

COBEF2025-0367 MANUFATURA ADITIVA POR DEPOSIÇÃO A ARCO: DESAFIOS E SOLUÇÕES NO CONTROLE DA RELAÇÃO CAD TO PART

Daniel Galeazzi, daniel.galeazzi@posgrad.ufsc.br¹

Régis Henrique Gonçalves e Silva, regis.silva@ufsc.br¹

Mateus Barancelli Schwedersky, m.barancelli@ufsc.br¹

¹ Universidade Federal de Santa Catarina, LABSOLDA – UFSC

Resumo: A manufatura aditiva por deposição a arco é um processo emergente que tem despertado crescente interesse na indústria e na academia devido à sua capacidade de fabricar peças complexas com baixo desperdício de material e alta flexibilidade industrial. Além disso, permite a produção de peças personalizadas com um ou mais materiais, resultando em componentes com características específicas de acordo com a demanda funcional, uma técnica conhecida como Functionally Graded Materials (FGM). No entanto, para que as peças fabricadas sejam funcionalmente aplicáveis em ambientes industriais, é necessário superar diversas barreiras tecnológicas e científicas. Nesse contexto, processos de soldagem sofisticados são comumente empregados, sendo o GMAW, especialmente sua variante com alimentação dinâmica CMT (Cold Metal Transfer), o mais utilizado. Apesar da sofisticação dos processos empregados, muitos desafios permanecem. Um dos principais obstáculos da manufatura aditiva por deposição a arco é a relação CAD to Part, ou seja, a fidelidade entre o modelo digital (CAD) e a peça final produzida. Para assegurar essa correspondência, os parâmetros de soldagem precisam ser alinhados à trajetória de deposição, controlando incrementos verticais e horizontais, velocidade de deslocamento e outros parâmetros relacionados, de forma a corresponder às dimensões do cordão de solda, que é o resultado direto do processo. Este trabalho tem como objetivo explorar a relação CAD to Part, destacando os principais desafios e possíveis soluções para a produção de peças utilizando arame de aço carbono e o processo CMT. Para isso, foi desenvolvida uma metodologia voltada à mitigação dos problemas relacionados, com foco no mapeamento e entendimento do comportamento geométrico dos cordões de solda em suas sobreposições verticais, horizontais e interseções. Com isso, foi possível criar um banco de dados de parâmetros do material e do processo utilizado, que permite, por meio de uma máquina de inferência, prever os parâmetros necessários para a trajetória de deposição (incremento vertical, incremento horizontal e diretrizes operacionais), a fim de garantir a relação CAD to Part. Os resultados indicaram que o método desenvolvido possibilita a correta predição da trajetória, ou seja, dos incrementos. A partir desse algoritmo, foram fabricadas diferentes peças, as quais apresentaram geometria adequada, livres de defeitos e com baixo desvio padrão em relação ao modelo CAD.

Palavras-chave: Wire-arc direct energy deposition (WA-DED), Manufatura Aditiva por Deposição a Arco (MADA), automação, Soldagem MIG/MAG, Sistema especialista.

1. INTRODUÇÃO

A manufatura aditiva por deposição a arco (WAAM, do inglês wire and arc additive manufacturing) é um processo de fabricação emergente que vem ganhando bastante destaque no Brasil e no mundo, devido à sua capacidade de produzir peças complexas com geometrias intrincadas e personalizadas, combinando materiais e propriedades mecânicas. Além disso, o WAAM se destaca pela maior produtividade e menor custo dos equipamentos em relação a processos de manufatura aditiva baseados em Laser (Galeazzi, 2024).

