



SOLDAGEM HÍBRIDA APLICADA EM IMPLEMENTOS RODOVIÁRIOS COM LASER + MAG

José Carlos Guimarães¹

Anderson Daleffe²

Henrique Cechinel Casagrande³

Gilson de March⁴

Joélson Vieira da Silva⁵

Resumo: Este trabalho visa abordar conteúdos sobre a aplicação da soldagem híbrida (HLAW), com a combinação de um feixe de laser de alta potência com um arco elétrico, utilizando-se um gás de proteção e o arame para executar a soldagem, visando vantagens com a aplicação deste processo na soldagem. Ainda na apresentação dos conteúdos relativos ao tema, aplicou-se a pesquisa bibliográfica e a pesquisa experimental. Após os experimentos, verificou-se que a seção resistente no processo híbrido é no mínimo 40% superior ao obtido no processo semiautomático, devido a penetração superior do laser na sobreposição de chapas. Com relação ao processo de soldagem híbrida – MAG (HLAW), aplicados nas juntas sobrepostas pode-se afirmar que é possível obter resultados satisfatórios do ponto de vista das avaliações visuais, de penetração e dureza, dentro dos limites de tolerâncias de norma. Visto que, do ponto de vista financeiro, os investimentos iniciais necessitam de um tempo de retorno de 4,3 anos, sendo considerado viável ao setor de implementos rodoviários.

PALAVRAS – CHAVE: Arco elétrico; Soldagem híbrida; Robustez do processo.

1 INTRODUÇÃO

O presente estudo visa compilar várias informações sobre a soldagem híbrida aplicada em implementos rodoviários com laser + MAG. O implemento rodoviário é produzido em aço de alta resistência tais como o aço *Hardox 400* e o aço *Strenx 700 MC*, ao passo que a escolha do consumível de solda mais adequado a estes materiais é fator de extrema relevância, pois este é responsável por fazer a união destes materiais, sem afetar o desempenho da peça ou infringir o resultado.

¹ Mestrando em Engenharia Metalúrgica da UNISATC, E-mail: guimaraes-carlos@hotmail.com

² Prof. Orientador no UNISATC, E-mail: Anderson.daleffe@satc.edu.br

³ Mestrando em Engenharia Metalúrgica da UNISATC, E-mail: henrique_cechinel@hotmail.com

⁴ Prof. Centro universitário UNISATC, E-mail: gilson.march@satc.edu.br

⁵ Doutorando em Engenharia de Minas, Metalurgia e Materiais UFRGS, E-mail: Joelson.silva@satc.edu.br



Os implementos podem ser classificados em carrocerias sobre chassi e rebocados. As carrocerias sobre chassi compõem veículos de carga de menor porte e são utilizados usualmente nas áreas urbanas para distribuir as cargas até os consumidores finais. As carrocerias são montadas diretamente sobre o chassi do caminhão e não têm eixos ou chassi próprios. Esses veículos são denominados caminhões simples. Os rebocados têm maior comprimento e capacidade de carga. São estruturas completas, com chassi, eixos, suspensão e freios, e são engatadas ao caminhão e utilizados usualmente em longos percursos. São mais adequados ao transporte de mercadorias das unidades industriais até os centros de distribuição ou de grãos entre as áreas agrícolas e os portos, no entanto, devido ao seu comprimento, não podem entrar em perímetros urbanos [29].

Nesse prisma, a solda híbrida se apresenta como uma alternativa viável nessa produção por combinar a eficiência da produtividade proporcionada pela soldagem MAG com uma tecnologia a laser, que propicia a soldagem com um cordão de solda menor, obtendo-se uma maior penetração de material na junta soldada.

No entanto, há uma questão problema identificada na aplicação da soldagem híbrida no segmento de implementos rodoviários e que merece ser melhor estudada, revelando-se pela necessidade de apresentar uma alternativa viável que possa combinar a eficiência da produtividade proporcionada pela soldagem MAG - GMAW com uma tecnologia a laser (HLAW - *Hybrid Laser Arc Welding*). Para tanto, é possível utilizar as duas fontes de calor na mesma poça de fusão, a fim de propiciar a soldagem com um cordão de solda com menor aporte de calor, alta penetração, obtendo-se maior qualidade com produtividade a ser aplicada na soldagem de implementos. Ou seja, como situação problema pode-se destacar: como a soldagem híbrida pode se tornar uma alternativa vantajosa na soldagem de juntas das chapas de aço utilizadas na produção de implementos rodoviários?

O objetivo do estudo é identificar tecnologias e processos inovadores, combinando duas tecnologias de soldagem, justamente para manter as características básicas de cada uma, e assim, demonstrar que podem ser utilizadas na soldagem de chapas de aço que demonstrem resistência e melhor eficiência.

Sendo assim, a justificativa para a escolha do tema resultou-se pela carência de aplicação e um novo método para o processo de soldagem das juntas que fazem parte da produção dos reboques utilizadas pelas empresas no Brasil, de forma que possa garantir maior eficiência e produtividade.



A fim de apresentar os conteúdos relativos ao estudo, aplicam-se duas metodologias: a pesquisa bibliográfica e a pesquisa experimental. Na pesquisa bibliográfica serão abordados conceitos referentes ao tema, no qual “[...] a pesquisa bibliográfica não é mera repetição do que já foi dito ou escrito sobre certo assunto, mas propicia o exame de um tema sob novo enfoque ou abordagem, a fim de se chegar as conclusões inovadoras” [1].

Na pesquisa experimental serão avaliadas as condições mecânicas da junta soldada em relação a possibilidade de utilização da nova tecnologia nas condições necessárias de aplicação real do sistema e com intensão de expandir para um teste em protótipo real, na busca de ajustar as condições de processamento, ou seja, aumentar o arranjo físico de operação do robô e partir para uma peça em dimensões reais. Ressalta-se, então, que uma pesquisa experimental consiste em determinar um objeto de estudo, selecionar as variáveis que serão capazes de influenciá-lo, definir as formas de controle e de observação dos efeitos que a variável produz no objeto [2].

2 PROCESSO DE SOLDAGEM DE METAIS

Na soldagem de metais é importante determinar o processo de soldagem mais adequado a fim de preservar ao máximo as características físicas e químicas dos materiais de base.

2.1 O PROCESSO DE SOLDAGEM

A soldagem é um processo que resulta na união de metais ou não-metais, por meio da fusão ou não das peças. Para isso, na fusão forma-se uma gota de metal fundido, que se arrefece e gera a união entre as peças. Ou seja, a união é obtida pela aproximação dos átomos (nos metais) ou moléculas (nos polímeros) a distâncias suficientemente pequenas para que ligações químicas sejam formadas, em particular, ligações metálicas [3].

Esse processo visa unir as forças das ligações químicas na junta de forma que sejam de natureza similar às atuantes nos próprios materiais a serem soldados. Como também, para preservar ao máximo, as características físicas e químicas dos materiais base [4]. Os processos de soldagem podem ser utilizados para várias



finalidades desde as mais simples até a mais complexas tais como: conserto de uma perna de cadeira metálica até a construção de pontes e de superpetroleiros [5].

As principais vantagens da soldagem referem-se à maior economia de tempo e de material, redução do peso, uniões estanques, resistentes e possíveis de serem usinadas. Como desvantagens pode-se citar: a dificuldade de desmontagem, como tensões e deformações; algumas soldas exigem acabamento posterior e exige mão de obra especializada [6].

2.2 AÇOS E ARAMES UTILIZADOS NA SOLDAGEM

Os aços de alta resistência e baixa liga utilizados na soldagem, são conhecidos pela sigla ARBL ou *HSLA (high strength low alloy)* e são definidos como: aços específicos com composição química desenvolvida para obter altos valores de propriedades mecânicas, e/ou melhor resistência à corrosão atmosférica, e/ou melhor resistência ao desgaste do que as encontradas em aços carbono convencionais. Os teores de elementos de liga adicionados aos aços ARBL são muito baixos se comparados a outras categorias de aços. Os principais elementos de liga adicionados são: Mn (Manganês), Nb (Nióbio), V (Vanádio), Ti (Titânio), Co (Cobalto), Al (Alumínio), Cu (Cobre) e Cr (Cromo) [7].

Os principais aços de alta resistência e baixa liga são: Hardox 400®; e Strenx® 700MC. As propriedades mecânicas e químicas do Hardox® 400 possuem propriedades mecânicas de alta resistência abrasão e dureza nominal de 400 HBW. Desta forma, o aço é versátil por seu comportamento positivo em relação ao desgaste abrasivo e, a sua alta tenacidade, boa capacidade de dobra e soldabilidade, com o intuito de ser usado em estruturas com desgaste moderado [8].

O aço Strenx® 700 é utilizado para conformação a frio e suas propriedades mecânicas, proporcionam estruturas mais resistentes e leves. Possui um limite de escoamento mínimo de 700 MPa, que são obtidos através do controle da composição química e das condições de laminação a quente [9]. Estes tipos de aços possuem características e composição química que garantem a melhor adequação ao processo.

