



UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA CATARINA
CENTRO TECNOLÓGICO
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA MECÂNICA

RAFAEL GOMES NUNES SILVA

**DESENVOLVIMENTO E AVALIAÇÃO DO PROCESSO DE
SOLDAGEM HÍBRIDA LASER-GMAW (HLAW): UM AVANÇO NA
CONSOLIDAÇÃO DE PROCESSOS DE SOLDAGEM DE ALTA
PENETRAÇÃO**

FLORIANÓPOLIS

2020

Rafael Gomes Nunes Silva

DESENVOLVIMENTO E AVALIAÇÃO DO PROCESSO DE SOLDAGEM HÍBRIDA
LASER-GMAW (HLAW): UM AVANÇO NA CONSOLIDAÇÃO DE PROCESSOS DE
ALTA PENETRAÇÃO

Dissertação submetida ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica da Universidade Federal de Santa Catarina para obtenção do título de Mestre em Engenharia Mecânica

Orientador: Prof. Milton Pereira, Dr. Eng.

Coorientador: Prof. Dr.-Ing. Walter Lindolfo Weingaertner

Florianópolis

2020

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

Silva, Rafael Gomes Nunes

Desenvolvimento e Avaliação do Processo de Soldagem Híbrida LASER-GMAW (HLAW): Um Avanço na Consolidação de Processos de Soldagem Híbrida / Rafael Gomes Nunes Silva ; orientador, Milton Pereira, coorientador, Walter Lindolfo Weingaertner, 2020.

138 p.

Dissertação (mestrado) - Universidade Federal de Santa Catarina, Centro Tecnológico, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica, Florianópolis, 2020.

Inclui referências.

1. Engenharia Mecânica. 2. Soldagem. 3. Laser. 4. Soldagem Híbrida Laser-Arco. 5. Soldagem Híbrida Laser-GMAW. I. Pereira, Milton. II. Weingaertner, Walter Lindolfo. III. Universidade Federal de Santa Catarina. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica. IV. Título.

Rafael Gomes Nunes Silva

**Desenvolvimento e Avaliação do Processo de Soldagem Híbrida LASER-GMAW
(HLAW): Um Avanço na Consolidação de Processos de Soldagem Híbrida**

O presente trabalho em nível de mestrado foi avaliado e aprovado por banca examinadora composta pelos seguintes membros:

Prof. Milton Pereira, Dr. Eng. - Orientador
Universidade Federal de Santa Catarina - UFSC

Prof. Dr- Ing. Walter Lindolfo Weingaertner - Coorientador
Universidade Federal de Santa Catarina - UFSC

Prof. Régis Henrique Gonçalves e Silva, Dr. Eng.
Universidade Federal de Santa Catarina - UFSC

Prof. Mateus Barancelli Schwedersky, Dr. Eng.
Universidade Federal de Santa Catarina - UFSC

Prof. Louriel Oliveira Vilarinho, Dr. Eng.
Universidade Federal de Uberlândia – UFU

Certificamos que esta é a **versão original e final** do trabalho de conclusão que foi julgado adequado para obtenção do título de mestre em Engenharia Mecânica.

Prof. Jonny Carlos da Silva, Dr. Eng.
Coordenador do Programa

Prof. Milton Pereira, Dr. Eng.
Orientador

Florianópolis, 14 de julho de 2020

Dedico este trabalho aos meus pais e ao meu irmão, por todo amor e incentivo que deles já recebi. Meu maior objetivo sempre foi fazê-los sentir orgulho. Espero um dia poder retribuí-los a altura.

Sleep e Atena.

AGRADECIMENTOS

Agradeço primeiramente ao Laboratório de Mecânica de Precisão – LMP por todo o suporte e acolhimento durante o mestrado, e em especial aos professores Dr. Milton Pereira e Dr.-Ing Walter Lindolfo Weingaertner por todo o conhecimento a mim repassado, por toda a orientação pessoal e profissional.

Agradeço também aos professores do Instituto de Soldagem e Mecatrônica – LABSOLDA, professores Dr. Régis Henrique Gonçalves e Silva e Dr. Mateus Barancelli Schwedersky por toda a orientação e auxílio durante toda minha graduação e pós-graduação. Fico muito contente em poder contar com o auxílio destes durante mais essa etapa da minha formação. Da mesma forma, agradeço ao Prof. Louriel Oliveira Vilarinho pela atenção e tempo cedidos às contribuições do trabalho.

A toda a equipe do LMP, graduandos, mestrandos, doutorandos e funcionários com quem pude trocar conhecimento e experiência durante este período. Em especial ao Msc. Max Baranenko Rodrigues e à graduanda em Engenharia de Materiais Caroline Mano Monteiro de Paço pela participação direta e decisiva nos ensaios e análises do mestrado.

Ao Laboratório de Materiais, representado pelo doutorando Bruno Borges Ramos, pelas incontáveis conversas e discussões sobre questões microestruturais e metalúrgicas.

À Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior – CAPES pelo apoio financeiro durante todo o período do mestrado. Ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica, ao Departamento de Engenharia Mecânica, ao Centro Tecnológico e à Universidade Federal de Santa Catarina por todo o apoio institucional.

À minha esposa, Andjara Consentino, por todo amor, carinho e motivação demonstrados diariamente.

Gostaria de agradecer por último e mais importante, à minha família. Ao meu pai Antônio de Pádua Gomes Silva, à minha mãe Nelma Nunes Campos Gomes Silva e ao meu irmão Guilherme Ricardo Nunes Silva. Sem pensar nas dificuldades, sempre me apoiaram incondicionalmente em todas as minhas decisões, mesmo nas mais incertas. Todas as minhas conquistas são de vocês! Obrigado!

A todos estes, o meu mais sincero agradecimento!

O compartilhamento de conhecimento é a engrenagem do desenvolvimento.

RESUMO

Os processos de soldagem estão inseridos em todos os setores da indústria. Em alguns nichos da indústria de fabricação, como a indústria de óleo e gás, naval e automobilística, a soldagem representa um dos principais processos envolvidos na produção, sendo determinante no tempo de fabricação e, conseqüentemente, no valor final do produto. Em aplicações de soldagem de união de chapas e tubos de grande espessura, a operação prévia de chanframento da junta, somada ao elevado número de passes para preenchimento dessa junta, faz com que o processo de união se torne extremamente lento e oneroso. Nesse cenário, processos de soldagem que possibilitem uma elevada penetração retiram a exigência do chanframento prévio, acelerando por consequência todo o ciclo de produção. O processo de soldagem híbrida Laser-GMAW surge como uma promissora opção para a soldagem de estruturas de elevada espessura, tendo como princípio a atuação do arco elétrico e do feixe Laser na mesma poça de fusão. A hibridização das duas fontes de calor garante elevada penetração e taxa de deposição, auxiliando no aumento da tolerância geométrica e reduzindo a necessidade do chanframento da junta, tornando-se extremamente interessante para aplicação industrial. Entretanto, devido ao elevado número de parâmetros envolvidos e à complexa interação entre o arco elétrico e o feixe Laser, esse processo torna-se relativamente complexo de ser parametrizado quando comparado aos processos individuais. O presente trabalho aborda a complexidade e características do processo de soldagem híbrida Laser-GMAW, desde a necessidade de adequação de um sistema composto pelos equipamentos individuais dos dois processos de soldagem Laser e a arco, até a análise da influência dos principais parâmetros no processo híbrido na penetração máxima, na largura da solda e na presença de discontinuidades, tendo sido analisada a influência de parâmetros como potência do feixe Laser, gás de proteção utilizado, sentido de alimentação de arame, distância relativa entre o feixe Laser e o arco elétrico e distância de desfoque do feixe Laser. Dentre esses parâmetros analisados e discutidos, foi possível alcançar uma penetração máxima de 14,8 mm a partir de uma potência emitida no Laser de 10 kW e uma corrente média de arco de 265 A em cordão de solda realizado no aço ASTM A516 GR70, revelando que o processo HLAW é de fato uma promissora alternativa para aplicações de elevada penetração. Através da comparação metalúrgica das soldas dos processos LBW e HLAW, foi obtida uma relação clara de formação de microestruturas mais duras e mais frágeis no processo LBW, como martensita e bainita superior, enquanto no processo HLAW foram observadas microestruturas como martensita revenida e bainita superior, sustentando que o ciclo térmico do processo HLAW contribui também como um agente retardador de aquecimento e resfriamento da zona fundida. Por fim, o trabalho aborda a metodologia de adequação dos parâmetros para aplicação do processo

HLAW em junta, possibilitando ainda uma comparação temporal entre este e o processo GMAW, onde alcançou-se uma redução comparativa de 40 vezes o tempo necessário para 1 metro de junta, confirmando as suas vantagens e a importância do seu estudo, pesquisa e desenvolvimento para a indústria nacional.

Palavras-chave: Análise Microestrutural; Aumento de Produtividade; Construção Naval; Chapa Espessa; Gas Metal Arc Welding; Influência de Parâmetros; Laser Beam Welding; Laser-MIG.

ABSTRACT

Welding processes are inserted in all sectors of the industry. In some manufacturing industry fields, such as the oil and gas, shipbuilding and automobile industries, welding represents one of the main processes involved in production, being decisive in the time of manufacturing and, consequently, in the final value of the product. In welding applications for joining thick sheets and tubes, the previous operation of chamfering the joint, added to the high number of passes for filling this joint makes the joining process extremely slow and costly. In this scenario, welding processes that enable high penetration remove the requirement for prior chamfering, thereby speeding up the entire production cycle. The hybrid LASER-GMAW welding process appears as a promising option for the welding of structures of high thickness, having as principle the performance of the electric arc and the Laser beam in the same melting pool. The hybridization of the two heat sources ensures high penetration and deposition rate, helping to increase geometric tolerance and reducing the need for joint chamfering, making it extremely interesting for industrial application. However, due to the high number of parameters involved and the complex interaction between the electric arc and the Laser beam, this process becomes relatively complex to be parameterized when compared to individual processes. The present work addresses the complexity and characteristics of the hybrid Laser-GMAW welding process, from the need to adapt a system composed of the individual equipment of the two Laser and arc welding processes, to the analysis of the influence of the main parameters of the hybrid process on maximum penetration, weld width and presence of discontinuities, having analyzed the influence of parameters such as Laser beam power, shielding gas used, wire feed direction, relative distance between the Laser beam and the electric arc and distance defocusing of the Laser beam. Among these parameters analyzed and discussed, it was possible to achieve a maximum penetration of 14.8 mm from a power emitted by the Laser of 10 kW and an average arc current of 265 A in weld bead made in ASTM A516 GR70 steel, revealing that the HLAW process is indeed a promising alternative for high penetration applications. Through the metallurgical comparison of the welds in the LBW and HLAW processes, a clear relationship was obtained for the formation of harder and more fragile microstructures in the LBW process, such as martensite and upper bainite, while in the HLAW process microstructures were observed such as tempered martensite and upper bainite, maintaining that the thermal cycle of the HLAW process also contributes as a heating and cooling retardant in the melted zone. Finally, the work addresses the methodology of adapting the parameters for the application of the HLAW process together, allowing a temporal comparison between this and the GMAW process, where a comparative reduction of 40 times the time required for 1 meter was achieved

board, confirming its advantages and the importance of its study, research and development for the national industry.

Keywords: Gas Metal Arc Welding; Influence of Parameters; Laser Beam Welding; Laser-MIG; Microstructural Analysis; Productivity Increase; Shipbuilding; Thick Plate.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - União de dutos executada de forma manual via processo de soldagem por eletrodo revestido (SMAW). (Fonte: [5]).....	32
Figura 2 - Processo HLAW aplicado na indústria naval. (Fonte:[7]).....	33
Figura 3 - Comparação de características entre a luz Laser (esquerda) e a luz normal (direita). (Fonte: Adaptado de [9])	37
Figura 4 - Estrutura construtiva de uma fibra óptica utilizada para transmissão do feixe Laser, destacando sua visão longitudinal (esquerda) e transversal (direita). (Fonte: Autor)	38
Figura 5 - Curva do coeficiente de absortividade espectral para diferentes metais e comprimentos de onda típicos de fontes Laser para uma incidência de luz perpendicular. (Fonte: Adaptado de [19]).....	41
Figura 6 - Transição do modo de condução (a) e (b) para o modo de penetração <i>keyhole</i> no processo LBW (d). (Fonte: [21])	43
Figura 7 - Relação de profundidade de penetração atingida pela densidade de potência no processo LBW, evidenciando os dois modos de operação, condução e <i>keyhole</i> . (Fonte: Adaptado de [14]).....	44
Figura 8 – Imagem obtida por filmagem em alta velocidade do processo de soldagem LBW, evidenciando a formação de respingos durante o procedimento. (Fonte: [23])	45
Figura 9 - Formato padrão da onda do processo de soldagem GMAW pulsado, sendo t_p o tempo de pulso, t_b o tempo de base, I_p a corrente de pulso, e I_b a corrente da base. (Fonte: Autor) .	46
Figura 10 - Esquemático comparativo entre os processos de soldagem híbrida (HLAW) e o soldagem assistida. (Fonte: Autor)	48
Figura 11 - Formato típico da seção transversal de um cordão de solda gerado pelo processo HLAW. (Fonte: [61]).....	51
Figura 12 - Variação do formato de cordão HLAW típico, devido à utilização de elevada potência do arco com o GMAW de arco enterrado. (Fonte: [61])	52
Figura 13 - Efeito da adição de CO ₂ no gás de proteção na área da zona fundida: (a) 0%, (b) 10%. (Fonte: [30])	53
Figura 14 – Distribuição de microdureza em uma junta solda pelo processo de soldagem HLAW. (Fonte: Adaptado de [64])	54
Figura 15 - Aspecto do arco GTAW com 100 A de corrente quando utilizado de forma (a) individual, e (b) de forma híbrida com o feixe Laser. (Fonte: [69]).....	55
Figura 16 - Comparação do fluxo de metal fundido em aço carbono com diferentes configurações de sentido de alimentação de arame. (Fonte: Adaptado de [82]).....	56

Figura 17 – Alteração na trajetória de destacamento do arame causada pela modificação no sentido de alimentação de arame no processo de soldagem HLAW. (Fonte: Adaptado de [82])	57
Figura 18 – Alteração no sentido de alimentação de arame na soldagem orbital dos processos de soldagem (a) GMAW e (b) HLAW. (Fonte: Autor)	58
Figura 19 - Efeito da potência Laser na profundidade de penetração dos cordões de solda LBW. (Fonte: [93])	59
Figura 20 – Seção transversal de cordão de soldagem HLAW com corrente do arco de (a) 150 A, (b) 180 A e (c) 220 A. (Fonte: [95])	60
Figura 21 - Características geométricas do posicionamento relativa entre o feixe Laser e o arco elétrico no processo de soldagem HLAW. (Fonte: Autor)	61
Figura 22 - Dados experimentais de soldagem GMAW: (a) Superfície da cordão, (b) Macrografia transversal, (c) Imagem de filmagem em alta velocidade, (d) Oscilograma de corrente de tensão. (Fonte: Adaptado de [119])	64
Figura 23 – Comparação de consumo de material de adição e tempo de trabalho entre os processos de soldagem GMAW e HLAW. (Fonte: Autor)	66
Figura 24 – <i>Backings</i> utilizados para soldagem de alta penetração, a) <i>backing</i> de cobre, b) <i>backing</i> de cerâmica, c) <i>backing</i> de fibra de vidro. (Fonte: [142])	69
Figura 25 - (a) Cabeçote de soldagem YW52 fabricado pela empresa Precitec. (b) Fonte Laser de fibra YLS 10000 fabricada pela empresa IPG Photonics®. (Fonte: Arquivo do Laboratório LMP-Laser UFSC)	70
Figura 26 – Janela de sacrifício após contaminação por respingos e fumos de soldagem. (Fonte: Autor)	71
Figura 27 – Fonte de soldagem DIGIPlus A7 multiprocessos e tracionador de arame STA20-2, ambos fabricados pela empresa IMC Soldagem. (Fonte: Autor)	72
Figura 28 – Sistema de Aquisição Portátil (SAP). (Fonte: [143])	72
Figura 29 – Controle de posicionamento de inserção de arame via acionamento do <i>pointer</i> (esquerda) e via imagem fornecida pela câmera de monitoramento do processo (direita). (Fonte: Autor)	73
Figura 30 – Foto (esquerda) e esquemático (direita) da bancada de trabalho utilizada para procedimentos GMAW, LBW e HLAW. (Fonte: Autor)	74
Figura 31 – Fluxograma de ensaios e análises realizadas para o desenvolvimento do trabalho. (Fonte: Autor)	75
Figura 32 – Bancada de trabalho de soldagem HLAW (esquerda) antes e (direita) depois do desenvolvimento do Sistema de Movimentação do Suporte Orientador (SMS) acoplado à tocha	

de soldagem GMAW. a) Cabeçote de soldagem LBW, b) Tocha de Soldagem a Arco, c) Sistema de Movimentação do Suporte Orientador. (Fonte: Autor)	77
Figura 33 – Parâmetros geométricos do cabeçote de soldagem Laser e tocha de soldagem GMAW. (Fonte: Autor).....	82
Figura 34 - Aspectos das superfícies dos cordões de solda obtidos pelos processos de soldagem LBW (a) e HLAW (b), destacando a formação de defeitos na soldagem Laser. (Fonte: Autor)	83
Figura 35 - Macrografias das seções transversais dos cordões de solda obtidos através dos processos de soldagem HLAW (a), e soldagem Laser (b), ambos com 8 kW de potência Laser e 1 m/min de velocidade de soldagem. (Fonte: Autor)	84
Figura 36 - Profundidades de penetração e largura atingidas pelos procedimentos de soldagem a Laser e HLAW com 5, 6, 7, 8, 9 e 10 kW de potência Laser. (Fonte: Autor).....	85
Figura 37 – Macrografia da seção transversal do cordão de solda HLAW com 10 kW de potência Laser e 1 m/min de velocidade de soldagem, alcançando 14,8 mm de profundidade de penetração. (Fonte: Autor).....	86
Figura 38 - Redução da espessura efetiva causada pela pressão do plasma do arco elétrico no processo HLAW. (Fonte: Autor).....	87
Figura 39 - Microestruturas observadas nas diferentes regiões do cordão de solda do processo LBW, a) transição entre zona fundida, zona termicamente afetada e metal de base, b) zona fundida superior, c) zona termicamente afetada superior, d) metal de base, e) zona termicamente afetada inferior, f) zona fundida interior (Fonte: Autor)	88
Figura 40 - Micrografia na zona termicamente afetada da região superior do cordão de solda do processo LBW. (Fonte: Autor).....	88
Figura 41 - Micrografia na zona fundida da região superior do cordão de solda do processo LBW. (Fonte: Autor).....	89
Figura 42 - Micrografia na zona termicamente afetada da região inferior do cordão de solda do processo LBW. (Fonte: Autor).....	89
Figura 43 - Micrografia na zona fundida da região inferior do cordão de solda do processo LBW. (Fonte: Autor).....	90
Figura 44 - - Microestruturas observadas nas diferentes regiões do cordão de solda do processo HLAW, a) transição entre zona fundida, zona termicamente afetada e metal de base, b) zona fundida superior, c) zona termicamente afetada superior próxima à zona fundida, d) zona termicamente afetada superior próxima à zona termicamente afetada, e) metal de base, f) zona termicamente afetada inferior, g) zona fundida interior (Fonte: Autor).....	91

Figura 45 - Zonas termicamente afetadas dos cordões de solda dos processos a) LBW, e b) HLAW. (Fonte: Autor).....	92
Figura 46 - Micrografia na zona termicamente afetada próxima ao substrato da região superior do cordão de solda do processo HLAW. (Fonte: Autor).....	92
Figura 47 - Micrografia na zona termicamente afetada próxima a zona fundida da região superior do cordão de solda do processo HLAW. (Fonte: Autor).....	93
Figura 48 - Micrografia na zona fundida da região superior do cordão de solda do processo HLAW. (Fonte: Autor).....	93
Figura 49 - Micrografia na zona termicamente afetada da região inferior do cordão de solda do processo HLAW. (Fonte: Autor).....	94
Figura 50 - Micrografia na zona fundida da região inferior do cordão de solda do processo HLAW. (Fonte: Autor).....	94
Figura 51 - Esquemático das regiões de medição de microdureza nas seções transversais das amostras soldadas pelos processos de soldagem a) HLAW, e b) LBW. (Fonte: Autor).....	95
Figura 52 - Perfil de microdureza das regiões superior e inferior da amostra soldadas pelo processo LBW, com 10 kW de potência Laser. (Fonte: Autor)	96
Figura 53 - Perfil de microdureza das regiões superior e inferior da amostra soldadas pelo processo HLAW, com 10 kW de potência Laser. (Fonte: Autor)	96
Figura 54 - Macrografia de uma solda feita com a) orientação <i>trailing arc</i> e b) orientação <i>leading arc</i> , ambos com 6 kW de potência Laser. (Fonte: Autor)	98
Figura 55 - Gráfico ilustrando os resultados da a) profundidade de penetração da solda e b) largura de solda para as duas orientações estudadas: <i>leading arc</i> e <i>trailing arc</i> variando de 5 kW até 10 kW a potência do Laser. (Fonte: Autor)	98
Figura 56 - Efeito da orientação de direção de soldagem GMAW na depressão causada na poça de fusão, e conseqüentemente, na penetração atingida. (Fonte: Autor)	99
Figura 57 - Perfil de microdureza das regiões superior (esquerda) e inferior (direita) das soldas HLAW realizadas com orientação <i>leading arc</i> e <i>trailing arc</i> . (Fonte: Autor).....	100
Figura 58 - Oscilograma de corrente de tensão do processo GMAW utilizando Ar e 92% Ar 8% CO ₂ como gás de proteção. (Fonte: Autor).....	101
Figura 59 - Superfície do final dos cordões de solda realizados pelo processo HLAW com gás de proteção (a) Ar, (b) 92% Ar 8% CO ₂ . (Fonte: Autor)	102
Figura 60 - Gráfico ilustrando os resultados da a) profundidade de penetração da solda e b) largura de solda, utilizando Ar e 92% Ar 8% CO ₂ como gás de proteção. (Fonte: Autor)....	102
Figura 61 - Posição do ponto focal do Laser (a) acima, e (b) abaixo da superfície da peça a ser soldada. (Fonte: Autor).....	103

Figura 62 - Valores de penetração de cordão obtidos pelo processo HLAW variando a distância entre o ponto focal do feixe Laser e a superfície da peça a ser soldada de 0 até 20 mm, com utilização dos gases de proteção Ar, e 92% Ar 8% CO ₂ . (Fonte: Autor).....	105
Figura 63 - Disposição geométrica utilizada para os ensaios de soldagem HLAW, evidenciando as diferentes distâncias entre feixe Laser e arco elétrico - DLA. (Fonte: Autor).....	106
Figura 64 - Macrografias das seções transversais realizadas pelo processo HLAW com distância entre feixe Laser e arco elétrico (DLA) de 0; +2 e +4 mm. (Fonte: Autor)	106
Figura 65 - Relação de penetração/largura com a distância entre feixe Laser e arco elétrico (DLA) na soldagem HLAW. (Fonte: Autor).....	107
Figura 66 - Influência do aumento da distância entre feixe Laser e arco elétrico na profundidade e largura da poça de fusão na soldagem HLAW. (Fonte: Autor).....	108
Figura 67 - Método proposto para cálculo de ângulo de bisel correspondente à área resultante do chanfro formado. (Fonte: Autor)	109
Figura 68 – Macrografia de solda realizada pelo processo HLAW aplicado em junta sem utilização de <i>backing</i> . (Fonte: Autor).....	110
Figura 69 - Macrografia de solda realizada pelo processo HLAW aplicado em junta com utilização de <i>backing</i> de fibra de vidro. (Fonte: Autor)	110
Figura 70 - Macrografia de solda realizada pelo processo HLAW aplicado em junta com utilização de <i>backing</i> e potência Laser de 10 kW e 1m/min de velocidade de soldagem. (Fonte: Autor).....	111
Figura 71 - Macrografia de solda realizada pelo processo HLAW aplicado em junta com utilização de <i>backing</i> e potência Laser de 8 kW e gap de 0,6 mm. (Fonte: Autor).....	111
Figura 72 - Macrografia de solda realizada pelo processo HLAW aplicado em junta com utilização de <i>backing</i> e potência Laser de 8 kW, gap de 0,6 mm, e ajuste da corrente do processo GMAW para 170 A e velocidade de arame para 9m/min. (Fonte: Autor).....	112
Figura 73 - Macrografia de solda realizada pelo processo HLAW aplicado em junta com utilização de <i>backing</i> com abertura de junta de a) 0mm e b) 1mm. (Fonte: Autor).....	113
Figura 74 - Macrografia de solda realizada pelo processo HLAW aplicado em junta com utilização de <i>backing</i> com ângulo de bisel de a) 20° e b) 40°. (Fonte: Autor).....	113
Figura 75 - <i>Backing</i> de fibra de vidro utilizado, evidenciando a) a possibilidade de retirada de camadas degradadas para reutilização, e b) a ocorrência de degradação completa sem possibilidade de reutilização durante processo de soldagem HLAW em junta. (Fonte: Autor)	114
Figura 76 - Macrografia de solda realizada pelo processo LBW aplicado em junta com utilização de <i>backing</i> , com potência Laser de 10 kW. (Fonte: Autor).....	115

Figura 77 - Perfis geométricos das juntas utilizadas para aplicação do processo a) HLAW e b) GMAW. (Fonte: Autor).....	115
Figura 78 - Macrografia de solda realizada pelo processo GMAW aplicado em junta com a) cordões filetados e b) cordões com tecimento. (Fonte: Autor)	116
Figura 79 - Comparação de tempo necessário para um metro de solda de união com os processos de soldagem HLAW e GMAW. (Fonte: Autor).....	117
Figura 80 – Perfis de microdureza das regiões superior e inferior das amostras soldadas pelos processos LBW (superior) e HLAW (inferior), ambos com 5 kW de potência Laser. (Fonte: Autor)	134
Figura 81 - Perfis de microdureza das regiões superior e inferior das amostras soldadas pelos processos LBW (superior) e HLAW (inferior), ambos com 6 kW de potência Laser. (Fonte: Autor)	135
Figura 82 - Perfis de microdureza das regiões superior e inferior das amostras soldadas pelos processos LBW (superior) e HLAW (inferior), ambos com 7 kW de potência Laser. (Fonte: Autor)	136
Figura 83 - Perfis de microdureza das regiões superior e inferior das amostras soldadas pelos processos LBW (superior) e HLAW (inferior), ambos com 8 kW de potência Laser. (Fonte: Autor)	137
Figura 84 - Perfis de microdureza das regiões superior e inferior das amostras soldadas pelos processos LBW (superior) e HLAW (inferior), ambos com 9 kW de potência Laser. (Fonte: Autor)	138

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Relação das principais fontes Laser com os respectivos comprimentos de onda. (Fonte: Adaptado de [10])	37
Tabela 2 - Fluxo de calor de diferentes processos de soldagem por fusão. (Fonte: Adaptado de [14])	42
Tabela 3 – Composição química do aço ASTM A516 GR70.	68
Tabela 4 – Composição química do arame AWS ER 70S-6.	68
Tabela 5 - Parâmetros modificados para análise de sua influência durante os ensaios preliminares. (Fonte: Autor).....	78
Tabela 6 – Parâmetros fixos utilizados nos ensaios de comparação ente os processos de soldagem LBW e HLAW. (Fonte: Autor).....	81
Tabela 7 - Profundidades de penetração e largura atingidas pelos procedimentos de soldagem a Laser e HLAW com 5, 6, 7, 8, 9 e 10 kW de potência Laser e 1 m/min de velocidade de soldagem. (Fonte: Autor).....	85
Tabela 8 – Distância entre a superfície da peça e os locais de medição de microdureza nas regiões inferiores dos cordões de soldagem LBW e HLAW. (Fonte: Autor)	95
Tabela 9 - Penetração e largura dos cordões obtidos pelo processo HLAW utilizando 92% Ar 8% CO ₂ , e Ar como gases de proteção. (Fonte: Autor).....	103
Tabela 10 - Valores de penetração e largura do cordão obtidos atingidos pelo processo HLAW variando a distância entre o ponto focal do feixe Laser e a superfície da peça a ser soldada de 0 até 20 mm, com utilização dos gases de proteção Ar, e 92% Ar 8% CO ₂ . (Fonte: Autor)	104
Tabela 11 - Valores de profundidade de penetração e largura obtidos através da variação da distância entre feixe Laser e arco elétrico (DLA). (Fonte: Autor)	107
Tabela 12 – Parâmetros iniciais utilizados para soldagem HLAW em junta. (Fonte: Autor)	109
Tabela 13 - Comparação de tempo necessário e consumo de insumos para um metro de solda de união com os processos de soldagem HLAW e GMAW. (Fonte: Autor)	117

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ALAW – *Assisted Laser-Arc Welding*

ASTM – *American Society for Testing and Materials*

Ceq – Carbono Equivalente

DLA – Distância entre Feixe Laser e Arco Elétrico

EBW – *Electron Beam Welding*

GMAW – *Gas Metal Arc Welding*

GTAW – *Gas Tungsten Arc Welding*

HLAW – *Hybrid Laser-Arc Welding*

LABCONF – Laboratório de Conformação Mecânica (UFSC)

LABMAT – Laboratório de Materiais (UFSC)

LABSOLDA – Instituto de Soldagem e Mecatrônica (UFSC)

LBW – *Laser Beam Welding*

LMP – Laboratório de Mecânica de Precisão (UFSC)

LMP Laser – Laboratório de Mecânica de Precisão, Divisão Laser (UFSC)

LMP USINAGEM – Laboratório de Mecânica de Precisão, Divisão Usinagem (UFSC)

MB – Metal Base

PAW – *Plasma Arc Welding*

SAW – *Submerged Arc Welding*

SMAW – *Shielded Metal Arc Welding*

ZF – Zona Fundida

ZTA – Zona Termicamente Afetada

LISTA DE SÍMBOLOS

α – Inclinação da Tocha de Soldagem GMAW em Relação à Superfície da Chapa

F_y – Distância entre o Feixe Laser e a Superfície da Chapa

h – Distância entre a Superfície da Amostra e a Linha Inferior de Medição de Microdureza

I_b – Corrente de Base

I_p – Corrente de Pulso

t_b – Tempo de Base

t_p – Tempo de Pulso

λ – Comprimento de Onda

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	31
1.1	OBJETIVOS.....	34
1.1.1	Objetivo Geral	34
1.1.2	Objetivos Específicos.....	34
2	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	36
2.1	LASER	36
2.1.1	Laser de Fibra.....	38
2.1.2	Interação da Energia Óptica com a Matéria	39
2.2	PROCESSO DE SOLDAGEM LASER - LBW	41
2.2.1	VANTAGENS E LIMITAÇÕES DO PROCESSO LBW	44
2.3	PROCESSO DE SOLDAGEM A ARCO – GMAW	45
2.3.1	Vantagens e Limitações do Processo de Soldagem GMAW	47
2.4	PROCESSO DE SOLDAGEM HÍBRIDA LASER-GMAW	47
2.4.1	Breve Histórico do Processo HLAW	49
2.4.2	Características das Juntas Soldadas pelo Processo HLAW	51
2.4.3	Interação entre o Feixe Laser e o Arco Elétrico	54
2.4.4	Influência do Sentido de Alimentação de Arame no Processo HLAW	55
2.4.5	Principais Parâmetros do Processo HLAW	58
2.4.6	Aplicações Industriais do Processo HLAW	65
3	MATERIAIS E MÉTODOS.....	67
3.1	MATERIAIS E INSUMOS DE SOLDAGEM	67
3.2	PREPARAÇÃO DAS CHAPAS E JUNTAS PARA ENSAIOS DE SOLDAGEM .	70
3.3	Equipamentos e Infraestrutura.....	70
3.4	METODOLOGIA DE ENSAIOS E ANÁLISES	74
3.4.1	Preparação da Bancada de Trabalho	76
3.4.2	Ensaio Preliminares	78
3.4.3	Ensaio de Análise Aplicada	79

3.4.4	Análises Experimentais	79
4	RESULTADOS E DISCUSSÕES	81
4.1	Comparação Geométrica e Metalúrgica dos Processos LBW e HLAW	81
4.2	Influência dos Parâmetros na Soldagem HLAW	97
4.2.1	Posição da Tocha de Soldagem GMAW	97
4.2.2	Gás de Proteção	100
4.2.3	Distância entre o ponto focal do feixe Laser e a superfície da chapa	103
4.2.4	Distância entre o Feixe Laser e o Arco Elétrico	105
4.3	Soldagem HLAW em Junta.....	108
5	CONCLUSÕES	118
5.1	SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS	121
	APÊNDICE A – PERFIS DE MICRODUREZA – SOLDAS LBW E HLAW	134

1 INTRODUÇÃO

A soldagem está presente em todos os setores da indústria. Em atividades de construção, montagem, reparo e manutenção de estruturas de grande espessura, a soldagem é o principal processo de fabricação utilizado, com o objetivo de conceder integridade estrutural das juntas. Ademais, processos de soldagem mais produtivos influenciam diretamente nos custos, cronogramas, análise de riscos e viabilização de projetos.

Em aplicações de união de chapas e tubos de grande espessura, comumente empregam-se processos convencionais de soldagem a arco, como os processos GTAW (*Gas Tungsten Arc Welding*), GMAW (*Gas Metal Arc Welding*), SMAW (*Shielded Metal Arc Welding*) e SAW (*Submerged Arc Welding*), caracterizados por sua robustez operacional e limitada penetração alcançável. Dependendo da espessura da junta a ser soldada, é necessário realizar o seu chanframento anterior à soldagem, seguido de diversos passes de preenchimento, garantindo assim a união metalúrgica em toda sua espessura. A operação de usinagem do chanfro, somada ao maior número necessário de cordões de solda necessários para o preenchimento total da junta, implicam diretamente num maior tempo de fabricação, assim como maior consumo de energia e insumos de soldagem.

Na execução de operações mais complexas, existe carência de profissionais qualificados, como por exemplo em decorrência das dificuldades encontradas na execução da atividade de soldagem em tubos, na qual a execução do passe de raiz é de extrema importância para a qualidade final de toda operação, e depende muito da habilidade e intervenção do operador. Tipicamente, a soldagem de tubos é realizada com um passe de raiz com processo GTAW e preenchimento com soldagem por SMAW, ambos manuais (Figura 1) [1]. Já em alguns casos, dependendo da disponibilidade e a qualificação dos soldadores, a raiz também é executada com eletrodos revestidos, normalmente celulósicos. Entretanto, a tendência mundial no setor dutoviário é a utilização do processo de soldagem GMAW, o qual é principalmente aplicado com sistemas mecanizados [2-4]. Este cenário revela uma importante oportunidade científica e tecnológica, com o estudo mais aprofundado de processos de soldagem de alta penetração.



Figura 1 - União de dutos executada de forma manual via processo de soldagem por eletrodo revestido (SMAW). (Fonte: [5])

Quando se busca uma elevada profundidade de penetração, uma opção para a soldagem de dutos e tubos é o processo de soldagem LBW (*Laser Beam Welding*), que possibilita a soldagem de grandes espessuras em um único passe e com elevadas velocidades de soldagem, quando comparado aos processos tradicionais de soldagem a arco.