Este processo concentra-se na fabricação de componentes por meio da deposição controlada de material ao longo de uma trajetória predefinida, onde a fusão desse material é obtida através da ação de um arco elétrico. No processo GMAW (Gas Metal Arc Welding), o arco elétrico é estabelecido entre o substrato e um arame eletrodo consumível. Esse arame é alimentado continuamente pela tocha de soldagem e fundido pelo arco elétrico, depositando o material de forma controlada conforme avança ao longo da trajetória de deslocamento. Por outro lado, nos processos GTAW (Gas Tungsten Arc Welding) e PAW (Plasma Arc Welding), o arco elétrico é formado entre um eletrodo não-consumível, geralmente de tungstênio, e o substrato. Nesses processos, o material de adição é adicionado na região do arco, onde é fundido e depositado conforme necessário para formar a peça desejada (Frazier, 2014).

A definição do processo de deposição para manufatura aditiva dependerá da complexidade da peça e do material de fabricação. Os processos autógenos com alimentação externa, apesar da vantagem de independência da corrente de soldagem da alimentação de material, tendem a apresentar maiores dificuldades na aplicação em manufatura aditiva, devido a variabilidade da direção de alimentação em trajetórias multidirecionais, uma vez que o alimentador é fixo

adjacente ao arco, o que não ocorre no processo GMAW, onde a alimentação é coaxial ao arco, fazendo deste o processo o mais aplicado na manufatura aditiva por deposição a arco atualmente.

Um dos principais desafios da manufatura aditiva trata-se da relação *CAD-to-part*, ou seja, à integração entre o projeto assistido por computador (CAD) e a fabricação do componente físico (*part*). No contexto da manufatura aditiva, essa relação envolve várias etapas cruciais. Destacam-se o planejamento e parametrização do processo, isto é, os parâmetros de soldagem e as diretrizes operacionais necessárias a serem programadas na trajetória, as quais devem garantir que, ao final do processo, a peça atenda aos requisitos dimensionais e mecânicos estabelecidos (Ding *et al.*, 2015a, 2016; Wang *et al.*, 2021). Diante desse cenário, torna-se imperativo mapear e compreender os fenômenos físicos relacionados à transferência metálica do processo de deposição adotado e seu impacto no perfil geométrico dos cordões depositados produzidos.

Nesse contexto, processos de soldagem de alta tecnologia embarcada são extensivamente utilizados na manufatura aditiva, devido ao maior nível de controle da transferência metálica e das variáveis de soldagem, destacando-se a variante com alimentação dinâmica do processo GMAW, CMT (*Cold Metal Transfer*). Conforme aborda a literatura, o sistema CMT confere controle geométrico ao depósito, alta estabilidade e possibilita altas taxas de deposição, características essas interessantes para a fabricação de peças por manufatura aditiva. (Ali *et al.*, 2019; Furukawa, 2006; Mvola, Kah e Layus, 2018; Posch, Chladil e Chladil, 2017; Yang *et al.*, 2019). Entretanto, mesmo ao aplicar equipamentos e processos de elevada confiabilidade, a parametrização de uma operação de manufatura aditiva transcende o processo de soldagem e se estende ao controle do aporte térmico, temperatura interpasse ou intercâmara, planejamento e controle da trajetória, dentre outras variáveis. A negligência em relação a esses aspectos pode impossibilitar as operações de manufatura aditiva (Bai *et al.*, 2018; Ding *et al.*, 2014, 2015a; b; c; Mehnen *et al.*, 2011).

Este trabalho tem como objetivo geral explorar a relação CAD to Part, destacando uma metodologia para definição de uma solução para a produção de peças por manufatura aditiva via deposição a arco utilizando arame de aço carbono e o processo CMT em consonância com o modelo CAD prévio. A partir deste estudo foi desenvolvido um algoritmo de predição de parâmetros otimizados baseados nas características do modelo CAD, isto é, espessura de parede. O algoritmo, baseado em um sistema especialista, se concentra em planejar uma condição com o menor número sobreposições laterais e maiores velocidades de soldagem para determinar a melhor relação de parâmetros.

2. METODOLOGIA

Para a execução e desenvolvimento dos ensaios de soldagem bem como das demais atividades concernentes ao objetivo geral foi utilizado uma célula de soldagem composta por um robô antropomórfico de seis graus de liberdade, sincronizado a uma base manipuladora de dois graus de liberdade e uma fonte de soldagem esquematicamente descrita na Figura 1.

