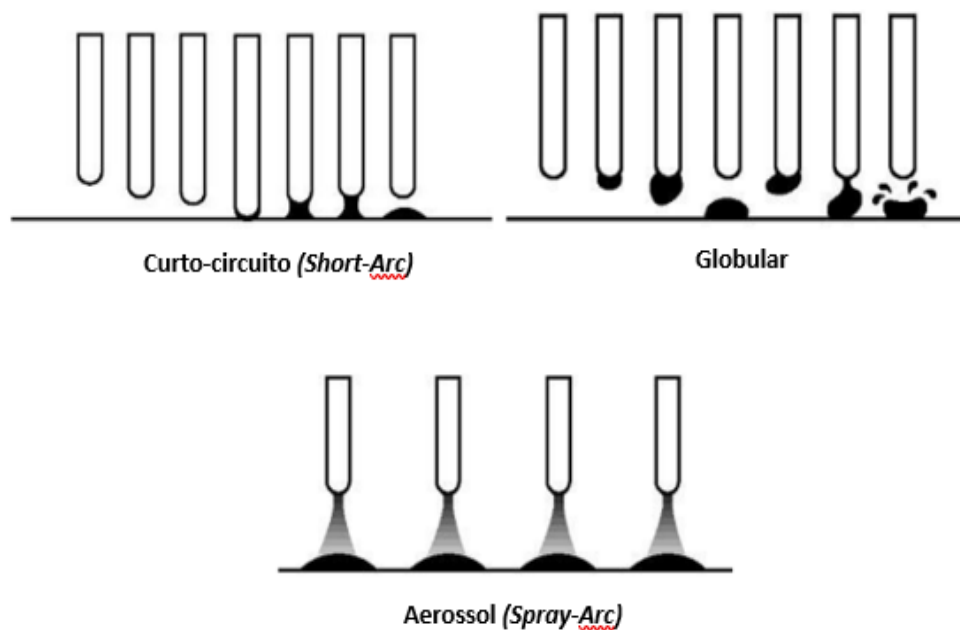
- Globular: gotas de metal fundido se movem em direção à poça de fusão com a ação da gravidade. Na prática, é um tipo de transferência bastante instável, que gera muitos respingos e que deve ser evitada;
- Curto-circuito (*Short-Arc*): nesse modo um curto circuito é gerado entre o arame e o metal de base (o arame tem contato com a poça de fusão), gerando o calor necessário para fundir o material e gerar a poça de fusão. A aplicação prática reside na soldagem de chapas de aço de pequenas espessuras (1 - 5 mm), soldagem de juntas de ângulo, multipasse ou fora de posição (horizontal, vertical

e sobrecabeça). Geralmente, gera uma certa quantidade de respingos, fator que deve ser controlado mediante a correta regulação da máquina de solda;

- *Aerossol (Spray-Arc)*: gotas de metal fundido se desprendem do arame e são transferidas para a poça de fusão por forças eletromagnéticas, sem contato do arame com a poça de fusão. Para arames de aço, acontece em valores de tensão altos (26 - 32 V) e correntes altas (entre 200 a 300A, dependendo do diâmetro do arame) e, portanto, não é de aplicação prática em soldagens fora de posição. Contudo, pode ser aplicado na soldagem de chapas de maior espessura na posição plana, além de ter a vantagem de gerar poucos respingos.

A Figura 4 apresenta um esquema que ilustra cada modo de transferência:

Figura 4 - Principais modos de transferência da soldagem MIG/MAG.



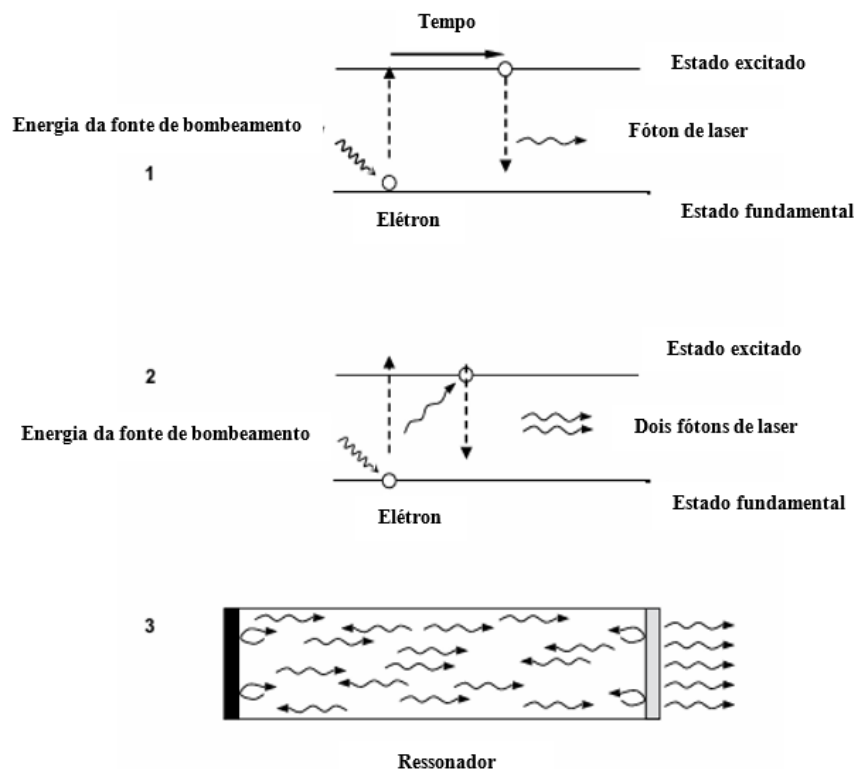
Fonte: ESAB Brasil (2005) apud FERREIRA, (2016)

2.1.2 Soldagem LASER (*Laser Beam Welding* ou *LBW*)

Segundo Bracarense, Marques e Modenesi (2009), os princípios teóricos para um novo tipo de luz foram fornecidos após uma publicação de Einstein, em 1917, descrevendo o terceiro processo de integração da matéria, a emissão estimulada e a radiação. Posteriormente, chamou-se de “*Light Amplification by Stimulated Emission of Radiation*” (amplificação da luz por emissão estimulada de radiação), e, então, o processo ficou conhecido pela sigla LASER.

De acordo com fabricante Amada (2020), o processo de geração de LASER envolve três etapas principais (Figura 5). Primeiro, a emissão espontânea ocorre quando a energia fornecida pela fonte de bombeamento excita os átomos do meio LASER, fazendo com que os elétrons emitam fótons ao retornarem a níveis de energia mais baixos. Em seguida, os fótons gerados podem causar a emissão estimulada ao colidir com outros elétrons excitados, resultando em fótons adicionais que são coerentes com os originais. Por fim, a amplificação acontece quando alguns desses fótons são refletidos de volta através do meio LASER, desde que haja uma quantidade maior de átomos em estado excitado, criando assim as condições necessárias para a geração do LASER. Em concordância com a citação anterior, o processo LASER é ilustrado pela Figura 5.

Figura 5 - Produção do feixe LASER.



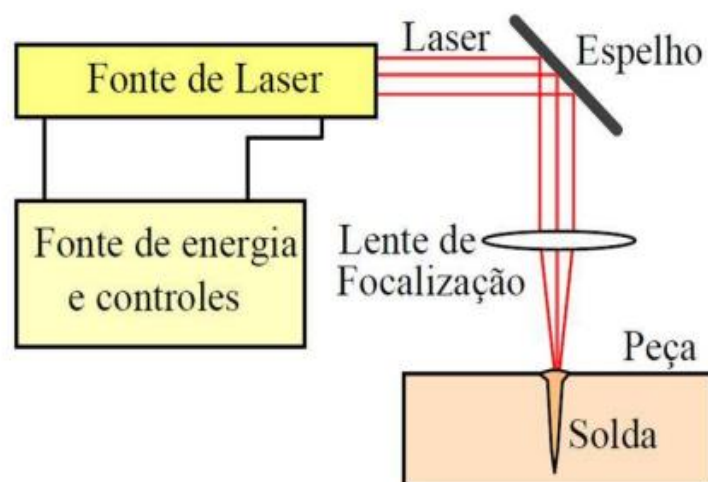
Fonte: Amada (2020)

De acordo com a fabricante IPG Photonics (2021), existem basicamente três tipos de LASER: LASER de estado sólido Nd (neodímio: ítrio-alumínio-granada), LASER a Gás (exemplos incluem os LASER de CO₂, hélio-neônio e argônio) e o LASER de fibra que utiliza uma fibra óptica dopada com elementos raros como meio de ganho, fibra óptica (SiO₂) dopada com Itérbio (Yb), sendo o último o mais utilizado atualmente em fontes de soldagem a LASER pelos seguintes fatores:

- Extração de calor eficiente;
- Comprimento de onda de 1070 nm;
- Gerado e conduzido por fibra óptica;
- Eficiência elétrica maior que 30%;
- Com fibra ótica, fica-se livre da necessidade de alinhamento de espelhos.

O sistema básico de um equipamento para a realização da soldagem a LASER é mostrado no esquema da Figura 6, onde é possível ver os itens principais que são a fonte de energia e controle, fonte de LASER e as lentes de focalização. Lembrando que neste caso, o sistema tem espelhos, no LASER de fibra, este elemento foi eliminado e substituído por fibra ótica.

Figura 6 - Sistema de soldagem a LASER



Fonte: Bracarense, Marques e Modenesi (2016).

Os parâmetros do processo da solda a LASER são importantes para obter uma soldagem de alta qualidade e eficiente. São eles:

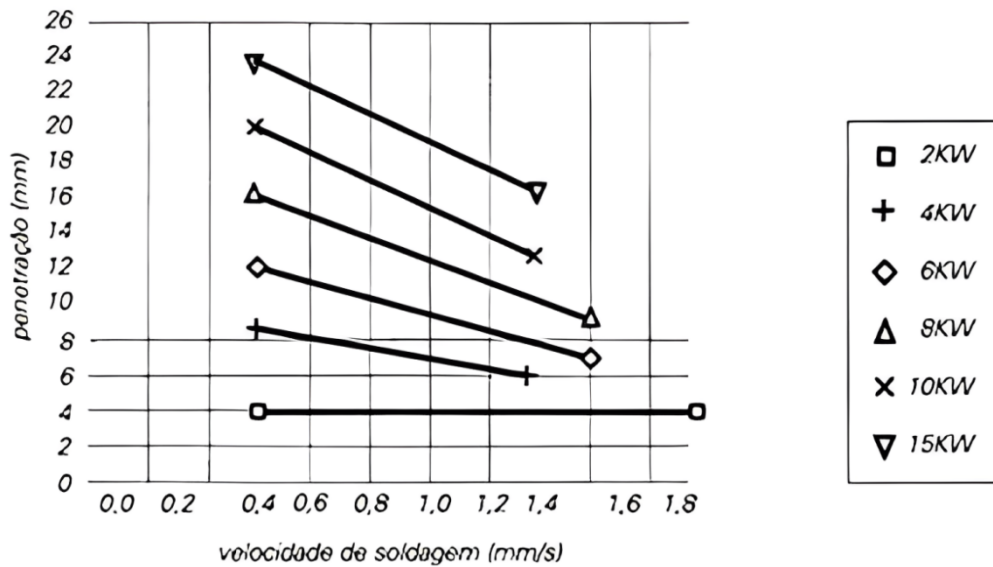
- Potência;
- Velocidade de alimentação do arame ¹;
- Velocidade de soldagem (avanço);
- Frequência de oscilação do feixe (*Wobble Frequency*);
- Largura do Feixe (*Wobble Length*) e;
- Posição do foco em relação à superfície.

A potência do LASER determina a quantidade de energia fornecida ao material, diretamente influenciando a profundidade da penetração. Uma maior potência geralmente resulta em uma maior penetração. Por outro lado, a velocidade de soldagem controla o tempo de interação do feixe de LASER com o material. Velocidades mais lentas permitem maior penetração, pois o metal fica mais tempo exposto a energia do LASER. Contudo, velocidades mais lentas podem levar a maior distorção da chapa ou perfuração em algumas situações. Portanto, ajustar adequadamente a potência e a velocidade de soldagem é crucial para obter a penetração desejada e garantir a qualidade da solda. A Figura 7 mostra a influência destes dois parâmetros na penetração.

Da mesma forma, uma maior largura do feixe de LASER tende a distribuir a energia em uma área maior, resultando em menor penetração no material, criando um cordão de solda mais largo, mas menos profundo. Com uma largura de feixe menor, a energia é concentrada em uma área menor, resultando em uma penetração mais profunda e um cordão de solda mais estreito e profundo. É possível, a partir desse parâmetro, encontrar um equilíbrio entre largura e profundidade de penetração o que em alguns casos é interessante no que diz respeito às propriedades mecânicas da solda.

¹ A soldagem a LASER é geralmente realizada sem metal de adição, sendo este utilizado apenas quando é necessário depositar material para formar um cordão maior e preencher lacunas (*gap*) do processo.

Figura 7 - Influência da velocidade na penetração para diferentes potências de LASER



Fonte: SENAI (2013)

A intensidade do feixe na superfície das amostras, que depende basicamente de todos os parâmetros do processo, determina o modo de soldagem utilizado. De acordo com a fabricante Amada (2020), existem três modos de soldagem a LASER: O modo de condução, modo de transição e o modo de penetração ou *keyhole* (buraco de fechadura).

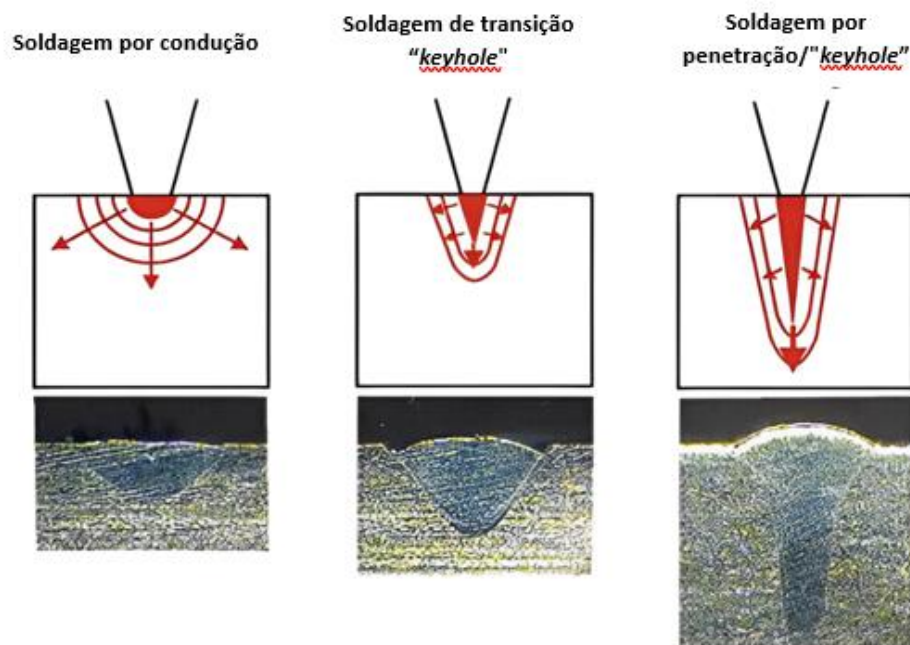
- Modo de condução: A soldagem no modo de condução é realizada com baixa densidade de energia, geralmente em torno de $0,5 \text{ MW/cm}^2$. Esse processo resulta em um cordão de solda que é relativamente largo e raso. O calor necessário para a fusão do material é transferido por condução a partir da superfície do material (AMADA, 2020). Apropriado para chapas muito finas como 1 mm ou 2 mm;
- Modo de transição (*transition keyhole*): O modo de transição é caracterizado por uma densidade de potência média, cerca de 1 MW/cm^2 , resultando em uma penetração superior à do modo de condução, devido à presença do "keyhole". Esse *keyhole*, que é uma coluna de metal vaporizado, se projeta para dentro do material, apresentando um diâmetro muito menor em comparação com a largura da solda. Ele é mantido pelas forças do material fundido (tensão superficial do material no estado líquido) ao redor por meio da pressão de vapor, e sua profundidade é determinada pela densidade de potência e pelo tempo de

exposição. Com sua baixa densidade óptica, o *keyhole* funciona como um canal que direciona a energia do LASER para o material. Durante o modo de transição, a combinação de tempo e densidade de potência é suficiente apenas para formar o *keyhole*, sem permitir que ele se aprofunde significativamente na peça. Como resultado, as soldas têm uma penetração relativamente rasa, com uma relação típica de aspecto (profundidade/largura) em torno de 1. Esse método é comumente empregado em aplicações de soldagem pontual e de costura com baixa entrada de calor, utilizando principalmente LASER pulsado de Nd e LASER de fibra (AMADA, 2020).

- Modo de penetração (*keyhole*): O modo de soldagem por penetração ou *keyhole* é caracterizado por soldas profundas e estreitas, com uma relação típica de aspecto maior que 1,5 e com uma densidade de potência acima de $1,5\text{MW/cm}^2$ (AMADA, 2020).

A Figura 8 mostra como a geometria do cordão é alterada de acordo com cada modo de soldagem.

Figura 8 - Modos de soldagem a LASER.



Fonte: Amada (2020)

A soldagem LASER pode ser realizada de forma manual, utilizando máquinas portáteis, ou de forma automatizada, com a utilização de robôs. Além disso, o processo pode empregar

metal de adição, como o uso de arame para reforço da junta, ou ser executado sem metal de adição, na chamada soldagem autógena, onde a fusão envolve apenas com o metal de base. Essas diferentes abordagens possibilitam uma ampla flexibilidade de aplicação, atendendo a diversas necessidades industriais e específicas de projeto.

2.1.3 Gases de proteção

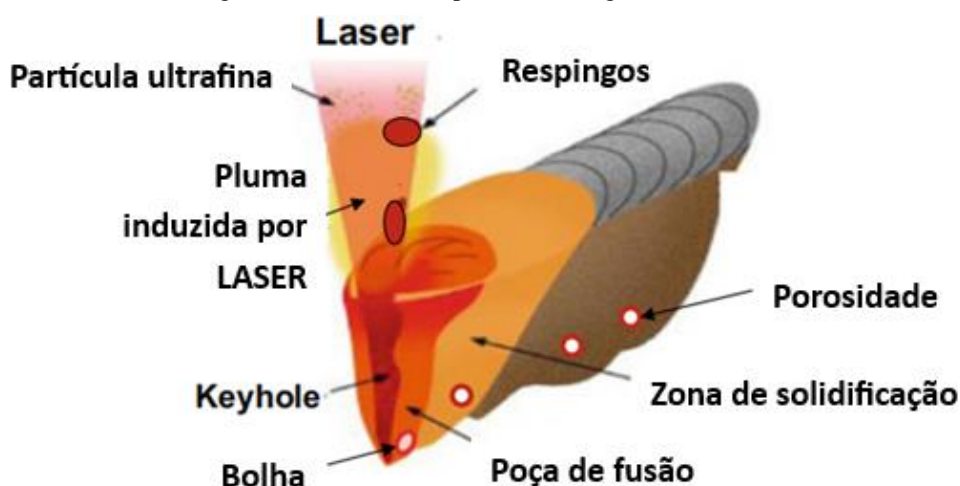
O gás de proteção utilizado na soldagem a LASER deve ser inerte, total ou parcialmente, e preferencialmente mais “pesado” que o ar, para que consiga deslocá-lo de forma eficiente, principalmente na posição plana (AMADA,2020). Os gases mais comuns nesse processo são o Argônio (Ar) e o Nitrogênio (N₂). Além disso, embora seja menos pesado que ar, o Hélio (He) é ocasionalmente empregado em soldagens que exigem penetração crítica, pois sua alta condutividade térmica pode aumentar a profundidade da solda. Em certas situações, gases auxiliares podem ser utilizados para melhorar ainda mais a eficiência do processo.

Sobre o nitrogênio, há alguma discussão sobre sua natureza reativa. De acordo com a norma ASME BPVC.II.C (2023), o argônio é classificado como um gás inerte e o nitrogênio é classificado como um gás de baixa reatividade. Ainda de acordo com esta norma, o comportamento do nitrogênio varia de acordo com os diferentes materiais de base podendo ser ativo em alguns e praticamente inerte em outras. Para soldagem de aços carbono, pode ser considerado inerte na operação de soldagem.

Segundo Katayama (2020), substâncias são evaporadas durante a soldagem, compostas principalmente de átomos de metal. Quando essas substâncias são ionizadas, juntamente com o gás de proteção, formam um plasma (plasma induzido por LASER) que pode afetar a penetração de solda (profundidade do cordão de solda). Quanto menor o potencial de ionização do gás, maior a possibilidade de aparência de plasma em função da interação do próprio gás com os vapores metálicos. Como o nitrogênio tem menor potencial de ionização (14,5 eV) que o argônio (15,8 eV), a possibilidade de ocorrência de plasma no nitrogênio é maior. Embora em LASER de baixa potência e baixo comprimento de onda, em torno de 1 micrometro (que é objeto deste estudo neste trabalho), a formação de plasma ocorra em menor intensidade, já é o suficiente para tornar a solda um pouco menos profunda. O plasma formado, refrata o feixe de LASER o desviando do ponto focal, ou seja, concentrando menos energia no ponto onde se quer soldar.