Outro material essencial no processo de soldagem são os arames de solda, os quais em combinação com o gás de proteção e são responsáveis por manter as características adequadas da soldagem. Os arames utilizados nas soldagens



conforme a sua classificação são: ER70S-6; ER80S-G; E110S-G. O Arame ER70S-6 é formulado para reduzir a limpeza pós-soldagem, proporcionando à junta uma baixa formação de ilhas de sílica e baixo índice de respingos, além de apresentar excelente abertura de arco e maior constância entre lotes [11].

O arame ER80S-G é sólido, não cobreado, ligado ao níquel-cobre, conferindo um nível excelente de desempenho, com baixa emissão de fumos, maior estabilidade de arco e níveis mínimos de respingo, até mesmo na utilização de elevadas correntes de soldagem [10]. O arame E110S-G requer um robusto metal de solda, é sólido de baixa liga, cromo-niquelmolibdenio, não cobreado é também requerido para altas absorções de energia em ensaios de impacto a baixas temperaturas, muito usado no processo GMAW, mostrando boa alimentação de arame e provendo um arco estável com pouco respingo [10].

2.3 SOLDA MIG-MAG - GMAW

A Soldagem a Arco Gás-Metal (*Gás Metal Arc Welding - GMAW*) é uma soldagem a arco que produz a união dos metais pelo seu aquecimento com um arco elétrico estabelecido entre um eletrodo metálico contínuo (e consumível) e a peça. Neste processo, o gás de proteção na soldagem a arco tem como finalidade básica proteger a poça de fusão contra os efeitos nocivos do oxigênio contido no ar atmosférico. Ocorre a união de peças metálicas produzidas pelo aquecimento destas com um arco elétrico estabelecido entre um eletrodo metálico nu, consumível e a peça de trabalho [12].

O gás quando inerte (Ar/He), é também chamado MIG (*Metal Inert Gás*); se for ativo (CO₂ ou misturas Ar/O₂/CO₂), o processo é chamado MAG (*Metal Active Gás*). Os gases inertes puros são, em geral, usados na soldagem de metais e ligas não ferrosas e se misturados com pequenas quantidades de gases ativos são usadas, em geral, com aços ligados, já os gases ativos ou CO₂ puro são usados na soldagem de aços carbono [13; 14].

O equipamento básico para a soldagem GMAW consiste de fonte de energia, tocha de soldagem, fonte de gás e alimentador de arame, entre outros equipamentos (exemplo na Fig. 1).

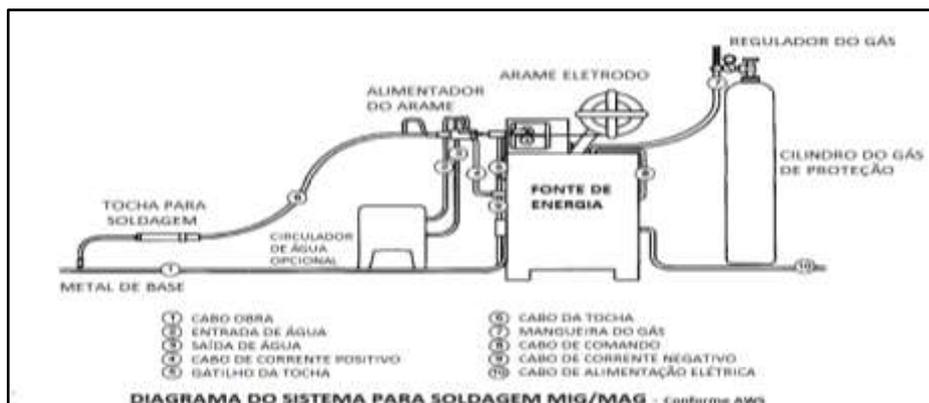


Figura 1 – Diagrama do sistema para a Solda MIG/MAG [12]

No esquema apresentado detalham-se as partes de um sistema para a soldagem MIG/MAG, destacando a presença do cilindro de gás que caracteriza o tipo de soldagem. A fonte de gás é responsável por manter o sistema de gás do arco em fluxo contínuo durante a operação e o alimentador de arame, fornece o consumível até a poça de fusão, tendo como objetivo principal manter a velocidade constante [15].

As principais vantagens do processo MIG/MAG são: alta taxa de deposição, facilidade de automação, facilidade de operação da soldagem, possibilidade de ser executada em diversas posições, alta velocidade de soldagem (alta produtividade), pouca ou nenhuma formação de escória, metal de solda depositado com baixo teor de hidrogênio, penetração uniforme de raiz, soldagem com visibilidade total das peças de fusão, o eletrodo nu é alimentado continuamente [16]. As limitações deste processo de soldagem, referem-se à velocidade de resfriamento, a grande emissão de raios ultravioletas, as projeções de gotas de metal líquido durante o processo e a dificuldade na realização da operação em locais de difícil acesso, devido à necessidade do bocal ficar próximo ao metal a ser soldado [17].

2.4 SOLDAGEM A LASER - *Laser Beam Welding* – LBW

A soldagem a Laser é um processo decorrente da invenção do feixe de energia a laser. Esta tecnologia está presente nos mais diversos ambientes, tais como: domésticos, industriais, manufatura, medicina e até mesmo no campo das artes [18]. A Figura 2 ilustra de forma esquemática um sistema para a soldagem a Laser.

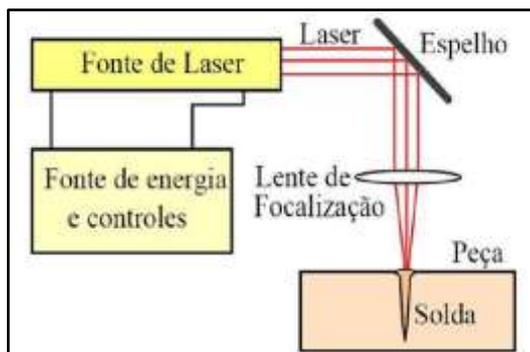


Figura 2 - Elementos de um sistema típico para soldagem a laser [19]

Para a produção do laser podem ser usadas fontes de energia contínua a dióxido de carbono, que são capazes de produzir laser de infravermelho e densidades de energia em torno de $1 \times 10^{10} \text{ W/m}^2$; ou fontes pulsadas de YAG (*Yttrium aluminum garnet*) no estado sólido [19].

O elevado custo do equipamento e a dificuldade do seu uso em ambientes externos, além de complexa parametrização do processo, são as desvantagens mais ponderadas no processo.

2.5 SOLDAGEM HÍBRIDA - HLAW

A soldagem híbrida apresenta vantagens e desvantagens sobre os outros processos. A elevada velocidade de soldagem, é uma das principais características e vantagens do processo de soldagem híbrido - HLAW, aumentando significativamente a produtividade do processo de fabricação como um todo [23, 24].

Foi Steen W. *et al.* quem incluiu na década de 1970, pela primeira vez, os resultados dos experimentos realizados nos processos de soldagem híbrida Laser-arco (HLAW), os quais “foram realizados no *Imperial College of London*, demonstrando as vantagens da combinação de um feixe Laser com o um arco elétrico para a soldagem” [20, p. 29].

Os processos híbridos mais conhecidos são os que envolvem o uso conjunto da soldagem GMAW e a soldagem laser ou a plasma, identificados na Figura 3.

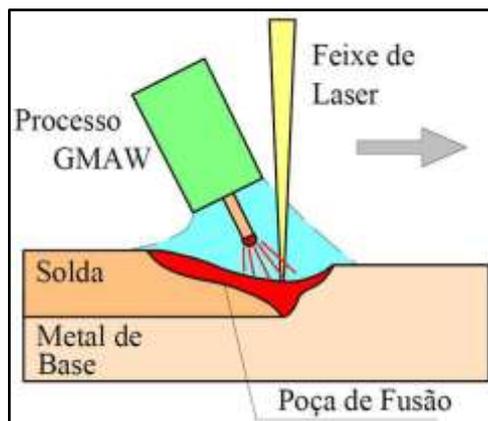


Figura 3 – Processo híbrido (Laser-GMAW) [20]

No processo híbrido as fontes de calor atuam sobre a mesma poça de fusão ao contrário de outra opção muito comum, que seria a combinação de processos, na qual cada processo cria a sua própria poça de fusão e atua de forma separada [22].

Contudo, é possível apontar também como uma vantagem do processo híbrido (em relação aos processos a Laser e a arco isoladamente) as seguintes: maior estabilidade e repetitividade do processo; maior profundidade de penetração; menor aporte térmico; menor distorção e empenamento; maior tolerância geométrica da junta a ser soldada [25, 26, 27]. Como principal limitação, apresenta um elevado custo de operação, processo complexo e com mais variáveis quando comparado a processos individuais; e parâmetros adicionais como a distância e ângulo entre as tochas dos dois diferentes tipos de soldagem [21].