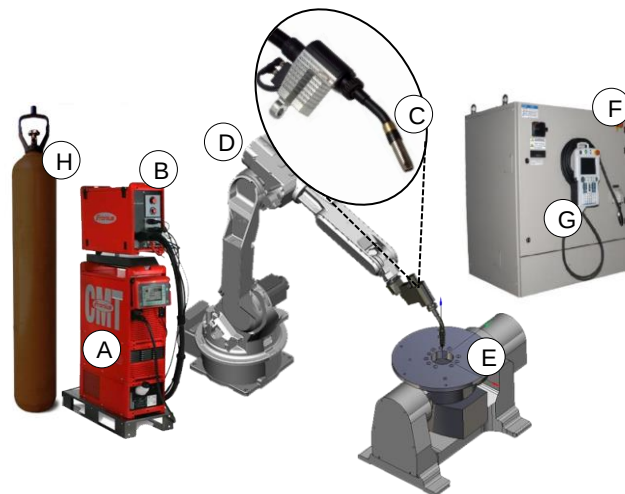


Figura 1. Representação esquemática da bancada de experimentos, onde: A) Fonte de soldagem Fronius CMT Advanced 4000R com controlador RCU 5000i; B) Cabeçote de alimentação de arame principal; C) Tocha de soldagem Fronius Robacta; D) Robô antropomórfico Yaskawa Motoman HP20D de 6 eixos e 20 kg de payload; E) Base articulada Motopos MPD250B com 2 eixos e 250 kg de payload; F) Unidade de controle Yaskawa Motoman DX100; G) IHM Teach Pendant DX100; H) Cilindro de gás de proteção para soldagem.

Os ensaios de soldagem foram conduzidos utilizando chapas de aço carbono ASTM A36 como corpos de prova para soldagem, com uma espessura de 9,52 mm, uma largura de 76,2 mm e um comprimento de 220 mm. O material de adição empregado foi o arame de aço ER70S6, com um diâmetro de 1,2 mm. A Mistura gasosa para os experimentos foi composta por 92% de argônio e 8% de CO₂ (C8). O processo de soldagem utilizado foi o GMAW operando com a variante CMT, utilizando a linha sinérgica 1362 (versão 2.3.8.5).

Para o desenvolvimento das tratativas em torno da relação CAD to part bem como do desenvolvimento de um algoritmo de sobreposição vertical e horizontal para em função das dimensões do modelo CAD definir o número de camadas e a distância entre camadas e no caso de paredes espessas com sobreposições horizontal a distância entre centros.

Inicialmente, para a tratar da sobreposição vertical, realizou-se a fabricação de paredes de 100 mm de comprimento, passe único e com 10 camadas de altura. A trajetória utilizada para deposição das camadas foi do tipo bidirecional ou Raster no plano XZ, descrita no esquema da Figura 2.

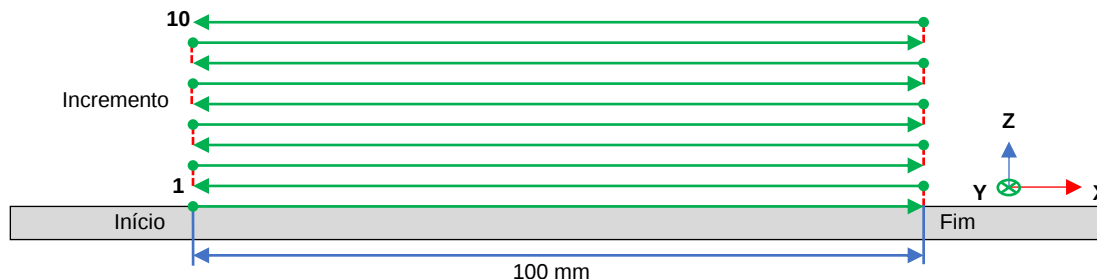


Figura 2. Representação esquemática da trajetória utilizada para construção das paredes.