Quando realizado de forma autógena, ou seja, sem emprego de material de adição, o processo LBW exige uma mínima tolerância geométrica da junta, tanto em sua abertura (*gap*), quanto em desalinhamento (*high-low*), caracterizando assim uma baixa robustez do processo, já que tanto a etapa de usinagem das partes quanto o posterior posicionamento relativo entre elas necessitam ser realizados com grau muito maior de qualidade e exatidão. Essa elevada exigência de preparação da junta é dificilmente alcançada em chapas e tubos de grande espessura, onde a ovalização está frequentemente presente, assim como pode ser afetado por distorções em sua geometria pelo aquecimento do material. Essa dependência da qualidade de preparação das juntas é que se reflete como menor robustez do processo LBW.

Tendo em vista as vantagens e limitações dos processos de soldagem GMAW e LBW, surgem os processos de soldagem HLAW (*Hybrid Laser Arc Welding*), onde a ação das duas fontes de calor na mesma poça de fusão, o que caracteriza o processo como sendo híbrido, permite alcançar as elevadas velocidades de soldagem e penetração características do processo LBW com possibilidade de processar juntas com maior tolerância geométrica devido à presença do processo GMAW, tornando este um processo altamente produtivo e robusto. O processo

HLAW já se faz presente em diversos setores da indústria, como o setor automotivo, ferroviário, aeroespacial, naval (Figura 2), extração de óleo e gás, entre outros [6].



Figura 2 - Processo HLAW aplicado na indústria naval. (Fonte:[7])

Apesar das potenciais vantagens do processo, a interação entre o feixe Laser e o arco elétrico representa uma elevada complexidade à sua aplicação, somado ao grande número de parâmetros envolvidos nos processos individuais. Tendo em vista que essa interação entre as duas fontes de calor é altamente dependente de características do feixe Laser e características de arco elétrico, uma investigação completa da influência dos principais parâmetros no processo HLAW se faz necessária para a consolidação da aplicação no cenário industrial nacional.

Desse modo, pretende-se neste trabalho promover a análise da influência dos principais parâmetros do processo HLAW, além de uma apreciação comparativa entre os processos GMAW, LBW e HLAW em procedimentos realizados sobre chapa plana e em junta. Os ensaios permitirão uma análise mecânica, metalúrgica de produtividade sobre processo de soldagem híbrida, além de permitir gerar um conhecimento teórico e prático sobre o processo.

1.1 OBJETIVOS

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

1.1.1 Objetivo Geral

O objetivo geral deste trabalho consiste na investigação da influência dos parâmetros de entrada do processo de soldagem híbrida Laser-GMAW, além da parametrização e avaliação da janela de operação do processo para aplicação em junta, possibilitando ainda uma comparação de produtividade com o processo GMAW. Esses resultados visam gerar subsídios para avanço das pesquisas concernentes a este processo no LMP Laser e demais laboratórios e institutos de pesquisa.

1.1.2 Objetivos Específicos

São objetivos específicos:

- Identificar a relação dos parâmetros de entrada do processo de soldagem HLAW com os resultados geométricos e metalúrgicos das soldas realizadas, através de análise visual, macrográfica, micrográfica e de microdureza;
 - a. Potência do feixe Laser;
 - b. Distância entre o ponto focal do feixe Laser e a superfície da chapa (Fy);
 - c. Distância relativa entre o feixe Laser e o arco (D_{LA});
 - d. Tipo de gás de proteção;
 - e. Orientação da tocha de soldagem GMAW;
- Otimizar os parâmetros de entrada identificados para realização da soldagem HLAW em junta;

- Avaliar a utilização do *backing* de fibra de vidro na aplicação da soldagem HLAW em junta;
- Avaliar a janela de operação do processo HLAW, com base na abertura de GAP e ângulo de bisel passíveis de serem utilizados;
- Avaliar através de comparação de produtividade os processos de soldagem HLAW e GMAW em junta.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Neste capítulo, é apresentada uma revisão da literatura acerca dos principais tópicos envolvidos no desenvolvimento deste trabalho, além de um levantamento do estado da arte da aplicação da tecnologia de soldagem LBW e híbrida Laser-GMAW.

2.1 LASER

Um Laser é um oscilador óptico no qual a radiação oscilante é amplificada por um processo de emissão estimulada; o que gerou o acrônimo Laser - *Light Amplification by the Stimulated Emission of Radiation*. O processo de estimulação, que é a essência da ação do Laser, foi previsto por Einstein (1916) e comprovado por Maiman (1960)[8]. É um processo natural, onde um átomo que está em um estado excitado, isto é, em um estado de vibração ou órbita eletrônica mais alta, expulsará essa energia de forma coerente e na mesma direção, se for atingido por um quantum da mesma energia. O enclausuramento quase total desta energia dentro do oscilador pode ser comparado a uma forma de ressonância, que multiplica a liberação da energia dos átomos excitados, desde que a agitação seja feita precisamente na fase e frequência correta. Baseado neste princípio, se dois refletores paralelos formam uma cavidade ótica, qualquer radiação dentro da cavidade que seja transmitida ao longo do eixo óptico irá oscilar aprisionada para frente e para trás, a menos que seja perdida por absorção ou difração para fora da cavidade. A radiação inicial advém das espécies excitadas dentro da cavidade decaindo espontaneamente, sendo amplificada pelo processo de emissão estimulada ao longo do eixo óptico da cavidade à velocidade da luz.

A radiação de oscilação se acumula rapidamente e, se um dos refletores for parcialmente transparente, um feixe de Laser surgirá. O feixe será paralelo, devido à natureza do processo de emissão estimulado, podendo haver também uma variação reduzida de Doppler em torno da frequência principal, devido à variação de velocidade dos átomos excitados. A radiação a Laser é uma das mais puras formas de radiação disponível.

O feixe de Laser é altamente direcional, ou seja, por possuir uma pequena divergência, pode ser focado em um pequeno ponto, possui uma característica monocromática e diferentemente do feixe de luz comum, as ondas são alinhadas e estão em fase. Essas

características podem ser resumidas como “coerência”- mesmo comprimento de onda, mesma direção e mesma fase. As principais diferenças entre um feixe Laser e a luz normal podem ser observadas na Figura 3.

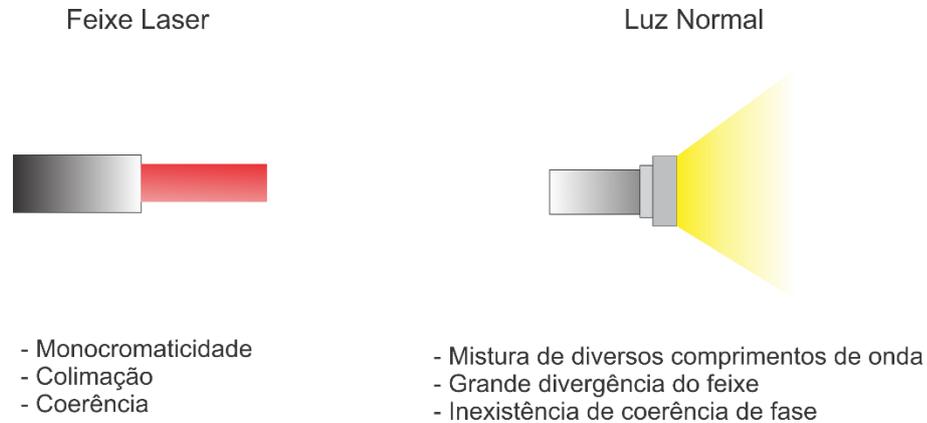


Figura 3 - Comparação de características entre a luz Laser (esquerda) e a luz normal (direita).

(Fonte: Adaptado de [9])

O comprimento de onda (λ) de um Laser é uma característica fundamental na diferenciação dos tipos de Laser, e sua escolha possui uma forte relação com o material a ser processado. Na Tabela 1 são indicadas as fontes típicas Laser com os respectivos comprimentos de onda.

Tabela 1 - Relação das principais fontes Laser com os respectivos comprimentos de onda.

(Fonte: Adaptado de [10])

Tipo de Laser	Comprimento de Onda - λ (nm)
Rubi	694,3
CO ₂	10600
Diodo	620 a 1500
Diodo AsGa	558
Nd:YAG	1060
Er:YAG	2940
Ho:YAG	2100
Corante Cumarina	450
Corante Rodamina	580
Fibra	100 a 1100

A tecnologia Laser possui uma elevada gama de aplicações e tem sido modelada e desenvolvida para utilização nas mais diversas áreas das ciências: médicas, biológicas, geológicas, de engenharia, entre outras. Ion J. [8] destaca que materiais processados a Laser estão presentes nos mais diversos ambientes: domésticos, industriais, manufatura, medicina e até mesmo no campo das artes.

Dentro da temática mais coerente ao presente trabalho, pode-se ainda citar diversas aplicações industriais de processamento de materiais amplamente estudadas nas últimas décadas, como processos de ablação, usinagem, brasagem, corte, marcação, manufatura aditiva, revestimento e soldagem [11-13].

2.1.1 Laser de Fibra

Um Laser de fibra é um Laser cuja característica construtiva do ressonador é baseada em uma fibra óptica dopada no núcleo e recoberta por um revestimento com elevado índice de reflexibilidade dificultando perda de energia, conforme pode-se observar na Figura 4.

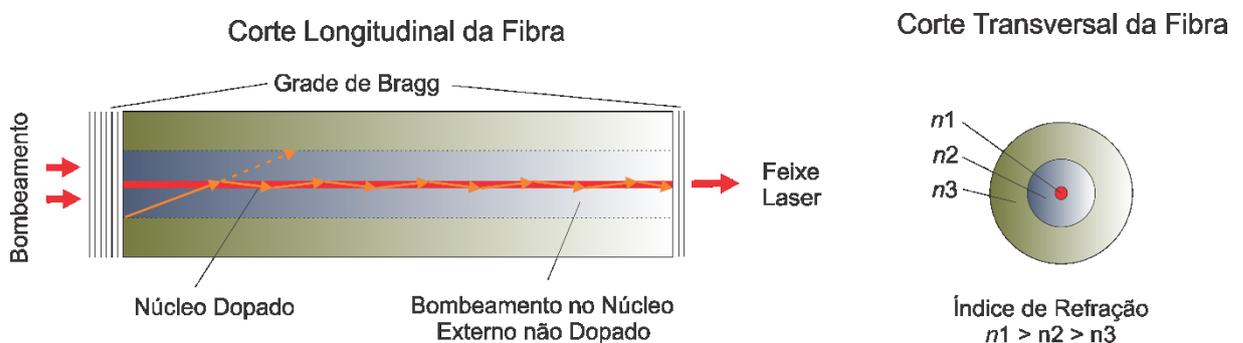


Figura 4 - Estrutura construtiva de uma fibra óptica utilizada para transmissão do feixe Laser, destacando sua visão longitudinal (esquerda) e transversal (direita). (Fonte: Autor)

Através do revestimento é bombeada a energia luminosa para o núcleo, e assim, na fibra dopada com o meio ativo, se estabelece a ressonância dos fótons no comprimento de onda específico. Os espelhos nas extremidades da fibra dopada do núcleo são substituídos por uma grade de Bragg em cada extremidade, sendo totalmente refletiva em uma extremidade, e parcialmente transmissiva na outra extremidade da fibra. Em decorrência do grande comprimento e do pequeno diâmetro da fibra, a dissipação da energia não transformada em luz

Laser é realizada pela superfície da fibra. O Laser de fibra emite um feixe de baixa divergência e com comprimento de onda na ordem de 1060 – 1085 nm [14, 15]. O núcleo interno contém o dopante, geralmente, que é estimulado a emitir radiação a partir da energia que recebe do bombeamento [14].

A crescente utilização da tecnologia Laser de fibra na indústria da manufatura permite progressos em diversas áreas de processamento de materiais. Devido à qualidade de feixe, à transmissão por fibra, à alta potência atingida, à maior eficiência energética da fonte, quando comparada a fontes antigas de Laser CO₂ e Nd:YAG, a tecnologia se torna mais vantajosa em muitos processos de fabricação. Boa parte desta crescente utilização, principalmente a partir de 2002, deve-se ao fato dos avanços tecnológicos obtidos na fabricação da fonte Laser de fibra e no domínio desta tecnologia [16].

O desenvolvimento da tecnologia de geração de Laser de fibra em múltiplos módulos, uma abordagem dominada pela empresa IPG Photonics®, constitui um exemplo claro desse avanço tecnológico. Cada módulo individual de um Laser de fibra tem até 600 a 900 W. A radiação proveniente destes módulos é acoplada em junções especiais, permitindo a união da energia proveniente de 7 fibras, 19 fibras, ou mais.

2.1.2 Interação da Energia Óptica com a Matéria

O resultado da interação do Laser com a matéria é determinado pela quantidade de potência absorvida pela peça, geralmente convertida em calor. Nem toda potência emitida sobre um material é absorvida. Nos metais, por exemplo, o que não é absorvido é refletido. Em materiais com algum grau de transparência, como em polímeros, parte da energia pode ser transmitida. A absorvidade pode ser determinada de acordo com a Equação 1, que apresenta a relação de absorvidade do feixe Laser em um material.

$$A = \frac{P_{abs}}{P_{tot}} \quad (1)$$

A absorvidade pode admitir valores entre 0 e 1, e é influenciada por diversas propriedades do material e do próprio feixe Laser gerado:

- Propriedades do Laser: comprimento de onda, polarização;
- Condições ambientais: gás de processo e temperatura inicial da peça;
- Propriedades de superfície: rugosidade, morfologia;
- Geometria da peça: espessura, contornos;
- Propriedades do material: índice de reflexibilidade, mudanças de fase, constantes ópticas, composição química da superfície.

Valores precisos de absorvidade podem ser determinados apenas experimentalmente. Entretanto, existem alguns modelos computacionais que atendem razoavelmente sob condições ideais.

A dificuldade em encontrar valores teóricos mais próximos aos reais se deve ao fato que as próprias propriedades físicas e químicas da superfície dos materiais se alteram de forma complexa com o aumento da temperatura [17].

A refletividade dos metais para a luz infravermelha encontra-se tipicamente em valores entre 0,90 e 0,99 e entre 0,45 e 0,95 para, respectivamente, a luz visível e próximo à luz ultravioleta [18]. Portanto, os Lasers de estados sólido, caracterizados por um menor comprimento de onda, tendem a um comportamento mais vantajoso de absorvidade em aplicações em metais quando comparados com o maior comprimento de onda gerado, por exemplo pelo Laser de CO₂. A Figura 5 ilustra a curva do coeficiente de absorvidade espectral para diferentes metais e comprimento de onda típicos de fontes Laser para uma incidência de luz perpendicular.

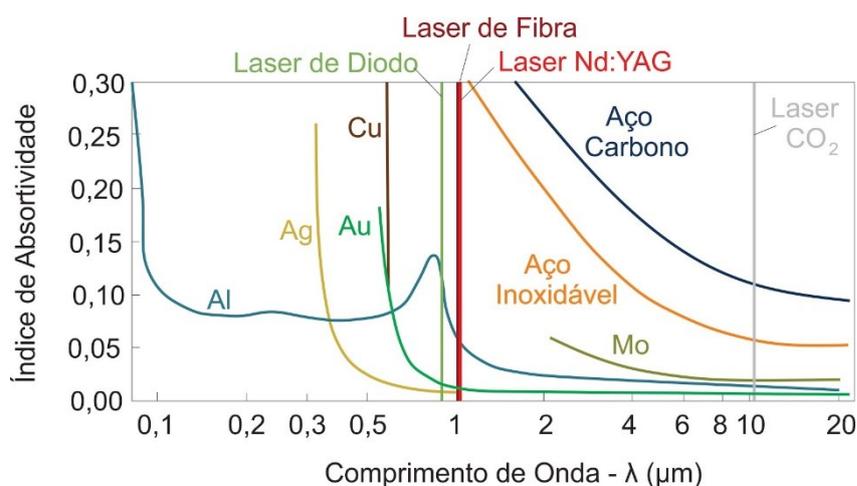


Figura 5 - Curva do coeficiente de absorvidade espectral para diferentes metais e comprimentos de onda típicos de fontes Laser para uma incidência de luz perpendicular.

(Fonte: Adaptado de [19])

Devido principalmente ao aumento da interação elétron-fônon por causa da frequência de colisão, a refletividade dos metais tende a diminuir à medida que a temperatura aumenta. Em altas temperaturas, a contaminação da superfície como oxidação e nitretação, e a deformação superficial também aumentam a absorção da superfície e podem ter uma influência ainda maior do que a inerente diminuição da refletividade causada pelo aumento da interação elétron-fônon [18].

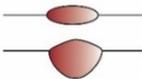
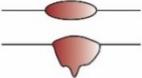
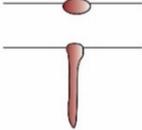
2.2 PROCESSO DE SOLDAGEM LASER - LBW

Devido às características de coerência e monocromaticidade, o feixe Laser tornou-se uma promissora fonte de calor para aplicações de soldagem, sendo este processo denominado como processo de soldagem por feixe Laser (*Laser Beam Welding* – LBW). Sua principal propriedade atrativa, a qual gera diversas vantagens deste processo, é a possibilidade de gerar elevadas densidades de potência, comparáveis ao processo de soldagem por feixe de elétrons (*Electron Beam Welding* – EBW) e muito superiores aos processos de soldagem a arco, além de ser uma fonte de calor muito estável e controlável [20].

Como uma das principais vantagens alcançadas pela densidade de potência do processo LBW, a elevada relação entre penetração e largura alcançável o torna extremamente

versátil para diversas aplicações de união de chapas e tubos de grande espessura. Essa relação entre densidade de potência e formato de zona fundida pode ser observada na Tabela 2 [14]. Cabe ressaltar que esta tabela apresenta valores e perfis genéricos para os processos analisados, e que resultados diversos podem ser encontrados através do uso de vertentes avançadas e adaptações de parâmetros.

Tabela 2 - Fluxo de calor de diferentes processos de soldagem por fusão. (Fonte: Adaptado de [14])

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)	$1 \times 10^{10} - 10^{12}$	

O processo LBW pode, em linhas gerais, ocorrer de duas formas, dependendo da densidade de potência empregada. Ao utilizar menores densidades de potência, seja devido ao valor da potência parametrizada, pelo ajuste da velocidade de soldagem ou pelo diâmetro focal do feixe, a energia gerada é absorvida pelo material e transmitida majoritariamente por meios de condução e convecção térmicas, resultando em uma solda com baixa profundidade de penetração. Esse modo de soldagem LBW, comumente tratado na literatura como soldagem Laser por condução (*melt-in*), apresenta baixo índice de formação de porosidade e respingos [14, 17]. A utilização desse modo de soldagem é realizada geralmente em aplicações de microssoldagem de componentes da indústria eletrônica, médica, automotiva, entre outras [14, 17].

Aumentando a densidade de potência utilizada, torna-se presente a ebulição metálica na poça de fusão e o aumento da pressão sobre a mesma, devido à expansão causada pelas mudanças de fase de sólido para líquido e de líquido para o estado gasoso. Conforme a depressão causada na superfície da poça de fusão aumenta devido ao aumento da pressão, é formado um orifício por onde o vapor metálico sai da poça de fusão, fazendo com que a reflexão do feixe Laser comece a ser direcionada em direção ao interior da poça de fusão, gerando um confinamento do feixe e o consequente aumento significativo de calor absorvido pelo material (Figura 6). Dentro dessa cavidade, por causa desse confinamento, a absorção do Laser é maior, aumentando a geração de vapor e resultando no crescimento e estabilização da depressão, que passa a ser chamada de capilar de vapor [21]. Neste cenário, conhecido na literatura como soldagem Laser por *keyhole* [17], a solda resultante apresentará maior profundidade de penetração, com estreitas faixas de zonas termicamente afetadas (ZTA) e baixas distorções térmicas.

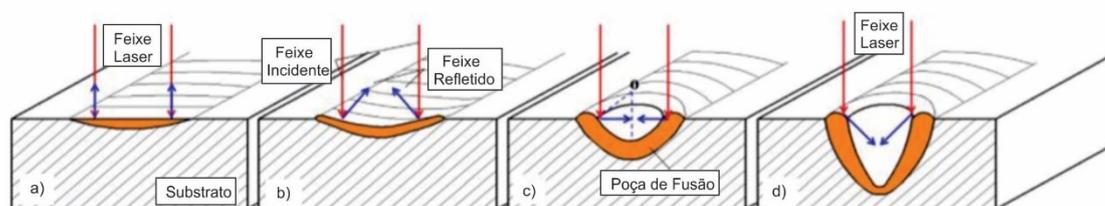


Figura 6 - Transição do modo de condução (a) e (b) para o modo de penetração *keyhole* no processo LBW (d). (Fonte: [21])

A soldagem LBW no modo *keyhole* possibilita alcançar elevadas velocidades de soldagem e profundidades de penetração, esta última sendo diretamente proporcional à potência Laser utilizada.

O patamar limiar de densidade de potência entre os modos de soldagem por condução e *keyhole* não é de concordância unânime entre os autores, mas é comum considerar que este é relacionado com a temperatura de evaporação do substrato. Poprawe [14] sugere que o modo de soldagem *keyhole*, quando aplicado em aço carbono, inicia com valores de densidade de potência na faixa de 10^6 W/cm² (Figura 7).

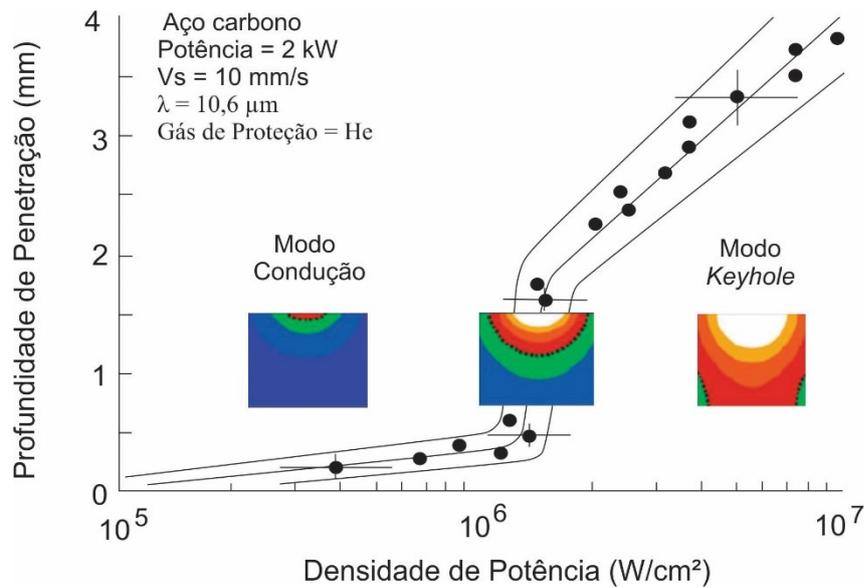


Figura 7 - Relação de profundidade de penetração atingida pela densidade de potência no processo LBW, evidenciando os dois modos de operação, condução e *keyhole*. (Fonte: Adaptado de [14])

Cabe ressaltar que a nomenclatura *keyhole* é também utilizada em processos de soldagem a arco, porém com outro significado. Enquanto na soldagem a Laser, o modo *keyhole* indica a formação de um capilar de vapor causando o aumento drástico de penetração, esse termo é utilizado somente quando se atinge um processo com penetração total na soldagem a arco.

2.2.1 VANTAGENS E LIMITAÇÕES DO PROCESSO LBW

O processo de soldagem LBW oferece inúmeras vantagens, atraindo a atenção de diversos setores da indústria, dentre os quais destacam-se: [9, 14, 17, 18, 22]

- Elevada profundidade de penetração atingível;
- Estreitas faixas de zona termicamente afetada (ZTA);
- Baixos valores de calor aportado, resultando em níveis reduzidos e previsíveis de distorção;
- Redução de necessidade de retrabalho das soldas;
- Não é necessário contato mecânico entre a peça e o feixe Laser;

- Possibilidade de soldar materiais dissimilares, e não condutores;
- Capacidade de unir chapa e tubos espessos em um único passe, sem a necessidade de chanfro;
- Quantidade reduzida de material de adição em vista à redução do chanfro gerado.

Em contrapartida, o processo LBW apresenta limitações que dificultam seu uso e sua consolidação no meio industrial, como: [9, 14, 17, 18, 22]:

- Elevado custo inicial do equipamento;
- Dificuldade de preenchimento de junta com grande abertura ou com variação dimensional no decorrer da junta, gerando requisitos críticos na preparação da junta;
- Posições de soldagem limitadas;
- Dificuldade de uso em ambientes externos;
- Possibilidade de surgimento de defeitos metalúrgicos devido às elevadas taxas de resfriamento;
- Complexa parametrização do processo, afim de gerar processos com elevada estabilidade e isenção de descontinuidades como porosidade e respingos.



Figura 8 – Imagem obtida por filmagem em alta velocidade do processo de soldagem LBW, evidenciando a formação de respingos durante o procedimento. (Fonte: [23])

2.3 PROCESSO DE SOLDAGEM A ARCO – GMAW

O processo de soldagem GMAW (*Gas Metal Arc Welding*), também conhecido como MIG/MAG (*Metal Inert Gas/Metal Active Gas*), é altamente difundido no meio acadêmico e

industrial, sendo talvez o mais representativo dentre os processos de soldagem a arco, gerando a união por meio de um arco que aquece os metais até seu ponto de fusão [22]. A partir da formação do arco, o gás de proteção utilizado e alimentado pela tocha é aquecido e ionizado, e assim formando o plasma.

O processo de soldagem GMAW oferece diversas vantagens em relação aos demais processos de soldagem. Entre estas, além da grande estabilidade e robustez, pode-se citar o baixo custo relativo do equipamento de soldagem, principalmente quando comparado ao sistema de soldagem a Laser. A partir do uso de modalidades avançadas do processo GMAW, é possível atingir resultados metalúrgicos e mecânicos aplicáveis desde procedimentos para união, revestimento, até aplicações em manufatura aditiva [22, 24, 25]. Devido ao comportamento dinâmico do arco, a corrente e a tensão podem ser modificadas e ajustadas continuamente durante a soldagem a arco. Dentre as vertentes do processo GMAW, destaca-se a modulação pulsada da corrente (Figura 9), possibilitando o controle e estabilidade do arco e da poça de fusão, alcançando assim processos isentos de respingos, com relativa elevada profundidade de penetração, e uma menor zona termicamente afetada gerada [26].

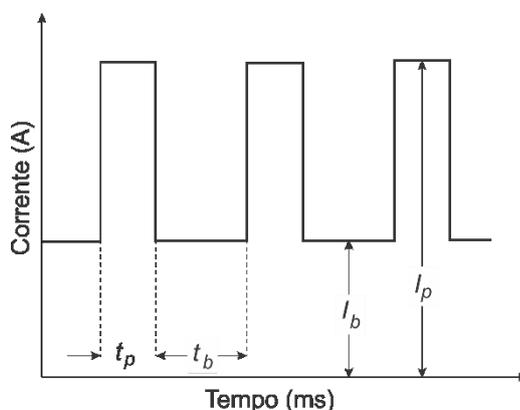


Figura 9 - Formato padrão da onda do processo de soldagem GMAW pulsado, sendo t_p o tempo de pulso, t_b o tempo de base, I_p a corrente de pulso, e I_b a corrente da base. (Fonte: Autor)

A largura e frequência do pulso e da base são parâmetros adicionais a serem controlados durante a pulsação da corrente do processo GMAW [26]. A largura do pulso determina a duração em que a corrente está no valor mais elevado, afetando o volume da gota de metal destacada e a largura do arco elétrico [27].

Ainda, a pulsação do arco pode ser utilizada juntamente com a pulsação da potência Laser na soldagem HLAW [28].

2.3.1 Vantagens e Limitações do Processo de Soldagem GMAW

Principalmente quando comparado ao processo de soldagem LBW, a soldagem GMAW apresenta as seguintes vantagens: [24]

- Elevada tolerância geométrica de abertura de junta;
- Baixo custo do equipamento;
- Fácil operação e automação do processo;
- Elevada eficiência elétrica (60 - 80 %);
- Elevada taxa de deposição de material;
- Elevada soldabilidade de materiais com alto índice de reflexibilidade.

Entretanto, apresenta as seguintes limitações: [24]

- Baixa densidade de energia;
- Baixas velocidades de soldagem;
- Baixas profundidades de penetração alcançáveis;
- Suscetibilidade de distorção e empenamento.

2.4 PROCESSO DE SOLDAGEM HÍBRIDA LASER-GMAW

Com o surgimento dos processos de soldagem denominados como processos híbridos, a sua própria definição gera algumas dúvidas sobre sua classificação, que devem ser esclarecidos para melhor compreensão dos processos e suas influências.

Ainda de forma pouco abordada na literatura, não existe uma definição oficial a qual diferencia processos híbridos (HLAW – *Hybrid Laser-Arc Welding*) e processos assistidos (ALAW – *Assisted Laser-Arc Welding*). Para facilitar o entendimento das condições de

contorno do processo abordado e conseqüentemente suas características físicas da sinergia entre os processos individuais, o autor do presente trabalho propõe e defende a seguinte definição, ilustrada na Figura 10:

Processos de soldagem híbridos Laser-arco (HLAW) são processos que utilizam duas ou mais fontes de calor (Laser e arco) na mesma poça de fusão, enquanto processos de soldagem assistidos Laser-arco (ALAW) são processos que utilizam duas ou mais fontes de calor (Laser e arco) com uma distância entre elas necessária para a formação de duas poças de fusão distintas.

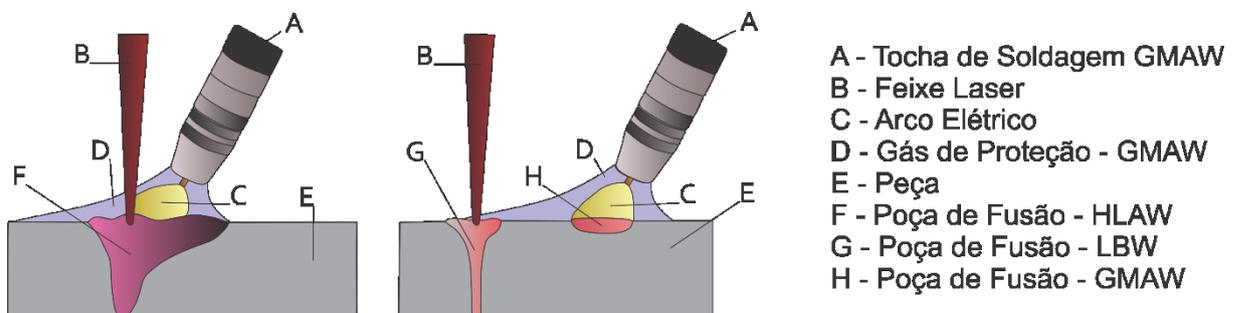


Figura 10 - Esquemático comparativo entre os processos de soldagem híbrida (HLAW) e o soldagem assistida. (Fonte: Autor)

Diversos autores, utilizando distâncias entre o feixe Laser e arco elétrico na ordem de 5 mm, observaram ainda o comportamento híbrido do processo de interação entre as duas fontes de calor na mesma poça de fusão. Indica-se, então, que a distância necessária para formação de um processo de soldagem assistida seja maior do que as avaliadas pelos autores [29-33].

A soldagem híbrida Laser-arco é notada como um promissor processo de união, uma vez que compensa as desvantagens ou limitações dos processos individuais envolvidos: o processo de soldagem Laser e o processo de soldagem a arco.

De acordo com Acherjee [34], Kah [35], Nielsen [36] e Katayma [37] as principais vantagens do processo híbrido (em relação aos processos a Laser e a arco isoladamente) são:

- 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.

A hibridização do processo de soldagem requer a adaptação dos parâmetros envolvidos nos processos individuais, e suas potenciais vantagens podem ser apenas alcançadas quando a soldagem Laser e a soldagem a arco são combinadas adequadamente e seus parâmetros são otimizados.

Tradicionalmente, a energia proveniente do feixe Laser é a principal fonte de calor durante o processo HLAW, a qual produz o *keyhole* e assegura a profundidade de penetração.

Neste capítulo, para melhor compreender os fundamentos do processo HLAW, será abordado um breve histórico do processo e serão discutidos em detalhes os principais parâmetros do processo HLAW, aspectos da interação entre o feixe Laser e o arco elétrico, características das juntas soldadas, influência do sentido de alimentação de arame no processo HLAW, e por fim, suas principais aplicações industriais.

2.4.1 Breve Histórico do Processo HLAW

No final da década de 1970, Steen W. *et al.* [38] introduziram pela primeira vez os processos de soldagem híbrida Laser-arco (HLAW). Seus estudos, realizados no *Imperial College of London*, mostraram claramente as vantagens da combinação de um feixe Laser com um arco elétrico para a soldagem. Utilizando um cabeçote de soldagem GTAW e uma fonte Laser de CO₂, demonstraram um aumento significativo de velocidade de soldagem (acima de 100% de aumento), de profundidade de penetração e estabilidade do processo [39]. Após demonstrar o sucesso da aplicação de sua técnica, a pesquisa e desenvolvimento dos processos HLAW sofreram um crescimento lento, devido principalmente à falta de disponibilidade de fontes Laser de alta potência.

Até então, a falta de conhecimento profundo sobre o funcionamento de uma fonte Laser impediu o avanço da pesquisa e desenvolvimento de processos HLAW [40]. No final da década de 1980, o desenvolvimento de Lasers industriais de alta potência atraiu a atenção de

pesquisadores do setor industrial e acadêmico, que orientaram seus estudos para o uso industrial [41].

Por meio da hibridização, várias desvantagens dos processos de soldagem empregados individualmente são minimizadas, incluindo os desafios de preenchimento de junta e a refletividade de algumas ligas como o alumínio. Já na década de 1990, a pesquisa e desenvolvimento dos processos HLAW apresentaram um maior desenvolvimento, devido à disponibilidade de fontes Lasers de CO₂ que poderiam concentrar densidade de potências maiores, até 10⁶ W/cm². Desde então, vários estudos têm sido focados no desenvolvimento da tecnologia HLAW para aplicações em aços [39, 42], ligas de titânio [38, 43], ligas de alumínio [44, 45], ou ainda em soldagem de materiais dissimilares [46, 47].

Diversos trabalhos têm sido realizados para investigar diferentes aspectos do processo, como a viabilidade econômica, a influência da posição relativa do feixe Laser e a da tocha, efeitos da qualidade da preparação das juntas, minimização de defeitos metalúrgicos, otimização dos parâmetros do processo, entre outros [48-52]. No entanto, apesar de múltiplas vantagens do HLAW, sua aplicação industrial ainda é limitada devido ao alto custo do equipamento e à complexidade do processo, devido ao elevado número de parâmetros presentes e à interação entre o feixe Laser e o arco elétrico.

Outro fator influente na estagnação da tecnologia HLAW deveu-se à falta de disponibilidade de um sistema híbrido integrado. O primeiro sistema industrial de soldagem HLAW foi introduzido em 2000 pelo Instituto Fraunhofer (ILT) na Alemanha, aplicados na fabricação de cisternas industriais [52]. Este sistema foi instalado para pesquisas em diversos setores, incluindo indústria automotiva, construção naval, fabricação de tubos e estrutura offshore. Atualmente existem diversos sistemas HLAW disponíveis comercialmente, os quais foram desenvolvidos em parcerias de institutos de pesquisa e empresas. As aplicações industriais de soldagem híbrida cresceram nos últimos anos devido aos avanços da automação e controle, assim como o projeto de ferramentas. Este progresso facilitou o desenvolvimento de cabeçotes de soldagem híbrida integradas e comerciais. Entre as empresas e parcerias que tiveram sucesso na integração de sistemas de soldagem Laser e arco elétrico, destacam-se as seguintes: ESAB [53], Fronius [54], Lincoln Electric [55], IPG Photonics [56], Trumpf [57], Cloos [58] e PEMA [59]. Atualmente, a tecnologia Laser vem se tornando mais barata, mais confiável, mais eficiente, com maior potência, e mais acessível à indústria.