A Figura 9 mostra os fenômenos típicos da soldagem a LASER e, entre eles, a formação do plasma.

Figura 9 - Fenômenos típicos da soldagem à LASER.



Fonte: Katayama (2020)

Em contraste, a soldagem com gás hélio não resulta na formação de plasma, devido ao seu alto potencial de ionização (24,6 eV), permitindo soldas mais profundas. Além disso, a formação de aglomerados e partículas ultrafinas pode ocorrer com LASERs de comprimento de onda menor que 1,5 μm , afetando a densidade de potência e, conseqüentemente, a profundidade da solda. A supressão da “pluma” (plasma induzido) é recomendável para garantir soldas profundas, especialmente em LASERs de alta potência (acima de 2.000 W).

Na Tabela 1, pode-se observar os valores de potencial de ionização e condutividade térmica dos principais gases utilizados nos processos LASER e MIG/MAG.

Tabela 1 - Potencial de ionização e condutividade térmica dos gases de proteção. Siglas: PI = potencial de ionização; CT = condutividade térmica

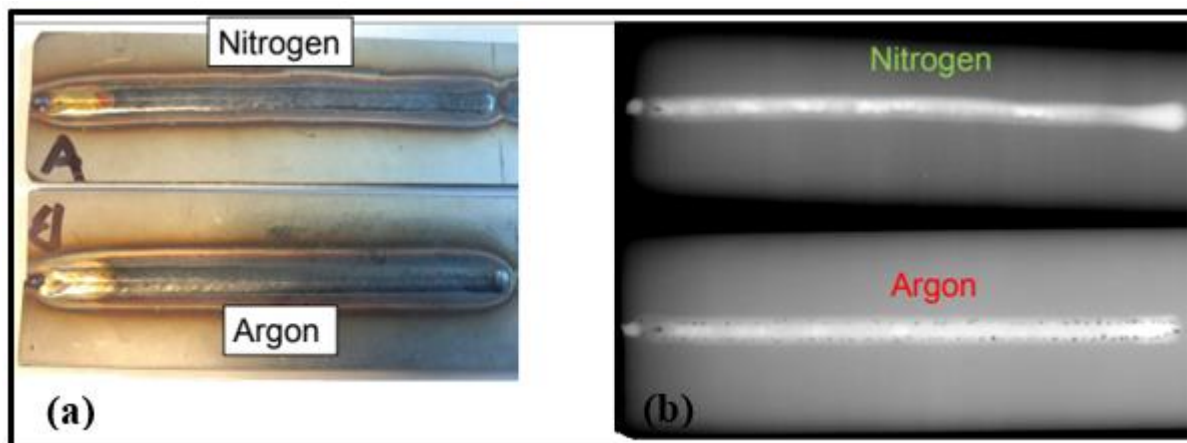
| Gás | Símbolo químico | PI (eV) | CT (mW/m.K) |
|--------------------|-----------------|---------|-------------|
| Argônio | Ar | 15,8 | 16,4 |
| Dióxido de carbono | CO ₂ | 14,4 | 14,7 |
| Hélio | He | 24,6 | 142,6 |
| Hidrogênio | H ₂ | 13,5 | 168,3 |
| Nitrogênio | N ₂ | 14,5 | 24,0 |
| Oxigênio | O ₂ | 13,2 | 24,2 |

Fonte: Tatagiba, Gonçalves e Paranhos (2012)

A Figura 10.a apresenta os resultados de uma comparação entre uma soldagem a LASER em aço carbono com Ar e outra com N₂ como gás de proteção. As radiografias (Figura 10.b) mostram claramente que o número de poros formados é superior na soldagem com

Argônio. Por esse motivo, as empresas fornecedoras de equipamentos para soldagem a LASER indicam o nitrogênio como gás ideal para esse tipo de soldagem.

Figura 10 – (a) Soldas realizadas com processo LASER usando N₂ e Ar e; (b) Radiografias de solda LASER utilizando N₂ e Ar.



Fonte: IPG Fotônica (2024)

Embora o potencial de ionização dos gases não seja um problema sensível para a soldagem MIG/MAG, Scotti e Ponomarev (2008) comentam que na soldagem MIG/MAG, o potencial de ionização está diretamente relacionado com a abertura do arco, a capacidade do arco em conduzir corrente elétrica e a sua estabilidade. Os gases mais utilizados no processo GMAW são Argônio (Ar), Hélio (He), Dióxido de carbono (CO₂), Oxigênio (O₂) e o Nitrogênio (N₂) e suas misturas. O Oxigênio, por exemplo, em mistura com o Argônio promove uma melhor estabilidade do arco e diminui a tensão superficial da gota a ser transferida e da poça de fusão.

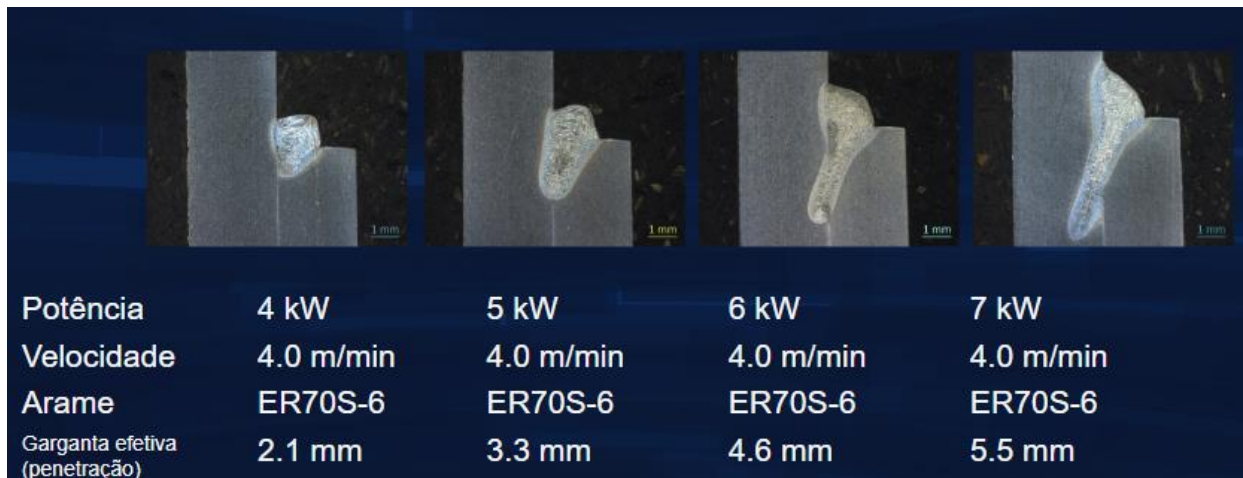
2.2 SOLDAGEM LASER (LBW) *VERSUS* SOLDAGEM MIG/MAG (GMAW)

Entre as diversas técnicas disponíveis, a soldagem LASER e a soldagem MIG/MAG destacam-se devido às suas características específicas e aplicações distintas. A compreensão das diferenças entre esses métodos é essencial para a escolha adequada do processo de soldagem em projetos de engenharia. Esta seção tem o objetivo de apresentar as diferenças, vantagens e limitações destes processos.

De acordo com Scotti e Ponomarev (2008), as soldagens MIG/MAG e LASER têm sido amplamente utilizadas na indústria, com o processo MIG/MAG sendo mais abrangente e o LASER aplicado em componentes de maior valor agregado. Embora não sejam considerados

concorrentes diretos, cada um desses processos possui características próprias que oferecem vantagens específicas, mas também enfrentam limitações. No caso da soldagem LASER, a alta densidade de energia concentrada em um ponto focal resulta em menor dissipação de calor, formando um cordão esbelto (com alta relação penetração-largura) e uma Zona Termicamente Afetada (ZTA) reduzida, o que minimiza distorções e tensões no material. A Figura 11 mostra o comportamento da penetração-largura de acordo com o aumento da potência em um processo de soldagem a LASER robotizada.

Figura 11 - Comportamento da relação penetração-largura de acordo com o aumento da potência.



Fonte: IPG Fotônica (2024)

O processo de soldagem a LASER também proporciona uma velocidade de soldagem superior, tendo como resultado uma maior produtividade. Entretanto, esse processo também apresenta desafios, como o alto custo de aquisição, além da necessidade de controle rigoroso da preparação da junta (baixas tolerâncias a desalinhamentos e aberturas de raiz) e do alinhamento da tocha. Outra desvantagem da soldagem a LASER é que ela pode resultar em uma menor rigidez estrutural² ao conjunto soldado, devido ao cordão de solda ser menor em comparação com a soldagem MIG/MAG, mas, pode ser compensado pela maior penetração do processo.

Ainda segundo Scotti e Ponomarev (2008), a alta relação penetração-largura dos cordões gerados na soldagem a LASER (principalmente nos equipamentos de alta potência) pode favorecer a formação de trincas de solidificação, especialmente em soldagens de chapas mais espessas soldadas de forma autógena (sem metal de adição). Na Figura 12, pode-se visualizar as diferenças no formato dos cordões de solda resultantes dos processos a LASER e

² Entende-se por rigidez estrutural, a habilidade do conjunto soldado de manter sua forma sob carga.

MIG/MAG. Os desenhos da figura em questão representam que a junta sobreposta com LASER tem maior penetração e menor largura em relação a junta sobreposta soldada com MIG/MAG.

Figura 12 - Ilustração das geometrias de cordões dos processos MIG/MAG e a LASER.



Fonte: IPG Fotônica (2023)

De forma complementar, Scotti e Ponomarev (2014) mencionam que o processo MIG/MAG possui uma densidade de energia consideravelmente menor, resultando em uma ação do calor mais ampla sobre a superfície do material, o que gera uma maior ZTA e tensões térmicas mais elevadas. Entretanto, destaca-se por sua capacidade de preencher aberturas de raiz (*gap*), o que proporciona maior tolerância dimensional na junta. Além disso, esse processo tende a influenciar de forma mais agressiva a microestrutura do metal de solda por meio do metal de adição. O seu custo é relativamente baixo em comparação com o processo LASER, além de ser um processo versátil, de fácil aprendizado e com grande variedade de modalidades (MIG/MAG Pulsado, MIG/MAG *Cold Metal Transfer*, MIG/MAG Curto-Circuito Controlado, são alguns exemplos). Como desvantagem, a baixa penetração relativa do processo requer uma maior preparação da junta (chanfros, espaçamentos para a soldagem da raiz, etc.) e um número maior de passes de solda, reduzindo assim a produtividade.

Da mesma forma, vale ressaltar que a solda LASER é considerada uma solda “limpa”, ou seja, não gera nenhum tipo de escória, é livre de respingos (pode apresentar respingos muito pequenos quase que imperceptíveis a olho nu), enquanto a soldagem MIG/MAG apresenta uma quantidade considerável de respingos, que podem ser minimizados com um bom ajuste dos parâmetros, mas que ao final do processo geram um retrabalho e consequente perda de produtividade.

Na soldagem a LASER manual, o modo de operação é simplificado em comparação com outros processos de soldagem, pois o operador precisa apenas movimentar a tocha na

direção do avanço, sem necessidade de "empurrar"³, garantindo que o movimento ocorra somente no sentido de "puxar"⁴. Na soldagem a LASER com metal de adição (arame), a velocidade de soldagem é diretamente influenciada pelo avanço do arame, ou seja, a velocidade com que o arame é alimentado corresponde à velocidade de soldagem. Isso ocorre tanto no modo de condução quanto no modo de transição, onde a taxa de avanço do arame define a progressão do processo. Já no processo de soldagem MIG/MAG, a dinâmica é diferente. Neste caso, a velocidade do arame é geralmente maior que a velocidade de soldagem, o que resulta em uma maior taxa de deposição de material, e, em consequência, um maior consumo de metal de adição. A velocidade de movimentação, por sua vez, é controlada manualmente pelo operador, que ajusta o ritmo de acordo com a necessidade do trabalho

Diferentemente do processo MIG/MAG, na soldagem a LASER não é necessário manter um *stick-out* (distância do bocal até a peça), já que o foco do feixe de LASER é ajustado diretamente sobre a área de soldagem. O processo também não requer movimentos oscilatórios ou complexos da tocha, tornando a soldagem mais precisa e consistente, com menor exigência de habilidade manual e menor suscetibilidade a erros.

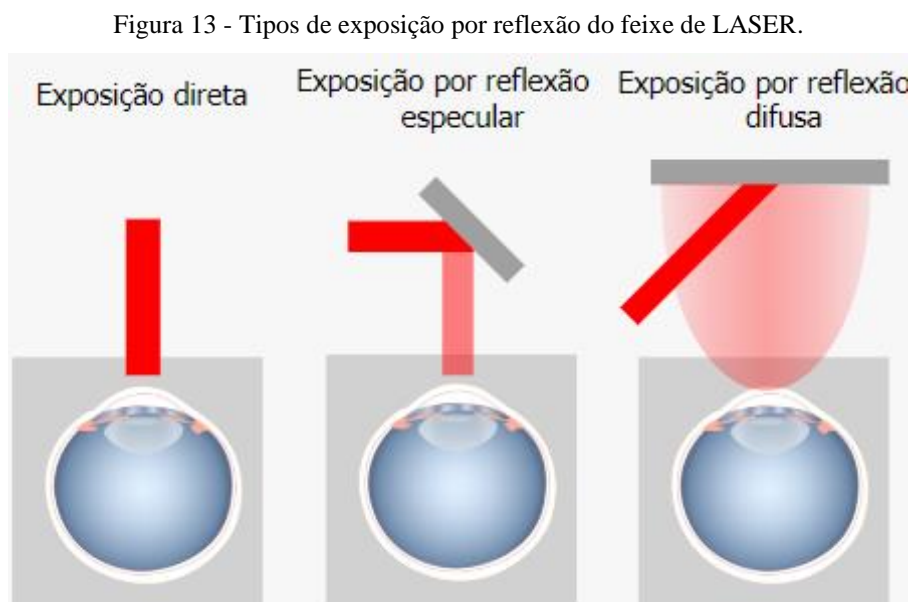
A soldagem, tanto no processo MIG/MAG quanto no processo LASER, envolve riscos que precisam ser gerenciados para garantir a segurança dos operadores e de pessoas próximas ao ambiente de trabalho. Um dos maiores perigos nesses processos está relacionado à radiação emitida. Na aplicação do MIG/MAG, é necessário proteger os olhos contra a radiação emitida pelo arco de solda, pois sua exposição pode resultar em sérios danos, como queimaduras na retina e até catarata (em caso de exposição continuada). Mesmo uma breve exposição a essa radiação pode causar o chamado "flash do soldador", uma condição que geralmente manifesta-se algumas horas após o contato, provocando desconforto intenso, inchaço, secreção ocular e cegueira temporária. Embora seja reversível, a exposição contínua ou repetida pode levar a lesões permanentes nos olhos (BRACARENSE, MARQUES E MODENESI 2016). Além disso, há também emissão de radiação infravermelha (IR) e luz visível intensa, que podem danificar os olhos com efeitos prolongados. Há ainda danos à pele do soldador, cuja a exposição aos raios UV pode levar até mesmo ao câncer de pele (exposição continuada).

No caso da soldagem a LASER são emitidas radiações do tipo visível, infravermelha e ultravioleta, que, juntamente com os efeitos de reflexões podem causar danos físicos ao

³ A técnica de soldagem empurrando (*forehand technique*), o arco ou outra fonte de energia é direcionado na direção de soldagem.

⁴ A técnica de soldagem puxando (*backhand technique*), o arco, ou outra fonte de energia é posicionado no sentido contrário à direção de soldagem.

operador. A Figura 13 ilustra os diferentes tipos de exposição do olho humano (mas que valem para a pele) à reflexão do LASER, exemplificando como o feixe pode se comportar ao interagir com diferentes superfícies.



Fonte: IPG Fotônica (2024)

Atualmente, no Brasil, o processo de soldagem a LASER de forma manual não possui uma norma específica que o regula diretamente. Com isso é necessário consultar normas internacionais como a IEC 60825 e a ANSI Z136.

De acordo com a norma internacional IEC 60825 - *Safety of LASER products* (Segurança de produtos LASER) os equipamentos LASER são divididos em quatro classes:

- Classe 1: Seguro em condições razoavelmente previsíveis;
- Classe 2: Seguro devido ao reflexo de piscar (apenas LASERs visíveis);
- Classe 3: Exposição direta, intrafeixe normalmente é perigosa;
- Classe 4: Alta potência, reflexões difusas podem ser perigosas.

Já a norma ANSI Z136 - *Safe use of LASERs* (Uso seguro de LASERs), diz que toda fonte LASER com potência maior que 0,5 W é classe 4. Contudo, podem ser adequados para Classe 1 se houver a inacessibilidade ao feixe de LASER. Nesse caso, a soldagem deve ocorrer em um ambiente enclausurado sem que ocorra acesso humano, que poder ser realizado em soldagens robotizadas. O LASER utilizado neste trabalho é classificado como classe 4 pois tem potência de 1500 W (ou seja, muito maior do que 0,5 W) e o operador fica exposto ao feixe de

LASER. Por este motivo é necessário a utilização de máscaras e óculos específicos para impedir a passagem de reflexões.

Embora existam vantagens do LASER sobre o MIG/MAG, deve-se salientar que este último é um processo já estabelecido dentro da indústria de máquinas e implementos agrícolas, dominado tecnicamente por soldadores, inspetores, engenheiros etc. e de baixo custo em relação ao processo LASER. O LASER, que é objeto de estudo deste trabalho, trata-se de um processo relativamente novo, já que é uma versão de baixa potência e manual do LASER. Até então, não se sabia ao certo o quão eficiente ele pode ser substituindo o MIG/MAG na soldagem de chapas de aço com espessura na faixa de 1 mm até 6 mm, especialmente no que concerne a questão técnica. Daí então, a razão deste trabalho.

2.3 ENSAIOS PARA QUALIFICAÇÃO DE PROCEDIMENTOS DE SOLDAGEM

Os ensaios são fundamentais para a avaliação da qualidade e integridade das soldas, sendo classificados em duas categorias principais: ensaios destrutivos (mecânicos) e ensaios não destrutivos. Ambos os tipos de ensaios são regidos por normas técnicas específicas que asseguram a padronização e a confiabilidade dos resultados, contribuindo para a validação dos processos de soldagem.

2.3.1 Ensaio Não destrutivos (END)

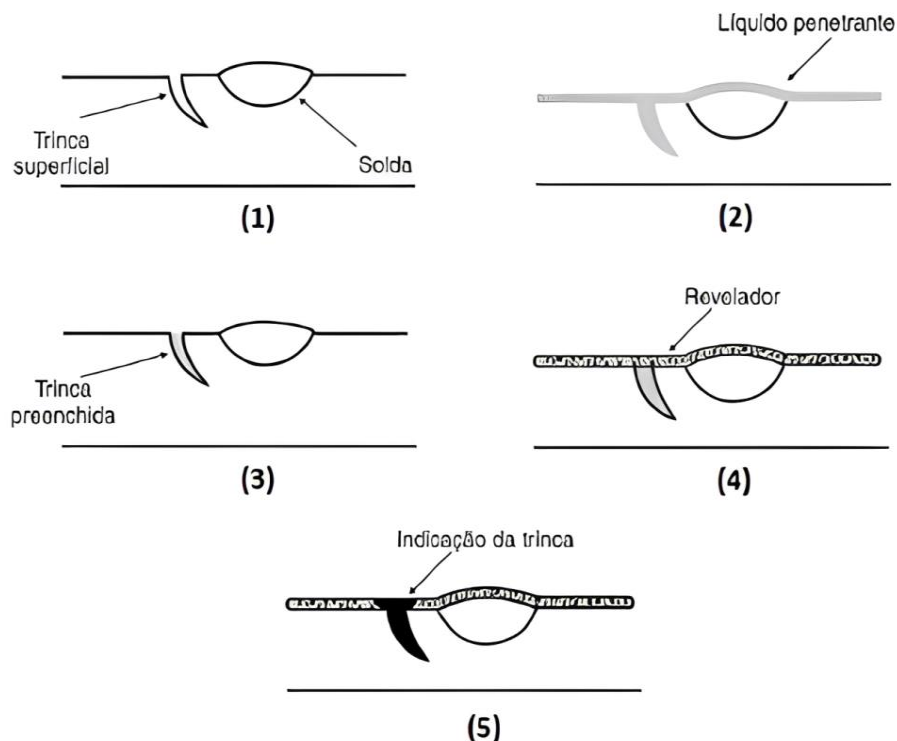
De acordo com Nunes e Kreicher (2010), os ensaios não destrutivos são técnicas utilizadas para inspeção de materiais ou equipamentos sem danificá-los. Para a detecção de descontinuidades/defeitos na solda, os mais utilizados são os ensaios de inspeção visual, líquidos penetrantes, radiografia e ultrassom. Nesta seção, serão comentados apenas os três primeiros ensaios citados.