Apesar das vantagens, o processo apresenta estabilidade e aspectos metalúrgicos que devem ser considerados. Ou seja, mesmo com suas vantagens, quando testaram a soldagem a laser híbrida usando um laser de fibra de 30 KW, descobriram a complexidade do processo a tentar penetrar mais de 25 mm de aço em uma única passagem devido à ocorrência de defeitos [28].

3 PROCEDIMENTOS EXPERIMENTAIS

Nos procedimentos experimentais foram abordados as atividades desenvolvidas, os equipamentos e materiais e os tipos de corpos de prova que fizeram parte do projeto.



3.1 ATIVIDADES DESENVOLVIDAS DURANTE O PROJETO

Apresentam-se [Quadro 1] as fases das atividades, as horas utilizadas e período em que os experimentos foram realizados.

Quadro 1 – Fases do projeto

| Fases | Atividades | Horas | Período |
|---|---|-------------|----------------------------------|
| Preparação (máquina e material) | Setup de Máquina / Robô. | N/A | Julho de 2023 a maio de 2024 |
| | Chegada de Peças para Fase 1. | | |
| | Chegada de Peças para Fase 2. | | |
| | Chegada de Peças para Fase 3. | | |
| | Chegada de Peças para Fase 4. | | |
| Fase 1 <u>Chapa teste 300x150 mm</u> | Ensaios de Soldagem em corpos de prova, para definir parâmetros. | 240 | Julho de 2023 a dezembro de 2023 |
| | Análise dobramento, metalografia e de dureza (preparação e ensaios). | | |
| | Avaliação da influência da abertura entre as juntas/GAP das peças. | | |
| | Estudo de aplicabilidade do sistema de correção de trajetória online. | | |
| | Estudo de tempos de ciclo, compilação e documentação dos resultados. | | |
| Fase 2 <u>Chapa teste 2000X300 mm</u> | Instalação e validação do sistema de correção de trajetória online para soldagem híbrida de elevada produtividade nos diferentes tipos de espessura/juntas. | 440 | Janeiro a março de 2024 |
| | Ensaios de Soldagem em corpos de prova para definir parâmetros, sem operação de dobra. | | |
| | Otimização de parâmetros de soldagem. | | |
| | Testes com soldagem semiautomática MAG | | |
| | Comparação entre o processo de soldagem semiautomático MAG e Híbrido. | | |
| | Avaliação de distorções e empenamentos. | | |
| | Análise de dureza para os novos conjuntos de parâmetros de soldagem. | | |
| | Ensaios de dobramento. | | |
| | Ensaios de macrografias. | | |
| Fase 3 <u>Chapa teste 2000X300 mm</u> | Instalação e validação do sistema de correção de trajetória online | 240 | Março a abril de 2024 |
| | Validação dos parâmetros de solda em corpos de prova, dobradas simulando condições reais de aplicação | | |
| | Avaliação das distorções e empenamentos em chapas com operação de dobra. | | |
| | Validação do posicionamento e acesso do sistema de soldagem híbrida (cabecote + tocha). | | |
| | Análise metalográfica | | |
| Fase 4 Soldagem do protótipo | Soldagem 3 laterais esquerdas e 3 direitas para construção do primeiro implemento produzido por soldagem híbrida do Brasil. | 160 | Abril a maio de 2024 |
| Total de horas | | 1080 | |

A partir destas informações, nota-se que foram utilizadas 1080 horas e que os experimentos tiveram duração de 9 meses desde a data de início até a sua finalização.

3.2 EQUIPAMENTOS DE PROTEÇÃO E SEGURANÇA

Para a execução dos experimentos também foram utilizados EPIs tais como: protetor auricular, óculos de segurança e óculos especiais (para serem utilizados no ato da soldagem), luvas de vaqueta para posicionar as peças no gabarito e sapatos de proteção; e cabines adequadas.

A cabine [Fig. 4] utilizada para executar a soldagem é do tipo enclausurada, pois os raios emitidos por este processo podem prejudicar a saúde, sendo um dos principais a visão.



Figura 4 – Cabine enclausurada



Figura 5 – Monitor utilizado no processo de solda a laser

Ao detalhar a cabine, na parte de cima do enclausuramento [Fig. 5], tem o sistema de exaustão, pois no momento da soldagem, geram muitos fumos e gases podendo ocorrer problema no processo de soldagem e causa ofuscamento nos filtros do laser e do seguidor de junta.

Para ter o alinhamento e a soldagem ficar no local desejado, antes da execução da solda, o operador centralizou o seguidor de junta em vários pontos da peça, conforme a tela de um dos monitores, específico para esta atividade [Fig. 5].



3.3 CONSUMÍVEIS, AÇOS E CORPOS DE PROVA UTILIZADOS NO PROJETO

Os consumíveis e aços utilizados em cada fase do projeto são detalhados nos Quadros 2 e 3.

Quadro 2 - Consumíveis utilizados nas fases do experimento

| Fases | Consumíveis |
|--------|--|
| Fase 1 | Arame Lincoln Electric ER70S-6 Red Force lote: (10)22022613, diâmetro de 1.2 (milímetros) mm Gás de processo 95%-Ar 5%O ₂ . |
| Fase 2 | Arame Lincoln Electric ER70S-6 Red Force lote: (10)22022613, diâmetro de 1.2 mm Gás de processo 95%-Ar 5%O ₂ . 26 l/min. |
| Fase 3 | Arame Lincoln Electric ER70S-6 Red Force lote: (10)22022613, diâmetro de 1.2 mm Gás de processo 95%-Ar 5%O ₂ . Vazão 26l/min. |
| Fase 4 | Arame Lincoln Electric ER70S-6 Red Force lote: (10)22022613, diâmetro de 1.2 mm Gás de processo 95%-Ar 5%O ₂ . Vazão 26l/min. |

Quadro 3 – Tipos de aços utilizados nas fases do experimento

| Fases | Especificação de material | Espessura - mm | Dimensão - mm | Quantidade - Peças |
|-------|--|----------------|---------------|--------------------|
| 1 | Chapa de Aço Strenx 700 | 2 | 150 x 300 | 454 |
| | | 3 | 150 x 300 | 218 |
| | | 4 | 150 x 300 | 100 |
| 2 | Chapa de Aço Strenx 700 | 2 | 300 x 3000 | 50 |
| | | 3 | 300 x 3000 | 20 |
| 3 e 4 | Chapa de Aço Strenx 700, 3 laterais direitas e 3 laterais esquerdas, divididas em seções de até dois metros de comprimento para soldagem do protótipo. | | | |

Os corpos de prova e o número das amostras utilizadas em cada fase são relacionados no Quadro 4.

Quadro 4 - Fases e corpos de prova utilizadas

| Fases | Total de corpos de prova |
|--------|---|
| Fase 1 | 18 amostras, nas dimensões de 300 mm por 150 mm, para cada combinação de espessura, material e tipo de junta a serem testados. Totalizando 36 amostras, soldagem nos dois lados. |
| Fase 2 | 15 amostras, nas dimensões de 3000 mm por 300 mm, para cada combinação de espessura, material e tipo de junta a serem testados, sendo todas as amostras para serem montadas e ponteadas, conforme o projeto da junta. |
| Fase 3 | 10 amostras, já com as dobras do produto final, obedecendo o tamanho célula, para combinações de junta sobreposta a serem testadas, sendo ponteadas nos padrões das empresas parceiras |
| Fase 4 | Laterais direitas e laterais esquerdas completas, ponteadas divididas em seções de dois metros de comprimento para soldagem do protótipo. |

A metodologia aplicada baseou-se no comportamento estrutural de uma junta soldada de aço dissimilar, utilizando o aço *Strenx 700 MC*, a fim de caracterizar

mecânica e metalurgicamente, aplicando o processo de soldagem Híbrida Laser + GMAW e o processo GMAW – MAG para o arame sólido ER70S-6, onde a junta será submetida à realização de macrografia, ensaios de dureza, ensaio de dobramento e medição de empenamento (flexa).

4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

Apresentam-se a seguir os resultados obtidos nas quatro fases do projeto.

4.1 PRIMEIRA FASE

Na primeira etapa dos experimentos foram determinados os parâmetros para 10 repetições de testes e selecionadas 3 destas para fazer o ensaio de macrografia, medições de dureza e ensaio de dobramento.

