

UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA CATARINA
CENTRO TECNOLÓGICO DE JOINVILLE
CURSO DE ENGENHARIA NAVAL

GABRIEL DE SIMAS ASQUEL

DESENVOLVIMENTO E AVALIAÇÃO DE TÉCNICA DE VIBRAÇÃO TRANSVERSAL
DO ARAME APLICADO À SOLDAGEM GTAW

Joinville
2020

GABRIEL DE SIMAS ASQUEL

DESENVOLVIMENTO E AVALIAÇÃO DE TÉCNICA DE VIBRAÇÃO TRANSVERSAL
DO ARAME APLICADO À SOLDAGEM GTAW

Trabalho apresentado como requisito para
obtenção do título de bacharel no Curso de
Graduação em Engenharia Naval do Centro
Tecnológico de Joinville da Universidade
Federal de Santa Catarina.

Orientador: Prof. Dr. Tiago Vieira da Cunha.

Joinville
2020

GABRIEL DE SIMAS ASQUEL

DESENVOLVIMENTO E AVALIAÇÃO DE TÉCNICA DE VIBRAÇÃO TRANSVERSAL
DO ARAME APLICADO À SOLDAGEM GTAW

Este trabalho de Conclusão de Curso foi julgado adequado para obtenção do título de bacharel em Engenharia Naval na Universidade Federal de Santa Catarina, Centro Tecnológico de Joinville.

Banca Examinadora:



Documento assinado digitalmente

Tiago Vieira da Cunha

Data: 08/12/2020 20:18:48-0300

CPF: 027.054.449-63

Prof. Dr. Tiago Vieira da Cunha
Orientador
Presidente

Prof. Dr. Hélio Ormeu Ribeiro
Membro
Instituto Federal de Santa Catarina

Prof. Dr. Víctor Vergara Díaz
Membro
Universidade de Antofagasta

Dedico este trabalho a minha família.
Em especial, a meus pais Ademir e Salete.

AGRADECIMENTOS

À Deus.

Aos meus pais, Ademir e Salete.

Aos meus irmãos, Rafael e Sara.

A minha namorada, Aline.

Ao meu orientador, Tiago, pela amizade e ensinamentos.

Aos meus colegas do LTS, pela amizade e troca de experiências.

Aos demais professores, pela dedicação à educação e contribuição ao desenvolvimento do país.

Em especial, Thiago Pontin e Luís Calil.

Ao LTS, por fornecer um ambiente de aprendizado e disponibilizar os equipamentos à realização deste trabalho. E à empresa Stribus, pelo fornecimento dos corpos de prova utilizados neste trabalho.

À Universidade Federal de Santa Catarina, pela excelente educação oferecida.

Ao CNPq, pela oportunidade de pesquisa e pela bolsa de iniciação científica.

À Embraco, pela oportunidade de estágio, aprendizado e vivência corporativa.

“Se eu vi mais longe, foi por estar sobre os ombros de gigantes”.

Isaac Newton

RESUMO

No presente trabalho é apresentado o desenvolvimento de um dispositivo capaz de vibrar o arame de adição na direção transversal à sua alimentação visando sua aplicação na soldagem GTAW. Foram realizados ensaios de caracterização desse dispositivo a fim de se encontrar as condições de operação para cada condição de soldagem. Foram realizados ensaios de soldagem com a simples deposição de cordões sobre chapa. Empregaram-se o processo convencional e a vibração do arame nas frequências de 100Hz e 150Hz para as amplitudes de 0,25mm, 0,50mm, 1,00mm e 1,50mm. A análise dos cordões de solda mostrou que a vibração imposta à poça de fusão não promove alterações na geometria da região soldada. Quanto à porosidade, os resultados mostram que o tamanho máximo dos poros reduziu até 69% e a área relativa de porosidade reduziu até 46%, para a frequência de 150Hz e amplitude de 0,50mm. A morfologia dos cordões não apresentou influência da variação da amplitude ou frequência. Porém, a área relativa de porosidade tem melhor desempenho em uma faixa específica de amplitude e frequência de vibração.

Palavras-chave: Desenvolvimento de Dispositivo. Soldagem de Alumínio. Vibração. Arame de Adição. GTAW.

ABSTRACT

This work presents the development of a device capable of vibrating the filler material in the transversal direction to the weld bead, aiming its application in GTAW welding. Characterization tests were carried out on this device in order to find the operating conditions for each welding condition. Welding tests were carried out with bead-on-plate. The conventional process and wire vibration at frequencies of 100Hz and 150Hz were used for amplitudes of 0.25mm, 0.50mm, 1.00mm and 1.50mm. The analysis of the weld beads showed that the vibration imposed on the weld pool does not promote changes in the geometry of the welded region. As for porosity, the results show that the maximum pore size reduced up to 69% and the relative porosity area reduced up to 46%, for the frequency of 150Hz and amplitude of 0.50mm. The morphology of the weld bead had no influence on the variation in amplitude or frequency. However, the relative porosity area decreased within a range of the amplitude and frequency of wire vibration.

Key-words: Device Development. Aluminum Welding. Vibration. Filler Material. GTAW.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Solubilidade do hidrogênio no alumínio.....	20
Figura 2 – Porosidade no cordão de solda da liga 6082-T6 soldada com o processo GTAW e material de adição ER4043.....	21
Figura 3 – Porosidade nos cordões de solda. Em (a), CMT [®] convencional. Em (b), CMT [®] pulsado.....	23
Figura 4 – Sistema de vibração ultrassônica aplicada na peça de trabalho no processo SMAW.	25
Figura 5 – Sistema de vibração ultrassônica aplicada na peça de trabalho no processo GTAW.	26
Figura 6 – Sistema de vibração aplicada na poça de fusão no processo SMAW.....	27
Figura 7 – Sistema de vibração ultrassônica aplicada na poça de fusão no processo GTAW.	28
Figura 8 – Conceito do dispositivo desenvolvido no presente trabalho.	30
Figura 9 – Requisitos de projeto da tecnologia desenvolvida.	30
Figura 10 – Processo de projeto da tecnologia desenvolvida.....	31
Figura 11 – Transdutor utilizado no presente trabalho.....	33
Figura 12 – Direcionador de arame na soldagem GTAW.	34
Figura 13 – Primeiro conceito do dispositivo desenvolvido.	35
Figura 14 – Projeto do dispositivo acoplado à tocha de soldagem GTAW.....	36
Figura 15 – Vistas do dispositivo.	37
Figura 16 – Estudo de movimentação do dispositivo.....	38
Figura 17 – Detalhe do acoplamento do direcionador de arame e transdutor.	39
Figura 18 – Dispositivo construído e montado na tocha de soldagem.	40
Figura 19 – Esquema de controle do dispositivo.....	40
Figura 20 – Circuito impresso para funcionamento do TDA7265.	41
Figura 21 – Bancada utilizada nos ensaios de caracterização do dispositivo.....	42
Figura 22 – Detalhe da bancada de caracterização.....	43
Figura 23 – Bancada de ensaios utilizada.....	44
Figura 24 – Detalhe da fixação da peça de trabalho no sistema de deslocamento.....	45
Figura 25 – Localização de obtenção das amostras no cordão de solda.....	47
Figura 26 – Dimensões do cordão de solda.....	48
Figura 27 – Procedimento de análise de porosidade.	49
Figura 28 – Sobreposição da imagem original e imagem utilizada na análise de poros.	50

Figura 29 – Caracterização do dispositivo: frequência de 150Hz e amplitude de oscilação de 1,00mm.....	51
Figura 30 – Relação entre a tensão eficaz imposta pelo gerador de funções ao transdutor e a amplitude real observada nos ensaios de caracterização.	53
Figura 31 – Relação entre as tensões eficazes imposta pelo gerador de funções ao transdutor e a amplitude real para as frequências de 50Hz, 100Hz, 150Hz e 200Hz.....	54
Figura 32 – Morfologia do cordão soldado sem vibração do arame de adição (Referência)...	55
Figura 33 – Morfologia dos cordões de solda produzidos com frequência de 100Hz.	55
Figura 34 – Morfologia dos cordões de solda produzidos com frequência de 150Hz.	56
Figura 35 – Análise qualitativa da porosidade dos cordões de solda.	58
Figura 36 – Tamanho máximo de poros em função da frequência e amplitude de vibração...	60
Figura 37 – Área relativa de porosidade em função da frequência e amplitude de vibração...	61

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Informações técnicas do transdutor eletromecânico.....	32
Tabela 2 – Matriz de caracterização do dispositivo.	43
Tabela 3 – Parâmetros de soldagem utilizados na realização dos ensaios de soldagem.	46
Tabela 4 – Matriz de experimentos.	46
Tabela 5 – Valores de tensão eficaz (rms) do sinal enviado pelo gerador de funções ao transdutor com relação à amplitude e a frequência.....	52
Tabela 6 – Área fundida e diluição dos cordões de solda.	56
Tabela 7 – Morfologia dos cordões de solda.	57
Tabela 8 – Análise qualitativa da porosidade nos cordões de solda.....	59
Tabela 9 – Relação entre frequência e amplitude de vibração sobre a aceleração da vibração forçada.	61

LISTA DE ABREVIATURAS E SÍMBOLOS

GTAW – Gas Tungsten Arc Welding

TIG – Tungsten Arc Welding

GMAW – Gas Metal Arc Welding

SMAW - Shielded Metal Arc Welding

CI – Circuito Integrado

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	14
1.1 OBJETIVOS	16
1.1.1 Objetivo geral.....	16
1.1.2 Objetivos específicos.....	16
2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	17
2.1 PARTICULARIDADES DA SOLDAGEM DE LIGAS DE ALUMÍNIO.....	17
2.2 A POROSIDADE NA SOLDAGEM DE LIGAS DE ALUMÍNIO	19
2.3 O CONTROLE DA POROSIDADE NA SOLDAGEM DE LIGAS DE ALUMÍNIO	21
2.4 A APLICAÇÃO DA VIBRAÇÃO MECÂNICA NO METAL FUNDIDO.....	24
3 ESCOPO DE PROJETO	29
3.1 REQUISITOS DE PROJETO	30
3.2 PROCESSO DE PROJETO	31
4 DESENVOLVIMENTO DO DISPOSITIVO	32
4.1 CONCEPÇÃO DO DISPOSITIVO	33
4.2 SISTEMA DE CONTROLE	40
5 MATERIAIS E MÉTODOS	42
5.1 CARACTERIZAÇÃO DO DISPOSITIVO	42
5.2 REALIZAÇÃO DOS ENSAIOS DE SOLDAGEM	44
5.3 OBTENÇÃO DAS AMOSTRAS.....	47
5.4 METODOLOGIA DE ANÁLISE DA MORFOLOGIA DOS CORDÕES DE SOLDA ..	48
5.5 METODOLOGIA DE ANÁLISE DA POROSIDADE DOS CORDÕES DE SOLDA....	49
6 ANÁLISE E DISCUSSÃO DOS RESULTADOS	51
6.1 CARACTERIZAÇÃO DO DISPOSITIVO DESENVOLVIDO	51
6.2 ANÁLISE DA MORFOLOGIA DO CORDÃO DE SOLDA	54
6.2 ANÁLISE DA POROSIDADE DO CORDÃO DE SOLDA.....	58
7 CONCLUSÕES.....	63

1 INTRODUÇÃO

O setor de engenharia e construção naval tem se desenvolvido ao longo dos séculos, tornando possível construir embarcações de maior porte em menor tempo. A soldagem é um dos fatores responsáveis por esse aumento da capacidade de construção do setor naval e, atualmente, é a principal técnica de união metálica empregada nesse setor. Sendo utilizada, por exemplo, na união de chapas, reforçadores e tubulações. Essa tecnologia teve o seu início a partir do final do século XIX e cresceu de maneira mais significativa durante a Primeira Guerra Mundial. Período marcado pela construção do primeiro navio completamente soldado, HMS Fullagar (de origem inglesa), utilizando-se o processo SMAW (MACHADO, 1996). Contudo, a soldagem ascendeu aos parques fabris dos estaleiros na década de 1930 e, em conjunto com a introdução das técnicas de construção pré-fabricada, acelerou a construção de navios em aproximadamente três vezes em comparação com aqueles construídos com rebites (PILIPENKO, 2001). Em contrapartida, recentemente a soldagem vem sendo considerada como um dos processos críticos à manutenção do bom nível de produtividade da indústria naval. Nesse sentido, Roland, Manzon *et al.* (2004) apresentam a soldagem como um fator chave à competitividade dos estaleiros, ressaltando que ela representa uma porção significativa das horas de produção. Além disso, a soldagem é responsável por grande parte do tempo empregado em processos não produtivos, tais como retrabalhos oriundos das distorções causadas pelo calor da soldagem. De acordo com Pilipenko (2001), as atividades de soldagem chegam a representar até 30% do tempo de produção e 10% do custo envolvido na construção de uma embarcação de grande porte.

Ainda no contexto da construção naval, as ligas de alumínio têm se mostrado uma alternativa ao aço como matéria prima para embarcações e componentes navais. Desde a industrialização da produção de alumínio em 1886, o setor naval demonstrou interesse pelo uso desse material, principalmente devido a sua baixa densidade. Assim, no final do século XIX, surgiram as primeiras embarcações de alumínio, em grande parte veleiros (ALCAN MARINE, 1999). Entretanto, conforme Ferraris e Volpone (2005), apenas após a Segunda Guerra Mundial o alumínio se tornou realmente atrativo à construção naval. Isso se deve principalmente ao desenvolvimento dos métodos de soldagem a arco voltaico, melhores técnicas de construção nos estaleiros, avanço da metalurgia das ligas de alumínio e a demanda por embarcações de alto desempenho e velocidade.

Apesar do custo para obtenção das ligas de alumínio naval ser historicamente superior ao do aço, desde a modernização dos processos de fabricação na década de 1960, essas ligas têm ganhado espaço nos estaleiros, sendo aplicadas em: embarcações de alta velocidade, embarcações de recreio, pesqueiros, embarcações de trabalho e vigilância, e na superestrutura das embarcações de grande porte construídas de aço (ALCAN MARINE, 1999). Como a densidade do alumínio é menor do que a do aço, o processo de construção e manutenção da embarcação se torna mais enxuto e barato. De fato, como sugerido por Lamb (2011) à Marinha Americana, ainda que o custo da estrutura equivalente de um navio em alumínio seja cerca de 40% maior do que o custo em aço, ao se considerar a perspectiva da vida útil da embarcação, é possível construir navios de alumínio com apenas 7,5% do custo de aço.

Por outro lado, a soldagem de alumínio não é uma atividade tão comum quanto à do aço. Embora algumas ligas apresentem melhoras significativas na soldabilidade, um dos principais desafios ainda é a porosidade dos cordões de solda. Essa descontinuidade tem origem no aprisionamento dos gases no metal fundido, principalmente do hidrogênio que é extremamente solúvel nas ligas de alumínio em estado líquido. Durante o resfriamento do material, as moléculas de hidrogênio buscam a superfície da poça de fusão, porém devido à alta taxa de solidificação, ocorre o aprisionamento do gás. O hidrogênio pode ser adicionado à poça de fusão através da contaminação da área por hidrocarbonetos ou umidade, sobretudo, nas regiões onde o óxido não foi perfeitamente removido e há presença de lubrificantes e refrigerantes (ALCAN ALUMÍNIO DO BRASIL S/A, 1993). Os efeitos nocivos dos poros nos cordões de solda de ligas de alumínio, conforme relatado por Ashton, Wesley e Dixon (1975), consistem principalmente na diminuição da resistência à tração e da ductilidade do material, bem como na redução da resistência à fadiga da área soldada. Isso ocorre pela diminuição da área resistente aos esforços e pela concentração de tensão no entorno dessas descontinuidades.

Dado o exposto quanto ao gargalo que a soldagem representa no âmbito da construção naval, faz-se necessário o desenvolvimento de técnicas capazes de aumentar a competitividade industrial. Para isso, há dois caminhos fundamentais: melhorar a produtividade e/ou a qualidade dos produtos e processos. Nesse sentido, tem-se o desenvolvimento de técnicas de soldagem a fim de aperfeiçoar a qualidade das juntas soldadas. Logo, técnicas que sejam capazes de mitigar a presença de poros em cordões de solda produzidos a partir de ligas de alumínio é de grande interesse para a indústria. Nesse contexto, o presente trabalho busca desenvolver uma técnica capaz de mitigar a porosidade em cordões de solda produzidos em alumínio.

1.1 OBJETIVOS

1.1.1 Objetivo geral

Este trabalho tem por objetivo desenvolver uma técnica capaz de realizar a vibração transversal do arame de adição visando sua aplicação na soldagem GTAW e, assim, avaliar seus efeitos no que diz respeito à porosidade e morfologia do cordão de solda.

1.1.2 Objetivos específicos

A fim de se atingir o objetivo principal deste trabalho, é necessário concluir as etapas apresentadas abaixo:

- Projetar e construir um dispositivo capaz de realizar a vibração transversal do arame de adição visando sua aplicação na soldagem GTAW;
- Caracterizar o dispositivo desenvolvido quanto as suas condições de operação;
- Realizar ensaios de soldagem GTAW com alimentação de material sobre chapas planas de alumínio, empregando a técnica da vibração transversal do arame de adição e o método convencional;
- Avaliar os efeitos da técnica proposta quanto ao índice de porosidade e morfologia dos cordões de solda.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Neste capítulo, aborda-se de maneira sintética a soldagem do alumínio e suas ligas, trazendo as principais características e limitações. De tal modo, discute-se a formação e a presença de porosidade na soldagem de alumínio, buscando-se apresentar técnicas desenvolvidas com o objetivo de mitigar esse fenômeno. Finalmente, oferece-se uma breve contextualização da aplicação da vibração mecânica durante os processos de fundição e soldagem de metais.

2.1 PARTICULARIDADES DA SOLDAGEM DE LIGAS DE ALUMÍNIO

A soldagem de ligas de alumínio difere da soldagem de aços em virtude das diferenças metalúrgicas de ambos os materiais, principalmente no que diz respeito aos óxidos, à condutividade térmica e à solubilidade do hidrogênio. Conforme Mathers (2002), o óxido de alumínio possui temperatura de fusão cerca de três vezes superior ao alumínio em si, exigindo elevado aporte térmico para sua coalescência. Além disso, essa camada de óxido é isolante e refratária, dificultando o fluxo de calor à peça de trabalho e, conseqüentemente, a soldagem desse material. Embora a temperatura de fusão das ligas de alumínio seja menor do que a do aço, em virtude de sua condutividade térmica ser aproximadamente seis vezes maior, normalmente é necessário um relativo maior aporte de calor. Ainda segundo Mathers (2002), na soldagem de chapa grossas de ligas de alumínio, podem ocorrer defeitos relacionados à falta de fusão devido à alta condutividade térmica e conseqüente perda de calor para o ambiente.

Do ponto de vista do processo, a soldagem de ligas de alumínio possui algumas características diferentes da soldagem de aços. Haja visto o exposto acima sobre as temperaturas de fusão do óxido de alumínio e do próprio alumínio, é evidente que durante soldagem não se realiza a fusão de ambos os materiais. Sendo assim, necessita-se de técnicas capazes de remover e dispersar a camada de óxido de alumínio antes e durante a soldagem (MATHERS, 2002).