- **Ensaio Visual:** A inspeção visual é o método mais simples e o mais utilizado, sendo normalmente o primeiro ensaio a ser realizado, pois não é necessário nenhum equipamento especial, apenas uma boa visão do inspetor e alguns equipamentos básicos. Requer um inspetor com boa experiência e conhecimento nos materiais e processos de soldagem. Os equipamentos mais utilizados são: réguas para o controle dimensional da junta, lanternas, lupas, endoscópios, espelhos para se conseguir ter acesso a áreas mais

restritas e, por último, sistemas de examinação flexíveis com câmara de filmar de modo a que o inspetor consiga visualizar remotamente áreas não acessíveis (PEREIRA, 2020).

- Ensaio de líquidos penetrantes: Segundo Pereira (2020), este ensaio permite detectar e localizar descontinuidades superficiais, e para isso a superfície da peça deve estar limpa. O *kit* para realizar o ensaio é composto por um desengraxante, o penetrante e o revelador, geralmente fornecidos em aerossol. Devido à alta capilaridade da tinta líquida penetrante, quando aplicada na superfície, invade as descontinuidades superficiais (poros, mordeduras, trincas, etc.) por ação capilar. Após um período, é feita a remoção do excesso do líquido penetrante e então é aplicado o revelador. O revelador consiste em um produto absorvente, de forma a evidenciar as indicações do penetrante, assinalando assim a localização de descontinuidades (PEREIRA, 2020). A Figura 14 ilustra as sequências e etapas do ensaio por líquidos penetrantes, buscando demonstrar a correta realização do ensaio.

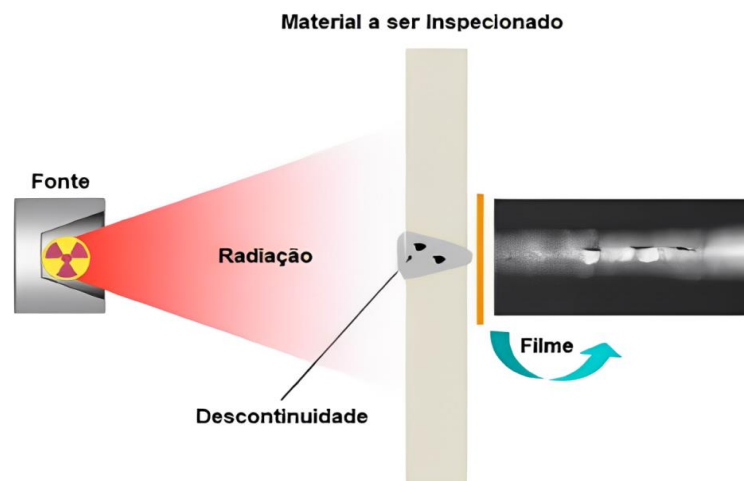
Figura 14 - Ilustração da sequência de ensaio de líquidos penetrantes.



Fonte: Adaptado de Garcia (2012)

- Radiografia industrial: A radiografia é um ensaio não-destrutivo que utiliza a absorção diferenciada de radiação para inspecionar peças, com base nas variações de densidade e espessura, bem como nas características de absorção do material. Essa variação de absorção, captada por um filme, tubo de imagem ou detectores eletrônicos, indica possíveis falhas internas ou descontinuidades. No contexto industrial, a radiografia é particularmente eficaz para detectar defeitos internos volumétricos em materiais, especialmente aqueles com diferenças de espessura ou densidade em relação a regiões vizinhas. A capacidade de detectar defeitos como trincas depende da técnica de ensaio utilizada, e descontinuidades com espessura variável em todas as direções são mais facilmente identificadas, desde que não sejam muito pequenas em comparação com a espessura da peça. (INFOSOLDA, 2013). A Figura 15 mostra como é realizado o ensaio e obtido o filme.

Figura 15 - Ilustração do ensaio de radiografia.



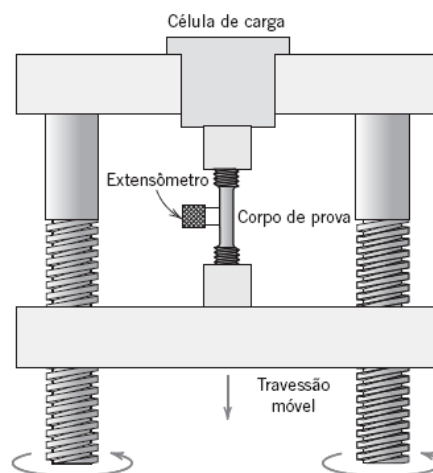
Fonte: Infosolda (2013)

2.3.2 Ensaios Mecânicos

Diferentemente dos END's, os ensaios mecânicos são destrutivos pois promovem a ruptura ou a inutilização do material (SOUZA, 2012). Porém, permitem a determinação de propriedades mecânicas dos materiais e seus comportamentos quando estão expostos à esforços. Os ensaios mecânicos presentes neste trabalho são:

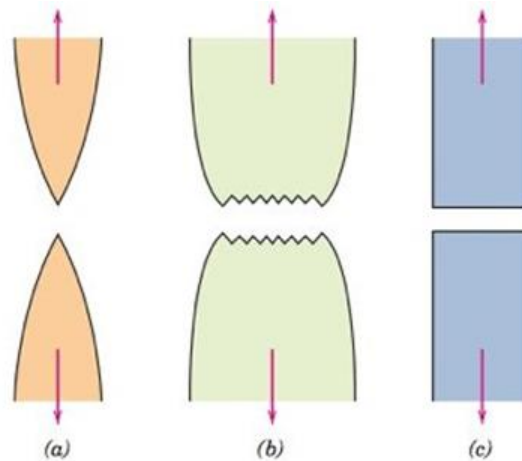
- **Macrografia:** Segundo Colpaert (2008) na observação por meio da macrografia, é possível examinar aspectos da macroestrutura de uma amostra de material metálico, cuja superfície deve estar bem polida e ter sido submetida a um ataque com um reagente químico apropriado. A verificação pode ser feita com o auxílio de uma lupa, a olho nu ou com o auxílio de um estereoscópio e a ampliação máxima utilizada para representar os resultados relacionados à macroestrutura é de até 10 vezes ou no tamanho natural da amostra. Para realizar o exame macroscópico, o corpo de prova precisa ser preparado seguindo algumas etapas, como a escolha e definição do local da seção a ser estudada, o preparo da seção selecionada com uma superfície plana e acabamento polido, e a realização do ataque químico com um reagente adequado na superfície polida.
- **Ensaio de tração para juntas soldadas:** De acordo com Garcia, Alvares e Santos (2012) o ensaio de tração se define na aplicação de uma carga uniaxial de forma crescente e até a ruptura em um corpo de prova específico, cujas dimensões são obtidas pelas normas técnicas de qualificação de soldagem. A partir deste ensaio é obtida a curva tensão *versus* deformação do corpo de prova. Trata-se de um ensaio muito utilizado pelo fato de fornecer dados quantitativos das propriedades mecânicas do material ensaiado, como o limite de resistência à tração, limite de escoamento, módulo de elasticidade e o alongamento. Para o ensaio de tração em juntas soldadas, o principal dado a ser coletado é a tensão de ruptura, visto que o critério de aceitação das normas está relacionado somente à tensão de ruptura. A Figura 16 e a Figura 17 mostram, respectivamente, a representação do processo de ensaio de tração e o formato dos tipos de fratura.

Figura 16 - Representação do processo de ensaio de tração.



Fonte: Callister (2019)

Figura 17 - a) fratura altamente dúctil. b) fratura moderadamente dúctil. c) fratura frágil

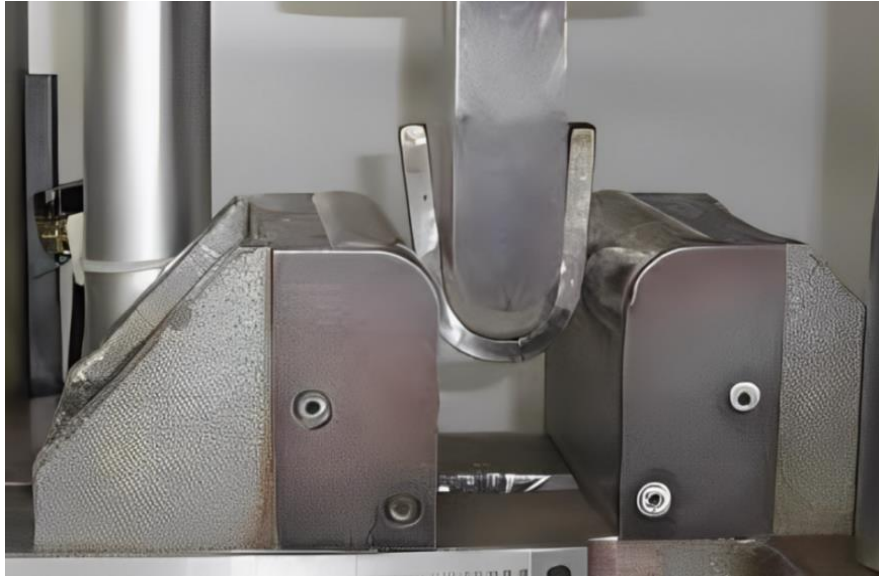


Fonte: Callister (2016)

Na fratura altamente dúctil (Figura 17.a), observa-se a formação de um pescoço acentuado na amostra, resultando em uma redução quase total da área, próxima a 100%. Já na fratura moderadamente dúctil (Figura 17.b), ocorre um empescoamento com menor intensidade, com uma redução moderada da área. Por outro lado, na fratura frágil (Figura 17.c), a ruptura acontece de forma brusca e sem deformação visível, com a propagação da trinca ocorrendo de maneira rápida e praticamente perpendicular à direção da tensão aplicada na amostra (CALLISTER, 2016).

- **Ensaio de dobramento:** O ensaio de dobramento é um dos mais utilizados para avaliar a qualidade de uma solda e envolve submeter o corpo de prova (dimensões de acordo com a especificação na norma técnica aplicável) a uma força aplicada no centro, a fim de dobrá-lo até atingir um ângulo específico, conforme Figura 18. Esse ensaio tem como objetivo avaliar tanto a resistência quanto a ductilidade da solda, além de identificar possíveis defeitos na junta soldada, como trincas, fissuras e porosidade. Há diferentes tipos de dobramento, que variam de acordo com a posição em que a carga é aplicada e o plano de dobramento: transversal ou longitudinal, podendo ser na face ou na raiz da solda. (ROMANO; VILAR; ARGARATE, 2023). Segundo a FBTS (2009), no ensaio de dobramento transversal, o corpo de prova é dobrado perpendicularmente ao eixo da solda, e, no dobramento longitudinal, o dobramento ocorre paralelamente ao eixo da solda.

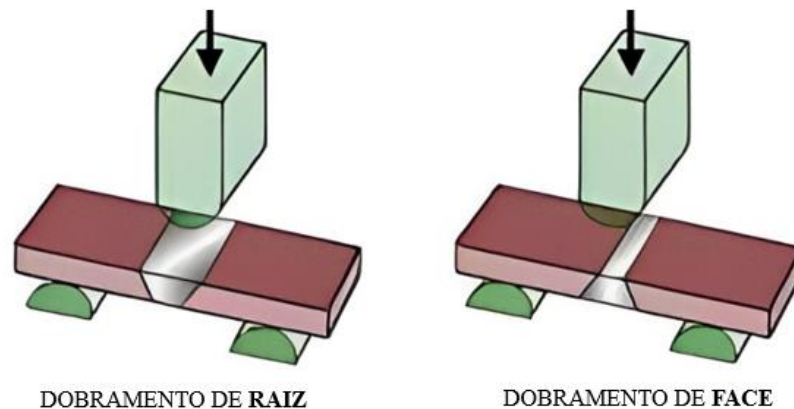
Figura 18 - Ensaio de dobramento em um corpo de prova de aço.



Fonte: Romano, Vilar e Argarate (2023)

Já quanto à região testada, o dobramento pode ser de face, onde a face do cordão é posicionada na parte externa do raio de dobramento, ou de raiz, que coloca a raiz da solda na parte externa do raio de dobramento (Figura 19). Vale ressaltar que o ensaio de dobramento é puramente qualitativo não fornecendo valores numéricos.

Figura 19 - Ilustração do ensaio de dobramento de face e de raiz.



Fonte: Labteste (2024)

2.4 DESCONTINUIDADES E DEFEITOS NA SOLDAGEM

De acordo com a Fundação Brasileira de Tecnologia da Soldagem (FBTS, 2009), “descontinuidade é a interrupção das estruturas típicas de uma peça, no que se refere à homogeneidade de características físicas, mecânicas ou metalúrgicas”.

De acordo com a mesma fonte, “defeito é quando a descontinuidade, por sua natureza, dimensão ou efeito acumulado, torna a peça inaceitável, por não satisfazer os requisitos mínimos da norma técnica aplicável”.

Neste contexto, pode-se dizer que “todo defeito é uma descontinuidade, mas nem toda descontinuidade é um defeito”. Por exemplo, uma trinca por menor que seja já pode ser considerada um defeito por sua natureza. Esta trinca quando submetida a esforços, pode se propagar e causar até mesmo uma falha catastrófica dependendo da situação. Entretanto, poros, mordeduras, faltas de fusão dentre outras descontinuidades, embora sejam considerados concentradores de tensão (CALLISTER, 2019), só poderão ser tratados como defeitos do ponto de vista da soldagem em função de suas dimensões ou efeito acumulado. Explicando melhor, um poro ou uma quantidade reduzida deles distribuída ao longo de um cordão de solda, dificilmente será considerado como um defeito de acordo com qualquer norma vigente, ou seja, não compromete ou compromete tão pouco a integridade do cordão de solda que não é viável retrabalhar ou descartar uma peça por causa disso. Todavia, um grande número de poros concentrado vai exigir retirada de material e a realização de nova solda naquela região em particular, ou seja, retrabalho indesejável.

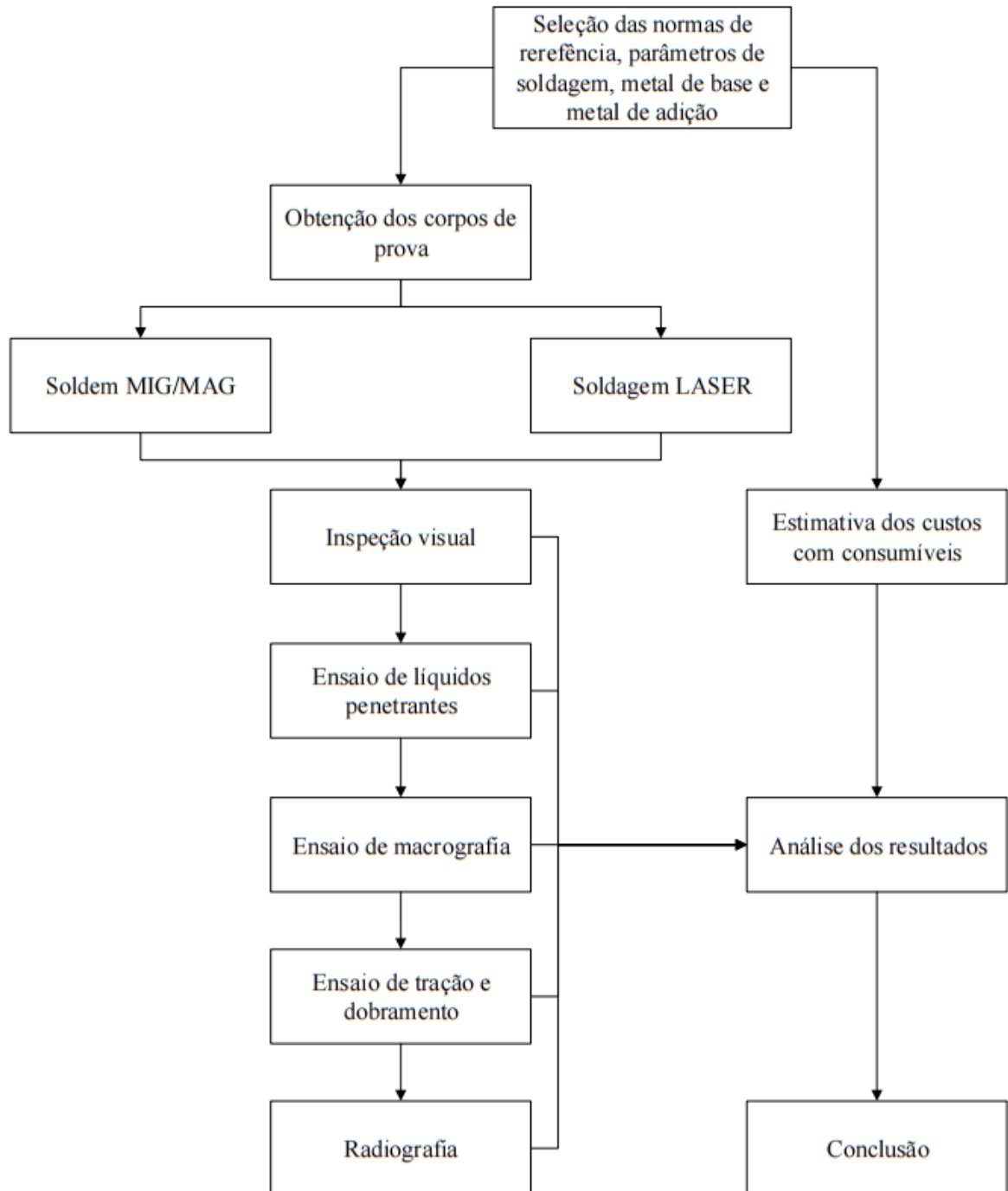
3 METODOLOGIA

Este capítulo descreve os procedimentos técnicos e experimentais aplicados no desenvolvimento deste estudo, que visou realizar uma análise comparativa das propriedades mecânicas de juntas soldadas em aço de baixo carbono com processos LASER e MIG/MAG. Estes ensaios almejam servir não apenas a este estudo, mas também auxiliar na tomada de decisão da empresa nos aspectos técnicos, com menor ênfase, na questão dos custos. Os ensaios conduzidos neste trabalho incluem ensaios não destrutivos ou END (ensaio visual, líquido penetrante e radiografia) e ensaios mecânicos (macrografia, ensaios de tração e dobramento). Os ensaios de macrografia, tração, dobramento e radiografia foram realizados por uma empresa terceirizada especializada em ensaios para qualificação do procedimento de soldagem. Os demais ensaios, como ensaio visual e líquido penetrante foram realizados nas dependências do IFRS Câmpus Ibirubá.

Os ensaios não destrutivos foram conduzidos conforme a norma da *American Welding Society* AWS B1.11:2000 (AWS, 2000) e para o ensaio de líquido penetrante (LP) foram seguidas algumas recomendações dadas no manual da Fundação Brasileira de Tecnologia de Soldagem (FBTS, 2009). Os ensaios mecânicos foram conduzidos conforme procedimentos laboratoriais e com base em normas específicas, utilizando como referência as diretrizes da AWS dadas nas normas B2.1/B2.1M:2021 (AWS, 2021) e D14.3/D14.3M:2019 (AWS 2019) para orientar os métodos de ensaio, definir as dimensões dos corpos de prova, bem como os formatos e os locais de retirada das amostras.

A Figura 20 apresenta o fluxograma experimental com as etapas realizadas para a execução do estudo proposto.

Figura 20 - Fluxograma experimental do estudo.



Fonte: Autor (2024)

3.1 METAL DE BASE

O material mais utilizado na fabricação de máquinas e implementos agrícolas é o aço carbono, pois o mesmo entrega propriedades mecânicas adequadas, facilidade de conformação, boa soldabilidade, além de possuir custo menor em comparação com aços ligados. Neste contexto, o aço ASTM A1011 foi escolhido como metal de base, devido às suas características que atendem às exigências de resistência mecânica, aliadas a um custo competitivo para a aplicação desejada. O material foi obtido por meio de duas chapas laminadas a quente, com dimensões de 1500 mm x 3000mm (largura x comprimento) e com espessuras de 2,65mm e 4,25mm.

De acordo com informações da Usiminas e conforme especificado na norma de referência, o aço ASTM A1011 (grau 30) deve apresentar um limite de ruptura mínimo de 340 MPa.

A Tabela 2 e a Tabela 3 apresentam, respectivamente, a composição química (levantada a partir de ensaios químicos) e as propriedades mecânicas deste material, cujo certificado de inspeção encontra-se no Anexo A.

Tabela 2 - Composição química (% em peso) do material ensaiado.

| Material | Componente | % em peso | Componente | % em peso |
|------------------|-------------------|------------------|-------------------|------------------|
| ASTM-A1011-SS-30 | C | 0,11 | Ti | 0,002 |
| | Si | 0,03 | Cr | 0,01 |
| | Mn | 0,35 | N | 0,0037 |
| | P | 0,017 | B | 0,0001 |
| | S | 0,005 | Nb | 0,001 |
| | Al | 0,033 | V | 0,001 |
| | Cu | 0,02 | Ca | 0,0039 |

Fonte: Certificado de inspeção Usiminas (2024)

Tabela 3 - Propriedades mecânicas do material ensaiado.

| Material | Limite de escoamento (Mpa) | Limite de ruptura (Mpa) | Alongamento (%) |
|------------------|-----------------------------------|--------------------------------|------------------------|
| ASTM-A1011-SS-30 | 286 | 426 | 32 |

Fonte: Certificado de inspeção da Usiminas (2024)

3.2 METAL DE ADIÇÃO

O metal de adição (arame) utilizado em ambos os processos foi o ER70S-6 de 1mm de diâmetro cujas propriedades mecânicas são apresentadas na Tabela 4.

