



Associação Brasileira de Soldagem

**XLVI CONSOLDA – Congresso Nacional de Soldagem
II CBMAdi – Congresso Brasileiro de Manufatura Aditiva
Uberlândia/MG de 26 a 28 de agosto de 2024**

Análise da Influência Oscilográfica, Elétrica e Geométrica da Frequência de Alimentação Dinâmica de Arame na Soldagem com Processo Plasma de Aço Inoxidável 309L com Vistas à Manufatura Aditiva

(Analysis of the Oscillographic, Electric and Geometric Influences of the Dynamic Wire Feed in the Plasma Arc Welding of 309L Stainless Steel with a View to Additive Manufacturing)

Regis Henrique Goncalves e Silva¹, Júlia Moraes Dornelles¹, Cleber Marques¹, Mateus Barancelli Schwedersky¹
¹universidade Federal de Santa Catarina, LABSOLDA – Departamento de Engenharia Mecânica, Florianópolis, SC, Brasil, regis.silva@ufsc.br

Resumo

A manufatura aditiva com energia direcionada (DED), em específico por processos de soldagem, tem ganhado espaço especialmente pela capacidade de produção de peças just in time e alta personalização tanto geométrica quanto física. Além disso, a grande diversidade de materiais e processos disponíveis para utilização abrem espaço para inúmeras possibilidades de aplicação. Neste contexto, diferentes técnicas de alimentação de arame vêm sendo desenvolvidas e estudadas para fornecer benefícios no processo e no resultado das peças construídas via WAAM (Wire Arc Additive Manufacturing). O foco deste trabalho é avaliar a influência da frequência de alimentação dinâmica de arame no processo de soldagem Plasma (PAW), no que diz respeito às características geométricas de cordões de solda depositados sobre chapa, com vistas a levantar informações e conhecimento transferíveis à manufatura aditiva (PAW-DED), utilizando como material de adição arame de aço inoxidável 309L. Foram comparadas diferentes frequências de alimentação e as análises foram realizadas com auxílio de câmera de alta velocidade, e sistema de aquisição de dados de soldagem a arco voltaico. Como principais, resultados verificou-se que a soldagem com alimentação dinâmica em altas frequências, 12 Hz e 15 Hz, originou cordões mais altos, simétricos e com penetração mais homogênea quando comparado à alimentação contínua de arame. A alimentação dinâmica apresentou potência média levemente superior à obtida na soldagem com alimentação contínua de arame. Os oscilogramas de tensão e de velocidade de arame podem ser usados como um indicativo de estabilidade do processo e da transferência metálica.

Palavras-chave: PAW; Alimentação pulsada de arame; WAAM; Manufatura Aditiva por Deposição a Arco (MADA); Indústria 4.0; Aço inoxidável; Impressão 3D

Abstract: *Additive manufacturing with directed energy deposition (DED), specifically through welding processes, has gained ground especially due to its ability to produce just-in-time parts and high customization ability, both geometric and physical. Furthermore, the great diversity of materials and processes available for use opens up space for numerous application possibilities. In this context, different wire feeding techniques have been developed and studied to provide benefits in the process and results of parts built via WAAM (Wire Arc Additive Manufacturing). The focus of this work is to evaluate the influence of the dynamic wire feed frequency in the Plasma welding (PAW) process, with regard to the geometric characteristics of weld beads deposited on sheet metal, with a view to gathering information and knowledge transferable to additive manufacturing (PAW-DED), using 309L stainless steel wire as filler material. Different wire oscillation frequencies were compared and analyzes were carried out with the aid of a high-speed camera and an arc welding data acquisition system. The main results were that welding with dynamic feeding at high frequencies, 12 Hz and 15 Hz, resulted in higher, symmetrical beads with more homogeneous penetration when compared to continuous wire feeding. Dynamic feeding presented an average power slightly higher than that obtained in welding with continuous wire feeding. Voltage and wire speed oscillograms can be used as an indication of process and metal transfer stability.*

Key-words: PAW; pulsed wire feed; WAAM; Arc Deposition Additive Manufacturing (MADA); Industry 4.0; Stainless Steel; 3D Print.

1. Introdução

É fato que as pesquisas no WAAM (Wire Arc Additive Manufacturing) vêm crescendo, principalmente nas últimas três décadas, mas o uso da soldagem na fabricação de componentes de grande porte já é descrita em trabalhos mais antigos, sendo chamado de shape welding. No trabalho de Gnirss [1], é feita uma revisão bibliográfica sobre shape welding, relatando a construção de flanges e peças cilíndricas pelos processos de soldagem eletroescória e arco submerso em 1970, na Alemanha. No Brasil, Moraes, et al. [2], construíram integralmente um bocal para componentes nucleares utilizando o processo de arco submerso em 1986. Em trabalhos mais recentes como os de Jhavar et al (2014) [3], Feng et al. (2018) [4] e Ruft (2019) [5], diferentes tecnologias vem sendo aplicadas na manufatura aditivada via processo de soldagem, como por exemplo, micro plasma, plasma alimentado com duplo arame e múltiplas tochas, respectivamente. No WAAM existem três processos de soldagem a arco que são amplamente utilizados como fonte de calor para a fusão do arame, MIG/MAG, TIG e Plasma [6]. O processo PAM (Plasma Additive Manufacturing) é usualmente utilizado na fabricação de componentes de alto custo, e por possuir bico constritor, apresenta a vantagem de maior densidade de energia o que resulta em maior taxa de deposição e melhor precisão de deposição em relação ao processo TIG convencional [7]. Além da constrição do arco, o bico também desempenha um papel de proteção do eletrodo, diminuindo o risco de contaminação por eventual instabilidade na transferência metálica quando o processo é alimentado. Desta forma, com a crescente utilização do WAAM, é natural que exista a necessidade em desenvolver novas tecnologias na soldagem para melhorar o desempenho e qualidade dos processos. Neste contexto, diferentes técnicas de alimentação de arame vêm sendo desenvolvidas e estudadas para fornecer benefícios no processo de soldagem e no resultado das peças construídas via WAAM. Hoje, as tecnologias mais desenvolvidas utilizam técnicas de alimentação dinâmica ou pulsada de arame [8]. A alimentação dinâmica de arame vem sendo estudada principalmente aplicada ao processo TIG e os autores relatam resultados promissores quanto à maior regularidade de potência [9], maior regularidade da transferência metálica e maior simetria da geometria dos cordões [10]. Além destas características, a utilização da alimentação dinâmica permite utilização de correntes mais baixas e menores velocidades de arame no processo devido ao maior controle da transferência metálica, favorecendo aplicações fora da posição plana de soldagem. Além dos atributos já citados a alimentação dinâmica promove a agitação da poça, que pode favorecer o refino de grão e dispersão de precipitados na microestrutura dos cordões soldados [10, 11].

Na soldagem, entende-se por alimentação contínua de arame aquela em que durante todo o processo possui velocidade de arame constante e definida pelo operador. É o modo de alimentação convencional adotado nos equipamentos comerciais devido à relativa simplicidade de equipamento e controle quando comparado aos modos de alimentação dinâmica. No que diz respeito à nomenclatura, “alimentação contínua” é ampla e mundialmente utilizada. Em 1982 Rudy [12], já empregava esta terminologia para se referir ao modo de alimentação convencional em que a velocidade de alimentação é constante. Em trabalhos mais recentes, como os de Silva [13] e Foley [11] a utilização do termo alimentação contínua também é usada para se referir à alimentação de arame convencional. Já o conceito de Alimentação Dinâmica de arame, abrange toda forma de alimentação não constante de material, isto é, na alimentação dinâmica pressupõe-se variações no movimento/deslocamento do arame que está sendo alimentado. Silva et al [13] definiram Alimentação Dinâmica como sendo o movimento de avanço e recuo do arame aplicado ao alimentador por um sistema eletromecânico, que gera características como aumento da robustez do processo e transferência metálica mais suave. Já Jorge et al. [14] chamaram de alimentação pulsada a modalidade em que o arame realiza o movimento de avanço e retrocesso durante o processo. Para Santangelo et al. [15] a técnica de excitação do arame a uma frequência definida é chamada de vibração. No presente trabalho será adotada a nomenclatura “dinâmica”, para se referir às técnicas de alimentação de arame não contínua. As variações do movimento tangem a mudanças no sentido de deslocamento do arame e alterações na velocidade de alimentação de arame, sendo assim, se pode classificar a alimentação dinâmica em duas variantes: Alimentação Dinâmica Oscilante e Alimentação Dinâmica Pulsada.

Na alimentação oscilante ocorre a alternância do sentido de alimentação, com amplitude e frequência definidas, na direção do eixo do arame. Nos equipamentos encontrados comercialmente e alguns desenvolvidos no Labsolda-UFSC, a alimentação de arame pelo motor principal é mantida constante (Va regulada na fonte de soldagem) e a oscilação do movimento é provocada pelo deslocamento do bloco de rolete, modificando assim a velocidade relativa de alimentação de arame. Na alimentação pulsada a velocidade de alimentação é sempre positiva, isto é, sempre no sentido de aproximação da poça/arco, porém com valores variados em períodos pré-definidos, caracterizando uma onda pulsada com dois patamares de velocidade de arame regulados. Ressalta-se que os sinais positivo e negativo para velocidade do arame foram definidos por convenção. Assim sendo, a velocidade negativa trata-se do período em que o arame apresenta o movimento de recuo, afastando-se da poça. A alimentação pulsada foi utilizada no trabalho de Pigozzo [16] na soldagem orbital de passe de raiz com o processo TIG, conciliando patamares mais elevados de velocidade com pulsos de corrente, enquanto as velocidades mais baixas foram desenhadas para acompanhar os momentos de corrente de base do processo.

Os estudos com foco em técnicas avançadas de alimentação de arame no processo plasma ainda são escassos, sendo que a grande maioria das publicações são de aplicações no processo TIG. A ideia de alimentar arame de

forma dinâmica já foi estudada em 1982 em uma 24 das primeiras publicações sobre alimentação dinâmica automatizada. Rudy [12] desenvolveu modificações mecânicas e eletrônicas em seu sistema de soldagem TIG para a realização da movimentação do arame com frequências entre 3 e 11 Hz. O objetivo era obter um melhor controle da transferência metálica, evitando a formação de gotas com tamanho e comportamento imprevisíveis, para o reparo de partes pequenas pertencentes a um motor de avião. Rudy concluiu que o aumento da velocidade de aproximação do arame de forma controlada gerava uma transferência metálica muito mais estável, com tamanho de poça controlado, diminuindo a tendência de escorrimento de material pela lateral das partes a serem reparadas. Esse novo modo de alimentação de arame foi batizado por ele de “Dabber TIG”. Nos últimos anos novas abordagens têm sido estudadas no que diz respeito a alimentação dinâmica. Riffel et al. [10] avaliaram os efeitos da alimentação dinâmica sobre a geometria do cordão na soldagem TIG e concluíram que o arame quando alimentado a uma frequência de 18 Hz resulta em cordões de solda com menor diluição e penetração, em comparação com alimentação contínua em ponte. Silwal e Santangelo [17], usando frequências em torno de 16 Hz, relataram que o uso de “vibração no arame” forneceu uma força extra auxiliando na transferência metálica e diminuindo o tempo de destacamento da gota, porém nenhuma diferença significativa foi constatada na geometria dos cordões. Já na investigação de Jorge et al. [14] na soldagem TIG com alimentação dinâmica com frequência de 15 Hz, houve um aumento de mais de 40% na penetração quando comparado com a alimentação contínua intermitente, mesmo apresentando potência média cerca de 100 W menor. Segundo Riffel [18], em seu estudo com o processo TIG, durante o movimento de avanço o arame percorre as isoterms do arco elétrico com maior velocidade, evitando a formação de grandes gotas em sua ponta, o que gera uma maior robustez para soldagem fora de posição. A estabilidade e robustez do processo com alimentação dinâmica também foram observadas por Silva et al. [9], que demonstraram através de oscilogramas de tensão do arco, tensão do arame e corrente que os resultados da alimentação dinâmica em 18 Hz geraram uma transferência metálica e valores de potência média mais regulares do que os encontrados na alimentação contínua no processo TIG. A mesma técnica foi aplicada por Silva et al. [19] em uma frequência de 1,25 Hz, o objetivo era unir tubos de aço para a indústria de óleo e gás, os autores também mostraram a possibilidade de aumentar a produtividade na execução do passe de raiz para uma soldagem automatizada. Alguns autores [5, 11, 14] estudaram também a relação entre a alimentação dinâmica e consequente aumento da agitação da poça de fusão com a temperatura e como isso pode, de alguma forma influenciar na microestrutura dos cordões soldados. Jorge et al. [20] investigaram a alimentação dinâmica no processo MIG/MAG e embora não tenham encontrado diferenças na geometria dos cordões, constataram mudança no perfil térmico próximo à região da poça. Houve menor transferência de calor para a peça na soldagem com frequência de 16 Hz resultando em uma redução da área de grãos grosseiros na ZTA e uma microestrutura mais refinada. Neves et al. [21] investigaram a influência da alimentação dinâmica em diferentes frequências (0,5, 5, 10 e 15 Hz) na resistência à fadiga de soldas realizadas pelo processo TIG quando comparado com alimentação contínua de arame. Os cordões soldados com alimentação dinâmica apresentaram em sua microestrutura dendritas com menor espaçamento entre os braços secundários e maiores valores de microdureza do que os obtidos na alimentação contínua. Os autores atribuem esses resultados como provável justificativa para o aumento da resistência à fadiga encontrado nas amostras soldadas com alimentação dinâmica. Riffel [10] mostrou que a alimentação dinâmica provocou uma melhor distribuição dos precipitados, formando uma estrutura mais isotrópica em procedimentos de revestimento com Inconel 625. Além disso, houve refino de grão na soldagem realizada com 18 Hz que resultou em aumento da resistência à corrosão do revestimento nas condições estudadas. Em artigos publicados pela equipe do Labsolda, a alimentação dinâmica com transferência em ponte intermitente apresentou potência média maior que para a alimentação convencional [9]. Em contrapartida, estudos termográficos realizados com câmeras infravermelho mostraram que a alimentação dinâmica de material reduz a temperatura da poça metálica. Vale ressaltar que a temperatura foi monitorada pelo verso da chapa. [13]. Os equipamentos disponíveis no mercado permitem uma oscilação de até 16 Hz (TigSpeed [22]), 15 Hz (TIP TIG [23]) e 10 Hz (Dabber TIG [24]).

A Manufatura Aditiva via processo plasma, PAW-DED (Plasma Arc Welding – Directed Energy Deposition), ou plasma arc additive manufacturing (PAM), como o próprio nome sugere, é a modalidade onde o arco do processo de soldagem plasma é utilizado como fonte de calor para a fusão de arame ou pó em aplicações na Manufatura Aditiva. A maioria dos estudos encontrados na literatura sobre o processo plasma são focados na aplicação pela técnica keyhole, mas a alta penetração e a formação de keyhole são indesejadas no processo WAAM. Essas características induzem fluidez excessiva que é prejudicial à deposição de camadas e apresentam potencial para formação de defeitos [25]. Portanto, modificações apropriadas devem ser feitas no arranjo tecnológico, em particular nas configurações da tocha e parametrizações do arco para aplicação na manufatura aditiva. Diferentemente do WAAM com processo MIG/MAG, na manufatura aditiva com os processos TIG e Plasma o arame não é alimentado coaxialmente, necessitando de um sistema de alimentação externa. Essa característica induz variações em parâmetros essenciais do processo ao ser mudada a orientação da tocha, por exemplo, conferindo extrema sensibilidade no comprimento do arco. Dessa forma, muitos sistemas de soldagem automatizados requerem um eixo rotativo para orientar o direcionador de arame e mantê-lo alinhado com a direção de soldagem, limitando sua aplicabilidade [6]. Por outro lado, a independência entre a energia do processo e a taxa

de alimentação tornam o TIG e o Plasma processos mais flexíveis quanto à combinação desses parâmetros. Até agora, as tecnologias de soldagem TIG e Plasma demonstraram ser processos mais confiáveis para WAAM com menos problemas de respingos, aquecimento excessivo, distorção ou porosidade do que o processo MIG/MAG convencional [6]. Pesquisas com PAM vem assumindo mais espaço devido ao seu grande potencial em melhorar a eficiência, conveniência e economia de custos em comparação com os processos de alta energia como laser (Laser Beam Deposition – LBD) e feixe de elétrons (Eletron Beam Melting - EBM)[7], principalmente na fabricação de componentes estruturais de alto custo, como discos e pás de turbinas de aeronaves, que normalmente são produzidos com ligas de titânio. Em comparação com a manufatura aditiva com TIG, o plasma tem as vantagens de um arco mais concentrado, com maior densidade de energia e rigidez e consequentemente maior precisão de deposição [4]. Segundo Lin et al. [7], a densidade de energia do arco plasma é maior do que a do TIG e próximo ao limite inferior do laser, o que ajuda na deposição mais precisa de material em relação ao processo TIG. Para Bai et al. [25] e Lin et al. [7], o processo plasma é uma alternativa bastante interessante na deposição de ligas de titânio, devido à densidade de energia, que leva a uma taxa de deposição mais alta e a menor rugosidade da superfície em relação ao TIG. Além disso, o plasma pode apresentar maior produtividade devido à existência do arco piloto. No TIG a abertura do arco é realizada por toque ou por pulso de alta frequência, sendo necessária a reignição do arco a cada novo cordão depositado caso haja necessidade de tempo de parada entre cordões. Já no processo plasma, a manutenção do arco piloto entre passes torna mais simples a ignição do arco transferido, diminuindo o desgaste e os riscos de contaminação do eletrodo devido à presença do bico constritor. Diante das características apresentadas pelo processo plasma aplicado ao WAAM, diversos estudos foram conduzidos explorando diferentes aplicações e materiais. No estudo de Lin et al. [26] foi investigada a manufatura de paredes finas (cordão simples), utilizando titânio (Ti-6Al-4V) com o processo PAW pulsado e controlando o aporte térmico camada a camada. Com esta redução de aporte térmico, a microestrutura das paredes foi refinada. A tensão de escoamento média e a resistência à tração atingiram o valor de 909 MPa e 988 MPa respectivamente, e o alongamento atingiu cerca de 7,5%. As peças, segundo os autores, apresentaram excelente desempenho para aplicações aeronáuticas, onde são requeridos elevados valores de propriedades mecânicas. Em seus experimentos Bai et al. [25], criaram um modelo matemático para simular e investigar o comportamento da transferência térmica e do fluxo de fluido na deposição multicamadas utilizando PAW e alimentação de arame de titânio (Ti-6Al-4V). Os resultados simulados foram de acordo com os resultados experimentais. Jhavar et al. [3] descreveram a fabricação de componentes de aço ferramenta P20 usando o processo WAAM por microplasma. Martina et al. [27] estudaram o uso de um sistema de deposição de arame com plasma para fabricar componentes aeroespaciais de grande porte com liga de Ti-6Al-4V. Este trabalho incluiu um modelo matemático para calcular a largura efetiva da parede, altura da camada e os parâmetros de processo mais adequados. Xu et al. [28] investigaram o efeito dos parâmetros do processo plasma com corrente pulsada na precisão da manufatura de componentes de paredes finas. Feng et al. [4] analisaram a utilização de duplo arame na manufatura aditiva via plasma com aço inoxidável e concluíram que houve um aumento na taxa de deposição para os mesmos parâmetros de soldagem.

Consideradas, portanto, as justificativas técnicas e o interesse científico verificado na literatura, o objetivo do presente trabalho é avaliar a influência do processo de soldagem plasma com alimentação dinâmica de arame nas características geométricas de cordões de solda depositados sobre chapa, que deverão servir como base de conhecimento e parametrização para expansão para estudos e operações de construção de estruturas por manufatura aditiva em diferentes condições de alimentação, utilizando como material de adição arame de aço inox 309L. O foco será na comparação da estabilidade da transferência metálica, no comportamento oscilográfico, elétrico e na geometria do cordão resultantes da soldagem com os dois modos de alimentação de arame. Além disso, o trabalho tem como propósito discutir sobre a aplicabilidade da alimentação dinâmica na Manufatura Aditiva via processo plasma.

2. Matérias e Métodos

Os ensaios de soldagem dos cordões e das paredes foram realizados na bancada experimental apresentada na Figura 1, constituída por uma fonte de soldagem IMC Digiplus A7, um módulo de alimentação dinâmica de arame (MAD) com seu respectivo controlador, uma tocha de soldagem plasma AUTOGEN-RITTER PWM 300 acoplada em um manipulador cartesiano robótico SPS sistema cartesiano de soldagem (SCS) com controle de movimentação da tocha e da mesa baseado em CNC (Comando Numérico Computadorizado), uma unidade de refrigeração ativa Marconi modelo MA083 para a tocha, uma câmera de alta velocidade IDT modelo Y4S2, um sistema de aquisição dos sinais elétricos portátil (SAP) e uma base refrigerada para fixação das chapas. O gás utilizado nos ensaios, argônio puro, foi fornecido pela rede central do laboratório.

Para a realização das soldas utilizou-se como material de base chapas de aço carbono ASTM A36, com dimensões de 75 mm de largura, 220 mm de comprimento e espessura de 12,7 mm (1/2"). O arame utilizado na realização dos ensaios como material de adição foi o aço inoxidável comercialmente conhecido como 309L, com diâmetro de 1,2 mm. A composição química foi verificada com espectrometria de emissão óptica (OES) no próprio

Labsolda. As Tabelas 1 e 2 apresentam os percentuais em peso dos elementos químicos presentes na chapa de aço utilizada como base e no arame respectivamente.



Figura 1. Bancada de ensaios: (a) Fonte de energia, (b) controlador do módulo de alimentação dinâmica, (c) tocha plasma, (d) manipulador robótico, (e) câmera térmica, (f) sistema de aquisição portátil (SAP), (g) módulo de alimentação dinâmica (MAD)

Tabela 1. Composição química da chapa de aço AISI 1010 realizada via OES.

Composição Química aço AISI 1010 (%)	
Carbono (C)	0,14
Manganês (Mn)	0,66
Enxofre (S)	0,032
Silício (Si)	0,12
Fósforo (P)	0,024

Tabela 2. Composição química do arame 309 L realizada via OES

Composição Química aço inoxidável 309 L (%)	
Carbono (C)	0,031
Cromo (Cr)	22,42
Níquel (Ni)	12,25
Manganês (Mn)	1,78
Molibdênio (Mo)	0,064
Fósforo (P)	0,042
Silício (Si)	0,83
Enxofre (S)	0,015

O direcionador de arame foi posicionado para que o arame seja inserido no arco a uma altura de 1,0 mm em relação à chapa. O ângulo de inserção do arame aplicado foi de 20° em relação a superfície da chapa e a tocha posicionada perpendicularmente à chapa. A alimentação de arame foi realizada pela frente do arco elétrico. O eletrodo utilizado tem diâmetro de 4,0 mm, e foi afiado com ângulo de 30°. O recuo do eletrodo em relação ao bico constritor foi de 2,4 mm. A Figura 2 apresenta os principais parâmetros de posicionamento do processo.

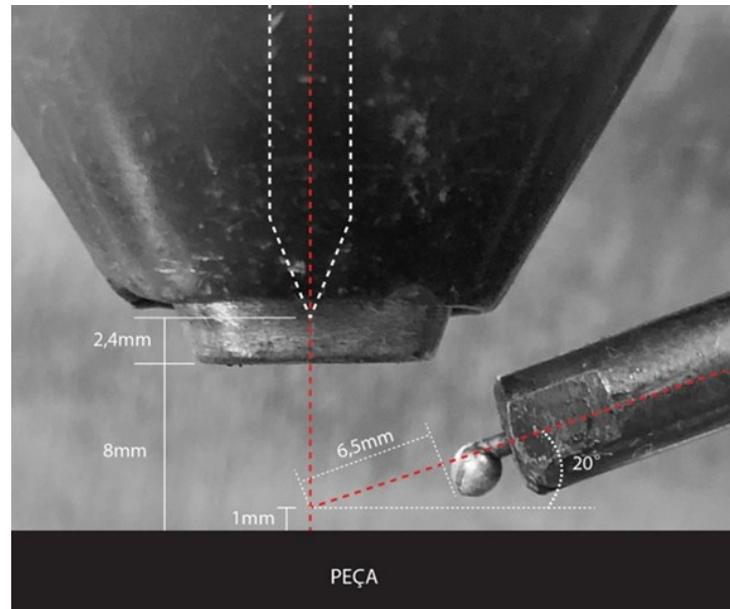


Figura 2. Tocha de soldagem com os principais parâmetros de posicionamento das variáveis do processo.

Depois dos testes preliminares exploratórios para a definição do melhor conjunto de parâmetros para atingir os objetivos deste trabalho os parâmetros definidos podem ser vistos na Tabela 3.

Tabela 3. Parâmetros de soldagem definidos para realização dos ensaios de soldagem dos cordões e das paredes

Parâmetros de soldagem	
Corrente	180 A
Velocidade de soldagem	15 cm/min
Velocidade de arame	1,7 m/min
Vazão gás de plasma	0,8 l/min
Corrente arco piloto	15 A
Vazão gás de proteção	13 l/min
Diâmetro bico constritor	3,4 mm
Diâmetro eletrodo	4,0 mm
Recuo eletrodo	2,4 mm

Para calcular a frequência mínima de alimentação dinâmica para a velocidade de soldagem definida (1,7 m/min), foi calculada a velocidade de avanço do arame juntamente com a velocidade de avanço do movimento do bloco de roletes do alimentador de arame MAD. De maneira análoga, a velocidade de retrocesso do bloco de roletes foi diminuída da velocidade de avanço do arame. Se a diferença dessas duas velocidades é positiva, significa que o arame não apresenta um movimento real de retração, ou seja, o retrocesso do bloco tracionador tem impacto apenas na redução da velocidade de avanço, sendo mantida a direção de avanço.

Com o intuito de avaliar a influência das diferentes frequências nas características de um único cordão de solda, uma matriz de ensaios foi definida mantendo constante todos os parâmetros de soldagem descritos na Tabela 5 variando apenas a frequência de oscilação do arame, em incrementos de 3 em 3 hertz. A amplitude adotada para todos os casos foi de 5 mm e os cordões foram soldados com comprimento de 150 mm. Para a soldagem com

alimentação contínua, foi definida a transferência metálica em ponte contínua. A Tabela 5 apresenta a matriz de ensaios utilizada. Foram realizados dois ensaios em cada corpo de prova, o segundo cordão foi feito depois do resfriamento total da chapa após a soldagem do primeiro cordão, para manter as mesmas condições iniciais de ensaio.

Tabela 5. Matriz de ensaios definida para soldagem de depósito dos cordões sobre chapa.

Matriz de ensaios cordões					
Nome	Corrente (A)	Vs (cm/min)	Va (m/min)	Amplitude (mm)	Frequência alimentação de arame (Hz)
C1					0 (contínua)
C2					3
C3					6
C4	180	15	1,7	5	9
C5					12
C6					15

3. Resultados e Discussão

3.1 Análise oscilográfica e elétrica

Na soldagem com alimentação dinâmica, o comportamento da tensão do arame não é linear e constante, como na alimentação contínua. A tensão varia de acordo com o movimento de avanço e recuo do arame, atingindo valores próximos à tensão do arco quando se encontra dentro da poça (ponte) e valores inferiores aos do arco nos momentos em que se encontra afastado da poça. A Figura 3 ilustra a relação entre a tensão e o movimento do arame.

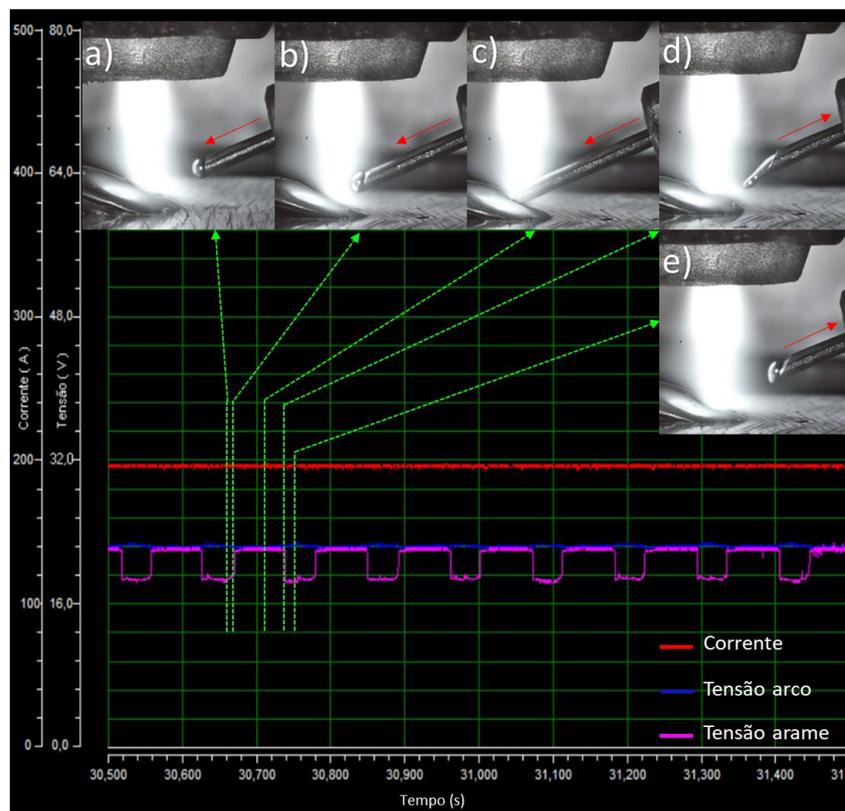


Figura 3. Oscilograma esquemático correlacionando a tensão do arame com o movimento do arame ao longo de um ciclo.

O comportamento da tensão entre o eletrodo e o arame pode ser explicado pelo grau de inserção do arame no arco e na poça. Quando o arame está em contato com a poça, ele faz parte do circuito de soldagem e encontra-se no mesmo potencial que a peça. Por essa razão a tensão entre o arame e eletrodo assume valores próximos à tensão do arco. Por mais que haja a ponte metálica e o arame esteja imerso na poça de fusão, a distância entre eletrodo e o arame é menor que o comprimento do arco entre eletrodo e peça/poça. Logo, os valores de tensão entre arame e eletrodo são ligeiramente inferiores à tensão do arco. Por outro lado, quando o arame não está mais em contato com a poça e se afasta da mesma, ele deixa de fazer parte do circuito principal de soldagem, caracterizando um queda na tensão entre eletrodo e arame. Embora arame seja recuado, visivelmente, para fora do arco, os valores de tensão entre arame e eletrodo medidos foram da ordem de 18 V. Segundo Vilarinho [29], além da região visível do arco elétrico, onde ocorre a saturação iônica, existem outras duas regiões mais afastadas não visíveis a olho nu, a região de saturação eletrônica e a região de condição flutuante. A região de saturação eletrônica demonstra a posição mais afastada do centro do arco onde existem elétrons disponíveis, mas não suficientes para proporcionar emissão de radiação luminosa significativa. Nesta região de saturação eletrônica ainda há corrente sendo carregada, visto que os elétrons são responsáveis por cerca de 97% do total de corrente. A zona flutuante é caracterizada pela região onde há influência do campo eletromagnético gerada pelo arco, e corresponde à região mais externa do arco elétrico. Pelos resultados encontrados, a hipótese é que o arame, quando afastado da poça, encontra-se na região de saturação eletrônica, visto que a tensão é diferente de zero.

Nos ensaios, o afastamento máximo do arame em relação ao centro foi da ordem de 4 mm. A Figura 4 contém o oscilograma referente a soldagem com alimentação dinâmica com frequência de 3 Hz.

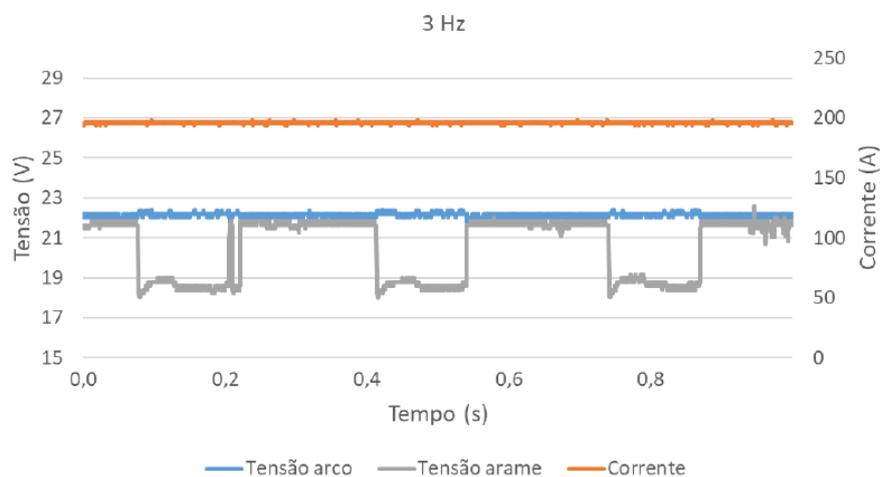


Figura 4. Oscilograma de corrente e tensão da soldagem com alimentação dinâmica de arame com frequência de 3 Hz.

No oscilograma com alimentação dinâmica fica evidente a variação de tensão do arame ao longo do processo, no caso da soldagem com 3 Hz de frequência é possível verificar que no tempo de 1 segundo houve 3 ciclos de entrada e saída do arame na poça de fusão, ilustrado na Figura 4. A tensão média do arame, considerando os valores obtidos dentro e fora da poça, foi de 20,5 V. A tensão do arco se mantém constante nos momentos em que o arame está em contato com a poça e apresenta alguma perturbação e valores ligeiramente superiores nos momentos em que o arame se afasta da poça, obtendo valor médio de 22,5 V, como pode ser observado na Figura 4. A corrente elétrica do processo se manteve estável com valor médio de 196 A. Analisando a aquisição completa foi possível constatar que o processo se manteve estável, entregando a frequência configurada no MAD. A Figura 5 mostra, representativamente, os resultados oscilográficos para a frequência de 6 Hz e 15 Hz, sendo que o padrão de comportamento oscilográfico se repetiu para as demais frequências.

De maneira geral, é possível constatar que os oscilogramas de tensão podem ser usados como indicadores de estabilidade do processo. A partir das aquisições dos sinais elétricos as médias de tensão, corrente e potência foram calculadas para todas as configurações estudadas e o resultado pode ser visto na Tabela 6.

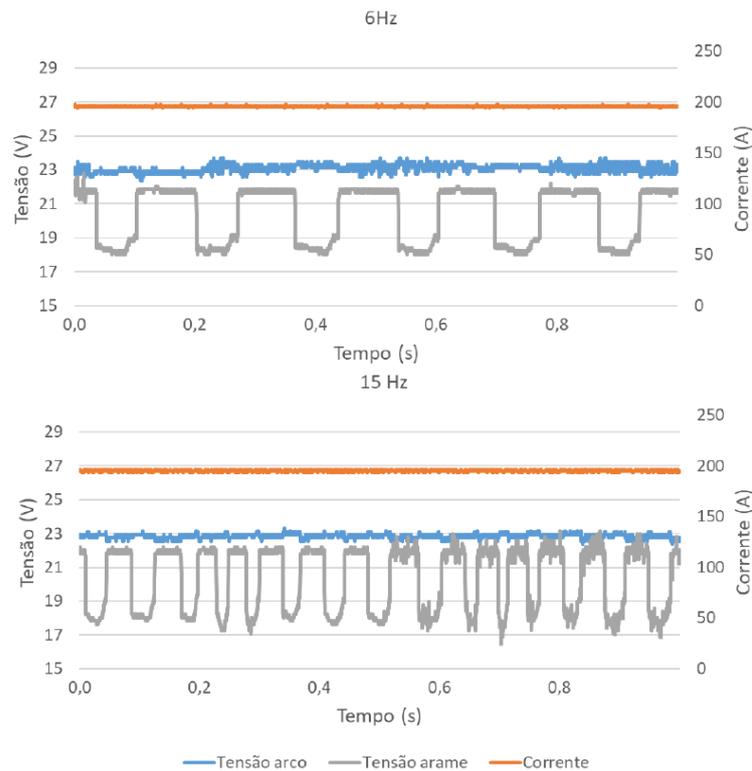


Figura 5. Oscilograma de corrente e tensão da soldagem com alimentação dinâmica de arame com frequência de 6 Hz e 15 Hz.

De maneira geral, é possível constatar que os oscilogramas de tensão podem ser usados como indicadores de estabilidade do processo. A partir das aquisições dos sinais elétricos as médias de tensão, corrente e potência foram calculadas para todas as configurações estudadas e o resultado pode ser visto na Tabela 6.

Tabela 6. Média das aquisições elétricas, tensão do arco, tensão arco-aramé, corrente e potência para todas as frequências estudadas.

Médias aquisições SAP						
	0 Hz	3Hz	6 Hz	9 Hz	12 Hz	15 Hz
Tensão arco (V)	22,5	22,5	22,9	22,9	23,1	23,1
Tensão arame (V)	21,4	20,5	20,6	20,5	20,4	20,5
Diferença tensão (V)	1,1	2,0	2,3	2,4	2,7	2,6
Corrente (A)	196	196	196	196	195	195
Potência (W)	4425	4424	4494	4467	4525	4513

3.2 Análise geométrica

O estudo da geometria dos cordões soldados começou pela análise visual, com o objetivo de avaliar a repetibilidade dos cordões, a qualidade da superfície dos cordões, e identificar a presença de alguma possível irregularidade geométrica ou descontinuidade do cordão. Todos os três cordões soldados para cada frequência foram visualmente semelhantes quanto à largura, altura e apresentaram bordas homogêneas e retilíneas, demonstrando, de maneira geral, uma repetibilidade do processo para todas as condições. Além disso, todos os ensaios resultaram em cordões íntegros, apresentando uma homogeneidade de deposição ao longo do cordão e ausência de defeitos, como porosidade e humping, por exemplo (Figura 6).



Figura 6. Resultado visual, vista superior, dos cordões soldados para as diferentes frequências de alimentação de arame.

Após a análise visual da face dos cordões, os mesmos foram seccionados transversalmente, com o objetivo de realizar as medições de geometria dos cordões, como altura, largura, área e diluição. Para isso, após os cortes as amostras foram lixadas, polidas e receberam ataque químico para posteriormente serem fotografadas. A Figura 7 apresenta os cordões seccionados no início, meio e final para todas as frequências estudadas.

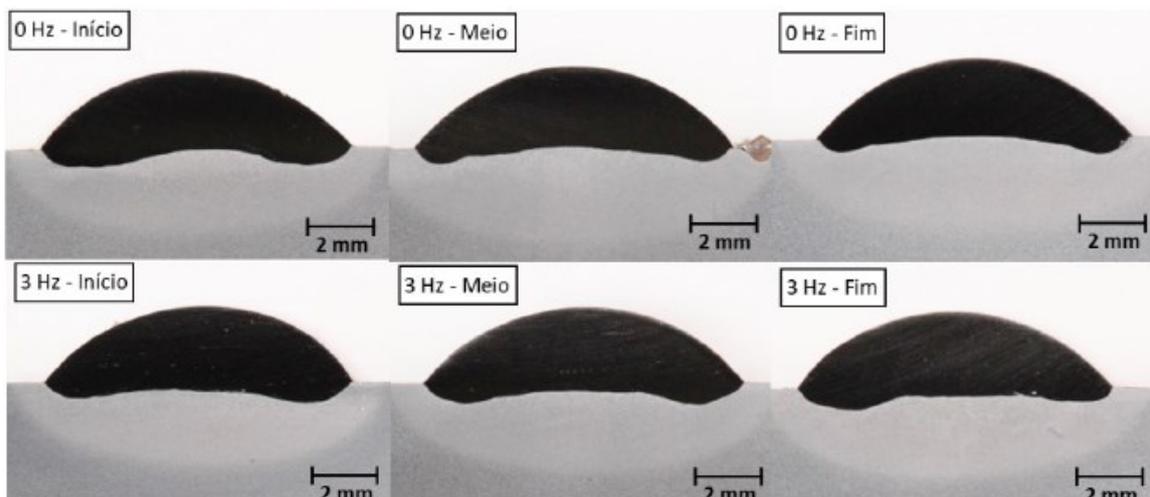


Figura 7. Resultados do corte transversal dos cordões para as diferentes frequências de alimentação (cont.)



Figura 7. Resultados do corte transversal dos cordões para as diferentes frequências de alimentação

A partir das imagens é possível constatar que na alimentação contínua de arame houve maior penetração nas bordas do cordão, e menor penetração de material no centro. À medida que a alimentação dinâmica foi inserida, em 3 Hz, 6 Hz e 9 Hz o perfil da área diluída tornou-se mais reto porém apresentando ainda acúmulo de material nas bordas, principalmente para soldagem com 9 Hz. Ao analisar a seção transversal dos cordões soldados com 12 Hz e 15 Hz é possível perceber uma penetração mais uniforme de material na área diluída, tanto nas bordas como no centro do cordão, adotando um perfil mais simétrico. Além disso, os cordões realizados com as frequências de 12 Hz e 15 Hz apresentaram reforço com perfil triangular, maior altura e menor largura do que os outros cordões. A Tabela 7 contém os valores médios das grandezas medidas a partir das imagens dos cortes transversais e os valores médios da área da peça obtidos na filmagem de alta velocidade.

Tabela 7. Valores médios de altura, largura, área total, área diluída e diluição para todas as frequências estudadas

-	0 Hz	3 Hz	6 Hz	9 Hz	12 Hz	15 Hz
Altura (mm)	2,41 ± 0,07	2,35 ± 0,10	2,32 ± 0,14	2,46 ± 0,12	2,6 ± 0,47	2,58 ± 0,34
Largura (mm)	9,43 ± 0,50	9,59 ± 0,32	9,75 ± 0,52	9,62 ± 0,43	9,02 ± 0,74	9,37 ± 0,76
Área fundida total (mm²)	17,88 ± 1,74	19,90 ± 1,13	19,10 ± 1,71	19,61 ± 1,39	19,15 ± 1,30	19,90 ± 0,79
Área penetração (mm²)	1,98 ± 1,00	3,86 ± 0,50	3,33 ± 1,41	3,13 ± 0,72	3,14 ± 0,50	3,29 ± 1,07
Diluição (%)	11,00 ± 4,48	19,41 ± 1,96	17,31 ± 6,19	15,94 ± 2,99	16,40 ± 2,54	16,52 ± 5,13

A alimentação contínua de arame e em frequências até 9 Hz apresentaram uma largura de cordão maior quando comparado com as frequências mais altas, 12 Hz e 15 Hz. Por outro lado, a altura dos cordões soldados com as duas frequências mais altas foram ligeiramente superiores às encontradas na alimentação contínua de arame. Estes resultados de geometria triangular para elevadas frequências e de maior homogeneidade na área diluída corroboram com os resultados geométricos obtidos por Riffel et al. [10] na soldagem com alimentação dinâmica em frequência de 18 Hz no processo TIG. Se analisarmos a potência dos processos (Tabela 6), os resultados obtidos são o oposto do esperado, pois para maiores potências (12 Hz e 15 Hz) usualmente os cordões apresentariam maior molhabilidade, largura e menor altura. A análise da videografia de alta-velocidade permitiu hipotetizar sobre este efeito. Na alimentação dinâmica, o movimento de retrocesso do arame “puxa” uma porção de metal líquido da poça devido à tensão superficial. Esse movimento para cima faz com que o cordão tenda a ser mais convexo, apresentar menor largura e molhabilidade. Aliado a isso, a intensa movimentação da poça conduz uma porção de metal líquido como uma onda para a parte posterior da poça, subindo a níveis acima do cordão já solidificado. Desta forma, mesmo para valores de potência média mais altos os cordões resultantes da alimentação dinâmica tendem a apresentar altura igual ou superior às obtidas com a alimentação contínua de arame.

Durante a análise da filmagem foi possível observar, como consequência do movimento de avanço e recuo do arame, que há movimentação da poça, ainda que discreta e lenta. A cada ciclo foi possível constatar que uma porção de metal líquido atinge a parte superior da poça durante o movimento, sobressaindo uma parte para cima da altura do cordão já solidificado na região posterior da poça (acima da linha amarela, Figura 8). As Figuras 8 e 9 apresentam, representativamente, o momento em que a poça atinge altura maior que a do cordão já solidificado para a frequência de 3 Hz e 6 Hz, respectivamente. O efeito se repete, com intensidade crescente, para as maiores frequências.

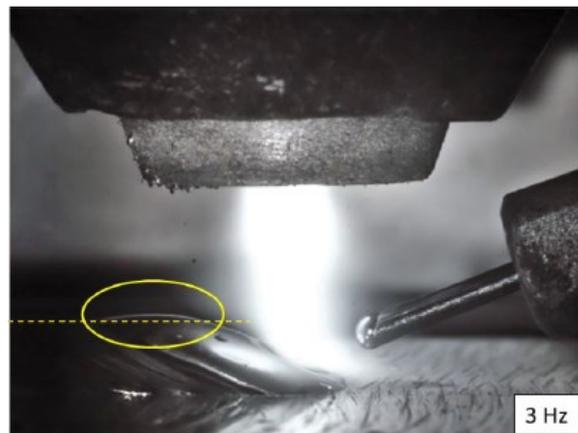


Figura 8. Momento em que uma porção de metal líquido está no topo da poça a uma altura maior que o cordão já solidificado. Soldagem com frequência de 3 Hz. ([Hyperlink para Vídeo](#))



Figura 9. Momento em que uma porção de metal líquido está no topo da poça a uma altura maior que o cordão já solidificado. Soldagem com frequência de 6 Hz. ([Hyperlink para Vídeo](#))

De maneira geral, para aplicações na manufatura aditiva, é desejável a repetibilidade dos cordões ao longo das camadas, com valores de altura e largura com baixo desvio padrão. Pela Tabela 7 é possível constatar que as

soldagens com maiores frequências apresentaram maior desvio padrão, podendo ser prejudicial na construção das paredes, fator que deve ser ponderadamente considerado na avaliação comparativa dos efeitos da alimentação dinâmica. A maior variação de geometria entre os cordões de alta frequência pode estar relacionada à maior agitação da poça.

4. Conclusões

O presente trabalho representa uma contribuição para a caracterização da soldagem plasma com alimentação dinâmica de arame, principalmente aplicada à manufatura aditiva (PAW-DED; PAM), pois estudos acerca deste tema ainda são bastante escassos na literatura. Foram abordados os fenômenos que ocorrem na aplicação da alimentação dinâmica em diferentes frequências e sua influência nas características oscilográficas, elétricas e geométricas dos cordões. Numa avaliação acerca dos resultados obtidos é possível concluir:

- Os oscilogramas de tensão entre o eletrodo e a peça e o eletrodo e o arame podem ser usados como um indicativo de estabilidade em processos TIG e Plasma com alimentação de arame;

- A frequência de alimentação dinâmica de arame influi na tensão e potência médias, sendo que maiores frequências resultam em maiores potências;

- O movimento de oscilação do arame influencia na tensão média do arco, sendo esta superior na alimentação dinâmica quando comparada com alimentação contínua em ponte;

- Mesmo com a potência média e temperatura potencialmente mais elevada, a alimentação dinâmica em altas frequências, como 15 Hz, resultou em cordões mais altos do que aqueles obtidos com alimentação contínua de arame;

- A maior altura dos cordões e paredes resultantes das altas frequências de alimentação dinâmica é justificada pelo movimento da poça ocasionado pela influência hidrodinâmica oscilatória, que foi sobrepujante em relação ao efeito da potência elétrica média;

- Maiores frequências de alimentação dinâmica fomentam maior simetria da seção transversal do cordão.

Trabalhos subsequentes abordarão as influências da alimentação dinâmica sobre paredes construídas por WAAM via PAW, do ponto de vista geométrico, térmico e microestrutural.

5. Agradecimentos

A equipe do LABSOLDA agradece aos financiadores CNPq, CAPES e PETROBRAS.

6. Referências Bibliográficas

- [1] Gnirss, G., Shape welding. The current state of the art in the Federal Republic of Germany. *Welding in the World*, 1987. Vol. 25: p. p. 132-138.
- [2] Marcelo M. Moraes, P.K., Jorge A. V. Echeverria, A fabricação, por soldagem, de boacais para componentes nucleares, in XII Encontro Nacional de Tecnologia da Soldagem. 1986: Campos do Jordão, SP.
- [3] Suyog Jhavar, N.K.J., C.P. Paul, Development of micro-plasma transferred arc (-PTA) wire deposition process for additive layer manufacturing applications. *Journal of Materials Processing Technology* 2014. 214 (2014) 1102–1110.
- [4] Yuehai Feng, B.Z., Jie He, Kehong Wang, The double-wire feed and plasma arc additive manufacturing process for deposition in Cr-Ni stainless steel *Journal of Materials Processing Tech.* , 2018. 259 (2018) 206–215
- [5] Huft, N.J., Investigation of multiple torch paw-based additive manufacturing, in *Metallurgical Engineering*. 2019, Montana Technological University: Butte, MT.
- [6] Iván Tabernero, A.P., Pedro Álvarez, Alfredo Suárez, Study on arc welding processes for high deposition rate additive manufacturing, in 19th CIRP Conference on Electro Physical and Chemical Machining. 2018: Bilbao, Spain.
- [7] Jianjun Lin, Y.L., Yuxin Liu, Zhe Sun, Kaibo Wang, Zhuguo Li, Yixiong Wu, Binshi Xu, Microstructural evolution and mechanical property of Ti-6Al-4V wall deposited by continuous plasma arc additive manufacturing without post heat treatment. *Journal of the mechanical behavior of biomedical materials* 2017. 69 (2017) 19–29.
- [8] PIGOZZO, I.O.E.S., R.H.G.; GALEAZZI, D. et al. , Pulsed dynamic wire feeding with low insertion angle in GTAW process: a metal transfer characterization. *Weld World*, 2022.
- [9] R. H. G. Silva, R.G.N.S., M. B. Schwedersky, G. Dalpiaz, J. C. Dutra, Contributions of the high frequency dynamic wire feeding in the gtaw process for increased robustness. *Soldagem & Inspeção.*, 2019. 2019;24:e2430.
- [10] K. C. Riffel, R.H.G.S., W. Haupt, L. E. Silva, G. Dalpiaz, Effect of dynamic wire in the GTAW

- process: Microstructure and corrosion resistance. *Journal of Materials Processing Technology*, 2020. 285 (2020) 116758.
- [11] Foley, R.P., Microstructural analysis of additively manufactured 308L stainless steel produced by plasma arc welding. 2019, Montana Technological University: Montana, USA. p. 143.
- [12] Rudy, J.F., Development and Application of Dabber Gas Tungsten Arc Welding for Repair of Aircraft Engine, Seal Teeth in Proceedings of the ASME International Gas Turbine Conference and Exhibit. 1982: London.
- [13] Régis Henrique Gonçalves e Silva, L.E.d.S.P., Marcelo Pompermaier Okuyama, and A.B.V. Gustavo Luis de Sousa, Luciano Machado Cirino, Mateus Barancelli Schwedersky, TIG welding process with dynamic feeding: a characterization approach. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology* 2018. 96:4467–4475.
- [14] V. L. Jorge, C.H.A.S., F. M. Scotti, T. R. Larquer, C. P. Mota, R. P. Reis, A. Scotti, Desenvolvimento e Avaliação de Técnicas para Pulsação da Alimentação de Arame em Soldagem a Arco. *Soldagem & Inspeção*, 2018. 2018;23(3):326-339
- [15] M. Santangelo, B.S., A. Purdy, Vibration assisted robotic hot-wire gas tungsten arc welding (gtaw) for additive manufacturing of large metallic parts, in *Solid Freeform Fabrication Symposium – An Additive Manufacturing Conference*. 2016.
- [16] PIGOZZO, I.O., Soldagem TIG Orbital: Otimização de Equipamentos e Prospecções Tecnológicas para Procedimentos de Passe de Raiz, in *Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica*. 2015, Universidade Federal de Santa Catarina. p. 132.
- [17] B. Silwal, M.S., Effect of vibration and hot-wire Gas Tungsten Arc (GTA) on the geometric shape. 2018. 2018;251:138-145. .
- [18] Riffel, K.C., Avanços tecnológicos do processo TIG: técnicas inovadoras de alimentação de arame e procedimentos automatizados como contribuição para a união de tubos internamente cladeados in *Departamento de Engenharia Mecânica*. 2018, Universidade Federal de Santa Catarina.
- [19] R. H. G. Silva, L.E.S.P., C. Marques, K. C. Riffel, M. B. Schwedersky, Performing higher speeds with dynamic feeding gas tungsten arc welding (GTAW) for pipeline applications. *Journal of the Brazilian Society of Mechanical Sciences and Engineering*, 2019. (2019) 41:38.
- [20] V. L. Jorge, F.M.S., R. P. Reis, A. Scotti, The effect of pulsed cold-wire feeding on the performance of spray GMAW. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 2020. (2020) 107:3485–3498.
- [21] 24. N. Neves , M.F.F., C. F. A. Von Dollinger, J. M. K. Assis, H. J. C. Voorwald, Effects of gtaw dynamic wire feeding frequencies on fatigue strength of astm a516-70 steel welded joints. *Journal of Materials Engineering and Performance*, 2022. 1059-9495.
- [22] EWM, EWM tigSpeed TIG cold/hot wire welding, EWM, Editor. p. 36.
- [23] TIPTIG, The welding revolution.
- [24] SYSTEMS, L.A.W., Dabber® Pro • High precision welding system https://www.liburdi.com/docs/welding-services/liburdi-automation/Dabber_Pro.pdf.
- [25] Xingwang Bai, P.C., Jialuo Ding, Xiangman Zhou, Chenglei Diao, Pillipe Bridgeman, Jan roman Hönnige, Haiou Zhang, Stewart Williams, Numerical analysis of heat transfer and fluid flow in multilayer deposition of paw-based wire and arcadditive manufacturing. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 2018. 124.
- [26] Jianjun Lin, D.G., Yaohui Lv, Yuxin Liu, Xiaoyu Wu, Bin Xu, Gang Xu, Binshi Xu, Heterogeneous microstructure evolution in Ti-6Al-4V alloy thin-wall components deposited by plasma arc additive manufacturing. *Materials and Design*, 2018. 157 (2018) 200–210
- [27] F. Martinaa, J.M., S.W. Williams, P. Colegrove, F. Wang, Investigation of the benefits of plasma deposition for the additive layer manufacture of Ti-6Al-4V. *Journal of Materials Processing Technology* 2012. 212 (2012) 1377–1386.
- [28] Xu, F.-J., Lü, Y.-H., Xu, B.-S., Liu, Y.-X., Shu, F.-Y., He, P., Study on process of rapid prototyping based on pulsed plasma arc welding. *Material Science and Technology*, 2012. 20 (3), pp. 89-93
- [29] Vilarinho, L.O., As Dimensões do Arco Elétrico. *Soldagem & Inspeção*, 2009. Vol. 14 p. p.271-275.