Um dos principais processos utilizados na soldagem de ligas de alumínio é o GMAW. Essa preferência se dá, entre outros fatores, pela facilidade de remoção da camada de óxido de alumínio através do fenômeno de limpeza catódica. Conforme Scotti, Dutra e Sanches (1998), a limpeza catódica é explicada através da emissão de campo, também chamada de emissão de cátodo frio. Quando se utiliza a polaridade reversa, em que o eletrodo é positivo, para se soldar um material não termiônico, há a incidência e a aglomeração de íons positivos sobre a camada de óxido, de maneira a formar um campo elétrico. Então, ocorre a penetração dos elétrons por

meio da camada de óxido de alumínio e a formação de pontos de emissão. Tais pontos possuem elevada temperatura, sendo capazes de fundir ou evaporar os óxidos, que são removidos da peça de trabalho por meio da tensão superficial ou vaporização. Conforme Lancaster (1986), esse mecanismo é percebido em camadas de óxido de finas. Por outro lado, para as camadas de maior espessura, se tem a ocorrência de um fenômeno capaz de transformar o filme de óxido em um condutor de corrente elétrica. Por fim, Scotti, Dutra e Sanches (1998) e Sarrafi e Kovacevic (2010) afirmam que ainda existem outras duas teorias sobre o funcionamento da limpeza catódica. A primeira teoria parte da premissa que a emissão de elétrons pela peça de trabalho em alta velocidade é a responsável por romper e quebrar a camada de óxido. E a segunda hipótese enuncia que a limpeza catódica se dá pelo bombardeamento de íons sobre a camada de óxido com energia suficiente para causar o seu rompimento.

O processo GTAW, embora geralmente apresente uma menor taxa de deposição de material, oferece um arco voltaico mais estável, a possibilidade da soldagem autógena e tende a resultar em um processo sem respingos. Conforme destacado por Wang *et al.* (2020), na soldagem de ligas de alumínio para aplicações aeroespaciais, automobilísticas, metroviárias e em vasos de pressão se tem preferência pelo processo GTAW justamente pela qualidade e controle do passe de raiz e penetração do cordão de solda, além de ser um processo livre de respingos. Por outro lado, a utilização de corrente contínua e eletrodo com polaridade positiva no processo GTAW resulta no superaquecimento e na acelerada deterioração do eletrodo de tungstênio. Assim, a configuração padrão desse processo é o eletrodo com polaridade negativa, onde há um fluxo de elétrons do eletrodo à peça de trabalho e um fluxo de íons no sentido contrário. Dessa maneira, conforme ressaltado por Scotti, Dutra e Sanches (1998) e por Mathers (2002), não acontece o processo de limpeza catódica e a remoção da camada de óxido na superfície da peça de trabalho.

Dessa forma, na soldagem GTAW de ligas de alumínio, emprega-se a corrente alternada. Nesse caso, ocorre a inversão de polaridades no eletrodo de tungstênio e se consegue obter vantagens oriundas de ambas as polaridades. Enquanto a corrente for positiva, realiza-se a limpeza catódica responsável pela remoção da camada de óxido, conforme discutido anteriormente. E quando a corrente for negativa, ocorre o processo de maior transferência térmica à peça de trabalho e a fusão do material, tal como no processo GTAW convencional. Sendo os parâmetros envolvidos nessa polaridade, conforme Scotti, Dutra e Ferraresi (2000), os principais responsáveis pela morfologia do cordão de solda, principalmente a penetração.

2.2 A POROSIDADE NA SOLDAGEM DE LIGAS DE ALUMÍNIO

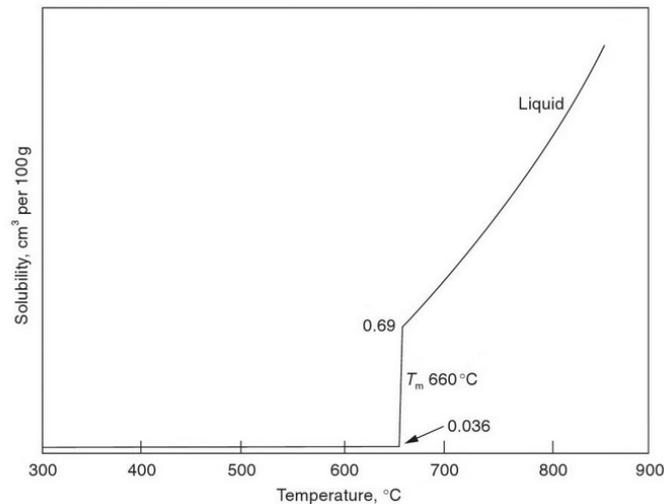
Como mencionado anteriormente, uma das discontinuidades com maior ocorrência na soldagem de alumínio é a porosidade nos cordões de solda. Rudy e Rupert (1970) analisaram os efeitos da porosidade sobre as propriedades mecânicas do alumínio. Para isso, os autores realizaram a soldagem GTAW com polaridade direta com cordões de simples deposição sobre chapas, utilizando as ligas de alumínio 2014-T6, com material de adição 4043, e 2219-T87, com material de adição 2319. Conforme os autores, a resistência à tração na direção transversal à soldagem apresentou uma diminuição proporcional à redução da área esperada para a fratura no cordão de solda. De forma similar, os autores mostram que a resistência à fadiga mecânica na direção transversal à soldagem decaiu linearmente com a redução da área do plano de fratura do cordão de solda.

De maneira similar, Ashton, Wesley e Dixon (1975) realizaram a soldagem da liga de alumínio 5086-H116 com o material de adição 5356 pelo processo GMAW. A fim de avaliar os efeitos da porosidade nas propriedades mecânicas do material, os autores provocaram condições propícias para sua ocorrência através da adição de umidade ao gás de proteção, argônio. Os autores perceberam que tanto a resistência à tração quanto a ductilidade do cordão de solda são influenciadas pela presença de porosidade, utilizando um índice para medir e classificar a porosidade com relação à área total e à área de poros. Conforme seus resultados, percebe-se que a resistência à tração diminuiu cerca de 14,6% e a ductilidade, medida através do alongamento da amostra no ensaio de tração reduziu 50%, em um índice de porosidade de 4,2%, comparado com o índice de 0,03%. Ademais, os autores realizaram um ensaio de dobramento, e para um índice de porosidade superior a 1,1%, todas as amostras falharam.

Recentemente, He *et al.* (2018) avaliaram os efeitos da porosidade nas propriedades mecânicas da liga de alumínio 2A97-T3 soldada pelo processo de solda à laser com o material de adição ER2319. Os autores constataram que a resistência à tração reduziu cerca de 30%, comparada à amostra sem a presença de poros. E a ductilidade apresentou uma diminuição de 14,3% para 2%, representando cerca de 86%, nessas mesmas condições.

A origem dessa discontinuidade se dá, principalmente, no aprisionamento do gás hidrogênio no interior da poça de fusão. De acordo com Mathers (2002), o hidrogênio é cerca de vinte vezes mais solúvel no alumínio líquido em comparação com o metal solidificado, sendo que essa transição nos níveis de solubilidade é abrupta. A Figura 1 apresenta o gráfico de solubilidade do hidrogênio no alumínio em ambos os estados sólido e líquido.

Figura 1 – Solubilidade do hidrogênio no alumínio.

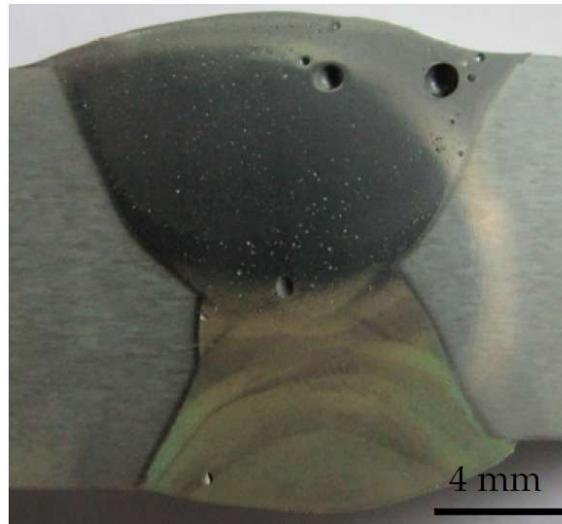


Fonte: Mathers (2002, p. 19).

Considerando a alta condutividade térmica e, naturalmente, a elevada taxa de resfriamento desse material, é notório que as moléculas de gás hidrogênio não consigam emergir a superfície da poça fusão nos instantes subsequentes à passagem do arco voltaico. O resultado são cordões de solda cujo material fundido apresenta poros, ocasionando a diminuição da resistência mecânica da junta soldada, conforme discutido anteriormente. A Figura 2 mostra uma macrografia transversal de um cordão do material de adição ER4043 de simples deposição sobre uma chapa da liga de alumínio 6082-T6, realizado pelo processo GTAW. Claramente, percebe-se a elevada quantidade de poros distribuídos no cordão de solda, bem como a grande dimensão de alguns poros. Tal situação torna-se crítica quando a junta soldada é solicitada mecanicamente, pois há a diminuição da área de seção transversal que resiste à tração. Ademais, em um ciclo de fadiga mecânica, o surgimento de trincas se pode dar a partir de tais poros.

A existência de hidrogênio durante a soldagem se deve à absorção de umidade pelo sistema de distribuição de gás, pelas peças de trabalho ou pelo material de adição, bem como devido à presença de hidrocarbonetos na região soldada. Segundo Martins (2008), a entrada de umidade pode ocorrer através da contaminação do gás de proteção (gases com baixa pureza ou existência de defeito no isolamento do sistema de distribuição), condensação na chapa ou no metal de adição devido à ultrapassagem do ponto de orvalho, e em virtude da presença de alumina hidratada na superfície da peça de trabalho. Por sua vez, a alumina hidratada é consequência do mal armazenamento do material antes da soldagem, onde houve absorção de umidade pela camada de óxido de alumínio, e preparação inadequada do material.

Figura 2 – Porosidade no cordão de solda da liga 6082-T6 soldada com o processo GTAW e material de adição ER4043.



Fonte: Wang *et al.* (2017).

Outra fonte de absorção de hidrogênio na soldagem de ligas de alumínio é o uso de óleos refrigerantes ou lubrificantes nos processos de fabricação anteriores à união, por exemplo, o processo de corte de chapas e perfis. Conforme Mathers (2002) e Martins (2008), as moléculas de hidrocarbonetos presentes nesses produtos sofrem dissociação sob a ação do elevado calor oriundo do arco voltaico. Dessa forma, há a liberação de moléculas de hidrogênio na região próxima à extremidade do cordão de solda, resultando na infiltração e permanência desse elemento na junta soldada.

Rudy e Rupert (1970) afirmam ser possível diferenciar a origem da porosidade na soldagem de alumínio, aquela originada da presença de hidrocarbonetos apresenta formato alongado e irregular. Por outro lado, os poros com formato esférico são oriundos da contaminação do metal líquido por gás e/ou vapor.

2.3 O CONTROLE DA POROSIDADE NA SOLDAGEM DE LIGAS DE ALUMÍNIO

É natural que se busque o desenvolvimento de técnicas a fim de mitigar a formação de porosidade na soldagem de ligas de alumínio. Recentemente, Huang *et al.* (2020) desenvolveram uma técnica de monitoramento e otimização online para controlar as variáveis de soldagem e impedir a formação de porosidade. Os autores realizaram a soldagem de topo de chapas da liga de alumínio 5A06 com material de adição ER 5183, utilizando o processo GTAW pulsado com forma de onda retangular e frequência de 70Hz. O sistema de controle

desenvolvido pelos autores inclui a aquisição da corrente de soldagem, bem como utiliza uma câmera de alta velocidade para realizar a filmagem do arco voltaico e do cordão de solda. Com base nesses dados, um algoritmo do tipo controlador proporcional integral derivativo (em inglês, PID) em conjunto com um sistema de otimização via redes neurais realiza o ajuste da corrente de soldagem em tempo real, através da comunicação via porta digital com a fonte de soldagem. Conforme o resultado dos autores, o ajuste da corrente de pulso permitiu um controle efetivo do nível de porosidade na zona fundida. Naturalmente, a técnica apresentada por Huang *et al.* (2020) necessita de elevado poder computacional e tende a possuir alto custo de implantação.

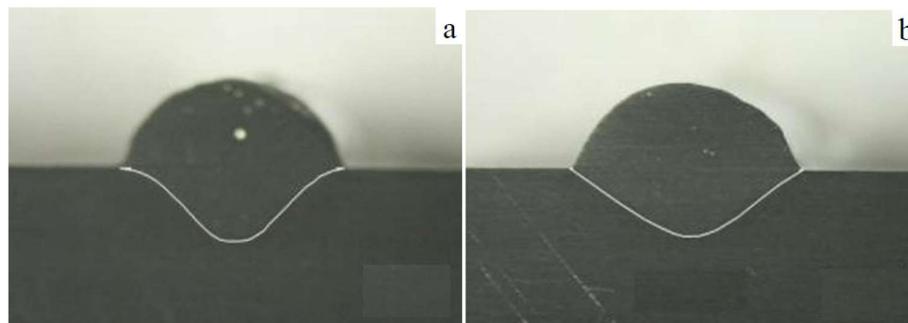
Ainda atuando no controle da corrente de soldagem, Wang *et al.* (2020) avaliaram os efeitos da pulsação da onda retangular em alta frequência no processo GTAW com corrente alternada. Os autores realizaram a deposição de cordões sobre chapas planas da liga 6061-T6 de 6mm de espessura e variaram a frequência de pulsação entre 10kHz e 40kHz. O resultado dos autores mostrou uma redução significativa no tamanho médio dos poros com o aumento da frequência de pulsação da corrente. Em 40kHz, os autores perceberam que o tamanho médio dos poros teve uma redução de cerca de 79% quando comparado com o método convencional. Conforme Wang *et al.* (2020), esse resultado pode ser explicado pela introdução da energia ultrassônica na poça de fusão. Essa energia promove uma depressão na superfície do metal líquido que se torna a direção preferencial no fluxo do hidrogênio. Por sua vez, o hidrogênio se acumula em bolsões próximos à superfície até conseguir emergir e deixar a poça de fusão.

Essa técnica de pulsação da corrente na soldagem GMAW, conforme Silva e Scotti (2006), tende a ser eficaz no controle da porosidade. No entanto, os autores decidiram estudar a técnica de duplo pulso no processo GMAW, comparando os resultados com o processo de pulsação simples. Segundo Silva e Scotti (2006), o processo de duplo pulso, denominado DP-GMAW, é uma variação do processo GMAW pulsado (denominado P-GMAW) e consiste em sobrepor a corrente pulsada, que é responsável pelo controle da transferência metálica, a uma pulsação térmica (conceitualmente realizada em baixa frequência). Então, conforme os autores, tem-se o controle efetivo da poça de fusão e se tende a aumentar a produtividade do processo. No que diz respeito à soldagem de ligas de alumínio, os autores inicialmente acreditavam que essa dupla pulsação da corrente deveria piorar o nível de porosidade no cordão de solda. A fim de comparar ambas as técnicas, os autores realizaram a simples deposição de cordões sobre chapas utilizando a liga de alumínio 5052-F e o material de adição ER4043. Os resultados de Silva e Scotti (2006) mostram que o número de poros com o processo DP-GMAW praticamente dobrou para uma corrente média de 94A, comparado ao processo P-GMAW. Por outro lado, o

volume total de poros aumentou cerca de 20% na mesma corrente média de soldagem. Esse resultado induz a hipótese de que esse processo de dupla pulsação originou uma diminuição do tamanho médio dos poros, dado o aumento bastante inferior do volume em relação à quantidade de poros.

De maneira similar, Baoqiang *et al.* (2016) avaliaram a aplicação do processo de soldagem GMAW com um modo de transferência metálica por curto-circuito controlado, CMT[®], na deposição de cordões sobre chapas da liga 2219-T851 com 19mm de espessura utilizando o arame ER2319. No processo CMT[®] convencional, os autores observaram a presença de poros próximos à raiz e à superfície do cordão. Por outro lado, ao utilizarem uma variação desse processo denominada CMT[®]-pulsado, os autores perceberam uma redução na quantidade e no tamanho médio dos poros. A Figura 3 mostra os resultados dos autores, conforme apresentado acima. Conforme Baoqiang *et al.* (2016), ao associarem o processo CMT[®], que busca estabelecer uma maior estabilidade do arco através de controle da corrente soldagem, com a pulsação da corrente, foi possível diminuir ainda mais o aporte de calor à peça de trabalho. Segundo os autores, essa foi a razão para a diminuição da porosidade. Na verdade, observando-se a curva de solubilidade do hidrogênio no alumínio líquido, apresentada na Figura 1, percebe-se um aumento substancial da solubilidade com a temperatura, reforçando a teoria dos autores. Por outro lado, uma chapa mais fria tende a se solidificar mais rápido, dificultando o escape do gás hidrogênio da poça de fusão.

Figura 3 – Porosidade nos cordões de solda. Em (a), CMT[®] convencional. Em (b), CMT[®] pulsado.



Fonte: Adaptado de Baoqiang *et al.* (2016).

Diferentemente do apresentado até o momento, onde se atuou na corrente de soldagem, Li *et al.* (2017) avaliaram os efeitos da aplicação de agentes ativos na peça de trabalho. Os autores realizaram a deposição de cordões sobre chapas da liga 2219-T6 com arame de adição ER2319. O agente ativo foi preparado com uma mistura de quatro tipos de fluoretos em pó

dissolvidos em álcool e transformados em pasta. Então, este fluxo foi aplicado sobre a superfície de trabalho previamente limpa. Os autores realizaram a soldagem GTAW com polaridade direta que, conforme apresentado anteriormente, não é recomendada à soldagem de alumínio devido à dificuldade para remover a camada de óxido. Nesse caso, Li *et al.* (2017) afirmam que a função do fluxo ativo é remover a camada de óxido, permitindo uma soldagem GTAW com as características esperadas nesse modo de operação. Ademais, conforme os autores, os fluoretos interagem com o hidrogênio presente na periferia da poça de fusão e diminuem sua solubilidade no metal líquido. De fato, os resultados dos autores mostram que esse método inibiu a formação de poros nos cordões de solda, se comparado ao processo GTAW com corrente alternada.

2.4 A APLICAÇÃO DA VIBRAÇÃO MECÂNICA NO METAL FUNDIDO

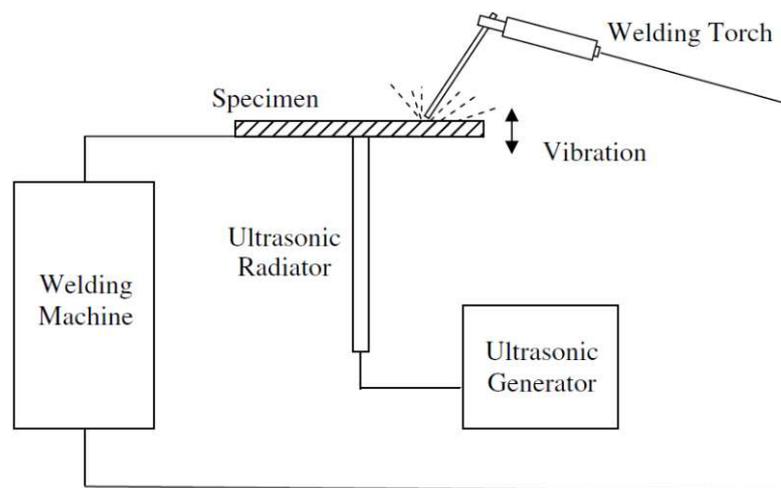
A introdução de vibração durante o processo de fusão e solidificação de metais é alvo de estudo de diferentes processos de fabricação. Conforme Campbell (1981), os primeiros experimentos que se tem registro são da década de 1868, e consistiam na inserção de energia vibracional mecânica nos moldes de fundição. Esse tema se tornou de grande interesse da indústria quase 30 anos mais tarde, no alvorecer da Primeira Guerra Mundial, onde se buscava a melhora das propriedades dos metais fundidos através de um processo mais homogêneo. Tanto nos processos de fundição quanto de soldagem, a literatura traz diversos trabalhos que abordam, sobretudo, a busca pelo refino de grãos da zona fundida e consequente melhoria das propriedades mecânicas das ligas metálicas e cordões de solda. Do ponto de vista da soldagem, destacam-se duas vertentes quanto ao modo de se impor a vibração mecânica ao material fundido: através do material de base e diretamente na poça de fusão.