Tabela 4 - Propriedades mecânicas do arame ER70S-6 segundo norma AWS A 5.18.

| Especificação do arame | limite de escoamento mínimo | limite de resistência à tração mínimo | Charpy V mínimo de 27J a -30°C | Alongamento |
|------------------------|-----------------------------|---------------------------------------|--------------------------------|-------------|
| AWS A5.18 ER70S-6 | 420 MPa | 490 MPa | 27J | 30% |

Fonte: Autor (2024)

Ainda sobre o arame ER70S-6, a Tabela 5 apresenta a composição química nominal do arame conforme AWS 5.18-2005 (SCOTTI; PONOMAREV, 2008).

Tabela 5 - Composição química nominal do arame ER70S-6, segundo norma AWS A 5.18.

| Classificação | Componente | % | Componente | % |
|--------------------------|------------|-------------|------------|-------------|
| AWS 5.18-2005 ER70S-6 | %C | 0,06 à 0,15 | %Ni | < 0,15 |
| | %Mn | 1,4 à 1,85 | %Cr | < 0,15 |
| | %Si | 0,8 à 1,15 | %Mo | < 0,15 |
| | %P | < 0,025 | %Ti | 0,05 à 0,15 |
| | %S | < 0,035 | %Zr | 0,05 à 0,15 |
| | %Cu | < 0,5 | %Al | 0,05 à 0,15 |

Fonte: Scotii e Ponomarev (2008)

3.3 OBTENÇÃO DOS CORPOS DE PROVA

A obtenção dos corpos de prova ocorreu dentro da empresa por meio do processo de corte a *LASER* em uma máquina da fabricante Trumpf, modelo TruLASER 5030 conforme mostra a Figura 21.

Figura 21 - Máquina de corte a LASER Trumpf TruLASER 5030.



Fonte: Autor (2024)

Para realização dos ensaios foram cortadas um total de 20 chapas, nas dimensões de 125 mm x 300 mm. Estas formaram um total de 10 conjuntos soldados. O número e a identificação dos corpos de prova para cada ensaio e para cada processo são apresentados na Tabela 6, lembrando que são necessárias duas chapas para formar um corpo de prova (CP), seja este uma junta de topo ou de ângulo.

Tabela 6 - Identificação dos corpos de prova. Siglas: CPL = corpo de prova soldado com LASER; CPM = corpo de prova soldado com MIG/MAG.

| Identificação da chapa | Processo de soldagem | Tipo de junta | Identificação do corpo de prova (conjuntos soldados) |
|------------------------|----------------------|---------------|--|
| 1 | LASER | Topo | CPL01 |
| 2 | | | |
| 3 | MIG/MAG | Topo | CPM01 |
| 4 | | | |
| 5 | LASER | Ângulo | CPL02 |
| 6 | | | |
| 7 | MIG/MAG | Ângulo | CPM02 |
| 8 | | | |
| 9 | MIG/MAG | Ângulo | CPM03 |
| 10 | | | |
| 11 | LASER | Ângulo | CPL03 |
| 12 | | | |
| 13 | LASER | Ângulo | CPL04 |
| 14 | | | |
| 15 | LASER | Ângulo | CPL05 |
| 16 | | | |
| 17 | LASER | Topo | CPL06 |
| 18 | | | |
| 19 | MIG/MAG | Topo | CPM04 |
| 20 | | | |

Fonte: Autor (2024)

3.4 SOLDAGEM DOS CORPOS DE PROVA

Após a confecção dos corpos de prova, foi realizada a soldagem dos mesmos utilizando os processos de soldagem LASER e MIG/MAG. Devido ao fato de que os processos se diferem, os parâmetros de soldagem utilizados foram definidos relacionando referenciais teóricos, manuais dos fornecedores e especificações técnicas, juntamente com os parâmetros utilizados diariamente dentro da empresa para os processos de soldagem. Como condição para aprovação de um corpo de prova (ou seja, um corpo de prova aprovado para o ensaio mecânico ou não destrutivo), o resultado da soldagem deve ser passar em um ensaio visual prévio, ou seja, a solda deve ter uma boa aparência e não apresentar descontinuidades visíveis a olho nu.

A soldagem com o processo MIG/MAG foi realizada em uma máquina modelo Speedtec da fabricante *Lincoln Electric*, conforme Figura 22. O processo foi realizado por um soldador da empresa com grande experiência na soldagem MIG/MAG.

Figura 22 - Máquina de solda MIG/MAG modelo Speedtec.



Fonte: Autor (2024)

Já a soldagem a *LASER* foi realizada em uma máquina de solda a *LASER* manual, da fabricante *IPG Photonics* modelo Light Weld XR, conforme Figura 23.

Figura 23 - Fonte de soldagem LASER manual com alimentador de arame.



Fonte: Autor (2024)

3.4.1 Soldagem dos CPs como junta de topo

A soldagem das juntas de topo, com ambos os processos, foi realizada de forma manual. Não houve preparação em nenhuma das juntas, podendo classificá-las como juntas de topo com chanfro reto. As soldagens foram feitas em apenas um dos lados das amostras, de forma a exigir uma penetração total na junta em um único passe, conforme orientação da AWS B2.1/B2.1M:2021

A Tabela 7 apresenta os parâmetros de soldagem utilizados em ambos os processos.

Tabela 7 - Parâmetros de soldagem utilizados.

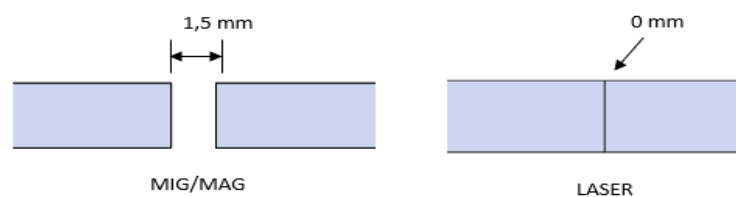
| Soldagem Laser | | Soldagem MIG/MAG | |
|---------------------|---|---------------------|---------------------------|
| Potência (Watt) | 1500 W | Potência | 6864 W |
| Amplitude | 2 mm | Corrente | 260A |
| Velocidade do arame | 0,7 m/min | Tensão | 26,4 Volts |
| Vazão de gás | 25 L/min | Velocidade do Arame | 16 m/min |
| Tipo de gás | (100% N ₂) e (95% Ar +5% O ₂) | Vazão de gás | 14 L/min |
| Frequência | 72 Hz | Tipo de gás | 95% Ar +5% O ₂ |

Fonte: Autor (2024)

Na junta soldada pelo processo MIG/MAG, foi deixada uma abertura de raiz (*gap*) de 1,5 mm entre as chapas. Essa abertura foi propositalmente utilizada para facilitar a obtenção de penetração total da solda, uma característica importante desse processo. Já no caso da soldagem a LASER, a abertura foi mantida em zero, uma vez que, como mencionado anteriormente, uma das principais limitações desse método é a dificuldade de preencher lacunas de maneira eficiente, o que comprometeria a qualidade da solda se houvesse um espaço significativo entre as chapas. Ademais, o processo LASER tem como característica a alta concentração de energia o que facilita a fusão completa da junta.

A Figura 24 exemplifica a abertura de raiz dos corpos de prova de ambos os processos.

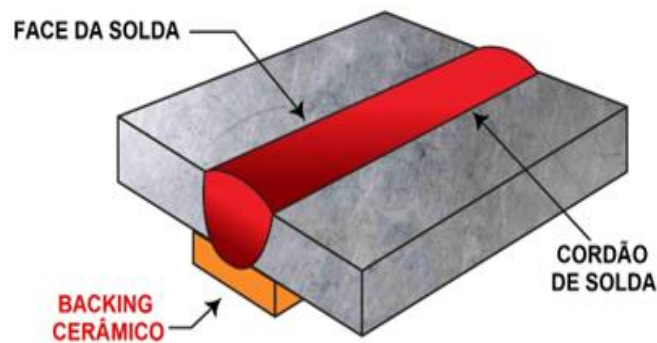
Figura 24 - Tipos de abertura de raiz utilizadas nos processos.



Fonte: Autor (2024)

A soldagem foi realizada em uma bancada especialmente desenvolvida para fixação adequada dos corpos de prova, garantindo estabilidade e precisão durante o processo, conforme mostrado na Figura 25. Para facilitar a fusão total da junta e evitar que o metal de solda escorresse pela parte inferior, foi adicionado um *backing* cerâmico na parte inferior da junta, conforme ilustrado na Figura 26.

Figura 25 - Ilustração da aplicação do *backing* cerâmico.



Fonte: Sumig (2024)

Figura 26 - Forma de fixação dos corpos de prova (junta de topo).



Fonte: Autor (2024)

3.4.2 Soldagem dos CPs com junta de ângulo

Os CPs com junta de ângulo foram soldados com diferentes parâmetros de soldagem, especialmente no processo LASER para entender o comportamento da geometria do cordão. Com isso foi possível analisar o comportamento do cordão de solda de acordo com a variação dos parâmetros de soldagem. Nesse caso, todas as juntas foram soldadas sem nenhum espaço entre elas (*gap*).

Com a intenção de analisar o comportamento da soldagem a LASER com diferentes tipos de gases, os corpos de prova foram submetidos a soldagem utilizando dois gases distintos: um que pode ser considerado inerte (Nitrogênio) e outro composto por uma mistura de um gás inerte com um gás ativo (95% Argônio + 5% Oxigênio). Essa abordagem permitiu observar como cada tipo de gás influencia o processo e a qualidade da solda. A Tabela 8 apresenta os parâmetros de soldagem e os gases de proteção utilizados em cada corpo de prova.

Tabela 8 - Parâmetros e gases de proteção utilizados na soldagem dos CPs.

| Processo | Identificação do CP | Potência | Amplitude | Frequência | Velocidade do arame | Gás de proteção |
|----------|---------------------|----------|-----------|------------|---------------------|---------------------------|
| LASER | CPL02 | 1500W | 2mm | 60 Hz | 0,65m/min | 95%Ar + 5% O ₂ |
| | CPL03 | 1500W | 2mm | 60 Hz | 0,65m/min | 100% N ₂ |
| | CPL04 | 1450W | 3mm | 25Hz | 0,45m/min | 100% N ₂ |
| | CPL05 | 1450W | 4,5mm | 25Hz | 0,45m/min | 95%AR + 5%O ₂ |
| Processo | Identificação do CP | Potência | Tensão | Corrente | Velocidade do arame | Gás de proteção |
| MIG/MAG | CPM02 | 6829,2W | 25,2V | 271 A | 13,8 m/min | 95%Ar + 5%O ₂ |
| | CPM03 | 6654,8W | 25,4V | 262 A | 10 m/min | 95%Ar + 5%O ₂ |

Fonte: Autor (2024)

A Figura 27 ilustra como ocorreu a fixação das chapas para realização das soldagens.

Figura 27 - Forma de fixação para soldagem dos corpos de prova (junta de ângulo).



Fonte: Autor (2024)

3.5 INSPEÇÃO VISUAL

A inspeção visual foi realizada com o propósito de identificar possíveis defeitos/descontinuidades superficiais nas soldas que possam ser vistas a olho nu e analisar a deformação causada pelo aporte térmico de ambos os processos de soldagem. Embora simples, este ensaio serve como preliminar para os ensaios não destrutivos ou mecânicos que vêm a seguir, além de servir para corrigir erros durante ensaios preliminares onde se está tentando levantar parâmetros de soldagem. Basicamente, os corpos de prova foram colocados em uma bancada e analisados visualmente com auxílio de uma lupa. O ensaio foi realizado nos corpos de prova identificados como CPL01 e CPM01, (junta de topo) que posteriormente irão ser submetidos a ensaios mecânicos e também nos corpos de prova CPM02, CPL02 e CPL03 (junta de ângulo).

3.6 ENSAIO DE LÍQUIDO PENETRANTE

O ensaio por líquido penetrante foi realizado nas dependências do IFRS Câmpus Ibirubá, nos corpos de prova identificados como CPL01 e CPM01 com a finalidade de identificar possíveis defeitos superficiais nas soldas realizadas antes de submetê-las aos ensaios posteriores (tração e dobramento).

Foi utilizado os produtos da (ORBIQUÍMICA, 2023) identificados da seguinte forma: 1 - desengraxante, 2 - penetrante e 3 - revelador, conforme ilustra a Figura 28. O ensaio foi

realizado seguindo as diretrizes estabelecidas no curso de inspetor de soldagem da Fundação Brasileira de Tecnologia da Soldagem (FBTS, 2009). Esse procedimento garante a conformidade com as normas e padrões técnicos adequados para a detecção de descontinuidades em materiais.

Figura 28 - Kit de líquido penetrante.

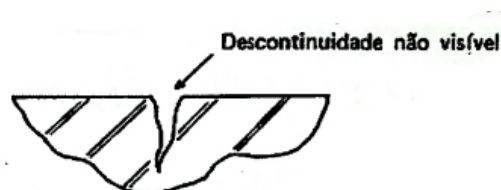


Fonte: Orbiquimica (2023)

O ensaio foi realizado seguindo os passos descritos pela FBTS (2009):

- a) Limpeza inicial (1): A limpeza inicial tem como objetivo remover graxa, óleo, ferrugem e sujeira que possam estar presentes na superfície a ser ensaiada. Para isso, foi utilizado o produto número 1 (desengraxante) em todos os pontos de controle (CPs) analisados. Após a aplicação do desengraxante, foi necessário aguardar 15 minutos para que o produto agisse. Em seguida, foi realizada a limpeza da superfície utilizando uma estopa, garantindo que todos os resíduos fossem removidos adequadamente. (Figura 29).

Figura 29 - Limpeza da descontinuidade e suas adjacências.

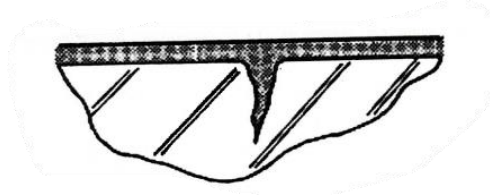


Fonte: FBTS (2009)

- b) Aplicação do penetrante (2): Após a realização da limpeza da superfície foi aplicado o líquido 2 (penetrante), de modo a cobrir toda a área a ser examinada. Foi então

aguardado um tempo de 30 min, até o penetrante agir por ação capilar para dentro das descontinuidades existentes conforme orientação da FBTS (2009). (Figura 30):

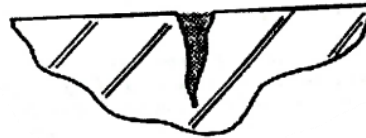
Figura 30 - Penetração do líquido penetrante na descontinuidade.



Fonte: FBTS (2009)

- c) Remoção do excesso do penetrante: Depois de aguardar o tempo de penetração foi removido o excesso de penetrante da superfície dos corpos de prova utilizando novamente o desengraxante (1) e um pano limpo. (Figura 31).

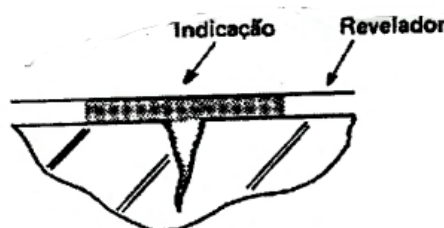
Figura 31 - Remoção do excesso de líquido penetrante.



Fonte: FBTS (2009)

- d) Aplicação do revelador (3): Após a remoção do excesso de penetrante, foi aplicada uma camada fina e uniforme do revelador (produto número 3) nas superfícies a serem analisadas. Defeitos superficiais tendem a ser revelados imediatamente após a aplicação do revelador. No entanto, para garantir que eventuais descontinuidades menores também sejam detectadas, foi aguardado 30 minutos antes de realizar a inspeção final. Essa espera permite que o revelador atue adequadamente, maximizando a eficácia do ensaio. (Figura 32).

Figura 32 - Aplicação do revelador e aparecimento da indicação da descontinuidade.



Fonte: FBTS (2009)

- e) Inspeção Final: Nessa última etapa, os corpos de prova foram examinados visualmente, procurando indicações de descontinuidades apontadas pelo revelador, tais como trincas, poros, etc. Como o líquido 2 (penetrante) tem coloração avermelhada, eventuais descontinuidades devem ficar indicadas com a mesma cor.

3.7 ENSAIOS DE TRAÇÃO E DOBRAMENTO

Os ensaios de tração e dobramento foram realizados nos CPs identificados como CPM01 e CPL01, ambos com espessura de 2,65 mm. A realização dos ensaios seguiu as diretrizes estabelecidas pela norma AWS, sessão B2.1/B2.1M:2021, a qual define os procedimentos específicos para a extração e preparação das amostras, bem como a quantidade mínima de amostras necessárias para cada tipo de ensaio. Além disso, a norma também orienta quanto às condições de execução dos testes, garantindo que todos os parâmetros, como força aplicada, ângulo de dobramento, entre outros, sejam devidamente controlados para assegurar a confiabilidade dos resultados obtidos. Todos os procedimentos foram seguidos para garantir que os ensaios estivessem em conformidade com os padrões exigidos

Primeiramente, foi realizada a extração das amostras das chapas soldadas de acordo com as dimensões e quantidades estabelecidas pela AWS, conforme ilustrado na Figura 33. A Figura 34 apresenta as dimensões das amostras de tração e dobramento, enquanto a Figura 35 mostra as amostras após serem removidas dos corpos de prova.

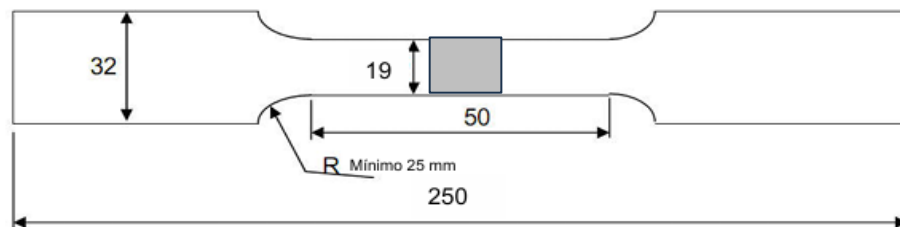
Figura 33 - Orientação para retirada de corpos de prova para ensaio de dobramento e tração para qualificação de procedimento pela norma AWS B2.1/B2.1M:2021.

| | | |
|------------|--|------------|
| Descartar | | esta parte |
| Dobramento | | de raiz |
| Ensaio de | | Tração |
| Dobramento | | de face |
| Dobramento | | de raiz |
| Ensaio de | | Tração |
| Dobramento | | de face |
| Descartar | | esta parte |

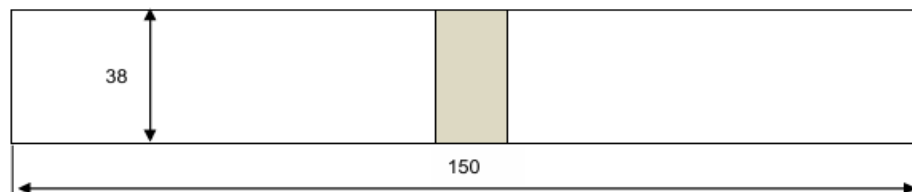
Fonte: Autor (2024)

Figura 34 - Dimensões das amostras para ensaio de tração e dobramento.

Corpo de prova de tração:

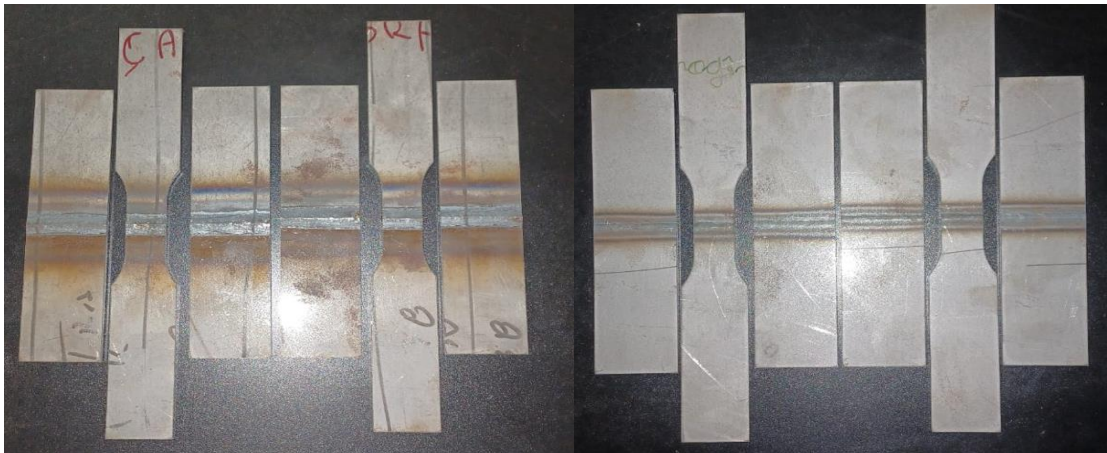


Corpo de prova de dobramento:



Fonte: Autor (2024)

Figura 35 - Corpos de prova de tração e dobramento após serem removidos.



