

ESCOLA TÉCNICA DO ARSENAL DE MARINHA

2ºSG-ML EVERTON GALDINO DA COSTA

TECNOLOGIAS AVANÇADAS EM SOLDAGEM NAVAL:
PROCESSO HLAW (Hybrid LASER-Arc Welding) E SUAS VANTAGENS

Rio Grande

2024

2ºSG-ML EVERTON GALDINO DA COSTA

TECNOLOGIAS AVANÇADAS EM SOLDAGEM NAVAL:
PROCESSO HLAW (Hybrid LASER-Arc Welding) E SUAS VANTAGENS

Trabalho de Conclusão de Curso apresentada à Escola Técnica do Arsenal de Marinha, como requisito parcial para a conclusão do Curso de Aperfeiçoamento Avançado para Praças.

Orientador(a): 1T PEDRO IVO
COELHO DE ARAÚJO

Rio de Janeiro
Escola Técnica do Arsenal de Marinha
2024

RESUMO

O presente trabalho visa a apresentação do processo HLAW (Hybrid Laser-Arc Welding). Um processo derivado de junção de dois outros, são eles *Laser Beam Welding (LBW)* e o Gas Metal Arc. Welding (GMAW). Uma explanação sobre os benefícios e vulnerabilidade desse dois processos e a união deles tornou o HLAW um processo muito promissor para a indústria Naval. Ajustados os complexos parâmetros que o HLAW exige, há redução de 40% no tempo de soldagem, diminuindo não só o tempo na soldagem, como também eliminando alguns processos demorados na construção marítima, como por exemplo a eliminação dos chanfros e vários passes em peças grossas. A implementação do HLAW nos estaleiros nacionais pode reduzir os custos na produção da pré-montagem até a edificação, podendo tornar o núcleo do poder naval Brasileiro a vanguarda das construções navais no mundo.

Palavras-Chave: Hybrid Laser-Arc Welding; Aumento da Produtividade; Alta complexividade de Parâmetros; *Laser Beam Welding*; Gas Metal Arc. Welding.

Sumário

1. INTRODUÇÃO.....	4
2. PRINCÍPIOS E FUNDAMENTOS DO PROCESSO HÍBRIDO LASER-GMAW.....	4
2.1. DEFINIÇÃO BÁSICA DOS PROCESSOS.....	5
2.1.1. PROCESSO LASER LBW (Laser Beam Welding – LBW).....	5
2.1.2. PROCESSO GMAW (Gas Metal Arc. Welding).....	6
2.2. PROCESSO HLAW (Hybrid LASER-Arc Welding).....	7
3. RESULTADOS E DISCUSSÃO.....	8
4. CONCLUSÃO.....	10
REFERÊNCIAS.....	11

1. INTRODUÇÃO

A soldagem, pilar fundamental da indústria contemporânea, busca constantemente por inovações que otimizem processos e reduzam custos. Em setores como o naval e o automotivo, onde a espessura das peças exige soldagens complexas, a tradicional preparação de juntas e o acentuado número de passes representam um gargalo produtivo. A soldagem HLAW (Hybrid LASER-Arc Welding) emerge como uma solução disruptiva, combinando a alta penetração do laser com a versatilidade do arco elétrico. Essa sinergia permite soldar peças espessas sem a necessidade de chanframentos extensos, acelerando significativamente a produção e reduzindo custos. No entanto, a complexidade da interação entre as duas fontes de energia de soldagem exige um cuidadoso ajuste dos parâmetros de soldagem, tornando o processo um desafio técnico a ser superado.

O presente trabalho busca a apresentação do processo HLAW, em linhas gerais, assim como, a comparação dos processos aos quais se originou, demonstrando, deste modo, as vantagens do processo HLAW e as dificuldades da hibridização para os processos.

2. PRINCÍPIOS E FUNDAMENTOS DO PROCESSO HÍBRIDO LASER-GMAW

A gênese da soldagem híbrida Laser-arco (HLAW) remonta ao final da década de 1970, quando pesquisadores do *Imperial College de London* pioneiramente demonstraram as sinergias entre o laser e o arco elétrico. Essa combinação inovadora prometia revolucionar a indústria da soldagem, oferecendo maior velocidade, profundidade na penetração e estabilidade no processo. No entanto, a escassez de laser com alta potência e a complexidade da interação entre os dois procedimentos limitaram o avanço da pesquisa nessa área por quase uma década. Somente com o advento dos lasers industriais de alta potência, no final dos anos 80, a HLAW ganhou novo impulso, atraindo a atenção de pesquisadores e indústrias. Desde então, a evolução da HLAW tem sido marcada por um contínuo aprimoramento, com foco na expansão de suas aplicações para diversos materiais e setores industriais (SILVA, 2020).