O primeiro modo se dá pelo uso de transdutores mecânicos acoplados à peça de trabalho ou à mesa de apoio da soldagem, sendo o método mais rudimentar. Embora a literatura comprove os efeitos dessa técnica no refino de grãos, conforme Cunha (2013), esse método é limitado à soldagem de peças de pequenas dimensões, dado que a potência requerida para vibrar um corpo é proporcional à sua massa. Além disso, a estrutura necessária à vibração de chapas com as dimensões usualmente encontradas em aplicações industriais se torna complexa e onerosa. Por outro lado, ao se impor a vibração diretamente ao material fundido é necessário o desenvolvimento de técnicas mais elaboradas, cuja principal vantagem se baseia na fácil adaptação dos equipamentos existentes.

No contexto da primeira vertente citada anteriormente, Cui, Xu e Han (2007) utilizaram transdutores mecânicos para impor vibração ultrassônica à peça de trabalho na

soldagem SMAW do aço inoxidável AISI 304, com o metal de adição AISI 316L. A Figura 4 apresenta o diagrama esquemático da técnica empregada pelos autores. Tal como mostrado no diagrama, a vibração é aplicada na direção perpendicular a superfície da peça de trabalho, e se percebe a limitação natural do processo para chapas com dimensões elevadas. Os autores encontraram uma redução na fração volumétrica da microestrutura colunar dendrítica com o aumento da potência de vibração ultrassônica de 0% para 90%, tendo como base uma frequência de vibração de 20kHz.

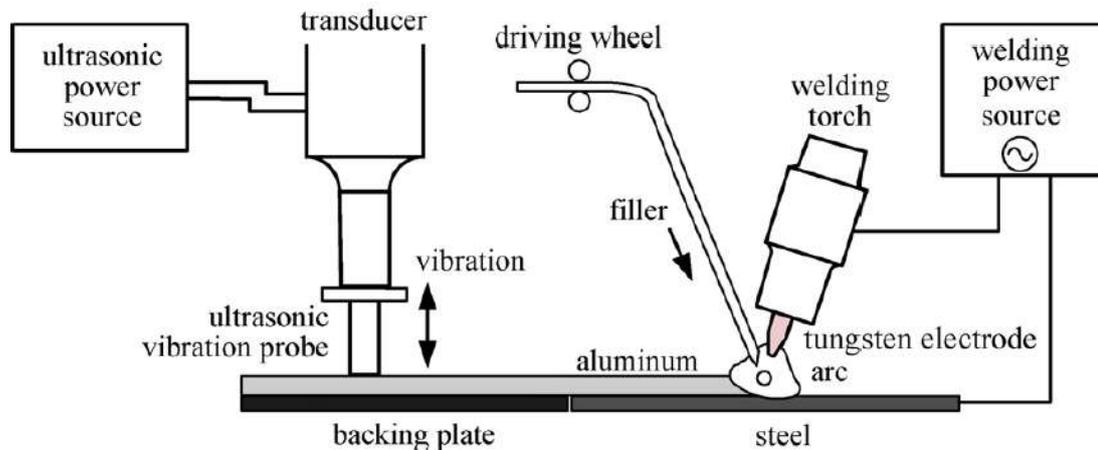
Figura 4 – Sistema de vibração ultrassônica aplicada na peça de trabalho no processo SMAW.



Fonte: Cui, Xu e Han (2007).

De maneira similar, Dong *et al.* (2012) desenvolveram uma técnica de aplicação de vibração mecânica sobre a peça de trabalho na soldagem dissimilar de liga de alumínio e aço pelo processo GTAW. A Figura 5 mostra o aparato experimental desenvolvido pelos autores. Os autores utilizaram a liga 5A06 e o aço baixo carbono Q235A, posicionando a chapa de alumínio sobre a chapa de aço, e como material de adição foi utilizado a liga de alumínio 4047. Uma haste de 28mm de diâmetro conectada ao transdutor é apoiada sobre a peça de trabalho a uma distância de 30mm da poça de fusão. Foi utilizado uma frequência de vibração de 20kHz. Como resultado, os autores notaram um aumento da resistência à tração de cerca de 27%, de 115MPa para 146MPa. Esse resultado foi atribuído por Dong *et al.* (2012) a um refino de grãos analisado qualitativamente, em que os autores perceberam uma menor quantidade da microestrutura colunar dendrítica e uma maior nucleação no processo GTAW com vibração da peça de trabalho, ao se comparar ao processo convencional. Novamente, ao analisar o diagrama esquemático proposto pelos autores, percebe-se a dificuldade da extrapolação dessa técnica para o meio industrial, caracterizado pela necessidade de se soldar chapas de grandes dimensões.

Figura 5 – Sistema de vibração ultrassônica aplicada na peça de trabalho no processo GTAW.



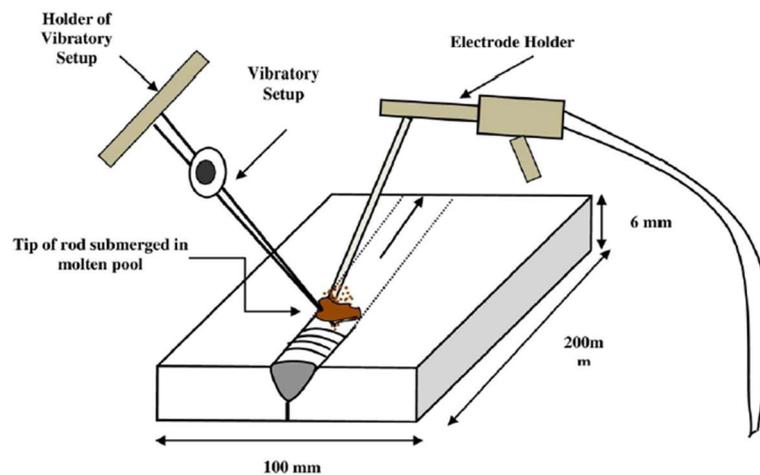
Fonte: Dong *et al.* (2012)

De forma semelhante, Gill e Reddy (2018) avaliaram o efeito da vibração na resistência à fadiga e à tração do aço inoxidável AISI 304L soldado com o material de adição AISI 308L. A fim de produzir a vibração mecânica, os autores acoplaram um motor elétrico de 1200 rpm na mesa de apoio à soldagem, sob a peça de trabalho. Como resultado, os autores conseguiram uma vibração (ou oscilação, conforme descrito em seu trabalho) da poça de fusão em frequência e amplitude controlada e constante. Gill e Reddy (2018) perceberam que a vida em fadiga com a vibração da poça de fusão aumentou cerca de 25%, em comparação com o processo convencional. Já a resistência à tração aumentou aproximadamente 8% no processo com a vibração da poça de fusão. Esse resultado foi concluído pelos autores como sendo resultado do refino de grãos na zona fundida. Gill e Reddy (2018) avaliaram de forma qualitativa as microestruturas formadas e afirmaram que com a aplicação da vibração mecânica, houve uma diminuição do tamanho médio dos grãos na zona fundida.

Como alternativa às técnicas descritas acima, onde se aplica a vibração na peça de trabalho ou na estrutura de apoio da soldagem, existem trabalhos onde é proposto a segunda vertente supracitada: aplicação de vibração diretamente na poção de fusão. Nesse cenário, Singh, Patel e Prasad (2016) desenvolveram uma tecnologia a fim de introduzir vibração na poça de fusão no processo de soldagem SMAW, conforme ilustrado no diagrama da Figura 6. Para isso, os autores utilizaram uma haste de tungstênio, cuja extremidade inferior foi revestida com cerâmica e permaneceu submersa na poça de fusão. E a extremidade superior foi acoplada ao eixo de um motor desbalanceado, isto é, um motor que possui uma massa conhecida afastada a uma determinada distância do eixo de giro. Nesse caso, quando o dispositivo está em operação, essa massa provoca um movimento rotacional sobre o eixo. Esse dispositivo possui

amplitude máxima de 0,5mm e frequência máxima de 300Hz. Singh, Patel e Prasad (2016) analisaram as frequências de 80Hz, 100Hz e 250Hz na simples deposição de cordões sobre chapas de aço carbono. Os autores constataram que, de forma geral, tanto a dureza quanto a resistência à tração aumentam com a frequência de vibração. Embora os autores não tenham realizado a análise microestrutural, eles atribuíram o seu resultado a um provável refino de grãos da zona fundida.

Figura 6 – Sistema de vibração aplicada na poça de fusão no processo SMAW.

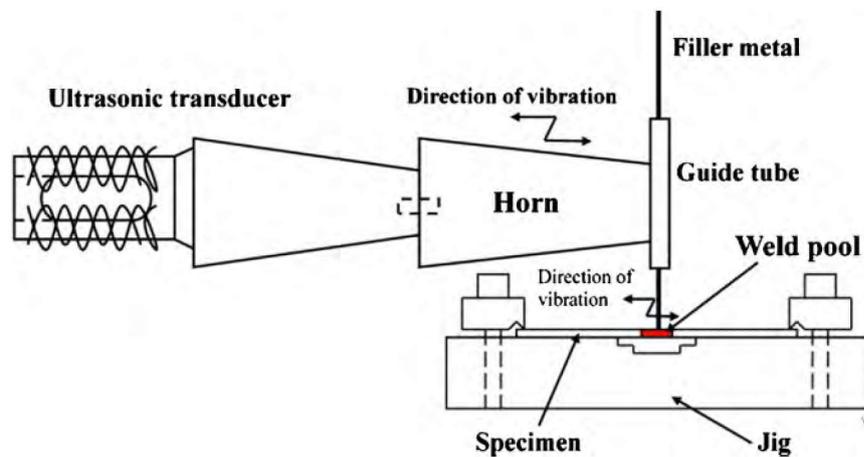


Fonte: Singh, Patel e Prasad (2016, p. 3)

No contexto da soldagem GTAW, Silwal e Santangelo (2018) avaliaram os efeitos da vibração do arame de adição sobre a morfologia do cordão de solda, realizando a simples deposição de cordões sobre chapas de aço carbono SAE 1018 com o metal de adição ER70S-6. Os autores utilizaram uma vibração em baixa frequência de 16Hz, transversalmente ao cordão de solda, que foi imposta no arame de adição por meio da vibração dos roletes do próprio alimentador. Conforme seus resultados, Silwal e Santangelo (2018) afirmam não existir diferença na morfologia do cordão de solda, tanto no processo de alimentação com arame frio quanto no processo com preaquecimento do arame. Entretanto, os autores não mantiveram o arame de adição submerso na poça de fusão, e com isso observaram um aumento da frequência de desprendimento das gotas do material de adição no processo com preaquecimento do arame. Entende-se que apesar de existir uma vibração do arame de adição no trabalho de Silwal e Santangelo (2018), ela não é de fato imposta à poça de fusão. Em virtude da ausência de contato entre o arame de adição e o metal líquido, não seria possível afirmar que se estaria vibrando a poça de fusão.

Ainda com relação a vibração do arame de adição na poça de fusão no processo GTAW, Watanabe *et al.* (2010) realizaram a soldagem com penetração completa de chapas do aço inoxidável ferrítico SUS444. A Figura 7 apresenta o diagrama esquemático da técnica desenvolvida pelos autores. Watanabe *et al.* (2010) utilizaram um transdutor mecânico acoplado a um tubo guia, que é responsável por conduzir o arame de adição à poça de fusão e introduzir a vibração no metal líquido. A direção de vibração é a mesma direção da soldagem, de forma axial ao cordão de solda. A amplitude de vibração é em torno de $35\mu\text{m}$ e a frequência é de 19kHz.

Figura 7 – Sistema de vibração ultrassônica aplicada na poça de fusão no processo GTAW.



Fonte: Watanabe *et al.* (2010).

Watanabe *et al.* (2010) perceberam uma significativa redução no tamanho dos grãos com a vibração do arame de adição para todas as velocidades de soldagem que foram experimentadas, cujo resultado mais significativo se deu na menor delas. Com uma velocidade de soldagem de 1,67mm/s, o tamanho médio dos grãos reduziu aproximadamente 46%. Por outro lado, com uma velocidade de soldagem de 10mm/s, quase não houve alterações. Com relação à resistência à tração, os resultados dos autores mostram um aumento cerca de 7% para a menor velocidade de soldagem, atribuída por Watanabe *et al.* (2010) ao refino de grãos. A ductilidade dos cordões de solda, medida através do alongamento das amostras nos ensaios de tração, aumentou cerca de 30% com a vibração do arame em relação ao processo convencional.

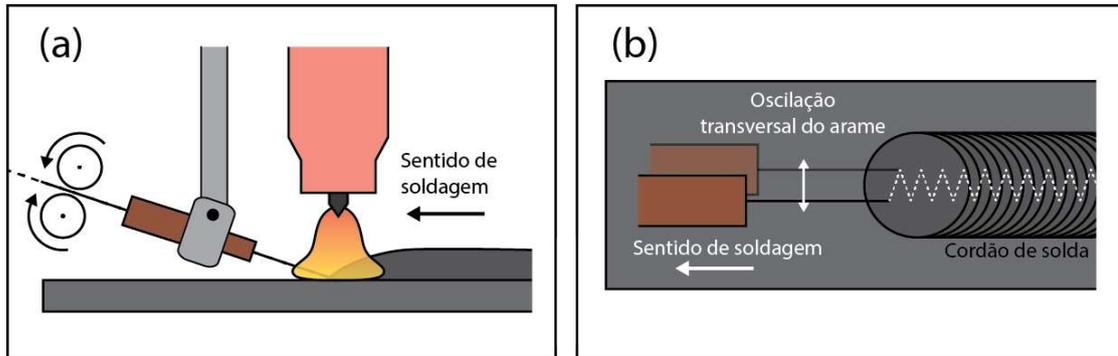
3 ESCOPO DE PROJETO

Dado o contexto abordado anteriormente quanto à soldagem das ligas de alumínio, percebe-se que grande parte das técnicas com o objetivo de evitar a formação de poros tem sua atuação baseada na inclusão de energia vibracional na poça de fusão. Em um primeiro momento, tal ideia pode não ser tão trivial. Afinal os trabalhos de Huang *et al.* (2020), Wang *et al.* (2020), Silva e Scotti (2006) e Baoqiang *et al.* (2016) atuaram no controle e oscilação, ou pulsação, da corrente de soldagem. Sendo o arco voltaico uma fonte de força e pressão sobre a superfície de metal líquido, entende-se que uma oscilação cíclica dos níveis de corrente de soldagem caracteriza uma vibração do arco atuando sobre a poça de fusão. Dessa forma, a literatura supracitada conseguiu controlar de maneira eficaz a porosidade na soldagem de ligas de alumínio a partir da aplicação de energia vibracional diretamente na poça de fusão.

Por outro lado, observa-se que apesar de existirem muitos trabalhos na literatura que abordam a aplicação da vibração mecânica na poça de fusão, normalmente esses trabalhos fazem uso de transdutores conectados à estrutura de apoio à soldagem ou diretamente à peça de trabalho. Conforme já relatado, essa abordagem dificulta a aplicação dessa técnica em escala industrial. Além disso, tanto essa vertente quanto a que diz respeito à aplicação da vibração mecânica diretamente na poça de fusão focam na avaliação das propriedades mecânicas da junta soldada. Isso acontece em virtude desses trabalhos, de maneira geral, buscarem e atingirem o refino da microestrutura da zona fundida.

Assim, o presente trabalho tem o objetivo de desenvolver uma técnica capaz de vibrar transversalmente o arame de adição na soldagem GTAW, inserindo vibração mecânica diretamente na poça de fusão. Portanto, espera-se encontrar uma redução nos níveis de porosidade na soldagem de ligas de alumínio. A Figura 8 apresenta o conceito da técnica proposta no presente trabalho. Na Figura 8(a), é mostrado a vista lateral do sistema de alimentação do arame de adição e sua disposição em relação à tocha de soldagem. O conceito é fundamentalmente o mesmo utilizado nos processos GTAW com adição de material. Na Figura 8(b), tem-se a vista superior mostrando a direção de vibração do arame de adição em relação ao cordão de solda.

Figura 8 – Conceito do dispositivo desenvolvido no presente trabalho.



O Autor (2020).

3.1 REQUISITOS DE PROJETO

O desenvolvimento da técnica supracitada deve atender alguns requisitos de projeto, cujas informações foram sintetizadas e ilustradas na Figura 9. Os requisitos de projeto são agrupados em três áreas: processo GTAW, vibração do arame de adição, e dimensional do dispositivo desenvolvido.

Figura 9 – Requisitos de projeto da tecnologia desenvolvida.



Fonte: O Autor (2020).

Referente à alimentação do arame de adição, essa tecnologia deve possibilitar a regulagem da posição do arame. Isto engloba o ajuste do ângulo de alimentação, a altura em relação à peça de trabalho e a distância axial e transversal em relação ao cordão de solda. A existência desses modos de liberdade se dá devido às características inerentes do processo de soldagem GTAW, tal como no processo convencional.

Do ponto de vista da vibração do arame transversalmente à poça de fusão, é preciso controlar as características do movimento. Dado o exposto, esse controle é realizado pela amplitude e frequência da vibração. Segundo a literatura comentada anteriormente, o controle

da frequência de vibração tende a produzir maiores alterações no comportamento do processo e, conseqüentemente, no material soldado. Por outro lado, acredita-se que a morfologia do cordão de solda seja mais influenciada pela amplitude do movimento.

Essa tecnologia é implementada por meio de um dispositivo responsável pela vibração do arame de adição, que será acoplado à tocha de soldagem. Assim, há requisitos de projetos com relação à dimensão e a massa do dispositivo, que não podem comprometer a estabilidade da fixação da tocha. Por outro lado, exige-se robustez com relação à temperatura de operação, dada a localização do equipamento próxima à fonte de calor do arco voltaico.

3.2 PROCESSO DE PROJETO

O desenvolvimento da tecnologia proposta nesse trabalho é descrito na forma de um processo sequencial, que pode ser decomposto conforme apresentado na Figura 10. Esse processo se divide em três atividades principais: desenvolvimento do dispositivo, ensaios de soldagem e análise dos resultados. Cada uma destas etapas, por sua vez, possui atividades secundárias. O desenvolvimento do dispositivo é desdobrado na confecção do dispositivo e em sua caracterização. A segunda etapa reflete a concepção da bancada para a realização dos ensaios de soldagem, além dos próprios ensaios de soldagem. Finalmente, a análise dos resultados compreende as etapas relacionadas à análise de porosidade na zona fundida e à morfologia do cordão de solda.

Figura 10 – Processo de projeto da tecnologia desenvolvida.