Fonte: Autor (2024)

Após a extração das amostras, os reforços da face e da raiz foram removidos até ficarem alinhados com o metal de base, de modo a obter uma face totalmente plana. Cada uma das amostras recebeu uma identificação, que foi utilizada para organizar e acompanhar os ensaios mecânicos subsequentes. Essa identificação serviu como referência para a análise dos resultados obtidos em cada teste realizado. As novas identificações das amostras podem ser verificadas na Tabela 9.

Tabela 9 - Identificação dos corpos de prova soldados para os ensaios destrutíveis. Siglas: T = tração; DF = dobramento de face; DR = dobramento de raiz; CPL = corpo de prova para LASER e; CPM = corpo de prova para MIG/MAG.

| Processo de soldagem | Identificação do corpo de prova | Tipo de junta | Ensaio mecânico | Identificação da amostra |
|----------------------|---------------------------------|---------------|--------------------|--------------------------|
| LASER | CPL01 | Junta de topo | Tração | CPL01-T1 |
| | | | Tração | CPL01-T2 |
| | | | Dobramento de Face | CPL01-DF1 |
| | | | Dobramento de Face | CPL01-DF2 |
| | | | Dobramento de raiz | CPL01-DR1 |
| | | | Dobramento de raiz | CPL01-DR2 |
| MIG/MAG | CPM01 | Junta de topo | Tração | CPM01-T1 |
| | | | Tração | CPM01-T2 |
| | | | Dobramento de Face | CPM01-DF1 |
| | | | Dobramento de Face | CPM01-DF2 |
| | | | Dobramento de raiz | CPM01-DR1 |
| | | | Dobramento de raiz | CPM01-DR2 |

Fonte: Autor, (2024)

Os ensaios de tração e dobramento foram realizados em uma máquina universal de ensaios, modelo RPM IWM 40 T (Figura 36). A máquina utilizada estava com o certificado de calibração atualizado, garantindo a precisão dos resultados.

De acordo com a norma AWS B2.1/B2.1M:2021 o critério de aceitação para o ensaio de tração é que a fratura ocorra no metal de base ou na interface da solda, e a resistência à tração não deve ser inferior à resistência à tração mínima especificada tanto para o metal de base quanto para o metal de adição (AWS, 2021).

Figura 36 - Máquina universal de ensaios modelo RPM IWM 40 T.



Fonte: Autor (2024)

O ensaio de dobramento foi realizado no sentido transversal das amostras (dobramento transversal), sendo elas, quatro amostras para cada processo de soldagem: duas amostras para o dobramento de face e duas amostras para o dobramento de raiz, ambas com ângulo de dobramento de 180°. Já o ensaio de tração foi conduzido com duas amostras para cada processo.

Ainda segundo a AWS B2.1/B2.1M:2021, o critério de aceitação para o ensaio de dobramento transversal deve ser o seguinte: o metal de solda e a zona afetada pelo calor devem estar completamente dentro da faixa dobrada, e não deve haver nenhuma descontinuidade excedendo 3 mm (AWS, 2021). Algumas informações sobre as condições de ensaio, bem como os procedimentos seguidos estão detalhados na Tabela 10.

Tabela 10 - Informações sobre as condições de ensaios e procedimentos seguidos.

| Ensaio | Norma de referência | Preparação | Critério de aceitação | Temperatura | Umidade relativa do ar |
|---------------|----------------------------|-----------------------------|------------------------------|--------------------|-------------------------------|
| Tração | AWS B2.1/ B2.1M:2021 | Anexo A-A3 e figura A.3A | 4.7.5 | 25±5 °C | 60 ±20% |
| Dobramento | AWS B2.1/ B2.1M:2021 | Anexo A-A2 e Figura A.5B | 4.7.6 | 20±5°C | 50 ±20% |

Fonte: Autor (2024)

3.8 MACROGRAFIA

O ensaio de macrografia foi realizado nas juntas de ângulo apresentadas na Tabela 4, seguindo a metodologia descrita pela norma AWS B2.1/B2.1M:2021. O processo começou com o corte do corpo de prova na seção específica onde se desejava realizar a análise. Em seguida, foi feito o embutimento do corpo de prova, que passou por um lixamento utilizando lixas de diversas granulometrias para garantir uma superfície adequada. Após o lixamento, o polimento foi realizado com o auxílio de uma politriz para obter um acabamento mais refinado. Por fim, foi aplicado o ataque químico com uma solução de Nital a 10%, que possibilita a revelação da geometria e zonas da solda para a análise macroscópica. Os procedimentos seguidos para este ensaio estão detalhados na Tabela 11.

Tabela 11 - Informações e procedimentos seguidos para o ensaio de macrografia.

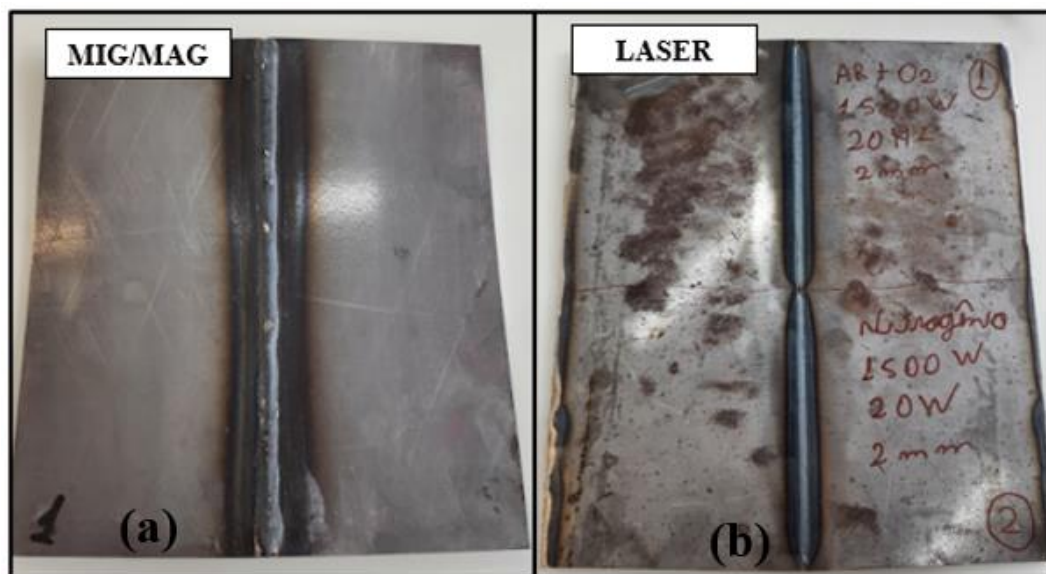
| Método de ataque | Reagente | Norma de referência | Preparação | Método de ensaio | Critério de aceitação |
|-------------------------|-----------------|----------------------------|----------------------------|-------------------------|---|
| Imersão | Nital 10% | AWS B2.1/B2.1M:2021 | Item 4.8.2 e Figura 4.7 | Anexo G | Item 4.8.4 da AWS B2.1 e Item 9.5.5 da AWS D14.3 |

Fonte: Autor (2024)

3.9 RADIOGRAFIA

O ensaio de radiografia foi conduzido com o objetivo de identificar descontinuidade/defeitos internos nas soldas. O ensaio foi realizado nos corpos de prova CPL06 e CPM04. No CPL06, (soldado com o processo LASER), a soldagem foi feita de forma mista, conforme a Figura 37. Metade do corpo de prova foi soldado com 100% nitrogênio (N₂) e a outra metade com uma mistura de 95% argônio (Ar) e 5% oxigênio (O₂). Já no corpo de prova CPM04, (soldado com o processo MIG/MAG) a solda foi realizada em toda a extensão do CP utilizando 95% argônio (Ar) e 5% oxigênio (O₂). Esse procedimento permitiu realizar uma comparação detalhada das possíveis descontinuidades internas entre as diferentes composições de gases utilizadas no processo de soldagem.

Figura 37 - Corpos de prova soldados para o ensaio de radiografia.



Fonte: Autor (2024)

3.10 CUSTOS

Com a finalidade de realizar uma comparação do consumo/custo dos processos de soldagem MIG/MAG e LASER, foi efetuado um cálculo com o objetivo de estimar consumo e o custo de arame, gás e energia elétrica de ambos os processos. Considerou-se dados de entrada como o tamanho de perna dos cordões, diâmetro do arame e densidade do aço para então calcular seu volume e estimar o consumo/custo de arame. Também adotou-se dados de consumo

de gás, velocidade de soldagem e custo da energia elétrica para calcular o consumo/custo de gás e da energia elétrica oriunda dos dois processos.

Vale ressaltar que o consumo de gás está diretamente relacionado a velocidade de soldagem. No processo de soldagem a LASER, quanto menor a espessura da chapa, maior pode ser a velocidade de soldagem, já que a penetração necessária no material é reduzida. No entanto, à medida que a espessura da chapa aumenta, pode ser necessária uma penetração de solda maior, especialmente em peças com grande importância estrutural. Nesses casos, na impossibilidade de aumentar a potência, a velocidade de soldagem precisa ser diminuída para garantir a penetração adequada.

Neste cálculo de estimativa, considerou-se a soldagem de chapas de pequena espessura, especificamente de 2,65 mm. Para chapas mais finas, o custo do gás será ainda menor, já que está diretamente relacionado à velocidade de soldagem. Por outro lado, para chapas mais espessas, o custo será maior, caso seja necessário reduzir a velocidade de soldagem para atingir a penetração desejada.

As suposições e considerações que embasaram essas estimativas foram retiradas de dados reais coletados diariamente no decorrer do trabalho e são descritas a seguir na Tabela 12 (dimensões dos cordões de solda, características do material, consumo de gás e velocidade de soldagem) e na Tabela 13 (custos dos consumíveis).

Tabela 12 - Dados utilizados para estimativa de custo.

| Processo | Tamanho de perna | Comprimento do cordão | Densidade do aço | Consumo de gás | Velocidade de soldagem |
|-----------------|-------------------------|------------------------------|-------------------------|-----------------------|-------------------------------|
| MIG/MAG | 5 mm | 1 m | 7850 kg/m ³ | 14 L/min | 0,4 m/min |
| LASER | 2 mm | 1 m | 7850 kg/m ³ | 25 L/min | 0,6 m/min |

Fonte: Autor (2024)

É preciso ressaltar que a diferença na dimensão dos cordões de solda, mais especificamente as pernas de solda na Tabela 10 são baseadas em dados reais. Detalhando melhor, na prática é bastante difícil, senão impossível, conseguir um cordão de solda com menos de 5 mm de perna no processo MIG/MAG operado manualmente. Por outro lado, no LASER também não é possível, pela própria natureza do processo, conseguir um cordão com pernas de 5 mm para que se tivesse uma comparação em igualdade de condições. O processo LASER apresenta como característica uma baixa deposição de material, daí a diferença entre

os tamanhos dos cordões. É justamente esta última característica que dá a vantagem do LASER em relação ao MIG/MAG no que diz respeito ao consumo de arame.

Tabela 13 - Custos dos consumíveis.

| Consumível | Custo |
|-------------------------------|--------------------------|
| Arame ER70S-6 Ø1mm | R\$ 21,43/Kg |
| Gás Nitrogênio | R\$ 2,00 /m ³ |
| Gás Argônio | R\$ 7,27/m ³ |
| Gás Oxigênio | R\$ 3,36/m ³ |
| Mistura %Ar +5%O ₂ | R\$ 7,075/m ³ |
| Energia elétrica | R\$ 0,13/Kwh |

Fonte: Autor (2024)

3.12 CÁLCULO DOS CUSTOS COM ARAME, GÁS DE PROTEÇÃO E ENERGIA ELÉTRICA

O objetivo deste item é explicar especificamente como foram estimados os custos com arame, gás de proteção e energia elétrica na comparação entre a soldagem MIG/MAG e LASER na soldagem em uma junta de ângulo. As dimensões dos cordões de solda foram dadas anteriormente na Tabela 12 e a metodologia foi adaptada de Villani, Modenesi e Bracarense (2016).

A primeira etapa é o cálculo do Massa de Material Depositado (MMD) que é dada pela Equação (1):

$$MMD = A \times W \times \rho \quad \text{Equação (1)}$$

Onde:

MMD = Massa de Material Depositado (kg);

A = Área da seção transversal do cordão (m²);

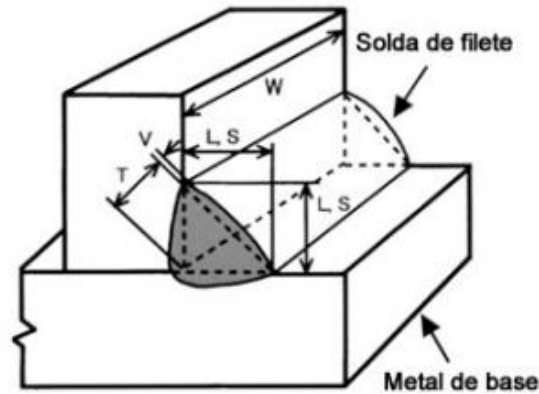
W = Comprimento do cordão (m) e;

ρ = Densidade do aço (7800 kg/m³).

No contexto deste trabalho, o MMD é a quantidade de material que forma um cordão em uma junta de ângulo.

A Figura 38 apresenta estas dimensões em uma representação de uma junta de ângulo soldada. Nota-se por esta figura que se aproxima o formato do cordão solda por um triângulo para facilitar os cálculos.

Figura 38 - Representação das dimensões de um cordão de solda



Fonte: Kobleco (2024)

Depois que a MMD foi estimada, calcula-se o Custo do Material Depositado (CMD) que é dado pela Equação 2 (lembrando que o custo do arame já foi dado anteriormente na Tabela 13):

$$CMD = MMD \times \text{Custo do arame} \quad \text{Equação (2)}$$

Seguindo na estimativa de custos, considera-se agora os gastos com gás de proteção para MIG/MAG e LASER. Neste caso, o procedimento é bastante simples, basta aplicar a Equação 3, onde CG é o custo do gás de proteção, a vazão de gás é dada em litro por minuto (l/min), tempo de arco aberto em segundos (s) e custo de gás está em R\$/m³.

$$CG = \frac{\text{Vazão de gás} \times \text{tempo de arco aberto} \times \text{Custo do gás}}{60000} \quad \text{Equação (3)}$$

Para completar as estimativas de custo, calculou-se o custo com energia elétrica para ambos os processos por intermédio da Equação (4). O preço da energia elétrica foi dado na Tabela 13:

$$CE = \frac{PE \times PES \times t_s}{E} \quad \text{Equação (4)}$$

Onde:

CE = Custo de Energia (R\$)

PE = Preço da energia elétrica (R\$/kWh)

PES = Potência Elétrica de Saída (kW);

t_s = Tempo de soldagem (h) e;

E = Eficiência elétrica do equipamento – MIG/MAG = 85% e LASER = 35% (dados obtidos pelos fabricantes das fontes de soldagem).

Por fim, somou-se todos os custos calculados anteriormente por meio da Equação (5), onde CT é o custo total (R\$):

$$CT = CMD + CG + CE \quad \text{Equação 5}$$

4 RESULTADOS

4.1 INSPEÇÃO VISUAL

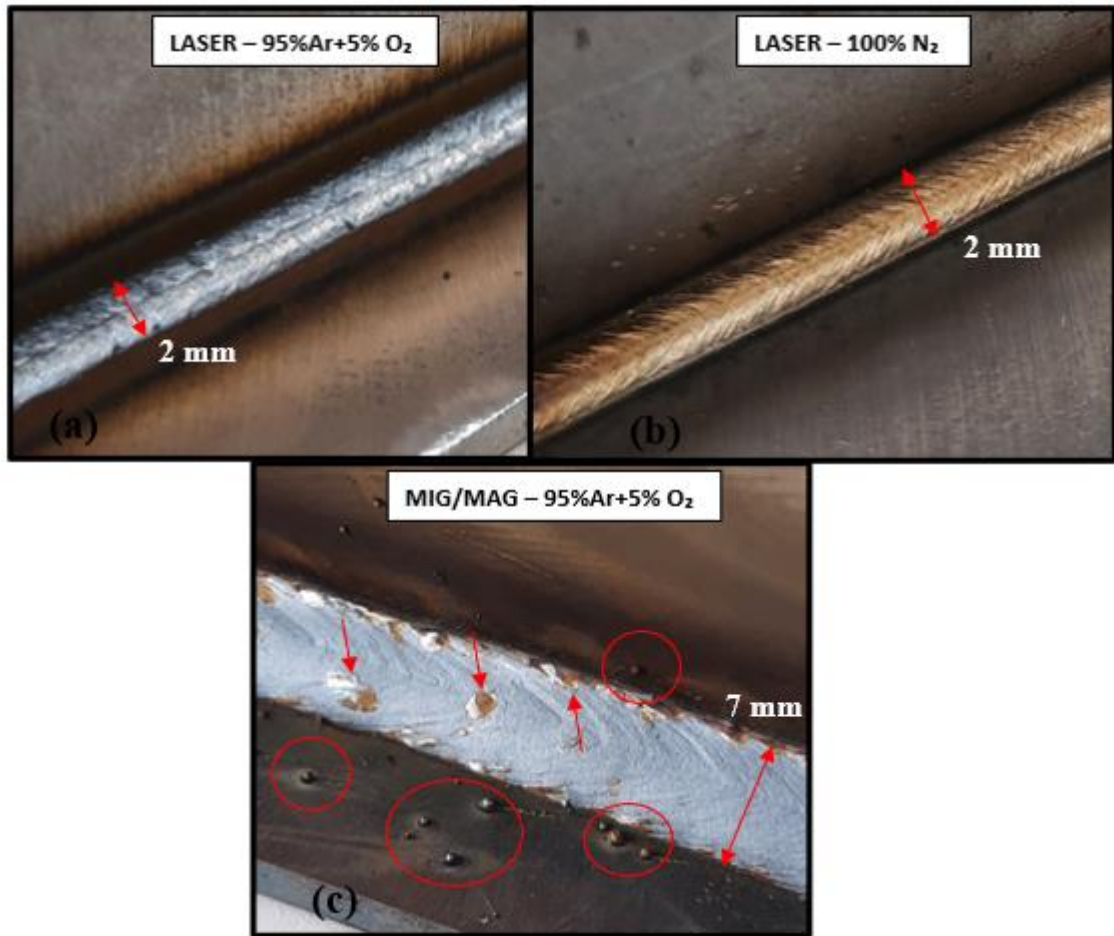
A inspeção visual foi realizada imediatamente após a soldagem dos corpos de prova de ambos os processos, mais especificamente nos CPs identificados como CPL01, CPM01 e CPL06 (juntas de topo) e nos CPs identificados como CPM02, CPL02 e CPL03 (juntas de ângulo). Com esta análise foi possível verificar que os corpos de prova não apresentaram nenhum tipo de defeito superficial que fosse visível a olho nu, apresentando uma solda de boa qualidade.

A Figura 39 apresenta o aspecto dos cordões de solda dos processos LASER e MIG/MAG. Observa-se que, na soldagem a LASER com nitrogênio puro (Figura 39.b), o cordão de solda possui uma qualidade visual superior em comparação à soldagem realizada com a mistura de gases (95%Ar + 5%O₂), (Figura 39.a).

Na Figura 39.c, tem-se a soldagem com processo MIG/MAG, mostrando uma solda com boa aparência, sem descontinuidades visíveis além dos respingos. Neste sentido, a soldagem a LASER demonstra ser livre de respingos visíveis, enquanto o processo MIG/MAG apresenta uma quantidade significativa de respingos, gerando possíveis retrabalhos ao final da soldagem, além da necessidade do uso de antirrespingos, que nem sempre são eficazes. Nota-se também, uma diferença significativa entre a largura dos cordões entre os dois processos, enquanto na solda LASER a largura foi ajustada em 2 mm, o cordão de solda resultante do processo MIG/MAG apresentou uma largura de aproximadamente 7 mm.

No cordão de solda da Figura 39.c, nota-se ainda a formação de uma escória vítrea. A formação deste tipo de escória é bastante comum no MIG/MAG, mas será visto a seguir que é possível sua formação também no processo LASER.