2.4.2 Características das Juntas Soldadas pelo Processo HLAW

No processo de soldagem HLAW, o feixe Laser, subsidiado principalmente por sua elevada densidade de potência, é o responsável por garantir a penetração, enquanto o processo GMAW fornece a quantidade apropriada de metal de adição para o preenchimento da junta, além de possibilitar a adição de elementos de liga à poça de fusão [60]. O aporte térmico é maior do que o do processo a Laser, porém inferior ao do GMAW (considerando um processo com múltiplos passes), resultando em menores zonas termicamente afetadas e em um cordão mais estreito e profundo. O metal de adição proveniente do GMAW aumenta a robustez do processo [6], reduzindo a sensibilidade que a soldagem a Laser possui à desalinhamentos na junta.

O cordão de solda realizado pelo processo HLAW é comumente formado por um formato de cálice, com a presença de uma região superior mais larga, majoritariamente afetada pelo arco elétrico, e uma região inferior mais fina, majoritariamente afetada pelo feixe Laser (Figura 11). A zona termicamente afetada (ZTA), assim como a zona fundida (ZF), tendem a ser mais largas que do que no processo LBW, e mais fina que nos processos de soldagem a arco.

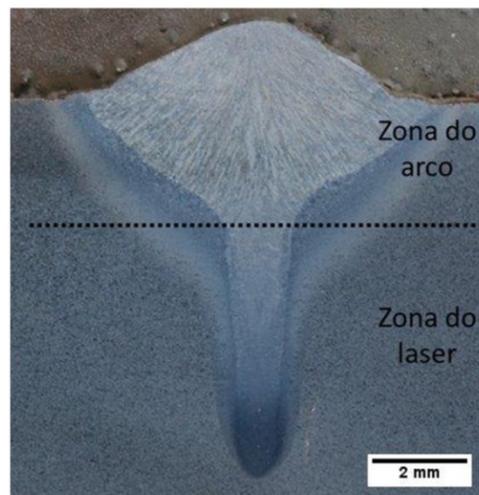


Figura 11 - Formato típico da seção transversal de um cordão de solda gerado pelo processo HLAW. (Fonte: [61])

Este formato típico pode apresentar algumas alterações, dependendo da relação entre potência do arco e do Laser utilizadas, conforme pode ser observado na Figura 12.



Figura 12 - Variação do formato de cordão HLAW típico, devido à utilização de elevada potência do arco com o GMAW de arco enterrado. (Fonte: [61])

No processo HLAW aplicado em chapas e tubos de grande espessura, a penetração é principalmente determinada pela potência utilizada no Laser. No entanto, aumentando a potência do arco, a velocidade de soldagem pode ser drasticamente aumentada. Assim, tanto visando a capacidade de permitir grandes penetrações, assim como aumento da velocidade de soldagem, o processo híbrido pode ser vantajoso em comparação ao processo tradicional Laser de alta potência [14, 17, 41, 60].

Muito fatores afetam o perfil transversal das soldas realizadas pelo processo HLAW. Na Figura 13, pode-se observar o efeito do gás de proteção. A adição de CO₂ no gás de proteção aumenta notavelmente a área da zona fundida [30].

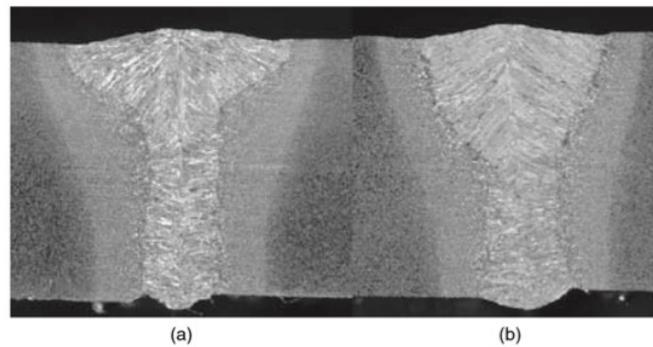


Figura 13 - Efeito da adição de CO₂ no gás de proteção na área da zona fundida: (a) 0%, (b) 10%. (Fonte: [30])

A composição química do arame de adição e do metal, especialmente o seu teor de carbono, influenciam significativamente a microestrutura resultante. Além das características dos materiais envolvidos, a escolha do procedimento de soldagem irá resultar em uma modificação nas características metalúrgicas da solda, devido principalmente ao seu ciclo térmico de aquecimento e resfriamento. No processo de soldagem HLAW, duas fontes de energia impõem diferentes ciclos térmicos simultaneamente sobre a poça de fusão, especialmente em aplicações em chapas de elevada espessura. Portanto, cada zona de solda desenvolve diferentes microestruturas, associadas às respectivas taxas de resfriamento [62]. Em geral, a microestrutura gerada na região inferior da solda, majoritariamente afetada pelo Laser, é composta de bainita e martensita, com grãos finos na linha central, enquanto na zona termicamente afetada apresenta grãos menos refinados. Por outro lado, as microestruturas formadas na região superior da solda, majoritariamente afetada pelo arco elétrico, são compostas por grãos grosseiros com maior proporção de ferrita na zona termicamente afetada [13, 60, 63]. Na medida em que a proporção da potência do arco elétrico aumenta em relação à potência Laser utilizada, obtém-se microestruturas mais grosseiras [64]. Alguns autores correlacionam tais características microestruturais com as microdurezas formadas nas diferentes regiões da solda, observando uma maior microdureza em uma faixa mais fina na região inferior, onde o arco elétrico não possui significativa participação no ciclo térmico como na região superior, conforme pode-se exemplificar na Figura 14. [64].

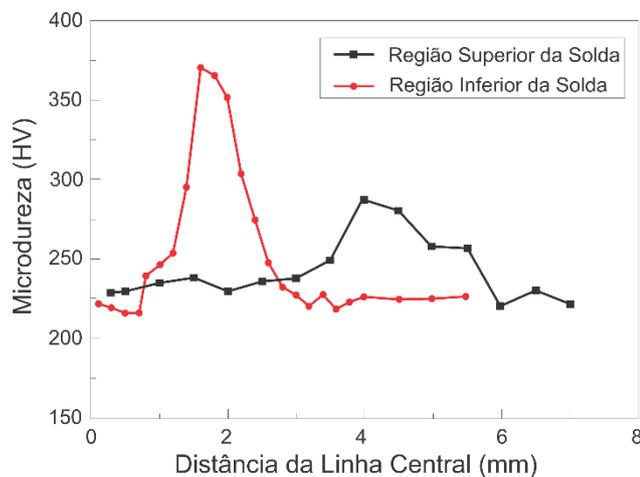


Figura 14 – Distribuição de microdureza em uma junta solda pelo processo de soldagem HLAW. (Fonte: Adaptado de [64])

2.4.3 Interação entre o Feixe Laser e o Arco Elétrico

A interação entre o arco e a pluma induzida pelo Laser geralmente depende do tipo de Laser, do gás de proteção, da corrente de arco, da distância entre o eletrodo e a peça, da distância entre o ponto focal do Laser e o ponto focal do arco elétrico, e da inclinação do eletrodo. Um *keyhole* é geralmente formado na poça de fusão utilizando um feixe Laser de alta densidade de potência, e simultaneamente uma pluma (emissão de luz), vapores, partículas ultrafinas e respingos que são formados no mesmo espaço.

Na soldagem híbrida, a emissão de átomos metálicos neutros ocorre de forma mais presente com densidade de potência no modo *keyhole*. A formação de pluma (emissão de luz) com comprimentos de onda menores ocorre de forma mais acentuada na soldagem híbrida, significando que a temperatura da pluma é maior na soldagem híbrida do que na soldagem individual a Laser. De forma análoga, a intensidade da emissão e temperatura do plasma aumenta com o incremento da corrente do arco elétrico.

Em estudos realizados, fora observado que a pluma induzida pelo Laser atua como um caminho para o arco entre o eletrodo e peça quando estes estão próximos um do outro, agindo como de fato um processo híbrido [65].

O comportamento do arco elétrico pode ser alterado devido às interações entre o feixe Laser e o arco [60, 66, 67]. Segundo Olsen [60] e Kutsuna e Chen [68] existe uma estabilização

do arco, resultado da presença de vapores metálicos gerados pelo Laser, que reduzem o potencial de ionização e a impedância do arco. A redução da impedância também leva à estricção do arco, Figura 15, resultando em um aumento da densidade de corrente [69]. Ainda, com o aumento da corrente de soldagem o arco se torna mais rígido e menos susceptível ao efeito de atração [67].

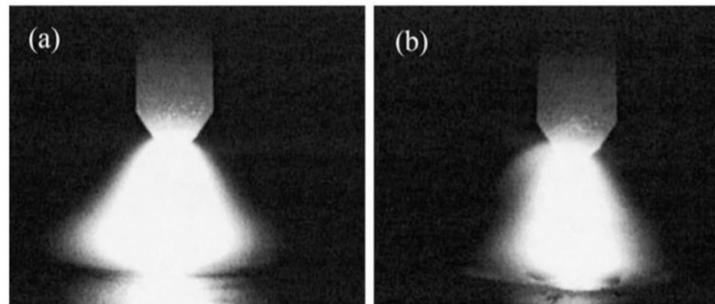


Figura 15 - Aspecto do arco GTAW com 100 A de corrente quando utilizado de forma (a) individual, e (b) de forma híbrida com o feixe Laser. (Fonte: [69])

2.4.4 Influência do Sentido de Alimentação de Arame no Processo HLAW

Nos processos de soldagem HLAW, o cabeçote de soldagem Laser e a tocha de soldagem a arco são posicionados e mantidos em uma posição adequada de tal forma que o arco e o feixe Laser são direcionados para a mesma zona de interação. Nesse sentido, são utilizados dois arranjos gerais de posicionamento: paraxial e coaxial. No arranjo paraxial, a tocha de soldagem a arco pode ser posicionada em frente ao feixe Laser, configuração conhecida como *leading arc*, e por trás do feixe Laser, configuração conhecida como *trailing arc* [70, 71].

Já no arranjo coaxial, é utilizado um eletrodo oco, de tal modo que permite a transmissão do feixe Laser por seu interior. Tal equipamento permite a projeção do feixe Laser e do arco elétrico com um eixo central comum. Apesar de existirem versões comerciais no arranjo coaxial [34], no processo de soldagem híbrida Laser-GMAW, o arranjo paraxial é sempre preferível [72-74], por conta do uso de eletrodos consumíveis.

De forma geral, a literatura traz como informação que a configuração com o arco pela frente do feixe Laser (conhecida na literatura como *leading arc*), apresenta como resultado geométrico, maior profundidade de penetração, enquanto a configuração com o arco por trás do

feixe Laser (conhecida na literatura como *trailing arc*) apresenta uma maior largura do cordão [33, 75-81], conforme pode-se observar na Figura 16.

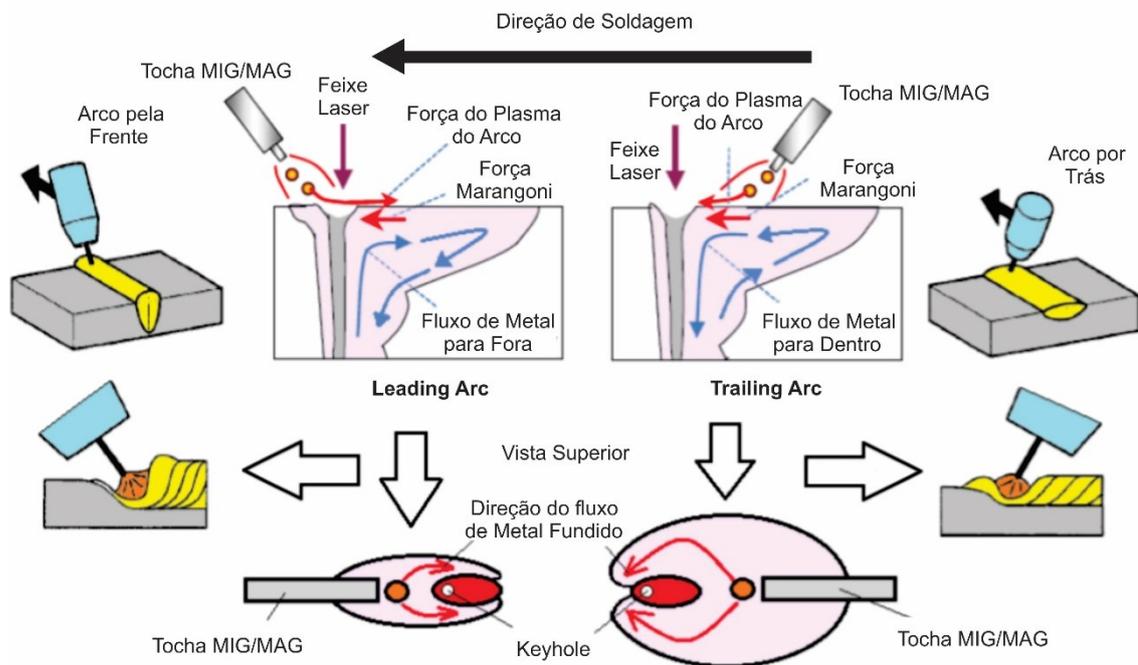


Figura 16 - Comparação do fluxo de metal fundido em aço carbono com diferentes configurações de sentido de alimentação de arame. (Fonte: Adaptado de [82])

A justificativa por trás do aumento da profundidade de penetração atingida pela configuração *leading arc* provavelmente é que nesta configuração o material, antes de ser atingido pelo feixe Laser, já esteja fundido e requer menos energia para gerar o *keyhole*. Além disso, ocorre o aumento da absorção de energia do feixe de Laser devido ao pré-aquecimento do material pelo arco elétrico.

Tsukamoto *et al.* [82] demonstraram que um processo com a configuração *trailing arc* é mais favorável para fornecer elementos microligados do arame de adição à raiz da solda. Alguns autores ainda contradizem as vantagens da configuração *trailing arc* evidenciando que melhores propriedades mecânicas quando realizado por *leading arc* [81, 83].

A configuração da soldagem HLAW tem ainda um efeito na qualidade da solda e na tendência de formação de descontinuidades e defeitos devido ao fluxo de metal fundido. A configuração *leading arc* produz mordedura com maior frequência, especialmente em

procedimentos de soldagem com elevada velocidade [84]. Além disso, existe uma maior probabilidade de a gota gerada pelo destacamento do arame atingir o *keyhole* formado pelo feixe Laser e desestabilizar o processo (Figura 17). Em contramão, a configuração *trailing arc* tende a gerar ineficiência no preenchimento de chanfros [85].

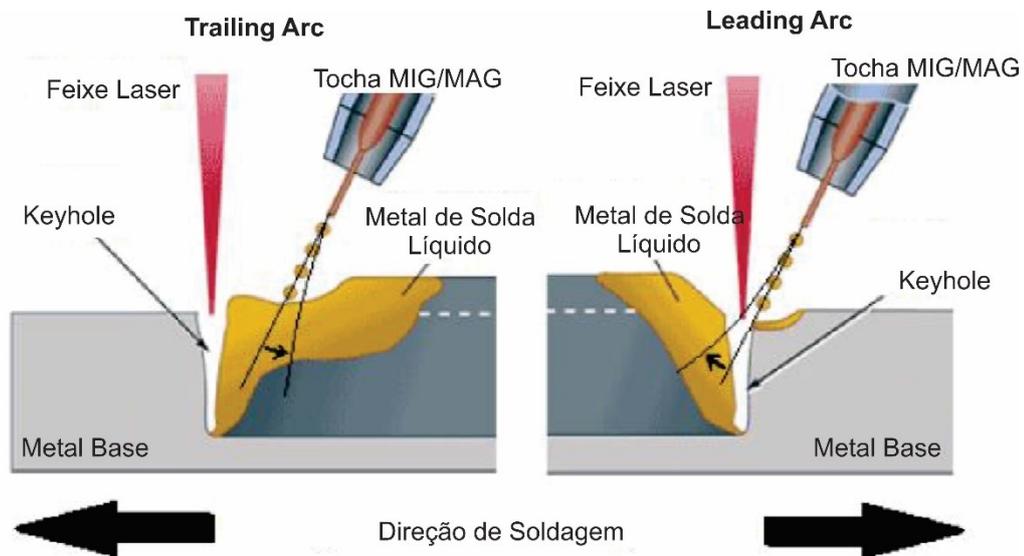


Figura 17 – Alteração na trajetória de destacamento do arame causada pela modificação no sentido de alimentação de arame no processo de soldagem HLAW. (Fonte: Adaptado de [82])

Corroborando a justificativa da importância do estudo no sentido de alimentação da arame, encontra-se a sua aplicação em soldagem orbital. Diversos autores indicam que em procedimentos de soldagem a arco, encontra-se melhores resultados operacionais e mecânicos quando este é aplicado em apenas um sentido, podendo ser este: vertical ascendente ou descendente [86]. De forma clara, quando um cabeçote híbrido é utilizado, a alteração no sentido de seu avanço torna-se mais complexa do que quando utilizado um cabeçote ou tocha de soldagem individual, ao ponto que apenas alterando o sentido de avanço, a configuração Laser-arco também é alterada (Figura 18).

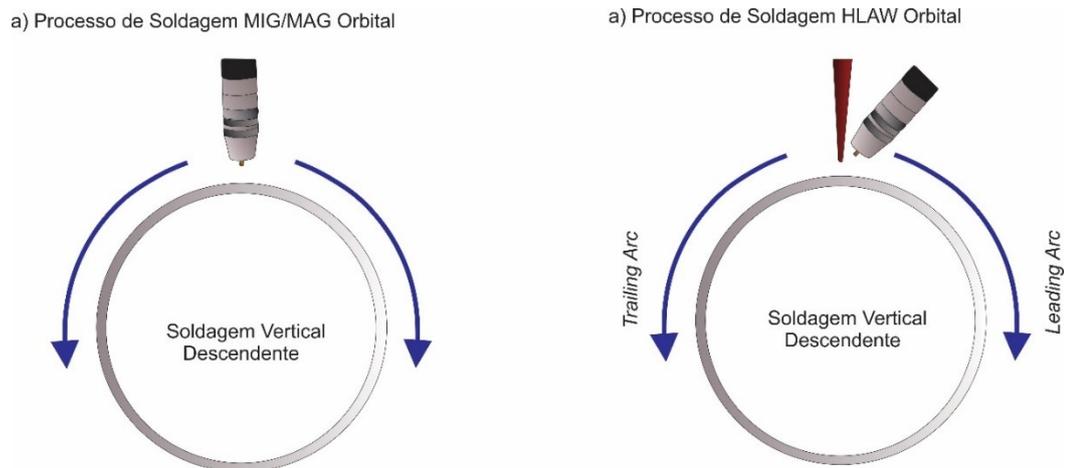


Figura 18 – Alteração no sentido de alimentação de arame na soldagem orbital dos processos de soldagem (a) GMAW e (b) HLAW. (Fonte: Autor)

Assim, conhecer os seus resultados e características operacionais em todas as suas configurações confere um tarefa essencial para possibilitar aplicações em soldagem orbital do processo HLAW.

2.4.5 Principais Parâmetros do Processo HLAW

Devido ao elevado número de parâmetros envolvidos no processo HLAW, a separação dos efeitos individuais na soldagem de cada parâmetro torna-se extremamente complexa e desafiadora, especialmente considerando suas interações.

A seguir, serão apresentados e discutidos os principais parâmetros envolvidos no processo HLAW.

2.4.5.1 Potência do Feixe Laser

A potência Laser caracteriza-se como o principal parâmetro para o aumento da penetração. Na soldagem HLAW, diferentemente da soldagem LBW, esse fenômeno é acentuado devido à redução da refletividade do metal da peça quando aquecido pelo arco [32, 87, 88]. Dessa forma, costuma-se primeiramente estabelecer a potência Laser a ser utilizada, e posteriormente os outros parâmetros, como velocidade de soldagem [89-91].

De forma geral, o valor máximo de profundidade de penetração alcançado é diretamente proporcional a potência Laser utilizada. Entretanto, o uso de fontes de elevada potência representa a maior influência financeira em todo o processo. Desse modo, a atual limitação na potência Laser utilizada industrialmente é devido à falta de aplicações onde seria necessário e rentável o elevado investimento. A empresa IPG Photonics® dispõe de tecnologia para fabricação de fontes de 500 kW utilizando a disposição de multimodos, porém ainda sem necessidade de produção real [92].

Katayama *et al.* [93] demonstraram a possibilidade em alcançar uma profundidade de penetração de 125 mm em soldagem sobre chapa de aço inoxidável AISI 304 utilizando um Laser de fibra de 70 kW com 0,3 m/min de velocidade de soldagem (Figura 19).

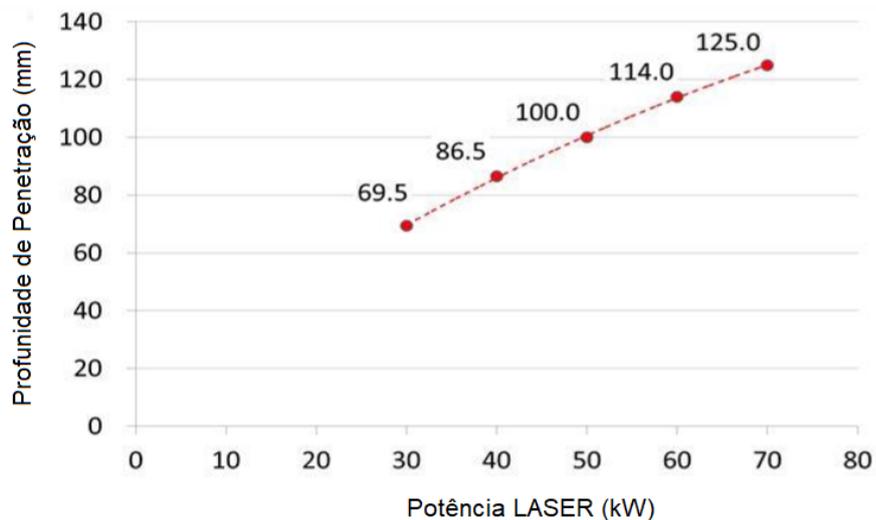


Figura 19 - Efeito da potência Laser na profundidade de penetração dos cordões de solda LBW. (Fonte: [93])

2.4.5.2 Potência do Arco Elétrico

De acordo com Qin *et al.* [94], a potência do arco, que está relacionada com a taxa de alimentação do arame no processo MIG/MAG, influencia diretamente na profundidade alcançada no processo HLAW. Yan *et al.* [95] demonstraram que com o aumento da corrente do arco de 150, 180 e 200 A e mantendo fixa a potência Laser, foi possível alcançar uma

profundidade de penetração de 7,58; 8,15 e 8,98 mm, respectivamente, como pode-se observar na Figura 20.

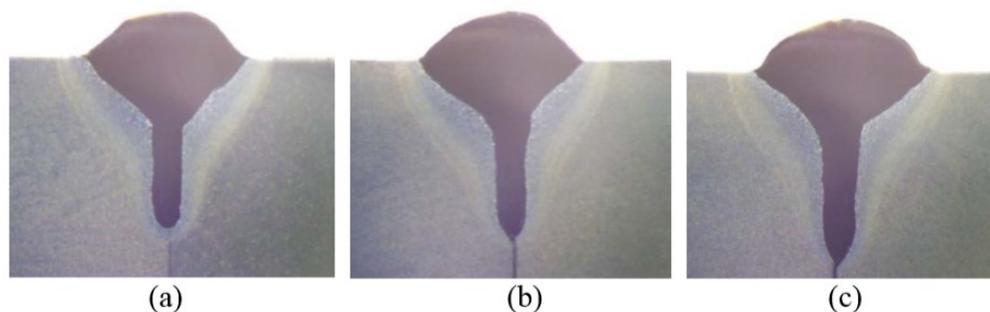


Figura 20 – Seção transversal de cordão de soldagem HLAW com corrente do arco de (a) 150 A, (b) 180 A e (c) 220 A. (Fonte: [95])

No entanto, potências excessivas do arco tendem à diminuição da penetração observada, conforme ilustra Chen *et al.* [96]. Isso se deve provavelmente ao aumento da absorção do feixe Laser pelo plasma do arco.

Dreveck [61] e Barbeta [20] observam que a utilização de um arco com maior potência, favorece a utilização do processo HLAW com fontes Laser de baixa potência, contribuindo para a inserção do processo HLAW na indústria nacional.

2.4.5.3 Velocidade de Soldagem

A elevada velocidade de soldagem, é uma das principais características e vantagens do processo de soldagem HLAW, aumentando significativamente a produtividade do processo de fabricação como um todo. Geralmente, uma menor velocidade de soldagem auxilia no aumento da profundidade de penetração [98, 99]. Entretanto, velocidades de soldagem criticamente baixas apresentam um ponto otimizado de profundidade de penetração, devido a maiores fluxos de material fundido e mais perdas térmicas por condução [100-104].

Elevadas velocidades de soldagem apresentam menor absorção, devido à maior refletividade de materiais em menores temperaturas, e geram taxas de resfriamento mais rápidas [98, 105], podendo resultar maiores gradientes térmicos na região da solda e formação de defeitos metalúrgicos [102, 106]. Além disso, a capacidade e produtividade de preenchimento de chanfros é melhorada em velocidades de soldagem maiores. A relação entre a velocidade de

soldagem e a alimentação do arame de adição é importante para a estabilidade do *keyhole* e, portanto, para a estabilidade do próprio processo [107].

Mesmo sendo caracterizado como um processo de elevada velocidade de soldagem possível de ser alcançada, o processo é normalmente utilizado em faixas de 0,6 m/min a 1,5 m/min [97, 98, 108]. Já nessas velocidades de soldagem, o seu aumento excessivo tende a não impactar tanto a tempo de fabricação do equipamento, uma vez que normalmente o gargalo da produção não será mais a soldagem, além de gerar uma dificuldade na parametrização e repetitividade do processo.

2.4.5.4 Posicionamento Relativo Entre o Feixe Laser e o Arco Elétrico

Inerente a um processo híbrido com duas fontes de calor agindo sobre uma mesma poça de fusão, a característica geométrica do posicionamento relativo entre o feixe Laser e o arco elétrico torna-se extremamente significativa para o resultado e repetitividade da sinergia do processo. Dada sua importância, os principais elementos geométricos relativos ao posicionamento do feixe Laser e do arco elétrico serão discutidos neste capítulo, destacando-se a distância entre o feixe Laser e o arco elétrico (DLA), distância de desfoque do feixe Laser (F_y) e inclinação da tocha de soldagem GMAW (α), conforme pode-se observar na Figura 21.

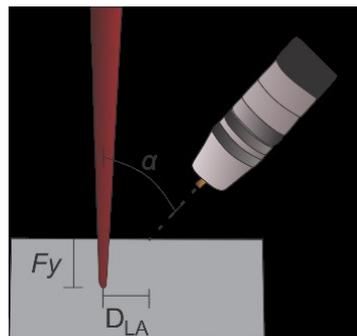


Figura 21 - Características geométricas do posicionamento relativa entre o feixe Laser e o arco elétrico no processo de soldagem HLAW. (Fonte: Autor)

2.4.5.4.1 Distância entre o Feixe Laser e o Arco Elétrico

A distância entre o feixe Laser e o arco elétrico (DLA) determina a proximidade entre as duas fontes de calor e a probabilidade e força de interação entre o feixe Laser e plasma do arco. A DLA é geralmente mantida em valores de 0 a 5 mm, dependendo dos parâmetros do Laser, do arco elétrico e dos materiais utilizados [29-33]. No entanto, alguns autores indicam a possibilidade de desestabilização do arco com DLA entre 0 a 1 mm, devido à possibilidade do feixe Laser colidir com o arame de adição e gerar a reflexão de grande parte da energia gerada. [77, 78, 109]. Como regra, se a DLA for menor que 3 mm, a profundidade de penetração é aumentada devido geração de um plasma comum às duas fontes de calor [97].

Entretanto, tais considerações variam com as diferentes fontes de Laser, fontes de arco, materiais utilizados e configurações de juntas.

2.4.5.4.2 Distância de Desfoque do Feixe Laser

De forma geral, nos processos de soldagem a Laser, o feixe Laser é utilizado com seu ponto focal na superfície ou abaixo da superfície da peça a ser soldada [67, 94, 110, 111]. Nos processos HLAW, a situação é similar. Victor *et al.* [81] relatam que observaram que diferentemente da soldagem LBW, a mudança do ponto focal na soldagem HLAW não altera significativamente a penetração atingida. Geralmente são utilizados valores entre 5 e 15 mm de desfoque do feixe Laser abaixo da superfície do material a ser soldado [97, 98, 108]. Cabe ainda ressaltar que pequenas mudanças na distância de desfoque do feixe Laser podem ocorrer de forma indesejada durante a soldagem, devido tanto ao aquecimento do sistema óptico, como a própria dilatação e empenamento de materiais a serem soldados.

2.4.5.4.3 Inclinação dos Cabeçotes de Soldagem

A inclinação da tocha de soldagem GMAW é fornecida de modo que o gás de proteção oriundo da tocha desvie efetivamente o plasma induzido pelo Laser da zona de solda para aumentar a profundidade de penetração e proteção do metal em solidificação, sendo este valor mantido geralmente entre 45° e 65° [31, 112-115].

O feixe Laser é geralmente direcionado perpendicularmente à superfície da peça para obter máxima profundidade de penetração. Entretanto, este é inclinado durante a soldagem de metais com elevada refletividade, para evitar danos ao cabeçote de soldagem Laser devido à incidência de feixes refletidos.

2.4.5.5 Gás de Proteção

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, além de formar e definir o arco elétrico. A ação deste, associado às características da fonte de energia e aos metais de adição, pode ajudar no aumento da qualidade mecânica e metalúrgica da solda e da produtividade na soldagem de aços carbono, aços inoxidáveis, ligas de alumínio, entre outras aplicações, influenciando as características do arco, geometria da solda e transferência metálica [69]. O gás de proteção pode ser inerte, que não têm praticamente nenhuma solubilidade na maioria dos metais, ativo, ou uma mistura destes dois tipos. Segundo a sua natureza e composição estes terão uma influência preponderante nas características do arco e no tipo de transferência metálica, na velocidade de soldagem, na perda por projeção (respingos), na penetração e no formato do cordão de solda, e, ainda, no custo final da operação de soldagem. São atribuídas também ao tipo de gás empregado as perdas de elementos químicos, a temperatura da poça de fusão, a sensibilidade à fissuração e porosidade, bem como a facilidade na execução da soldagem em diversas posições [116].

A escolha do tipo de atmosfera protetora para soldagem depende de fatores como aplicação, custo, facilidade de manuseio, efeitos fisiológicos sobre os operadores, geração de fumos e gases, estabilidade a temperaturas elevadas, entre outros. A solubilidade do gás no metal fundido que se almeja proteger durante a soldagem também deve ser observada, pois se uma quantidade substancial do gás entra no metal fundido pode causar liberação do gás durante a solidificação causando descontinuidades na solda produzida, como por exemplo, porosidade [116].

Os gases de proteção utilizados amplamente nas últimas décadas em soldagem do aço carbono são o argônio (Ar), o dióxido de carbono (CO₂) e o hélio (He), que são usados puros ou misturados entre si. Em alguns casos, pequenas quantidades de oxigênio (O₂) são misturadas

aos anteriores. Adições de elementos redutores ou pouco ativos como o hidrogênio (H_2) e o nitrogênio (N_2) são citadas na soldagem de aços inoxidáveis e outras aplicações específicas. Na indústria, embora sejam disponíveis misturas binárias, ternárias e até quaternárias, as mais populares são ainda à base de Ar e CO_2 [117].

As propriedades físicas e químicas dos gases como potencial de ionização, condutividade térmica, potencial de oxidação e tensão superficial, viscosidade, entre outras, definem as principais características operacionais do arco de soldagem e as propriedades das soldas. Variações dos parâmetros de soldagem como tensão e corrente, entre outros, modifica a geometria do cordão de solda, e são intensamente influenciados pela composição química do gás de proteção [118].

No processo de soldagem GMAW, embora a utilização de Ar puro como gás de proteção seja desejável para tenacidade do metal de solda, o arco torna-se instável nessa condição. Como resultado, essa instabilidade causa o aparecimento de defeitos e descontinuidades de solda e irregularidade no cordão, dificultando a sua execução, conforme ilustra Kanemaru *et al.* [119]. Dessa forma, a mistura de Ar e O_2 ou Ar e CO_2 é comumente utilizada como gás de proteção nos processos de soldagem GMAW (Figura 22).

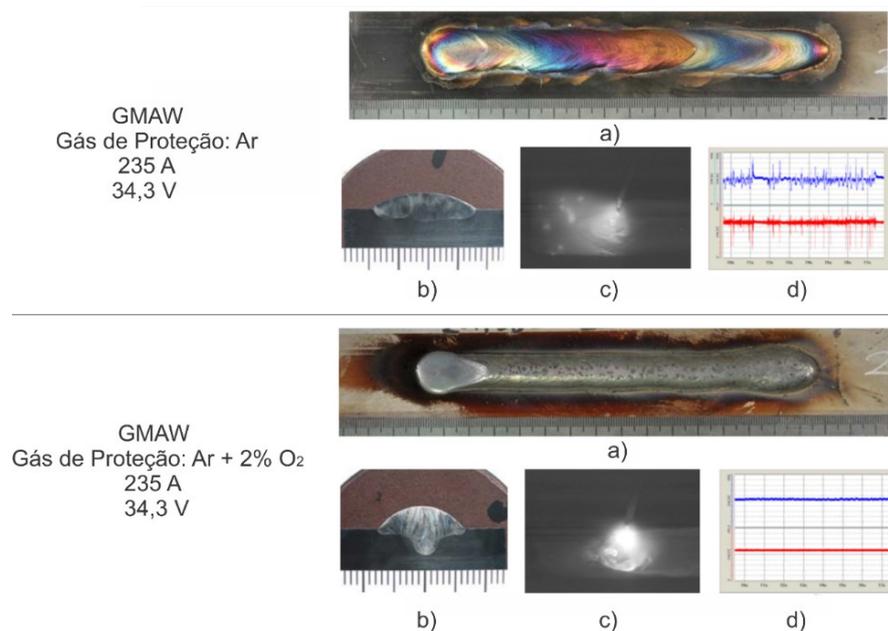


Figura 22 - Dados experimentais de soldagem GMAW: (a) Superfície da cordão, (b) Macrografia transversal, (c) Imagem de filmagem em alta velocidade, (d) Oscilograma de corrente de tensão. (Fonte: Adaptado de [119])

Na soldagem HLAW, o He e o Ar são os constituintes predominantes nos gases de proteção utilizados. Porém o uso de misturas com gases ativos como o Ni, CO₂ e CO são também encontradas em diversas aplicações. O uso de CO₂ na mistura gasosa na soldagem HLAW em larga proporção resulta no aumento da profundidade de penetração e redução de porosidade, enquanto aumenta significativamente a quantidade de respingo gerada [72, 115, 120-122].

2.4.6 Aplicações Industriais do Processo HLAW

Devido às diversas vantagens quando comparado aos processos convencionais, a soldagem HLAW torna-se extremamente atrativa a alguns setores da indústria.