Fonte: O Autor (2020)

4 DESENVOLVIMENTO DO DISPOSITIVO

A primeira etapa no desenvolvimento do dispositivo é a definição de qual técnica será utilizada para vibrar o arame de adição transversalmente à soldagem, conforme explanado anteriormente. A proposta utilizada no presente trabalho faz uso de um transdutor eletromecânico. Utilizar transdutores mecânicos no processo de inclusão de energia vibracional na poça de fusão é um tema bem relevante no contexto da soldagem GTAW visando o refino de grãos, conforme apresentado anteriormente.

Um transdutor é um equipamento capaz de converter um tipo de energia em outro. No presente trabalho, o transdutor é responsável por transformar energia elétrica em energia mecânica, resultando em um movimento com amplitude e frequência definida. Nesse caso, o transdutor é acoplado ao sistema de alimentação, transmitindo a vibração ao arame de adição durante a soldagem.

As informações técnicas com os principais dados do transdutor eletromecânico utilizado no presente trabalho são apresentadas na Tabela 1, tais informações são fornecidas pelo fabricante do equipamento. A Figura 11 mostra uma foto do transdutor. Percebe-se na região posterior a existência de uma rosca externa. Já na área frontal, observa-se uma superfície fixada por quatro parafusos, essa região é a parte sujeita ao movimento de vibração e onde deve ser fixado o sistema de alimentação de arame de adição.

Tabela 1 – Informações técnicas do transdutor eletromecânico.

Potência nominal	25W (em 10V)
Impedância nominal	4Ω
Distorção (THD)	< 5% (em 1kHz)
Massa	270g
Dimensões	Ø50mm x 21mm

Fonte: (AIYIMA AUDIO, 2019)

O intuito da utilização dessa técnica se baseia no uso de uma tecnologia já existente, a fim de diminuir os recursos de fabricação para o desenvolvimento do conceito, e que seja capaz de exercer controle sobre o movimento. Isto é, onde a frequência e a amplitude do movimento possam ser controladas. Como um transdutor é um equipamento que transforma energia de um

tipo para outro, o comportamento das variáveis dependentes se torna previsível desde que se conheça a variável independente, garantindo a repetibilidade do processo.

Figura 11 – Transdutor utilizado no presente trabalho.



Fonte: (AIYIMA AUDIO, 2019)

4.1 CONCEPÇÃO DO DISPOSITIVO

O transdutor será responsável por introduzir a vibração mecânica diretamente na poça de fusão por meio do arame de adição, portanto é necessário que o sistema de alimentação seja acoplado ao transdutor. Por outro lado, de modo a facilitar a regulagem e fixação do dispositivo, necessita-se que o equipamento seja acoplado à tocha de soldagem. Logo, o dispositivo deve possuir um sistema que permita o ajuste de posicionamento do arame com relação à tocha e à poça de fusão, conforme explanado anteriormente. Como referência, obviamente se buscou sistemas já relacionados à alimentação de arame na soldagem GTAW. A Figura 12 apresenta o conceito do direcionador de arame desenvolvido pela empresa IMC soldagem.

Nesse conceito, percebe-se que há a possibilidade de ajuste do direcionador de arame em quatro direções: altura, ângulo de alimentação, avanço sobre a poça de fusão, e ajuste radial em relação à direção de soldagem. Essa última característica é dada pela rotação do suporte do direcionador em torno do corpo da tocha de soldagem. Na verdade, analisando-se o processo de soldagem GTAW, percebe-se que de fato são necessários esses quatro graus de liberdade. Pois, uma vez que seja regulado o ângulo de alimentação, haverá implicações no ajuste da altura e do avanço do direcionador sobre a poça de fusão. Por fim, o ajuste radial é importante para garantir o posicionamento do arame de adição na fixação do direcionador na tocha de soldagem.

Figura 12 – Direcionador de arame na soldagem GTAW.

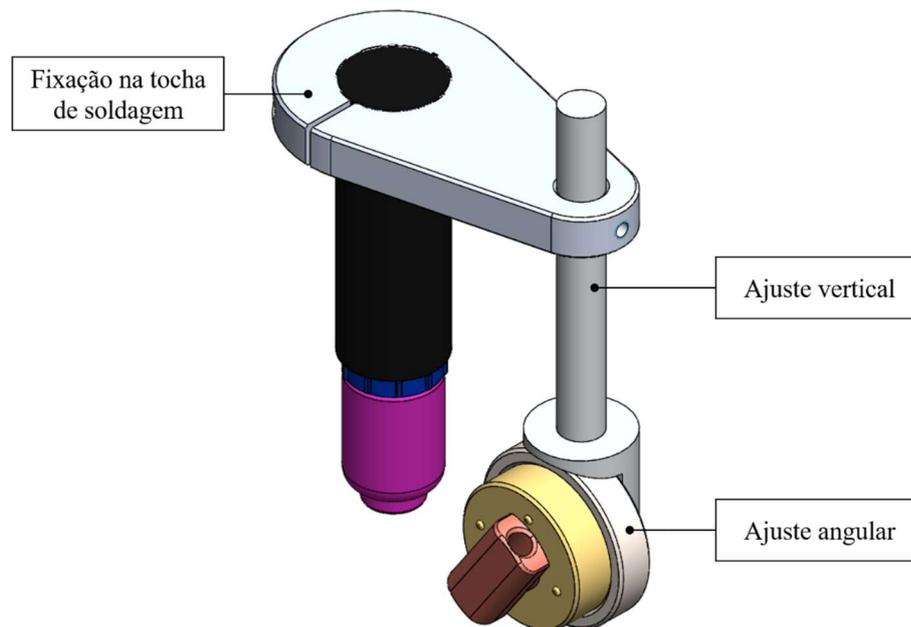


Fonte: IMC soldagem (2020).

O primeiro conceito do dispositivo foi baseado nesse modelo de referência apresentado anteriormente. A Figura 13 mostra uma vista em perspectiva do conceito preliminar desse modelo. Nota-se que desde esse ponto já se previu o uso de uma tocha de soldagem GTAW reta refrigerada a água, conforme a disponibilidade do laboratório. Assim como, utilizou-se a rosca externa presente no transdutor para lhe fixar no dispositivo desenvolvido. Essa ideia realmente se fez viável, pois se aproveita algo oriundo do próprio equipamento a fim de facilitar o projeto.

Esse primeiro conceito não chegou a ser construído, pois se observou a necessidade de melhoria no projeto no que diz respeito, principalmente, à robustez do dispositivo. Apesar da baixa massa desse conceito, é notório que ele oferece baixa rigidez a deslocamentos e desalinhamentos em virtude de possuir poucos pontos de apoio e fixação. Isso implica em uma maior dificuldade para um ajuste preciso da posição do arame, além de colocar em risco a confiabilidade do dispositivo em relação à manutenção do posicionamento da ponta do arame durante a soldagem. Afinal, durante o funcionamento do transdutor, a estrutura periférica que esteja acoplada mecanicamente a ele também tende a vibrar. Sabendo disso, notou-se a necessidade de aumentar a massa do dispositivo, utilizando-se a inércia para restringir esse movimento. No entanto, esse aumento de massa deve ser no sentido de apenas aumentar a rigidez do dispositivo.

Figura 13 – Primeiro conceito do dispositivo desenvolvido.



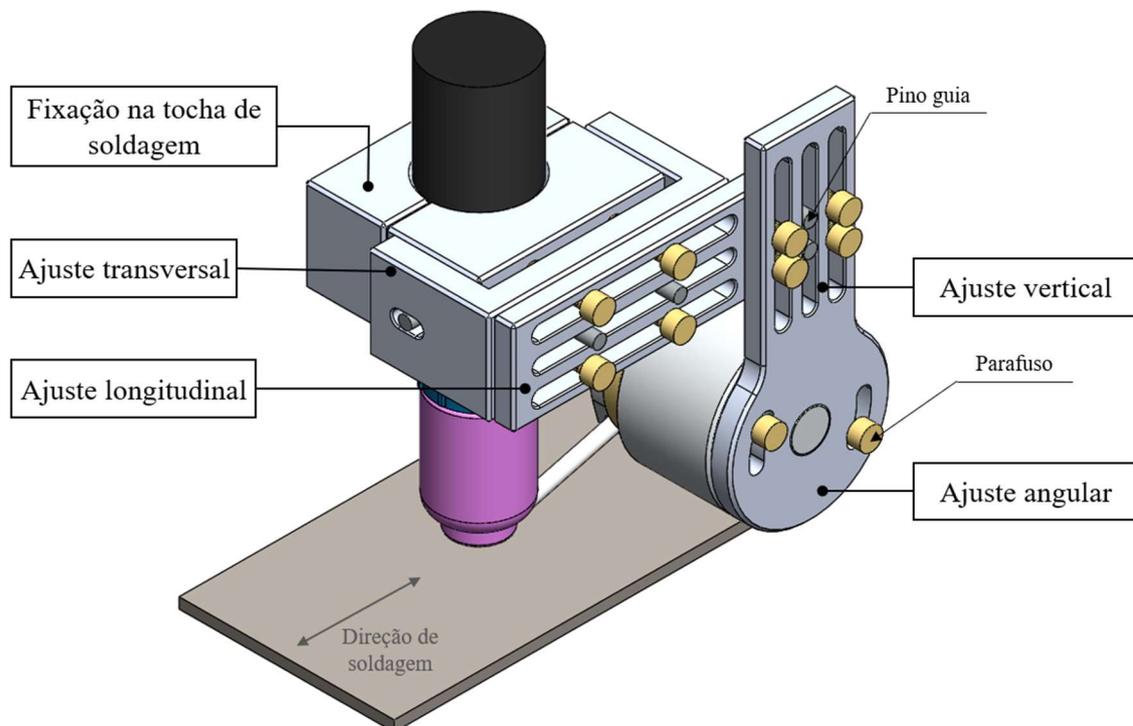
Fonte: O Autor (2020).

Com base nessas observações, buscou-se aprimorar o conceito de fixação do dispositivo na tocha de soldagem e regulagem de seu posicionamento. Analisando a proposta do presente trabalho, que visa uma técnica capaz de vibrar transversalmente o arame de adição na soldagem GTAW, percebeu-se que um ajuste radial não seria suficiente. De fato, faz sentido que esse ajuste seja dado na direção transversal, de modo a permitir a centralização do arame com o eletrodo de tungstênio.

Outra percepção durante a elaboração do projeto foi quanto à temperatura que o transdutor estará sujeito. Esse ponto já havia sido mencionado nos requisitos de projeto. Afinal, o transdutor é um equipamento eletrônico e elevadas temperaturas podem acarretar o seu mau funcionamento e, inclusive, a sua danificação completa. Nesse caso, buscou-se utilizar um material com baixa condutividade térmica para ser o condutor de arame, ao invés do tradicional direcionador de cobre. Encontrou-se um tubo de cerâmica com diâmetro interno compatível com o arame de adição e comprimento de 10mm. Uma vez que a cerâmica é um material frágil e difícil de ser cortado, tentou-se adaptar o conceito do dispositivo para esse comprimento do tubo. Na verdade, isso implica em uma maior distância entre o arco voltaico e o transdutor, sendo benéfico à questão anterior. Por outro lado, tem-se um maior comprimento em balanço, visto que a distância entre o transdutor e o ponto de apoio e fixação na tocha de soldagem também é maior. Reforçando, assim, a necessidade de rigidez do mecanismo.

A Figura 14 apresenta o projeto do novo conceito do dispositivo acoplado à tocha de soldagem, bem como os componentes responsáveis pelos ajustes de posicionamento. A fim de garantir a boa fixação à tocha de soldagem, tem-se nessa região uma maior espessura para promover uma maior área de contato e atrito. Na região frontal, há um perfil em formato de “U” que promove o ajuste transversal do arame em relação ao arco voltaico e ao cordão de solda. Esse perfil foi projetado para possuir um encaixe com a peça de fixação do dispositivo, mantendo-se a folga mínima de forma a promover um movimento quase deslizante entre as partes. Em contato com a área frontal desse perfil está localizada a peça responsável pelo ajuste longitudinal do arame, na direção de aproximar ou afastar a ponta do arame da poça de fusão. Ambas as peças possuem dois pontos de apoio com pino guia, que é preso por interferência na peça de fixação do dispositivo na tocha de soldagem. Na região lateral direita, tem-se o ajuste vertical do arame feito por uma peça com sistema de deslocamento e posicionamento através de oblongos e pinos guia, idêntica à anterior. Finalmente, através de dois rasgos de chaveta radiais, a camisa que suporta o transdutor é acoplada ao restante do dispositivo.

Figura 14 – Projeto do dispositivo acoplado à tocha de soldagem GTAW.



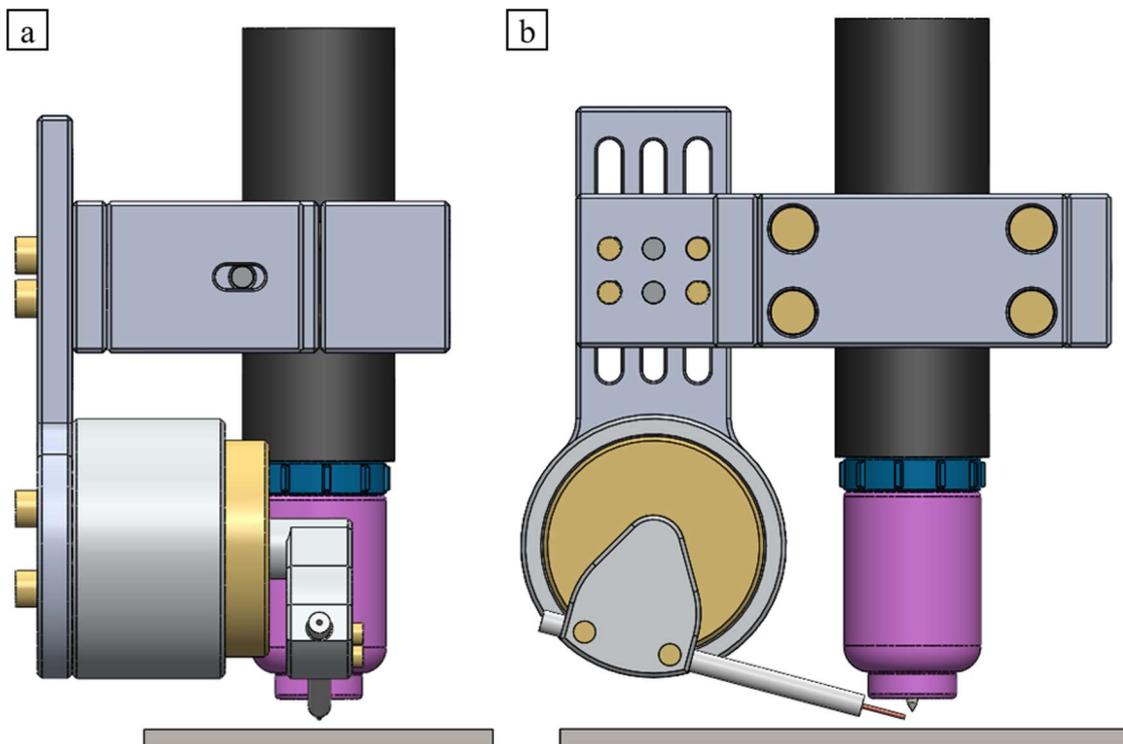
Fonte: O Autor (2020).

Nesse projeto foi previsto a construção de todo o dispositivo em alumínio, com exceção do tubo de cerâmica por onde será conduzido o arame de adição, conforme apresentado

anteriormente. Os pinos guia e os parafusos foram selecionados a partir de catálogos disponíveis no mercado. Para evitar os cantos vivos, que oferecem risco ao operador e facilitam a danificação das peças, projetou-se chanfros nas arestas, oblongos e furos. O conceito do corpo, onde é acoplado o dispositivo à tocha de soldagem, ser bipartido tem o intuito de facilitar a montagem do conjunto. Nessa mesma peça, desenhou-se rebaixos para as cabeças dos parafusos de modo a otimizar o espaço posterior, onde normalmente há demais equipamentos na bancada de ensaios. A Figura 15 exibe as vistas complementares do projeto do dispositivo: vista lateral na Figura 15(a), e vista posterior na Figura 15(b). Em ambas as vistas, percebe-se de forma mais clara o sistema de ajuste do posicionamento, descrito anteriormente.

Figura 15 – Vistas do dispositivo.

Em (a), vista lateral. Em (b), vista posterior.



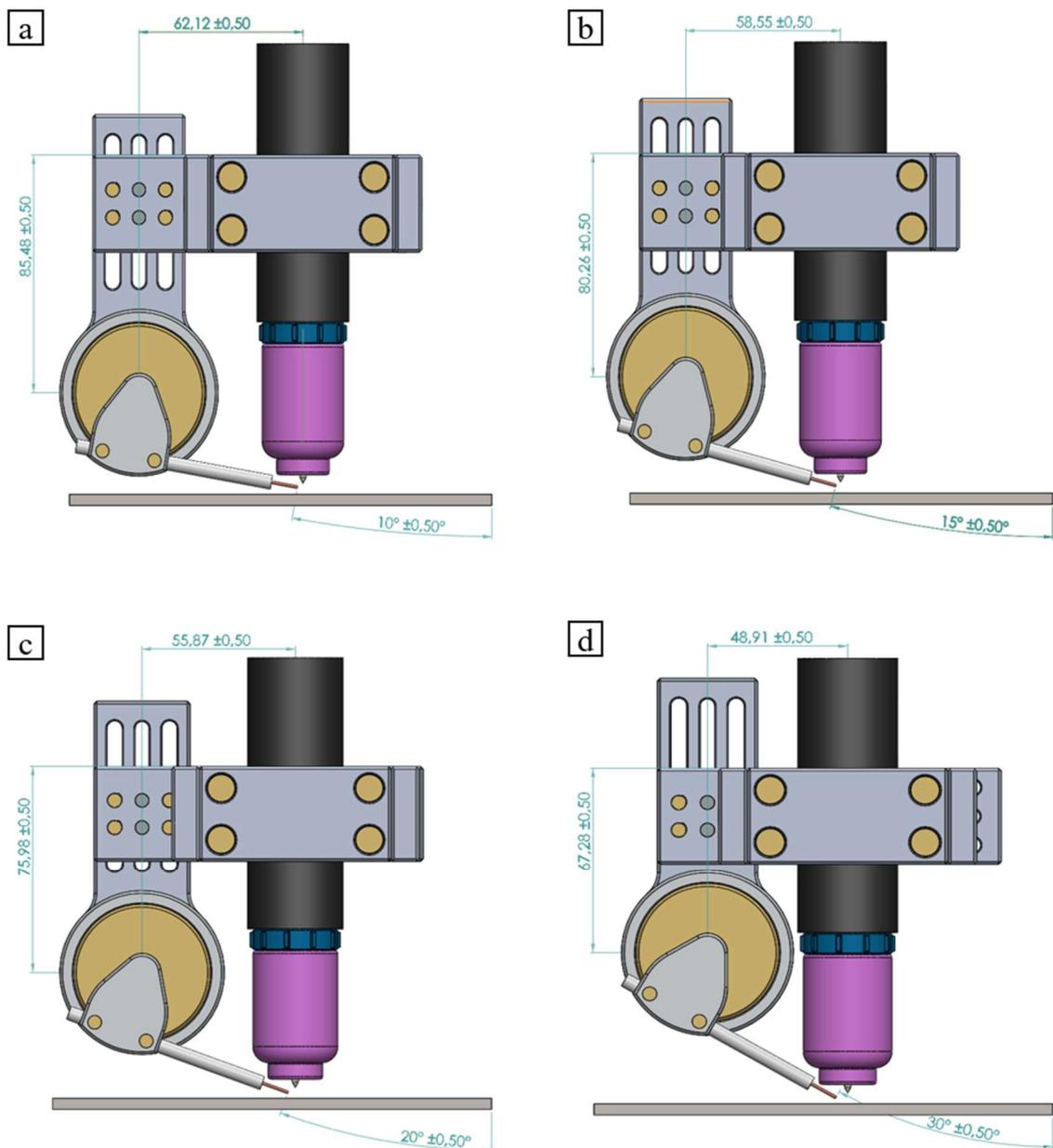
Fonte: O Autor (2020).