4.1.1 Amostras das juntas de 2 x 2 mm

As chapas de 2 x 2 mm foram fornecidas chapas que chegaram com ferrugem, foi necessário remover com escova de aço para os testes. Uma vez desenvolvidos os parâmetros executaram-se as repetições, macrografias, durezas e dobramentos, os resultados são os seguintes:

Tabela 1 - Seções resistentes nas juntas de 2 x 2 mm

| Amostra | Garganta mm | Penetração na sobreposição mm | Penetração total mm | Observação |
|---------|-------------|-------------------------------|---------------------|----------------------|
| 1 | 1,68 | 2,06 | 3,74 | |
| 2 | 1,41 | 2,31 | 3,72 | Um poro |
| 3 | 1,68 | 1,81 | 3,49 | Mordedura de 0,05 mm |



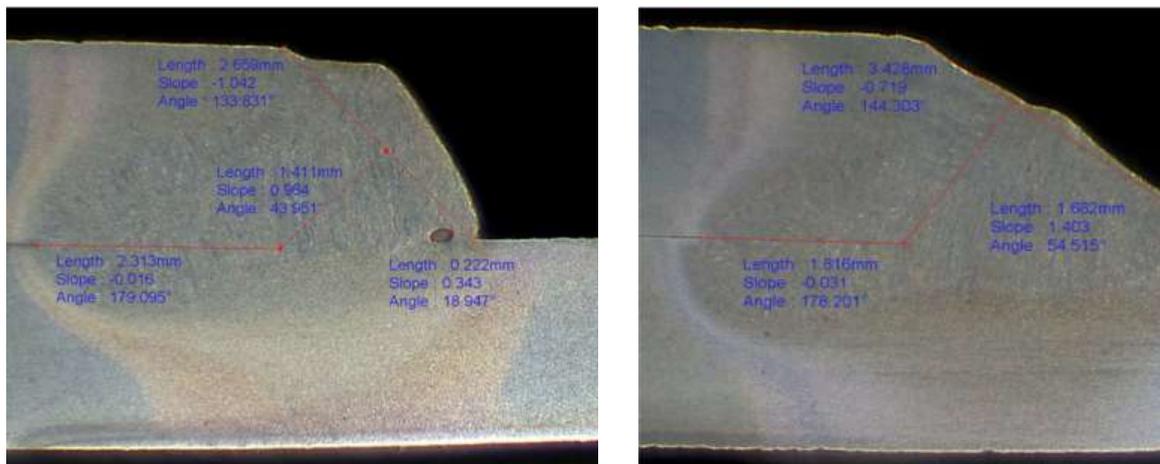


Figura 6 - Chapas de 2 x 2 mm – Ensaio de Macrografia

Os resultados de dureza para as amostras de 2 x 2 mm se encontram na Tabela 2.

Tabela 2 – Resultados dos ensaios de dureza nas juntas de 2 x 2 mm

| Localização | Dureza HV | | |
|---------------------------|-----------|-----|-----|
| | #1 | #2 | #3 |
| ZTA chapa Inferior 1 | 396 | 399 | 378 |
| ZTA chapa Inferior 2 | 391 | 425 | 403 |
| ZTA chapa Inferior 3 | 389 | 407 | 396 |
| Material de base inferior | 394 | 354 | 298 |
| ZTA chapa superior 1 | 420 | 398 | 385 |
| ZTA chapa superior 2 | 412 | 428 | 420 |
| ZTA chapa superior 3 | 420 | 401 | 380 |
| Material de base superior | 339 | 341 | 327 |

Foram executadas duas repetições do dobramento sem evidência de falhas ou ruptura, conforme Figura 7.



Figura 7 -Dobramento de juntas de 2 x 2 mm

4.1.2 Amostras das juntas de 3 x 2 mm

Foram fornecidos chapas de aço que chegaram com ferrugem, foi necessário remover estas impurezas com escova de aço para fazer os testes [Fig. 8]. Uma vez desenvolvidos os parâmetros executaram-se as repetições, macrografias [Fig. 9], durezas e dobramentos, os resultados são os seguintes:



Figura 8 - Amostras analisadas das juntas de 3 x 2 mm

Tabela 3 - Seções resistentes nas juntas de 3 x 2 mm

| Amostra | Garganta mm | Penetração na sobreposição mm | Penetração total mm | Observação |
|---------|-------------|-------------------------------|---------------------|-------------|
| 1 | 1,54 | 2,40 | 3,94 | |
| 2 | 1,38 | 2,44 | 3,82 | |
| 3 | 1,36 | 3,43 | 4,79 | GAP 0,15 mm |

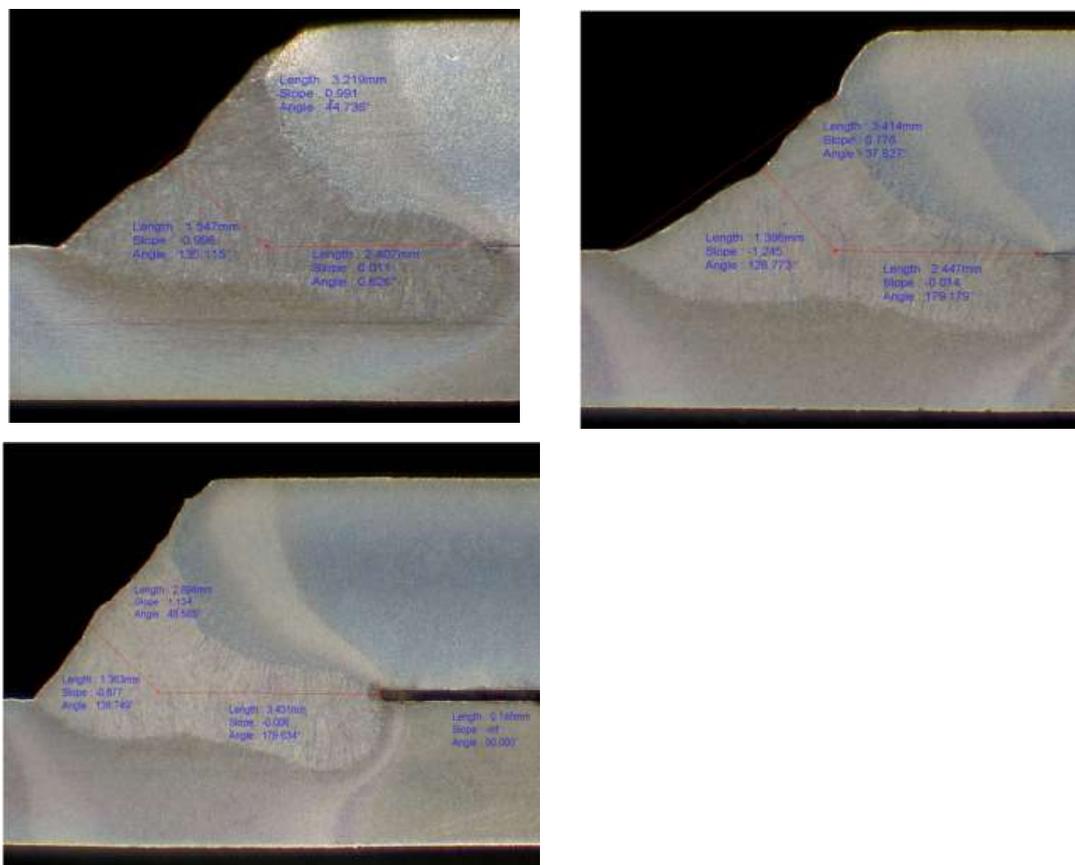


Figura 9 - Chapas de 3 x 2 mm – Ensaio de Macrografia

A Tabela 4 apresenta os resultados das medições de dureza das amostras analisadas.

Tabela 4 - Resultados dos ensaios de dureza nas juntas de 3 x 2 mm

| Localização | Dureza HV | | |
|---------------------------|-----------|-----|-----|
| | #1 | #2 | #3 |
| ZTA chapa Inferior 1 | 397 | 279 | 338 |
| ZTA chapa Inferior 2 | 338 | 277 | 345 |
| ZTA chapa Inferior 3 | 344 | 317 | 338 |
| Material de base inferior | 339 | 298 | 336 |
| ZTA chapa superior 1 | 311 | 292 | 317 |
| ZTA chapa superior 2 | 328 | 305 | 303 |
| ZTA chapa superior 3 | 325 | 299 | 303 |
| Material de base superior | 269 | 281 | 281 |

Foram executadas duas repetições do dobramento sem evidência de falhas ou ruptura, conforme Figura 10.



Figura 10 – Dobramento junta 3 x 2 mm

4.2 SEGUNDA FASE

Na segunda fase do experimento foi realizada a caracterização da soldagem semiautomática a partir de amostras enviadas. Após procedeu-se uma comparação entre os resultados da soldagem robotizada nas peças de 150 x 300 mm. Para tanto, foram aplicados os processos de soldagem Híbrida Laser GMAW versus o processo soldagem semiautomática MAG, realizado pelo soldador.

Foram realizadas análises macrográficas e de durezas das amostras enviadas pela empresa parceira.

4.2.1 Análises Macrográficas

Foram extraídas das amostras enviadas corpos de prova para medição das seções resistentes penetração e inspeção de qualidade, os resultados se encontram na Tabela 5 com a imagem das amostras na Figura 11.