Dentre outros parâmetros, manteve-se, principalmente, a DBCP controlada em 15 mm e a temperatura intercamada em 100 °C, monitoradas por meio de calibre de altura e um termopar de contato. Os experimentos concentraram-se em verificar a altura média do cordão camada a camada para uma determinada faixa de alimentação de arame e velocidade de deslocamento. Sendo assim, para a matriz de ensaios, variou-se a velocidade de arame programada entre 4,0 e 7,0 m/min utilizando a variante CMT. Além disso, variou-se em paralelo a velocidade soldagem entre 30 e 75 cm/min. A Tabela 1 apresenta a matriz de ensaios construída para esta fase.

Tabela 1. Matriz de experimentos utilizada para a construção das paredes.

VA Programada (m/min)	Vel. Deslocamento (cm/min)	Vel. Deslocamento (mm/s)	DBCP (mm)	VG (L/min)	Temperatura Intercamada (°C)
4,0	30	5,0	15	12	100
	45	7,5			
	60	10,0			
	75	12,5			
5,0	30	5,0	15	12	100
	45	7,5			
	60	10,0			
	75	12,5			
6,0	30	5,0	15	12	100
	45	7,5			
	60	10,0			
	75	12,5			
7,0	30	5,0	15	12	100
	45	7,5			
	60	10,0			
	75	12,5			

Os sinais elétricos, tensão, corrente e velocidade de arame foram mantidos na média constantes por meio de monitoração utilizando o sistema de aquisição portátil SAP. Para a caracterização geométrica da parede foi utilizado um paquímetro mitutoyo digital com resolução de 0,01 mm. Os mensurandos foram a altura e largura máxima, obtidos por meio da média de 5 pontos distribuídos ao longo da parede.

Em sequência, os experimentos foram expandidos para definições das condições ótimas de sobreposição horizontal. O algoritmo desenvolvido levou em consideração modelos descritos na literatura, por exemplo, o modelo descrito por Ding, et al. (Ding *et al.*, 2015b) que apresenta um modelo baseado em seno e cosseno utilizando como entrada de dados a altura e largura do cordão, os modelos descritos (Suryakumar *et al.*, 2011) e (Xiong *et al.*, 2014; Xiong e Zhang, 2014) que apresentam um modelo matemático de sobreposição também baseado na altura e largura do cordão, porém utilizando polinômios de segundo grau. Em resumo, os algoritmos utilizam relações de igualdade de área sobrepostas para definir uma distância entre o centro dos cordões (*Overlap*). Observando os modelos dos autores citados bem como suas limitações criou-se outra abordagem, que utiliza a altura e largura do reforço do cordão de solda como entrada de dados e uma análise de regressão baseada em polinômios de segunda ordem. A resposta do método é a distância entre os centros dos cordões que, neste caso, foi definida como 67% da largura do cordão de solda.

Para validar este valor, utilizando a mesma matriz experimental da Tabela 1, foram construídos blocos com cinco sobreposições horizontais ao longo de duas camadas defasadas 180°, ou seja, iniciando a camada 2 no fim da camada 1, conforme esquema na Figura 3. Para a caracterização geométrica da parede foi utilizado um paquímetro mitutoyo digital

com resolução de 0,01 mm. O principal mensurando foi a largura média do bloco, por meio da medição de 5 regiões ao longo do bloco.

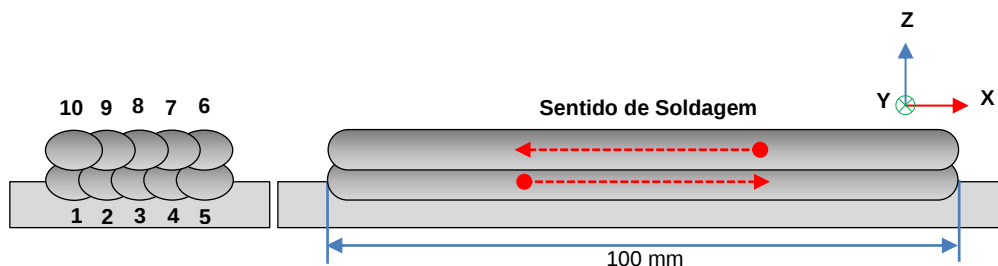


Figura 3. Esquema de fabricação dos blocos.