Durante o projeto do dispositivo, analisou-se o ângulo de alimentação do arame de adição em relação à peça de trabalho. Segundo o *Welding Handbook* (1997), esse ângulo é normalmente mantido em torno de 15° para um processo manual. Em processos automatizados, não há consenso, entretanto se permanece próximo a esse valor. Estabeleceu-se um intervalo de 10° a 30° no projeto do dispositivo. Essa variável é importante, pois exige robustez do dispositivo do ponto de vista de ajuste do posicionamento do arame de adição em relação ao

arco voltaico. Por outro lado, também delimita o espaço disponível para a movimentação. Portanto, realizou-se uma análise de movimentação do dispositivo no mesmo software utilizado para o projeto. Essa simulação tem o objetivo de verificar qual é a posição aproximada dos componentes em relação à tocha de soldagem, considerando-se o intervalo do ângulo de alimentação citado acima. Tais resultados são apresentados na Figura 16.

Figura 16 – Estudo de movimentação do dispositivo.

Em (a), ângulo de 10° . Em (b), ângulo de 15° . Em (c), ângulo de 20° . Em (d), ângulo de 30° .



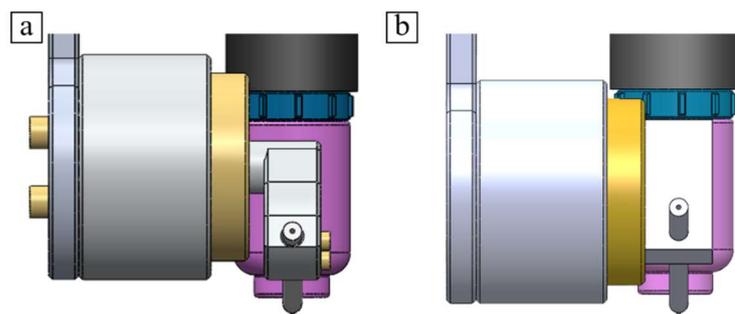
Fonte: O Autor (2020).

Após a validação desse projeto, realizou-se o orçamento e compra dos materiais, bem como a contratação dos serviços de usinagem em máquina fresadora e torno. Os processos dependentes de ajustes de bancada, corte das roscas dos furos e montagem do conjunto, foram realizados pelo próprio autor. Após a montagem do dispositivo proposto nesse trabalho, percebeu-se que os requisitos relativos à capacidade de posicionamento do arame de adição e limite de massa foram atingidos. Para testar tais situações, foram simuladas situações de ajuste de parâmetros de posição do arame. Bem como, realizou-se o deslocamento do dispositivo acoplado à tocha de soldagem para se identificar possíveis avarias no movimento do conjunto, oriundas da maior massa.

Em um ensaio preliminar, observou-se que quando o transdutor estava em operação, havia um deslocamento transversal (amplitude do movimento) menor do que o esperado. Na verdade, a força de vibração na ponta do arame era muito menor do que a presente no eixo do transdutor. Tal informação mostra uma perda de carga nessa transmissão do movimento vibracional. A Figura 17 exhibe o detalhe do acoplamento entre o transdutor e o direcionador de arame. Na Figura 17(a), observa-se que o direcionador possui uma massa em balanço. Tal proposta foi desenvolvida no sentido de causar a mínima restrição à vibração dessa região do transdutor. Com o surgimento desse problema, essa peça foi simplificada para o modelo mostrado na Figura 17(b).

Figura 17 – Detalhe do acoplamento do direcionador de arame e transdutor.

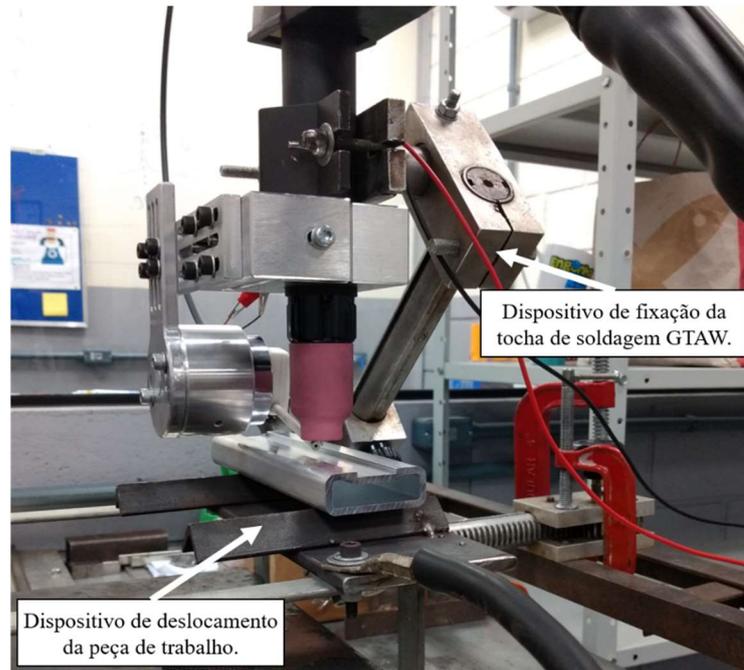
Em (a), conceito anterior. Em (b), conceito após melhoria.



Fonte: O Autor (2020).

A Figura 18 exhibe uma foto em perspectiva que mostra o dispositivo desenvolvido nesse trabalho, após a sua construção e fixação à tocha de soldagem.

Figura 18 – Dispositivo construído e montado na tocha de soldagem.

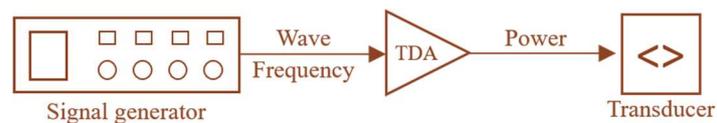


Fonte: O Autor (2020).

4.2 SISTEMA DE CONTROLE

O sistema de controle do dispositivo consiste basicamente em um sistema amplificador conectado a um gerador de funções. O gerador de funções produz um sinal através da especificação da forma de onda e frequência. Como este sinal é gerado em baixa potência, utiliza-se o amplificador para converter o sinal em níveis de potência necessários ao funcionamento do transdutor. Esse esquema de controle é ilustrado na Figura 19. Ressalta-se que como a frequência é uma variável ajustada no próprio gerador de funções, ela não sofre alteração devido ao amplificador. Por outro lado, a potência de saída do amplificador reflete diretamente na amplitude do movimento de vibração.

Figura 19 – Esquema de controle do dispositivo.



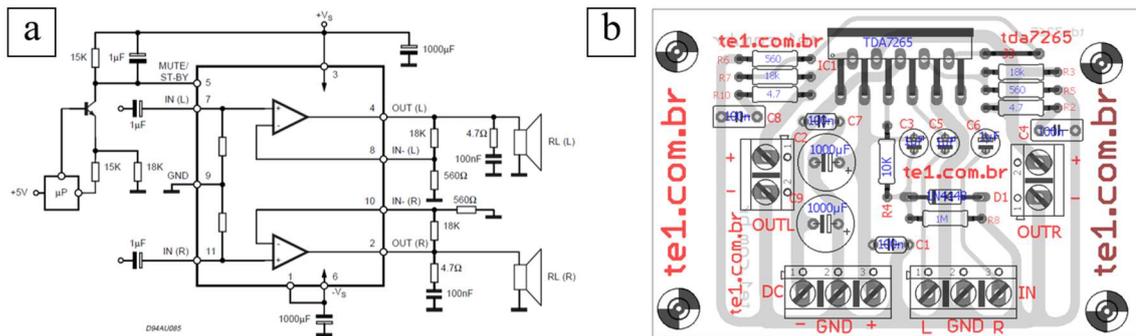
Fonte: O Autor (2020).

Dada a especificação do transdutor, apresentada anteriormente na Tabela 1, cuja potência nominal é de 25W, selecionou-se um circuito integrado (CI) amplificador de áudio. O

CI utilizado é o TDA7265, projetado para sistemas sonoros de alta qualidade, que oferece duas saídas de 25W cada. A placa eletrônica (circuito impresso) de funcionamento do CI foi construída com base no datasheet do próprio TDA. A Figura 20 mostra o circuito impresso para o CI utilizado no presente trabalho. Na Figura 20(a), o desenho esquemático, e na Figura 20(b), o layout com os componentes e trilhas.

Figura 20 – Circuito impresso para funcionamento do TDA7265.

Em (a), desenho esquemático. Em (b), layout do circuito impresso.



Fonte: ST Microelectronis (2002).

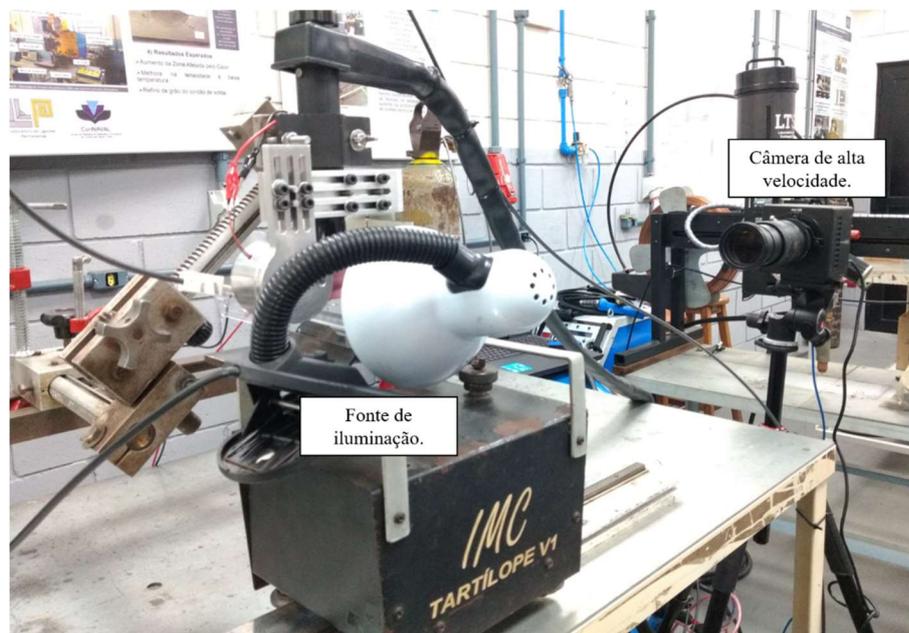
5 MATERIAIS E MÉTODOS

5.1 CARACTERIZAÇÃO DO DISPOSITIVO

O movimento de vibração é composto por duas grandezas bem definidas: frequência e amplitude. Ao se impor um sinal com frequência controlada, oriundo do gerador de sinais, considerando-se zero de ruído causado pelo amplificador, o nível de potência estabelecido pelo amplificador resultará na variação da amplitude do movimento. Dessa forma, pode-se estabelecer uma curva de comportamento do movimento vibratório, definida pela relação entre a potência imposta pelo gerador de sinais e a amplitude medida. O conhecimento dessa relação é fundamental para estabelecer os limites de operação do dispositivo.

A fim de se conhecer os níveis de potência impostos pelo gerador de funções ao transdutor, conectou-se um osciloscópio na saída de sinal do gerador. Para a visualização da amplitude do movimento durante a caracterização, utilizou-se uma câmera industrial de alta velocidade, modelo Photron - Fastcam Mini UX100, com taxa de captura de 1000 frames por segundo. Isso porque a frequência é relativamente alta e a amplitude é baixa, dificultando o emprego de outro método de medição. A Figura 21 mostra a bancada de ensaios utilizada na caracterização do dispositivo, na presença da iluminação externa e da câmera de alta velocidade.

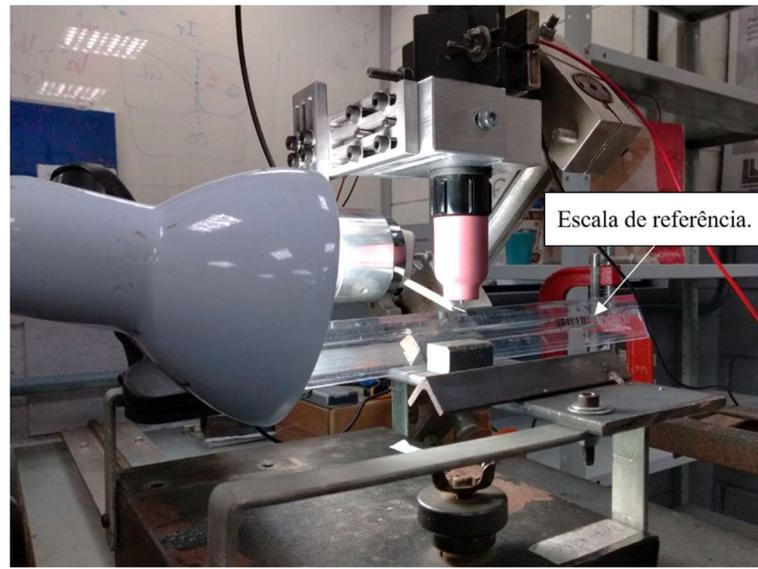
Figura 21 – Bancada utilizada nos ensaios de caracterização do dispositivo.



Fonte: O Autor (2020).

A Figura 22 apresenta a bancada de caracterização em detalhe no dispositivo desenvolvido no presente trabalho. Nota-se o efeito da iluminação externa sobre o arame e a tocha de soldagem. Conforme indicado, foi utilizado uma escala de referência para o processo de calibração da câmera de alta velocidade.

Figura 22 – Detalhe da bancada de caracterização.



Fonte: O Autor (2020).

Definiu-se uma matriz de condições a serem analisadas durante a caracterização do dispositivo. Do ponto de vista de inserir energia vibracional na poça de fusão a fim de evitar a porosidade, espera-se que os valores de amplitude e frequência sejam de uma baixa ordem de grandeza. Ademais, conforme se aumenta a frequência e a amplitude de vibração, uma maior potência é requerida por parte do transdutor. Ensaios preliminares foram realizados a fim de entender a capacidade do dispositivo utilizado no presente trabalho. Dessa forma, estabeleceu-se a matriz apresentada na Tabela 2. Para cada uma das quatro frequências ensaiadas, caracterizou-se o dispositivo para os cinco valores de amplitudes mostrados.

Tabela 2 – Matriz de caracterização do dispositivo.

Frequência (Hz)	Amplitude (mm)
50	0,25; 0,50; 0,75; 1,00; 1,50
100	0,25; 0,50; 0,75; 1,00; 1,50
150	0,25; 0,50; 0,75; 1,00; 1,50
200	0,25; 0,50; 0,75; 1,00; 1,50

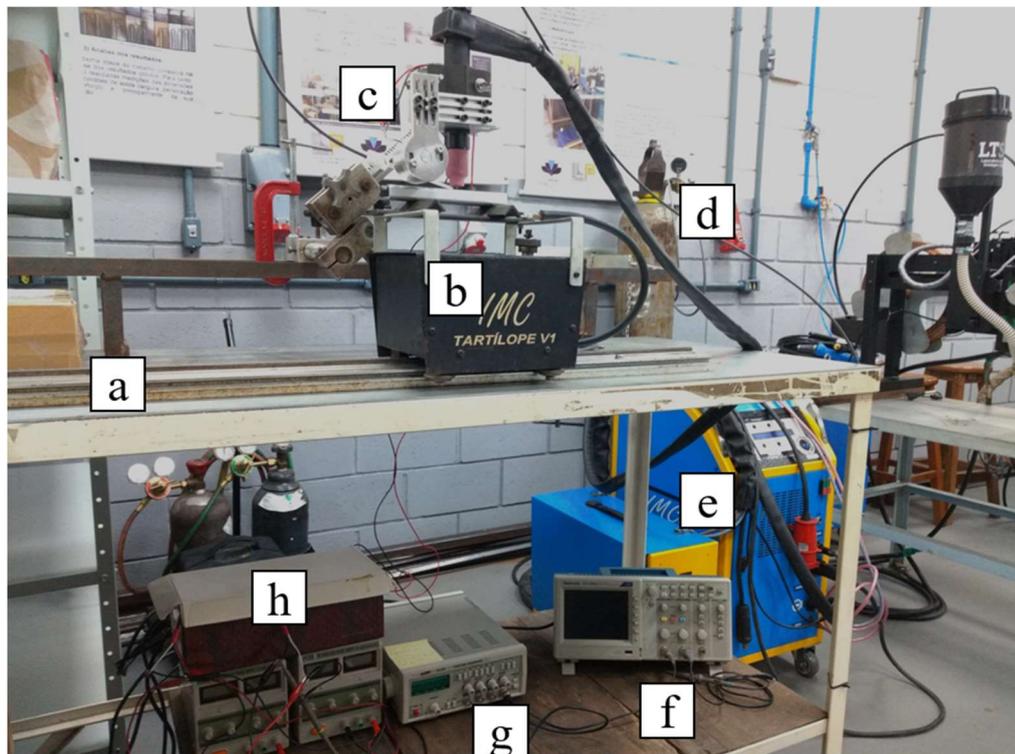
Fonte: O Autor (2020).

5.2 REALIZAÇÃO DOS ENSAIOS DE SOLDAGEM

Após a construção e caracterização do dispositivo desenvolvido no presente trabalho, realizou-se ensaios de soldagem a fim de avaliar os efeitos dessa técnica na porosidade e morfologia e do cordão de solda. Para isso, montou-se uma bancada de ensaios conforme mostrado na Figura 23. A bancada é composta por uma mesa de trabalho; um sistema de deslocamento da peça de trabalho; conjunto da tocha de soldagem GTAW reta refrigerada à água e o dispositivo desenvolvido no presente trabalho; sistema de gás; fonte de soldagem GTAW com corrente alternada e sistema de alimentação de arame; osciloscópio, que é utilizado para ajuste da amplitude do movimento; gerador de sinais; circuito de controle e duas fontes de energia para se atingir a tensão necessária ao funcionamento do circuito.

Figura 23 – Bancada de ensaios utilizada.

Em (a), mesa de trabalho. Em (b), sistema de deslocamento da peça de trabalho. Em (c), conjunto dispositivo e tocha de soldagem. Em (d), gás de proteção. Em (e), fonte de soldagem e sistema de alimentação do arame de adição. Em (f), osciloscópio. Em (g), gerador de sinais. Em (h), sistema de controle e fontes de energia.