Do ponto de vista econômico, o processo de soldagem híbrida Laser-GMAW permite alcançar aumento de produtividade e redução até mesmo do investimento necessário. Principalmente quando comparado aos processos de soldagem a arco, a redução da necessidade de abertura de grandes chanfros possibilita uma significativa economia no processo como um todo. Reutzel *et al.* [123] ilustram uma comparação entre o processo HLAW e o processo GMAW aplicados na indústria naval e automobilística, onde o processo HLAW obteve uma redução média de tempo de soldagem de 90%, redução das deformações de soldagem em torno de 4 vezes como reflexo da diminuição da energia de soldagem imposta. Na indústria automobilística, esses dados superam a marca aproximada de até 7 vezes a produtividade, chegando a um aumento de comprimento de juntas soldadas de até 9 vezes se comparado ao processo convencional GMAW. A Figura 23, construída a partir de dados fornecidos por Reutzel *et al.* [123] ilustram de forma clara a contribuição econômica do processo HLAW em relação aos processos de soldagem a arco.

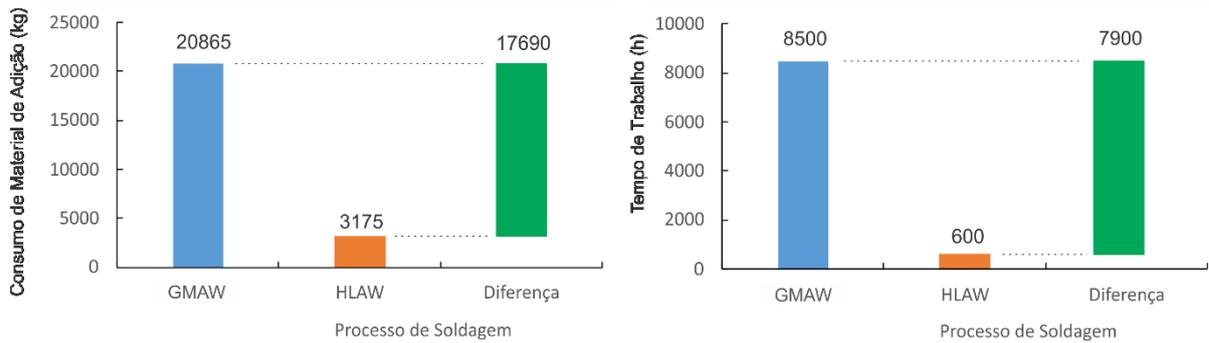


Figura 23 – Comparação de consumo de material de adição e tempo de trabalho entre os processos de soldagem GMAW e HLAW. (Fonte: Autor)

Ainda, quando comparado aos processos de soldagem LBW, a hibridização permite a utilização de uma fonte de Laser de menor potência, contribuindo drasticamente na redução do investimento inicial necessário ao equipamento.

O processo HLAW pode ser utilizado na soldagem de uma grande variedade de metais, incluindo metais ferrosos como aço carbono e aço inoxidável, e metais não ferrosos como ligas de alumínio, magnésio, níquel, titânio, etc [71, 115, 124-132]. Sua aplicação ainda existe para soldagem de chapa finas e espessas.

No entanto, um sistema de soldagem híbrido ainda requer altos custos de investimento, fazendo que este seja adotado em setores industriais focados em tempos curtos de fabricação, baixos custos de fabricação, elevada produtividade e desempenho técnicos. Alguns autores citam a aplicação industrial do processo HLAW no setor automobilístico [133] e na indústria naval [134, 135].

Diferentes aspectos do processo HLAW como potencial de automação, redução do custo de utilização, soldabilidade de diferentes materiais são investigados por diversos autores com aplicações em setores como indústria naval, fabricação de dutovias e tubos, além da indústria ferroviária [123, 136, 137].

Entre os representantes onde a tecnologia HLAW segue implementada da fabricação de seus produtos, destacam-se as empresas do setor automobilístico as empresas Volkswagen, Audi e Daimler [133], do setor industrial naval a empresa alemã Meyer-Werft GmbH [138] e a empresa italiana Fincantieri [134].

3 MATERIAIS E MÉTODOS

Para a realização dos ensaios propostos no trabalho, o auxílio de diversos laboratórios e institutos da Universidade Federal de Santa Catarina foi necessário, entre estes: Laboratório de Mecânica de Precisão (LMP-Laser e LMP-USINAGEM), Instituto de Soldagem e Mecatrônica (LABSOLDA), Laboratório de Materiais (LABMAT) e Laboratório de Conformação Mecânica (LABCONF). Além destes, foi também necessário o apoio técnico da empresa IMC Soldagem.

A metodologia experimental consiste na realização de ensaios e análises que possibilitem a compreensão da influência de cada parâmetro e da elaboração de uma janela de operação para o processo HLAW na união de chapas espessas com isenção de descontinuidades de soldagem.

A partir da revisão da literatura, é claro um ponto de acordo entre todos os autores sobre o processo HLAW: a grande quantidade de parâmetros de cada processo individual e a elevada complexidade da hibridização dos dois processos de soldagem. Neste cenário, se faz necessária uma extensa bateria de ensaios e análises para verificar a influência dos parâmetros variáveis de entrada.

Este capítulo aborda as questões relativas à organização e configuração experimental do trabalho, descrevendo em detalhes os materiais utilizados, as etapas da metodologia utilizada, os equipamentos e a infraestrutura utilizada, a preparação dos corpos de prova e as descrições das análises realizadas nos cordões depositados sob chapa e em chanfro para união de junta.

3.1 MATERIAIS E INSUMOS DE SOLDAGEM

Foram utilizados como substratos, para todas as etapas propostas, chapas de aço ASTM A516 GR70. Esse aço carbono é destinado industrialmente principalmente para o serviço em vasos de pressão soldados, onde procura-se aumento de ductilidade do substrato. A Tabela 3 apresenta a composição química do ASTM A516 GR70.

Tabela 3 – Composição química do aço ASTM A516 GR70.

Elemento	Concentração (% peso)
Carbono (C)	0,27 (máx)
Manganês (Mn)	0,85 a 1,20
Fósforo (P)	0,035 (máx)
Enxofre (S)	0,035 (máx)
Silício (Si)	0,15 a 0,40

Como arame de adição do processo GMAW, foi utilizado o material AWS ER 70S-6 com diâmetro de 1,2 mm. A Tabela 4 apresenta a composição química do AWS ER 70S-6.

Tabela 4 – Composição química do arame AWS ER 70S-6.

Elemento	Concentração (% peso)
Carbono (C)	0,06 - 0,15
Manganês (Mn)	0,90 - 1,40
Silício (Si)	0,45 - 0,75
Fósforo (P)	0,025 (máx)
Enxofre (S)	0,035 (máx)
Cobre (Cu)	0,50 (máx)

O carbono equivalente possui uma influência significativa sobre as transformações metalúrgicas ocorridas durante o aquecimento e resfriamento na soldagem, e, portanto, correlacionam-se fortemente com as microestruturas formadas [139-141]. O carbono equivalente (C_{eq}) do substrato utilizado pode ser calculado através da Equação 2.

$$C_{eq} = \%C + \frac{\%Mn}{6} + \frac{\%Cr + \%Mo + \%V}{5} + \frac{\%N + \%Cu}{15} \quad (2)$$

Assim, pode-se obter o carbono equivalente do substrato utilizado em 0,47, classificando-o como um aço de razoável soldabilidade.

Já como gases de proteção, foram utilizados para o processo MIG o gás Argônio e a mistura comercial 92% Ar, 8% CO₂. A escolha destes gases deve-se à representatividade dos

gases inertes e ativos, pela já conhecida influência da adição de CO₂ na soldabilidade, e pela disponibilidade dos mesmos no laboratório.

Durante os procedimentos de soldagem HLAW em junta, foi observada a necessidade na utilização de *backings*, também conhecidos na literatura como cobre-junta, suporte ou apoio. *Backing* é o nome dado ao material ou dispositivo colocado na parte posterior da junta a ser soldada adjacente à raiz da junta. O material pode ser parcialmente fundido ou permanecer sem fundir durante a soldagem, podendo ser metálico ou não metálico.

Entre os mais utilizados, destacam-se o *backing* de cerâmica, cobre, e fibra de vidro, cada um contendo suas vantagens e limitações específicas para o uso Figura 24.

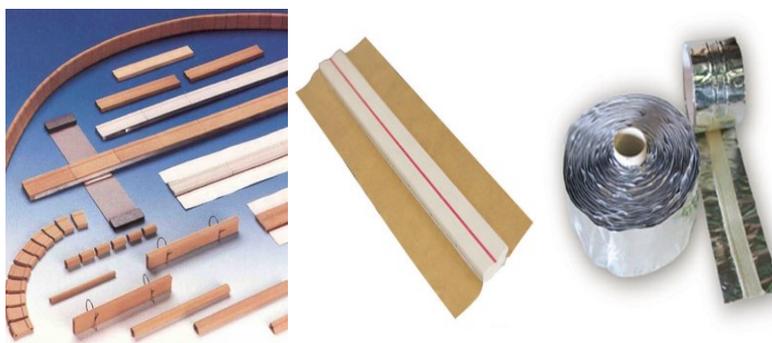


Figura 24 – *Backings* utilizados para soldagem de alta penetração, a) *backing* de cobre, b) *backing* de cerâmica, c) *backing* de fibra de vidro. (Fonte: [142])

O *backing* de cobre possui como principal característica o elevado valor de condutividade térmica, o que auxilia na solidificação e conseqüente sustentação mecânica da raiz da solda. O *backing* de cerâmica apresenta um elevado ponto de fusão, fazendo que este seja dificilmente fundido à solda e ao substrato. Por fim, o *backing* de fibra de vidro, além de sua flexibilidade e facilidade de aplicação, possui como principal vantagem permitir até certo ponto um fluxo gasoso no interior do chanfro.

Devido às características supracitadas e à sua disponibilidade, foi optado pela utilização de *backing* de fibra de vidro Fiback®, fabricado pela empresa Aquasol Corporation.

3.2 PREPARAÇÃO DAS CHAPAS E JUNTAS PARA ENSAIOS DE SOLDAGEM

Para a realização dos procedimentos de soldagem sobre chapa propostos que serão discutidos nos próximos subcapítulos, as chapas tiveram suas superfícies desbastadas, para retirada da camada de óxido e favorecimento da estabilidade e manutenção do arco elétrico e melhor comportamento de interação do feixe Laser com o substrato.

Devido ao desejo interno do laboratório em se utilizar juntas de 15 mm de espessura, foram realizadas pré etapas de fresamento das chapas originais, a fim de se atingir a espessura desejada e preparar a junta com as diferentes variações dos chanfros analisados. Durante os ensaios em junta, os resultados de cada ensaio subsidiaram alterações na geometria do chanfro. Estas alterações, assim como as próprias geometrias utilizadas na soldagem em junta pelos processos LBW e GMAW, serão ilustradas durante a discussão dos resultados de cada ensaio, a fim de permitir um maior entendimento do leitor.

3.3 Equipamentos e Infraestrutura

Como fonte de Laser, foi utilizada uma fonte de fibra (Yb-Itérbio) do fabricante IPG Photonics®, com potência máxima de 10,0 kW, comprimento de onda (λ) entre 1070,0 nm e 1080,0 nm, diâmetro de feixe no foco ($\text{\textit{Øff}}$) entre 0,8 mm e 2,5 mm, além do cabeçote de soldagem Laser modelo YW52, fabricado pela empresa Precitec® (Figura 25).



Figura 25 - (a) Cabeçote de soldagem YW52 fabricado pela empresa Precitec. (b) Fonte Laser de fibra YLS 10000 fabricada pela empresa IPG Photonics®. (Fonte: Arquivo do Laboratório

LMP-Laser UFSC)

O sistema óptico do cabeçote representa um elevado custo. Assim, sua proteção deve ser assegurada contra exposição às contaminações de fumos e respingos gerados pelo processo de soldagem. Com o objetivo de evitar essa contaminação, utiliza-se de uma janela de sacrifício fabricada de vidro com uma espessura múltipla de meio comprimento de onda da luz Laser empregada, garantindo a transmissibilidade total do feixe Laser, sem ocorrência de desvios ópticos ou absorção de alguma parcela de energia, o que impediria a confiabilidade dos parâmetros utilizados e culminaria na danificação deste elemento óptico. No caso da contaminação desta janela de sacrifício, esta deve ser substituída. Para aumentar a vida útil da janela de sacrifício, é soprado um fluxo transversal de ar comprimido em alta velocidade (*crossjet*), para empurrar as partículas sólidas (respingos) e gasosas geradas no processo para longe dos elementos ópticos.

Cabe ressaltar que o mau funcionamento do *crossjet* acarreta em danos imediatos da janela de sacrifício, conforme pode-se observar na Figura 26.

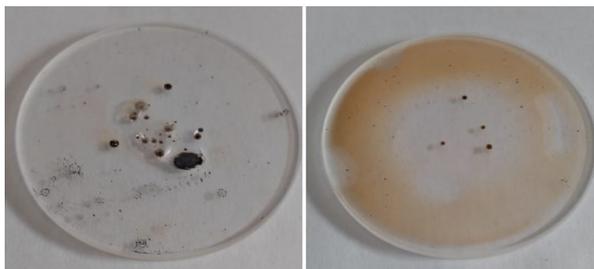


Figura 26 – Janela de sacrifício após contaminação por respingos e fumos de soldagem.

(Fonte: Autor)

Estes danos, como respingos e fumos aderidos à janela de sacrifício, acarretam diretamente na absorção de uma parcela ou até da totalidade da potência do feixe Laser gerada, culminando no trincamento da janela de proteção e elevado risco à segurança do sistema óptico do cabeçote.

A fonte de soldagem DIGIPlus A7 Multiprocessos e o tracionador de arame STA20-2, ambos fabricados pela empresa IMC Soldagem, foram utilizados para o Processo GMAW (Figura 27).



Figura 27 – Fonte de soldagem DIGIPlus A7 multiprocessos e tracionador de arame STA20-2, ambos fabricados pela empresa IMC Soldagem. (Fonte: Autor)

Com o objetivo de melhor controlar e parametrizar o processo MIG, foi utilizado o Sistema de Aquisição Portátil – SAP (Figura 28). O equipamento, fabricado pela empresa IMC Soldagem, permite uma aquisição de corrente, tensão, vazão de gás e velocidade de arame em uma frequência de 5000 Hz. Os dados obtidos são então dispostos em formas de gráficos e histogramas, permitindo um acompanhamento mais detalhado do procedimento realizado.



Figura 28 – Sistema de Aquisição Portátil (SAP). (Fonte: [143])

O módulo de movimentação da peça é comandado numericamente com CNC e integrado ao painel de comando do Laser, o qual permite variar os parâmetros de entrada. O comando numérico CNC utilizado, Siemens Sinumerik 840D SL, comanda os servomotores modelo 1FK7042. Esta bancada de trabalho foi concebida no escopo do trabalho desenvolvido por Gutjahr (2016) [47]. A partir do uso do sistema de movimentação controlado por comando numérico CNC, é possível um posicionamento do feixe Laser com resolução de 0,001 mm,

facilitando ainda o controle preciso do posicionamento de inserção de arame. O controle da posição pode ser realizado pelo acionamento de um *pointer* centralizado ao feixe Laser de processo, ou ainda pela imagem fornecida pela câmera de monitoração de processo, inserida junto ao cabeçote de soldagem Laser. As duas opções de visualização são ilustradas na Figura 29.

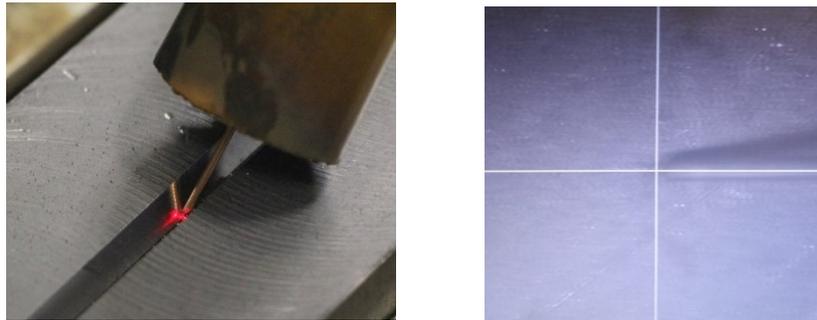


Figura 29 – Controle de posicionamento de inserção de arame via acionamento do *pointer* (esquerda) e via imagem fornecida pela câmera de monitoramento do processo (direito).

(Fonte: Autor)

Com o objetivo de facilitar e possibilitar o posicionamento independente do cabeçote GMAW com um nível satisfatório de precisão e robustez, foi desenvolvido um sistema de suporte e movimentação, o qual será apresentado na próxima seção.

Dessa forma, a bancada de trabalho configura-se pelo aparato central, composto pelo sistema de movimentação, cabeçote de soldagem Laser e tocha de soldagem GMAW, e pelos equipamentos periféricos, como pode ser observado na Figura 30. Assim, a bancada estava preparada para realizar ensaios de soldagem GMAW, LBW e HLAW com elevada precisão geométrica.

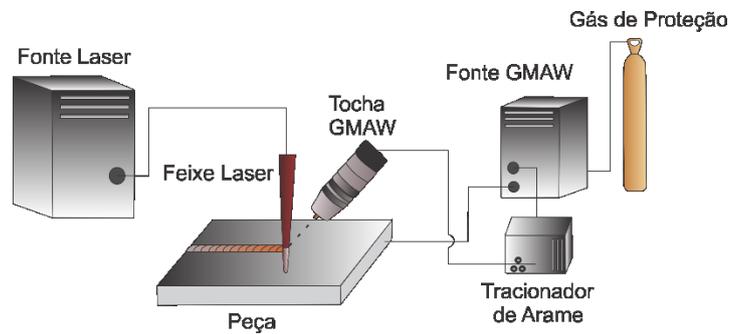


Figura 30 – Foto (esquerda) e esquemático (direita) da bancada de trabalho utilizada para procedimentos GMAW, LBW e HLAW. (Fonte: Autor)

3.4 METODOLOGIA DE ENSAIOS E ANÁLISES

Os procedimentos experimentais deste trabalho estão divididos em três macro etapas, cada qual gerando discussões, resultados e subsídios para as etapas posteriores, conforme pode-se observar no fluxograma da Figura 31.

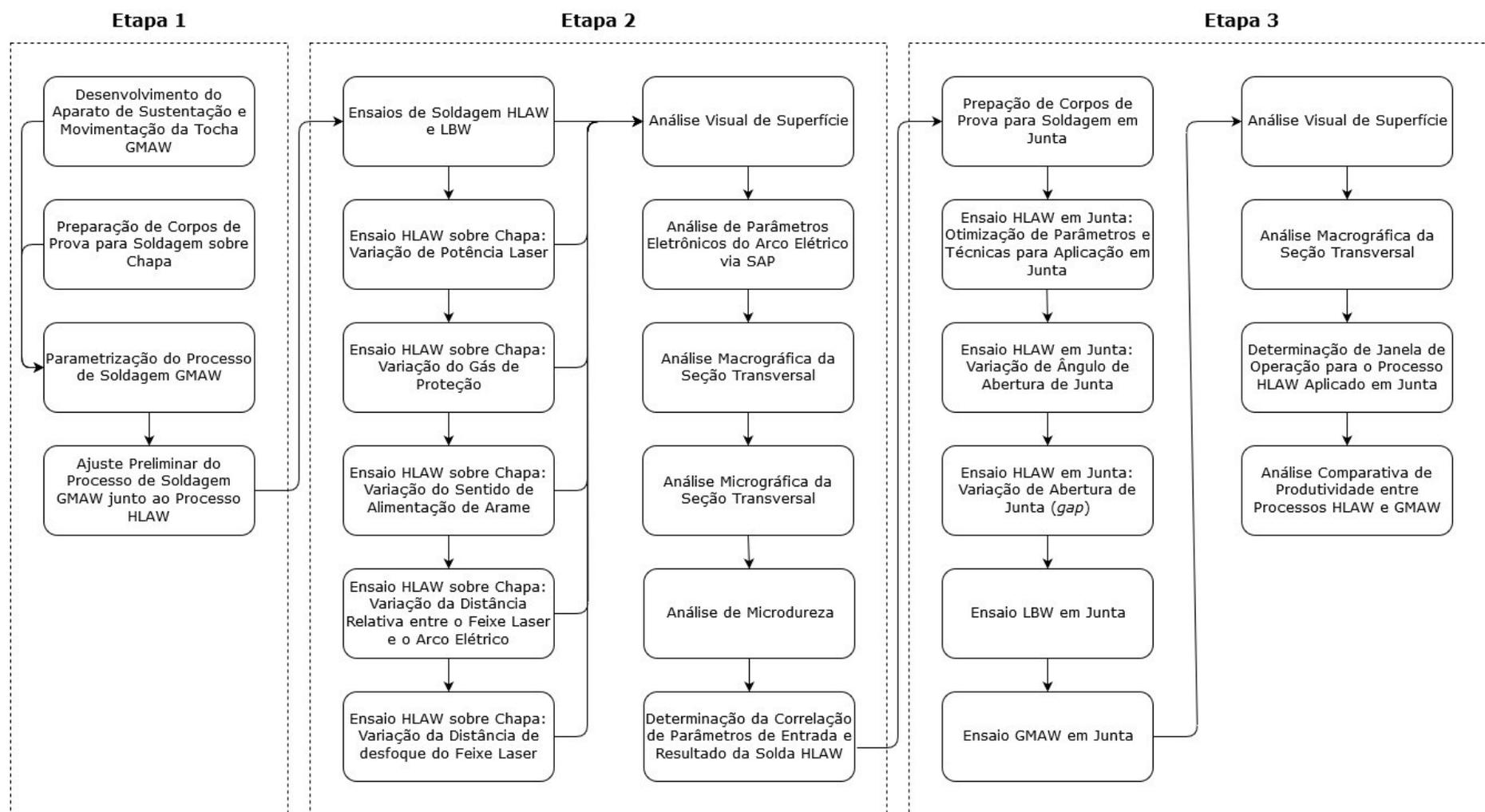


Figura 31 – Fluxograma de ensaios e análises realizadas para o desenvolvimento do trabalho. (Fonte: Autor)

3.4.1 Preparação da Bancada de Trabalho

A primeira etapa, denominada como Preparação da Bancada de Trabalho, destina-se principalmente ao desenvolvimento do aparato de sustentação e movimentação da tocha GMAW junto ao cabeçote de soldagem Laser, avaliando critérios de sensibilidade e robustez do equipamento para a aplicação em soldagem híbrida, além dos sistemas de proteção para operador e máquina durante a realização dos procedimentos. Esse sistema, denominado Sistema de Movimentação do Suporte Orientador (SMS), desenvolvido em conjunto com a equipe de mecânica do LMP-Laser, manteve suas características de robustez e sensibilidade possibilitando sua utilização em diversas aplicações de processamento de materiais via Laser com adição de arame, como Laser *cladding* e soldagem LBW com alimentação de arame [144].

Durante o posicionamento relativo da tocha GMAW junto ao cabeçote de soldagem Laser, o eixo *z* da máquina torna-se o mais crítico e complexo ao processo, já que devido a qualquer ajuste incorreto deste eixo afetar significativamente outros parâmetros geométricos do processo, como DBCP e distância relativa entre o feixe Laser e o arco elétrico. Neste cenário, controlar a movimentação do eixo *z* de forma manual com a precisão necessária inviabilizaria a execução correta dos ensaios. Assim, em aplicações específicas com a utilização em processos Laser, busca-se de forma geral baixa inércia, baixa incerteza de posicionamento, elevada rigidez para suporte de carga e elevada relação torque e dimensão do motor.

Conforme se fez necessário o ajuste fino no eixo *z* sem a alteração compulsória dos demais eixos, o SMS foi projetado com a inclusão de acionamento eletrônico do eixo *z*, possibilitando incrementos isolados de 1 mm, sem qualquer alteração indesejada em outros parâmetros geométricos, como DBCP e DLA.

A Figura 32 ilustra a bancada de trabalho antes e após o desenvolvimento do SMS.

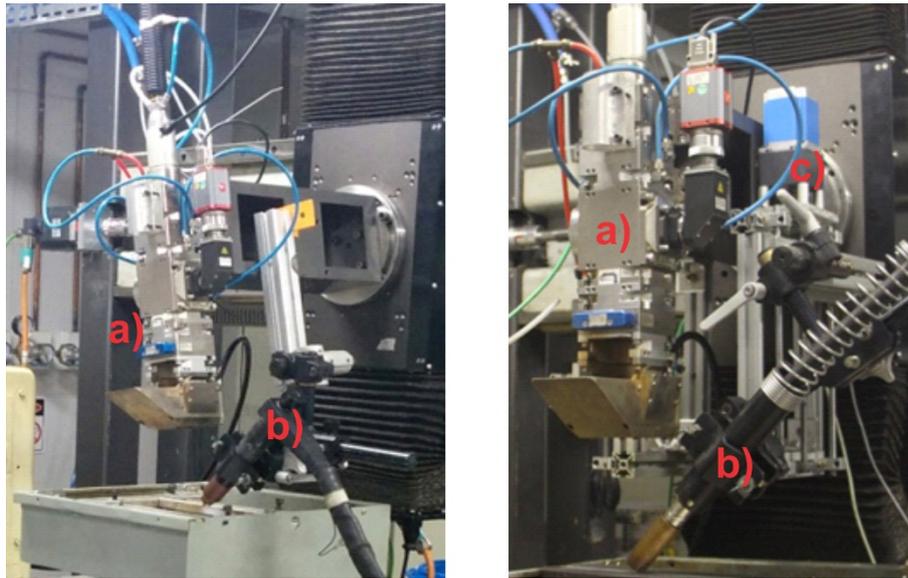


Figura 32 – Bancada de trabalho de soldagem HLAW (esquerda) antes e (direita) depois do desenvolvimento do Sistema de Movimentação do Suporte Orientador (SMS) acoplado à tocha de soldagem GMAW. a) Cabeçote de soldagem LBW, b) Tocha de Soldagem a Arco, c) Sistema de Movimentação do Suporte Orientador. (Fonte: Autor)

Em paralelo, buscou-se também o desenvolvimento de um procedimento individual estável GMAW, através de ensaios de parametrização, e realização dos primeiros procedimentos de soldagem híbrida. A ordem dos ensaios deve-se principalmente pela elevada sensibilidade e alto custo do equipamento de soldagem Laser, fazendo com que seja necessária a utilização de um processo GMAW estável e sem respingos para a parametrização inicial do processo híbrido.

A partir da determinação da utilização da variante de controle de corrente de modo pulsado do processo GMAW, foram realizados ensaios de parametrização do processo GMAW individual. Alcançando aspectos satisfatórios de superfície, os corpos de prova foram seccionados transversalmente e preparados metalograficamente para avaliação de possíveis discontinuidades internas de soldagem.

Após a constatação de um processo estável, este foi utilizado juntamente ao Laser como um processo híbrido. De forma já esperada, foi necessária ainda um ajuste posterior nos parâmetros do processo GMAW para estabilização junto ao feixe Laser, originando assim um processo inicial HLAW estável.

3.4.2 Ensaios Preliminares

A segunda macro etapa, denominada como Ensaios Preliminares, destina-se a realização de ensaios sobre chapa e análise de diversos parâmetros do processo HLAW para melhor compreensão da influência de cada um destes para a produtividade e qualidade do procedimento final. Para tanto, os ensaios foram realizados sobre chapas de 25,2 mm de espessura. A utilização de chapas espessas teve como objetivo impedir que a profundidade de penetração fosse limitada por alguma característica externa aos parâmetros de soldagem. Entre os parâmetros analisados, destacam-se a potência Laser, a utilização de diferentes gases de proteção (inerte e ativo), sentido de alimentação de arame, distância entre o feixe Laser e o arco elétrico e distância entre o foco do feixe Laser com a superfície da chapa. De forma paralela, esta etapa destina-se à realização de ensaios de soldagem LBW com valores de potência Laser similares aos utilizados nos ensaios HLAW, possibilitando assim uma comparação mecânica e metalúrgica entre os dois processos.

Como o trabalho está inserido nas aplicações com elevada penetração, foram utilizadas como parâmetros de comparação de potência Laser, valores de 5; 6; 7; 8; 9 e 10 kW, sendo que este e os demais valores utilizados de parâmetros modificados podem ser observados na Tabela 5.

Tabela 5 - Parâmetros modificados para análise de sua influência durante os ensaios preliminares. (Fonte: Autor)

Potência Laser (kW)	5 - 6 - 7 - 8 - 9 - 10
Gás de Proteção	Ar - 92% Ar 8% CO ₂
Sentido de Alimentação de Arame	<i>Leading Arc - Trailing Arc</i>
Distância entre Feixe Laser e Arco Elétrico (mm)	0 - 2 - 4
Distância entre o Foco do Feixe Laser e a Superfície da Chapa (mm)	0 - 5 - 10 - 15 - 20

A avaliação dos parâmetros mencionados proporcionará não somente a sua aplicação imediata em junta, mas principalmente o real entendimento dos parâmetros envolvidos no processo híbrido.

3.4.3 Ensaios de Análise Aplicada

Por fim, a terceira macro etapa, denominada como Ensaios de Análise Aplicada, destina-se à realização de procedimentos de soldagem aplicado em união de junta, avaliando o comportamento do processo e adequando os parâmetros e geometria da junta, proporcionando a elaboração de uma janela de operação para o processo HLAW. Ainda, almejando a comparação financeira e temporal entre os processos de soldagem GMAW e HLAW, foram realizados processos de soldagem GMAW em juntas de mesma espessura da utilizada pelo processo HLAW, alterando assim, quando necessário, somente valores de ângulo de abertura de junta, comprimento do nariz, e distância de abertura da junta.

3.4.4 Análises Experimentais

De forma geral, os cordões realizados, tanto pelos processos individuais quanto pelo processo híbrido foram analisados de acordo com sua superfície para controle de isenção de defeitos e descontinuidades na superfície, como porosidade, mordeduras e trincas, e avaliação de efeitos únicos decorrentes de cada parâmetro avaliado.

A verificação por meio de análise macrográfica foi realizada para todos os procedimentos realizados. Assim, fez-se necessária a preparação metalográfica das seções transversais dos corpos de prova. Para avaliação metalográfica, as amostras foram seccionadas transversalmente e preparadas metalograficamente. O processo consiste em uma sequência de lixamento com granulometria de 80, 120, 220, 400, 600, 800 e 1200 mesh. Após o lixamento, as amostras foram polidas com a utilização de abrasivo alumina de 1 μm , até se atingir uma superfície espelhada, com isenção de riscos. Por fim, as amostras são lavadas e atacadas quimicamente com o reagente Nital 2% (2 % HNO_3 em volume de etanol) por 3 segundos na superfície a ser analisada. Então a amostra foi lavada em álcool etílico e secada com algodão para ser analisada. As medições das geometrias da zona fundida foram realizadas com a

utilização do software ImageJ®. De forma análoga, para avaliação micrográfica, as etapas iniciais da preparação metalográfica mantiveram-se as mesmas, adicionando apenas a utilização do microscópio ótico Leica® DM 4000 MLED para avaliação microestrutural em todas regiões do cordão de solda.

Com o objetivo de avaliar o comportamento metalúrgico dos diferentes processos envolvidos, foram realizadas medições de microdureza das regiões de solda (zona fundida e zona termicamente afetada) de procedimentos selecionados para este fim, com o equipamento HMV Micro Hardness Tester, fabricado pela empresa Shimadzu. O procedimento de indentação utilizado foi com 200 kgf por 10 s, com espaçamento de 0,5 mm entre as indentações.

Ainda, com a utilização do Sistema de Aquisição Portátil – SAP, os procedimentos foram avaliados pelo seu comportamento elétrico pela tensão do arco elétrico, a fim de se comprovar a estabilidade e uniformidade do procedimento.

4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

Com o objetivo de facilitar entendimento e compreensão do leitor, optou-se por dividir os resultados e suas discussões em três seções: comparação geométrica e metalúrgica entre os processos LBW e HLAW sobre chapas, análise da influência dos parâmetros na soldagem HLAW, e por fim, a soldagem HLAW e comparação de produtividade entre os processos HLAW e GMAW em aplicação de união de junta.

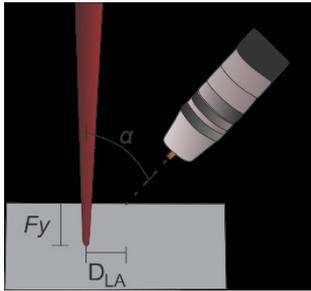
4.1 Comparação Geométrica e Metalúrgica dos Processos LBW e HLAW

Com o objetivo de uma comparação estática entre os processos de soldagem LBW e HLAW, o único parâmetro modificado para a realização dos ensaios foi a potência Laser utilizada. Dessa forma, foram realizados 12 ensaios, com 5; 6; 7; 8; 9 e 10 kW de potência Laser para os dois processos analisados. Os demais parâmetros seguem listados na Tabela 6.

Tabela 6 – Parâmetros fixos utilizados nos ensaios de comparação ente os processos de soldagem LBW e HLAW. (Fonte: Autor)

Gás de Proteção	92% Ar 8% CO ₂
Vazão de Gás de Proteção (L/min)	20
Corrente Média (A)	265
Corrente de Pulso (A)	450
Corrente de Base (A)	150
Tempo de Pulso (ms)	2,8
Tempo de Base (ms)	4,5
Velocidade de Arame (m/s)	8
Velocidade de Soldagem (cm/min)	100

Conforme destacado no subcapítulo 2.4.5.4, a influência dos parâmetros geométricos entre o feixe Laser e o arco elétrico nos processos HLAW. Assim, seguem ilustrados na Figura 33 tais parâmetros, destacando-se a distância de desfoque Laser (Fy), a distância entre o Laser e o arco (DLA) e o ângulo da tocha de soldagem MIG (α).



Distância de Desfoque do Feixe Laser - F_y (mm)	10,0
Distância entre Feixe Laser e Arco - D_{LA} (mm)	0,0
Inclinação da Tocha de Soldagem GMAW - α (°)	45

Figura 33 – Parâmetros geométricos do cabeçote de soldagem Laser e tocha de soldagem GMAW. (Fonte: Autor)

Após a realização dos ensaios, os cordões de solda foram analisados visualmente, constatando a presença ou não de descontinuidades de soldagem em sua superfície, tais como respingos, mordeduras e porosidade superficial. De acordo com o observado por Patschger *et al.* [145], a soldagem LBW autógena, quando realizada visando alta penetração (alta potência), comumente favorece a formação de protuberâncias arredondas na superfície externa do cordão de solda, efeito conhecido na literatura como *humpings*, resultantes de altas taxas de fluxo de material fundido no fim da poça de fusão. Como os ensaios realizados destinaram-se todos à alta penetração, indícios de formação de *humpings* foram observados em todos os cordões, em escala proporcionalmente crescente ao aumento da potência utilizada. De forma similar, os cordões depositados por soldagem HLAW foram analisados visualmente, porém não foram constatadas descontinuidades de soldagem. As superfícies dos cordões soldados pelos processos LBW e HLAW, ambos com 10 kW de potência Laser, podem ser observados na Figura 34, destacando as descontinuidades formadas.