O processo híbrido LASER – GMAW, vem suprir uma necessidade da indústria de otimização de tempo. Eliminando e otimizando algumas fases do processo. Nesse sentido, com a solda HLAW elimina-se o chanframento das peças devido à profundidade alcançada pelo laser realizando ao mesmo tempo o cordão de solda bem-acabado e um passe raiz de qualidade. Com a eliminação do chanfro, cordão de solda com acabamento perfeito com penetração até a raiz elimina-se também a necessidade de mais de um passe de solda na junta, o que evita o reaquecimento da peça e alterações na sua microestrutura indesejáveis. Outra vantagem é que devida a Zona Fundida (ZF) e a Zona Termicamente Afetada (ZTA) serem mais estreitas há menos dispersão de calor na peça evitando a distorção.

Advindo da coesão dos processos LBW e GMAW, buscando aperfeiçoar ambas técnicas e potencializando o que cada uma tem de melhor, a HLAW é uma opção à indústria naval.

2.1. DEFINIÇÃO BÁSICA DOS PROCESSOS

Nos tópicos a seguir, faremos um breve apanhado dos dois processos: LBW e GMAW. Unidos, formam o HLAW, um procedimento que visa extrair o melhor de cada um. Por exemplo a penetração do LBW e a alta produção do GMAW. Em seguida, detalharemos os benefícios do HLAW.

2.1.1. PROCESSO LASER LBW (*Laser Beam Welding* – LBW)

Devido às características de coerência e monocromaticidade, o Laser se tornou uma promissora fonte de calor à soldagem, sendo este processo denominado como união por feixe Laser (*Laser Beam Welding* – LBW). Como uma das principais vantagens alcançadas pela densidade de potência do processo LBW, a elevada interação entre penetração e a Zona termicamente Afetada (ZTA) o torna extremamente versátil para diversas aplicações de soldadura de chapas e tubos de grande espessura. Essa relação entre densidade de potência e formato de zona fundida pode ser observada na Figura 1.

Figura 1 - Fluxo de Calor de diferentes processos de soldagem por fusão

Processo de Soldagem	Densidade de Potência (W/m ²)	Perfil da Zona Fundida
Eletrodo Revestido (SMAW)	$5 \times 10^6 - 10^8$	
MIG/MAG (GMAW)	$5 \times 10^6 - 10^8$	
Plasma (PAW)	$5 \times 10^6 - 10^{10}$	
Feixe Laser (LBW) e Feixe de Elétrons (EBW)	$1 \times 10^{10} - 10^{12}$	

Fonte: SILVA (2020, p 42.)

Soldagem LBW no modo *keyhole* possibilita alcançar elevadas velocidades de soldagem e profundidades de penetração, esta última sendo diretamente proporcional à potência Laser utilizada. Com a soldagem LBW no modo *keyhole*, temos algumas vantagens e desvantagem.

TABELA 1

VANTAGENS LBW :	DESVANTAGENS LBW :
POSSÍVEL TRANSMITIR O FEIXE A GRANDES DISTÂNCIA	BAIXA EFICIÊNCIA
PERMITE SOLDAGEM EM DIFÍCEIS ACESSOS	EQUIPAMENTO DE BAIXA POTÊNCIA
PODE SER AUTOMATIZADO TENDO EM VISTA O FÁCIL AJUSTE DO FEIXE DE LASER	OFERECE DIFICULDADE PARA MUDAR O PONTO FOCAL
GRANDE PENETRAÇÃO	APRESENTA PROBLEMAS DE REFLETIVIDADE EM ALGUNS MATERIAIS