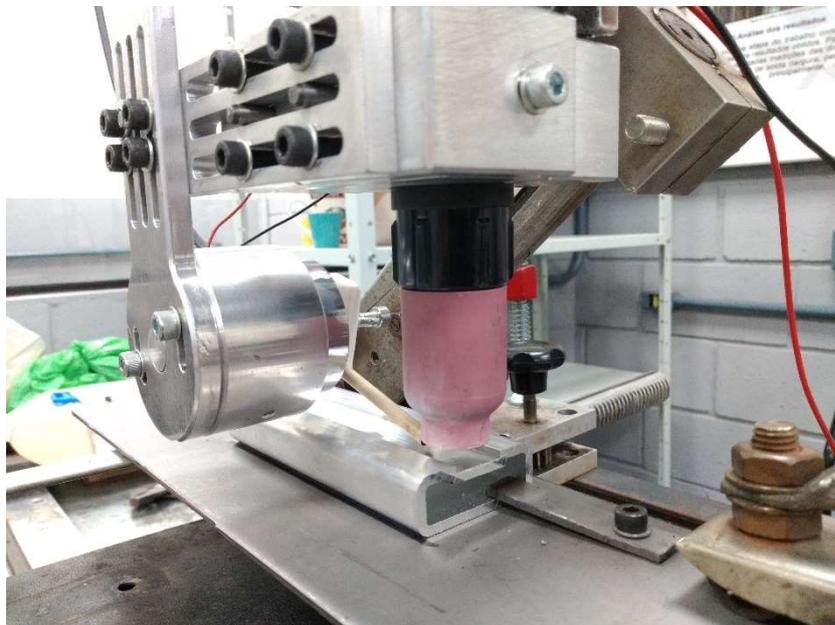


Fonte: O Autor (2020).

Durante a realização dos ensaios de soldagem, optou-se por deslocar a peça de trabalho ao invés da tocha de soldagem. A justificativa é muito simples, considerando-se que o

transdutor gera uma vibração transversal ao cordão de solda, um movimento em outra direção poderia acarretar instabilidade ao processo. Ademais, com o deslocamento da tocha de soldagem seria necessário movimentar o conduíte, por onde passa o arame de adição, tendendo a promover resistência à vibração. Dessa forma, fixou-se a tocha de soldagem em um pórtico preso à mesa de trabalho e, por sua vez, o corpo de teste foi fixado sobre o sistema de deslocamento. A Figura 24 mostra em detalhe a fixação da peça de trabalho e sua disposição com relação ao dispositivo.

Figura 24 – Detalhe da fixação da peça de trabalho no sistema de deslocamento.



Fonte: O Autor (2020).

Os parâmetros desse processo GTAW com corrente alternada, tais como: tempo positivo (t_p), tempo negativo (t_n), corrente positiva (I_p) e corrente negativa (I_n) foram determinados a partir de ensaios preliminares. Nesses ensaios, utilizou-se como referência a estabilidade do processo e a formação de um cordão de solda sem discontinuidades aparentes, tais como: falta de fusão e mordeduras. Além disso, em virtude de o presente trabalho propor a inclusão de vibração diretamente dentro da poça de fusão, buscou-se uma condição em que a ponta do arame de adição permanecesse submersa no metal líquido. Os parâmetros de soldagem utilizados no presente trabalho são apresentados na Tabela 3. O bocal de gás utilizado é do tipo gás lens número 10, com diâmetro interno de 16mm e área de abertura de aproximadamente 201mm². Ressalta-se que os cordões de solda são do tipo de simples deposição sobre chapas (bead-on-plate).

Tabela 3 – Parâmetros de soldagem utilizados na realização dos ensaios de soldagem.

Parâmetro (unidade)	Valor
Distância eletrodo-peça - DEP (mm)	4
Tipo de eletrodo	EWP
Diâmetro do eletrodo (mm)	2,4
Ângulo de afiação do eletrodo (°)	60
Avanço do eletrodo (mm)	4mm
Velocidade de soldagem (cm/min)	20
Velocidade do arame (m/min)	2,7
Gás de proteção	Argônio
Vazão de gás (l/min)	13
Corrente positiva e negativa – Ip / In (A)	100
Tempo positivo - tp (ms)	5
Tempo negativo - tn (ms)	25

Fonte: O Autor (2020).

Os corpos de prova possuem o formato de um perfil retangular com cerca de 120mm de comprimento e 40mm de largura, foi utilizada a face lisa para os ensaios de soldagem do presente trabalho. A espessura da região onde foi depositado o cordão de solda é de 5mm. Os corpos de prova são confeccionados com a liga de alumínio 6063-T5, comumente utilizada na fabricação de estruturas soldadas e tubulações. O material de adição utilizado foi o ER4043 com diâmetro de 1,0mm.

A Tabela 4 apresenta a matriz de experimentos usada no presente trabalho. Para facilitar a identificação das amostras, definiu-se a seguinte nomenclatura: letra maiúscula “F”, seguida por três algarismos com relação à frequência de vibração empregada, letra maiúscula “A”, seguida por três algarismos relativos à amplitude do movimento de oscilação. Além disso, tem-se a amostra “Referência”, oriunda do ensaio de soldagem sem a aplicação da vibração do arame de adição.

Tabela 4 – Matriz de experimentos.

Amostra	Frequência (Hz)	Amplitude (mm)
Referência	0	0
F100A025	100	0,25
F100A050	100	0,50
F100A100	100	1,00

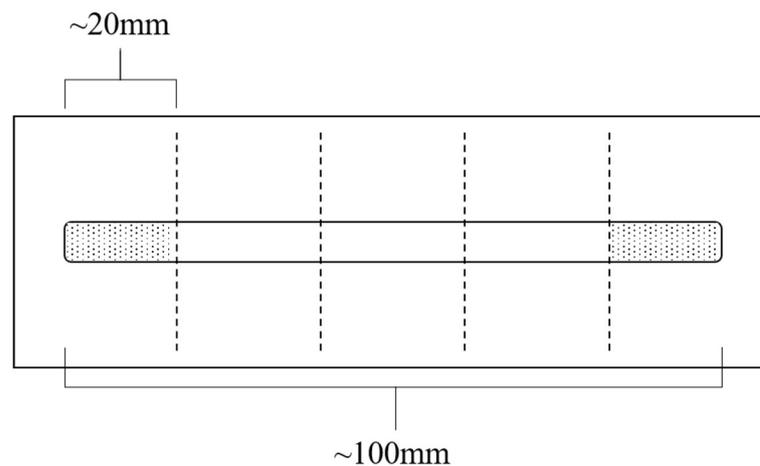
F100A150	100	1,50
F150A025	150	0,25
F150A050	150	0,50
F150A100	150	1,00
F150A150	150	1,50

Fonte: O Autor (2020).

5.3 OBTENÇÃO DAS AMOSTRAS

Após a realização dos ensaios de soldagem, cortou-se os cordões de solda em quatro regiões conforme ilustrado na Figura 25. As regiões iniciais e finais dos cordões foram descartadas e a partir da região restante foram coletadas quatro amostras transversais. Dessa forma, os resultados apresentados se referem à média aritmética simples entre os quatro valores.

Figura 25 – Localização de obtenção das amostras no cordão de solda.



Fonte: O Autor (2020).

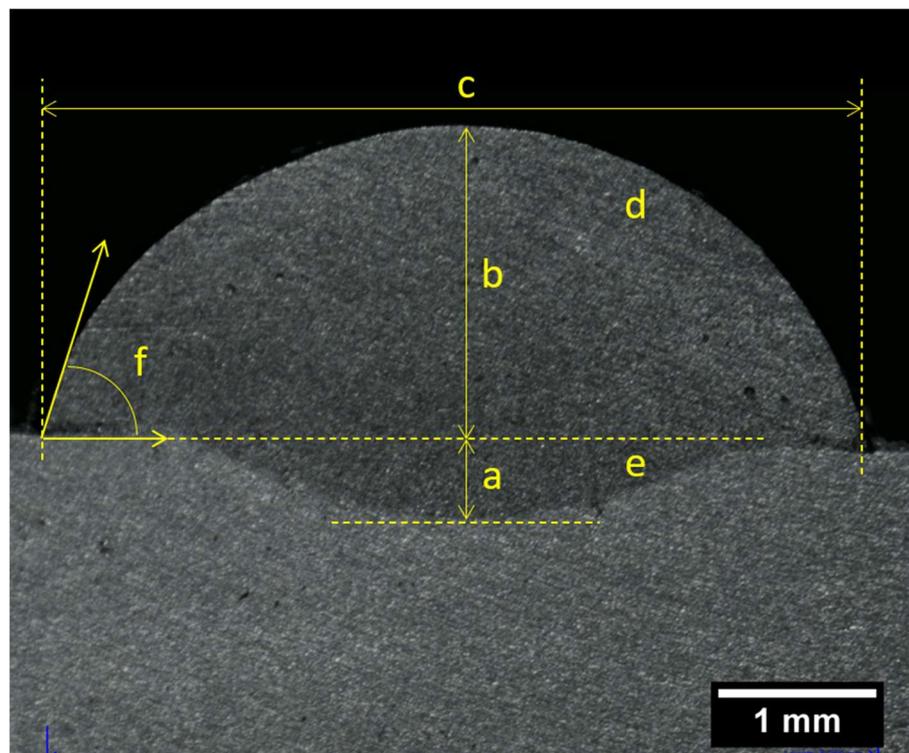
As amostras foram cortadas perpendicularmente ao cordão em uma máquina policorte refrigerada com fluido de corte, e foram lixadas. Empregaram-se lixas com as seguintes granulometrias: 120, 200, 400 e 600, realizando-se o giro da amostra em 90° a cada troca de lixa. Na análise da morfologia e da porosidade do cordão, utilizou-se um estereoscópio e o software de análise de imagens, ImageJ.

5.4 METODOLOGIA DE ANÁLISE DA MORFOLOGIA DOS CORDÕES DE SOLDA

No que diz respeito à morfologia do cordão de solda, tem-se a medição das principais dimensões da zona fundida: largura, penetração, reforço, área de reforço, área fundida, diluição e ângulo de molhabilidade. O desenho esquemático da Figura 26 mostra as dimensões supracitadas no cordão de solda. A diluição é calculada a partir da razão entre a área fundida do metal de base, Figura 26(e), e a soma entre essa área e a área do reforço, Figura 26(d). A forma de medição do ângulo de molhabilidade, ou ângulo de contato, é destacada em vermelho na Figura 26(f), tendo sido realizada para ambas as laterais do cordão. O valor do ângulo de molhabilidade de ambas as extremidades foi somado e o resultado apresentado é a média aritmética simples dos valores.

Figura 26 – Dimensões do cordão de solda.

Em (a), penetração. Em (b), reforço. Em (c), largura. Em (d), área do reforço. Em (e), área fundida do material de base. Em (f), ângulo de molhabilidade.



Fonte: O Autor (2020).

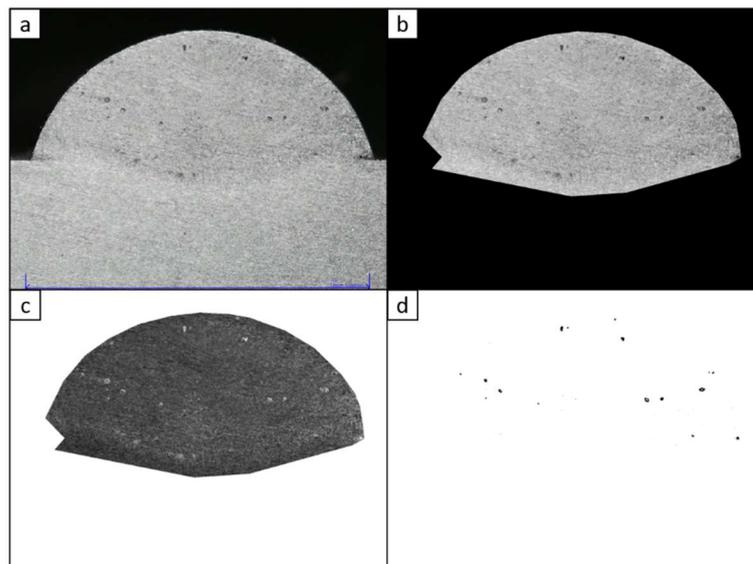
5.5 METODOLOGIA DE ANÁLISE DA POROSIDADE DOS CORDÕES DE SOLDA

Para analisar a porosidade dos cordões de solda, utilizou-se uma ferramenta do software livre ImageJ denominada *Analyse Particles*. A identificação correta das partículas é dependente de uma espécie de filtro, denominado *Threshold*, que faz a distinção entre o nível da escala de cinza em uma imagem monocromática. Nesse caso, faz-se a parametrização da ferramenta com limites superiores e inferiores dessa escala de cinza. E apenas as regiões da imagem cuja escala de cinza pertença ao intervalo estabelecido são mantidas na análise. A aplicação desses limites se dá de forma individual para cada imagem, de modo a perceber as variações naturais de luminosidade e coloração.

A fim de explicar o procedimento de forma mais didática, mostra-se na Figura 27 as etapas de modelagem da porosidade em uma seção da amostra de Referência. A Figura 27(a) representa a imagem original da seção transversal e a Figura 27(b) mostra a área delimitada que foi utilizada na análise. Idealmente, essa região é demarcada pela área fundida total. Na Figura 27(c) foi aplicado a ferramenta descrita anteriormente. Por fim, a Figura 27(d) apresenta o resultado que será analisado quantitativamente.

Figura 27 – Procedimento de análise de porosidade.

Em (a), imagem original. Em (b), imagem cortada. Em (c), imagem tratada. Em (d), imagem final.

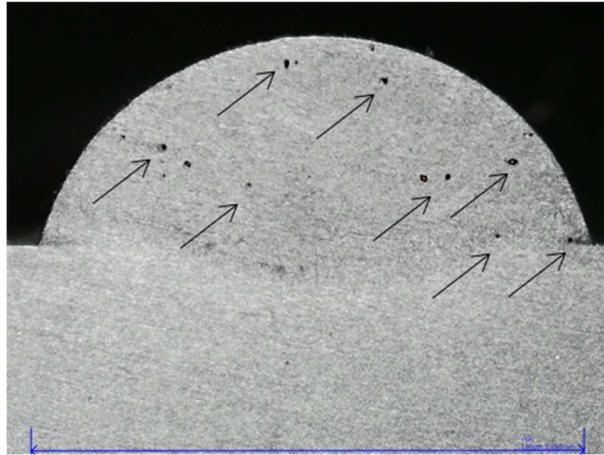


Fonte: O Autor (2020).

Ainda na Figura 27, é possível perceber que os poros estão destacados com uma cor mais clara do que o restante da amostra. A definição dos limites da escala de cinza é importante

para evitar ruídos, que podem distorcer o resultado. Por isso, realiza-se uma comparação com a imagem original, adequando-se o modelo até se encontrar o melhor ajuste. A Figura 28 apresenta a sobreposição entre a imagem original e a imagem resultante, sendo que os poros estão destacados em uma coloração mais escura e indicados por uma seta. Percebe-se que o método aplicado consegue identificar os poros presentes na soldagem, garantindo a confiabilidade do resultado.

Figura 28 – Sobreposição da imagem original e imagem utilizada na análise de poros.



Fonte: O Autor (2020).

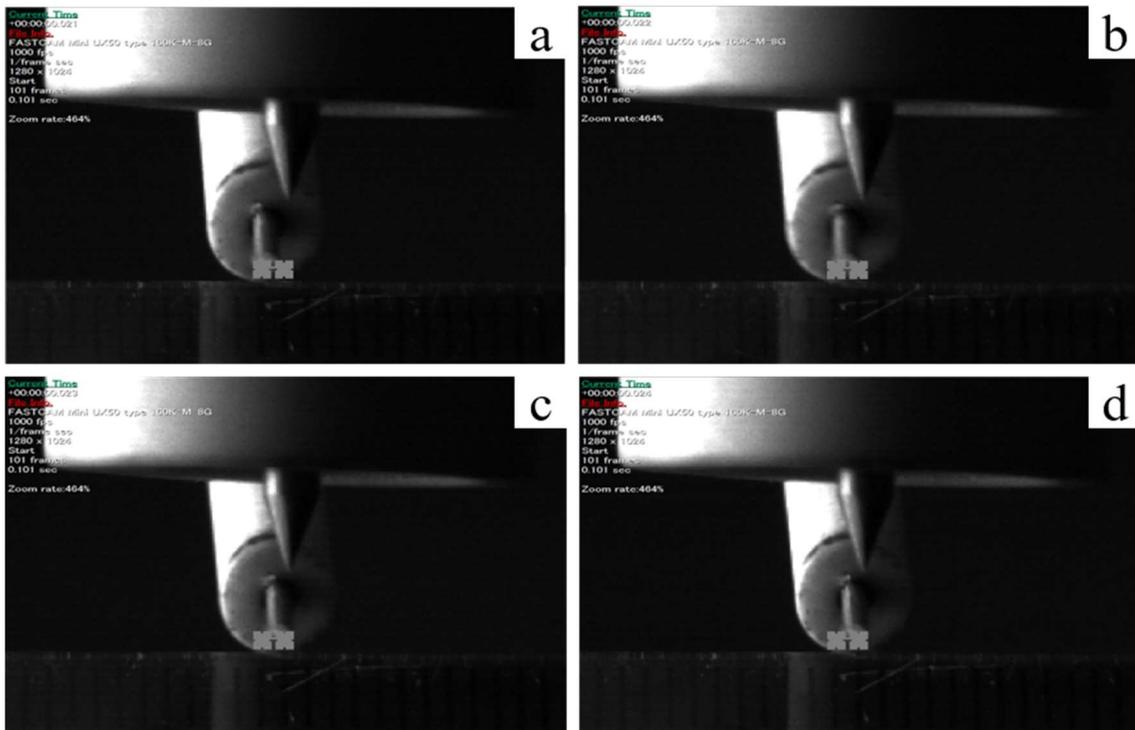
6 ANÁLISE E DISCUSSÃO DOS RESULTADOS

6.1 CARACTERIZAÇÃO DO DISPOSITIVO DESENVOLVIDO

A Figura 29 apresenta quatro frames sequenciais do ensaio de caracterização na frequência de 150Hz e amplitude de oscilação de 1,00mm. Na Figura 29(a), tem-se o frame número 21, e o arame está localizado na extremidade esquerda do movimento. Na Figura 29(b) e Figura 29(c), têm-se os frames número 22 e 23, respectivamente. Na Figura 29(d), tem-se o frame número 24, e o arame está localizado na extremidade direita. Ambas as extremidades do movimento são representadas na imagem por um quadrado branco na região da ponta do arame. Na Figura 29, percebe-se a presença de uma escala milimétrica, no entanto ela é apenas para fins didáticos a fim de facilitar a percepção do movimento. Afinal, o próprio software da câmera de alta velocidade permite realizar as medições de distância entre os deslocamentos máximos e mínimos do arame.

Figura 29 – Caracterização do dispositivo: frequência de 150Hz e amplitude de oscilação de 1,00mm.

Em (a), frame 21. Em (b), frame 22. Em (c), frame 23. Em (d), frame 24.



Fonte: O Autor (2020).

Como explicado anteriormente, a caracterização se deu por mensurar o sinal que o gerador de funções impõe ao transdutor. Como se utilizou um osciloscópio, a variável medida foi a tensão eficaz (rms). Dessa forma, a Tabela 5 apresenta os valores de tensão eficaz, em milivolts (mV), para cada uma das amplitudes de oscilação e frequências selecionadas. Para a frequência de 200Hz não foi possível atingir a amplitude de oscilação 1,50mm, por isso a referida tabela está com essa célula vazia. Tal impedimento é oriundo dos limites de corrente e a tensão que são suportados pelo transdutor.

Tabela 5 – Valores de tensão eficaz (rms) do sinal enviado pelo gerador de funções ao transdutor com relação à amplitude e a frequência.

Amplitude (mm)	Frequência (Hz)			
	50	100	150	200
0,25	24mV	16mV	30mV	43mV
0,50	61mV	33mV	57mV	106mV
0,75	78mV	61mV	106mV	185mV
1,00	105mV	95mV	131mV	226mV
1,50	200mV	141mV	184mV	*

Fonte: O Autor (2020).