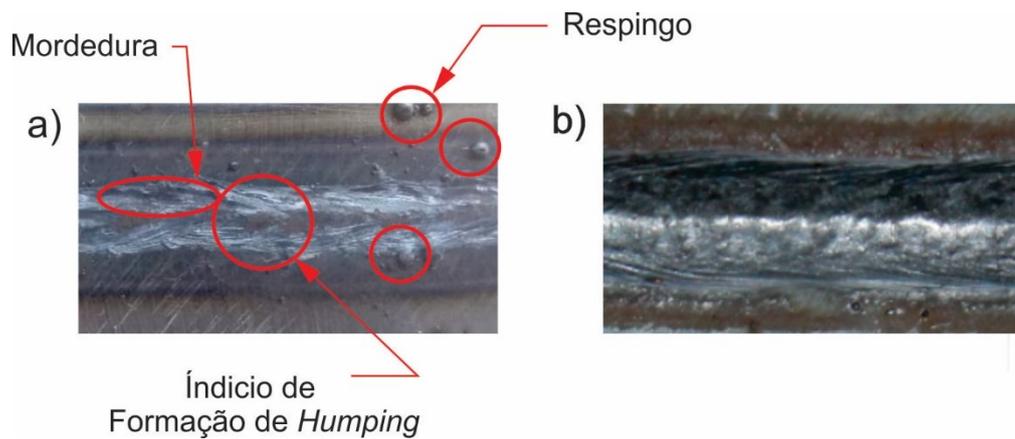


Figura 34 - Aspectos das superfícies dos cordões de solda obtidos pelos processos de soldagem LBW (a) e HLAW (b), destacando a formação de defeitos na soldagem Laser.

(Fonte: Autor)

A partir da análise visual das superfícies dos cordões, as amostras foram preparadas metalograficamente, possibilitando uma análise da geometria resultante do cordão para os 12 conjuntos de parâmetros analisados. Com o objetivo de exemplificar a morfologia dos cordões gerados pelos dois processos analisados, pode-se observar na Figura 35 as seções transversais dos processos de soldagem Laser e HLAW, ambos utilizando 8 kW de potência Laser.

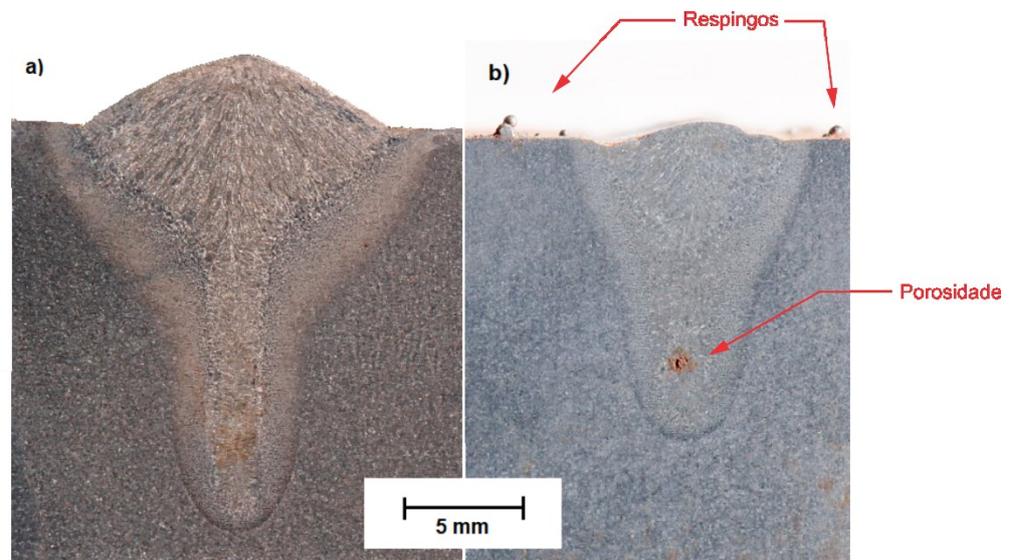


Figura 35 - Macrografias das seções transversais dos cordões de solda obtidos através dos processos de soldagem HLAW (a), e soldagem Laser (b), ambos com 8 kW de potência Laser e 1 m/min de velocidade de soldagem. (Fonte: Autor)

A formação de porosidade no interior da zona fundida ocorre normalmente na soldagem LBW quando se almeja elevada profundidade (*keyhole*), conforme descreve Poprawe [17]. Este fato deve-se à elevada densidade térmica, que gera sublimação de vapores metálicos, instabilidade e resfriamento rápido da poça de fusão. Conforme ilustram Buzaniv *et al.* [98], tanto nos procedimentos de soldagem LBW como de soldagem HLAW, a potência Laser se destaca como um dos principais parâmetros influenciados da profundidade de penetração alcançada. Ainda, a adição de uma fonte de calor por arco elétrico possibilitou um aumento da profundidade de penetração atingida para todos os níveis de potência Laser utilizada (Tabela 7).

Tabela 7 - Profundidades de penetração e largura atingidas pelos procedimentos de soldagem a Laser e HLAW com 5, 6, 7, 8, 9 e 10 kW de potência Laser e 1 m/min de velocidade de soldagem. (Fonte: Autor)

Potência Laser (kW)	Penetração (mm)		Largura (mm)	
	LBW	HLAW	LBW	HLAW
5	4,9	7,4	4,3	7,9
6	5,8	9,1	4,2	8,6
7	6,8	10,0	5,0	7,7
8	7,5	12,6	6,0	8,7
9	9,0	13,8	5,9	9,9
10	9,4	14,8	6,1	9,2

Esta relação direta pode ser observada na Figura 36.

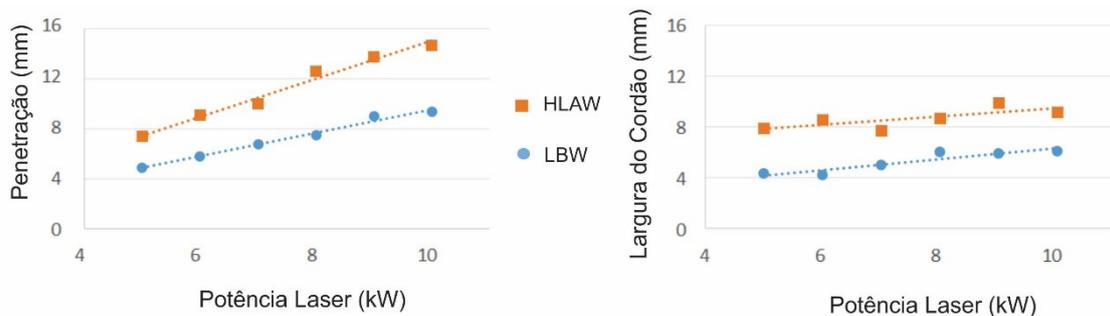


Figura 36 - Profundidades de penetração e largura atingidas pelos procedimentos de soldagem a Laser e HLAW com 5, 6, 7, 8, 9 e 10 kW de potência Laser. (Fonte: Autor)

Dentre estes, destaca-se o procedimento de soldagem HLAW com 10 kW de potência Laser, o qual alcançou a profundidade de penetração de 14,8 mm. A Figura 37 ilustra a macrografia da seção transversal da solda, evidenciando a elevada profundidade de penetração alcançada e ausência de descontinuidades e defeitos.



Figura 37 – Macrografia da seção transversal do cordão de solda HLAW com 10 kW de potência Laser e 1 m/min de velocidade de soldagem, alcançando 14,8 mm de profundidade de penetração. (Fonte: Autor)

De forma análoga, foi observado aumento na largura do cordão de solda depositado pelo processo HLAW quando comparado ao processo de soldagem LBW. Esta característica, entre outras, auxilia na redução da precisão geométrica necessária da junta, efeito conhecido na literatura como *bridgeability*.

Assim, o aumento de profundidade de penetração atingível deve ser considerado como uma notável contribuição do processo HLAW, auxiliando na possibilidade de uso de fontes Laser de menor potência, e conseqüentemente mais baratas, para a obtenção de soldas com mesma profundidade de penetração. Este fato justifica-se pela depressão causada na poça de fusão pela pressão do plasma do arco elétrico, reduzindo a espessura efetiva da chapa a ser soldada (Figura 38).

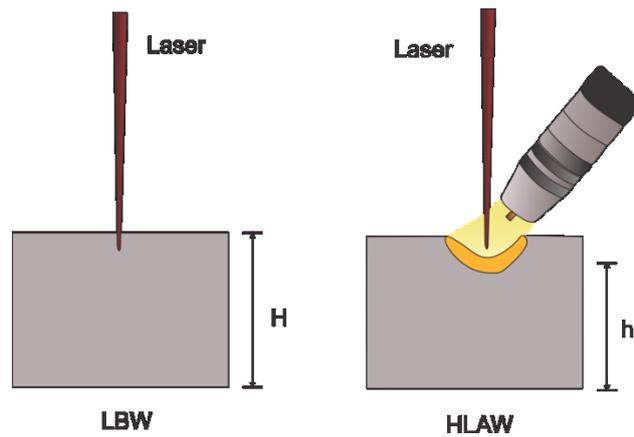


Figura 38 - Redução da espessura efetiva causada pelo pressão do plasma do arco elétrico no processo HLAW. (Fonte: Autor)

Após a análise geométrica das seções transversais das soldas obtidas, as microestruturas nas diferentes regiões das soldas foram analisadas. A partir de análise via microscópio óptico, foram analisadas as microestruturas presentes nas diferentes regiões de cada cordão de solda realizado pelos processos LBW e HLAW. Para exemplificar e proporcionar o melhor entendimento sobre as transformações metalúrgicas e as microestruturas resultantes, será proposto uma discussão mais detalhada sobre os cordões realizados com 10 kW de potência Laser para ambos os processos.

A Figura 39 ilustra de forma geral as microestruturas presentes do cordão produzido pelo processo LBW.

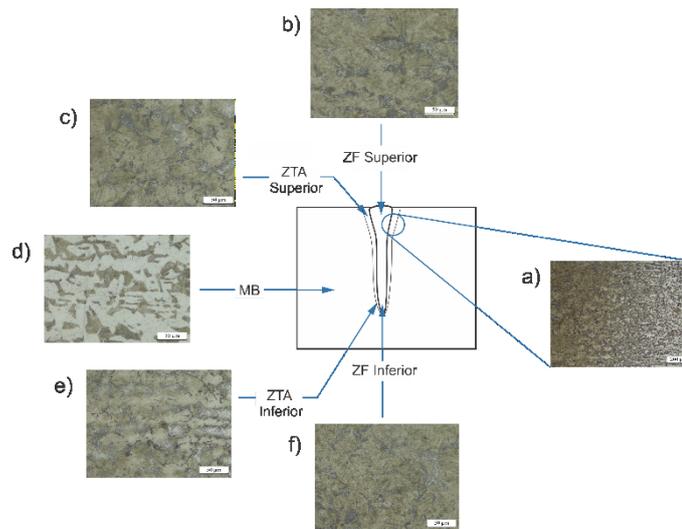


Figura 39 - Microestruturas observadas nas diferentes regiões do cordão de solda do processo LBW, a) transição entre zona fundida, zona termicamente afetada e metal de base, b) zona fundida superior, c) zona termicamente afetada superior, d) metal de base, e) zona termicamente afetada inferior, f) zona fundida inferior (Fonte: Autor)

De forma geral, condizente com o material utilizado, foi observado estruturas perlíticas e ferríticas no metal base.

Inicialmente, a partir da observação da região superior, é possível observar na zona termicamente afetada a presença de uma estrutura martensítica com grãos de bainita superior, estas últimas com formato de estrutura de espinha, evidenciados na Figura 40.

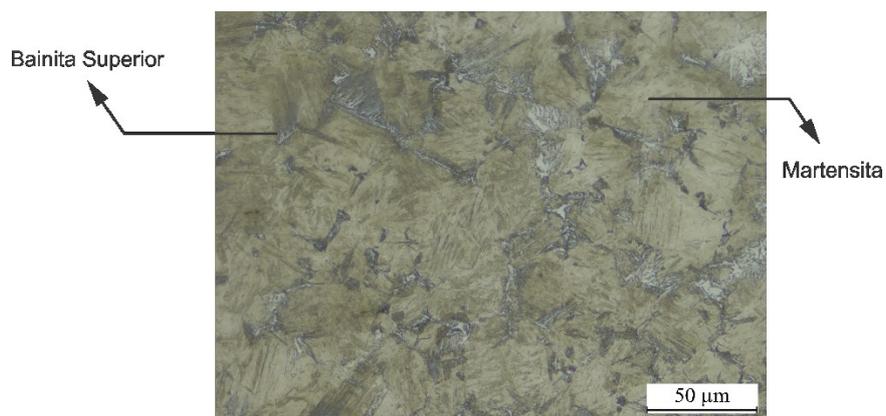


Figura 40 - Micrografia na zona termicamente afetada da região superior do cordão de solda do processo LBW. (Fonte: Autor)

Adentrando a zona fundida, observa-se uma estrutura similar à encontrada no início da ZTA, porém mais grosseira, justificada pela temperatura atingida pelo processo de soldagem mais elevada e maiores tempos de resfriamento da estrutura. (Figura 41).

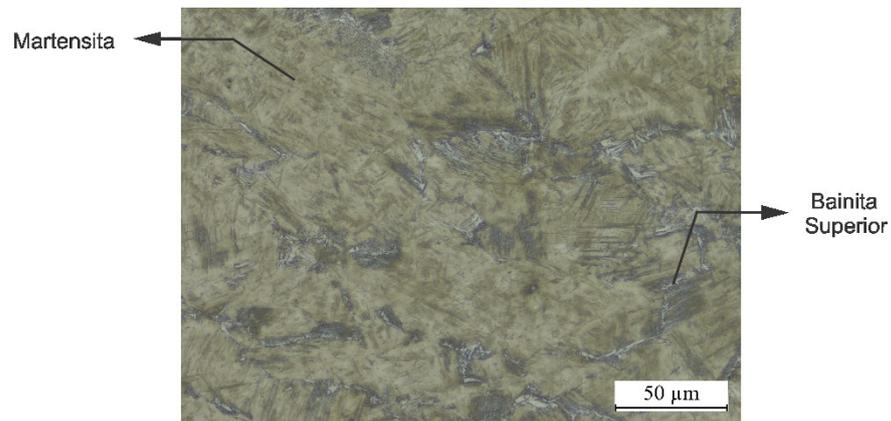


Figura 41 - Micrografia na zona fundida da região superior do cordão de solda do processo LBW. (Fonte: Autor)

Já na região inferior, o comportamento observado reflete ao mesmo tido na região superior, porém de forma mais severa. Nesta região, a temperatura mais elevada alcançou um campo de formação de componentes mistos, apresentando martensita e bainita, formada devido à transformação martensítica da austenita, combinada com ferrita pré-eutetóide (Figura 42).

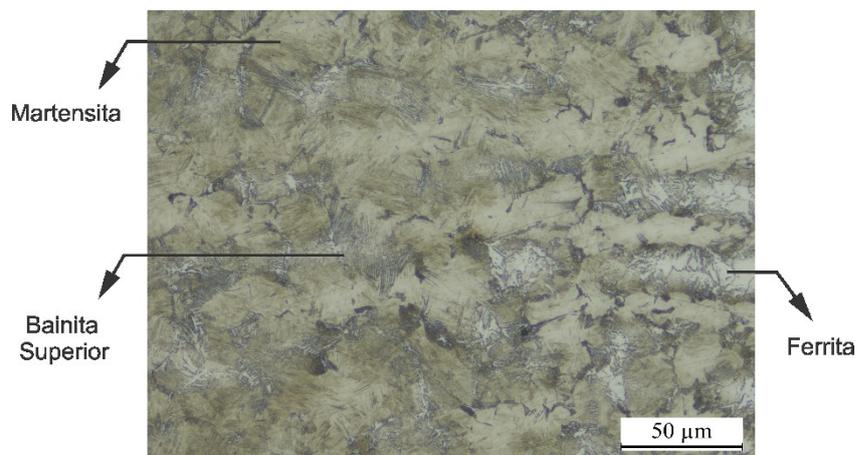


Figura 42 - Micrografia na zona termicamente afetada da região inferior do cordão de solda do processo LBW. (Fonte: Autor)

Na zona fundida da região inferior observa-se estruturas martensíticas com grãos de bainita superior, similar ao observado na zona fundida da região superior, porém com estrutura mais refinada (Figura 43).

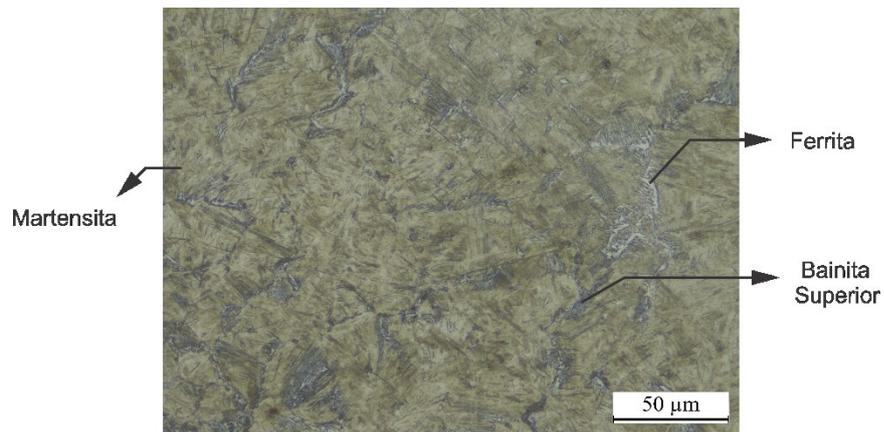


Figura 43 - Micrografia na zona fundida da região inferior do cordão de solda do processo LBW. (Fonte: Autor)

De forma análoga à análise do cordão produzido pelo processo LBW, a Figura 44 ilustra as microestruturas presentes no cordão produzida pelo processo HLAW.

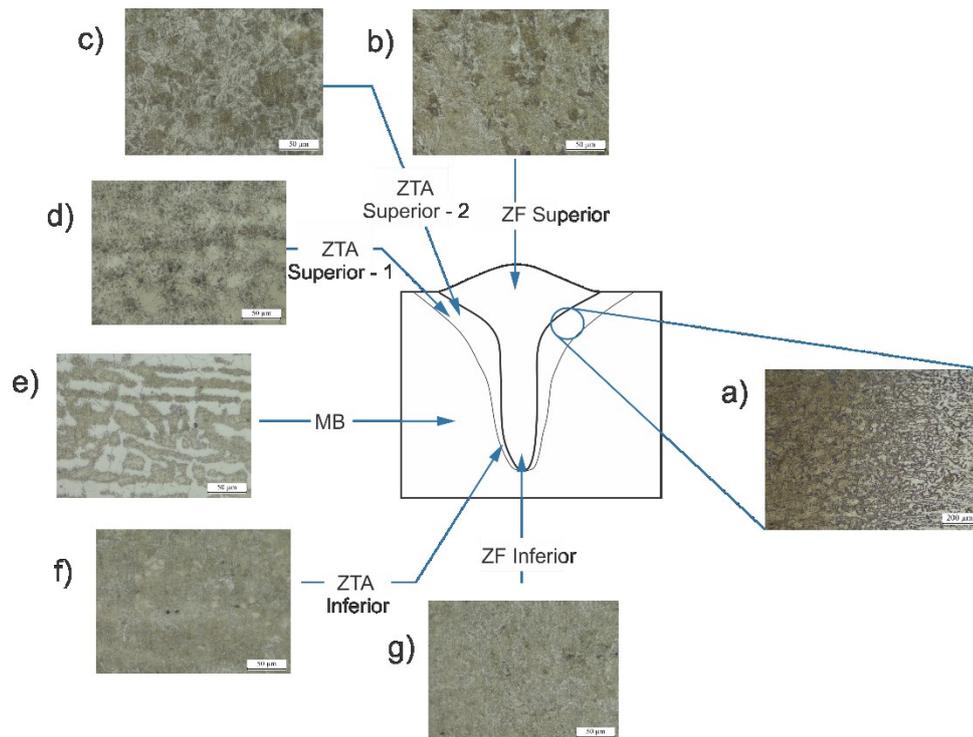


Figura 44 - - Microestruturas observadas nas diferentes regiões do cordão de solda do processo HLAW, a) transição entre zona fundida, zona termicamente afetada e metal de base, b) zona fundida superior, c) zona termicamente afetada superior próxima à zona fundida, d) zona termicamente afetada superior próxima à zona termicamente afetada, e) metal de base, f) zona termicamente afetada inferior, g) zona fundida interior (Fonte: Autor)

Na região superior, de forma mais clara e presente que no cordão de solda LBW, pode-se observar regiões distintas na zona termicamente afetada. De forma já esperada e profundamente relatada na literatura, o processo LBW, devido sua elevada densidade de potência [17], permite a formação de ZTA mínimas, quando comparado a processos de soldagem a arco. A Figura 45 ilustra a relação analisada.

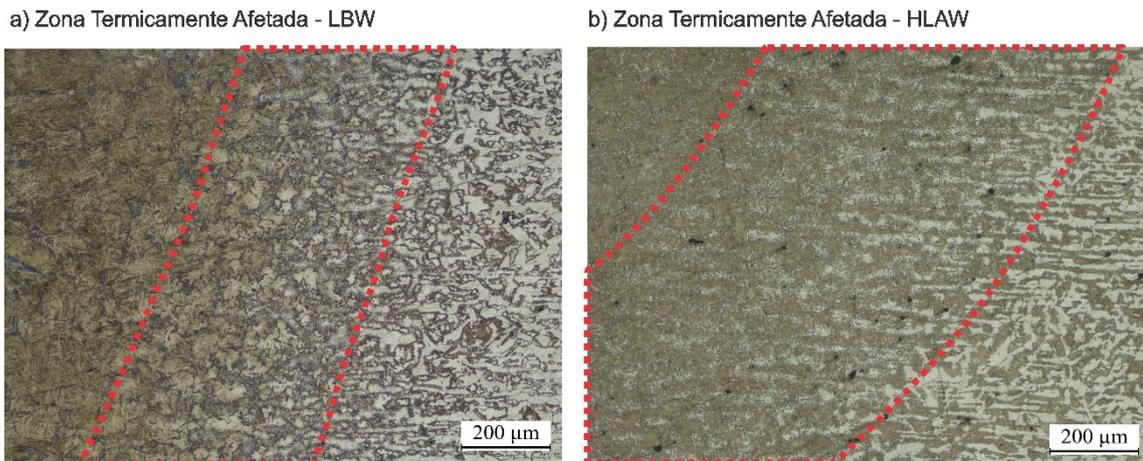


Figura 45 - Zonas termicamente afetadas dos cordões de solda dos processos a) LBW, e b) HLAW. (Fonte: Autor)

No início da ZTA, região mais distante da ZF, as estruturas perlíticas e ferríticas apresentam-se de forma refinada, além do crescimento de partículas de cementita, fruto de recristalização devido ao aquecimento gerado pela solda (Figura 46).

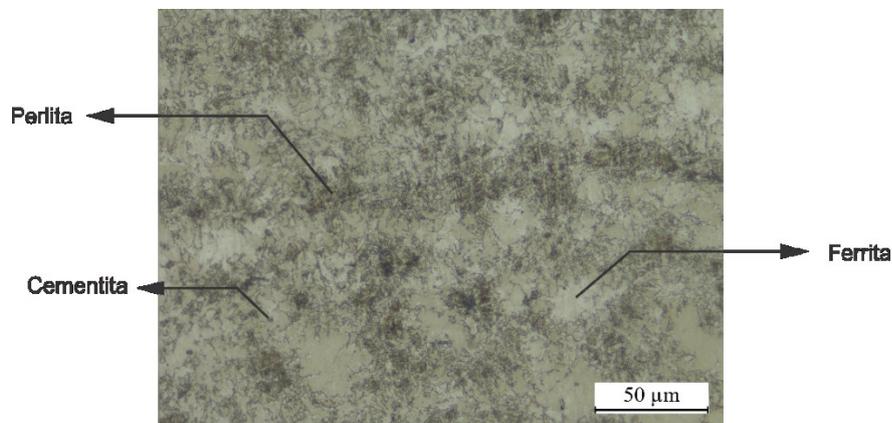


Figura 46 - Micrografia na zona termicamente afetada próxima ao substrato da região superior do cordão de solda do processo HLAW. (Fonte: Autor)

Avançando em direção à ZF, observa-se já a formação de ferritas, além da presença de perlitas remanescentes à estrutura original (Figura 47).

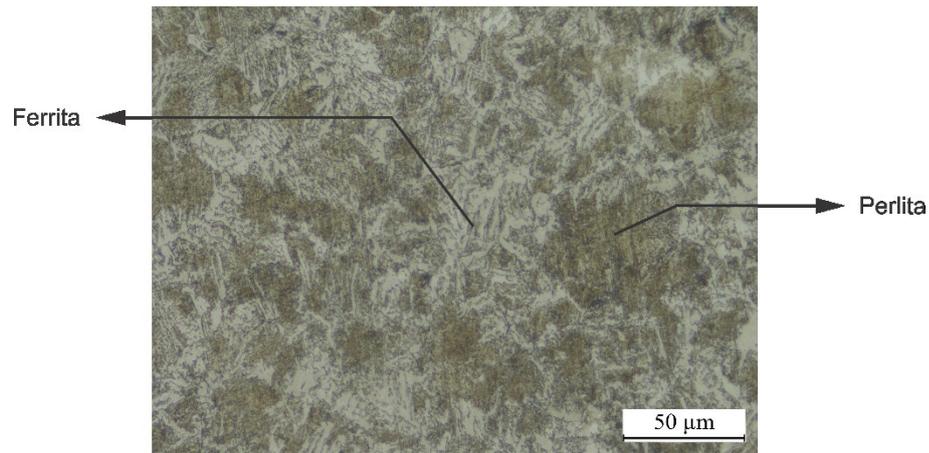


Figura 47 - Micrografia na zona termicamente afetada próxima a zona fundida da região superior do cordão de solda do processo HLAW. (Fonte: Autor)

Já no interior da ZF na zona região superior (Figura 48), observa-se a presença de martensita revenida, ferrita, bainita e perlita refinada quando comparada à região superior do cordão de solda LBW, microestruturas resultantes de um processo de resfriamento mais lento ou revenido devido aos diferentes ciclos térmicos das duas fontes de calor presentes.

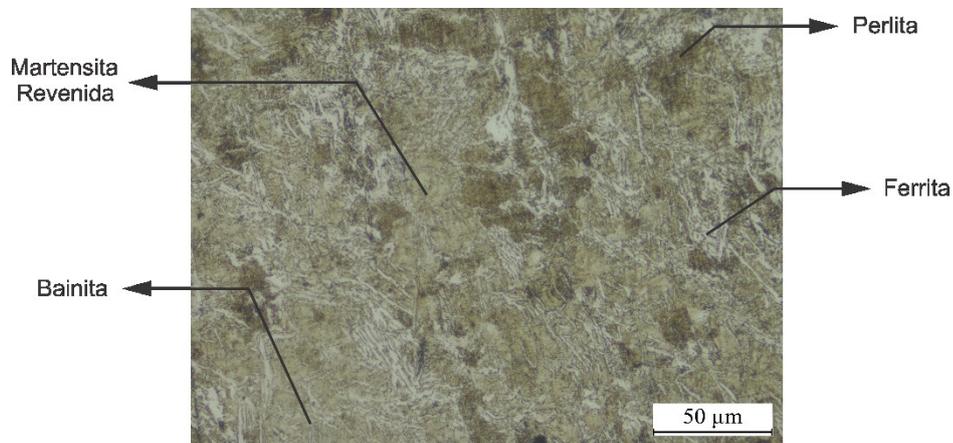


Figura 48 - Micrografia na zona fundida da região superior do cordão de solda do processo HLAW. (Fonte: Autor)

Na zona termicamente afetada da região inferior, observa-se a presença de estruturas de martensita revenida e bainita, ocasionadas por um processo de recristalização (Figura 49).

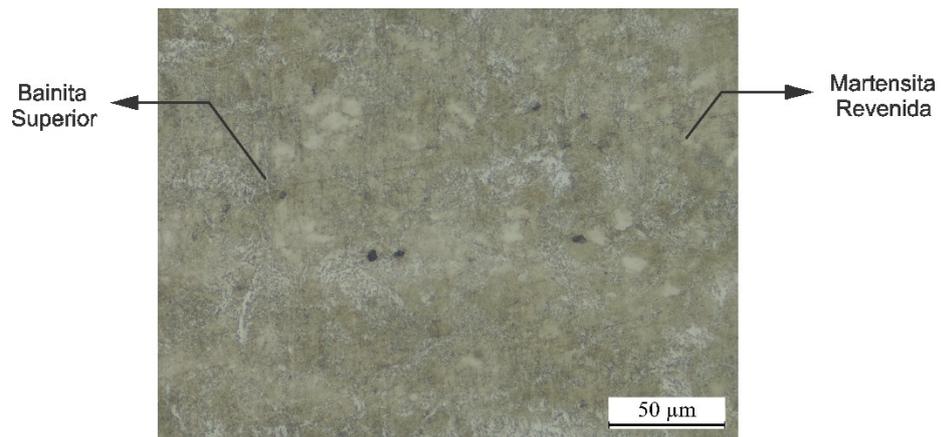


Figura 49 - Micrografia na zona termicamente afetada da região inferior do cordão de solda do processo HLAW. (Fonte: Autor)

Por fim, na zona fundida da região inferior é possível observar a presença das mesmas microestruturas, martensita e bainita superior, porém de forma mais refinada (Figura 50).

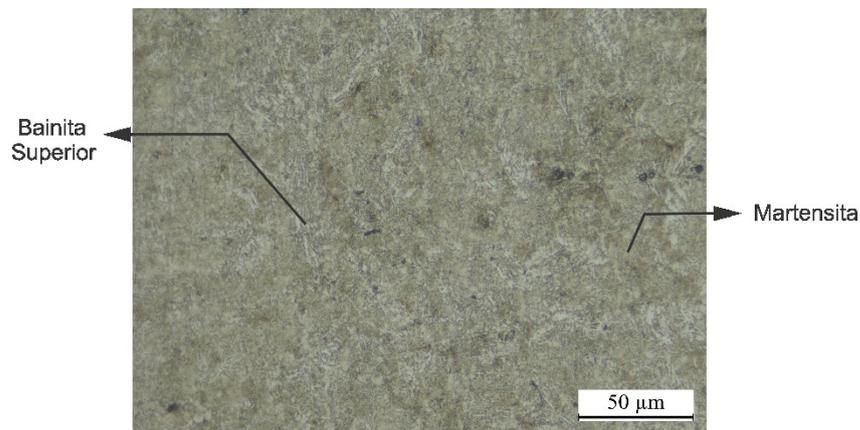


Figura 50 - Micrografia na zona fundida da região inferior do cordão de solda do processo HLAW. (Fonte: Autor)

Almejando a análise do efeito da hibridização na soldagem de alta penetração, as medições de microdureza e análises de microestruturas acima mencionadas foram realizadas nas regiões superior (1 mm abaixo da superfície) e inferior (1 mm acima da penetração máxima), conforme ilustra a Figura 51.

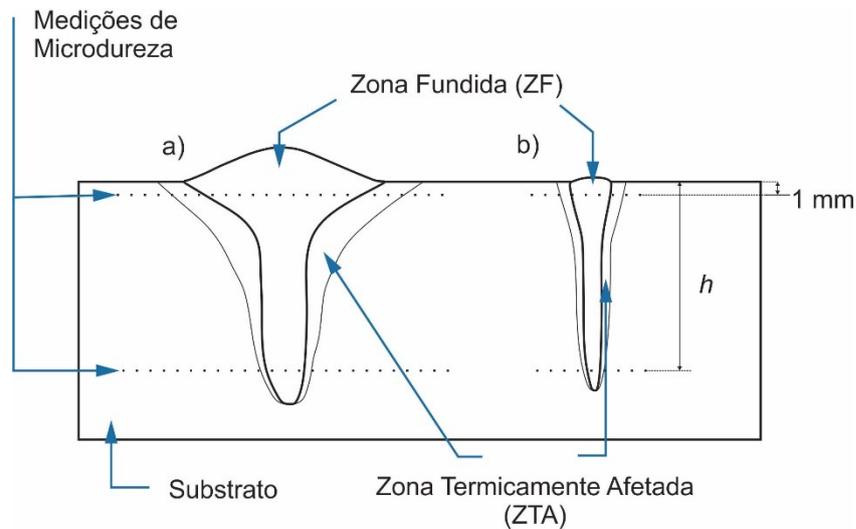


Figura 51 - Esquemático das regiões de medição de microdureza nas seções transversais das amostras soldadas pelos processos de soldagem a) HLAW, e b) LBW. (Fonte: Autor)

Conforme a penetração atingida varia com a potência Laser utilizada, a distância entre a superfície e a linha de medições de microdureza da região inferior analisada não se manteve a mesma para todos os ensaios. Assim, a distância h (Figura 51) utilizada para os ensaios segue na Tabela 8, de acordo com a potência Laser parametrizada.

Tabela 8 – Distância entre a superfície da peça e os locais de medição de microdureza nas regiões inferiores dos cordões de soldagem LBW e HLAW. (Fonte: Autor)

Potência Laser (kW)	Distância h (mm)	
	LBW	HLAW
5	3,9	6,4
6	4,8	8,1
7	5,8	9,0
8	6,5	11,6
9	8,0	12,8
10	8,4	13,8

Os perfis de microdureza das soldas realizadas pelos processo LBW e HLAW, ambos com 10 kW de potência Laser, podem ser observados nas Figura 52 e Figura 53, respectivamente. Os demais perfis de microdureza, observados nas soldas LBW e HLAW com potências Laser de 5, 6, 7, 8 e 9 kW seguem dispostos no Apêndice A.

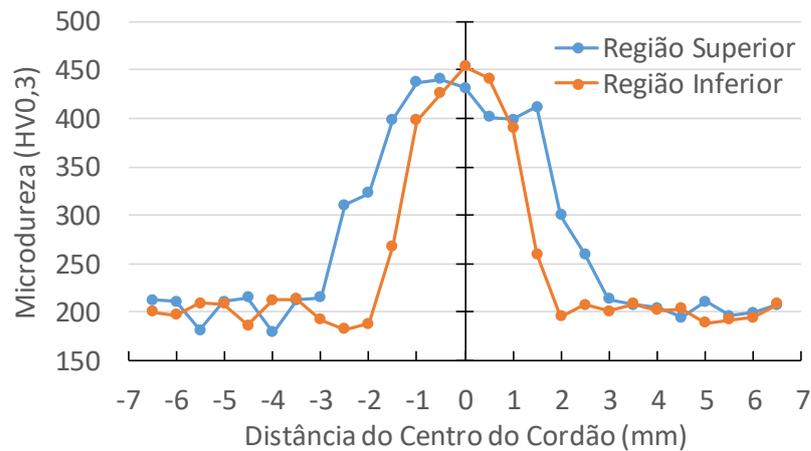


Figura 52 - Perfil de microdureza das regiões superior e inferior da amostra soldadas pelo processo LBW, com 10 kW de potência Laser. (Fonte: Autor)

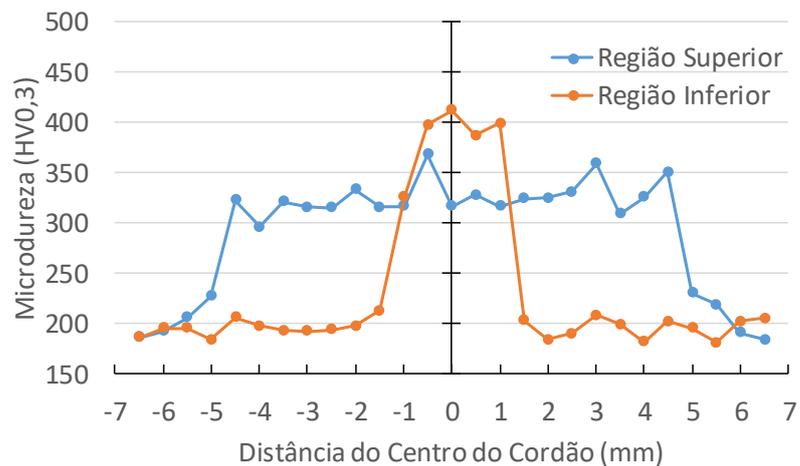


Figura 53 - Perfil de microdureza das regiões superior e inferior da amostra soldadas pelo processo HLAW, com 10 kW de potência Laser. (Fonte: Autor)

De forma geral, observa-se que as amostras produzidas pelo processo LBW apresentam microdureza similares nas regiões superior e inferior, com valores aproximados a 450 HV, enquanto que as amostras produzidas pelo processo HLAW apresentam valores próximos a 350 HV na região superior, e valores próximos a 450 HV na região inferior da solda.