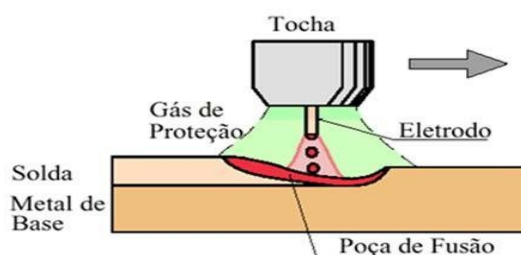
Fonte: Apostila C-ApA-PR-EAD

2.1.2. PROCESSO GMAW (Gas Metal Arc. Welding)

Também conhecido como MIG/MAG (*Metal Inert Gas/Metal Active Gas*), é o processo mais estudado e utilizado indústria, sendo talvez, a maior representatividade dentre os processos de soldagem a arco elétrico, formando a ligação por meio de um arco que aquece as juntas até seu ponto de fusão. O GMAW é hoje o substituto natural do eletrodo revestido, processo mais comum e adaptado a realidade da indústria Brasileira, devido as suas propriedades mecânicas e sua alta produtividade. Sua produtividade superior está intimamente ligada ao processo ser automatizáveis o que requer conhecimento para regulação dos parâmetros de trabalho, porém não requer uma alta habilidade de seus operadores.

No processo GMAW há muitos recursos interessantes, a propositura de soldagem por fusão que utiliza um arco para o derretimento do eletrodo consumível bobinado, com um gás de proteção para a poça de fusão podendo ser ativo ou inerte. Conforme Figura 2.

Figura 2 - Processo de soldagem GMAW



Fonte: Researchgate.net

TABELA 2

VANTAGENS GMAW :	DESVANTAGENS GMAW :
FÁCIL AUTOMATIZAÇÃO	MUITO SUSCETÍVEL A VARIAÇÃO ELÉTRICA
ALTA PRODUTIVIDADE	MAIOR CUSTO DO EQUIPAMENTO
ALTA TAXA DE DEPOSIÇÃO	MAIOR NECESSIDADE DE MANUTENÇÃO
GRANDE VERSATILIDADE QUANTO AO TIPO DE MATERIAL E	MENOR VARIEDADE DE CONSUMÍVEIS

2.2. PROCESSO HLAW (Hybrid LASER-Arc Welding)

A soldagem HLAW, que combina a energia do laser com a do arco elétrico, envolve uma complexa interação entre diversos fatores. A formação de um canal de vapor (keyhole) pelo laser e a consequente geração de uma pluma (Emissão Luz) de plasma são cruciais nesse processo.

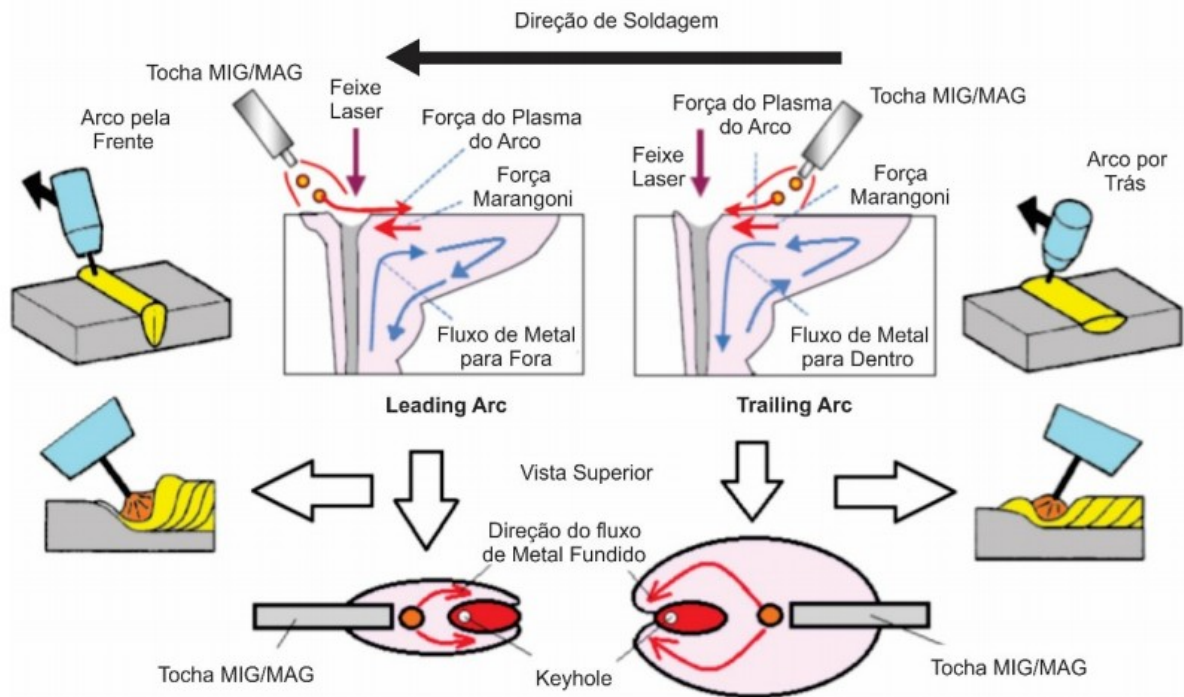
O entrosamento entre o laser e o arco é influenciada por:

- Tipo de laser e gás de proteção: Diferentes lasers e gases resultam em características distintas da pluma.
- Parâmetros de soldagem: Corrente do arco, distância do eletrodo e a peça, e posição relativa entre o laser e o arco afetam a formação e a temperatura da pluma.
- Densidade potencial do laser: A alta densidade de potência favorece a formação do keyhole e intensifica a emissão de plasma. (SILVA, 2020)

Na soldagem híbrida a laser (HLAW), a combinação da energia do laser e do arco elétrico exige um posicionamento preciso das fontes de calor. Existem duas configurações principais para essa disposição: paraxial e coaxial. **Configuração paraxial:** O laser e o arco são direcionados para a mesma zona, mas em posições diferentes. Nessa configuração, o arco pode estar à frente do laser (leading arc) ou atrás (trailing arc). A literatura indica que o leading arc geralmente resulta em maior profundidade de penetração da solda, enquanto o trailing arc proporciona uma maior largura do cordão de solda. **Configuração coaxial:** O laser passa pelo interior de um eletrodo oco, sendo direcionado para a peça junto com o arco elétrico. Embora existam equipamentos comerciais para essa configuração, ela é menos comum na soldagem híbrida com eletrodos consumíveis (como o GMAW), sendo o arranjo paraxial o mais utilizado. (SILVA, 2020)

O método leading arc apresenta uma maior penetração de solda, devido ao fato de que antes do material ser atingido pelo feixe laser ele já se encontra fundido, exigindo menor energia para atingir o keyhole, ocasionando também um aumento de absorção da energia proveniente do feixe laser (PANASSOL, 2023, p. 21).

Figura 3 - Comparação do fluxo de metal fundido em aço carbono com diferentes configurações de sentido de alimentação de arame.



Fonte – SILVA (2020, p.56)

TABELA 3

VANTAGENS HLAW	DESVANTAGENS HLAW
Alta velocidade de soldagem	Alta complexidade de parametrização
Elevada penetração de material, com alta deposição de material	Elevado custo de aquisição
Maior tolerância geométrica da junta a ser soldada em comparação com a soldagem unicamente a laser	Processo relativamente novo, com muitas informações a serem exploradas
Redução do custos globais de fabricação	Poucas empresas e profissionais com expertise
Possibilidade de soldar metais ferroso e não ferrosos e com diferentes espessuras	Complexidade maior para acesso adequado dos cabeçotes a junta de solda.
Menor aporte técnico	-

Fonte: PANASSOL (2023. p 23).

3. RESULTADOS E DISCUSSÃO

A soldagem (HLAW), que combina a precisão do laser e a versatilidade do arco elétrico, tem se mostrado uma tecnologia extremamente promissora para a indústria naval. Essa técnica oferece diversos benefícios em relação a soldas convencionais, como:

- Aumento da produtividade: A HLAW permite soldar com maior velocidade, reduzindo significativamente o tempo na produção.
- Melhora na qualidade da solda: As juntas soldadas pela HLAW apresentam menor porosidade, menor inclusão de escória e melhor acabamento superficial.
- Redução de deformações: A menor inserção de calor na peça durante a solda HLAW resulta em menor distorção e deformação.
- Menor necessidade de preparação das juntas: A alta penetração do laser permite soldar juntas com menor abertura de chanfro, reduzindo custos.
- Maior flexibilidade: Permite soldar uma ampla variedade de materiais e espessuras.
- Menor consumo de energia: Devido a maior eficiência do processo.
- Redução de emissões de gases poluentes: Em comparação com alguns processos convencionais.