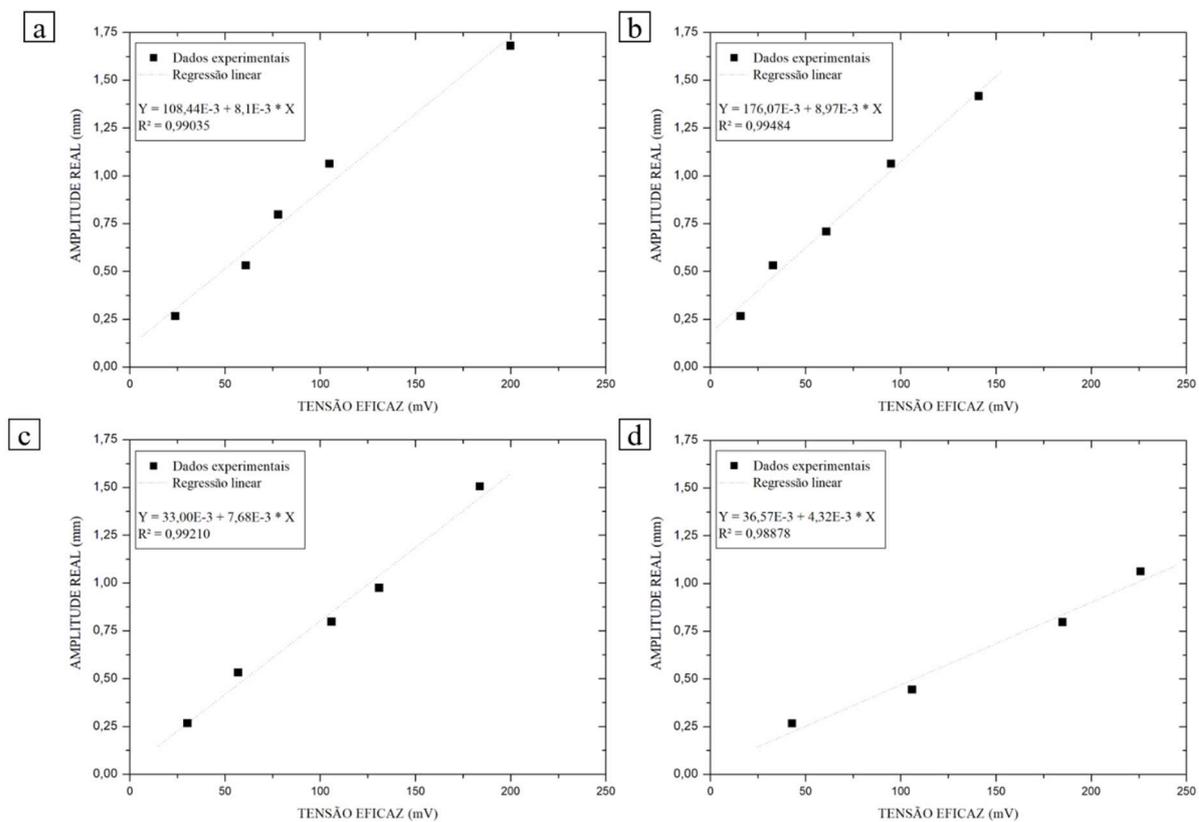
A relação entre os dados apresentados na Tabela 5, tensão eficaz do sinal imposto pelo gerador de funções ao transdutor e a amplitude real observada no ensaio de caracterização, será fundamental durante os ensaios de soldagem. Tendo esses valores como referência será ajustado a amplitude desejada com base no valor da tensão eficaz do sinal do gerador de funções. Ou seja, durante os ensaios de soldagem será mantido o osciloscópio conectado na saída do gerador de funções, tal como ocorreu nessa fase de caracterização do dispositivo. A Figura 30 apresenta os gráficos que relacionam os valores mostrados acima, tendo no eixo das abscissas o valor da tensão eficaz, e no eixo das ordenadas o valor da amplitude real medida na caracterização.

Percebe-se que para todas as frequências analisadas, o comportamento do dispositivo se mantém quase constante, apresentando uma relação linear entre a tensão eficaz imposta pelo gerador de funções ao transdutor e a amplitude real medida na caracterização. Tal relação apresenta um coeficiente de determinação (R^2) sempre maior do 0,99, indicando o excelente resultado da regressão linear. Os coeficientes angulares das retas também são semelhantes, com exceção da maior frequência. Quando ocorre a vibração do direcionador de arame, acoplado ao dispositivo e tocha de soldagem, esperava-se que houvesse algum tipo de perda da característica original do movimento. Isso em decorrência de algum tipo de ressonância que pudesse

acontecer entre a frequência natural do conjunto e a frequência do movimento. De fato, não se percebeu tal perda da característica original do movimento. Com base nesses resultados, seria possível a interpolação dos dados com confiança, de modo a buscar amplitudes não testadas durante a caracterização.

Figura 30 – Relação entre a tensão eficaz imposta pelo gerador de funções ao transdutor e a amplitude real observada nos ensaios de caracterização.

Em (a), frequência de 50Hz. Em (b), frequência de 100Hz. Em (c), frequência de 150Hz. Em (d), frequência de 200Hz.

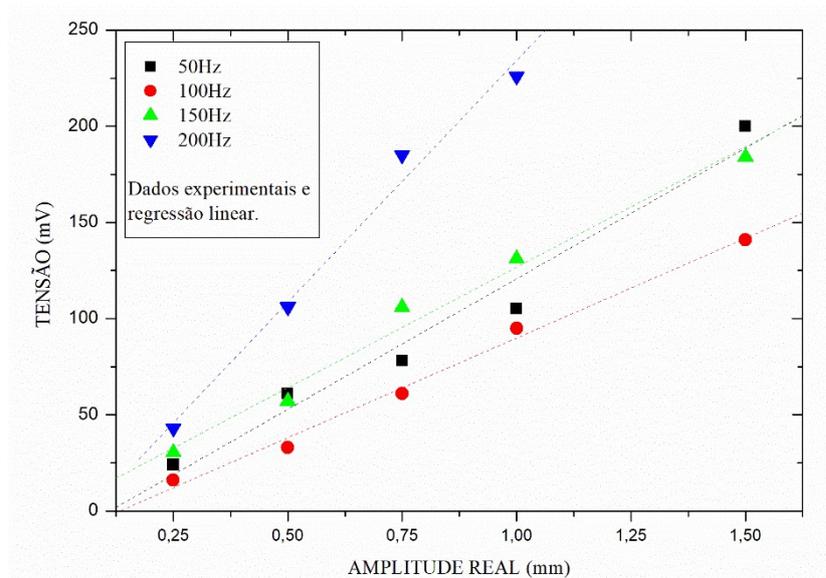


Fonte: O Autor (2020).

Como forma de facilitar a comparação entre as curvas obtidas para diferentes frequências, a Figura 31 exibe um gráfico com os dados experimentais e as retas da regressão linear para cada um dos casos analisados. Nota-se que a curva de 50Hz apresentou valores de tensão mais altos do que a curva de 100Hz e, em alguns casos, mais altos do que a curva de 150Hz. Esse fato contraria o comportamento esperado, pois é natural que a energia necessária para realizar o mesmo deslocamento de uma determinada massa em um período menor aumente com a frequência de vibração. Elaborar-se a hipótese de que nessa frequência haja algum tipo

de ressonância que dificulta o movimento, embora isso não tenha sido percebido durante os ensaios de caracterização.

Figura 31 – Relação entre as tensões eficazes imposta pelo gerador de funções ao transdutor e a amplitude real para as frequências de 50Hz, 100Hz, 150Hz e 200Hz.



Fonte: O Autor (2020).

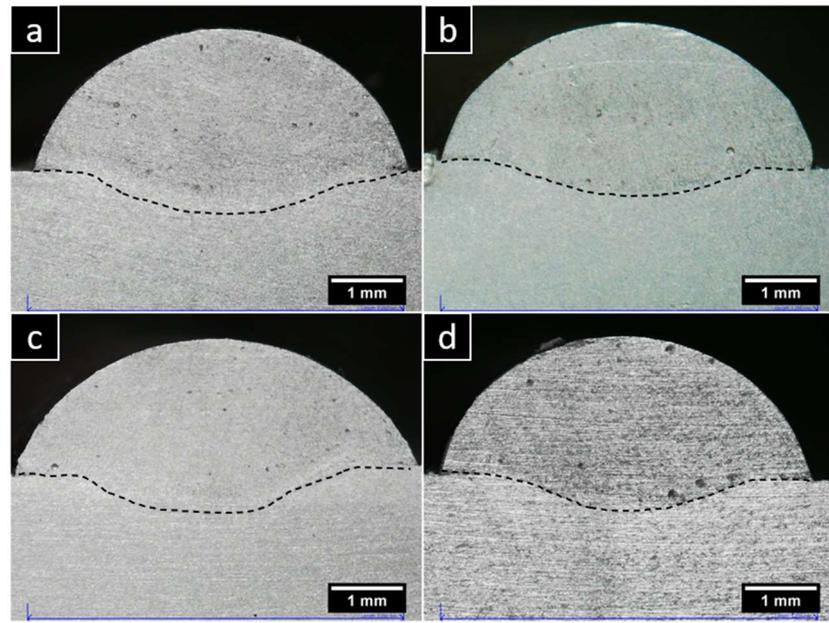
6.2 ANÁLISE DA MORFOLOGIA DO CORDÃO DE SOLDA

A Figura 32 apresenta quatro seções diferentes do cordão soldado com o processo convencional, sem a vibração do arame de adição (amostra Referência). A Figura 33 e a Figura 34 mostram uma seção de cada uma das amplitudes de vibração utilizadas nos ensaios de soldagem com as frequências de 100Hz e 150Hz, respectivamente.

Em uma análise qualitativa, não se observou alterações significativas com relação à morfologia dos cordões de solda com a aplicação da vibração do arame de adição, quando comparados com o cordão obtido sem vibração do arame (Referência). A amostra F100A025, Figura 33(a), demonstrou um comportamento aparentemente distinto das demais amostras no que diz respeito ao ângulo de molhabilidade e à largura do cordão de solda. Para ambas as características se tem a impressão de elas estão menores do que nas demais amostras. De maneira similar, a amostra F150A100, Figura 34(c), sugere possuir um ângulo de molhabilidade menor do o verificado nos demais corpos de prova.

Figura 32 – Morfologia do cordão soldado sem vibração do arame de adição (Referência).

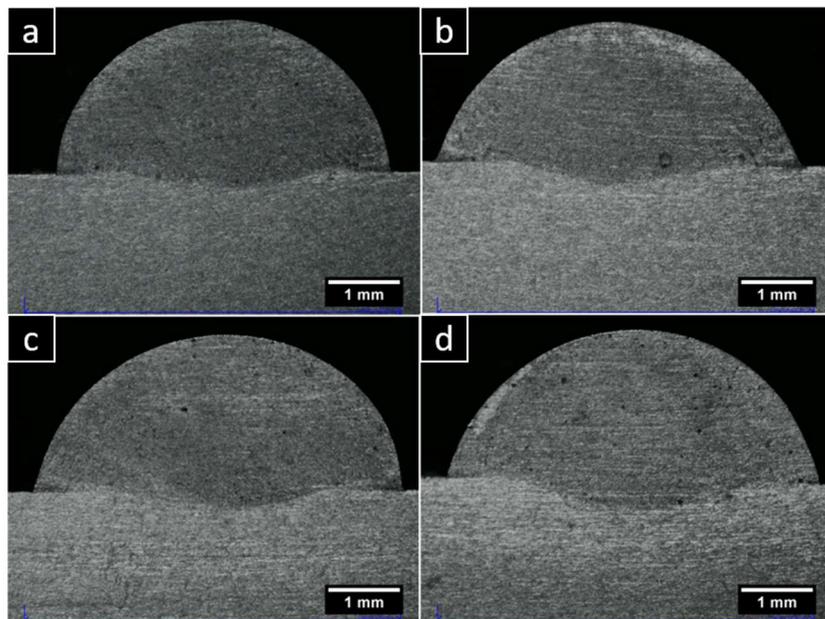
Em (a), (b), (c) e (d), tem-se quatro seções de diferentes regiões do cordão de Referência.



Fonte: O Autor (2020).

Figura 33 – Morfologia dos cordões de solda produzidos com frequência de 100Hz.

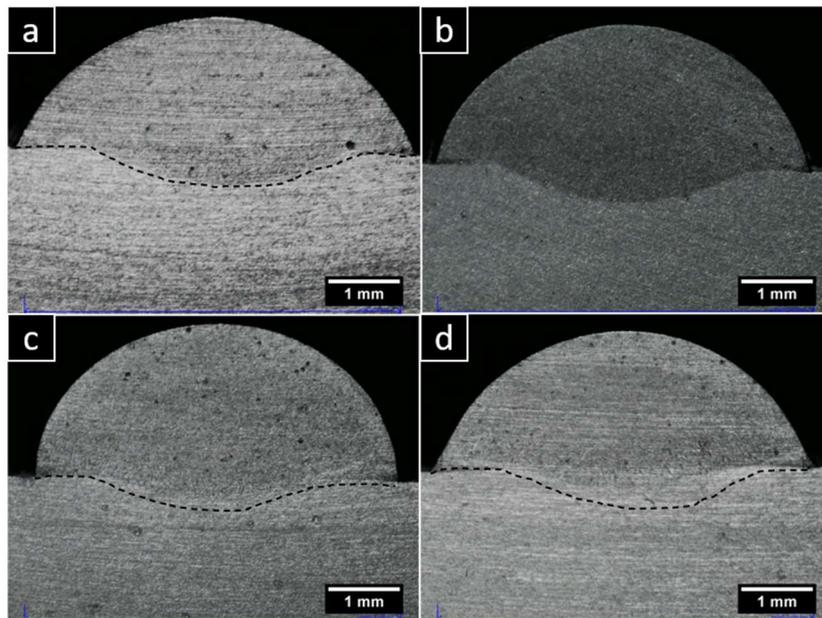
Em (a), F100A025. Em (b), F100A050. Em (c), F100A100. Em (d), F100A150.



Fonte: O Autor (2020).

Figura 34 – Morfologia dos cordões de solda produzidos com frequência de 150Hz.

Em (a), F150A025. Em (b), F150A050. Em (c), F150A100. Em (d), F150A150.



Fonte: O Autor (2020).

A fim de se realizar uma análise quantitativa dos dados, mediram-se as principais dimensões das seções transversais das amostras. Os resultados referentes à medição da área fundida total, área do reforço, área fundida do metal de base e diluição do cordão de solda são mostrados na Tabela 6. Os resultados relacionados aos demais aspectos morfológicos dos cordões são apresentados na Tabela 7.

Tabela 6 – Área fundida e diluição dos cordões de solda.

Amostra	Área Fundida Total (mm ²)	Área Reforço (mm ²)	Área Fundida Metal Base (mm ²)	Diluição (%)
Referência	8,73	7,73	0,99	11,4
F100A025	8,00	7,46	0,54	6,7
F100A050	8,82	8,22	0,60	6,7
F100A100	8,64	8,09	0,55	6,4
F100A150	9,18	8,20	0,98	10,6
F150A025	9,03	7,97	1,06	11,7
F150A050	8,74	7,70	1,04	11,8
F150A100	8,81	8,24	0,58	6,6
F150A150	8,31	7,93	0,38	4,6

Fonte: O Autor (2020).

Tabela 7 – Morfologia dos cordões de solda.

Amostra	Largura (mm)	Reforço (mm)	Penetração (mm)	Ângulo Molhabilidade (°)
Referência	5,34	1,98	0,39	68,6
F100A025	4,95	1,78	0,17	105,5
F100A050	5,27	2,14	0,33	68,2
F100A100	5,13	2,14	0,29	71,5
F100A150	5,28	2,10	0,44	70,3
F150A025	5,49	1,99	0,44	63,3
F150A050	5,29	1,86	0,54	67,3
F150A100	4,98	2,14	0,28	82,5
F150A150	5,19	2,07	0,20	69,9

Fonte: O Autor (2020).

De fato, analisando-se os dados da Tabela 6 e Tabela 7, percebe-se que não há variação significativa em nenhuma das dimensões analisadas no presente trabalho, com excessão das anomalias previamente citadas. Esse resultado sugere que, de maneira geral, a aplicação de energia mecânica à poça de fusão por intermédio da vibração do arame de adição não promove alterações significativas na geometria do cordão de solda. Ademais, não se percebe nenhum tipo de tendência dos dados com a variação da amplitude ou da frequência de vibração.

Conforme explanado anteriormente, esperava-se que a amplitude do movimento implicasse em efeitos na morfologia do cordão, principalmente na largura e molhabilidade. Isso porque com a movimentação do arame de adição com sua ponta submersa na poça de fusão, tende-se a promover uma agitação do metal fundido. Devido à direção da vibração, tal movimento poderia aumentar o espalhamento do metal liquido na poça, ocasionado o acréscimo de largura e diminuição da penetração. Por outro lado, as amplitudes analisadas no presente trabalho são consideravelmente baixas, em comparação com o movimento de tecimento, por exemplo. Com excessão da amplitude de 1,50mm, as demais são menores do que o diâmetro do próprio metal de adição. Portanto, conjectura-se que tal ordem de grandeza aliada com a alta condutividade térmica do alumínio, que promove a rápida solidificação da poça de fusão, não foi capaz de promover alterações na geometria dos cordões de solda.

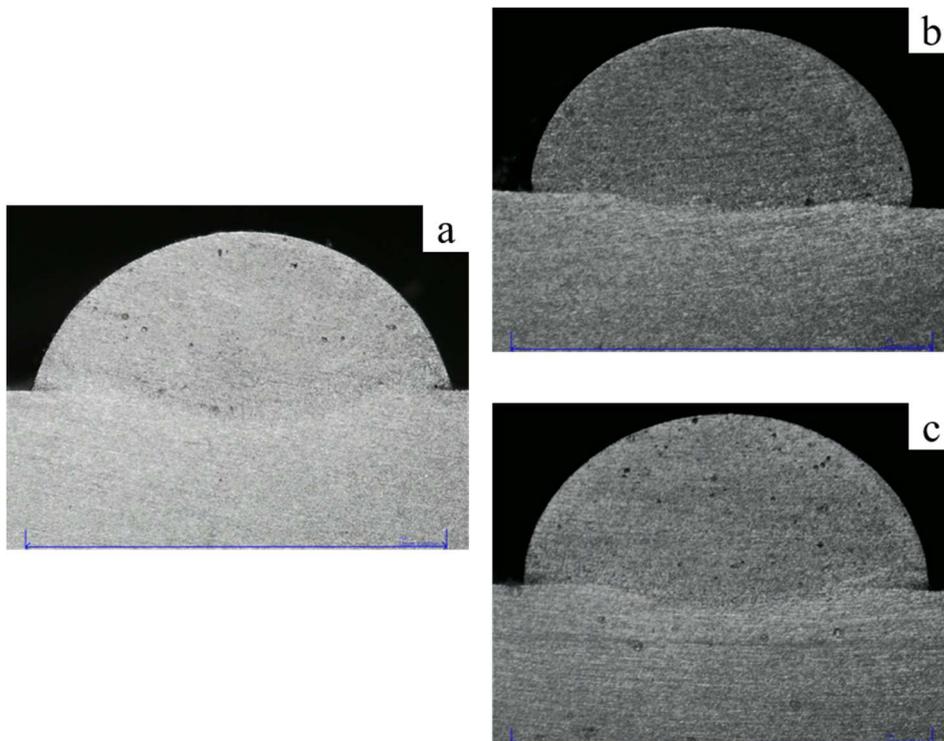
6.2 ANÁLISE DA POROSIDADE DO CORDÃO DE SOLDA

A fim de se analisar a ocorrência de porosidade nos cordões de solda, seguiu-se por duas vertentes: qualitativa e quantitativa. Na análise qualitativa se classificou cada amostra em função da percepção de poros no cordão de solda e comparação com a amostra de Referência. Para isso, rotulou-se os dados da seguinte forma: “-”, em caso de diminuição da porosidade; e “+”, em caso de aumento da porosidade. Esse ponto de vista é interessante pois em uma aplicação prática, tende-se a fazer uso de técnica semelhante em uma análise preliminar da qualidade do cordão de solda. Representando, portanto, uma estimativa dos melhores parâmetros e condições do processo.