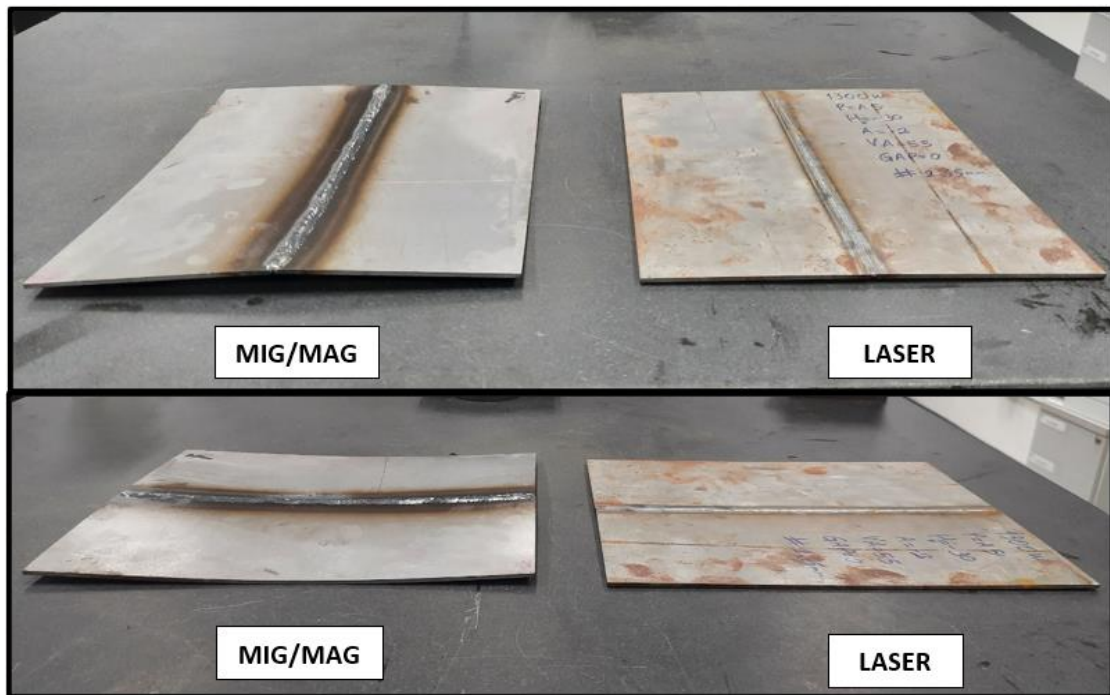
Figura 39 - Comparação visual dos cordões de solda a LASER e MIG/MAG.



Fonte: Autor (2024)

A Figura 40 compara a deformação causada pelo aporte térmico nos corpos de prova CPL01 e CPM01. No corpo de prova soldado pelo processo MIG/MAG, foi observada uma deformação maior em comparação com a corpo de prova soldado com o processo LASER. Isso ocorre porque a soldagem a LASER concentra uma alta quantidade de energia em uma área menor, o que reduz a difusão do calor através da peça e, conseqüentemente, minimiza a deformação. Este resultado corrobora as afirmações que se tem na literatura já discutidas anteriormente no capítulo de referencial teórico. Do ponto de vista prático, este é um bom resultado, pois deformações térmicas costumam causar problemas em estágios posteriores da produção, causando retrabalho, inconvenientes na montagem etc.

Figura 40 - Deformação nos corpos de prova

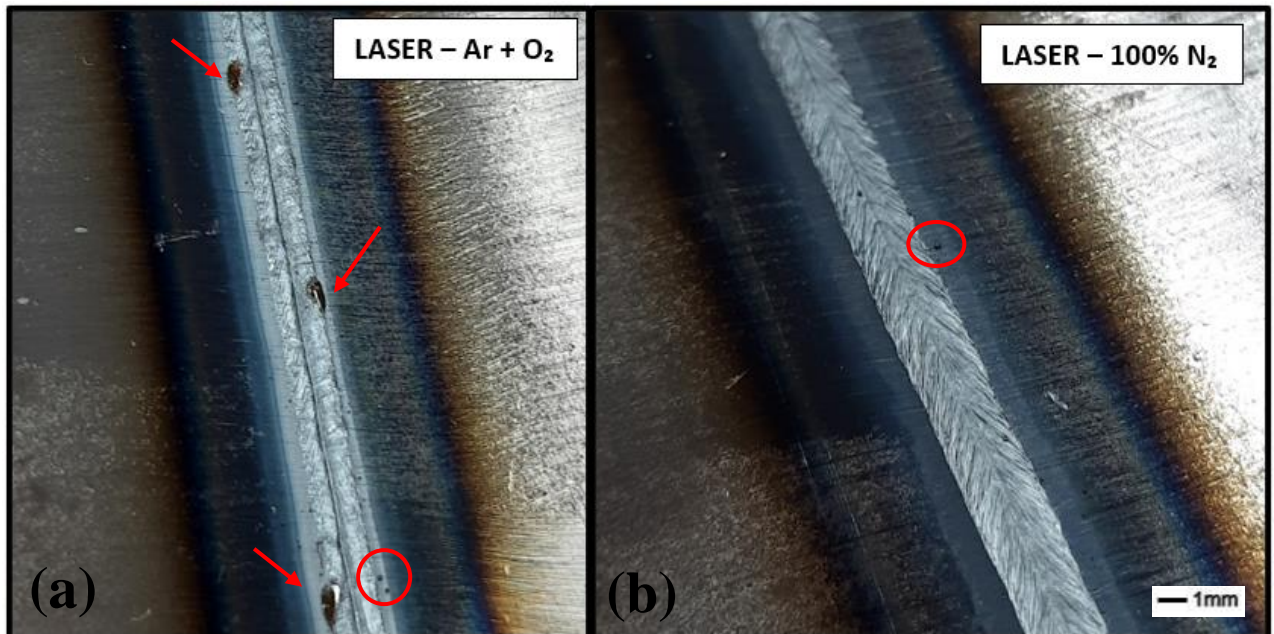


Fonte: Autor (2024)

O aspecto visual dos cordões de solda a LASER realizados no CPL06 para o ensaio de radiografia, é apresentado na Figura 41, onde foi empregado dois tipos de gases de proteção. Observa-se que o cordão de solda feito com N_2 (Figura 41.a) apresenta uma qualidade visual superior em comparação ao cordão feito com a mistura de $Ar + 5\% O_2$ (Figura 41.b). Além disso, no cordão soldado com $Ar + 5\% O_2$, é possível identificar a presença de pontos com formação de escória vítrea. Esse fato pode estar relacionado ao potencial de oxidação da mistura de gases, pois a adição de oxigênio na mistura aumenta o potencial de oxidação, ou ainda à interação entre a mistura de gás e o silício presentes no metal de adição (arame) que tem teor na faixa de 0,8 até 1,15% (SCOTTI; PONOMAREV, 2008).

Da mesma forma, como o nitrogênio é um gás inerte na soldagem de aços carbono, não reage com o silício e, desta forma, não haveria formação de escória vítrea. De acordo com a empresa SUMIG (2024), esta escória vítrea é prejudicial no momento que a peça for levada para a pintura se não houver remoção prévia. Contudo, nesta empresa normalmente as peças passam por processo de jateamento (granalha) anteriormente à pintura, não há um problema maior neste sentido. De qualquer maneira, o aspecto visual das soldas realizadas com o processo LASER são muito bons. Esse fator tem sua importância pois soldas com superfícies visuais lisas e regulares passam a ideia de solda bem feita para os clientes, o que é bom do ponto de vista comercial.

Figura 41 - Comparação do aspecto visual dos cordões de solda a LASER utilizando dois gases distintos.

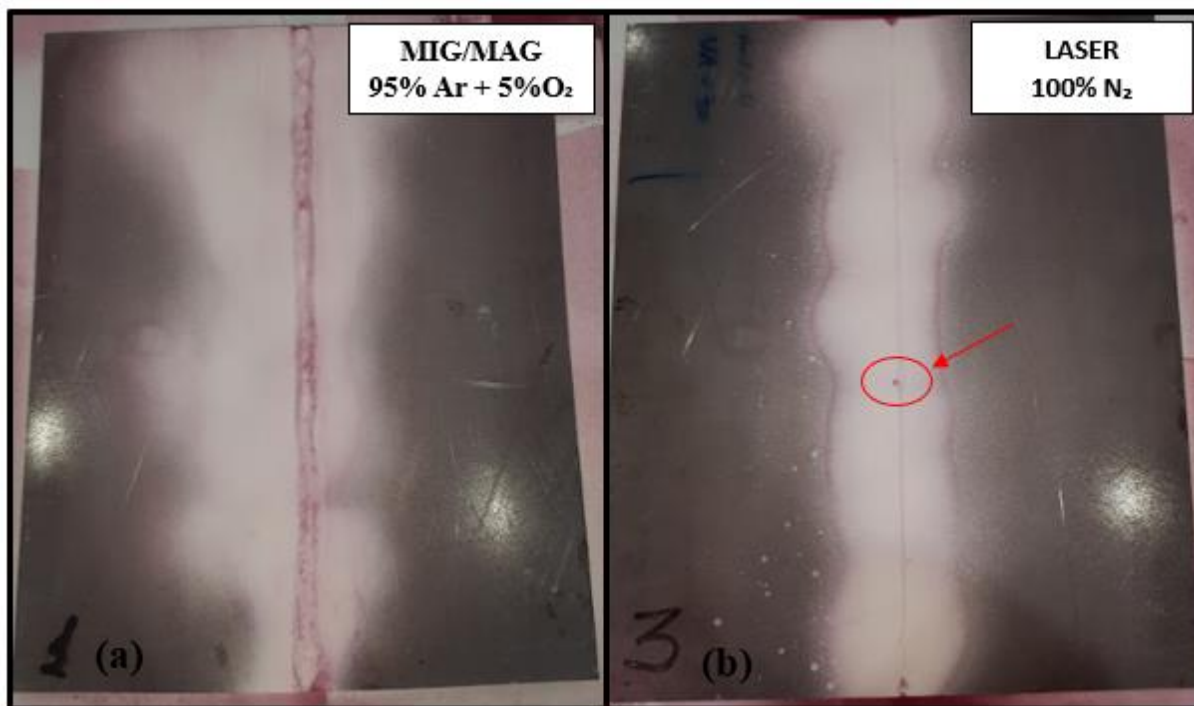


Fonte: Autor (2024)

4.2 ENSAIO DE LÍQUIDO PENETRANTE

Após a aplicação do revelador nas amostras ensaiadas por líquido penetrante, o corpo de prova CPM01, soldado com o processo MIG/MAG (Figura 42.a.) não apresentou nenhuma descontinuidade superficial, podendo ser considerado aprovado. No corpo de prova identificado como CPL01 (soldado com o processo LASER) o ensaio revelou uma pequena descontinuidade na raiz da solda do cordão, conforme indicado na Figura 42.b. Analisou-se melhor esta descontinuidade para descobrir que não passava de um pequeno poro isolado no metal de solda, que pode ter sido gerado no processo de ponteamto da peça. Contudo, dificilmente poderia ser considerado como um defeito real frente aos critérios de aprovação de uma norma como a ASME Seção IX por exemplo.

Figura 42 - Corpos de prova após a aplicação do revelador.



Fonte: Autor (2024)

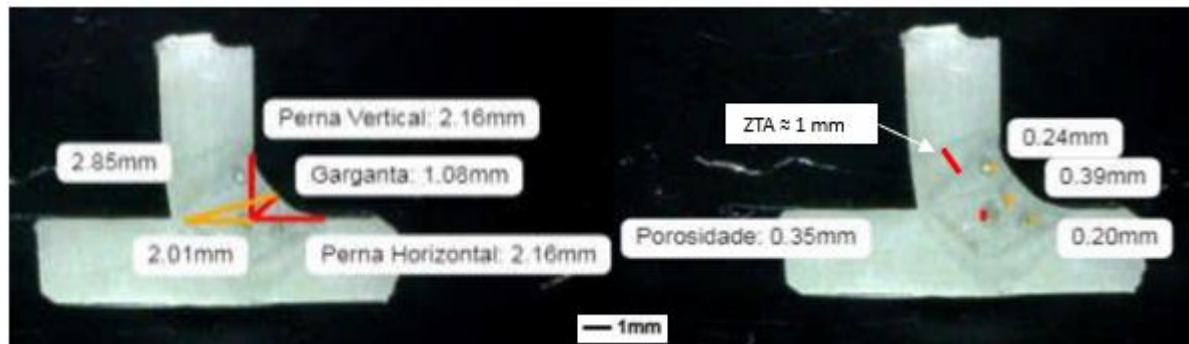
4.3 MACROGRAFIA

O ensaio de macrografia foi realizado nos corpos de prova conforme informados na Tabela 6 (já vista no Capítulo 3) com o intuito de visualizar a geometria dos cordões de solda de ambos os processos de soldagem e avaliar aspectos como penetração, dimensões da perna de solda, tamanho da garganta teórica, garganta efetiva e largura da ZTA. Na medida do possível, tentou-se identificar possíveis descontinuidades embora este não fosse o objetivo principal do ensaio.

De forma geral, as amostras mostraram-se isentas de descontinuidades como trincas, falta de fusão, falta de penetração e mordeduras. No entanto, observa-se que as amostras CPL02 (Figura 43) e CPL05 (Figura 44), soldadas com LASER utilizando o gás 95%Ar+5%O₂, apresentaram microporosidades internas com dimensões aproximadas de 0,3 mm.

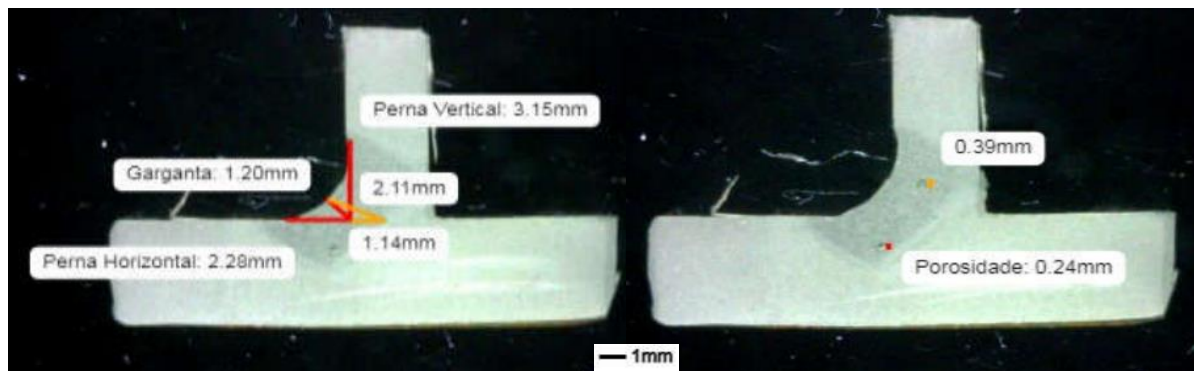
Já as amostras CPL03 (Figura 45) e CPL04 (Figura 46), soldadas com LASER utilizando o gás N₂, não apresentaram nenhuma descontinuidade. Quanto à não presença de descontinuidades, este efeito benéfico do nitrogênio pode estar relacionado à uma melhor estabilidade do *keyhole* ou devido à solubilidade/reatividade do nitrogênio com a poça de solda fundida, o que pode auxiliar a não formação de porosidades (ELMER et al., 2014). Este fato que corrobora as informações que foram dadas pela IPG (2024).

Figura 43 - Macrografia da amostra CPL02.



Fonte: Autor (2024)

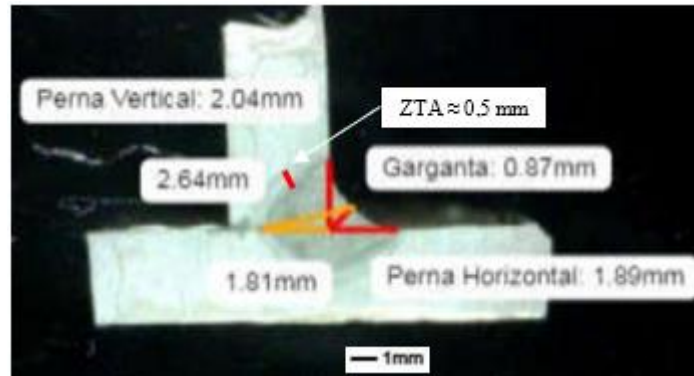
Figura 44 - Macrografia da amostra CPL05.



Fonte: Autor (2024)

Observa-se também que a amostra CPL03, soldada com N_2 , apresentou uma penetração menor em comparação com a amostra CPL02, soldada com $Ar + O_2$. Essa diferença pode ser atribuída ao menor potencial de ionização do nitrogênio que facilita a formação de plasma induzido sobre a região de soldagem. De acordo com Katayama (2020), esse fenômeno reduz a penetração da solda e, conseqüentemente, a garganta efetiva. Além disso, outra possível causa para essa variação é a sensibilidade do LASER a mudanças no ângulo de trabalho da tocha. Variações neste ângulo podem resultar em diferenças significativas na penetração da solda. Contudo, cabe ressaltar que essa diminuição da penetração/garganta efetiva não chega a comprometer a integridade da solda, especialmente no que diz respeito à soldagem LASER manual, de baixa potência. Na soldagem LASER de alta potência a redução da penetração pode ser considerável (KATAYAMA, 2020).

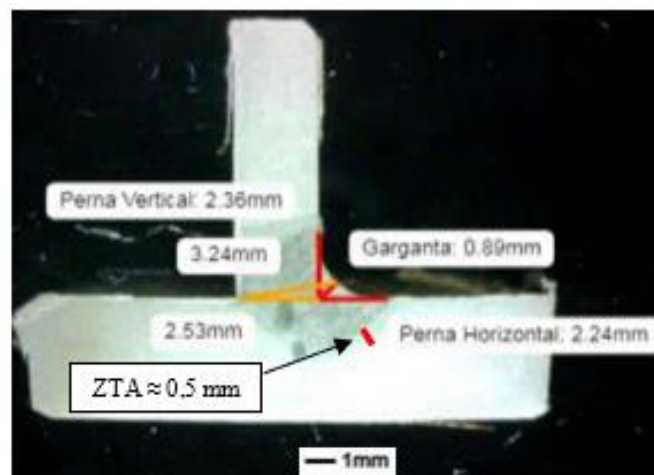
Figura 45 - Macrografia da amostra CPL03.



Fonte: Autor (2024)

Um aspecto positivo é que a ZTA em todas as soldas realizadas com LASER, independentemente do gás de proteção, foi de largura bastante pequena. Em geral, as amostras soldadas com LASER apresentaram uma ZTA com largura entre 0,5 e 1 mm.

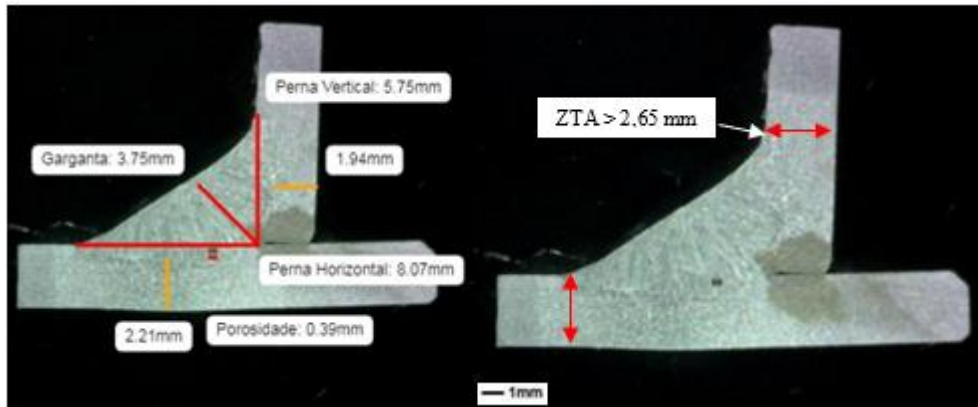
Figura 46 - Macrografia da amostra CPL04.



Fonte: Autor (2024)

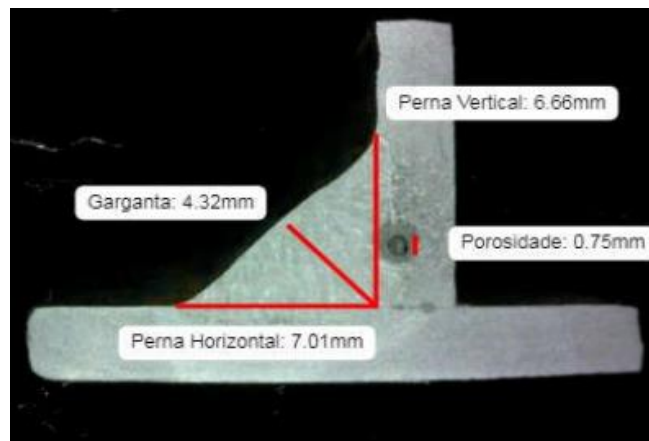
Já as amostras CPM02 (Figura 47) e CPM03 (Figura 48), soldadas pelo processo MIG/MAG apresentaram valores maiores de perna e garganta, menor penetração e maior ZTA, o que já era esperado, pois são características típicas deste processo. Além disso, observou-se a presença de porosidades, mas em quantidade menor em comparação com as amostras soldadas com LASER e com 95% Ar + 5% O₂ (CPL02 e CPL04).

Figura 47 - Macrografia da amostra CPM02.



Fonte: Autor (2024)

Figura 48 - Macrografia da amostra CPM03.



Fonte: Autor (2024)

Em relação à penetração, observa-se que as amostras soldadas com o processo LASER obtiveram grandes valores de penetração, até mesmo, em alguns casos, a penetração total da junta. Já nas amostras oriundas do processo MIG/MAG, não foi possível verificar de maneira contundente a penetração de solda (na raiz da junta) a partir das macrografias, fato que leva a conclusão de que foram muito pequenas. Contudo, a penetração de solda nos membros inferior e superior das juntas foram identificadas, porém as medições mostram que ficaram abaixo de 1 mm. Mais especificamente, a Figura 47, referente à amostra CPM02, apresentou uma penetração máxima de 0,7 mm nos membros da junta.