Tabela 5 - Seções resistentes nas juntas de 2 x 2 mm

| Amostra | Garganta mm | Inferior | | | Observação |
|---------|-------------|---------------|----------|--------|--|
| | | Penetração mm | Perna mm | ZTA mm | |
| 1 | 2,1 | 0,96 | 4,0 | 2 | GAP 0,43 mm |
| 2 | 1,9 | 0,57 | 3,87 | 2 | GAP 0,57 mm, apresentou poro e falta de fusão. |
| 3 | 2,5 | 1,9 | 5,49 | 2 | GAP 1,12 mm, apresentou reforço 0,22 mm |

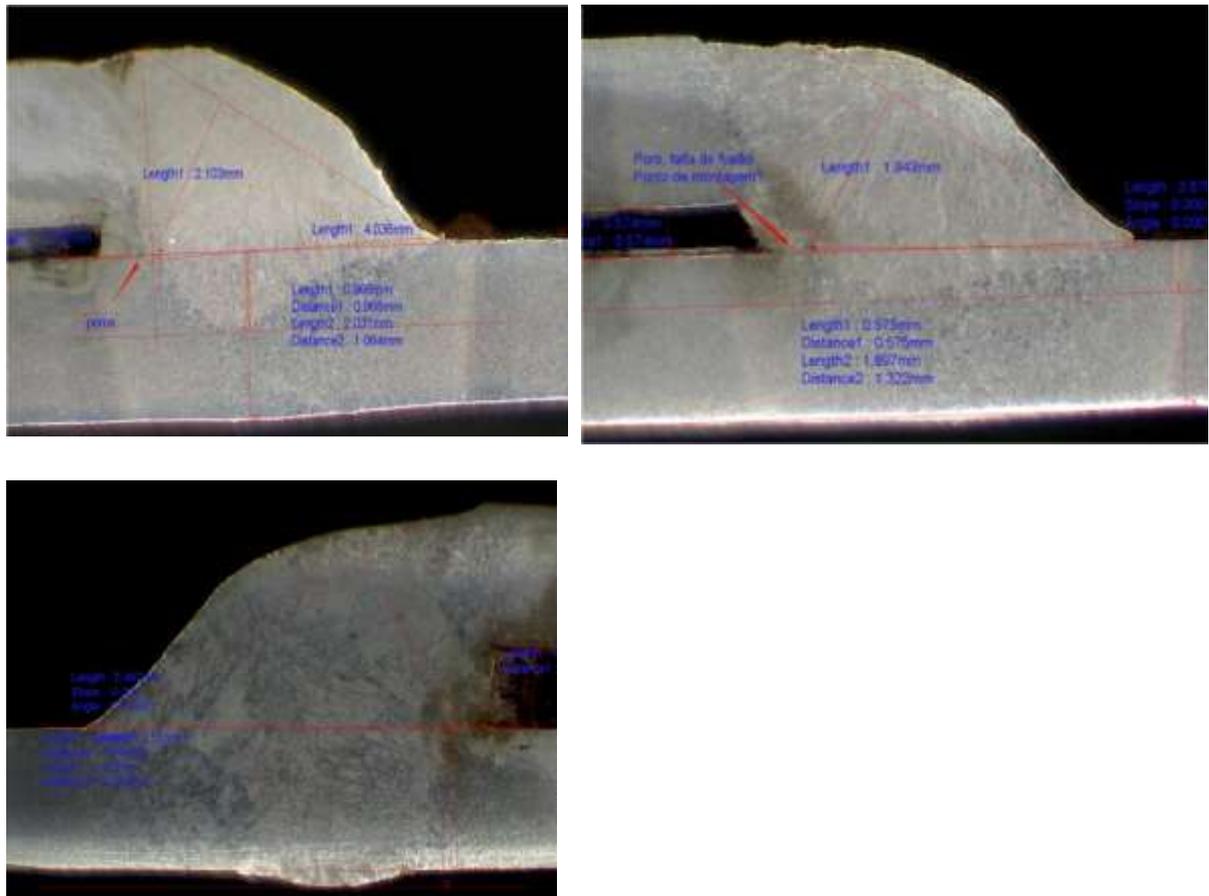


Figura 11 - Imagem e amostras analisadas das juntas de 2 x 2 mm

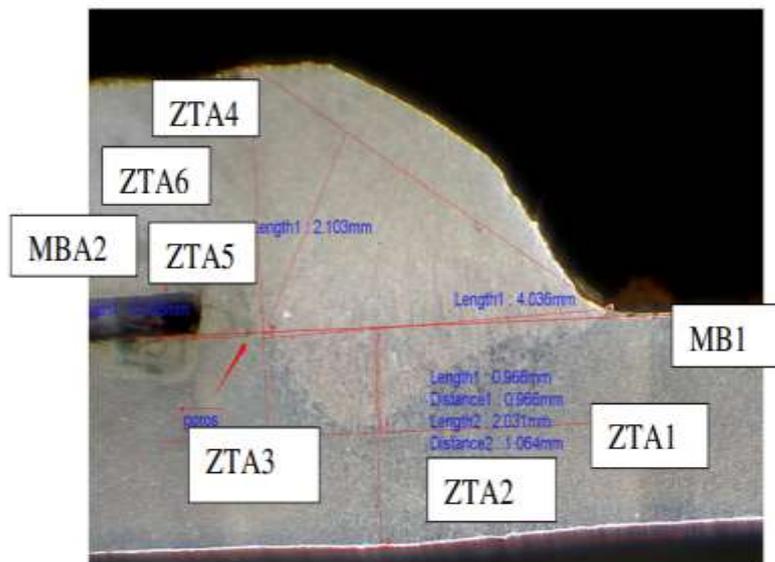


Figura 12 - Medições de dureza

Os resultados das medições de dureza [Fig. 12], para as amostras de 2 mm x 2 mm, se encontram na Tabela 6.

Tabela 6 – Resultados dos ensaios de dureza nas juntas de 2 x 2 mm.

| Localização | Dureza HV | | |
|---------------------|-----------|-----|-----|
| | #1 | #2 | #3 |
| MB1(Metal de Base) | 154 | 147 | 148 |
| ZTA1 | - | 179 | 177 |
| ZTA2 | - | 202 | 173 |
| ZTA3 | 174 | 193 | 212 |
| ZTA4 | - | 180 | 189 |
| ZTA5 | 197 | 190 | 183 |
| ZTA6 | 184 | 168 | 168 |
| MB2 (Metal de Base) | 165 | 159 | 161 |

Os resultados de dureza para as amostras de 3 x 2 mm se encontram na Tabela 7.

Tabela 7 – Resultados dos ensaios de dureza nas juntas de 3 x 2 mm

| Localização | Dureza HV | | |
|---------------------|-----------|-----|-----|
| | #1 | #2 | #3 |
| MB1(Metal de Base) | 186 | 161 | 157 |
| ZTA1 | 156 | 180 | 151 |
| ZTA2 | 154 | 189 | 166 |
| ZTA3 | 164 | 192 | 165 |
| ZTA4 | 210 | 220 | 211 |
| ZTA5 | - | 209 | 250 |
| ZTA6 | - | 236 | 200 |
| MB2 (Metal de Base) | - | 178 | 170 |

4.2.2 Resultados para Juntas de 3 X 2 mm

Foram extraídas das amostras enviadas corpos de prova para medição das seções resistentes penetração e inspeção de qualidade, os resultados se encontram nas Tabela 8 com as imagens das amostras na Figura 13.

Tabela 8 -Seções resistentes nas juntas de 3 x 2 mm

| Amostra | Garganta mm | Inferior | | | Observação |
|---------|-------------|---------------|----------|--------|---|
| | | Penetração mm | Perna mm | ZTA mm | |
| 1 | 2,5 | 0,73 | 4,0 | 2 | GAP 0,49mm |
| 2 | 2,5 | 2,0 | 4,9 | 2 | Apresentou na raiz um reforço de 0,18 mm na chapa inferior. |
| 3 | 2,3 | 0,83 | 4,6 | 2 | GAP 0,22 mm, apresentou na raiz falta de fusão. |