A partir deste conjunto de experimentos associado ao entendimento das melhores práticas para a construção de peças por manufatura aditiva, i.e., relação de conexão entre cordões de solda em trajetos fechados, intersecção de cordões, tipos de trajetória, temperatura intercamada, foi concebido um sistema para operar em uma lógica análoga a um sistema especialista, capaz de realizar processos de inferência lógica para chegar a conclusões ou tomar decisões baseadas em regras e informações disponíveis. Em outras palavras, o sistema utiliza regras lógicas e dados para deduzir novas informações ou realizar ações específicas baseadas em uma entrada que neste caso é a espessura da parede da peça.

O sistema especialista a partir desta entrada, executa a máquina de inferências e a partir das regras criadas ao longo dos resultados gerados nos experimentos práticos define as melhores saídas, isto é, os parâmetros de soldagem, VA programada e velocidade de deslocamento, incremento vertical e número de sobreposições horizontais, além da estratégia de deposição, ou seja, a trajetória. Todas estas variáveis são cruciais para a programação da trajetória no software de CAM SprutCAM XV. Além disso, vale salientar que todas as regras e condições foram implementadas utilizando o software Matlab 2020a.

Para conceber e desenvolver o algoritmo, bem como a máquina de inferência, todos os resultados obtidos ao longo do trabalho foram compilados em um banco de dados. Esse banco incluiu regras e condições que orientaram decisões assertivas na definição das diretrizes e parâmetros de soldagem. Isso abrangeu desde a composição da mistura gasosa para o arame de aço ER70S-6 até os detalhes operacionais como DBCP, faixa operacional (Velocidade de arame velocidade de deslocamento), incrementos verticais e horizontais, modos de intersecção, modos de conexão e tipo de trajetória.

O algoritmo, delineado no fluxograma da Figura 4, inicia seu processo recebendo informações sobre a peça a ser fabricada como entrada de dados. Em uma etapa inicial de avaliação, a peça é examinada para identificar ressaltos, detalhes ou variações na espessura da parede. Caso tais características estejam presentes, a peça é segmentada em partes distintas, cada uma associada a uma lista específica de diretrizes e parâmetros. Essa segmentação é essencial para garantir um controle preciso e eficaz durante o processo de fabricação.

Em seguida, cada segmento é caracterizado conforme sua espessura de parede. Se a espessura exceder o maior valor de largura de cordão registrado no banco de dados, o algoritmo identifica o segmento como uma parede espessa e emprega o método de sobreposição de cordões, conforme definido pela equação da sobreposição. Caso contrário, o segmento é considerado uma parede simples, e o algoritmo busca no banco de dados o valor de espessura mais próximo. Em ambos os casos, o algoritmo prioriza a velocidade de deslocamento e, em seguida, a velocidade de alimentação. O algoritmo inicialmente seleciona três opções de maior velocidade de alimentação e seleciona aquela com a maior velocidade de deslocamento. Caso o algoritmo não encontre um parâmetro adequado para uma parede simples, ele automaticamente considera a peça como uma parede espessa. Utilizando a equação da sobreposição, o algoritmo busca então um conjunto de parâmetros apropriados para esse tipo de parede. Se, mesmo assim, não for possível encontrar uma solução que atenda aos requisitos, o algoritmo sinaliza um erro e solicita que o usuário redefina a espessura da peça. Esse procedimento garante que o processo de fabricação seja conduzido de forma precisa e eficiente, evitando a utilização de parâmetros inadequados que possam comprometer a qualidade da peça final.

Por fim, após a parametrização de todos os segmentos o algoritmo compila uma lista contendo as diretrizes e parâmetros para cada segmento da peça. Esses dados são então utilizados no software CAM como parâmetros de trajetória para o modelo CAD a ser fabricado.