Conforme indica Deschuyteneer *et al.* [146], a velocidade de resfriamento possui forte impacto no refino de grãos, o que se traduz diretamente no aumento da microdureza do material resfriado subitamente. Os valores de microdureza observados nas soldas realizadas pelo

processo LBW sugerem que a taxa de resfriamento foi aproximadamente igual para todas as regiões da solda. De forma análoga, pode-se observar uma redução da microdureza nas regiões superiores das soldas realizadas pelo processo HLAW. Segundo Churiaque *et al.* [62], a microestrutura formada durante o processo HLAW desenvolve-se de forma diferente devido aos diferentes ciclos térmicos impostos pelas duas fontes de calor. Notadamente verifica-se um resfriamento retardado nas regiões superiores dos cordões de soldas realizados pelo processo HLAW.

4.2 Influência dos Parâmetros na Soldagem HLAW

A seguir, são apresentados os resultados de ensaios nos quais foram variados alguns parâmetros da soldagem HLAW para destacar sua influência na qualidade das soldas produzidas.

4.2.1 Posição da Tocha de Soldagem GMAW

De forma já conhecida na literatura para o processo de soldagem GMAW, a orientação da tocha, seja puxando ou empurrando, análogo às orientações *leading arc* e *trailing arc* do processo HLAW, influi diretamente sobre as forças atuantes na poça de fusão e consequentemente na geometria final da zona fundida [147].

Semelhando ao observado e ilustrado na literatura no processo GMAW, o processo de soldagem HLAW também sofre uma grande influência da orientação de alimentação de arame. Tendo em vista que essa se faz uma característica inerente ao processo GMAW, pode-se concluir que essa também é decorrente dos mesmos fatores do processo individual no HLAW.

Almejando realizar uma comparação das duas orientações, foram realizados ensaios de soldagem HLAW com 5; 6; 7; 8; 9 e 10 kW utilizando as configurações *leading arc* e *trailing arc*.

Após a análise visual e preparação metalográfica, analisou-se a geometria da solda. Assim, a Figura 54 ilustra a morfologia típica de cada orientação de soldagem, exemplificando a partir da utilização de 6 kW de potência Laser para ambos os processos.

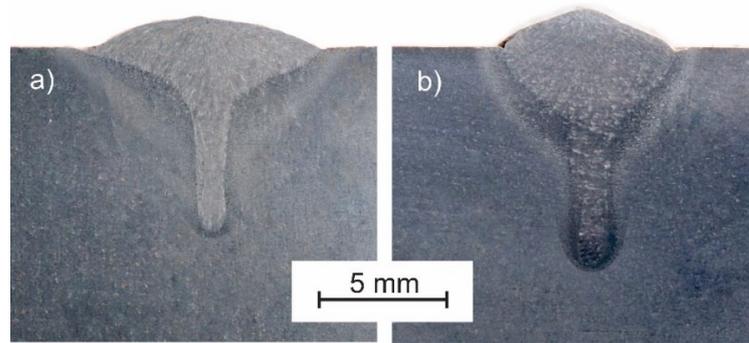


Figura 54 - Macrografia de uma solda feita com a) orientação *trailing arc* e b) orientação *leading arc*, ambos com 6 kW de potência Laser. (Fonte: Autor)

É possível observar que a morfologia entre as orientações de soldagem distingue-se principalmente pela largura da solda e pela profundidade de penetração. Em vista disso, a largura da solda e a profundidade de penetração das amostras foram mensuradas, conforme ilustra a Figura 55.

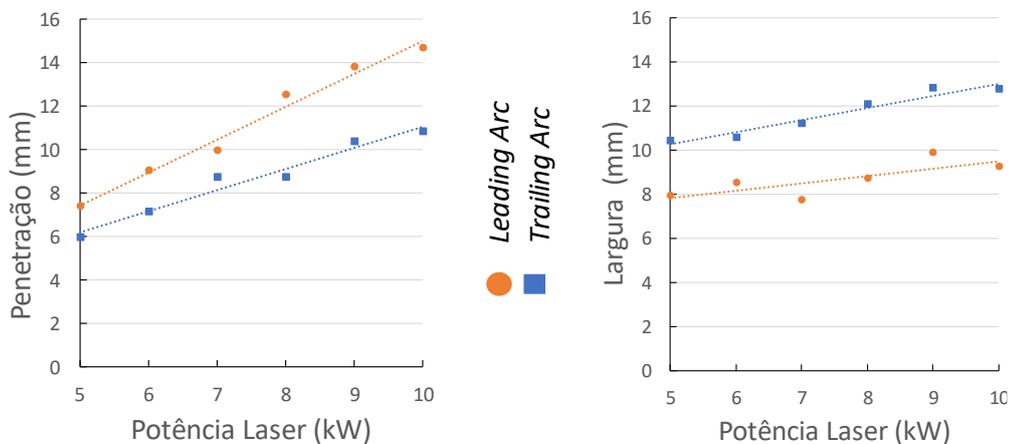


Figura 55 - Gráfico ilustrando os resultados da a) profundidade de penetração da solda e b) largura de solda para as duas orientações estudadas: *leading arc* e *trailing arc* variando de 5 kW até 10 kW a potência do Laser. (Fonte: Autor)

É perceptível que há um aumento de largura e profundidade de penetração com o crescente aumento da potência do Laser para ambas orientações de processo. Entretanto, o processo utilizando *leading arc* como orientação apresentou uma maior profundidade de penetração relativa, o que sugere que esta disposição de processo é benéfica quando se deseja

obter altas penetrações, possibilitando ainda atingir profundidades de penetração satisfatórias com o uso de potências Laser menores. Em contrapartida, a orientação *trailing arc* obteve maiores valores de larguras de solda, o que sugere que em cenários onde uma abertura indesejada do chanfro seja um aspecto crítico, esta orientação pode ser considerada mais vantajosa já que torna o processo mais robusto, diminuindo a interferência de possíveis irregularidades geométricas.

As diferenças nos perfis geométricos das soldas HLAW pelas duas configurações está relacionada a dois aspectos. O primeiro aspecto deve-se, conforme discutido anteriormente, pela pré-aquecimento metal gerado pelo arco elétrico na configuração *leading arc*. O segundo, referente às características próprias do processo individual GMAW, que processos de soldagem GMAW tendem a formar poças de fusão com menor penetração e maior largura na configuração empurrando, enquanto tendem a formar poças de fusão com maior penetração e menor largura na configuração puxando (Figura 56). Estas configurações do processo individual GMAW, quando aplicados na soldagem HLAW, relacionam-se às configurações *trailing arc* e *leading arc*, respectivamente.

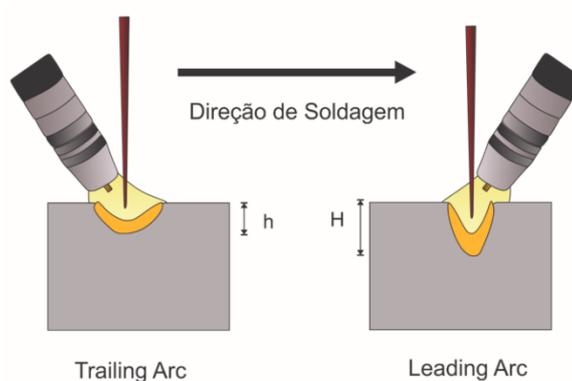


Figura 56 - Efeito da orientação de direção de soldagem GMAW na depressão causada na poça de fusão, e conseqüentemente, na penetração atingida. (Fonte: Autor)

Em relação ao perfil de microdureza analisado, os resultados da linha próxima a superfície estão de acordo com a largura da solda. Dessa forma, as amostras soldadas com orientação *trailing arc* resultaram em uma região mais extensa de dureza elevada, devida a sua maior largura da solda. Ainda, não foram observadas variações significantes nos valores de microdureza da zona fundida e da zona termicamente afetada pelo calor nas duas orientações

analisadas. A Figura 57 exemplifica o perfil de microdureza das regiões superior e inferior da solda, regiões com maior influência do arco e do Laser, respectivamente, das amostras utilizando 8 kW de potência Laser e ambas orientações de processo.

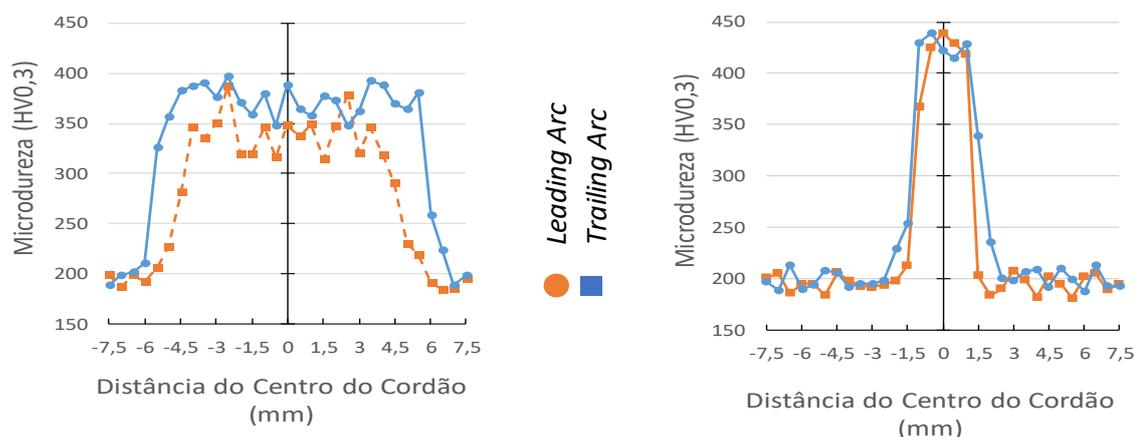


Figura 57 - Perfil de microdureza das regiões superior (esquerda) e inferior (direita) das soldas HLAW realizadas com orientação *leading arc* e *trailing arc*. (Fonte: Autor)

De forma análoga, os perfis de microdureza da linha inferior, ilustrados na Figura 57-b, apresentam características semelhantes para ambas as orientações de soldagem utilizadas. Embora semelhantes entre si, é notável a redução da microdureza da linha superior quando comparada à linha inferior da zona fundida.

4.2.2 Gás de Proteção

As propriedades físicas e químicas dos gases como potencial de ionização, condutividade térmica, potencial de oxidação e tensão superficial, entre outras, definem as principais características operacionais do arco de soldagem e as propriedades das soldas. Variações dos parâmetros de soldagem como tensão e corrente, entre outros, modifica a geometria do cordão de solda, e são intensamente influenciados pela composição química do gás de proteção [3].

Com o objetivo de possibilitar uma comparação entre misturas comerciais de gases, foram selecionados como gases de proteção o Ar e mistura de 92% Ar 8% CO₂. Utilizando os

dois gases mencionados, foram realizados ensaios de soldagem com potência Laser de 5 a 10 kW, com incremento de 1 kW.

A presença de CO₂ na mistura, devido à sua característica de gás ativo, auxilia na promoção de uma oxidação controlada na superfície da chapa durante o arco, contribuindo para a formação dos pontos catódicos, gerando assim a facilidade na manutenção do arco e consequentemente na sua estabilidade e regularidade do cordão de solda. Esta é, entre outras, um motivo pelo qual dificilmente emprega-se Ar puro na soldagem GMAW. Esta diferença na instabilidade do arco durante o processo HLAW pode ser observada através da aquisição da tensão do arco, ilustrada na Figura 58.

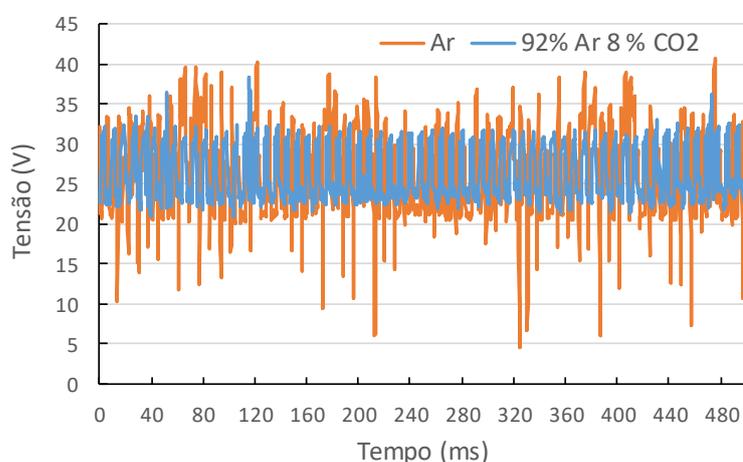


Figura 58 - Oscilograma de corrente de tensão do processo GMAW utilizando Ar e 92% Ar 8% CO₂ como gás de proteção. (Fonte: Autor)

Corroborando ainda a dificuldade na estabilidade na utilização de Ar como gás de proteção no processo HLAW, foram observados no final de todos os cordões de solda a formação de uma região esbranquiçada, sugerindo a formação insuficiente de pontos catódicos. A comparação das regiões finais dos cordões utilizando os dois gases pode ser observado na Figura 59.

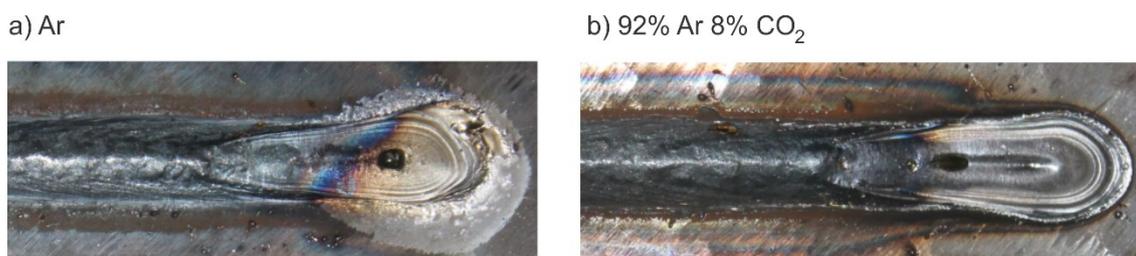


Figura 59 - Superfície do final dos cordões de solda realizados pelo processo HLAW com gás de proteção (a) Ar, (b) 92% Ar 8% CO₂. (Fonte: Autor)

Apesar dos princípios de formação de pontos catódicos, manutenção e estabilidade do arco observados, os procedimentos empregando a mistura 92% Ar 8% CO₂ como gás de proteção apresentaram maiores valores de penetração atingidos para todas as potências utilizadas. Em contrapartida, a largura do cordão não apresentou aumentos significativos com o aumento da potência Laser utilizada (Figura 60).

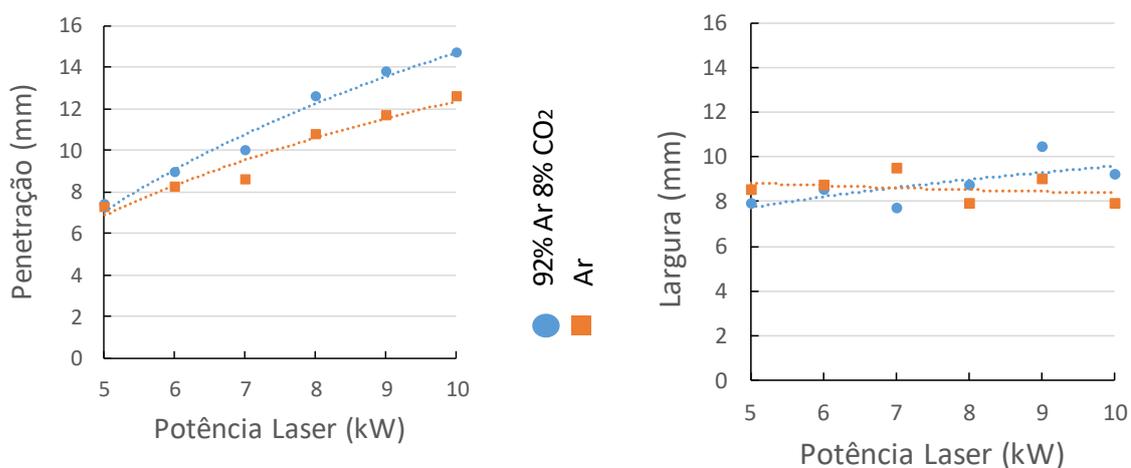


Figura 60 - Gráfico ilustrando os resultados da a) profundidade de penetração da solda e b) largura de solda, utilizando Ar e 92% Ar 8% CO₂ como gás de proteção. (Fonte: Autor)

Os valores numéricos obtidos de penetração e largura dos cordões podem ser observados também na Tabela 9.

Tabela 9 - Penetração e largura dos cordões obtidos pelo processo HLAW utilizando 92% Ar 8% CO₂, e Ar como gases de proteção. (Fonte: Autor)

Potência Laser (kW)	92% Ar 8% CO ₂		Ar	
	Penetração (mm)	Largura (mm)	Penetração (mm)	Largura (mm)
5	7,4	7,9	7,3	8,5
6	9,0	8,5	8,3	8,7
7	10,0	7,7	8,6	9,5
8	12,6	8,7	10,8	7,9
9	13,8	10,4	11,7	9,0
10	14,8	9,2	12,6	7,9

4.2.3 Distância entre o ponto focal do feixe Laser e a superfície da chapa

Conforme discutido anteriormente, em aplicações de soldagem em materiais com elevado índice de reflexibilidade, opta-se por utilizar o ponto focal do feixe Laser acima da superfície da peça (Figura 61-a), afim que caso ocorra a reflexão de uma quantidade significativa de energia, esta esteja em sentido divergente e não apresente perigo ao sistema óptico do cabeçote de soldagem Laser, ao contrário do que ocorreria com o foco do feixe Laser abaixo da superfície da peça (Figura 61-b).

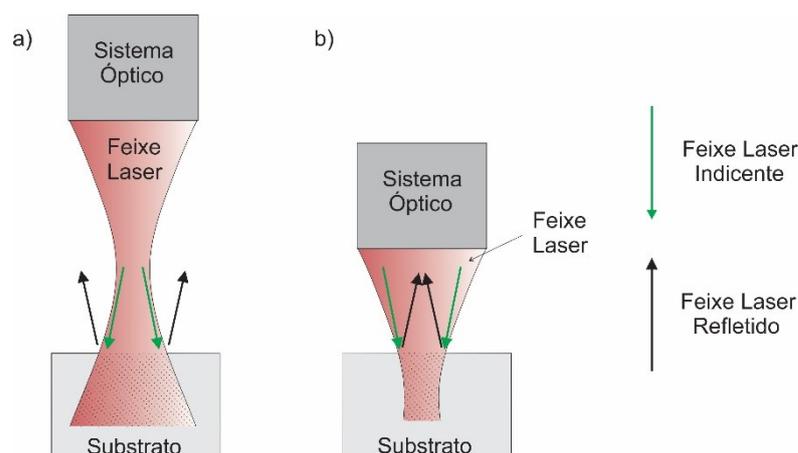


Figura 61 - Posição do ponto focal do Laser (a) acima, e (b) abaixo da superfície da peça a ser soldada. (Fonte: Autor)

Alguns autores citam, para diferentes cenários, valores otimizados em torno de - 10 mm. Assim, foram realizados ensaios com os gases de proteção 92% Ar 8% CO₂, e Ar com distâncias de desfoque de 0 a -20 mm, com incremento de -5 mm. Os valores de penetração e largura obtidos podem ser observados na Tabela 10.

Tabela 10 - Valores de penetração e largura do cordão obtidos atingidos pelo processo HLAW variando a distância entre o ponto focal do feixe Laser e a superfície da peça a ser soldada de 0 até 20 mm, com utilização dos gases de proteção Ar, e 92% Ar 8% CO₂. (Fonte: Autor)

Fy (mm)	Penetração (mm)		Largura (mm)	
	92% Ar 8% CO₂	Ar	92% Ar 8% CO₂	Ar
0	8,1	9,7	9,9	9,8
-5	10,6	10,6	8,8	8,8
-10	14,8	12,6	9,2	7,9
-15	9,4	13,9	10,4	9,5
-20	9,5	10,3	9,5	9,4

A partir da análise da Figura 62, pode-se obter valores otimizados de distância entre o ponto focal do feixe Laser e a superfície da chapa Laser em torno de -10 mm para as duas misturas gasosas utilizadas, de acordo com o observado na literatura. As larguras dos cordões de solda obtidas evidenciam um comportamento relativamente constante em relação à variação da distância de desfoque do feixe Laser.

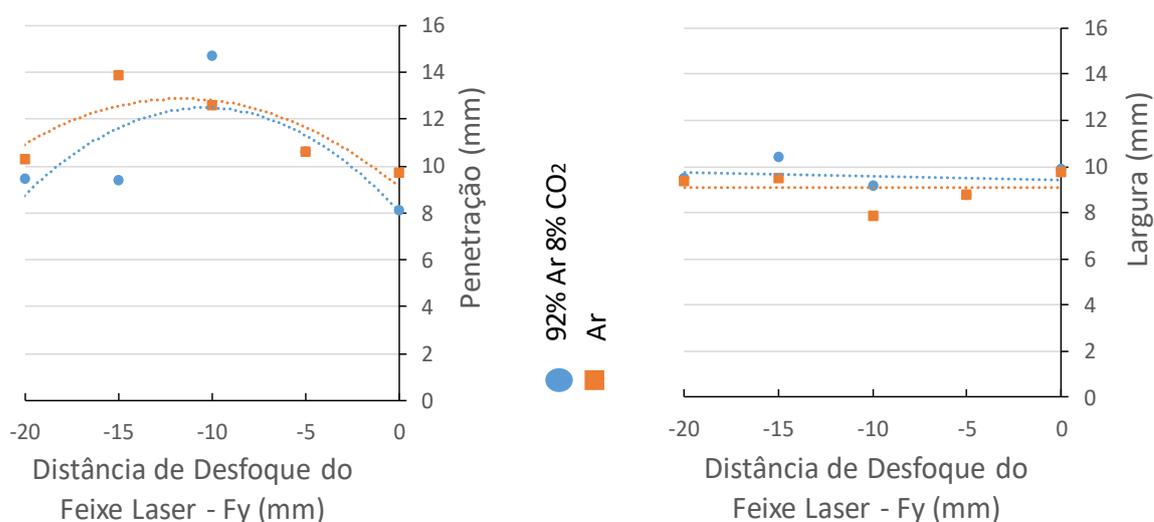


Figura 62 - Valores de penetração de cordão obtidos pelo processo HLAW variando a distância entre o ponto focal do feixe Laser e a superfície da peça a ser soldada de 0 até 20 mm, com utilização dos gases de proteção Ar, e 92% Ar 8% CO₂. (Fonte: Autor)

4.2.4 Distância entre o Feixe Laser e o Arco Elétrico

A distância entre o feixe Laser e arco (DLA) influi diretamente sobre a interação entre as duas fontes de calor presentes, assim como determina aspectos geométricos da poça fundida.

A fim de se observar os efeitos da variação da DLA, foram elaborados ensaios com variação de -4; -2; 0 +2; e +4 mm (Figura 63). Os ensaios utilizando DLA negativas não puderam ser realizados, devido à ineficiência de abertura e estabilidade do arco elétrico, além da impossibilidade em manter o mesmo *stick-out* dos parâmetros estabelecidos.

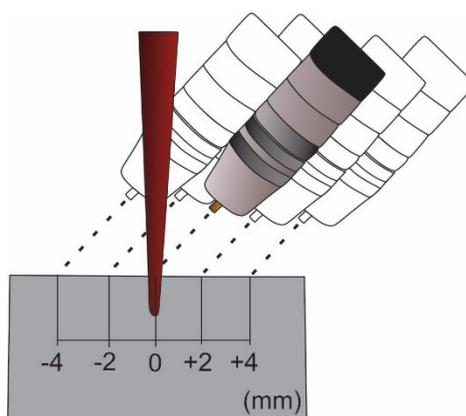


Figura 63 - Disposição geométrica utilizada para os ensaios de soldagem HLAW, evidenciando as diferentes distâncias entre feixe Laser e arco elétrico - DLA. (Fonte: Autor)

A Figura 64 ilustra as seções transversais obtidas para os ensaios com DLA 0; +2 e +4 mm. É possível observar a formação de porosidade quando utilizado DLA +4 mm. A formação deste defeito é devida ao fato que aumentando a distância entre o feixe Laser e o arco elétrico, os processos passam a se comportar cada vez mais como processos individuais, evidenciando suas características próprias, como a formação de porosidade na soldagem LBW de elevada penetração.

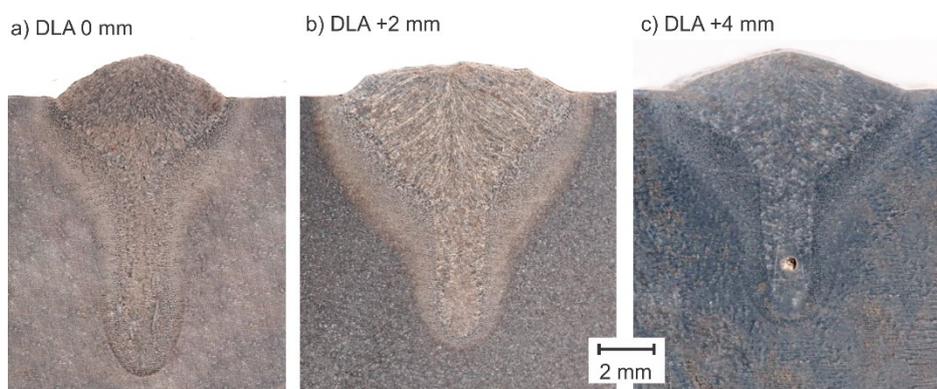


Figura 64 - Macrografias das seções transversais realizadas pelo processo HLAW com distância entre feixe Laser e arco elétrico (DLA) de 0; +2 e +4 mm. (Fonte: Autor)

A partir das seções transversais dos corpos de prova soldados, foram obtidos os valores de profundidade de penetração e largura, permitindo uma análise da correlação entre os

parâmetros DLA e os resultados geométricos. Os valores obtidos seguem na Tabela 11 e podem ser melhor comparados na Figura 65.

Tabela 11 - Valores de profundidade de penetração e largura obtidos através da variação da distância entre feixe Laser e arco elétrico (DLA). (Fonte: Autor)

DLA (mm)	Penetração (mm)	Largura (mm)
0	12,6	7,9
+2	9,3	9,3
+4	8,6	10,8

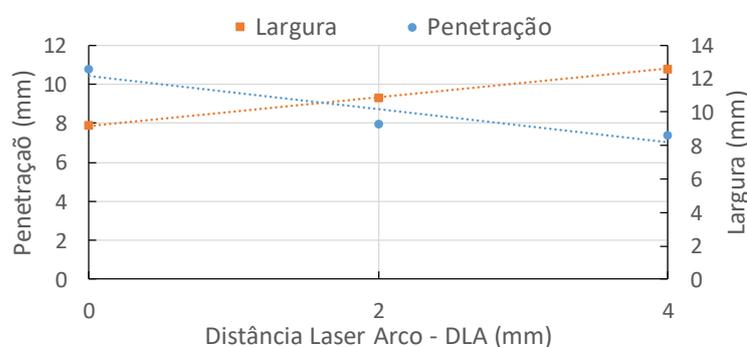


Figura 65 - Relação de penetração/largura com a distância entre feixe Laser e arco elétrico (DLA) na soldagem HLAW. (Fonte: Autor)

A partir da análise da Figura 65, pode-se observar claramente um comportamento de redução de penetração e aumento da largura do cordão obtido com o aumento da DLA. Esse fato justifica-se provavelmente pela forte interação térmica entre as duas fontes de calor quando próximas (Figura 66-a), auxiliando na condução térmica e atingindo maiores profundidades de penetração, ao contrário do que ocorre quando a distância entre o feixe Laser e arco é aumentada (Figura 66-b).

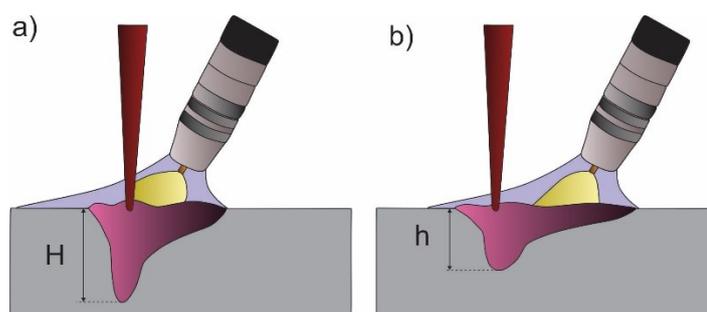


Figura 66 - Influência do aumento da distância entre feixe Laser e arco elétrico na profundidade e largura da poça de fusão na soldagem HLAW. (Fonte: Autor)

A interação entre o feixe Laser e o arco elétrico, conforme discutido em todo o trabalho, é demasiadamente complexa e os resultados obtidos para um certo cenário de parâmetros não devem ser considerados como incontestáveis para utilização de outras fontes Laser, processos de soldagem a arco, vertentes do processo GMAW, gases de proteção, etc.

4.3 Soldagem HLAW em Junta

De forma inicial, foram estabelecidos critérios geométricos fixos para a junta a ser soldada pelo processo HLAW, conforme interesse e projetos internos do laboratório. Essas características se traduzem na espessura da chapa em 15 mm e utilização de um nariz com 10 mm de comprimento.

Devido ao comprimento do nariz da junta ser menor do que a maior penetração alcançada durante os ensaios de análise sobre chapa, o conjunto de parâmetros selecionados para os testes iniciais foram aqueles que, sob condições específicas, atingiram penetração próxima àquela buscada na aplicação em junta, mesmo um resultado não idêntico sendo esperado nestes dois cenários distintos.

Portanto, admitiu-se como parâmetros iniciais os listados na Tabela 12.

Tabela 12 – Parâmetros iniciais utilizados para soldagem HLAW em junta. (Fonte: Autor)

Corrente Média (A)	265
Corrente de Pulso (A)	450
Corrente de Base (A)	150
Tempo de Pulso (ms)	2,8
Tempo de Base (ms)	4,5
Velocidade de Arame (m/s)	8
Velocidade de Soldagem (cm/min)	100
Potência Laser (kW)	8

A partir do conjunto de parâmetros de entrada selecionados, foi necessária a avaliação do ângulo do bisel coerente ao processo proposto, tendo como base o seu cordão realizado sobre chapa. Conforme critérios geométricos fixos do chanfro desejado, foi proposta uma área que acomodasse o reforço obtido, conforme ilustra a Figura 67.

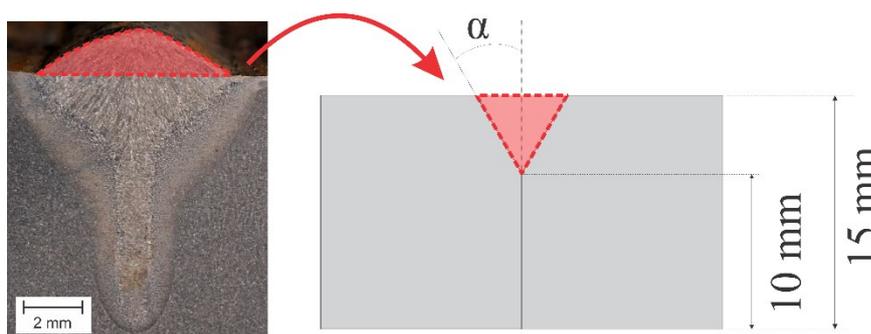


Figura 67 - Método proposto para cálculo de ângulo de bisel correspondente à área resultante do chanfro formado. (Fonte: Autor)

Segundo o procedimento acima observado, optou-se pela utilização de um ângulo de abertura de 30° de bisel para os procedimentos HLAW em junta.

Durante o procedimento de soldagem em junta, diferentemente do observado em ensaio de soldagem sobre chapa, foi observada a ocorrência de *burn through*, conforme é ilustrado na macrografia obtida através da seção transversal do cordão de solda (Figura 68).

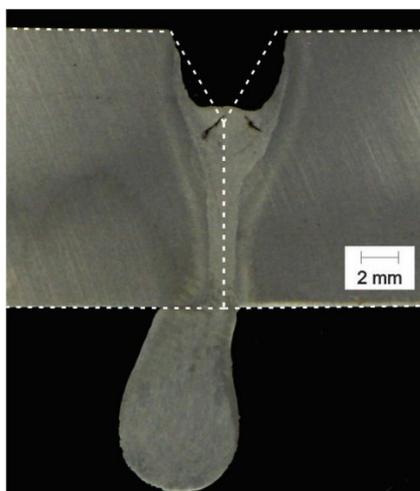


Figura 68 – Macrografia de solda realizada pelo processo HLAW aplicado em junta sem utilização de *backing*. (Fonte: Autor)

Esse comportamento é também observado por Zanini [148], onde sugere que processos de soldagem a arco com elevada penetração necessitam da utilização de *backings*.

Com a utilização do *backing* de fibra, o comportamento observado de fluxo gasoso e térmico na poça fundida foi bruscamente alterado, modificando os resultados geométricos de penetração e largura atingidos (Figura 69).

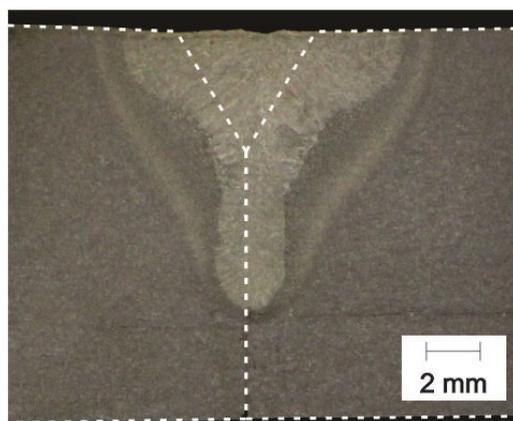


Figura 69 - Macrografia de solda realizada pelo processo HLAW aplicado em junta com utilização de *backing* de fibra de vidro. (Fonte: Autor)

Com essa justificativa em mente, os parâmetros preliminares não atingiram uma penetração total, fazendo com que fossem necessários ensaios com potências Laser maiores, com 9 e 10 kW. Ainda assim, a penetração total não foi observada (Figura 70).

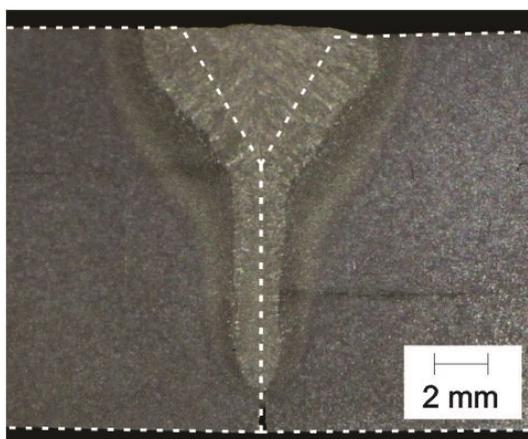


Figura 70 - Macrografia de solda realizada pelo processo HLAW aplicado em junta com utilização de *backing* e potência Laser de 10 kW e 1m/min de velocidade de soldagem.