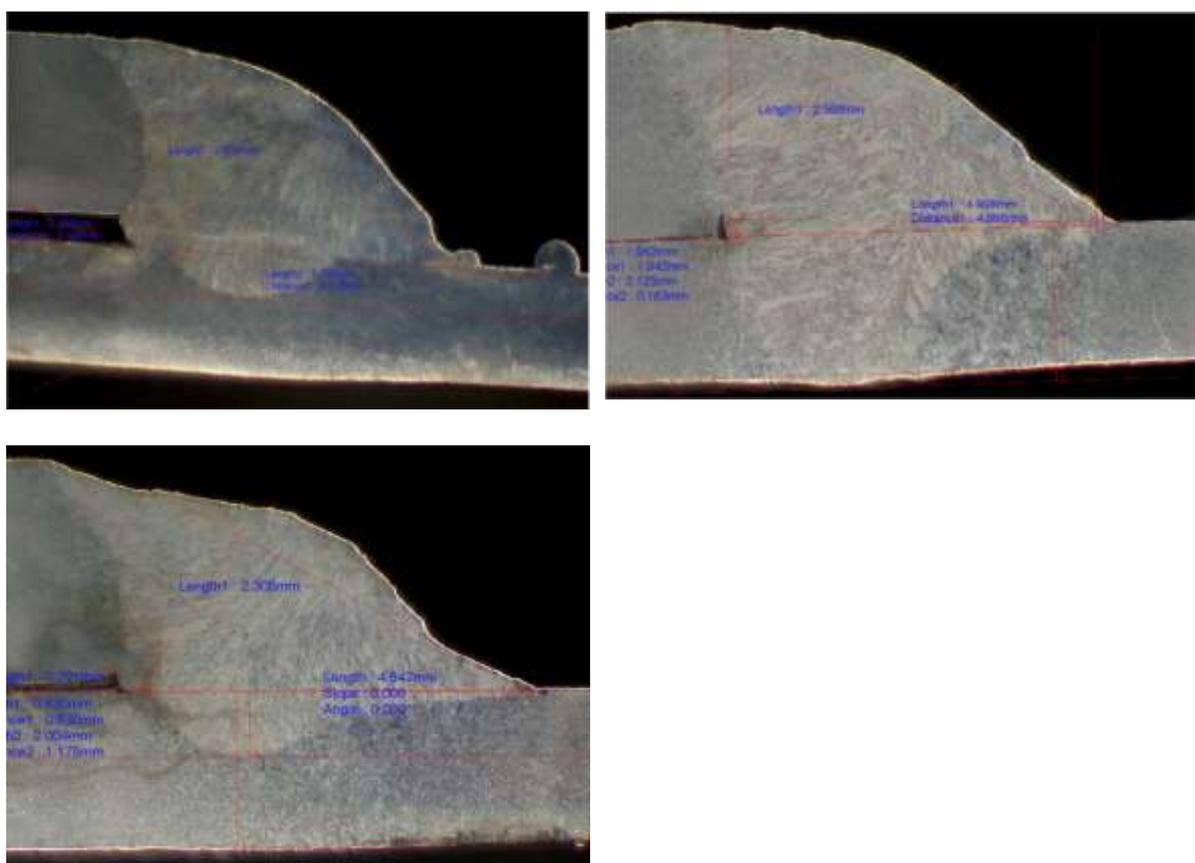


Figura 13 - Imagem e amostras analisadas das juntas de 3 x 2 mm

Os corpos de prova de 2 mm x 2 mm e 3 mm x 3 mm utilizados nos testes de soldagem estão mencionados na Figura 14.



Figura 14 - Amostras dos testes de soldagem

Na soldagem das chapas, com o processo semiautomática MAG, sendo a junta sobreposta com espessura de 2 mm x 2 mm, 3 mm x 2 mm, foram realizados testes com velocidade de deslocamento em torno de 40 cm/min.

Como resultado em relação a velocidade de soldagem é possível obter aumentos superiores a 400% em todas as espessuras testadas, comparadas com o Processo Híbrido versus ao processo semiautomático – MAG, realizado pelo soldador. A energia de soldagem é menor na soldagem híbrida quando comparada, resulta em um resfriamento mais rápido e aumento da dureza na ZTA. A soldagem Semiautomática é mais tolerante as juntas com “GAP”, porém devido a redução da velocidade causa fusão de toda a espessura da chapa e reforço.

4.3 TERCEIRA FASE

Na terceira fase do experimento foram realizados testes de soldagem em juntas sobrepostas de 2 mm x 2 mm, 3 mm x 2 mm com velocidade de soldagem estipulada em 3 m / min para junta de 2 mm x 2 mm e 3 mm x 2 mm atendendo as normas AWS D1.3, em chapas de 3000 mm. Foi utilizada a soldagem híbrida laser em conjunto com o processo de soldagem GMAW - MAG.

Os ensaios de soldagem foram realizados em corpos de prova de 300 x 3000 mm em junta sobreposta com 40 mm de sobreposição. Os parâmetros utilizados foram os desenvolvidos na fase 01 do projeto (chapas de 150 x 3000 mm).

Foram ajustados os parâmetros de soldagem do sensor laser, ferramenta que auxilia na localização e seguimento de juntas soldadas através do uso de um feixe de laser rotatório. Este dispositivo detecta as variações de posição e física da junta e pode corrigir a trajetória ou alterar parâmetros de soldagem conforme a necessidade

em cada caso. No processo foram feitos os ajustes no gabarito, executadas 6 repetições para as juntas de 2 mm x 2 mm e 3 mm x 2 mm.

Para as juntas de 2 mm x 2 mm soldadas manualmente foram medidas flechas de até 25 mm contra 16 mm na soldagem híbrida robotizada, mostrando que efetivamente há uma redução do empenamento com o processo robotizado, como pode ser visto nos dados da Figura 15.

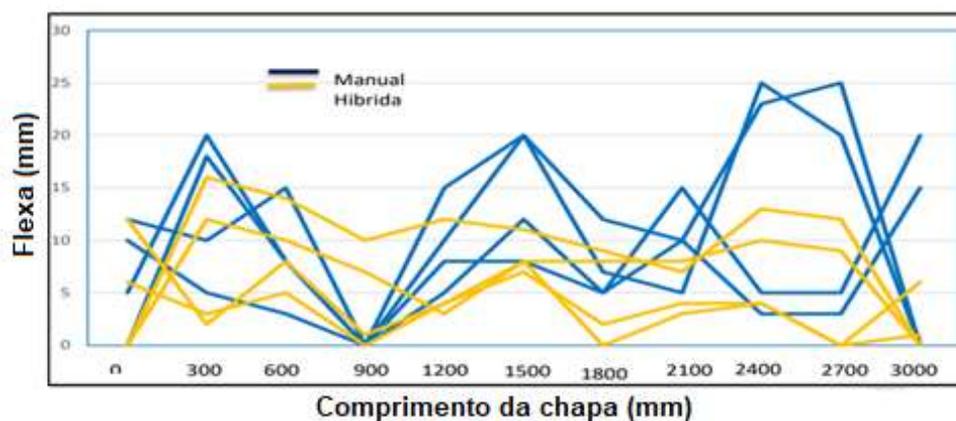


Figura 15 – Gráfico das medições de flecha para juntas de 2 x 2 mm

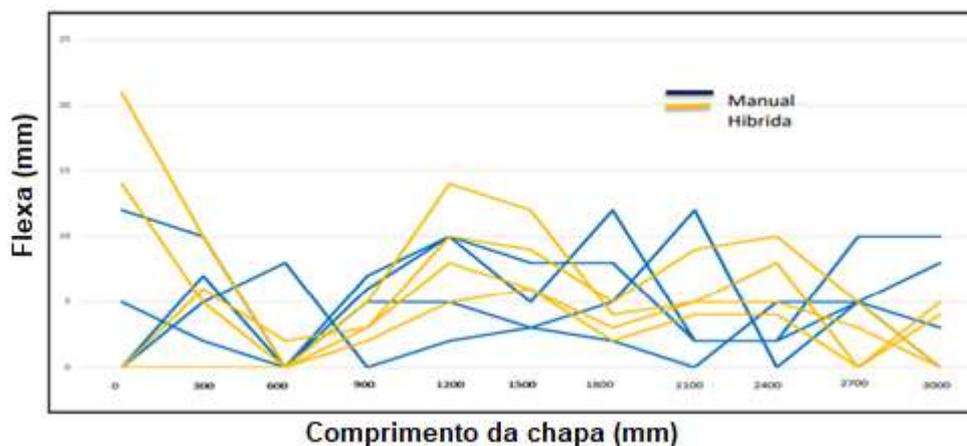


Figura 16 – Gráfico das medições das flechas para juntas de 3 mm x 2 mm

Nos dados da Figura 16, destacam-se os níveis das medições das juntas de 3 mm x 2 mm e 2 mm x 2 mm, realizadas com ajustes nos dispositivos do sensor laser. Para tanto, foram executadas 8 repetições com soldagem completa de ambos os lados e todas com resultado satisfatório. Também foram executadas duas amostras com soldagem intervalada na junta de 2 mm sobre 3 mm para efeitos da comparação das flechas geradas após a soldagem. Para as juntas de 3 mm x 2 mm não foi possível observar variações significativas nas flechas. Analisando tais dados, nota-se que a flecha máxima pode ser vista para soldagem híbrida e fica em 21 mm, já para manual



a máxima flecha ficou em 12 mm. Porém se somar todas as flechas obtém-se 211 mm para a soldagem manual e 222 mm para a soldagem híbrida.

4.4 QUARTA FASE

Na quarta fase do experimento foram realizados testes de soldagem em juntas sobrepostas de 2 mm x 2 mm, 3 mm x 2 mm com velocidade de soldagem estipulada em 3 m/min para junta de 2 mm x 2 mm e 3 x 2 mm atendendo as normas AWS D1.3, em chapas para montagem de caixa basculante. O processo de soldagem abrangeu a soldagem Híbrida Laser GMAW, com Laser no modo de onda contínua em conjunto com o processo de soldagem.

Foram realizados ensaios de soldagem iniciais com ajustes dos parâmetros de soldagem do sensor laser em 4 caixas de carga, totalizando 24 conjuntos. Desta forma, os testes abrangeram cordões externos, assoalho lateral e corrimão. Posteriormente, após reconfiguração do gabarito, executaram-se as soldas internas.