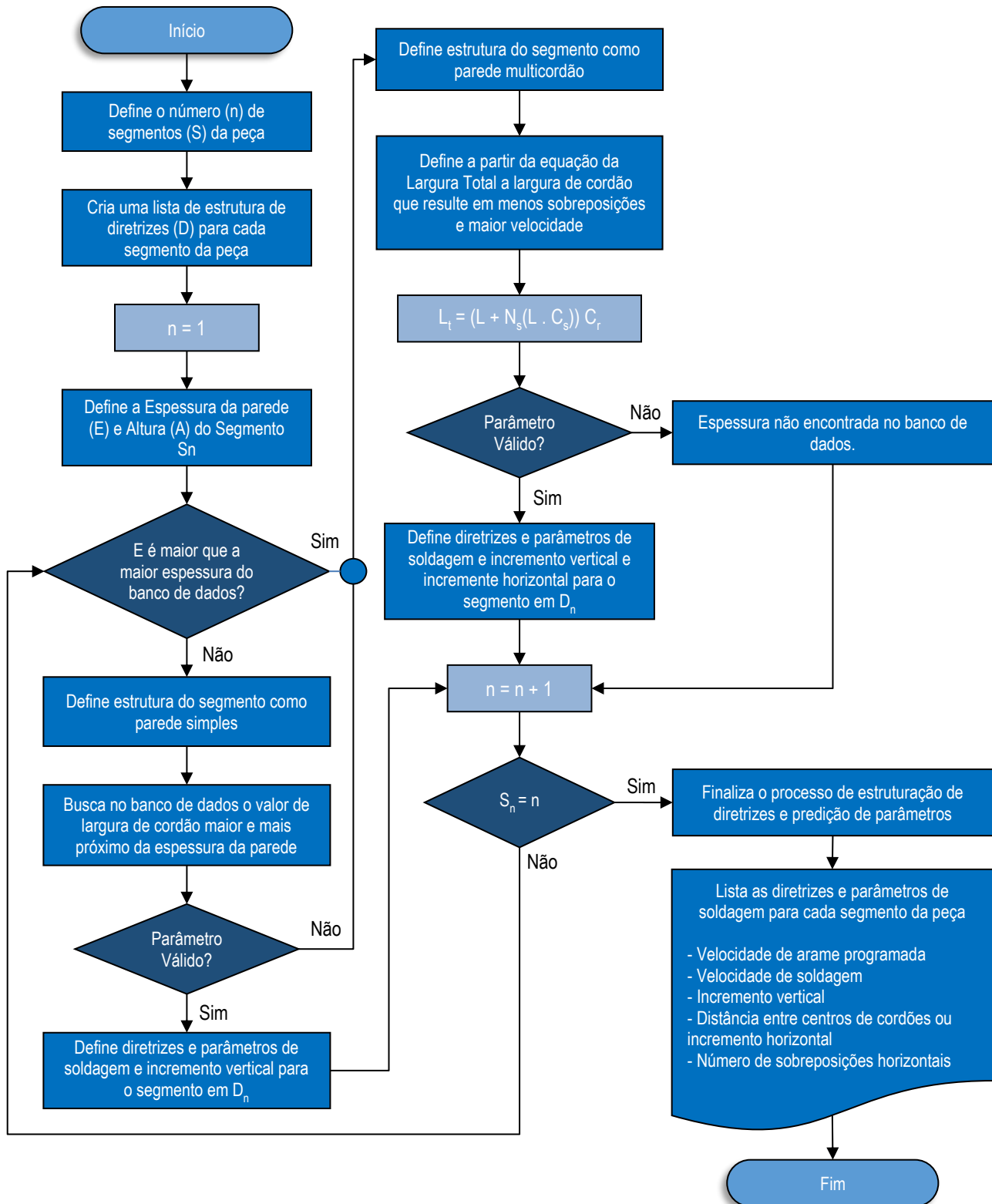


Figura 4. Fluxograma do funcionamento do algoritmo de predição de diretrizes e parâmetros para manufatura aditiva.

Na etapa de validação do algoritmo de predição de parâmetros proposto, utilizando a bancada de experimentos descrita na Figura 1, foram fabricadas diferentes peças representativas para avaliar a eficácia do modelo. Essas peças abrangem diferentes geometrias e características, incluindo um cubo com ressalto, um tubo de parede simples com derivações e o logo do LABSOLDA em parede simples, conforme mostra a Figura 5.

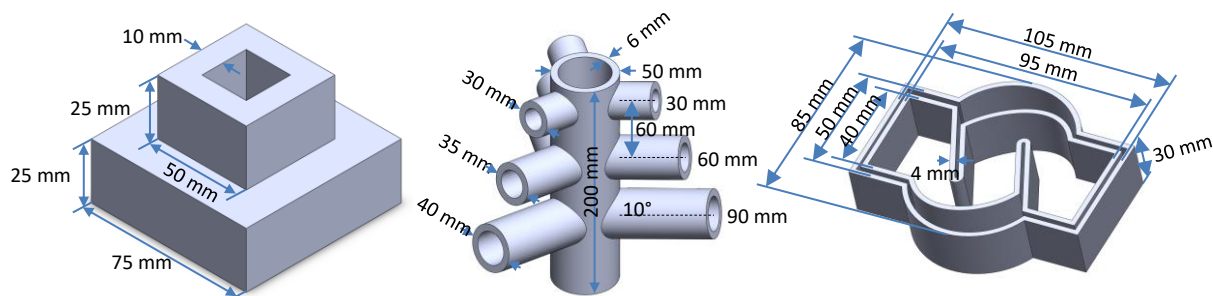


Figura 5. Detalhamento dimensional das peças utilizadas para validação do algoritmo de predição de parâmetros.

Para definição dos parâmetros de soldagem e diretrizes operacionais, aplicou-se o método proposto no algoritmo de parametrização nas peças destinadas à validação. Com isto, obteve-se os parâmetros e diretrizes para cada segmento das peças propostas, em função de suas dimensões. A Tabela 2, apresenta os parâmetros de soldagem e de trajetória que o algoritmo retornou para cada segmento da peça.

Vale destacar que as demais diretrizes, como trajetória e conexão entre cordões, foram estabelecidas com base em padrões que demonstraram os melhores resultados em estudos anteriores. Para a trajetória, todas as camadas foram realizadas com cordões retos e contínuos, a fim de mitigar defeitos geométricos. O sentido dos cordões é alternado a cada camada, ou seja, camadas pares são depositadas no sentido horário, enquanto as camadas ímpares são depositadas no sentido anti-horário.

Quanto às conexões, os cordões sempre terminam sobre o ponto inicial, com um pré-gás de 2 segundos, um delay em arco aberto de 1 segundo no início, e, ao final, um delay de arco aberto de 0,5 segundos seguido de pós-gás de 5 segundos. Além disso, os pontos de início das camadas pares e ímpares são defasados pela maior distância em relação ao ponto final da camada anterior, visando uma distribuição térmica mais homogênea.

Após a produção das peças, realizou-se uma medição comparativa com os modelos CAD correspondentes para avaliar a fidelidade geométrica. Essa análise das diferenças entre as medidas reais e os modelos digitais evidenciou a capacidade do algoritmo em prever não apenas os parâmetros de soldagem, mas também a conformidade geométrica das peças fabricadas. Os resultados desta validação visam destacar a eficácia do algoritmo em obter peças com dimensões e características próximas às especificações desejadas (near net shape ou net shape), consolidando a robustez do método na manufatura aditiva.

Tabela 2. Tabela de parâmetros utilizados na fabricação das peças de validação. VD – Velocidade de deslocamento; VA – Velocidade de alimentação; DEC – Distância entre centros de cordões de solda; IV – Incremento vertical; TI – Temperatura interpasse.