Nota-se também, uma grande diferença na largura da ZTA. Enquanto as amostras resultantes do processo MIG/MAG a largura na ZTA é maior que 2,65 mm, as amostras soldadas com LASER apresentaram uma largura que varia na faixa de 0,5 mm a 1 mm (que já foram comentados anteriormente). Este fato entra em concordância com as características de

cada processo. Em algumas das amostras, não foi possível revelar a ZTA pelo ensaio de macrografia. Isso se deve ao fato de que a metal de base possui um baixo teor de carbono, resultando em uma mudança menos acentuada na microestrutura, fazendo que o ataque químico resulte em uma baixa variação de cor na superfície.

A Tabela 14 apresenta as medições das características geométricas de cada amostra analisada, além de especificar as descontinuidades encontradas.

Tabela 14 - Características geométricas e descontinuidades presentes em cada amostra.

| Características geométricas/ descontinuidades | CPL02 | CPL03 | CPL04 | CPL05 | CPM02 | CPM03 |
|--|--------------|--------------|--------------|--------------|--------------|--------------|
| Perna horizontal | 2,16 mm | 1,89 mm | 2,24 mm | 2,28 mm | 7,01 mm | 8,07 mm |
| Perna vertical | 2,16 mm | 2,04 mm | 2,36 mm | 3,15 mm | 6,66 mm | 5,75 mm |
| Garganta teórica | 1,08 mm | 0,87 mm | 0,89 mm | 1,2 mm | 4,32 mm | 3,75 mm |
| Garganta efetiva | 2,85 mm | 2,64 mm | 3,24 mm | 2,11 mm | - | - |
| Penetração na raiz | 2,01 mm | 1,81 mm | 2,53 mm | 1,14 mm | - | - |
| Trincas | Isenta | Isenta | Isenta | Isenta | Isenta | Isenta |
| Falta de fusão | Isenta | Isenta | Isenta | Isenta | Isenta | Isenta |
| Falta de penetração | Isenta | Isenta | Isenta | Isenta | Isenta | Isenta |
| Poros | Sim | Isenta | Isenta | Sim | Sim | Sim |
| Mordedura | Isenta | Isenta | Isenta | Isenta | Isenta | Isenta |
| Sobreposição | Isenta | Isenta | Isenta | Isenta | Isenta | Isenta |
| Inclusão não metálica | Isenta | Isenta | Isenta | Isenta | Isenta | Isenta |

Fonte: Autor (2024)

4.4 ENSAIO DE TRAÇÃO

Por meio do ensaio de tração foi possível verificar a resistência mecânica das soldas realizadas com ambos os processos de soldagem e também do metal de base. Devido ao fato dos melhores resultados do uso do nitrogênio na soldagem LASER, os CPs soldados para estes ensaios utilizaram essa para sua fabricação.

Nos resultados obtidos, todas as amostras foram aprovadas, apresentando fraturas dúcteis, localizadas no metal de base, e com valores de limite de ruptura acima dos valores especificados do metal de adição e do metal de base, condição importante para a aprovação das mesmas. A Tabela 15 apresenta os valores obtidos para cada uma das amostras ensaiadas, conforme o relatório emitido pela empresa que realizou o ensaio.

Tabela 15 - Resultados obtidos das amostras submetidas a ensaio de tração.

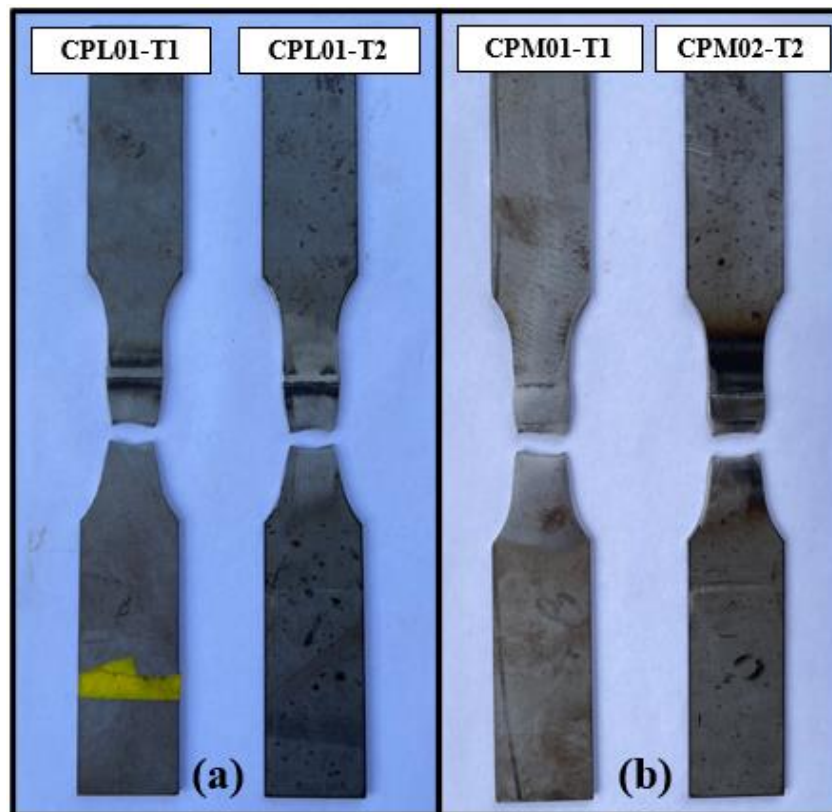
| Processo | Identificação | Força Máxima | Limite de ruptura | Incerteza de Medição | Local de ruptura | Laudo |
|-----------------|----------------------|---------------------|--------------------------|-----------------------------|-------------------------|--------------|
| LASER | CPL01-T1 | 25730 N | 495 Mpa | ±8 Mpa | Dúctil/ Metal de | Aprovado |
| | CPL01-T2 | 25740 N | 492 Mpa | ±8 Mpa | Dúctil/ Metal de | Aprovado |
| MIG/MAG | CPM01-T1 | 25430 N | 495 Mpa | ±8 Mpa | Dúctil/ Metal de | Aprovado |
| | CPM01-T2 | 25430 N | 488 Mpa | ±8 Mpa | Dúctil/ Metal de | Aprovado |

Fonte: Autor (2024)

A Figura 49 mostra as amostras submetidas ao ensaio de tração, onde se observa que todas as fraturas são do tipo dúctil, com estrição evidente na área da seção transversal. Nas amostras CPM01-T1 e CPM01-T2, que foram soldadas pelo processo MIG/MAG, o local de ruptura ocorreu mais próximo do cordão de solda. Em contrapartida, nas amostras CPL01-T1 e CPL01-T2, soldadas pelo processo LASER, a ruptura ocorreu mais afastada da região da solda. Não é possível tirar uma conclusão definitiva sobre o que pode ter causado a alteração no local da fratura, sendo necessário um estudo mais aprofundado para determinação da causa dessa diferença.

Nota-se que os valores dos limites de ruptura das amostras apresentaram uma variação muito pequena, com uma diferença máxima de apenas 4 MPa entre eles, e que de acordo com o critério de aceitação da AWS B2.1/B2.1M:2021 são consideradas aprovadas.

Figura 49 - Amostras submetidas ao ensaio de tração.



Fonte: Autor (2024)

4.5 ENSAIO DE DOBRAMENTO

Com o ensaio de dobramento, foi possível verificar a ductilidade da região soldada. Esse teste permitiu avaliar a capacidade do material de suportar deformações plásticas sem apresentar falhas.

Observou-se que nenhuma das amostras apresentou descontinuidades típicas desse tipo de teste, como trincas ou rachaduras. De acordo com o critério de aceitação previsto pela norma AWS B2.1/B2.1M:2021, não devem existir descontinuidades que excedam 3 mm. Dessa forma, todas as amostras foram aprovadas, revelando que as soldas de ambos os processos apresentaram ductilidade adequada.

A Tabela 16 apresenta algumas informações referente ao ensaio bem como o relatório da identificação de descontinuidades e o laudo final.

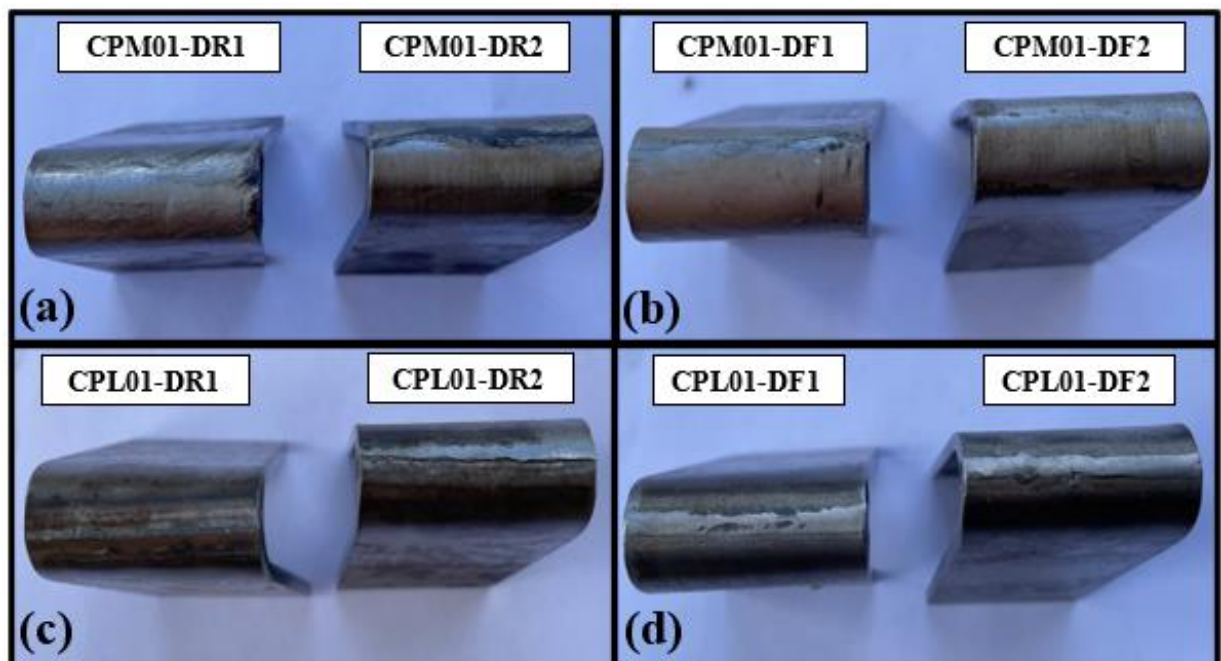
Tabela 16 - Relatório da identificação de descontinuidades e o laudo final.

| Processo | Identificação da amostra | Tipo de dobramento | Identificação das descontinuidades | Laudo |
|----------|--------------------------|--------------------|------------------------------------|----------|
| LASER | CPL01-DF1 | Transversal/Face | Isento de descontinuidades | Aprovado |
| | CPL01-DF2 | Transversal/Face | Isento de descontinuidades | Aprovado |
| | CPL01-DR1 | Transversal/Raiz | Isento de descontinuidades | Aprovado |
| | CPL01-DR2 | Transversal/Raiz | Isento de descontinuidades | Aprovado |
| MIG/MAG | CPM01-DF1 | Transversal/Face | Isento de descontinuidades | Aprovado |
| | CPM01-DF2 | Transversal/Face | Isento de descontinuidades | Aprovado |
| | CPM01-DR1 | Transversal/Raiz | Isento de descontinuidades | Aprovado |
| | CPM01-DR2 | Transversal/Raiz | Isento de descontinuidades | Aprovado |

Fonte: Autor (2024)

A Figura 50 ilustra os corpos de prova após serem submetidos aos ensaios. Nela, é possível observar o estado final das amostras, evidenciando a integridade dos materiais após o ensaio.

Figura 50 - Amostras submetidas ao ensaio de dobramento.



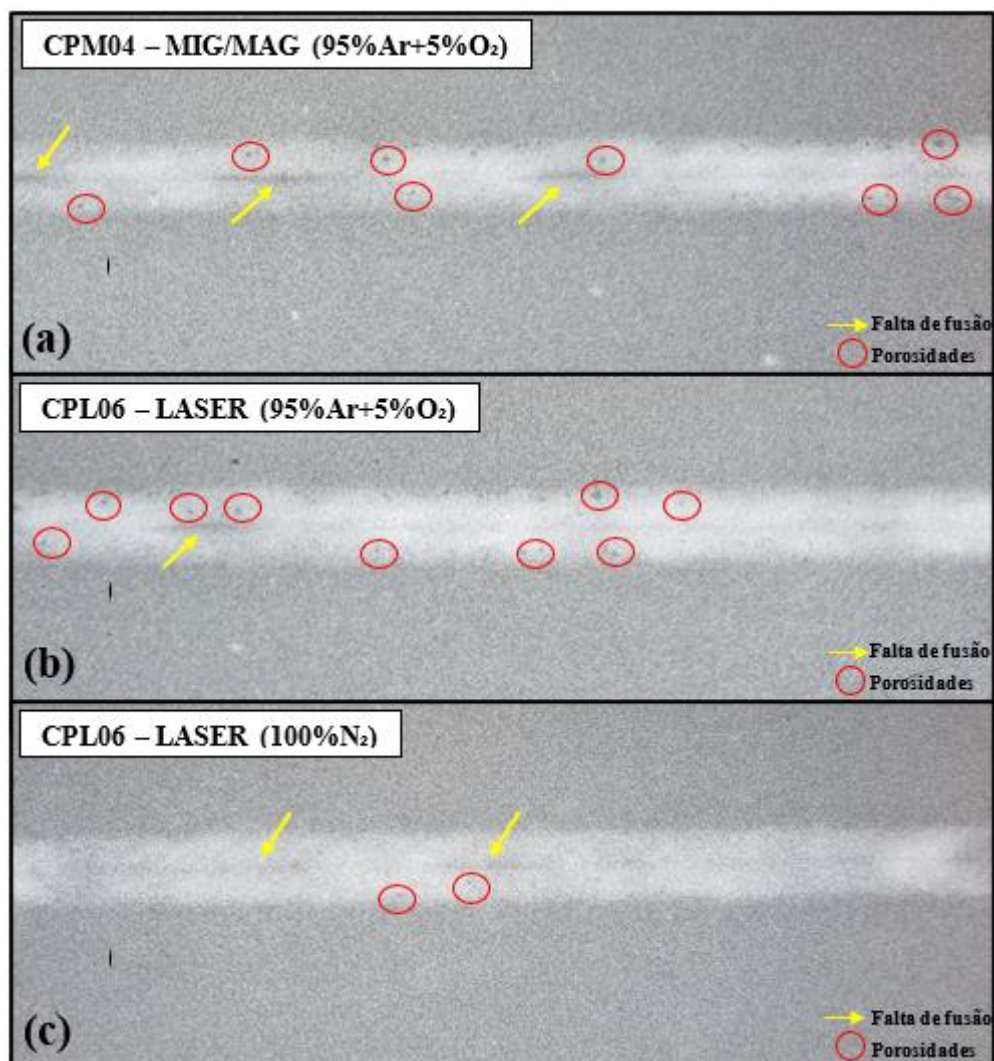
Fonte: Autor (2024)

4.6 RADIOGRAFIA

O ensaio de radiografia foi conduzido para revelar possíveis descontinuidade internas das soldas realizadas nos corpos de prova CPL06 e CPM04. Por meio deste ensaio, foi possível avaliar as descontinuidades presentes na parte interna dos cordões de solda de ambos os processos e identificar a influência dos gases de proteção no processo LASER.

No caso da amostra soldada pelo processo MIG/MAG, identificada como CPM04 (Figura 51.a.), foram observados pontos com falta de fusão e também a presença de porosidades. Porosidades são características comuns no processo MIG/MAG, mas podem ser reduzidas por meio do ajuste de parâmetros de soldagem e da correta regulagem da vazão de gás de proteção.

Figura 51 - Resultados do ensaio de radiografia.



Fonte: Autor (2024)

Nas amostras soldadas pelo processo LASER, também foram detectados pontos com falta de fusão em ambas as condições de gás de proteção. Contudo, houve uma diferença em relação à ocorrência de porosidades: no corpo de prova soldado com a mistura de Ar e O₂ (Figura 51.b), foram identificadas porosidades, enquanto o corpo de prova soldado com N₂ como gás de proteção (Figura 51.c) apresentou porosidades, porém em quantidade significativamente menor. Esses resultados estão em concordância com observações anteriores, que apontam para uma tendência do processo LASER com Ar + O₂ a gerar maior número de poros em comparação ao uso de N₂ como gás de proteção.

As manchas escuras e alongadas presentes no centro dos cordões de solda representam a falta de fusão (indicadas pelas setas amarelas), enquanto os pontos escuros mais presentes nas extremidades dos cordões são porosidades (indicados pelos círculos vermelhos).

Este resultado mostra que há espaço para melhoria do procedimento de soldagem e parâmetros, já que as radiografias mostraram falta de fusão, o que não é desejável. Contudo, no que concerne à formação de poros, a superioridade do nitrogênio como gás de proteção é evidente.

4.7 CUSTOS

Os resultados referentes aos custos e consumos de arame, gás de proteção e energia elétrica dos processos de soldagem MIG/MAG e LASER estão apresentados na Tabela 17.

Tabela 17 - Consumo e custo de arame, gás, e energia elétrica por metro de solda.

| Consumível | MIG/MAG (95% Ar + 5% O₂) | LASER (100% N₂) | LASER (95% Ar + 5% O₂) |
|----------------------------|--|---------------------------------------|--|
| Arame | | | |
| Consumo | 0,098 kg/m | 0,016 kg/m | 0,016 kg/m |
| Custo | R\$ 2,10/m | R\$ 0,34/m | R\$ 0,34/m |
| Gás de Proteção | | | |
| Consumo | 0,035 m ³ /m | 0,042 m ³ /m | 0,042 m ³ /m |
| Custo | R\$ 0,25/m | R\$ 0,08/m | R\$ 0,29/m |
| Energia Elétrica | | | |
| Consumo | 0,208 Kwh | 0,042 Kwh | 0,042 Kwh |
| Custo | R\$ 0,032/m | R\$ 0,015/m | R\$ 0,015/m |
| Custo Total (R\$/m) | R\$ 2,38/m | R\$ 0,43/m | R\$ 0,64/m |

Fonte: Autor (2024)

Neste caso, observa-se que o processo LASER se destacou-se por consumir cerca de 84% menos arame em comparação ao MIG/MAG, fato que era previsto, pois o processo MIG/MAG possui maior deposição de material. Em contrapartida, o processo LASER que utiliza nitrogênio apresentou um consumo de aproximadamente 20% mais gás do que o MIG/MAG. Apesar do maior consumo, o custo no processo LASER com nitrogênio é 68% menor do que no MIG/MAG. Isso significa que, mesmo com um maior volume de gás utilizado no LASER, o impacto financeiro é reduzido devido ao menor custo do nitrogênio.

Quando se utiliza a mistura de 95% Ar + 5% O₂ no processo LASER, o custo de gás é 16% maior que no MIG/MAG, justamente pelo fato de o processo LASER requerer uma vazão maior, e o custo da mistura é superior.

O custo com energia elétrica no processo MIG/MAG foi cerca de 113,3% maior do que no processo LASER, mesmo o LASER apresentando uma eficiência elétrica inferior. Essa discrepância pode ser explicada pela potência significativamente maior utilizada no MIG/MAG, além da velocidade de soldagem mais baixa, que resulta em um tempo de soldagem maior por metro.

Desta forma, pode-se afirmar que o processo de soldagem a LASER oferece um custo de arame e energia elétrica significativamente menor. Além disso, dependendo da velocidade de soldagem, da vazão, e do tipo de gás utilizado, o processo LASER pode apresentar também um custo de gás mais baixo.

Somando todos os custos calculados obteve-se o custo total, onde o processo de soldagem a LASER se mostrou economicamente mais vantajoso, com reduções de custos com consumíveis em torno de 82% com gás N₂ e 73% com a mistura Ar + O₂.

Essa combinação de fatores torna o processo a LASER uma opção economicamente vantajosa na maioria das aplicações, principalmente em sistemas de maior potência e robotizados, onde é possível realizar a soldagem em uma velocidade superior ao processo manual.

Vale lembrar que esta análise de custos não levou em conta o custo de mão de obra, custos de manutenção dos equipamentos, entre outros que são considerados para o cálculo. Também não foram levadas em conta estimativas relacionadas a diminuição de retrabalho, menor número de peças não conforme, entre outros problemas relacionados à soldagem que o processo LASER tende a diminuir na soldagem de chapas de baixa espessura.

5 CONCLUSÃO

Com base nos objetivos específicos propostos neste trabalho, foi possível realizar uma análise abrangente dos processos de soldagem MIG/MAG e LASER para a união de chapas de aço com baixo teor de carbono, envolvendo sua aplicação em máquinas e implementos agrícolas.