A condição da chapa (oleosidade e brilho, rebarbas, ondulações, corte irregular, corte com chanfro), posição das juntas (perto de dobras) e interferência do gabarito afetaram a repetibilidade do sensor laser com os mesmos parâmetros da fase II. Foram necessárias novas configurações e conseqüentemente testes para obter a configuração que obtivesse os resultados satisfatórios.

O gabarito conseguiu pressionar através de parafusos que distribuem a força na aba do corrimão forçando a encostar na chapa lateral. Mesmo com o uso do dispositivo foram identificadas montagens com aberturas variáveis e danos na superfície de corte que aumentou a espessura da chapa e criou condições para afastamento.

Também foram identificadas descontinuidades sempre que o afastamento das chapas ficava acima de 0,5mm. Esta situação, na montagem, ocorreu pela combinação de ondulações na chapa somadas com dobras executadas fora da especificação de desenho.

A junta formada pela lateral e o assoalho pelo lado interno do conjunto foi a que apresentou maior variação na abertura da junta, chegando a 6 mm antes da prensagem no gabarito. Para o fechamento desta abertura foi necessário usar o sistema de aperto até o limite, e não sendo suficiente foram utilizados calços na parede posterior para auxiliar no processo.



Não foi possível eliminar os afastamentos em todas as juntas, porém foi constatado que os afastamentos de até 0,5 mm podem ser preenchidos com os parâmetros selecionados. Para aumentar a pressão no fechamento da junta foi inserido inicialmente um calço de 4 mm.

Em várias peças ainda com o uso do calço não foi possível reduzir o afastamento (GAP). Para tentar reduzir foram realizadas duas experiências: 1º) ponteamento das peças; e 2º) aumento dos calços. Na última peça a ser soldada foram adicionados calços de até 40 mm na parte posterior do apoio das peças, com este recurso foi possível reduzir o afastamento em quase toda a extensão para menos 0,5 mm ou menos, porém aproximadamente 150 mm ficaram com 1 mm ou mais de afastamento, resultando em falta de preenchimento da junta nesta região.

4.5 ANÁLISES FINAIS

Após a finalização dos testes da fase 4, concluiu-se que o conceito do gabarito atendeu a necessidade de montagem, porém identificou-se que pode ser aumentada a rigidez e capacidade de fechamento das aberturas entre as juntas (GAP), através de encostos reguláveis e sistema de aperto. Como também, as questões de ergonomia e acesso devem ser consideradas.

As variações dimensionais dos componentes (corrimão, lateral e assoalho) devem ser mapeadas e mantidas dentro de tolerâncias controladas de forma que resultem em juntas que possam ser soldadas com resultados satisfatórios. Isto inclui: corte, dobra e transporte dos componentes.

Os resultados finais também consideraram a eficiência produtiva e os custos financeiros para a implementação da soldagem Híbrida nas caixas de carga do implemento rodoviário. Tais dados são apresentados na Tabela 9 e 10.

Tabela 9 - Análise do tempo de ciclo de soldagem laser híbrida da lateral / caixa de implemento.

| Tempo de soldagem do implemento | | | | | | | |
|---------------------------------|--------------------|-------------|---------------------------|---------------|----------------|---------------------|------------------------------|
| Nº | Descrição | Quant. robô | Tempo por produto (horas) | Quant. Diária | Quant. cordões | Comprim. solda (mm) | Tempo total produção (horas) |
| 08 | Lateral basculante | 01 | 0:16:17 | 64 | 03 | 26.530 | 17:22:08 |

Como visto, o tempo de soldagem [Tab. 9] por lateral de implemento foi de 0:16:17 horas, com 03 cordões, com um comprimento de 26.530 mm (15% da solda



total do produto), sendo 64 laterais, levou em torno de 17:22:08 horas, com uma eficiência produtiva de 75%, com 01 robô.

Tabela 10 - Valores processo manual para fabricação de 30 caixa de implementos com 53060 mm de solda

| Item | Descrição | Valor Unitário (R\$) |
|------|---|----------------------|
| 01 | Custo do metrô de solda atual (R\$/metro) | 8,40 |
| 02 | Metragem de solda mensal (Previsão) | 33.427,80 |
| 03 | Custo de solda mensal | 280.793,52 |
| 04 | Custo de solda anual | 3.369.522,24 |

Com informação da empresa de implementos rodoviários [Tab. 10], os gastos atuais com produção diária de 30 caixas de implementos necessitam do trabalho de 12 colaboradores por turno.

Para compreender as vantagens no processo com solda híbrida apresentam-se dados na Tabela 11.

Tabela 11 - Processo proposto – soldagem automático híbrido

| Item | Descrição | Valor Unitário (R\$) |
|------|---|----------------------|
| 01 | Custo do metrô de solda atual (R\$/metro) | 2,58 |
| 02 | Metragem de solda mensal (Previsão) | 33.427,80 |
| 03 | Custo de solda mensal | 86.243,72 |
| 04 | Custo de solda anual | 1.034.924,69 |

Com os valores referentes ao processo proposto [Tab.11], considerando a mesma fabricação de 30 caixa de implementos/dia, concluiu-se que o trabalho pode ser executado com redução de Mão de Obra Direto (MOD) de 12 colaboradores para 02 colaboradores por turno. Ou seja, o processo não necessita do mesmo número de trabalhadores, reduzindo-se o custo do metro de solda, o custo de solda mensal e anual, economia importante para o processo.

Para evidenciar as vantagens financeiras da implantação do processo de soldagem híbrida, apresenta-se uma comparação do investimento no processo atual e do processo híbrido, evidenciando também o tempo de retorno para o investimento [Tab. 12, 13 e 14].

Tabela 12 – Investimento atual

| Item | Descrição Atual | Valor Unitário (R\$) |
|------|---|----------------------|
| 01 | Custo do metrô de solda atual (R\$/metro) | 8,40 |
| 02 | Metragem de solda mensal (Previsão) | 33.427,80 |
| 03 | Custo de solda mensal | 280.793,52 |



| | | |
|----|----------------------|--------------|
| 04 | Custo de solda anual | 3.369.522,24 |
|----|----------------------|--------------|

X

Tabela 13 – Investimento híbrido

| Item | Descrição Híbrido | Valor Unitário (R\$) |
|------|---|----------------------|
| 01 | Custo do metrô de solda atual (R\$/metro) | 2,58 |
| 02 | Metragem de solda mensal (Previsão) | 33.427,80 |
| 03 | Custo de solda mensal | 86.243,72 |
| 04 | Custo de solda anual | 1.034.924,69 |

Tabela 14 - Retorno de investimento processo atual x híbrido

| Item | Descrição | Valor atual fábrica MAG | Valor atual Híbrido |
|--|---------------------------------|-------------------------|---------------------|
| 01 | Processo de soldagem da lateral | R\$ 3.369.522,24 | R\$ 1.034.924,69 |
| Economia anual R\$ 2.334.597,55 | | | |
| Estimativa do valor para a implantação do processo Laser Híbrido – R\$ 9.956.370,00 | | | |
| Retorno previsto do investimento em anos - 4,3 anos | | | |

O valor relativo ao processo robotizado com solda híbrida para fabricação de 30 caixa de implementos com 53,060 metros de solda, pode gerar uma economia de $(280.793,52 - 86.243,72) = R\$ 194.549,80$ mês e a quantia de anual de R\$ 2.334.597,55.

Considerando tais dados, com a implantação da soldagem híbrida e apesar do investimento inicial, a empresa pode ter o retorno deste investimento em até 4,3 anos, tornando-se evidente a vantagem econômica com a adoção do novo processo.

CONSIDERAÇÕES FINAIS

O processo de soldagem híbrida – MAG (HLAW), aplicados nas juntas sobrepostas apresentou resultados satisfatórios do ponto de vista das avaliações visuais, de penetração, dureza e dentro de limites de tolerâncias de norma.

Verificou-se também que o processo híbrido é no mínimo 40% superior ao obtido no processo semiautomático, devido a penetração superior do laser na sobreposição de chapas.

Por fim, considerando dados financeiros, a implantação do processo híbrido de soldagem pode garantir economia anual. Apesar do investimento inicial, a empresa que optar na sua implantação, pode ter o retorno deste investimento em até 4,3 anos, tornando-se assim evidente a vantagem econômica com a adoção do novo processo.