A Figura 35 apresenta um exemplo de como se classificou as amostras na análise qualitativa. Na Figura 35(a), tem-se a amostra soldada sem a vibração do arame de adição. Na Figura 35(b) e Figura 35(c), apresenta-se a amostra F100A025 e a F150A100, respectivamente. Claramente se percebe a diferença entre a porosidade de ambas as amostras com relação à Referência. A amostra da Figura 35(b) foi classificada como “-” e a da Figura 35(c) como “+”.

Figura 35 – Análise qualitativa da porosidade dos cordões de solda.

Em (a), Referência. Em (b), F100A025. Em (c), F150A100



Fonte: O Autor (2020).

A Tabela 8 apresenta os resultados da análise qualitativa da porosidade. Nota-se que para a frequência de 100Hz, apenas a amostra com maior amplitude apresentou aumento de porosidade. Por outro lado, para a frequência de 150Hz, as amostras com amplitude de 1,00mm e 1,50mm obtiveram uma percepção de desempenho pior do que a amostra de Referência. Ressalta-se, que a avaliação foi realizada sobre todas as seções cortadas de cada amostra. Esse resultado indica que a vibração do arame de adição na poça de fusão reduz a porosidade para as menores amplitudes de vibração.

Tabela 8 – Análise qualitativa da porosidade nos cordões de solda.

Amostra	Porosidade (qualitativa)
F100A025	-
F100A050	-
F100A100	-
F100A150	+
F150A025	-
F150A050	-
F150A100	+
F150A150	+

Fonte: O Autor (2020).

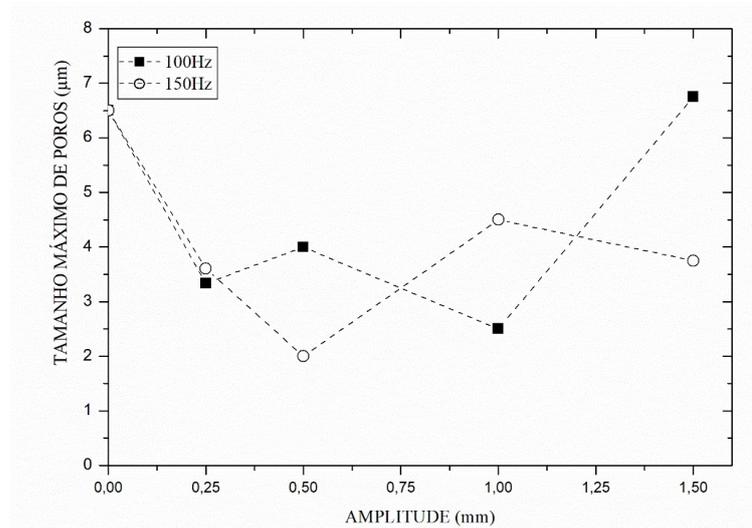
Na sequência, avaliou-se a presença de poros na área fundida de maneira quantitativa. Com o objetivo de se avaliar os efeitos da frequência e da amplitude no cordão de solda, realizaram-se duas medições: tamanho máximo e fração de área. O primeiro é importante para avaliar qual o tamanho máximo dos poros presentes no cordão, além de funcionar como um filtro aos ruídos oriundos do processo anterior. Já a fração de área é obtida como sendo a razão da área total dos poros pela área fundida. Essa característica tem a função de desconsiderar as variações geométricas do cordão, caso se analisasse apenas a área total de poros. Pois, quanto maior a área fundida, maior é a probabilidade da ocorrência dessa descontinuidade.

A Figura 36 apresenta o tamanho máximo dos poros em função da frequência e da amplitude de vibração. Os pontos onde a amplitude é zero são referentes à amostra Referência. Percebe-se que a vibração do arame de adição na poça de soldagem diminui o tamanho máximo dos poros. A única amostra em que houve aumento é a F100A150, onde o valor foi cerca de 4% maior do que a Referência. Além disso, obteve-se uma redução no tamanho máximo dos

poros de aproximadamente 61% para a frequência de 100Hz com amplitude de 1,00mm e de 69% para a frequência de 150Hz com amplitude de 0,50mm.

Outrossim, observa-se que o efeito da frequência e da amplitude não apresenta uma tendência definida. Ou seja, a simples presença de vibração na poça de fusão parece ser suficiente para reduzir o tamanho máximo dos poros. Pensando-se na dinâmica da formação de porosidade apresentada anteriormente, presume-se que a agitação do metal líquido causada pela vibração do arame de adição na poça de fusão é capaz de fragmentar as bolhas de gás. Com isso, uma simples agitação da poça seria capaz de promover resultados semelhantes.

Figura 36 – Tamanho máximo de poros em função da frequência e amplitude de vibração.

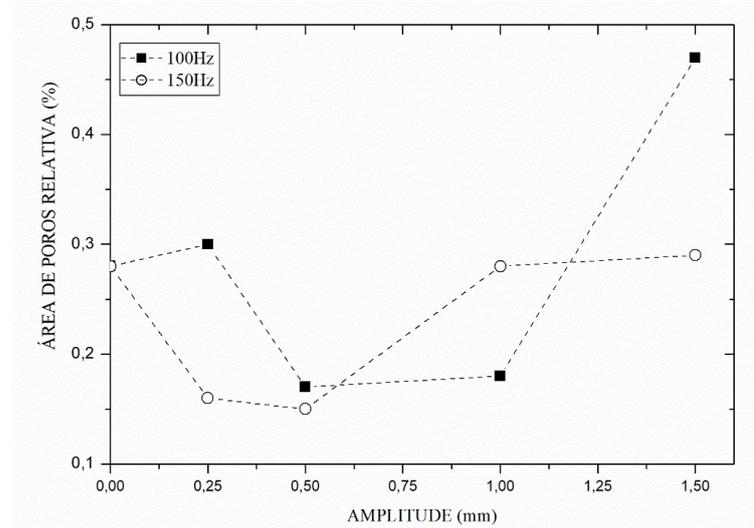


Fonte: O Autor (2020).

A Figura 37 apresenta o comportamento da área relativa de porosidade como função da frequência e da amplitude de vibração. Novamente, os pontos onde a amplitude é zero são referentes à amostra Referência. Observa-se que a aplicação da vibração na poça de fusão promoveu uma redução da área relativa de porosidade com baixas amplitudes de vibração. De fato, com frequência de 100Hz, houve diminuição nas amplitudes de 0,50mm e 1,00mm. Por outro lado, com 150Hz, a redução ocorreu com as duas menores amplitudes (0,25mm e 0,50mm). A melhor condição foi encontrada na amplitude de 0,50mm, para ambas as frequências de vibração. Nesse caso, a área relativa de porosidade diminuiu cerca de 39%, com uma frequência de 100Hz, e de 46%, com a frequência de 150Hz. Diferente do ocorrido com o tamanho máximo dos poros, a simples aplicação de vibração na poça de fusão não é suficiente para diminuir a área relativa de porosidade. Na verdade, parece existir uma faixa de amplitude de vibração onde se atinge a máxima redução da área relativa de porosidade. Esse intervalo é

entre 0,50mm e 1,00mm, para a frequência de 100Hz, e entre 0,25mm e 0,50mm, para a frequência de 150Hz.

Figura 37 – Área relativa de porosidade em função da frequência e amplitude de vibração.



Fonte: O Autor (2020).

Pensando-se no conceito de movimento harmônico, tem-se que a vibração forçada é dada pelo produto da massa pela aceleração de pico (máxima). A aceleração, por sua vez, é obtida através da multiplicação entre a amplitude do movimento e o quadrado da frequência de vibração. Extrapolando-se esse conceito para o presente trabalho e sendo a massa constante em virtude da manutenção das mesmas condições nos ensaios de soldagem, qualquer alteração na força da vibração forçada é dada pela relação entre a amplitude e a frequência. A Tabela 9 apresenta o cálculo dos valores dessa aceleração para o intervalo mencionado anteriormente.

Tabela 9 – Relação entre frequência e amplitude de vibração sobre a aceleração da vibração forçada.

Frequência (Hz)	Amplitude (mm)	Aceleração ($\text{mm}\cdot\text{s}^{-2}$)
100	0,50	5000
150	0,25	5625
100	1,00	10000
150	0,50	11250

Fonte: O Autor (2020).

Nota-se a semelhança entre os valores da aceleração obtida com frequência de 100Hz e amplitude de 0,50mm com o resultado oriundo da frequência de 150Hz e amplitude de

0,25mm. De forma similar acontece para essas mesmas frequências e amplitudes de 1,00mm e 0,50mm. Observa-se a similaridade entre os valores na Tabela 9 e os resultados apresentados na Figura 37. Esse comportamento sugere que existe um intervalo de valores de aceleração onde se obtém a maior redução da área relativa de porosidade, tal intervalo tende a ser compreendido entre aproximadamente $5000\text{mm}\cdot\text{s}^{-2}$ e $10000\text{mm}\cdot\text{s}^{-2}$. Com isso, teoricamente é possível ajustar uma série de condições de amplitude e frequência a fim de se obter o máximo desempenho no que diz respeito à redução da área de porosidade na soldagem de ligas de alumínio.

7 CONCLUSÕES

Esse trabalho surgiu como uma necessidade de se estudar novas técnicas na soldagem de ligas de alumínio, de modo a aumentar a qualidade da junta soldada e contribuir com a competitividade da indústria nacional. Para isso, foi proposto o desenvolvimento de uma tecnologia capaz de vibrar transversalmente o arame de adição no processo de soldagem GTAW. Além de se buscar uma avaliação preliminar dos impactos da técnica desenvolvida nos aspectos morfológicos e na porosidade do cordão de solda.

O dispositivo desenvolvido permitiu a inserção da vibração transversal do arame de adição diretamente na poça de fusão. Esse processo de desenvolvimento foi pautado sob os requisitos de projeto inicialmente identificados, os quais foram atendidos nos ensaios de soldagem. A etapa de caracterização do dispositivo fez uso de ferramentas de elevada tecnologia, permitindo desenhar o comportamento mecânico do dispositivo conforme a potência selecionada no gerador de funções. Tais resultados se mostraram excelentes, criando a oportunidade de interpolação dos valores em trabalhos futuros, em que se deseja aprofundar a pesquisa sobre os efeitos da amplitude e frequência de vibração.

Por fim, a análise da morfologia do cordão de solda mostrou que o movimento de vibração imposto à poça de fusão não promove alterações na sua geometria. Com relação à porosidade, os resultados se mostraram promissores. O tamanho máximo dos poros, de forma geral, reduziu com a soldagem com vibração do arame de adição. Atingindo valores mínimos de tamanho de poros nas amplitudes de 1,00mm, com frequência de 100Hz, e 0,50mm, com frequência de 150Hz. Tal redução é da ordem de 61% e 69%, respectivamente. A área relativa de porosidade apresentou melhor desempenho nas amplitudes de 0,50mm e 1,00mm, para frequência de 100Hz, e de 0,25mm e 0,50mm, para frequência de 150Hz. Ademais, a menor área relativa de porosidade foi encontrada como sendo dependente da relação entre a amplitude e frequência de vibração.

Como sugestão a trabalhos futuros, propõe-se uma investigação do comportamento da porosidade do cordão de solda para demais frequências e amplitudes que estejam no âmbito do presente trabalho, conforme discutido na caracterização do dispositivo. Sugere-se validar a hipótese de existir uma faixa de frequência e amplitude para se minimizar a área relativa de porosidade, conforme elucidado nas discussões do presente trabalho. Ademais, propõe-se experimentar diferentes níveis de corrente de soldagem bem como corrente duplamente pulsada e investigar a relação com a porosidade e os efeitos da técnica proposta. Finalmente,

recomenda-se o a investigação dos possíveis efeitos da técnica desenvolvida no presente trabalho sobre a microestrutura da região soldada, buscando experimentar condições que possam promover um refino dos grãos da zona fundida.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- AIYIMA AUDIO. Audio Speaker: vibration speaker - AIYIMA, 2019. Disponível em: <https://www.aiyima.com/products/audio-speaker-aiyima-vibration-speaker-4-8-ohm-15-25w-aluminum-loudspeaker?_pos=10&_sid=38beea580&_ss=r&variant=31425728905291>. Acesso em: 22 Novembro 2019.
- ALCAN ALUMÍNIO DO BRASIL S/A. **Manual de Soldagem**. São Paulo: [s.n.], 1993.
- ALCAN MARINE. **Aluminium, Metal and the Sea**. [S.l.]: [s.n.], 1999. 12 p.
- AMERICAN WELDING SOCIETY. **Welding Handbook**. 8^a. ed. Miami: American Welding Society, v. II, 1997. 955 p.
- ASHTON, R. F.; WESLEY, R. P.; DIXON, C. R. The Effect of Porosity on 5086-H116 Aluminum Alloy Welds. **Welding Journal** , 54, n. 3, 1975. 95-98.
- BAOQIANG, C. et al. Influence of Cold Metal Transfer Process and Its Heat Input on Weld Bead Geometry and Porosity of Aluminum-Copper Alloy Welds. **Rare Metal Materials and Engineering**, 45, n. 3, 2016. 606-611.
- CAMPBELL, J. Effects of vibration during solidification. **International Metals Reviews**, V. 26, 1981. 71-108.
- CUI, Y.; XU, C.; HAN, Q. Microstructure Improvement in Weld Metal Using Ultrasonic Vibrations. **ADVANCED ENGINEERING MATERIALS**, 9, n. 3, 2007. 161-163.
- CUNHA, T. V. D. **DESENVOLVIMENTO E AVALIAÇÃO DE TECNOLOGIA PARA SOLDAGEM TIG COM PULSAÇÃO ULTRASSÔNICA**. Universidade Federal de Santa Catarina. Florianópolis, p. 266. 2013.
- DONG, H. et al. Improving arc joining of Al to steel and Al to stainless steel. **Materials Science and Engineering A**, 534, 2012. 424-435.
- FERRARIS, S.; VOLPONE, L. M. **ALUMINIUM ALLOYS IN THIRD MILLENNIUM SHIPBUILDING: MATERIALS, TECHNOLOGIES, PERSPECTIVES**. The Fifth International Forum on Aluminum Ships. Tóquio: [s.n.]. 2005. p. 11.
- GILL, J. S.; REDDY, T. K. **Effect of Weld Pool Vibration on Fatigue Strength and Tensile Strength of Stainless Steel Butt Welded Joints by GTAW Process**. World Congress on Engineering. Londres: [s.n.]. 2018.
- HE, E. et al. Effect of porosities on tensile properties of laser-welded Al-Li alloy: an experimental and modelling study. **The International Journal of Advanced Manufacturing Technology**, 95, 2018. 659-671.
- HUANG, Y. et al. Real-time monitoring and control of porosity defects during arc welding of aluminum alloys. **Journal of Materials Processing Technology**, 286, 2020. 11.
- IMC - SOLDAGEM. Direcionador de arame TIG Alimentado , 2020. Disponível em: <<https://www.imc-soldagem.com.br/pt-pt/acessorios/sptig-al>>. Acesso em: 18 set. 2020.

LAMB, T. The Benefits and Cost Impact of Aluminum Naval Ship Structure. **Journal of Ship Production and Design**, 27, 2011. 35-49.

LANCASTER, J. P. **The Physics of Welding**. 1. ed. [S.l.]: Pergamon Press, 1986.

LI, H. et al. The effect of TIG welding techniques on microstructure, properties and porosity of the welded joint of 2219 aluminum alloy. **Journal of Alloys and Compounds**, 727, 2017. 531-539.

MACHADO, I. G. **Soldagem e técnicas conexas: processos**. Porto Alegre: [s.n.], 1996.

MARTINS, N. C. D. E. **Soldadura de ligas de alumínio de construção naval**. Faculdade de Ciências e Tecnologia da Universidade Nova de Lisboa. Lisboa, p. 123. 2008.

MATHERS, G. **The welding of aluminium and its alloys**. 1^a. ed. Abington: Woodhead Publishing, 2002.

PILIPENKO, A. **Computer simulation of residual stress and distortion of thick plates in multi-electrode submerged arc welding. Their mitigation techniques**. Norwegian University of Science and Technology. Trondheim. 2001.

ROLAND, F. et al. Advanced Joining Techniques in European Shipbuilding. **Journal of Ship Production**, V. 20, n. 3, 2004. 200-210.

RUDY, J. F.; RUPERT, E. J. Effects of Porosity on Mechanical Properties of Aluminum Welds. **Welding Journal**, 49, n. 7, 1970. 322-336.

SARRAFI, R.; KOVACEVIC, R. Cathodic Cleaning of Oxides from Aluminum Surface by Variable-Polarity Arc. **WELDING JOURNAL**, 89, 2010. 10.

SCOTTI, A.; DUTRA, J. C.; FERRARESI, V. A. The influence of parameter settings on cathodic self-etching during aluminum welding. **Journal of Materials Processing Technology**, 100, 2000. 179-187.

SCOTTI, A.; DUTRA, J. C.; SANCHES, H. A. **O EFEITO DOS PARÂMETROS DE AJUSTE NA ESTABILIDADE E. XXIV ENCONTRO NACIONAL DE TECNOLOGIA DA SOLDAGEM, XI CONGRESSO LATINO-AMERICANO e V ÍBERO-AMERICANO DE SOLDAGEM**. Fortaleza: [s.n.]. 1998. p. 10.

SILVA, C. L. M.; SCOTTI, A. The influence of double pulse on porosity formation in aluminum GMAW. **Journal of Materials Processing Technology**, 171, n. 3, 2006. 366-372.

SILWAL, B.; SANTANGELO, M. Effect of vibration and hot-wire Gas Tungsten Arc (GTA) on the geometric shape. **Journal of Materials Processing Technology**, 251, 2018. 138-145.

SINGH, P. K.; PATEL, D.; PRASAD, S. B. Development of Vibratory Welding Technique and Tensile Properties Investigation of Shielded Metal Arc Welded Joints. **Indian Journal of Science and Technology**, V. 9, 2016.

ST MICROELECTRONICS. **TDA7265**. [S.l.], p. 11. 2002.

WANG, B. et al. Effects of Porosity, Heat Input and Post-Weld Heat Treatment on the Microstructure and Mechanical Properties of TIG Welded Joints of AA6082-T6. **Metals**, 7, n. 11, 2017. 463-480.

WANG, Y.; CHEN, M.; WU, C. High-frequency pulse-modulated square wave AC TIG welding of AA6061-T6 aluminum alloy. **Welding in the World**, 64, 2020. 1749-1762.

WATANABE, T. et al. Improvement of mechanical properties of ferritic stainless steel weld metal by ultrasonic vibration. **Journal of Materials Processing Technology**, 210, 2010. 1646-1651.