A HLAW oferece uma combinação única de alta produtividade, alta qualidade e menor custo, tornando-a uma tecnologia ideal para a construção e reparo de navios e plataformas marítimas.

A solda HLAW, combina o melhor dos dois mundos: a alta penetração do laser e a versatilidade do processo GMAW. O laser, com sua elevada densidade potencial, atravessa o material, criando uma profunda cavidade. Já o arco elétrico do GMAW preenche essa cavidade adicionando metal de seu arame, garantindo uma solda robusta e homogênea. Essa sinergia entre as duas fontes de calor resulta em uma solda única e característico, com um perfil de cálice. A parte superior, mais larga, é resultado da ação do arco elétrico, enquanto a parte inferior, mais estreita e profunda, é moldada pelo laser.

O alto potencial da soldagem HLAW para aplicações que exigem elevada penetração. Ao utilizar uma potência laser de 10 kW e uma corrente de arco de 265 A, foi possível alcançar uma penetração máxima de 14,8 mm em aço ASTM A516 GR70, evidenciando a eficácia desse processo para a união de materiais espessos. A redução de 40% no tempo da progressão da solda comparando com o GMAW demonstra o potencial inovador do HLAW para aumentar a eficiência e a competitividade das empresas brasileiras. (SILVA, 2020)

É possível verificar no vídeo abaixo o processo HLAW, aponte a câmera do seu celular QrCode abaixo:



Fonte: Fronius LaserHybrid – You Tube

No vídeo acima podemos ver a configuração paraxial, *leading arc*.

4. CONCLUSÃO

Iniciei meus estudos em soldagem no ano de 2000, na extinta Escola Técnica Estadual de Transporte Engenheiro Silva Freire, localizada no terreno onde hoje se ergue o estádio do Engenhão. Nessa instituição, tive a oportunidade de aprender os tipos de solda não convencionais e convencionais.

Após mais de duas décadas, retomei meus estudos sobre soldagem com o objetivo de aprofundar meus conhecimentos e contribuir de forma mais efetiva nessa área. Ao me deparar com o processo de soldagem a laser e suas vantagens, fiquei surpreso ao constatar que essa tecnologia ainda não havia sido amplamente aplicada na produção naval de grande porte, como na construção de submarinos.

No entanto, ao pesquisar mais sobre o tema, descobri o processo HLAW, que combina as melhores características da soldagem a laser com as vantagens da

soldagem a arco elétrico, representando, em minha opinião, uma evolução também do processo GMAW. Acredito que a adaptação do processo HLAW aos nossos estaleiros, especialmente nas etapas de montagem de sub-blocos, blocos e edificações, traria benefícios significativos em termos de custo e qualidade a longo prazo.

Há muitos aspectos do HLAW que precisam ser objeto de estudo, como a complexabilidade de parametrizar o dois processos de origem. Porém, o objeto desse estudo é apresentar o processo e suas vantagens e desafios.

A soldagem HLAW, resultante da combinação da alta densidade de energia do laser e da deposição de metal de adição do processo GMAW, proporciona um entrosamento único que resulta em juntas soldadas de alta qualidade e alta produtividade. O laser, com sua elevada densidade de potência, cria uma profunda cavidade no material base, enquanto o arco elétrico do GMAW preenche essa cavidade com metal de adição, garantindo uma penetração profunda e um bom preenchimento da raiz. Essa complementariedade entre as duas fontes de calor resulta em um cordão de solda característico, com um perfil em forma de cálice, que combina as vantagens de ambos os processos.

REFERÊNCIAS

APOSTILA - C-ApA-BR-EAD – Curso Aperfeiçoamento Avançado em Soldagem industrial em estruturas Navais.2023. Diretoria Industrial da Marinha (DIM). Escola Técnica do Arsenal de Marinha (ETAM).

PANASSOL, Felipe Vanin. **desenvolvimento e análise de soldagem robotizada híbrida laser-arco elétrico em reservatórios de ar.**2023. Dissertação (Bacharel em Engenharia Mecânica) – Universidade de Caxias do Sul.

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

WALLERSTEIN, Daniel Figueirôa. **Influência do teor de co2 e do metal de adição na soldagem híbrida laser-gmaw em aço estrutural grau s355**. 2016. (Mestrado Engenharia Mecânica) – Universidade Federal de Pernambuco.