Primeiramente, o estudo dos processos de soldagem permitiu compreender as características particulares de cada processo e suas características operacionais. O processo MIG/MAG é uma opção já consolidada na indústria de máquinas e implementos agrícolas, com alta confiabilidade e facilidade de implementação. Em contrapartida, o processo de soldagem a LASER, ainda recente para o setor, mostrou-se promissor ao apresentar vantagens em aspectos como maior produtividade, menor deformação térmica e redução de custos operacionais (metal de adição, gás de proteção e energia elétrica).

Foi possível avaliar os benefícios e as limitações de cada processo, destacando que a soldagem a LASER oferece um acabamento mais preciso, uma área afetada pelo calor reduzida, maior velocidade de soldagem, entre outros. No entanto, o processo LASER apresenta baixa capacidade de preenchimento de lacunas (*gap*), necessitando uma maior precisão no alinhamento das juntas. Também pode entregar menor rigidez estrutural, portanto, a aplicação da soldagem a LASER em peças de maior demanda estrutural requer uma análise rigorosa para garantir que a rigidez do conjunto não seja comprometida.

No que tange à conformidade com os requisitos mecânicos exigidos pela indústria de máquinas e implementos agrícolas, ambos os processos soldagem atenderam aos padrões estabelecidos pela norma AWS B2.1/B2.1M:2021, não apresentando nenhuma descontinuidade nos ensaios requisitados para qualificação do procedimento de soldagem, atendendo aos critérios dados pelas normas adotadas. Em outras palavras, nenhuma descontinuidade foi grave o suficiente para que, em um caso real, a peça necessitasse de retrabalho ou descarte. Além disso, conclui-se que a escolha do gás de proteção para a soldagem de aço carbono com o processo LASER é fundamental para evitar descontinuidades internas, especialmente porosidades. Neste caso, o uso de nitrogênio foi superior à outra opção (95% Ar + 5% O₂).

Do ponto de vista da segurança, o processo de soldagem a LASER apresenta desafios adicionais em comparação com o processo MIG/MAG, uma vez que a alta intensidade da radiação LASER exige medidas de proteção específicas para os operadores, como a utilização de óculos e máscaras especiais para proteção dos olhos. No Brasil, as normas nacionais de

segurança ainda não contemplam regulamentações específicas para o uso da soldagem a LASER, sendo necessário seguir normas internacionais.

Por fim, este estudo contribuiu como uma base inicial para a possível implementação do processo de soldagem a LASER, tanto de forma manual quanto automatizada, em escala maior dentro da empresa. O LASER passou em todos os ensaios a qual foi submetido e, neste contexto, produz soldas tão resistentes quanto aquelas resultantes do processo MIG/MAG. Embora os resultados sejam promissores, recomenda-se uma análise econômica detalhada, incluindo estudo de *pay-back*, para avaliar as perspectivas de investimento em sistemas a LASER de maior potência e robotizados ou de menor potência em larga escala. Dessa forma, sendo este trabalho uma análise preliminar ou exploratória, não apenas cumpre seus objetivos, mas também estabelece um ponto de partida relevante para futuras aplicações industriais e escalabilidade do processo LASER na indústria agrícola.

REFERÊNCIAS

AMADA. **Laser Welding Fundamentals**. California, 2020.

AMERICAN NATIONAL STANDARDS INSTITUTE. ANSI Z136.1-2022 - **Safe Use of Lasers**. Orlando: Laser Institute of America, 2022.

AMERICAN SOCIETY OF MECHANICAL ENGINEERS. **ASME SECTION IX: ASME Boiler and Pressure Vessel Code**. 2010 Edition ed. New York: Asme, 2010.

AMERICAN WELDING SOCIETY. *Specification for welding procedure and performance qualification*. AWS B2.1/B2.1M:2009-ADD1. Miami, 2009.

AMERICAN WELDING SOCIETY. **AWS B1.11:2000**: Guide for the Visual Examination of Welds. Miami: AWS, 2000.

AMERICAN WELDING SOCIETY. **AWS B2.1/B2.1M:2021**: Specification for Welding Procedure and Performance Qualification. 5 ed. Miami: AWS, 2021.

AMERICAN WELDING SOCIETY. **D14.3/D14.3M:2019**: Specification for Welding Earthmoving, Construction, Agricultural, and Ground-Based Material Handling Equipment. 7 ed. Miami: AWS, 2019.

ASME. **ASME BPVC.II.C (2023)**: Welding Consumables - Gases and gas mixtures for fusion welding and allied processes. SI: Asme, 2023

CALLISTER, William D J. **Fundamentos da Ciência e Engenharia de Materiais - Uma Abordagem Integrada**. 5ª edição. Rio de Janeiro: LTC, 2019. *E-book*. pág.203. ISBN 9788521636991. Disponível em: <https://app.minhabiblioteca.com.br/reader/books/9788521636991/>. Acesso em: 12 nov. 2024.

CALLISTER, William D.; RETHWISCH, David G. **Ciência e Engenharia de Materiais: Uma Introdução**. 9. ed. Rio de Janeiro: LTC, 2016.

COELHO, Gonçalo Pereira Dias. **Estudo e Aplicação da Soldadura Laser**. 2023. 116 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia Mecânica, Escola Superior de Tecnologia e Gestão de Viseu, Viseu, 2023.

COLPAERT, Hubertus. **Metalografia dos produtos siderúrgicos comuns**. 4ª edição. São Paulo: Editora Blucher, 2008. *E-book*. ISBN 9788521215714. Disponível em: <https://app.minhabiblioteca.com.br/reader/books/9788521215714/>. Acesso em: 11 nov. 2024.

CONTINI, E.; ARAGÃO, A. **Agro do Brasil alimenta quase 10% da população mundial**. *Agroanalysis*, São Paulo, v. 41, n. 6, p. 16-17, jun. 2021. Disponível em: <https://www.embrapa.br/documents/10180/26187851/Popula%C3%A7%C3%A3o+alimentada+pelo+Brasil/5bf465fc-ebb5-7ea2-970d-f53930b0ec25?version=1.0&download=true>. Acesso em: 25 nov. 2024.

ECNODATA. **2.540 empresas de maquinas agricolas no Brasil**. Disponível em: <https://www.econodata.com.br/empresas/todo-brasil/busca-maquinas-agricolas>. Acesso em: 11 nov. 2024.

ELMER, J. W. et al. **The effect of Ar and N2 shielding gas on laser weld porosity in steel, stainless steel, and nickel**. *The Welding Journal*, Livermore, v. 663819, 5 nov. 2014.

ESAB Brasil. *Soldagem MIG/MAG*. Apostila técnica. Traduzido e adaptado por Cleber Fortes; revisado por Cláudio Turani Vaz. São Paulo, 2005.

ESAB. **OK AristoRod 12.50**. Disponível em: https://esab.com/br/sam_pt/products-solutions/product/filler-metals/mild-steel/mig-wires-tig-rods-gmaw-gtaw/ok-aristorod-12-50/. Acesso em: 11 nov. 2024.

ESAB. **Soldagem MIG/MAG**. Sl: Esab, 2005. Disponível em: <https://www2.ufjf.br/profab/files/2016/09/ESAB-Apostila-MIG-MAG.pdf>. Acesso em: 11 nov. 2024.

FELIZARDO, Ivanilza. **Apostila - Tecnologia da soldagem**. Minas Gerais: Ivanilza Felizardo, 2016. 113 p.

FERREIA, Hebert Augusto Viera. **Elaboração de uma EPS para fabricação de uma viga soldada conforme a norma AWS D1.1/2010**. 2016. 34 f. Monografia (Especialização) - Curso de Engenharia Mecânica, Departamento de Engenharia Mecânica, Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2016.

FUNDAÇÃO BRASILEIRA DE TECNOLOGIA DA SOLDAGEM. **Curso de Inspetor de Soldagem: Ensaios não Destrutivos**. Rio de Janeiro: FBTS, 2009.

FUNDAÇÃO BRASILEIRA DE TECNOLOGIA DE SOLDAGEM. **Curso de Inspetor de Soldagem - CIS - Nível 1: volume 2**. Rio de Janeiro: Fbts, 2009.

GARCIA, Amauri; SPIM, Jaime A.; SANTOS, Carlos Alexandre dos. **Ensaios dos Materiais, 2ª edição**. Rio de Janeiro: LTC, 2012. *E-book*. ISBN 978-85-216-2114-0. Disponível em: <https://app.minhabiblioteca.com.br/reader/books/978-85-216-2114-0/>. Acesso em: 11 nov. 2024.

GARCIA, Amauri; SPIM, Jaime Alvares; SANTOS, Carlos Alexandre dos. **Ensaaios dos materiais**. 2. ed. Rio de Janeiro, RJ: LTC, 2012. xvi, 365 p. ISBN 9788521620679.

INFOSOLDA. **Ensaio não-destrutivo: Radiografia**. Disponível em: <https://infosolda.com.br/215-ensaio-nao-destrutivo-radiografia/>. Acesso em: 11 nov. 2024.

INTERNATIONAL ELECTROTECHNICAL COMMISSION. IEC 60825-1:2014 - **Safety of laser products** - Part 1: Equipment classification and requirements. Geneva: IEC, 2014.

IPG PHOTONICS. **LightWELD**. Disponível em: <https://www.ipgphotonics.com/br/products/lightweld/lightweld-handheld-laser-welding-and-cleaning>. Acesso em: 11 nov. 2024.

JR., William D C. **Ciência e Engenharia de Materiais - Uma Introdução**. 10ª edição. Rio de Janeiro: LTC, 2020. *E-book*. ISBN 9788521637325. Disponível em: <https://app.minhabiblioteca.com.br/reader/books/9788521637325/>. Acesso em: 11 nov. 2024.

JR., William D C. **Ciência e Engenharia de Materiais - Uma Introdução**. 10ª edição. Rio de Janeiro: LTC, 2020. *E-book*. pág.189. ISBN 9788521637325. Disponível em: <https://app.minhabiblioteca.com.br/reader/books/9788521637325/>. Acesso em: 12 nov. 2024.

KATAYAMA, Seiji. **Fundamentals and Details of Laser Welding**. Osaka: Carlos P. Bergmann, Federal University Of Rio Grande do Sul, Porto Alegre, Rio Grande do Sul, Brazil, 2020.

KOBELCO Welding. **ABC da soldagem**. Disponível em: https://www.kobelco-welding.jp/portuguese/education-center/abc/ABC_2000-01.html. Acesso em: 26 nov. 2024.

LABTESTE. Ensaio de tração e dobramento. Disponível em: <https://www.labteste.com.br/ensaio-tracao-e-dobramento>. Acesso em: 3 dez. 2024.

LINCOLN ELECTRIC. SPEEDTEC® 500SP. Disponível em: <https://www.lincolnelectric.com/en-GB/Products/le-emear-speedtec500sp?sku=K14259-1>. Acesso em: 11 nov. 2024.

MARQUES, Paulo Villani *et al.* **Soldagem: fundamentos e tecnologia.** 3. ed. Belo Horizonte: Ufmg, 2009.

MODENESI, Paulo J. *et al.* **Introdução à Metalurgia da Soldagem.** 2012. 209 f. Monografia - Curso de Engenharia Metalúrgica, Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2012.

NUNES, Laerce de Paula; KREISCHER, Anderson Teixeira. **Introdução à metalurgia e aos materiais metálicos.** 1ª ed. Rio de Janeiro: Interciência, 2010.

ORBIQUIMICA. **Produtos.** Disponível em: <https://orbiquimica.com.br/product-category/linha-industrial/manutencao-industrial/>. Acesso em: 11 nov. 2024.

PEREIRA, Bruno Domingues. **Inspeção de Juntas Soldadas: Estudo da influência da entrega térmica.** 2020. 64 f. Dissertação - Curso de Engenharia Metalúrgica e de Materiais, Faculdade de Engenharia Universidade do Porto, Porto, 2020. Disponível em: <https://repositorio-aberto.up.pt/bitstream/10216/129253/2/419955.pdf>. Acesso em: 11 nov. 2024.

ROMANO, Gustavo Roberto Cabral; VILAR, Gustavo Silva; ARGARATE, Rafael Orsatti. **Ensaio Mecânico de Dobramento**. AeroDesign Magazine, v. 15, n. 1, 2023. Disponível em: <https://irp.cdn-website.com/c1ca6eb9/files/uploaded/v15artb.pdf>. Acesso em: 11 nov. 2024.

SCHLOSSER, Jeferson Luis. **Análise comparativa do processo produtivo e propriedades mecânicas resultantes dos processos de soldagem TIG e a LASER na união de chapas de aço inoxidável ferrítico AISI 430**. 2022. 118 f. TCC (Graduação) - Curso de Engenharia Mecânica, Universidade do Vale do Taquari - Univates, Lageado, 2022.

SCOTTI, Américo; PONOMAREV, Vladimir. **Soldagem MIG/MAG**. 2. ed. São Paulo: Artliber Editora, 2008.

SENAI. **Soldagem**. São Paulo: Senai - Sp, 2013. 720 p.

SILICATO **Sobre o cordão de solda - É problema? | Sumig Dicas**. Sl: Sumig, 2019. P&B. Disponível em: <https://www.youtube.com/watch?v=QBozssyEFHU>. Acesso em: 13 nov. 2024.

SILVEIRA, Gustavo Veloso da. **Efeito da alteração dos parâmetros do processo Laser sobre a geometria do cordão de solda**. 2012. 49 f. TCC (Graduação) - Curso de Engenharia de Materiais, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2012.


SUMIG. **Backing Cerâmico**. Disponível em: https://www.sumig.com/pt/produto/detalhe/backing_ceramico. Acesso em: 11 nov. 2024.

TATAGIBA, Luiz Cláudio Soares; GONÇALVES, Renata Barbosa; PARANHOS, Ronaldo. **Tendências no Desenvolvimento de Gases de Proteção Utilizados na Soldagem MIG/MAG**. 2012. Disponível em: <https://www.scielo.br/j/si/a/TWngQmXCrKkj6mZf89fvfqr/>. Acesso em: 11 nov. 2024.

VILLANI, Paulo. **Soldagem - Fundamentos e Tecnologia**. Rio de Janeiro: GEN LTC, 2016. *E-book*. ISBN9788595156067. Disponível em: <https://app.minhabiblioteca.com.br/reader/books/9788595156067/>. Acesso em: 12 nov. 2024.

ANEXOS

Anexo A – Certificado de inspeção do metal de base

| | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
|--|------------------------|--|---------|---|---------|---|---------|--|---------|-----------|---------|------------|------------|------------|---------|------------|---------|------------|------------|---------|-------|--------------|------------------------|----|---|----|----|----|----|-----|------------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|
| <p>Soluções em Aço Usiminas S.A. SEDE: Eixo Horizonte - MG - BRASIL AV. DO CONTORNO, 654 BARRIO SAUVAGE - CP 808 - CEP: 30110-044 CNPJ: 42924410/001 INSCRIÇÃO ESTADUAL: 0012113780048 Plantar: JA32 - Não-Me-Toque - RS</p> | | <p>CERTIFICADO DE INSPEÇÃO INSPECTION CERTIFICATE</p> | | <p>Cliente - Customer: Produto - Product: Chapa Fina Quente DO / LO Tolerâncias - Tolerances (mm): Espessura - Thickness - 0,22 / + 0,22 Largura - Width - 0,0 / + 22,0 Comprimento - Height - 0,0 / + 19,0</p> | | <p>Mais Fical Commercial Invoice 10143 Ordem de Venda Sales Order Nº Item 1100307 5</p> | | <p>Data de Emissão Date of Issue 06.02.2024 Nº Certificado Certificate Nº 1253225</p> | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| <p>We certify that the material described in the document was assayed and analyzed for our Laboratory of the Quality, in accordance with the respective Specifications, Techniques of the reference norm and is duly approved.</p> | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| <p>Certificamos que o material descrito neste documento foi ensaiado pelo nosso laboratório de Qualidade, de acordo com as Especificações, Técnicas da norma de referência.</p> | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| <p>Qualidade - Steel ASTM A1011-SS-30</p> | | <p>Dimensões Nominais - Nominal Dimensions 2,68 X 1100,0 X 3000,0</p> | | <p>Aspecto Superfície - Surface Appearance Superfície 2</p> | | <p>Norma de Fabricação - Manufacturing Standards: 11020434</p> | | <p>Código do Material Cliente - Code of Customer Material: 11020434</p> | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| <p>Composição Química (% peso) - Chemical Composition (% Weight)</p> <table border="1"> <tr> <td>Lot# M.P.</td> <td>C</td> <td>Si</td> <td>Mn</td> <td>P</td> <td>S</td> <td>Al</td> <td>Cu</td> <td>Ti</td> <td>Cr</td> <td>Ni</td> <td>Sn</td> <td>N</td> <td>B</td> <td>Nb</td> <td>V</td> <td>Mo</td> <td>Sb</td> <td>Co</td> <td>Ca</td> <td>Cmg</td> </tr> <tr> <td>0018209533</td> <td>0,11000</td> <td>0,03000</td> <td>0,35000</td> <td>0,01700</td> <td>0,00500</td> <td>0,03300</td> <td>0,02000</td> <td>0,00200</td> <td>0,01000</td> <td>0,00000</td> <td>0,00000</td> <td>0,00000</td> <td>0,00010</td> <td>0,00100</td> <td>0,00100</td> <td>0,00000</td> <td>0,00000</td> <td>0,00000</td> <td>0,00990</td> <td>0,00000</td> </tr> </table> | | | | | | | | | | Lot# M.P. | C | Si | Mn | P | S | Al | Cu | Ti | Cr | Ni | Sn | N | B | Nb | V | Mo | Sb | Co | Ca | Cmg | 0018209533 | 0,11000 | 0,03000 | 0,35000 | 0,01700 | 0,00500 | 0,03300 | 0,02000 | 0,00200 | 0,01000 | 0,00000 | 0,00000 | 0,00000 | 0,00010 | 0,00100 | 0,00100 | 0,00000 | 0,00000 | 0,00000 | 0,00990 | 0,00000 |
| Lot# M.P. | C | Si | Mn | P | S | Al | Cu | Ti | Cr | Ni | Sn | N | B | Nb | V | Mo | Sb | Co | Ca | Cmg | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 0018209533 | 0,11000 | 0,03000 | 0,35000 | 0,01700 | 0,00500 | 0,03300 | 0,02000 | 0,00200 | 0,01000 | 0,00000 | 0,00000 | 0,00000 | 0,00010 | 0,00100 | 0,00100 | 0,00000 | 0,00000 | 0,00000 | 0,00990 | 0,00000 | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| <p>Ensaio de Tracção - Tensile Test</p> <table border="1"> <tr> <td>Lot# M.P.</td> <td>LE</td> <td>LR</td> <td>AL (%)</td> </tr> <tr> <td>0018209533</td> <td>TS</td> <td>TS</td> <td>ET</td> </tr> <tr> <td>0018209533</td> <td>OT6</td> <td>OT6</td> <td>ETD</td> </tr> <tr> <td>Unidade Unit</td> <td colspan="3">MPa / BM = 200,00 / mm</td> </tr> </table> | | | | | | | | | | Lot# M.P. | LE | LR | AL (%) | 0018209533 | TS | TS | ET | 0018209533 | OT6 | OT6 | ETD | Unidade Unit | MPa / BM = 200,00 / mm | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| Lot# M.P. | LE | LR | AL (%) | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 0018209533 | TS | TS | ET | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 0018209533 | OT6 | OT6 | ETD | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| Unidade Unit | MPa / BM = 200,00 / mm | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| <p>Peso líquido</p> <table border="1"> <tr> <td>Lot# M.P.</td> <td>Peças</td> <td>Net Weight</td> </tr> <tr> <td>0018209533</td> <td>Peças</td> <td>2,120</td> </tr> <tr> <td>0018209533</td> <td>Peças</td> <td>2,120</td> </tr> <tr> <td>0018209533</td> <td>Peças</td> <td>2,120</td> </tr> </table> | | | | | | | | | | Lot# M.P. | Peças | Net Weight | 0018209533 | Peças | 2,120 | 0018209533 | Peças | 2,120 | 0018209533 | Peças | 2,120 | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| Lot# M.P. | Peças | Net Weight | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 0018209533 | Peças | 2,120 | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 0018209533 | Peças | 2,120 | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 0018209533 | Peças | 2,120 | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| <p>Total peças - Total pieces - 132 Peso líquido Total - TotalNet Weight - 12,720 Tonelagem Métrica/Metric ton</p> | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| <p>Atrevimentos-Abreviations BM = Base Metals/Gauge Length Dir = Direction/Direction M.P. = R.M. = Matéria Prima Raw Material TG = Tamanho de Grão-Grain Size Certificamos que este material possui nível de radiação abaixo de 0,5 µSv/h. We certify that this material has radiation level below 0,5 µSv/h.</p> | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| <p>Observação - Remarks: RESULTADO-RESULT = BOM/GOOD RESULTADO-RESULT = BOM/GOOD RESULTADO-RESULT = BOM/GOOD RESULTADO-RESULT = BOM/GOOD RESULTADO-RESULT = BOM/GOOD</p> | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| <p>Engº André Luciano Leite Gerente da Qualidade - Soluções Usiminas</p> | | | | | | | |  | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |