





Desenvolvimento de um Modelo para Parametrização do Processo GMAW-P Aplicado a Manufatura Aditiva por Deposição a Arco

Fagner Guilherme Ferreira Coelho¹ , Alexandre Queiroz Bracarense² , Eduardo José Lima II¹ , Ariel Rodriguez Arias¹ 

¹Universidade Federal de Minas Gerais, Departamento de Engenharia Mecânica, Belo Horizonte, MG, Brasil.

²MBWelWorks, Belo Horizonte, MG, Brasil.

Como citar: Coelho FGF, Bracarense AQ, Lima II EJ, Arias AR. Desenvolvimento de um modelo para parametrização do processo GMAW-P aplicado a manufatura aditiva por deposição a arco. Soldagem & Inspeção. 2024;29:e2909. <https://doi.org/10.1590/0104-9224/SI29.09>

Resumo: A fabricação de peças pelo processo de Manufatura Aditiva por Deposição a Arco (MADA) tem como característica o uso de fontes de soldagem aplicadas em GMAW, GTAW e PAW. O controle dos parâmetros durante a construção das peças é fundamental para contribuir com a redução do aporte térmico, possibilitando assim a aplicação de uma técnica para controlar o calor imposto sobre a deposição das camadas. O monitoramento do processo consiste em detectar variações no processo durante as deposições das camadas e vários são os recursos utilizados, tais como: emissão acústica, sistemas de visão computacional, sensores para coletar informações quanto à radiação térmica e/ou temperatura da peça, além da captura de informações quanto às variáveis elétricas. O objetivo deste trabalho é apresentar uma metodologia para o controle dos parâmetros durante a deposição das camadas de modo a atuar no equipamento por meio de um algoritmo de controle e um sistema de aquisição de dados, atuando no processo. Um estudo da influência dos parâmetros sobre a geometria e estabilidade de arco é apresentado. Um planejamento experimental baseado na técnica de Projeto Robusto foi aplicado para viabilizar o número de experimentos. Os resultados sugerem o efeito benéfico da duração do ciclo sobre a estabilidade do arco, comportamento da poça de fusão e geometria final.

Palavras-chave: MADA; Controle de processo; GMAW-P; Automatização.

Development of a Model for Parametrization of the GMAW-P Process Applied to Wire Arc Additive Manufacturing

Abstract: Manufacturing parts using the Wire Arc Additive Manufacturing (WAAM) process is characterized by the use of welding sources applied in GMAW, GTAW, and PAW. The control of the parameters during manufacturing is fundamental to contribute to the reduction of the heat input, thus making it possible to apply a technique to control the heat imposed on the deposition of the layers. The process monitoring consists in detecting variations in the process during layers' deposition, using a variety of resources, such as: acoustic emission, computer vision systems, sensors to collect information on thermal radiation and/or temperature of the part, in addition to capturing information on electrical variables. The objective of this work is to present a methodology for controlling the parameters during deposition of the layers in order to command the equipment with a control algorithm and a data acquisition system, acting on the process. A study of the influence of the parameters on arc geometry and stability is presented. An experimental design based on the Robust Design technique was applied to make the number of experiments feasible. The results suggest the beneficial effect of cycle length on arc stability, melt pool behavior and the final geometry.

Key-words: WAAM; Process control; GMAW-P; Automation.

1. Introdução

A Manufatura Aditiva (MA) metálica baseada no processo a arco elétrico (MADA) [1] proporciona elevada produtividade de acordo com a eficiência energética e ampla abrangência em relação à quantidade de material depositado [2], como é o caso do GMAW (*Gas Metal Arc Welding*), GTAW (*Gas Tungsten Arc Welding*) e PAW (*Plasma Arc Welding*). Estes processos são facilmente aplicados com manipuladores robóticos que garantem a precisão exigida na fabricação e que apresentam crescente contribuição nos estudos das diversas técnicas nos campos da engenharia. A metodologia de fabricação proposta pela MA, que possibilita otimizar o tempo e custo de produção, aliado à redução de desperdício de material, torna-o de interesse para o meio científico e industrial. Porém, para um melhor controle do resultado esperado, estudos exaustivos devem ser realizados com o objetivo de obter a melhor parametrização que influencia principalmente a geometria da camada depositada, que é também uma das principais e mais importantes características do produto obtido pela adição de material.

Recebido: 08 Mar., 2023. Aceito: 23 Abr., 2024.

E-mails: fgfcoelho@yahoo.com.br (FGFC), bracarense@mbweldworks.com (AQB), ejlima2@gmail.com (EJL2), arielra2506@gmail.com (ARA)



Este é um artigo publicado em acesso aberto (Open Access) sob a licença Creative Commons Attribution, que permite uso, distribuição e reprodução em qualquer meio, sem restrições desde que o trabalho original seja corretamente citado.

O uso do processo GMAW-P (*Pulsed Gas Metal Arc Welding*) na fabricação de peças por MADA, só se tornou uma possibilidade devido ao avanço dos controles de trajetória dos mecanismos manipuladores da fonte térmica. Porém, devido à complexidade paramétrica que envolve o processo de soldagem a arco, se faz necessário verificar como os parâmetros envolvidos no processo influenciam a forma e a qualidade da deposição de cada camada. Só com esse tipo de conhecimento será possível estabelecer a previsibilidade e o controle na fabricação de componentes utilizando MADA [3].

A aplicabilidade desta técnica se deve à combinação de vantagens, tais como: taxa de deposição, eficiência energética e de uso do material [4]. Porém, com as deposições das camadas, a parede ganha altura e a dissipação de calor para o substrato é retardada gradualmente devido ao aumento da resistência térmica condutora até o metal de base, de modo que uma quantidade crescente de calor é dissipada para o ambiente por convecção natural, sendo este mecanismo menos eficaz que a condução direta, que reduz a velocidade de solidificação da poça de fusão e resulta em uma variação da geometria da camada [5].

O estudo do controle da transferência metálica vem ganhando cada vez mais estudos na aplicação da Manufatura Aditiva por Deposição a Arco (MADA), seja por meio do curto-circuito controlado (STT – *Surface Tension Transfer*; CMT – *Cold Metal Transfer*; RMD – *Regulated Metal Deposition*; etc.), que apresenta como vantagens o controle de deposição do metal de adição, melhor acabamento do cordão de solda, maior produtividade, maior controle do aporte de calor e menor quantidade de respingos [6]. Assim como na transferência metálica em voo livre, como por exemplo no Pulsado, objeto de estudo deste trabalho, é necessário o uso de um *software* para garantir o controle do processo.

O calor imposto pelo processo MADA produz complexos ciclos térmicos resultando em vários problemas, incluindo mudanças microestruturais, tensões térmicas e residuais que podem causar deformações e distorções. Desta forma, o controle dos parâmetros do processo influencia os efeitos térmicos e no resultado da peça produzida. A irregularidade geométrica obtida no perfil da seção transversal de uma parede multicamadas de único passe produzida por processo a arco, como apresentado na Figura 1, pode promover acúmulo excessivo de material nas camadas superiores e promover o transbordamento deste [5]. Este fenômeno tem como causa a redução da taxa de transferência de calor por condução durante o processo, o que promove um aporte de calor na região superior da parede, fazendo esta porção de metal fundido ter um tempo de solidificação maior.



Figura 1. Irregularidade geométrica.

As variações na geometria das camadas depositadas estão relacionadas com as mudanças do regime de fluxo de calor, que podem ter como causas: 1 - variações na intensidade da fonte de calor (alterações do comprimento do arco elétrico ou no aporte térmico); 2 - mudanças geométricas que promovem bordas ou espessuras irregulares e perturbam o estado quase-estático do fluxo de calor; 3 - presença de outros elementos secundários na poça de fusão [7]. O aporte de calor ideal pode resultar em melhores propriedades microestruturais e mecânicas da peça, assim como a precisão geométrica das camadas. A poça de fusão obtém tempo mínimo para se espalhar e, portanto, a proporção entre largura e altura pode ser menor com a redução do aporte térmico [5]. A correta seleção dos parâmetros do processo pulsado deve garantir a estabilidade do arco, determinar a quantidade e diâmetro das gotas transferidas e o aporte térmico. O controle sinérgico, seja em malha aberta ou fechada, se torna essencial para garantir a gestão das variáveis do processo, que de uma certa forma são interdependentes. O volume de metal depositado por comprimento é um dos principais fatores causadores da instabilidade da camada depositada no processo pulsado [8].

Para a MADA, o processo necessita ser controlado para minimizar os níveis de calor imposto. Com isso, o uso da transferência pulsada se fundamenta na metodologia da antecipação de pulsos de corrente para transferir as gotas antes que estas toquem a peça e promovam o curto-circuito. Com isso, evita-se intensos surtos de corrente e tende-se a manter o arco com uma pressão razoavelmente homogênea sobre a poça de metal líquido, o que permite um processo mais estável obtido

pelo comportamento regular da corrente em dois patamares, um inferior ao valor da corrente de transição e outro superior. A condição de transferência de Uma Gota Por Pulso (UGPP), para uma determinada combinação de materiais e gás de proteção, é obtida para combinações de parâmetros de pulso que seguem a relação apresentada na Equação 1, que relaciona o fator de destacamento da gota. Esta equação representa proporcionalmente a energia despendida no processo [9].

$$I_p^n * T_p = D \tag{1}$$

A necessidade de selecionar corretamente os parâmetros do processo, monitorar e controlar a deposição e geometria das camadas tem como finalidade aumentar a qualidade e garantir a eficiência do processo. Com isso, surge a necessidade de correlacionar as variáveis do processo e as características geométricas da camada obtida, permitindo assim otimizar a confecção da peça. Uma metodologia utilizada para controlar o acúmulo de calor com o uso do processo híbrido micro plasma com eletrodo duplo (DE-MPAW), em que foi desenvolvido um sistema de controle em tempo real para otimizar e estabilizar o processo de deposição através da alteração auto adaptativa da velocidade de alimentação do fio e da distância de afastamento da tocha [10]. Estudos de controle do processo robotizado, por meio de um sistema SMD (*Shaped Metal Deposition*), com o processo (TIG) para prototipagem rápida, em que foi implementada uma configuração experimental de um sistema automático, com uso de diferentes tipos de sensores, tais como: câmera de soldagem que permite coletar imagens em alta velocidade, sensores infravermelho e um microfone, além do desenvolvimento de uma interface dedicada [11].

A MADA recentemente tem se mostrado como uma opção para fabricação de peças para uso em aplicações industriais, principalmente itens que apresentam complexidade de produção. Porém, a Manufatura Aditiva por Deposição a Arco necessita de maiores contribuições quanto a definição de parâmetros e sensoriamento do processo, a fim de alcançar o controle do mesmo e obter perfis mais homogêneos das sucessivas camadas depositadas, o que visa minimizar desperdício de matéria-prima em possíveis etapas de pós-processamento por usinagem.

O sistema aqui desenvolvido e apresentado não visa competir com as tecnologias já consolidada e utilizadas por diversos fabricantes de fontes de soldagem, tais como: RMD, CMT e STT, por exemplo, mas permitir que um novo método de monitoramento e controle possa ser utilizado em equipamentos convencionais.

2. Materiais e Métodos

Na realização deste trabalho, utilizou-se a fonte INVERSAL 300 da IMC. No modo pulsado, os parâmetros ajustados são: Corrente de pulso (I_p), Corrente de base (I_b), Tempo de pulso (T_p), Tempo de base (T_b) e Velocidade de arame (V_a). Uma câmera de alta velocidade *Phantom Miro LAB110* foi utilizada para capturar imagens, verificar o modo de destacamento e avaliar o diâmetro das gotas. O equipamento disponibiliza sinais de corrente e tensão para medição/realimentação, importante para otimização dos parâmetros. Utilizou-se arame ER70S6 de aço com 0,9 mm de diâmetro. Como material de base/substrato utilizou-se uma chapa de aço carbono com 12,7 mm de espessura. Para a manipulação da tocha, foi utilizado o robô industrial SK-6 da Yaskawa Motoman, com seis graus de liberdade, com objetivo de manter regularidade nos movimentos. As demais variáveis estão apresentadas na Tabela 1.

Tabela 1. Variáveis do processo de deposição das camadas.

Parâmetro	Valor ou descrição
Polaridade	Corrente Contínua polaridade reversa
Velocidade de deslocamento	18 cm/min
Distância entre o Bico de Contato e a Peça (DBCP)	16 mm
Orientação da tocha	90°
Posição de deposição	Plana
Gás de Proteção	90% Ar; 8% CO ₂ e 2% O ₂ com vazão de 16 L/min

O gás de proteção com a mistura ternária permite operar em regime de transferência metálica goticular, tendo permitido operar com uma faixa maior de tensão e avaliar as interferências desta na corrente pulsada.

Foram construídas paredes lineares com 250 mm de comprimento, com o objetivo de depositar 50 camadas, e foram comparados os perfis geométricos obtidos com os parâmetros estabelecidos no processo pulsado. Para se obter uma superfície mais uniforme em geometrias mais complexas o uso de múltiplos passes é necessário, sendo que nestes casos estes podem ser depositados de modo que a falta de material seja compensada pela sobreposição das camadas. O modo utilizado para a deposição do material foi o *raster*, ou seja, iniciando a abertura do arco sempre no mesmo ponto e direcionando ao final da geometria. Porém a difusão de calor da poça fundida piora à medida que a altura de depósito aumenta, sendo importante então alterar os parâmetros, de modo que a condição térmica possa ser significativamente melhorada.

Uma placa de aquisição de dados (DAQ), com entradas e saídas analógicas e digitais, além de conversores digitais/analógicos (D/A) e analógicos/digitais (A/D), foi utilizada para fazer o controle e monitoramento do equipamento. O *software* atualiza o valor da saída A/D da DAQ que corresponde ao valor corrente elétrica, enviando para a fonte o valor a ser utilizado durante o processo. No modo de corrente pulsada, durante a calibração, o valor de 1 V correspondeu a 100 A, para uma forma de onda de corrente com 400 A de pulso, e $T_p = 3,6$ ms, 50 A de base e $T_b = 12$ ms. Com isso a DAQ deve atualizar o valor do D/A em 4 V, que corresponde aos 400 A de pulso por 3.6 ms, passando posteriormente para 0,5 V que remete ao valor da corrente de base por 12 ms e assim sucessivamente.

Os sinais digitais da DAQ foram utilizados para acionar outros sinais da máquina, tais como a vazão do gás, o avanço do arame e habilitar a potência. Caso se queira usar o disparo da tocha não é necessário usar esses sinais, ou seja, esses sinais somente são usados quando se necessita um controle mais apurado de todo o processo.

O programa desenvolvido para controlar a fonte permite trabalhar com uma interrupção de 10 kHz para malha de controle, ou mesmo gerar formas de ondas com resolução de 0.1 ms. Como exemplo, para gerar um sinal quadrado, por exemplo com $I_p = 240$ A, $T_p = 4,1$ ms, $I_b = 40$ A, $T_b = 13,8$ ms, dentro do procedimento chamado pela interrupção de 10 kHz, a DAQ envia à saída analógica o valor de 4,68 V que corresponde a 240 A mantidos durante 40 interrupções e após este tempo o valor é atualizado para 0,78 V que representa 40 A, por 138 interrupções, repetindo-se esse processo. Durante a interrupção são lidas a corrente e tensão de saída da fonte, as quais podem ser utilizados para modificar a forma de onda, frequência ou amplitude.

O planejamento experimental foi adotado para auxiliar nos testes a partir de dois objetivos: obter o controle sobre as variáveis de respostas e determinar as condições ideais para a sua aplicação. Após definidos os fatores que apresentaram condições favoráveis para o processo, seus níveis foram fixados e se encontram na Tabela 2, o tempo e a corrente de pulso foram mantidos constantes em 4 ms e 240 A, respectivamente, enquanto o tempo de base oscilou de acordo com o *Duty Cycle* utilizado, para garantir o modo de transferência pulsada.

Tabela 2. Níveis inferiores e superiores dos fatores.

Fator	Unidade	Nível Inferior	Nível Superior
Corrente de base (I_b)	(A)	55	89
Tempo de base (T_b)	(ms)	10,0	39,8
Tensão de Referência (U_{ref})	(V)	20,5	26,0

Para definir os valores utilizados no experimento, o valor da tensão foi alterado progressivamente até atingir o modo de transferência pulsada. A partir daí foi utilizada a câmera de alta velocidade em conjunto com o oscilograma para garantir tal condição. Os ajustes do valor da tensão remetem ao aumento do comprimento do arco elétrico e uma vez que ocorre a manutenção deste valor, a velocidade do arame também é alterada, o que acarreta elevação da taxa de fusão do arame. Com um comprimento de arco grande, promove-se uma tensão média elevada, o que necessita de maior volume depositado por comprimento para que a camada permaneça homogênea.

O resultado estabeleceu os parâmetros a serem utilizados, com base em camadas contínuas e homogêneas ao longo de suas extensões e estes estão apresentados na Tabela 3. O valor de tensão como referência ao comprimento do arco, " U_{ref} " tende a controlar automaticamente a velocidade de alimentação do arame por meio de um circuito interno da máquina, de acordo com o desenvolvimento do processo, sendo que se o arco diminuir, ocorre uma redução na tensão do mesmo e com base na diferença entre as tensões, do arco e de referência " U_{ref} ", ocorre um aumento na frequência de pulsos. Estas variações apontam para as características dinâmicas da máquina e sua capacidade em promover alterações em intervalos de tempo muito curtos, na ordem de 10^{-3} s. Com este procedimento, foram obtidas as velocidades de alimentação do arame, que estão apresentadas na mesma tabela e que foram utilizadas para parametrizar uma macro desenvolvida no Excel® e que será apresentada posteriormente.

Para a análise neste trabalho a razão entre as velocidades de alimentação e de deslocamento da tocha foi considerada constante, de modo a manter estável o equilíbrio dinâmico, o que evita malformação das camadas. O sucesso no uso da MADA, proposto para esta pesquisa, necessita trabalhar com uma ampla faixa de valores dos parâmetros de modo que permita o controle da taxa de deposição de material e garanta a geometria desejada, a partir do tamanho e a forma da poça de fusão que são características essenciais para controle do processo.

2.1. Interface com a fonte

Esta seção visa apresentar a proposta de controle das variáveis da fonte de soldagem ao utilizar a interface dos dados através da porta serial DB-25 da máquina, para monitorar e avaliar a geração dos sinais pulsados do processo GMAW-P, de acordo com a necessidade de variação dos parâmetros do processo de modo a alterar os aportes térmicos (entrada) e obter características pré-definidas das geometrias das camadas depositadas (saída) e o arquétipo do controle está apresentado na Figura 2. Os parâmetros pulsados gerados via Macro do Excel® são enviados e monitorados, de modo que possíveis correções são realizadas pelo algoritmo de controle e DAQ utilizados.

Tabela 3. Parâmetros utilizados nos procedimentos experimentais.

Amostra	Ib (A)	Tb (ms)	Uref (V)	Im (A)	Va (m/min) Média
1	89,0	11,0	26,	130,0	5,2
2	85,0	10,0	26,0	130,1	5,2
3	85,3	11,9	25,0	124,9	5,0
4	84,0	11,5	25,0	125,0	5,0
5	80,0	12,3	25,0	120,0	4,8
6	81,0	12,6	25,0	120,0	4,8
7	77,0	13,4	24,5	115,2	4,6
8	76,0	13,1	24,5	115,1	4,6
9	75,0	15,2	24,0	110,1	4,4
10	71,0	13,6	24,0	110,1	4,4
11	73,0	17,3	23,5	105,0	4,2
12	67,0	14,6	23,5	104,9	4,2
13	70,0	19,1	23,0	100,0	4,0
14	63,0	15,3	23,0	100,4	4,0
15	68,0	22,0	22,5	95,0	3,8
16	59,0	16,5	22,5	95,0	3,8
17	67,0	26,7	22,0	90,0	3,6
18	55,0	17,6	22,2	90,0	3,6
19	58,0	39,8	20,5	75,0	3,0
20	61,0	34,5	21,0	80,0	3,2
21	64,0	30,2	21,5	85,0	3,4

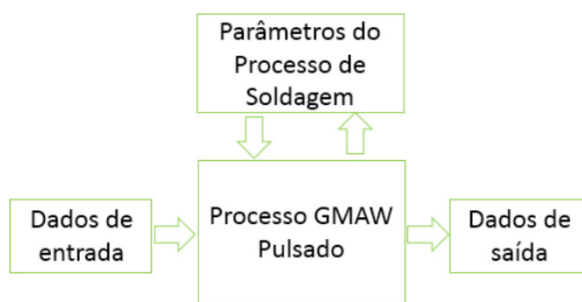


Figura 2. Modelo proposto para o controle do processo.

Para a correta calibração da placa de aquisição de dados foi realizada a instrumentação com um gerador de sinais, a DAQ, um osciloscópio, multímetro e o algoritmo, onde foram criadas funções para as conversões dos valores analógicos, tanto para as entradas quanto para as saídas. O fabricante da DAQ possui SDK (*Software Development Kit*) para aplicação em MATLAB®.

Desse modo é possível comunicar com a máquina de solda e obter variáveis do processo, além de unificar toda a sua aplicação com base na programação com MATLAB®, de modo a padronizar todo o algoritmo e hardware utilizado. A escolha deste permite desenvolver interrupções a altas frequências para a malha de controle e até mesmo gerar formas de ondas com resoluções de 0,1 ms e os valores de corrente e tensão de saída da fonte são lidos, podendo ser utilizados para modificar a forma de onda fechando a malha.

Para os testes em bancada, foi utilizado um gerador de funções para produzir sinais nas entradas analógicas da DAQ e com um osciloscópio foi possível fazer a leitura destes dados. Após esta etapa, a DAQ e o sistema monitoramento de processos de soldagem SAP V4® da IMC foram montados paralelamente na fonte de soldagem para validação quanto aos sinais instantâneos do processo, como tensão, corrente e velocidade de alimentação do arame. Uma comparação entre as informações coletadas pela DAQ foi realizada utilizando um *software* denominado SINAL® para processar os sinais de tensão e corrente de soldagem, o qual apresentou comportamento semelhante na análise dos dados, conforme apresentado na Figura 3 e na Figura 4.

Os valores obtidos pelo sistema de monitoramento SAP V4® são extraídos sinais através de sensor *hall* para a corrente e cabos que estão conectados aos polos da máquina para a medição da tensão, enquanto que para a DAQ há uma interface direta com o circuito da máquina.

Para utilizar o algoritmo desenvolvido é importante entender a necessidade de gerar a rotina com os parâmetros a serem alterados durante o processo de deposição das camadas. O Microsoft Excel® foi utilizado como um gerador de matrizes e cada valor é atribuído uma função para enviar o sinal respectivo de tensão para as saídas analógicas da DAQ para o comando da

corrente e velocidade de arame. Baseado em incrementos de tempos definidos para os valores de I_p , T_p , I_b , T_b , em determinados instantes, as sub-rotinas, que formam uma “palavra” que apresenta diferentes parâmetros do processo e um visualizador permite identificar o comportamento dos sinais antes de serem utilizados.

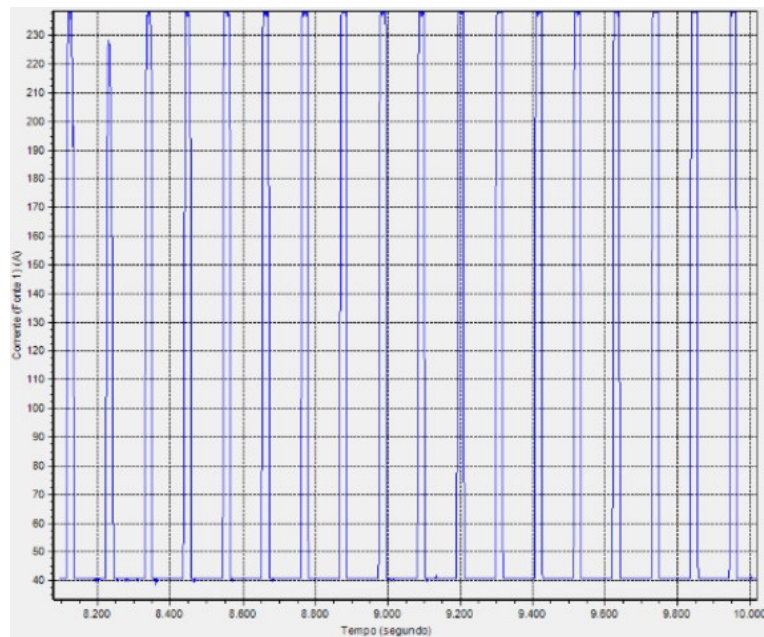


Figura 3. Comparativos dos dados lidos do processo: Sinais obtidos via SAP V4® e analisados no SINAL®.

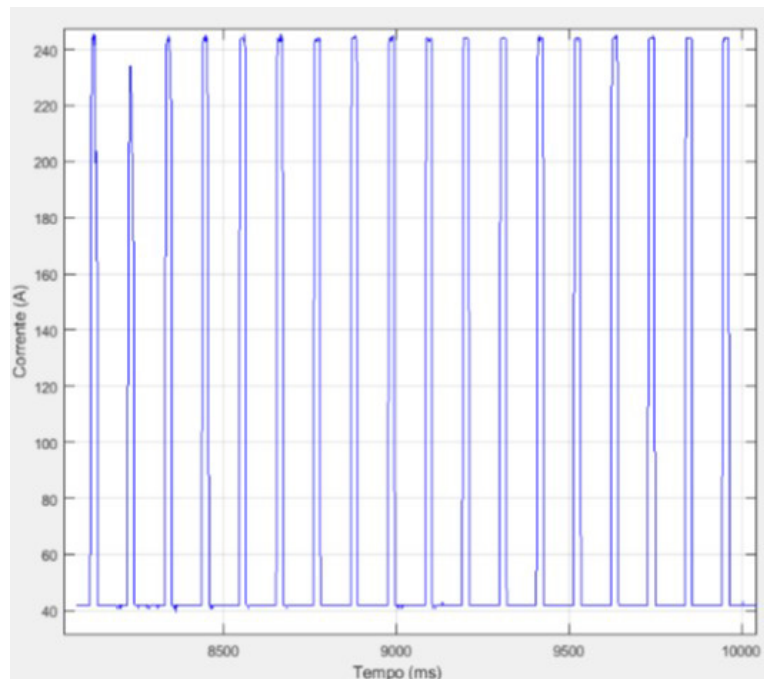


Figura 4. Comparativos dos dados lidos do processo: Sinais obtidos via DAQ e analisados no MATLAB®.

Para o uso da DAQ foram consideradas apenas a corrente e velocidade de arame sendo implementado o algoritmo no MATLAB®. Como os sinais de processo interpretados pela fonte ocorre por valores analógicos, o modelamento destes se fez necessário e este foi gerado por um *script* no Microsoft Excel®, que criou sub-rotinas com dados dos parâmetros a serem utilizados. O planejamento dos valores e outras funções como exportação da rotina, que serão utilizadas pelo algoritmo desenvolvido no MATLAB®, está representado na Figura 5. Com isso, a leitura da matriz de dados cria os respectivos vetores para valores de corrente pulsada e velocidade de alimentação do arame e envia seus valores para as respectivas saídas da DAQ, para que possa comandar o processo com uso de uma função de tempo para que não houvesse perda de sinal.

SubRotina	ms	ms	ms	A	A	ms	ms	m/min
SubRotina	Tduracao	Tpico	Tbase	Cpico	Cbase	TP-Arame	TB-Arame	VP-Arame
A	450	1	2	240	80	1	2	4,8
B	800	4	4	240	71	4	4	4,7
C	1600	4	16	240	63	4	16	4,4
D	2200	4	18	240	55	4	18	3,9
E	2500	4	21	240	48	4	21	3,7
F	2800	4	24	240	41	4	24	3,3
G	3300	4	29	240	34	4	29	2,4
H	3900	4	35	240	28	4	35	2
I	4900	4	45	240	22	4	45	1,7
J	5200	4	61	240	16	4	61	1,4

Figura 5. Parametrização Excel®.

Para uma duração de deposição de 26,7 segundos, por camada, cada sub-rotina foi executada um determinado número de vezes como apresentado na coluna “Tduracao”, conforme a Figura 5, ou seja, por exemplo, para a sub-rotina D que tem um período (Tp+Tb) de 22 ms, sua duração é de 2,2 segundos o que indica que esta será executada 100 vezes. Cada instrução possui um múltiplo inteiro da fase e a soma destas tem que resultar na extensão do processo. A escala de tempo está associada a cada sub-rotina.

Por fim, a Figura 6 e a Figura 7 representam os sinais enviados para a máquina de solda durante o processo e diz respeito à realização de apenas um ciclo por subprograma, com o objetivo de facilitar a visualização dos dados interpretados pelo MATLAB® e enviados para a DAQ e consequentemente para a máquina. A saída analógica da placa de interface atualiza os valores da saída correspondente ao valor da corrente, de modo que a interface possa atuar na fonte e esta interpreta os sinais analógicos para atuar na corrente, sendo necessário o envio de valores de tensão de 0 a 5 V que corresponde de 0 a 300 A, da mesma forma para o controle da velocidade de arame que vai de 0 a 5 V, representando de 0 a 10 m/min.

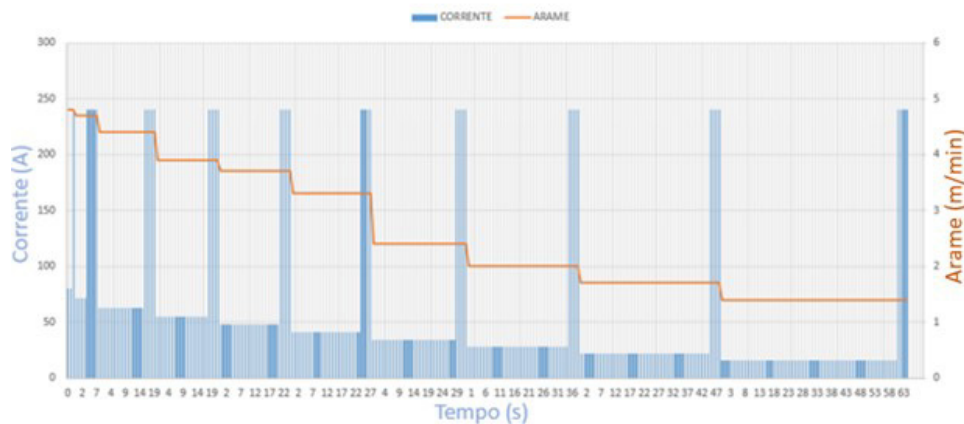


Figura 6. Visualizador Excel®.

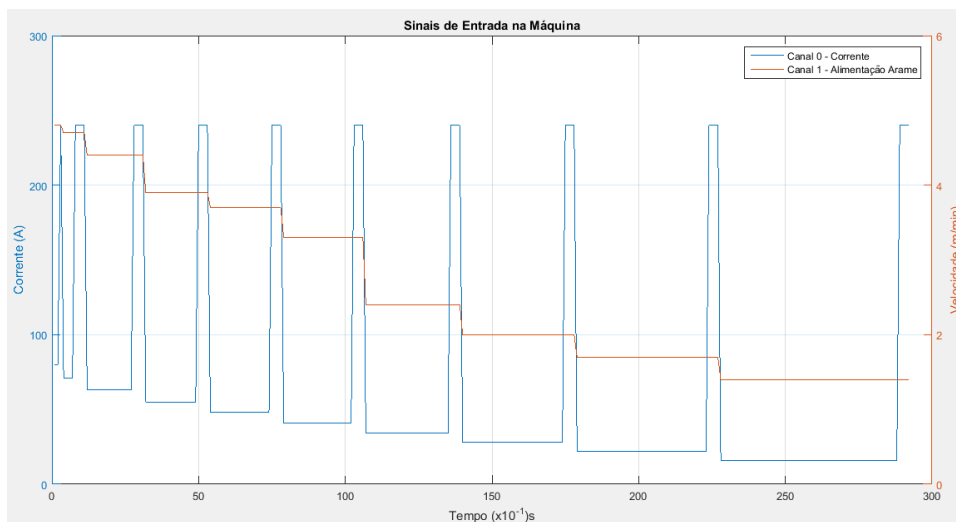


Figura 7. Visualizador saída DAQ MATLAB®.

A variação da frequência de pulsação influencia o diâmetro das gotas e um valor do diâmetro da gota maior que o do eletrodo resulta em um fator de destacamento baixo, e apesar da corrente média estar abaixo do valor da corrente de transição, os parâmetros necessitam de um melhor ajuste para garantir a condição goticular. As medições foram realizadas quando a gota apresentava a forma mais esférica possível.

Para a condição de uma gota destacada por pulso, a frequência de pulso relaciona-se com o diâmetro da gota, conforme a Equação 2.

$$d_g = \sqrt[3]{\frac{25\phi \cdot V_a}{f}} \quad (2)$$

Onde d_g – diâmetro da gota (mm), ϕ – diâmetro do eletrodo (mm), V_a – velocidade de alimentação do arame (m/min), f – frequência de pulso (Hz) [12].

A incerteza associada entre o valor calculado e medido da gota ficou em torno de 3,85%. A medida foi realizada a partir das imagens obtidas por uma câmera de alta velocidade que permitiu a análise dos tamanhos médios das gotas.

O algoritmo aguarda um sinal proveniente do controlador do robô que indica o início do processo de soldagem assim que a tocha estiver nas posições em que deve ocorrer a abertura do arco elétrico. As sub-rotinas possuem um tempo de duração que deve ser informado, uma vez que o período do processo pulsado pode se repetir diversas vezes, sendo essa duração um múltiplo da soma dos tempos de base e de pulso. A Figura 8 apresenta a configuração que promove o controle dos parâmetros. Com as leituras e escritas dos sinais elétricos o controle do processo é possível, bem como sua interação.

Para a calibração da escala de tensão foi conectada uma fonte DC em paralelo com os bornes da fonte e um resistor de 470 Ohms (para limitar a corrente). Ao aplicar 20 V, surge no display 4 V referente ao valor analógico eficaz da tensão V_{ae} , o que permitiu gerar uma tabela função de aferição dos valores, necessitando de uma correção de 2% entre os dados analisados. Por fim, o alimentador de arame foi verificado de duas formas. Primeiramente, com o equipamento em modo remoto, foram enviados valores analógicos e seu valor proporcional foi lido no marcador digital da máquina. A segunda forma foi com um medidor de arame e ao ajustar a rampa de aceleração para 1, foram realizados o disparo e a medição da quantidade de consumível por tempo.

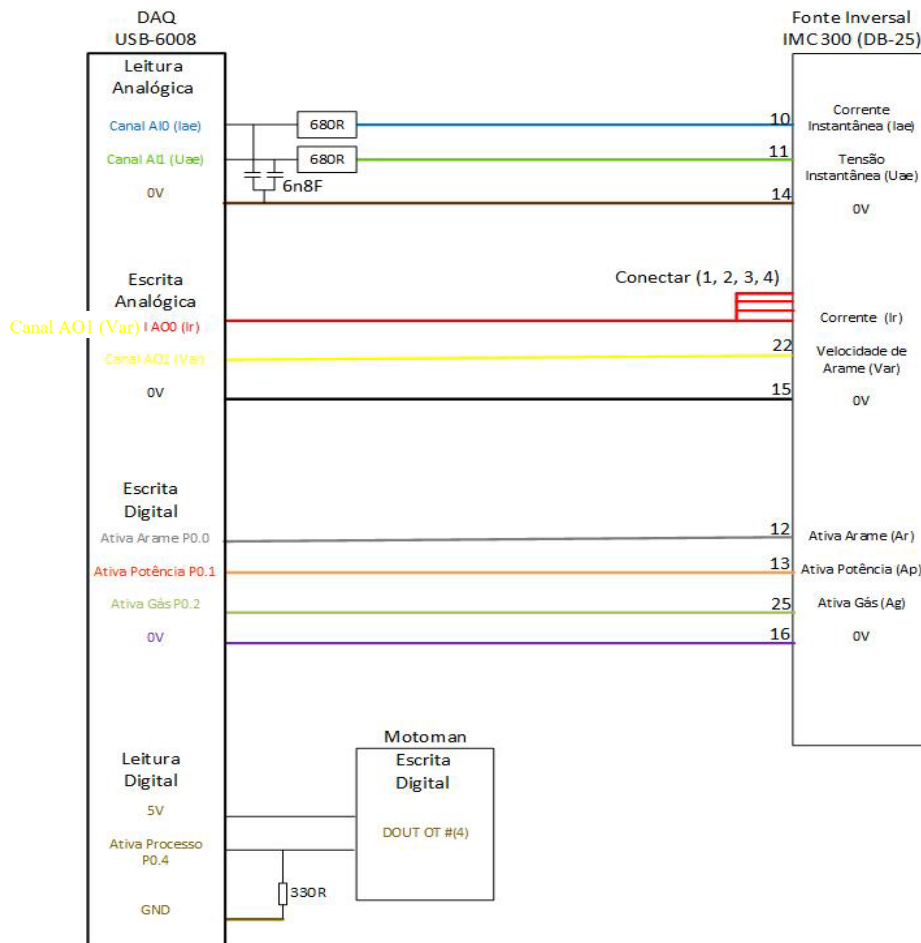


Figura 8. Interface com a Inversal 300.

Para entender o comportamento do perfil da geometria obtida mediante os parâmetros atribuídos ao processo, inicialmente cordões foram depositados sobre chapa, estas foram preparadas metalograficamente de modo a extrair suas características geométricas, tais como, largura, altura do reforço, molhabilidade e índice de convexidade. Para a análise da molhabilidade e convexidade foi utilizado um algoritmo de segmentação binária baseada em limiarização e de binarização, de modo que para a detecção automática das bordas, o *threshold* seleciona os níveis de pixels para preto ou branco, como pode ser observado na Figura 9, que representa o perfil de alguns cordões obtidos.



Figura 9. Deposição de camadas e avaliação dos perfis.

3. Resultados e Discussão

Embora a corrente de pulso seja a variável que é diretamente relacionada ao parâmetro de destacamento de gota, o valor da tensão de pulso também mantém uma relação com a mesma. Isto significa que se pode controlar a transferência metálica tanto pela corrente, quanto pela tensão. Em função disso surgiram metodologias para comandar a transferência metálica em corrente pulsada [13,14], dentre elas os comandos nos modos de imposição de corrente pulsada em que os valores das correntes e tempos de base e de pulso são ajustados, além da velocidade de alimentação do arame que se dá por meio de um sistema de realimentação interna da fonte, enquanto o processo misto impõe a corrente na fase de base e comanda a tensão no momento do pulso. Com isso a transferência metálica pode ser controlada tanto pela corrente quanto pela tensão. No comando de imposição de corrente, tanto na base como no pulso, seus valores médios e eficazes garantem a velocidade de alimentação do arame, o que indica que com uma redução do tamanho do arco, a tensão também diminuirá, reduzindo sua energia, conseqüentemente sua capacidade de fusão do eletrodo. Neste modo de operação é possível ao invés de ajustar o valor da velocidade de alimentação do arame, ajustar a tensão de referência. Esse comportamento permite variar o comprimento do arco por variações da corrente de soldagem e, como consequência, a taxa de fusão do arame.

Com a variação da corrente média e a tensão de referência foram obtidas diferentes larguras da camada, uma vez que o equilíbrio entre velocidade de alimentação e taxa de fusão do arame determina a estabilidade do comprimento do arco, que não sendo mantida pode ocasionar variações consideráveis na fusão do arame-eletrodo, resultando em perfis depositados com variação de altura, largura e penetração. Com o auxílio dos oscilogramas de tensão e corrente foi possível determinar o comportamento da máquina quanto à frequência de pulso f , por meio de medições de tempo de período T . A Figura 10 mostra que conforme a velocidade de alimentação aumenta a frequência de pulso também aumenta, o que garante a estabilidade do processo, devido à regularidade no diâmetro das gotas e no comportamento dinâmico da poça de fusão.

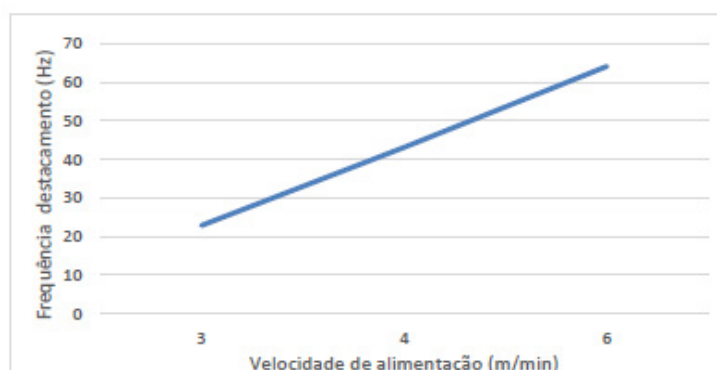


Figura 10. Relação frequência de destacamento com a velocidade de alimentação.

Uma menor corrente indica menor ação dos campos magnéticos e menor pressão sobre a poça de fusão, assim como a velocidade de impacto das gotas é função do valor da corrente média. Essa redução do valor da corrente promoveu um aumento do volume da gota. Porém a frequência de destacamento decresceu, o que foi favorável, pois contribuiu para a diminuição do nível de penetração. Com aumento da corrente e da tensão houve uma tendência de redução do índice de convexidade.

O índice de convexidade (IC) e a não-molhabilidade (NM) foram avaliados [15] por meio da metodologia de análise de superfície (RSM), que permite estabelecer as relações quadráticas entre os parâmetros do processo. A análise estatística auxiliou no levantamento dos parâmetros a serem utilizados e indicaram que com o aumento da tensão de referência há uma tendência de reduzir o IC, enquanto que o aumento da associação dos valores de base (corrente e tempo) que ocasionam maior corrente média, tem ação de elevar o índice. Estes remetem a maior pressão do arco que resulta em acréscimo na largura e redução do reforço, o que pode indicar uma maior geração de calor. Conclui-se ainda no estudo [15] que os ângulos obtidos indicam que as camadas apresentam baixa molhabilidade que está associada a baixos valores de tempo de base e uma pequena faixa de corrente, ambos sofrem maior influência quando a tensão de referência é de 23,25 V.