(Fonte: Autor)

Optou-se, portanto, por utilizar abertura de chanfro, denominada no trabalho como *gap*. Para determinação do *gap* otimizado, foram realizados ensaios de soldagem, onde alcançou-se um *gap* otimizado de 0,6 mm, com potência Laser de 8 kW (Figura 71).

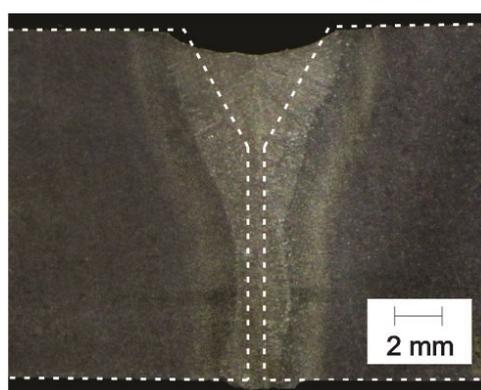


Figura 71 - Macrografia de solda realizada pelo processo HLAW aplicado em junta com utilização de *backing* e potência Laser de 8 kW e *gap* de 0,6 mm. (Fonte: Autor)

Mesmo atingindo um resultado satisfatório de raiz, o reforço do cordão apresentou um rebaixo que deveria ser otimizado. Assim, após diversos ensaios de otimização de parâmetros, a corrente base do processo GMAW foi modificada para 170 A e a velocidade de arame para 9 m/min. Com as alterações descritas, o resultado otimizado da soldagem HLAW foi alcançado (Figura 72).

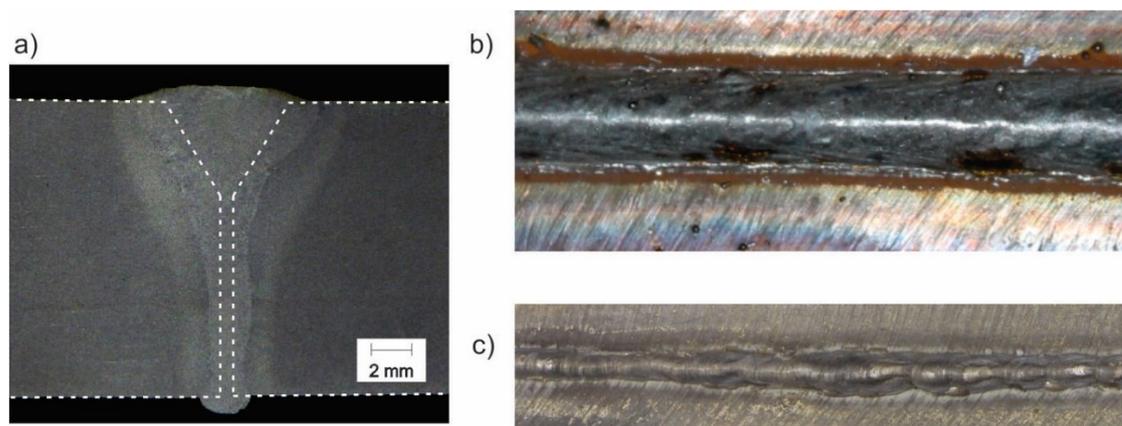


Figura 72 - Macrografia de solda realizada pelo processo HLAW aplicado em junta com utilização de *backing* e potência Laser de 8 kW, gap de 0,6 mm, e ajuste da corrente do processo GMAW para 170 A e velocidade de arame para 9m/min. (Fonte: Autor)

A fim de determinar uma janela de operação com os parâmetros para o processo HLAW em junta, foram realizados ensaios com variação de *gap* de 0 a 1 mm, onde observou-se resultados insatisfatórios com *gap* menor que 0,3 mm e maior que 0,8 mm (Figura 73).

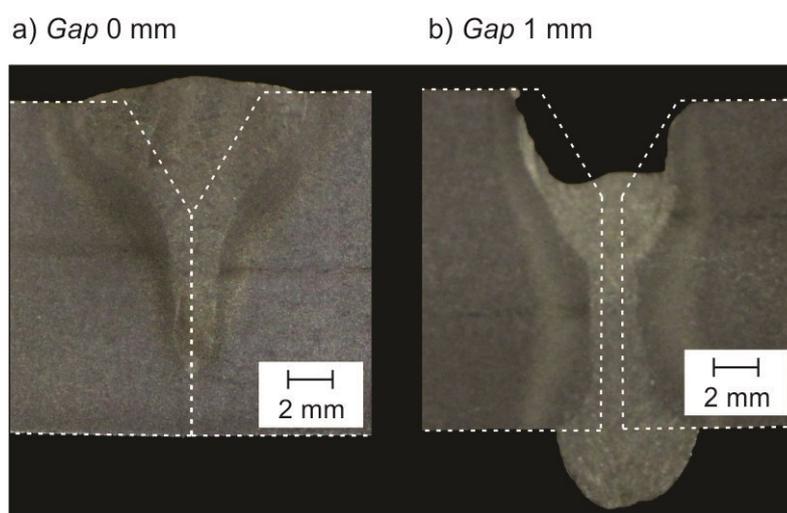


Figura 73 - Macrografia de solda realizada pelo processo HLAW aplicado em junta com utilização de *backing* com abertura de junta de a) 0mm e b) 1mm. (Fonte: Autor)

Conforme mencionado, a escolha do ângulo de abertura se fez após o estudo prévio da área de reforço alcançada pelo processo em ensaios sobre chapa. Nesse contexto, foram também realizados ensaios com aberturas de bisel de 20° e 40° com o *gap* otimizado de 0,6 mm, estes apresentando resultados insatisfatórios (Figura 74).

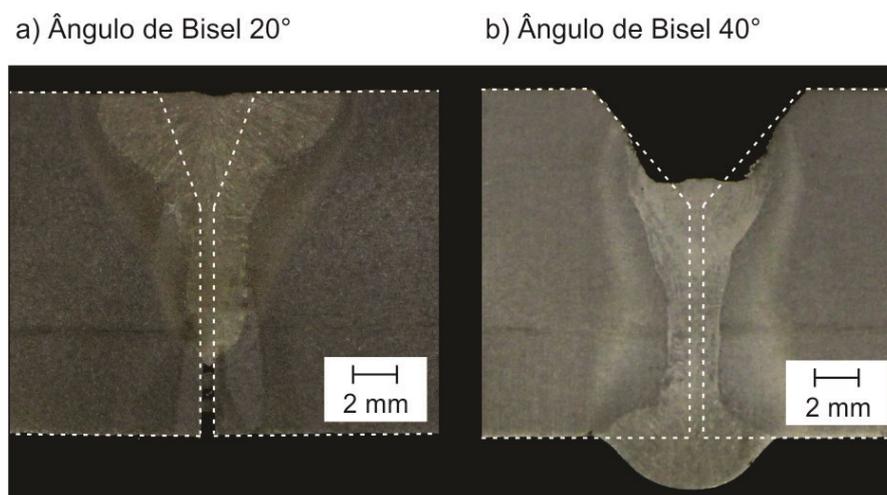


Figura 74 - Macrografia de solda realizada pelo processo HLAW aplicado em junta com utilização de *backing* com ângulo de bisel de a) 20° e b) 40°. (Fonte: Autor)

O *backing* utilizado possui três camadas duplas de fibra de vidro que podem ser retiradas, permitindo a sua reutilização após a queima das camadas superiores (Figura 75-a).

No entanto, nos ensaios HLAW onde ocorreram escoamento excessivo da poça de fusão, observou-se uma degradação excessiva do *backing*, impedindo sua reutilização (Figura 75-b). Este comportamento difere do observado por Zanini [148] para aplicações do *backing* em processo de soldagem a arco. Tal fato justifica-se provavelmente pela elevada densidade térmica característica do feixe Laser.

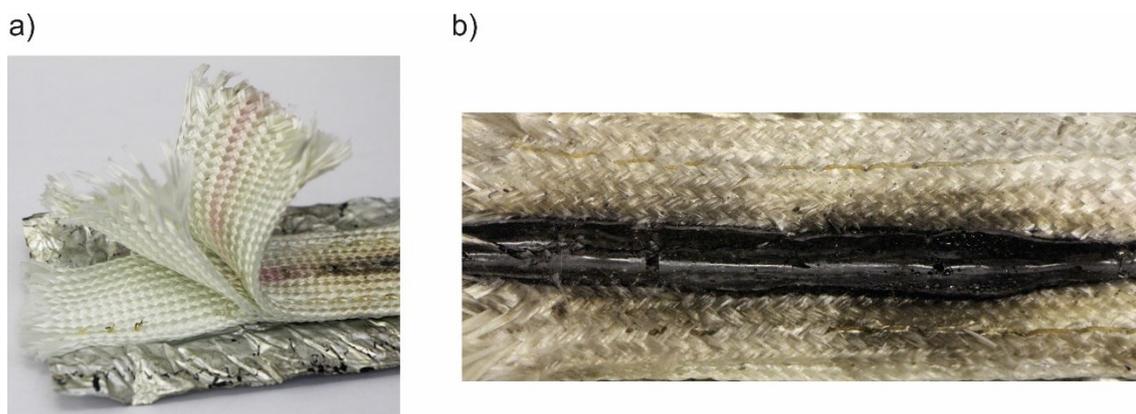


Figura 75 - *Backing* de fibra de vidro utilizado, evidenciando a) a possibilidade de retirada de camadas degradadas para reutilização, e b) a ocorrência de degradação completa sem possibilidade de reutilização durante processo de soldagem HLAW em junta. (Fonte: Autor)

Por fim, realizaram-se ensaios de soldagem em junta com os processos individuais LBW e GMAW. O processo LBW, para a espessura de chapa utilizada e potência máxima disponível de 10 kW, não alcançou penetração total. Ademais, é notória a inviabilidade de utilização de juntas com *gap* no processo LBW (Figura 76). Ainda, pode-se observar a formação de porosidade no interior do cordão de solda.

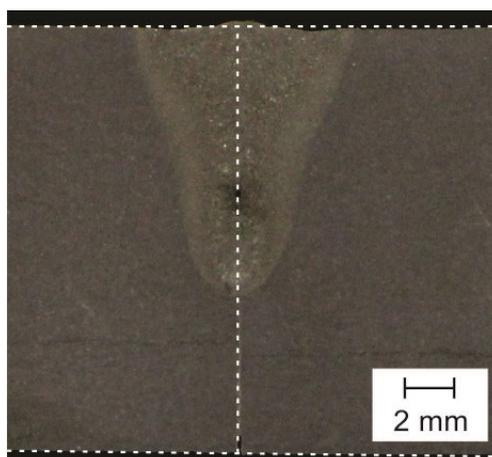


Figura 76 - Macrografia de solda realizada pelo processo LBW aplicado em junta com utilização de *backing*, com potência Laser de 10 kW. (Fonte: Autor)

Já para a aplicação do processo GMAW, como este possui uma certa limitação quanto à penetração máxima atingível, fez-se necessário a utilização de um nariz com menor comprimento, possibilitando uma união metalúrgica em toda a extensão da junta. Na Figura 77, pode-se observar uma comparação entre as juntas utilizadas nos processos HLAW e GMAW.

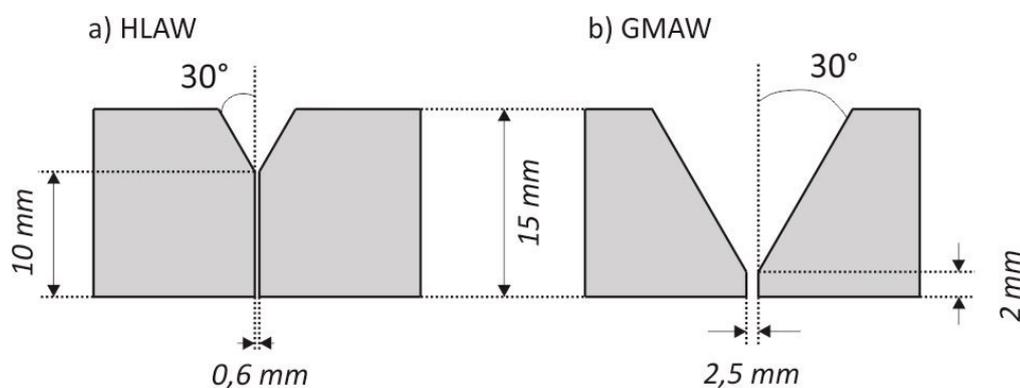


Figura 77 - Perfis geométricos das juntas utilizadas para aplicação do processo a) HLAW e b) GMAW. (Fonte: Autor)

Quanto ao processo GMAW aplicado em junta, foram utilizados dois cenários, com cordões filetados e com tecimento de cordão. Ambos os processos utilizaram 120 A de corrente, 20 V de tensão e 3,5 m/min de velocidade de arame. Já a velocidade de soldagem variou conforme a técnica de movimentação da tocha empregada. A escolha de utilização dos modos

de movimentação foi devido à maior coerência para análise comparativa com outros processos quando aplicado em preenchimento de junta (Figura 78).

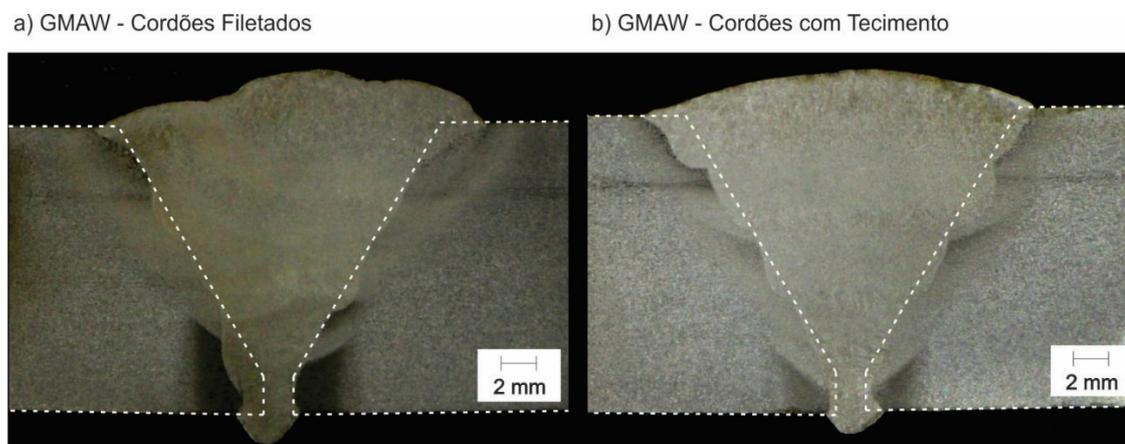


Figura 78 - Macrografia de solda realizada pelo processo GMAW aplicado em junta com a) cordões filetados e b) cordões com tecimento. (Fonte: Autor)

Comum a todos os setores da indústria de fabricação, a procura constante por processos mais produtivos e seguros representa uma das principais diretrizes a serem buscadas. Processos de soldagem mais produtivos influenciam diretamente nos custos, cronogramas, análise de riscos e viabilização de projetos [149]. A produtividade, mesmo não podendo ser traduzida unicamente pela velocidade do processo de soldagem, sofre elevada influência desta.

A partir do cálculo para um metro de solda em junta, foi elaborada uma análise comparativa de tempo necessário de processo de união entre os processos HLAW e GMAW, ilustrada na Figura 79 e Tabela 13.

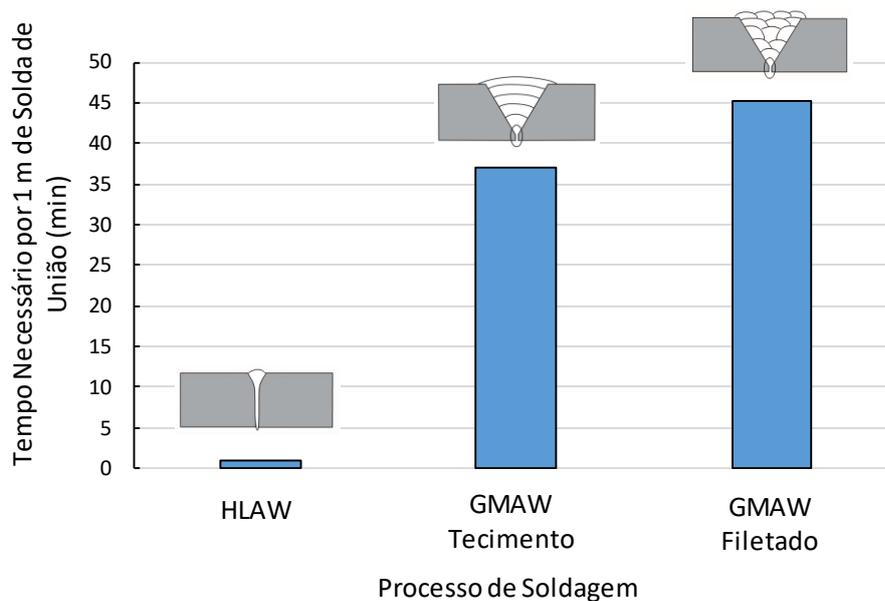


Figura 79 - Comparação de tempo necessário para um metro de solda de união com os processos de soldagem HLAW e GMAW. (Fonte: Autor)

Tabela 13 - Comparação de tempo necessário e consumo de insumos para um metro de solda de união com os processos de soldagem HLAW e GMAW. (Fonte: Autor)

	HLAW	GMAW Filetado	GMAW Tecimento
Tempo de Solda - 1 m (min)	1	37.04	45.19

Cabe ressaltar que esta análise comparativa não deve ser tratada de forma absoluta, de forma que foram considerados em seus cálculos apenas o tempo necessário de soldagem. Cálculos envolvendo processos anteriores à soldagem como preparação do chanfro e posicionamento da junta não foram considerados.

Ainda, é importante salientar que os dois processos não estão sendo utilizados em seus níveis otimizados, podendo assim ser considerada com uma análise do comportamento usual de ambos.

A partir da análise da Figura 79, é nítida a diferença de produtividade entre os dois processos avaliados, tornando o tempo necessário para fabricação da junta na ordem de 40 vezes menor pelo processo HLAW.

5 CONCLUSÕES

A partir das discussões e resultados obtidos no trabalho, foi possível chegar a algumas conclusões.

Comparação entre os processos de soldagem HLAW e LBW:

- Quando realizado de forma individual, o processo LBW com alta potência apresentou diversos defeitos e descontinuidades de soldagem internos e na superfície do cordão, como respingos, mordeduras e indícios de formação de *humping*, enquanto o processo HLAW com a mesma potência Laser, apresentou resultados satisfatórios internos e na superfície do cordão;
- O processo HLAW apresentou maiores valores de profundidade de penetração e larguras, quando comparado ao processo LBW com mesma potência Laser utilizada. O aumento da penetração alcançada deve-se ao pré-aquecimento do metal causado pelo arco elétrico, facilitando a fusão do metal de base e aumentando a absorção do feixe Laser pelo metal pré-aquecido. Já o aumento da largura deve-se à própria característica do formato do arco elétrico e conseqüentemente do metal depositado. Essa característica aumenta significativamente a facilidade de aplicação em soldagem de junta, aumentando a tolerância geométrica na preparação da junta a ser soldada;
- O cordão soldado pelo processo HLAW apresentou, em todas as regiões da zona fundida, a formação de microestruturas com menor dureza e menor fragilidade, evidenciando o auxílio térmico do arco elétrico atuando como retardador de resfriamento na zona fundida, principalmente nas regiões superiores da zona fundida;

Influência do sentido de alimentação de arame no processo HLAW:

- O processo HLAW com configuração *leading arc* apresentou maiores valores de profundidade de penetração e menores valores de largura do que a configuração *trailing arc*. Essa diferença geométrica do cordão deve-se ao pré-aquecimento do metal de base gerado pelo arco elétrico na configuração

leading arc, além do próprio perfil geométrico gerado pelo processo individual GMAW nas configurações puxando e empurrando, o que no processo híbrido seria o equivalente às configurações *leading arc* e *trailing arc*, respectivamente. Este fato corrobora a utilização preferencial da configuração *leading arc* em aplicações onde a penetração necessária é o principal parâmetro operacional do processo, enquanto a configuração *trailing arc* mostra-se promissora em aplicações onde existe maiores variações de abertura de junta, necessitando de procedimentos com maior tolerância geométrica de junta;

- O processo HLAW com configuração *leading arc* apresentou maior suscetibilidade a formação de mordedura, decorrente do formato gerado pelo arco;
- O processo HLAW com configuração *leading arc* demonstrou ainda uma influência térmica mais significativa na zona fundida, gerando microestruturas com menor dureza na sua região superior;

Influência do gás de proteção no processo HLAW:

- A utilização de Ar como gás de proteção apresentou instabilidade do arco, gerando momentos de curto circuito e conseqüentemente geração de respingos;
- No final dos cordões, foi nítida a formação de uma região esbranquiçada nos cordões quando utilizado Ar como gás de proteção, evidenciando a formação insuficiente de pontos catódicos no cordão.
- Utilizando Ar e 92% Ar 8% CO₂, a largura dos cordões foi aproximadamente constante, enquanto a profundidade de penetração alcançada pelos procedimentos utilizando 92% Ar 8% CO₂ foi maior;

Influência da distância entre o ponto focal do feixe Laser e a superfície da peça:

- Utilizando Ar e 92% Ar 8% CO₂, a distância de desfoque do feixe Laser otimizada encontrada foi aproximadamente de 10 mm para o interior da peça. A largura não apresentou alterações significativas através da variação deste parâmetro;

Influência da distância entre o feixe Laser e o arco elétrico:

- A distância entre o feixe Laser e o arco elétrico otimizada foi de 0 mm, sendo que esta precisão foi possível apenas através do desenvolvimento do Sistema de Movimentação do Suporte Orientador – SMS;

Otimização dos parâmetros de soldagem HLAW em junta:

- A aplicação do processo HLAW em junta foi possível somente através da utilização *backing*, onde o *backing* de fibra de vidro apresentou elevada adequação ao propósito, devido sua flexibilidade e relativa passividade de fluxo de gasoso;
- Através da adequação dos parâmetros de soldagem, foi possível alcançar um procedimento satisfatório de soldagem HLAW de junta de 15 mm de espessura em único passe;

Comparação dos processos de soldagem HLAW, LBW e GMAW em junta:

- Quando comparado ao processo GMAW aplicado em junta de mesma espessura, o processo HLAW apresentou um tempo necessário aproximadamente 40 vezes menor para união de 1 metro de junta.
- Por fim, com base nos resultados apresentados, conclui-se que o processo HLAW representa uma promissora opção nos procedimentos de união de chapas e tubos de elevada espessura, apresentando diversas vantagens operacionais, financeiras e metalúrgicas quando comparado aos processos individuais LBW e GMAW.

5.1 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

Com o objetivo de dar continuidades às atividades e discussões realizados na dissertação, são propostos os seguintes estudos:

- Avaliação da variação da velocidade de soldagem no processo HLAW;
- Aplicação de vertentes do processo GMAW com maior potência (*Dynamic Flexible Arc* e *Buried Arc*);
- Análise via filmagem térmica e filmagem em alta velocidade do processo HLAW, possibilitando uma melhor compreensão dos fenômenos físicos atuantes;
- Aplicação do processo HLAW em diferentes materiais de substrato;
- Aplicação do procedimento HLAW desenvolvido em junta de união de tubos na posição plana e na soldagem orbital;
- Avaliação da utilização de *backing* de cerâmica e cobre, possibilitando uma comparação entre o utilizado e o não utilizado no trabalho;
- Avaliação da robustez do processo HLAW com base em desalinhamento (*high-low*) da junta;
- Realização de ensaios mecânicos das juntas soldadas;
- Por fim, a elaboração de um cabeçote de soldagem híbrida Laser-GMAW, tendo como base as liberdades geométricas entre o feixe Laser e o arco elétrico avaliadas na dissertação.

REFERÊNCIAS

- [1] JG, E. FCAW Orbital Pipe Welding Technology Improves Fab Shop Productivity. **Welding Journal**, v. 78(11), p. 57-59, 1999.
- [2] AICHELE G, B. M. Orbital Welding: Solutions for Demanding Welding Tasks. Part 2. **Welding and Cutting**, v. 05, p. 252-255, 2005.
- [3] C, P. Pipelining with Precision: Mechanized Welding that Consistently Meets the Challenging Needs of the Canadian Pipeline Industry. **Canadian Welding Association Journal**, v. 06, p. 12-29, 2013.
- [4] R., B. Pipeline Welding Goes Mechanized. **Welding Journal**, v. 78(11), p. 47-50, 1999.
- [5] TECHNOLOGY, W. Manual Metal Arc Welding - MMAW - SMAW. Disponível em: <http://weldingtechno.blogspot.com/2017/08/manual-metal-arc-welding.html>. Acesso em: 25 Feb 2020.
- [6] P., K. Overview of the Exploration Status of Laser-Arc Hybrid Welding Processes. **Reviews on Advanced Materials Science**, v. 30, p. 112-132, 2012.
- [7] PLATFORM, W. T. Ships made of Light – Lighter Ships. Disponível em: <https://www.waterborne.eu/showcases/Laser-welding-projects/>. Acesso em: 25 Feb 2020.
- [8] J., I. **2005**. 01 ed. Norfolk: Elsevier, Laser Processing of Engineering Materials: Principles, Procedure and Industrial Application.
- [9] HITZ C. B., E. J. J., HECHT J. **Introduction to Laser Technology**. 2012. ISBN 978-1-118-21948-5.
- [10] JESUS DJLAMA PÉCORÁ, A. B. J. Noções sobre a Física do Laser. Universidade de São Paulo, Disponível em: <http://www.forp.usp.br/restauradora/Laser/fisica.html>. Acesso em: 25 Feb 2020.
- [11] BRUECKNER, F.; NOWOTNY, S.; RIEDE, M.; KUBISCH, F.; LEYENS, C.; BEYER, E. Surface Functionalization by High-precision Laser Cladding. **Laser Technik Journal**, v. 10, 2013. DOI: 10.1002/latj.201390005.
- [12] NOWOTNY, S.; SCHAREK, S.; BEYER, E.; RICHTER, K.-H. Laser Beam Build-Up Welding: Precision in Repair, Surface Cladding, and Direct 3D Metal Deposition. **Journal of Thermal Spray Technology**, v. 16, p. 344-348, 2007. DOI: 10.1007/s11666-007-9028-5.
- [13] CASALINO G., D. M., U., ANGELASTRO, A. CAMPANELLI, S. L. **Hybrid Laser Welding: A Review**. Vienna, Austria: 2010.

- [14] STEEN W. M., M. J. **Laser Material Processing**. 4 ed. London: Springer, 2010.
- [15] JEFF, H. Fiber Lasers: The state of the art. *LASER Focus World Magazine*, 2012. Disponível em: <http://www.Laserfocusworld.com/articles/print/volume-48/issue04/features/the-state-of-the-art.html>. Acesso em: 02 July 2019.
- [16] INJEYAN H., G. G. D. **High-Power Laser Handbook**. New York: Mc Graw-Hill, 2011.
- [17] R., P. **Tailored Light 2: Laser Application Technology**. 1 ed. Berlin: Springer, 2011.
- [18] BÄUERLE, D. **Laser Processing and Chemistry**. Berlin: Springer, 2011.
- [19] BAUMBACH, N. K., P.; KARAM, J.; JONKERS, J.; VILLARREAL-SAUCEDO, F.; REYES, M. . A cutting-edge solution for 1 μ m Laser metal processing. **High-Power Laser Materials Processing: Applications, Diagnostics, and Systems**, v. VI, 2017.
- [20] BARBETTA, L. D. **Application of the High-Current Buried Spray Arc in Hybrid Laser Arc Welding**. 2019. (Doutorado em Engenharia Mecânica) - Departamento de Engenharia Mecânica, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, SC, Brasil, 2019.
- [21] AL., Z. J. L. E. Experimental and theoretical characterization of deep penetration welding threshold induced by 1- μ m Laser. **Applied Surface Science**, v. 357, p. 1522-1527, 2015.
- [22] L., O. B. R. **Welding Handbook: Welding Process**. Miami, FL: American Welding Society, 1991. p. 110-155.
- [23] LTD, C. Spatter in Laser welding process - Visualization with CAVILUX HF. Cavitar Ltd, 2018. Acesso em: 28 Jan 2020.
- [24] J., N. **GMAW Welding Guide: Gas Metal Arc Welding, Carbon, Low Alloy, and Stainless Steel and Aluminium**. Cleveland, OH: Lincoln Electric, 2006.
- [25] JFLAWF. **The Procedure Handbook of Arc Welding**. 14 ed. Cleveland, OH: The James F. Lincoln Arc Welding Foundation, 2000.
- [26] W. ZHANG, X. H., W. LIAO, F. LI, M. WANG. Study of metal transfer in CO₂ Laser + GMAW-P hybrid welding using argon-helium mixtures. **Optics and Laser Technology**, v. 56, p. 158-166, 2014.
- [27] G. SONG, Z. L. The influence of Laser pulse wave form on Laser-TIG hybrid welding of AZ31B magnesium alloy. **Optics and Laser Technology**, v. 49, p. 82-88, 2011.
- [28] A. V. BIRDEANUA, C. C., A. PUICEA. Pulsed LASER-(micro) TIG hybrid welding: Process characteristics. **Mater. Process. Technol.**, v. 212, p. 890-902, 2012.

- [29] BUNAZIV I., A. O. M., SALMINEN A. The Fiber Laser-MIG Hybrid Welding of 5mm 5083 Aluminum Alloy. **Mater. Process. Technol.**, v. 233, p. 107-114, 2016.
- [30] FELLMAN A., J. P., KUJANPÄÄ V. CO₂-GMA hybrid welding of carbon steel – the effect of shielding gas composition. *In: Conf. Appl. Electro-Optics, 2003, Jacksonville, FL, USA. Proceeding [...]*.
- [31] LIU L., X. R. Investigation of Corrosion Behavior of Mg-Steel Laser-TIG Hybrid Lap Joints. **Corrosion Science**, v. 54, p. 212-218, 2012.
- [32] MAGEE, K. H., V. E. MERCHANT, C. V. HYATT. Laser assisted gas metal arc weld characteristics. *In: Laser Materials Processing - ICALEO '90, 1991, Boston, MA, USA, LIA (Laser Institute of America)*.
- [33] NIELSEN S.E., A. M. M., KRISTENSEN J.K., JENSEN T. A. **Hybrid welding of thick section C/Mn steel and aluminum**. Roissy: International Institute of Welding, 2002.
- [34] B., A. Hybrid Laser arc welding: State-of-art review. **Optics and Laser Technology**, v. 99, p. 60-71, 2017.
- [35] KAH, P. Overview of the exploration status of Laser-arc hybrid welding processes. **Reviews on Advanced Materials Science**, v. 30, p. 112-132, 2012.
- [36] NIELSEN, S. E. High Power Laser Hybrid Welding - Challenges and Perspectives. **Physics Procedia**, v. 78, p. 24-34, 2015.
- [37] KATAYAMA, S. **Handbook of Laser Welding Technologies**. 1 ed. Cambridge, UK: Woodhead Publishing, 2013.
- [38] SHI J., Z. Y., LIU L.,. Application of Pulsed Laser-TIG Hybrid Heat Source in Root Welding of Thick Plates Titanium Alloys. **Applied Sciences**, v. 7, 2017.
- [39] GÓRKA J., S. S. Microstructure and Properties of Hybrid Laser Arc Welded Joints (Laser Beam-MAG) in Thermo-Mechanical Control Processed S700MC Steel. **Metals**, v. 8, 2018.
- [40] F., R. J. **Industrial Application of Lasers**. London, UK: 1997.
- [41] SEYFFARTH P., K. I. V. **Laser-Arc Processes and Their Applications in Welding and Materials Treatment**. London, UK: 2002.
- [42] TURICHIN G., K. M., KLIMOVA-KORSMIK O., SKLYAR M., ZHITENEV A., KURAKIN A., POZDNYAKOV A. Laser-Arc Hybrid Welding Perspective Ultra-High Strength Steels: Influence of the Chemical Composition of Weld Metal on Microstructure and Mechanical Properties. **Procedia CIRP**, v. 74, p. 752-756, 2018.

- [43] LI C., M. K., TAKAO S., KOUJI H. Fiber Laser-GMA Hybrid Welding of Commercially Pure Titanium. **Materials and Design**, v. 30, p. 109-114, 2009.
- [44] CASALINO G., C. S. L., DAL MASO U., LUDOVICO A. D. Arc Leading Versus Laser Leading in the Hybrid Welding of Aluminium Alloy Using a Fiber Laser. **Procedia CIRP**, v. 12, p. 151-156, 2013.
- [45] HUANG L., W. D., HUA X., LIU S., JIANG Z., WANG H., SHI S. Effect of the Welding Direction on the Microstructure Characterization in Fiber Laser-GMAW Hybrid Welding of 5083 Aluminium Alloy. **Journal of Manufacturing Processes**, v. 31, p. 514-522, 2018.
- [46] CASALINO G., L. P., MORTELLO M., PERULLI P., VARONE A. Effects of Laser Offset and Hybrid Laser on Microstructure and IMC in Fe-Al Dissimilar Welding. **Metals**, v. 7, 2017.
- [47] GAO M., C. C., GU Y., ZENG X. Microstructure and Tensile Behavior of Laser Arc Hybrid Welded Dissimilar Al and Ti Alloys. **Materials**, v. 7, p. 1590-1602, 2014.
- [48] DILTHEY U., L. F., WIESCHEMANN A. Expanded Capabilities in the Welding of Aluminium Alloys with the Laser-MIG Hybrid Process. **Aluminium**, v. 75, p. 64-75, 1999.
- [49] DILTHEY U., L. F., WIESCHEMANN A. Technical and Economical Advantages by Synergies in Laser Arc Hybrid Laser Welding. **Welding World**, v. 943, p. 141-152, 1999.
- [50] DILTHEY U., W. A. Prospects by Combining and Coupling Laser Beams and Arc Welding Processes. **Riv. Ital. Saldatura**, v. 52, p. 749-759, 1999.
- [51] GRAF T., S. H. **Laser Hybrid Process at Volkswagen**. Copenhagen, Denmark: International Institute of Welding, 2002.
- [52] PETRING D., F. C. Recent Progress and Innovative Solutions for Laser-Arc Hybrid Welding. *In: 1st Pacific International Conference on Application of Lasers and Optics, 2004, Melbourne, Australia. Proceeding [...]. 19 -21 Apr 2004. p. 7-10.*
- [53] ESAB. Hybrid Laser Arc Welding. 2019. Disponível em: <https://www.esabna.com/us/en/automation/process-solutions/hlaw/index.cfm>. Acesso em: 11 Nov 2019.
- [54] GMBH, F. I. Hybrid Laser Arc Welding. 2019. Disponível em: <https://www.fronius.com/en-in/india/welding-technology/products/robotic-welding/migmag-high-performance/Laserhybrid/Laserhybrid>. Acesso em: 11 Nov 2019.
- [55] ELECTRIC, L. Hybrid Laser Arc Welding. 2019.