REFERÊNCIAS

- [1] MARCONI, Marina de Andrade; LAKATOS, Eva Maria. **Fundamentos de metodologia científica**. 5. ed. São Paulo: Atlas, 2003.
- [2] GIL, Antônio Carlos. **Métodos e técnicas de pesquisa social**. 5. ed. São Paulo: Atlas, 2007.
- [3] SILVA, Fernanda Laureti Thomaz da. **Pequeno histórico da soldagem**. Disponível em: <https://infosolda.com.br/pequeno-historico-da-soldagem/>. Acesso em: 05 out. 2024.
- [4] FELIZARDO, Ivanilza. **Tecnologia da soldagem**. CEFEMT. Centro Federal De Educação Tecnológica de Minas Gerais. Departamento de Engenharia Mecânica. Versão 02/2016, p. 5. Disponível em: <https://www.dem.cefetmg.br/wp-content/uploads/sites/39/2017/09/Apostila-Tecnologia-da-Soldagem.pdf>. Acesso em: 15 out. 2024.
- [5] PEIXOTO, Arildomá Lobato. **Soldagem**. Belém: IFPA, Santa Maria: UFSM, 2012. 90p. 1. Escola Técnica Aberta do Brasil. II. Título. CDD: 671.52. Disponível em: https://www.ufsm.br/app/uploads/sites/413/2018/12/08_soldagem.pdf. Acesso em: 08 out. 2024.
- [6] NERIS, Manoel Messias. **Soldagem**. CETEC. Eixo Tecnológico: Controle e Processos Industriais. Disponível em: http://www.cpscetec.com.br/cpscetec/arquivos/apostila_soldagem.pdf. Acesso em: 15 out. 2024.
- [7] COSTA, V. M. **Caracterização mecânica e metalúrgica de juntas dissimilares de aços de alta resistência e baixa liga**. Trabalho de Diplomação, fev. de 2011. Porto Alegre, RS, Sul: UFRGS.
- [8] SSAB. **Aço Hardox® 400 e Strenx® 700MC**. Disponível em: Acesso em: <https://www.ssab.com/pt-br/marcas-e-produtos/hardox/programa-de-produto/400>. Acesso em: 20 out. 2024.
- [9] GALINA, Bruno; SOUZA, José de; BIEHL, Luciano Volcanoglo; MEDEIROS, Jorge Luis Braz; ROSSINI, Elton Gimenez. **Estudo dos efeitos do tratamento térmico nos aços Hardox® 500 e Strenx® 700**. Disponível em: [www.https://www.editoracientifica.com.br/articles/220609102.pdf](https://www.editoracientifica.com.br/articles/220609102.pdf). Acesso em: 15 out.2024.
- [10] CASTILHO, Marcos Augusto Minho. **Análise comparativa entre arames de solda da classe ER70S-6, ER80S-G E E110S-G no processo GMAW Com transferência por curto-circuito para aplicação em aços dissimilares ARBL. 2021**. Disponível em: <https://www.scielo.br/j/si/a/b535rw6qw7bMpkhtbQyKYYd/abstract/?lang=pt>. Acesso em: 15 out. 2024.



[11] ESAB. **European standard**. (2000). *EN ISO 9692-3*. Editado, traduzido e adaptado pela empresa ESAB-Brasil. Disponível em: <http://www.esab.com.br>. Acesso em: 15 out. 2024.

[12] SUMIG. **Tudo o que você precisa saber sobre o processo de soldagem MIG/MAG**. 2024 Disponível em: <http://Sumig.com/pt/blog/post/tudo-o-que-voce-precisa-saber-sobre-o-processo-de-soldagem-mig>. Acesso em: 22 out. 2014.

[13] MARQUES, P. V.; MODENESI, P. J.; BRACARENSE, A. Q. **Soldagem fundamentos e tecnologia**. 11. ed. Belo Horizonte: Editora UFMG, 2009.

[14] TATAGIBA, Luiz Claudio Soares; GONÇALVES, Renata Barbosa; PARANHOS, Ronaldo. **Tendências no desenvolvimento de gases de proteção utilizados na soldagem MIG/MAG**. Disponível em: <https://www.scielo.br/j/si/a/TWngQmXCrKkj6mZf89fvfqr/?format=pdf&lang=pt>. Acesso em: 8 out. 2024.

[15] INFOSOLDA. **Gases na soldagem**. Disponível em: [https://infosolda.com.br/gases-deprotecaonasoldagem/#:~:text=Di%C3%B3xido%20de%20Carbono%20\(CO2\),e%20a%C3%A7os%20de%20baixa%20liga](https://infosolda.com.br/gases-deprotecaonasoldagem/#:~:text=Di%C3%B3xido%20de%20Carbono%20(CO2),e%20a%C3%A7os%20de%20baixa%20liga). Acesso em: 15 out. 2024.

[16] WAINER E.; BRANDI, S. D.; MELLO, F. D. H. **Soldagem: processos e metalurgia**. 4. ed. São Paulo: Edgard Blucher LTDA, 2004.

[17] CEFET. **Apostila da soldagem**. Disponível em: <https://www.dem.cefetmg.br/wp-content/uploads/sites/39/2017/09/Apostila-Tecnologia-da-Soldagem.pdf>. Acesso em: Acesso em: 18 out. 2024.

[18] MODENESI, Paulo J.; REIS, R. I.. A model for melting rate phenomena in GMA welding. **Journal of Materials Processing Technology**, p. 199-205, 2007.

[19] ALMEIDA, Denison; CASEMIRO, Helder; DUTRA, Edgar. **Processo de soldagem laser híbrido GMAW**. 2017. Disponível em: <https://infosolda.com.br/1185-processo-de-soldagem-laser-hibrido-gmaw/>. Acesso em: 16 out. 2024.

[20] MODENESI, Paulo Villani Marques. **Soldagem I** - introdução aos processos de Belo Horizonte, janeiro de 2011. Disponível em: <https://demet.eng.ufmg.br/wp-content/uploads/2012/10/processo.pdf>. Acesso em: 08 out. 2014.

[21] NIELSEN, S. E. **Hybrid welding of thick section mild steel**. Force Institute, Brøndby, Denmark. 2011. Disponível em: https://www.researchgate.net/publication/321391932_LASER-MIG_Hybrid_Welding_of_Thick_Plates_of_Mild_Steel_in_Single_Pass. Acesso em: 14 out. 2024.



[22] SILVA, Rafael Gomes da. **Desenvolvimento e avaliação do processo de soldagem híbrida laser-GMAW (HLAW): um avanço na consolidação de processos de soldagem de alta penetração.** 2022. Dissertação Mestrado. Disponível em: <https://repositorio.ufsc.br/handle/123456789/215845?show=full>. Acesso em: 5 out. 2024.

[23] TAN, C., W. H.; GONG, Z.; LIM, L; FENG, J.. Influence of Laser Power on Microstructure and Mechanical Properties of Fiber Laser-Tungsten Inert Gas Hybrid Welded Mg/Cu Dissimilar Joints. **Materials and Design**, v. 78, p. 51-62, 2015. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0261306915001983>. Acesso em: 17 out. 2024.

[24] Z. SHENGAI, S. Y., Q. HUIJUN. The Technology and Welding Joint Properties of Hybrid Laser-TIG Welding on Thick Plate. **Optics and Laser Technology**, v. 48, p. 381-388, 2013. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0030399212005312>. Acesso em: 17 out. 2024.

[25] KAH, P. Overview of the exploration status of Laser-arc hybrid welding processes. **Reviews on Advanced Materials Science**, v. 30, p. 112-132, 2012. Disponível em: https://www.researchgate.net/publication/267856626_Overview_of_the_exploration_status_of_laser-arc_hybrid_welding_processes. Acesso em: 21 out. 2024.

[26] NIELSEN, S. E. High Power Laser Hybrid Welding - Challenges and Perspectives. **Physics Procedia**, v. 78, p. 24-34, 2015. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1875389215015047>. Acesso em: 18 out. 2024.

[27] KATAYAMA S., K. Y., MIZUTANI M. Elucidation of Laser welding phenomena and factors affecting weld penetration and welding defects. **Physics Procedia**, v. 5, p. 9-17, 2010. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1875389210004505>. Acesso em: 16 out. 2024.

[28] HARRIS, I. D. **High - Speed GMAW and Laser GMAW Hybrid Welding of Steel Sheet.** 2009. Tese (PhD) – School of Applied Sciences, Cranfield University, 2009. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0924013614002416>. Acesso em: 14 out. 2024.

[29] BNDES - **A indústria de implementos rodoviários e sua importância para o aumento da eficiência do transporte de cargas no Brasil.** Biblioteca Digital. BNDES Setorial, Rio de Janeiro, n. 24, p. 241-260, set. 2006. Disponível em: <https://web.bndes.gov.br/bibliotecadigital>. Acesso em: 18 out. 2024



ABSTRACT

This work covers content on the application of hybrid welding (HLAW), with the combination of a high-power laser beam with an electric arc, using a shielding gas and wire to perform the welding, aiming for more advantages with the application. of this process in welding. In order to present the content related to the topic, bibliographical research and experimental research were applied. During the monitoring of the experiments, a large variation in mechanical properties was observed between the 2 mm, 3 mm and 4 mm thick sheets. After the experiments, it was found that the resistant section in the hybrid process is at least 40% higher than that obtained in the manual process due to the superior penetration of the laser in the overlapping of sheets. Regarding the hybrid welding process – MAG (HLAW), applied to overlapping joints, it can be stated that it is possible to obtain satisfactory results from the point of view of visual assessments, penetration and hardness, within the limits of standard tolerances. From a financial point of view, initial investments require a payback time of 4.3 years, being considered viable for the road implements sector.

Key Words: Electric arc; Hybrid welding; Process robustness.