Para verificar o influxo do comprimento do arco sobre a instabilidade da camada, alterou-se o seu comprimento em dois níveis, por meio da variação da velocidade de alimentação do arame (V_a), com os demais parâmetros constantes, isto é, menores velocidades de alimentação proporcionaram um maior comprimento do arco. Além da medição do comprimento do arco, o valor médio da tensão mostrou ter alguma influência sobre a instabilidade da camada, de acordo com as tensões de referências utilizadas, visto que para as mesmas condições do processo, houve uma relação direta entre o comprimento do arco e o volume da camada por comprimento depositado, isto é, comprimentos de arcos maiores (tensões médias maiores) necessitaram de um maior volume depositado por comprimento depositado para que a camada permanecesse estável.

A molhabilidade está associada ao acúmulo de calor, o que afeta diretamente o ângulo de contato, o volume de material e consequentemente a altura da parede, como está representado na Figura 11.

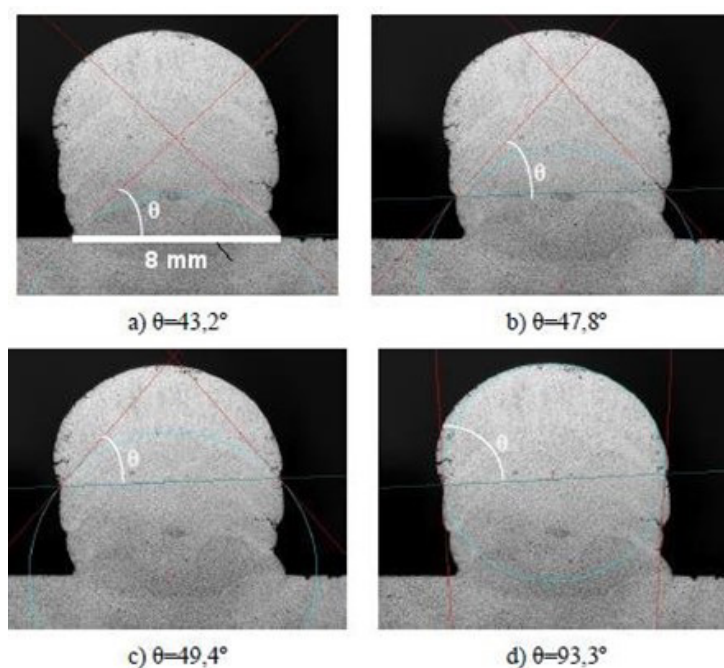


Figura 11. Variação da molhabilidade de acordo com o ângulo de contato.

Os valores da corrente média foram reduzidos a cada camada depositada, $I_{m1} = 120$ A, $I_{m2} = 100$ A, $I_{m3} = 96$ A, $I_{m4} = 90$ A e $I_{m5} = 86$ A. A Figura 10 apresenta a deposição de cinco camadas e a variação do ângulo de contato devido à alteração do valor da corrente média em cada camada depositada. Desta forma, foi possível promover uma melhora na geometria da parede. O acúmulo de calor proveniente do processo de deposição a arco se apresenta como um sério problema para a Manufatura Aditiva. Portanto, quanto menor for a entrada de calor, menor será o efeito na largura das camadas conforme apresentado na Figura 12.

De acordo com cada aporte térmico aplicado, os corpos de prova foram seccionados e foram medidas a largura, convexidade e não-molhabilidade, conforme apresentado na Tabela 4, o que auxiliou na avaliação do efeito e em replicar no controle do processo, com a construção do banco de dados.

Os valores de corrente e tempo de pulso foram mantidos constantes para que estes não atuassem na força do arco elétrico no momento do desprendimento da gota e não gerassem a uma maior penetração da camada. Além disso, à medida que a frequência de pulsação aumenta, a taxa de entrada de calor aumenta na poça de fusão, bem como a penetração, o que não é favorável para o processo multicamadas, devido aos graus de refusão das camadas anteriores.

Quanto ao aumento da velocidade de alimentação do arame, esse aumento implica na maior intensidade de corrente necessária para fundir o metal e aumenta a taxa de deposição. Não se pode negligenciar a distância bico de contato peça, que também afeta a taxa de fusão do arame devido ao aquecimento por efeito Joule do comprimento livre de consumível para fora do bico de contato.

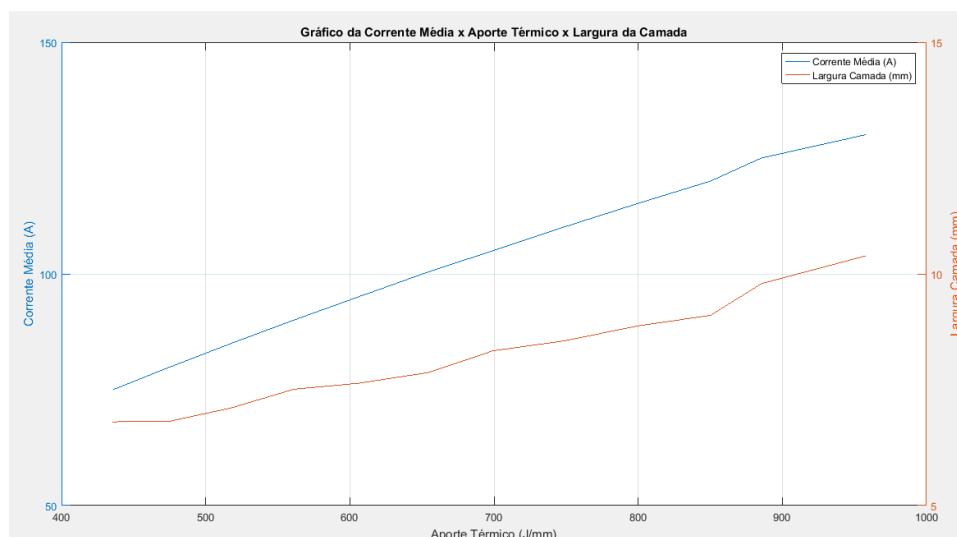


Figura 12. Efeito do aporte térmico e corrente média na largura da camada.

Tabela 4. Dados dimensionais sobre as 20 primeiras camadas produzidas.

Camada	Largura (mm)	Índice de Convexidade (%)	Não-Molhabilidade (°)
1	9,56	29,19	112,44
2	10,39	27,46	112,11
3	9,5	30,16	121,38
4	9,79	27,37	125,84
5	8,59	32,05	112,97
6	9,11	30,30	110,56
7	8,56	31,62	112,29
8	8,56	34,73	111,70
9	8,76	29,42	116,57
10	8,88	30,70	118,41
11	8,34	26,08	105,40
12	8,11	31,29	101,83
13	7,78	33,59	104,86
14	7,87	31,03	106,79
15	7,69	31,61	104,57
16	7,64	35,70	107,72
17	7,11	38,17	105,26
18	7,59	33,41	105,02
19	6,81	34,61	114,06
20	6,83	31,12	115,94

4. Conclusões

A dificuldade de se automatizar o processo de deposição por camadas está em monitorar e controlar o comportamento dinâmico da poça de fusão, assim como os parâmetros geométricos como largura e altura, sendo que a qualidade das camadas depositadas por meio do processo pulsado está relacionada com a estabilidade do modo de destacamento da gota que influencia diretamente na agitação e aporte térmico do metal líquido. O comportamento dinâmico apresenta-se como não-linear e composto por múltiplas variáveis e muitos fatores estocásticos.