- [56] PHOTONICS, I. Hybrid Laser Arc Welding. 2019. Disponível em: <https://www.ipgphotonics.com/en/applications/materials-processing/metal-welding>. Acesso em: 11 Nov 2019.
- [57] TRUMPF. Hybrid Laser Arc Welding. 2019. Disponível em: https://www.trumpf.com/pt_BR/aplicacoes/solda-a-Laser/soldagem-hibrida/. Acesso em: 11 Nov 2019.
- [58] GMBH, C. C. S. Hybrid Laser Arc Welding. 2019. Disponível em: <https://www.cloos.de/de-en/processes/details/Laser-hybrid-weld/>. Acesso em: 11 Nov 2019.
- [59] AUTOMATION, P. W. Hybrid Laser Arc Welding. 2019. Disponível em: <https://pemamek.com/news/advanced-Laser-hybrid-welding-station-to-savonia-university-of-applied-sciencies/>. Acesso em: 11 Nov 2019.
- [60] OLSEN, F. O. **Hybrid Laser-Arc Welding**. 1 st ed. ed. Oxford, UK: Woodhead Publishing Limited, 2009.
- [61] DREVECK, N. W. **Aplicação do Arco Enterrado na Soldagem Híbrida Laser-GMAW no Aço Estrutural A709 TMCP**. 2019. (Mestrado) - Programa de Pós-Graduação em Ciência e Engenharia de Materiasi, Universidade do Estado de Santa Catarina, Joinville, SC, 2019.
- [62] CHURIAQUE, C.; CHLUDZINSKI, M.; PORRUA-LARA, M.; DOMINGUEZ-ABECIA, A.; ABAD-FRAGA, F.; SÁNCHEZ-AMAYA, J. Laser Hybrid Butt Welding of Large Thickness Naval Steel. **Metals**, v. 9, n. 1, 2019. DOI: 10.3390/met9010100.
- [63] ZHANG, C., LI, G., GAO, M., ZENG, X. Y. Microstructural and mechanical properties of narrow gap Laser-arc hybrid welded 40 mm thick mild steel. **Materials**, 2017.
- [64] CHUNYAN YAN, C. L., CHENXIA KAN, XIULIN JI, LICHAO WU, ZIXIN LIU, FENGUYN ZUE. Experimental investigation of hybrid Laser arc welding of X80 pipeline steel. **Materials Science and Engineering**, v. 452, 2018. DOI: doi:10.1088/1757-899X/452/2/022021.
- [65] SUGINO T., T. S., ARAKANE G., NAKAMURA T. Effect of interaction between the arc and Laser plume on metal transfer in pulsed GMA/CO2 Laser hybrid welding. *In*: 4th International Congress on Laser Advanced Materials Processing, 2006, Kyoto, Japan. JLPS, p. 1-6.
- [66] CHEN M., L. L. Study on Attraction of Laser to Arc Plasma in LaserTIG Hybrid Welding on Magnesium Alloy. **IEEE Transactions on Plasma Science**, v. 39, p. 1104-1109, 2011.
- [67] GU X., L. H., YANG L., GAO Y. Coupling mechanism of Laser and arcs of Laser-twin-arc hybrid welding and its effect on welding process. **Optics and Laser Technology**, v. 48, p. 246-235, 2013.

- [68] KUTSUNA, M. C., L. **Interaction of both plasmas in CO₂ Laser-MAG hybrid welding of carbon steel**. Osaka, Japan: Bellingham: SPIE, 2003. p. 341-346.
- [69] GAO M., Z. X., QIANWU H.U. Effects of gas shielding parameters on weld penetration of CO₂ Laser-TIG hybrid welding. **Journal of Materials Processing Technology**, v. 184, p. 177-183, 2007.
- [70] ATABAKI M. M., N. M., CHENIER P., MAA J., LIU W., KOVACEVIC R. Experimental and Numerical Investigations of Hybrid Laser Arc Welding of Aluminium Alloys in the Thick T-Joint Configuration. **Optics and Laser Technology**, v. 59, p. 68-92, 2014.
- [71] LEO P., R. G., CASALINO G., OLABI A. G. Effect of Power Distribution on the Weld Quality During Hybrid Laser Welding of an Al-Mn Alloy. **Optics and Laser Technology**, v. 73, p. 118-126, 2015.
- [72] ALAM M. M., B. Z., JONSEN P., KAPLAN A. F. H., HAGGABLAD H. A. The influence of surface geometry and topography on the fatigue cracking behaviour of Laser hybrid welded eccentric fillet joints. **Applied Surface Science**, v. 256, p. 1936-1945, 2010.
- [73] GUEN E. L., F. R., CARIN M., COSTE F., MASSON P. L.,. Analysis of hybrid Nd:Yag Laser-MAG arc welding processes. **Optics and Laser Technology**, v. 43, p. 1155-1166, 2011.
- [74] NAITO Y., K. S., MASTSUNAWA A. Keyhole behaviour and liquid flow in molten pool during Laser-arc hybrid welding. *In: 1st International Symposium on High-Power Laser Macroprocessing, 2002, Osaka, Japan. Proceeding [...].* p. 357-362.
- [75] ABE N., K. Y., HAYASHI M., TSUCHITANI Y. Dynamic Observation of High Speed Laser-Arc Combination Welding of Thick Steel Plates. **Transactions of JWRI**, v. 26, p. 7-11, 1997.
- [76] CAO X., W. P., HUANG J., MUNRO C., NOLTING A. Hybrid fiber Laser – Arc welding of thick section high strength low alloy steel. **Materials and Design**, v. 32, p. 3399-3413, 2011.
- [77] HAYASHI T., K. S., ABE N., OMORI A. High-power CO₂ Laser-MIG hybrid welding for increased gap tolerance. Hybrid weldability of thick steel plates with a square groove. **Welding International**, v. 18, p. 692-701, 2003.
- [78] ISHIDE T., T. S., WATANABE M., UESHIRO K. Development of TIG-YAG and MIG-YAG hybrid welding. **Welding International**, v. 17, p. 775-780, 2003.
- [79] JOO S.M., K. Y. P., RO C.S., BANG H.S., PARK J.U. Basic Experiments by Hybrid Welding to Steels for Shipbuilding. **Welding International**, v. 17, p. 775-780, 2004.
- [80] NAITO Y., M. M. Observation of Keyhole Behavior and Melt Flows during Laser-Arc Hybrid Welding. *In: 22th International Congress on Applications of Lasers and Electro-Optics (ICALEO), 2003, Jacksonville, Florida, USA. Laser Institute of America,* p. 159-167.

- [81] VICTOR B., N. B., REAM S., FARSON D. High Brightness Hybrid Welding of Steel. *In: 28th International Congress on Applications of Lasers and Electro-Optics (ICALEO), 2009, Orlando, Florida, USA. Laser Institute of America, 02-05 nov 2009. p. 79-88.*
- [82] TSUKAMOTO S., Z. L., SUGINO T., ARAKANE G. Distribution of Wire Feeding Elements in Laser-Arc Hybrid Welding. *In: 27th International Congress on Applications of Lasers and Electro-Optics (ICALEO), 2008, Temecula, California, USA. Laser Institute of America, p. 498-505.*
- [83] HONG S.G., L. J. B. Effects of Hybrid Welding Parameters on the Toughness of Weld Metal in Ship Structural Steel. *In: 26th International Congress on Applications of Lasers and Electro-Optics (ICALEO), 2007, Orlando, Florida, USA. **Proceeding [...]**. Laser Institute of America, 29 out to 01 nov 2007. p. 935-939.*
- [84] REISGEN U., O. S., JAKOBS S. The Arc in Hybrid Welding Serves As a Sensor for the Process Quality. *In: 27th International Congress on Applications of Lasers and Electro-Optics (ICALEO), 2008, Temecula, California, USA. **Proceeding [...]**. Laser Institute of America, 20-23 oct 2008. p. 479-488.*
- [85] FELLMAN A., S. A. Study of the Phenomena of Fiber Laser-MAG Hybrid Welding. *In: 26th International Congress on Applications of Lasers and Electro-Optics (ICALEO), 2007, Orlando, Florida, USA. **Proceeding [...]**. Laser Institute of America, 29 oct to 01 nov 2007. p. 871-880.*
- [86] SARTORI, F. **Tecnologias e Técnicas Modernas do Processo MIG/MAG para o Passe de Raiz em Soldagem Orbital de Tubos.** 2016. (Mestrado) - Departamento de Engenharia Mecânica, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, SC, Brasil, 2016.
- [87] BAGGER C., F. O. O. Review of Laser hybrid welding, *Journal of Laser Applications. **Journal of Laser Application**, v. 17, 2005.*
- [88] P., J. Hybrid welding combines the benefits of Laser and arc welding. *In: Nordiska Svetsmötet, 2003, **Proceeding [...]**. 3-5 Sept 2003.*
- [89] LIU, Z., KUTSUNA, M., XU, G. Fiber Laser Welding of 780MPa High Strength Steel. *In: 25th International Congress on Applications of Lasers and Electro-Optics (ICALEO), 2006, Scottsdale, Arizona, USA. **Proceeding [...]**. Laser Institute of America, 30 oct to 02 nov 2006. p. 562-568.*
- [90] REAM, S. L. Laser Welding Efficiency and Cost: CO₂, YAG, Fiber, and Disc. *In: 23rd International Congress on Applications of Lasers and Electro-Optics (ICALEO), 2004, San Francisco, USA. **Proceeding [...]**. Laser Institute of America, 20-23 oct 2004.*

- [91] VOLLERTSEN F., T. C. Welding with Fibre Lasers from 200 to 17000 W. *In: 24th International Congress on Applications of Lasers and Electro-Optics (ICALEO), 2005, Miami, Florida, USA. Proceeding [...].* Laser Institute of America, 31 oct to 03 nov 2005. p. 254-263.
- [92] PHOTONICS, I. High Power CW Fiber Lasers. IPG Photonics, Disponível em: <https://www.ipgPhotonics.com/en/products/LASERs/high-power-cw-fiber-LASERs>. Acesso em: 28 Jan 2020.
- [93] AL, K. S. E. Fundamental Research of 100 kW Fiber Laser Welding Technology. *In: World of Photonics Congress, 2015, Munich. Proceeding [...].* WLT,
- [94] QIN L., L. Z., LIN S. Y. Effects of Nd:YAG Laser + pulsed MAG arc hybrid welding parameters on its weld shape. **Science Technology of Welding Joining**, v. 12, p. 79-86, 2007.
- [95] CHUNYAN YAN, C. L., CHENXIA KAN, XIULIN JI, LICHAO WU, ZIXIN LIU, FENGYUN XUE. **Experimental investigation of hybrid Laser arc welding of X80 pipeline steel.** IOP Conf., 2018.
- [96] CHEN Y. B., L. Z. L., LI Q., WU L. Experimental study on welding characteristics of CO2 Laser TIG hybrid welding process. **Science Technology of Welding Joining**, v. 11, p. 403-411, 2006.
- [97] BUNAZIV, I.; AKSELSEN, O. M.; REN, X.; SALMINEN, A. Hybrid Welding Possibilities of Thick Sections for Arctic Applications. **Physics Procedia**, v. 78, p. 74-83, 2015. DOI: 10.1016/j.phpro.2015.11.019.
- [98] BUNAZIV, I.; FROSTEVARG, J.; AKSELSEN, O. M.; KAPLAN, A. F. H. The penetration efficiency of thick plate Laser-arc hybrid welding. **The International Journal of Advanced Manufacturing Technology**, v. 97, n. 5-8, p. 2907-2919, 2018. DOI: 10.1007/s00170-018-2103-x.
- [99] 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.
- [100] C. TAN, W. H., Z. GONG, L. LIM, J. FENG. 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.
- [101] E.L. GUEN, R. F., M. CARIN, F. COSTE, P.L. MASSON. Analysis of Hybrid Nd:Yag Laser-MAG Arc Welding Processes. **Optics and Laser Technology**, v. 43, p. 1155-1166, 2011.
- [102] L.J. ZHANG, J. N., X.J. ZHANG, G.F. ZHANG, J.X. ZHANG. Single pass hybrid Laser-MIG welding of 4-mm thick copper without preheating. **Materials and Design**, v. 74, p. 1-18, 2015.

- [103] T. ISHIDE, S. T., M. WATANABE. **Lastest MIG, TIG, arc-YAG Laser hybrid welding systems for various welding products**. Osaka, Japan: SPIE 2003, 2002. p. 347-352.
- [104] 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.
- [105] KAWAHITO Y., M. N., ABE Y., KATAYAMA S. Laser absorption characteristics in high-power fibre Laser welding of stainless steel. **Welding International**, v. 27, p. 129-135, 2013.
- [106] H.S. BANG, Y. C. K., S.M. JOO. Analysis of Residual Stress on AH32 Butt Joint by Hybrid CO₂ Laser-GMA Welding. **Computational Materials Science**, v. 49, p. 217-221, 2010.
- [107] KAPLAN A. F. H., W. M., NILSSON K., POWELL J. Fundamental analysis of hybrid Laser-MIG welding. *In*: Conference EUROJOIN 5, 2004, Vienna, Austria. The European Welding Federation, 10-14 jun 2004.
- [108] WOUTERS, M. **Hybrid Laser-MIG Welding: An Investigation of Geometrical Considerations**. 2005. (Licentiate Thesis) - Department of Applied Physics and Mechanical Engineering Division of Manufacturing Systems Engineering, Luleå University of Technology Luleå, Sweden 2005.
- [109] PIILI H., S. A., HARKKO P., LEHTINEN J. Study of Phenomenon of Fibre-Laser-Mig/Mag-Hybrid-Welding. *In*: 27th International Congress on Applications of Lasers and Electro-Optics (ICALEO), 2008, Temecula, California, USA. Laser Institute of America, p. 506-515.
- [110] M. EI RAYES, C. W., G. SEPOLD. The Influence of Various Hybrid Welding Parameters on Bead Geometry. **Welding Journal**, v. 83, p. 139-145, 2004.
- [111] P. SATHIYA, M. K. M., SOUNDARARAJAN R., SOUNDARARAJAN B. Shielding Gas Effect on Weld Characteristics in Arc-Augmented Laser Welding Process of Super Austenitic Steel. **Optics and Laser Technology**, v. 45, p. 46-55, 2013.
- [112] K. NILSSON, S. H., H. ENGSTRÖM, A.F.H. KAPLAN. **Parameters Influence in CO₂-Laser/MIG Hybrid Welding**. Bucharest, Romania: IIW Doc, 2003.
- [113] L. LIU, X. H., G. SONG. A New Laser-Arc Hybrid Welding Technique Based on Energy Conservation. **Mater. Trans.**, v. 47, p. 1611-1614, 2006.
- [114] Z. GAO, X. S., P. JIANG, L. CAO, Q. ZHOU, C. YUE, Y. LIU, C. WANG. Parameters Optimization of Hybrid Fiber Laser-Arc Butt Welding on 316L Stainless Steel Using Kriging Model and GA. **Optics and Laser Technology**, v. 83, p. 153-162, 2016.

- [115] ZHANG K., L. Z., CHEN Y., LIU M., LIU Y. Microstructure characteristics and mechanical properties of Laser-TIG hybrid welded dissimilar joints of Ti-22Al-27Nb and TA15. **Optics and Laser Technology**, v. 73, p. 139-145, 2015.
- [116] R, T. L. C. S. G. R. G. P. Trends in the Development of Protective Gases Used in GMAW Welding. **Soldagem & Inspeção**, 2012.
- [117] IRVING, B. Shielding Gases are the Key to Innovations in Welding. **Welding Journal**, 1999.
- [118] MARQUES, P. V. M., P.J.; VALENTE, O.B. **Características do Arco de Soldagem TIG em Diferentes Atmosferas**. Fortaleza, Brasil: Associação Brasileira de Soldagem, 1998.
- [119] KANEMARU S., S. T., SATO T., MISHIMA H., TASHIRO S., TANAKA M. **Study for TIG-MIG Hybrid Welding Process**. Taiyo Nippon Sanso Corporation, Joining and Welding Research Institute Osaka University, 2012.
- [120] LIU S., L. F., XU C., ZHANG H. Experimental Investigation on Arc Characteristic and Droplet Transfer of CO₂ Laser-Metal Arc Gas (MAG) Hybrid Welding. **International Journal of Heat Mass Transfer**, v. 62, p. 604-611, 2013.
- [121] PIEKARSKA W., K. M. Three-Dimensional Model for Numerical Analysis of Thermal Phenomena in Laser-Arc Hybrid Welding Process. **International Journal of Heat Mass Transfer**, v. 54, p. 4966-4974, 2011.
- [122] YAN S., N. Y., ZHU Z., CHEN H., GOU G., YU J., WAN G. Characteristics of Microstructure and Fatigue Resistance of Hybrid Fiber Laser-MIG Welded Al-Mg Alloy Joints. **Applied Surface Science**, v. 298, p. 12-18, 2014.
- [123] REUTZEL E. W., S. M. J., MIKESIC D. A. Joining pipe with the hybrid Laser-GMAW process: Weld tests results and cost analysis. **Welding Journal**, v. 85, p. 66-71, 2006.
- [124] ASCARI A., F. A., ORAZI L., CAMPANA G. The influence of process parameters on porosity formation in hybrid LASER-GMA welding of AA6082 aluminium alloy. **Optics and Laser Technology**, v. 44, p. 1485-1490, 2012.
- [125] CASALINO G., M. M., LEO P., BENYOUNIS K. Y., OLABI A. G. Study on arc and Laser powers in the hybrid welding of AA5754 Al-alloy. **Materials Design**, v. 61, p. 191-198, 2014.
- [126] GAO Z., S. X., JIANG P., CAO L., ZHOU Q., YUE C., LIU Y., WANG C. Parameters optimization of hybrid fiber Laser-arc butt welding on 316L stainless steel using Kriging model and GA. **Optics and Laser Technology**, v. 83, p. 153-162, 2016.

- [127] HAO K., Z. C., ZENG X., GAO M. Effect of heat input on weld microstructure and toughness o Laser-arc hybrid welding of martensitic stainless steel. **Journal of Materials Processing Technology**, v. 245, p. 7-14, 2017.
- [128] LIU L., H. X. Improvment of Laser keyhole formation with the assistance of arc plasma in the hybrid welding process of magnesium alloy. **Optics and Lasers in Engineering**, v. 47, p. 1177-1182, 2009.
- [129] SONG G., L. Z. The influence of Laser pulse wave form on Laser-TIG hybrid welding of AZ31B magnesium alloy. **Optics and Lasers in Engineering**, v. 49, p. 82-88, 2011.
- [130] TAN C., H. W., GONG X., LI 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 Design**, v. 78, p. 51-62, 2015.
- [131] ZENG Z., L. X., MIAO Y., WU G., ZHAO Z. Numerical and experiment analysis of residual stress on magnesium alloy and steel butt joint by hybrid Laser-TIG welding. **Computational Materials Science**, p. 1763-1769, 2011.
- [132] ZHANG L. J., N. J., ZHANG X. J., ZHANG J. X.. Single pass hybrid Laser-MIG welding of 4-mm thick copper without preheating. **Materials Design**, v. 74, p. 1-18, 2015.
- [133] H., S. Laser Hybrid Welding in the Automotive Industry. **Welding Journal**, v. 86, p. 36-40, 2007.
- [134] GERRITSEN C. H. J., W. J., KRISTENSEN J. K. Development of Nd:Yag Laser-MAG hybrid welding of T joints for shipbuilding. *In: 10th Nordic Laser Materials Processing Conference, 2005, Lulea, Sweden. Proceeding [...].* p. 395-406.
- [135] JASNAU U.; HOFFMANN J., S. P. Nd:YAG-Laser – gas metal arc hybrid welding: a chance for the use of the advantages of Laser technology and flexible automation in shipbuilding and steel construction. *In: International Conference on Robotic Welding, Intelligence and Automation, 2002, Shanghai, China. Proceeding [...].* RWIA'200, 09 to 12 dec 2002.
- [136] OLSCHOK S., R. U., DILTHEY U. Robotic application for Laser-GMA hybrid welding in shipbuilding. *In: Laser Materials Processing Conference ICALEO, 2007, Orlando, USA. Laser Institute of America, p. 308-315.*
- [137] WALZ C., S. I. S., EL RAYES M., SEEFELD T., SEPOLD G. Hybrid welding of steel for offshore applications. *In: 11th International Offshore and Polar Engineering Conference, 2001, Stavanger, Norway.*
- [138] ROLAND F., R. T., PETHAN G. Laser welding in ship building - An overview of the activities at Meyer Werft. *In: IIW International Conference in Connection with Annual Assembly, 2002, Copenhagenm Denmark. Proceeding [...].* p. 103-115.

- [139] GRIBENCHENKO, A. V., OVCHINNIKOV, A.S., GAPICH, D.S., MOTORIN, V.A., NOVIKOV, A.E., BOCHARNIKOV, V.S., FOMIM, S.D. **Structuring carbon alloys due to carbon mass transfer**. Kurgan State Agricultural Academy Kurgan; Russian Federation: IOP Conference Series: Earth and Environmental Science, 2019.
- [140] KIM, K. H., MOON, I.J., KIM, K.W., KANG, K.B., PARK, B.G., LEE, K.S. Influence of Carbon Equivalent Value on the Weld Bead Bending Properties of High-Strength Low-Alloy Steel Plates. **Journal of Materials Science and Technology**, v. 33, p. 321-329, 2017.
- [141] ODEBIYI, O. S., ADEDAYO, S.M., TUNJI, L.A., ONUORAH, M.O. A review of weldability of carbon steel in arc-based welding processes. **Cogent Engineering**, v. 6, 2019.
- [142] CORPORATION, A. Backing de Fibra de Vidro Fiback®. 2019. Disponível em: <https://www.alumaq.com.br/produto/aquasol-fita-de-backing-de-soldagem-fiback/>. Acesso em: 10 oct 2019.
- [143] SOLDAGEM, I. Sistema Portátil de Monitoração de Processos de Soldagem. Disponível em: <https://www.imc-soldagem.com.br/pt-br/equipamentos/sistemas-de-monitoramento/sap-v4>. Acesso em: 29 Jan 2020.
- [144] RODRIGUES, M. B. **Desenvolvimento de Sistema de Oscilação Axial de Arame Aplicado em Soldagem LASER de Revestimento**. 2020. (Mestrado) - Departamento de Engenharia Mecânica, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, SC, Brasil, 2020.
- [145] PATSCHGER, A. B., J.; BERGMANN, J. P. Process-limiting Factors and Characteristics of Laserbased Micro Weldin. **Physics Procedia**, v. 56, p. 740-749, 2014.
- [146] DESCHUYTENEER, D., PETIT, D., GONON, M. AND CAMBIER, F. Influence of large particle size – up to 1.2mm – and morphology on wear resistance in NiCrBSi/WC Laser clad composite coatings. **Surface & Coatings Technology**, v. 311, p. 365-373, 2015.
- [147] CARDOSO, F., MACHADO A. A., COLAÇO F. H. G. **Avaliação da Geometria do Cordão de Solda Depositado com Diferentes Gases pelo Processo GMAW**. Salvador, BA: 2015.
- [148] ZANINI, J. B. **Investigação e Prospecções para o Processo de Soldagem Híbrida Plasma-MIG Serial**. 2020. (Mestrado) - Departamento de Engenharia Mecânica, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, SC, Brasil, 2020.
- [149] FRANCISCO SARTORI, R. H. G. E. S., JAIR CARLOS DUTRA, LUIZ EDUARDO DOS SANTOS PAES, MATEUS BARANCELLI SCHWEDERSKY, CLEBER MARQUES. Uma Análise Comparativa entre Diferentes Versões de Variantes Modernas do Processo MIG/MAG para o Passe de Raiz em Soldagem Orbital. **Soldagem & Inspeção**, v. 22(4), p. 442-452, 2017. DOI: <http://dx.doi.org/10.1590/0104-9224/SI2204.04>.

APÊNDICE A – PERFIS DE MICRODUREZA – SOLDAS LBW E HLAW

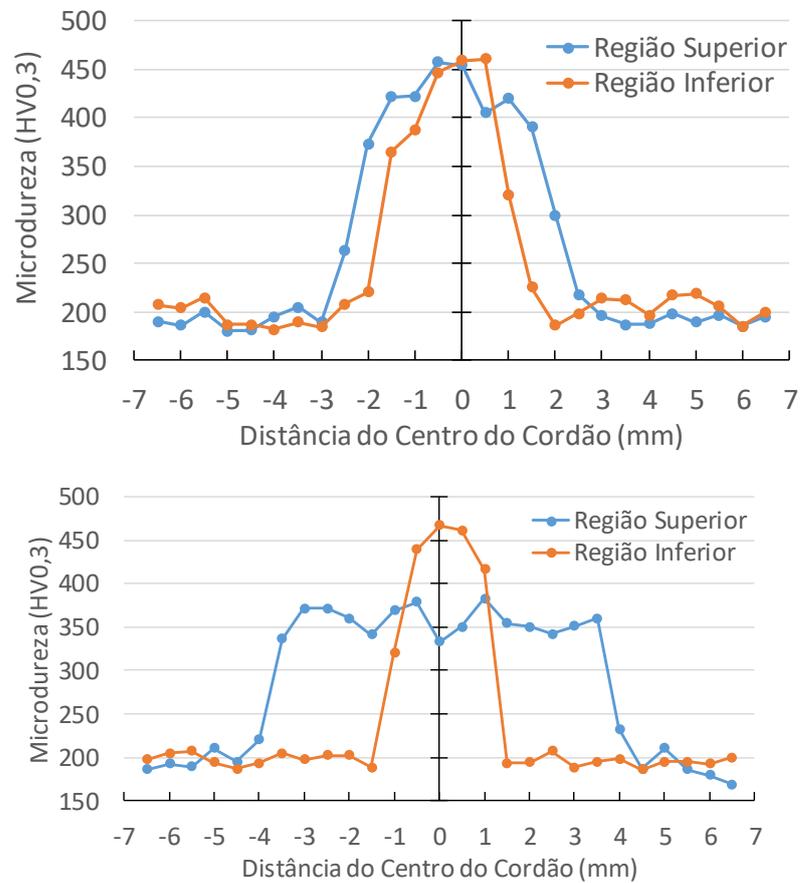


Figura 80 – Perfis de microdureza das regiões superior e inferior das amostras soldadas pelos processos LBW (superior) e HLAW (inferior), ambos com 5 kW de potência Laser. (Fonte: Autor)

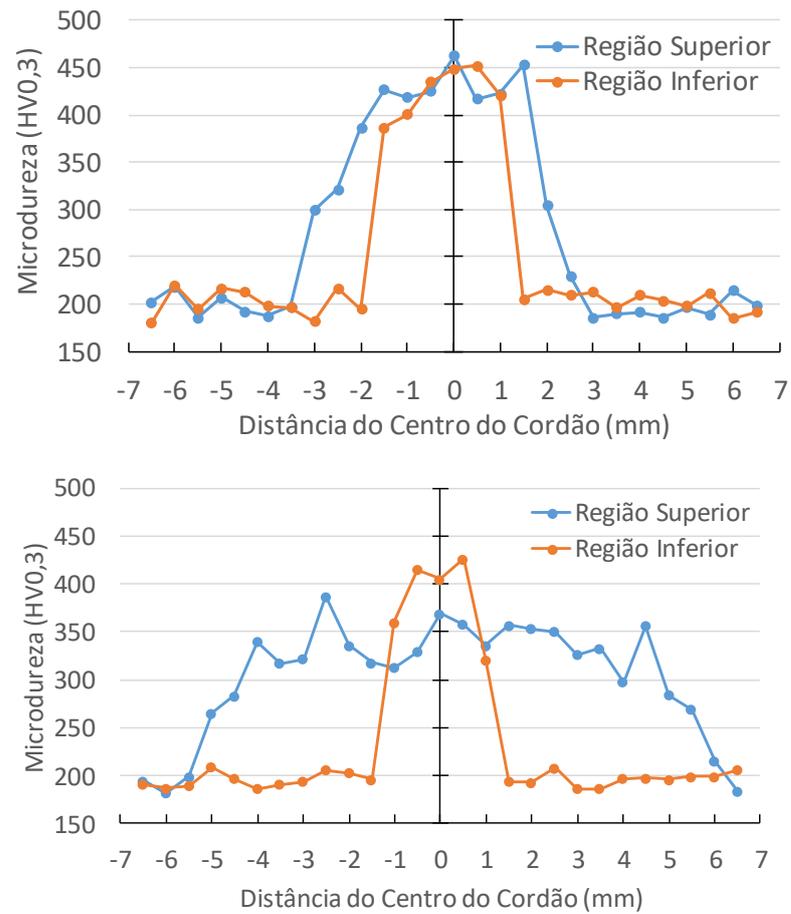


Figura 81 - Perfis de microdureza das regiões superior e inferior das amostras soldadas pelos processos LBW (superior) e HLAW (inferior), ambos com 6 kW de potência Laser. (Fonte:

Autor)

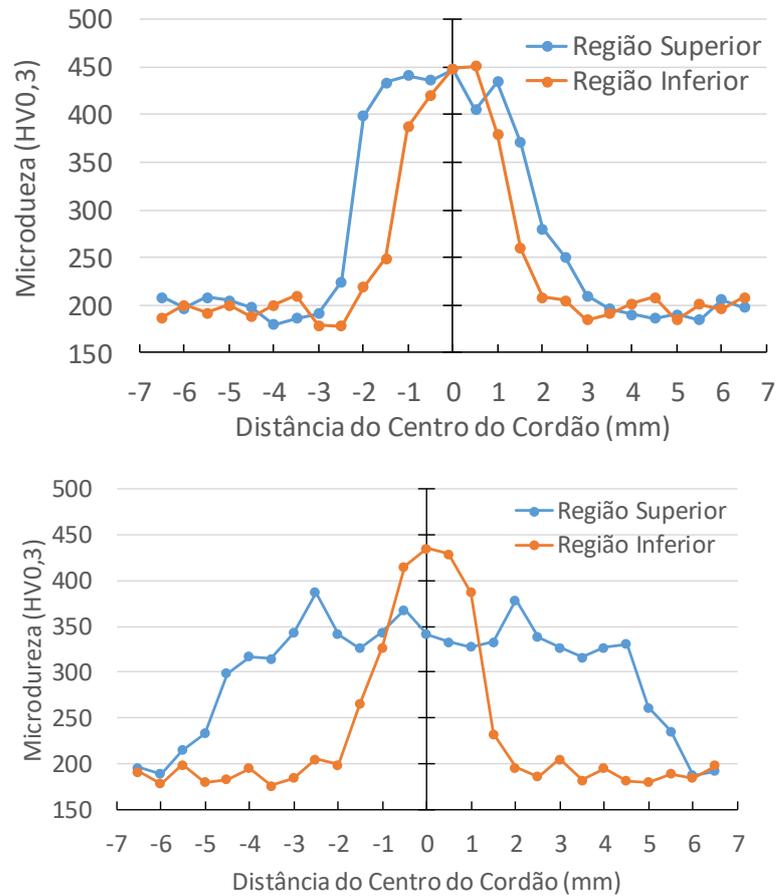


Figura 82 - Perfis de microdureza das regiões superior e inferior das amostras soldadas pelos processos LBW (superior) e HLAW (inferior), ambos com 7 kW de potência Laser. (Fonte: Autor)

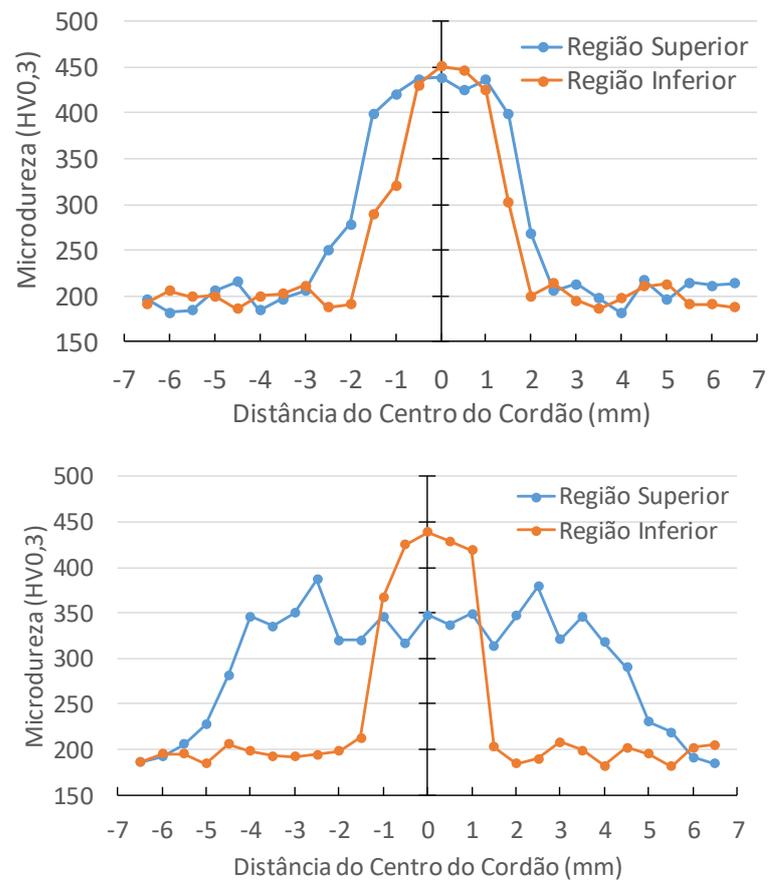


Figura 83 - Perfis de microdureza das regiões superior e inferior das amostras soldadas pelos processos LBW (superior) e HLAW (inferior), ambos com 8 kW de potência Laser. (Fonte: Autor)

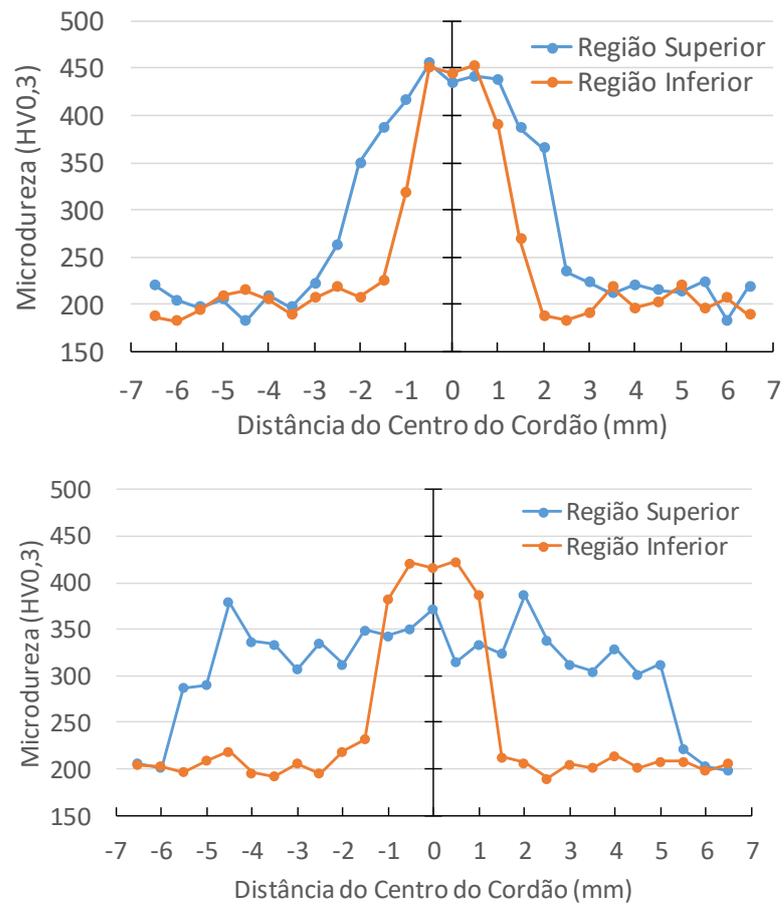


Figura 84 - Perfis de microdureza das regiões superior e inferior das amostras soldadas pelos processos LBW (superior) e HLAW (inferior), ambos com 9 kW de potência Laser. (Fonte: Autor)