O processo de Manufatura Aditiva por Deposição a Arco ainda está em desenvolvimento tecnológico e enfrenta diversos problemas como a deformação geométrica causada pelo excesso de calor imposto durante a fabricação. O ciclo térmico que ocorre a cada camada depositada promove contração e expansão não uniformes, levando a problemas micro e macroestruturais que serão apresentados em trabalho futuros. Além desses fenômenos, o controle dos parâmetros garante que a MADA possa ser utilizada de forma mais assertiva, minimizando o tempo de deposição, devido a menores ciclos térmicos, garantindo uma

taxa de resfriamento maior. Permitindo obter uma geometria mais próxima da final, resultando em menor remoção de material em pós processamento.

O método aqui apresentado sugere uma metodologia para desenvolvimento de sistemas adaptativos que pode ser aplicado em fontes de soldagem convencionais. A parametrização do processo de Manufatura Aditiva: a integração entre um computador, sistema de aquisição de dados e a fonte de processo, permitiu interferir nos parâmetros durante as deposições. Para as condições deste trabalho é possível concluir que:

- a. Com o aumento da corrente média, há um crescimento da largura e do reforço à medida que as camadas sobrepostas são depositadas, o que é favorável para alcançar a altura projetada para a parede;
- b. O arco elétrico necessita de uma região que seja suficientemente capaz de suportar sua base para que não promova a fusão das laterais da camada, além de permitir uma maior estabilidade do arco no topo da camada. Com isso, a variação dos parâmetros de modo a minimizar a corrente média e conseqüentemente o aporte térmico a área de incidência é reduzida, garantindo uma maior regularidade na geometria do perfil.

Contribuição dos autores

FGFC: concepção, coleta de dados, análise dos dados, elaboração do manuscrito, redação, metodologia, discussão dos resultados, conclusão.

AQB: concepção, análise dos dados, elaboração do manuscrito, redação, supervisão, discussão dos resultados, revisão.

EJL2: concepção, análise dos dados, elaboração do manuscrito, redação, validação dos dados e experimentos, discussão dos resultados, revisão.

ARA: concepção, análise dos dados, elaboração do manuscrito, redação, metodologia, discussão dos resultados, revisão.

Agradecimentos

Os autores agradecem à Universidade Federal de Minas Gerais e em especial ao Laboratório de Robótica, Soldagem e Simulação do Departamento de Engenharia Mecânica, por permitirem o uso dos recursos e equipamentos para realização deste trabalho.

Referências

- [1] Alberti EA, Silva L, D'Oliveira A. Manufatura aditiva: o papel da soldagem nesta janela de oportunidade. *Soldagem e Inspeção*. 2014;19(2):190-198. <http://doi.org/10.1590/0104-9224/SI1902.11>.
- [2] Uziel A. Looking at large-scale, arc-based additive manufacturing. *Welding Journal*. 2016;95(4):42-46.
- [3] DebRoy T, Wei HL, Zuback JS, Mukherjee T, Elmer JW, Milewski JO, et al. Additive manufacturing of metallic components: process, structure and properties. *Progress in Materials Science*. 2018;92:112-224. <http://doi.org/10.1016/j.pmatsci.2017.10.001>.
- [4] Cruz FE. G Uma metodologia para monitoramento em tempo real dos modos de transferência de metal convencionais no processo de soldagem GMAW [dissertação de mestrado]. Brasília: Departamento de Engenharia Mecânica, Universidade de Brasília; 2019.
- [5] Coelho FGF, Bracarense AQ, Lima EJ. Analysis of parameters based on deposited beads geometry in single-pass multi-layers applied in wire arc additive manufacturing process. *Arabian Journal for Science and Engineering*. 2023;48(3):3425-3439. <http://doi.org/10.1007/s13369-022-07011-0>.
- [6] TWI. MIG/MAG developments in low heat input transfer modes [internet]. 2022 [acesso em 2 dez. 2022]. Disponível em: <https://www.twi-global.com/technical-knowledge/job-knowledge/mig-mag-developments-in-low-heat-input-transfer-modes-133>
- [7] Marya M, Marya SK. A theoretical and experimental analysis of variances in weld bead morphologies. *Journal of Materials Engineering and Performance*. 1998;7(4):515-523. <http://doi.org/10.1361/105994998770347675>.
- [8] Pereira Wa, Ferraresi VA. Estudo dos parâmetros que influenciam a instabilidade do cordão em soldagem MIG pulsada automatizada. In: *Anais do XXIV Encontro Nacional de Tecnologia da Soldagem*; 1998; Fortaleza. São Paulo: Associação Brasileira de Soldagem; 1998.
- [9] Rajasekaran S, Kulkarni S, Mallya U, Chaturvedi R. Droplet detachment and plate fusion characteristics in pulsed current gas metal arc welding. *Welding Journal*. 1998;77(6):254s-269s.
- [10] Li N, Fan D, Huang J, Yu S, Yuan W, Han M. Self-adaptive control system for additive manufacturing using double electrode micro plasma arc welding. *Chinese Journal of Mechanical Engineering*. 2021;34(1):59. <http://doi.org/10.1186/s10033-021-00581-4>.
- [11] Bonaccorso F, Cantelli L, Muscato G. Arc welding control for shaped metal deposition process. *IFAC Proceedings Volumes*. 2011;44(1):11636-11641. <http://doi.org/10.3182/20110828-6-IT-1002.01575>.
- [12] Scotti A, Ponomarev V. *Soldagem MIG/MAG: melhor entendimento, melhor desempenho*. São Paulo: Artliber; 2008.

-
- [13] Carreira M No, Brandi SD. Modelamento da frequência de destacamento de gotas na soldagem de ligas de alumínio como processo SAMGP. In: Anais do XXIII Encontro Nacional de Tecnologia da Soldagem; 1997; São Paulo. São Paulo: FATEC; 1997.
- [14] Nascimento AS, Dias AC, Macias BB Fo, Mota CA. Procedimento experimental para seleção de parâmetros de pulso para soldagem com arame tubular em corrente pulsada. In: Anais do 2º Congresso Brasileiro de Engenharia de Fabricação; 2003; Uberlândia, MG, Brasil. Rio de Janeiro: Associação Brasileira de Ciências Mecânicas; 2003.
- [15] Coelho FGF, Bracarense AQ, Lima EJ 2nd. Analysis of parameters based on deposited beads geometry in single-pass multi-layers applied in wire arc additive manufacturing process. *Arabian Journal for Science and Engineering*. 2023;48(3):3425-3439. <http://doi.org/10.1007/s13369-022-07011-0>.