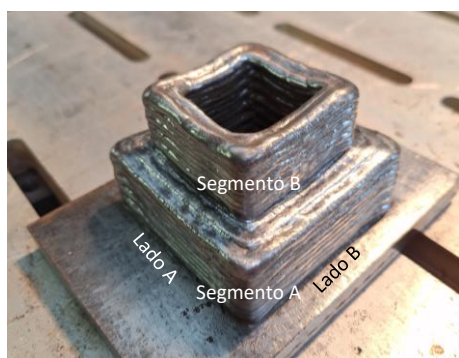
Peça	Segmento A	Segmento B	Segmento C	Segmento D
Cubo com ressalto	VD 60 cm/min VA 6,0 m/min DEC 4,2 mm IV 2,1 mm TI 150 °C 4 Sobreposições 12 Camadas	VD 60 cm/min VA 7,0 m/min DEC 4,5 mm IV 2,2 mm TI 150 °C 1 Sobreposições 12 Camadas	-	-
Cilindro com derivações (Árvore de Natal)	VD 60 cm/min VA 5,0 m/min IV 1,9 mm TI 150 °C 105 camadas	VD 60 cm/min VA 5,0 m/min IV 1,9 mm TI 150 °C 45 camadas	VD 60 cm/min VA 5,0 m/min IV 1,9 mm TI 150 °C 32 camadas	VD 60 cm/min VA 5,0 m/min IV 1,9 mm TI 150 °C 16 camadas
Logotipo LABSOLDA	VD 75 cm/min VA 4,0 m/min IV 1,5 mm TI 150 °C 20 camadas	-	-	-

3. RESULTADOS

O mapeamento dos parâmetros permitiu estabelecer uma relação entre a altura do cordão simples com a altura média da camada nas paredes, com isto, foi possível determinar o comportamento do depósito e prever o incremento necessário para manter a DBCP constante, bem como a relação CAD to Part. Do mesmo modo, para os blocos também foi possível estabelecer um paralelo entre largura do cordão, a distância entre centros e largura final do bloco, possibilitando a fabricação de paredes espessas próximas a geometria desejada.

Com base no mapeamento dos parâmetros de soldagem em função da geometria das paredes e dos blocos, bem como da construção do banco de dados de parâmetros, diretrizes e estratégias de deposição, foram construídas peças utilizando todos estes métodos, os quais estão concentrados no algoritmo inteligente de predição de parâmetros, descrito na metodologia.

A peça cúbica com ressalto também apresentou aparência satisfatória, continuidade e sem incidência de defeitos superficial, conforme pode ser visualizado na Figura 6. As medições correspondentes a esta peça estão também detalhadas Figura 6. Ao analisar e comparar essas medições em relação aos valores nominais, observou-se uma aproximação considerável para ambos os segmentos.



Característica	Segmento A			Segmento B		
	Nominal (mm)	Média (mm)	Desv. Pad (mm)	Nominal (mm)	Média (mm)	Desv. Pad (mm)
Lado A	75	77.1	0.4	50	53	0.4
Lado B	75	76.7	0.3	50	52.3	0.5
Espessura da Parede A	22.5	23.1	0.2	10	11.1	0.3
Espessura da Parede B	22.5	23.5	0.3	10	11.2	0.3
Altura A	25	27.1	0.4	25	27.4	0.4
Altura B	25	27.5	0.3	25	27.7	0.4

Figura 6. Resultado da fabricação do cubo com ressalto.

A segunda peça, de parede simples, tem uma forma composta por um cilindro base e ramificações cilíndricas de diferentes diâmetros, posicionadas em intervalos de 120° e inclinadas a um ângulo de 10°, como detalhado na metodologia. A Figura 7 ilustra algumas etapas da fabricação desta peça. Semelhante à peça anterior, o processo envolveu a fabricação de um cilindro base (Figura 7A), seguido pela produção das derivações utilizando a mesa posicionadora. Cada conjunto de ramificações foi fabricado rotacionando a peça, por meia da mesa posicionadora, em 120° para iniciar o próximo conjunto, conforme representado na Figura 7BC.

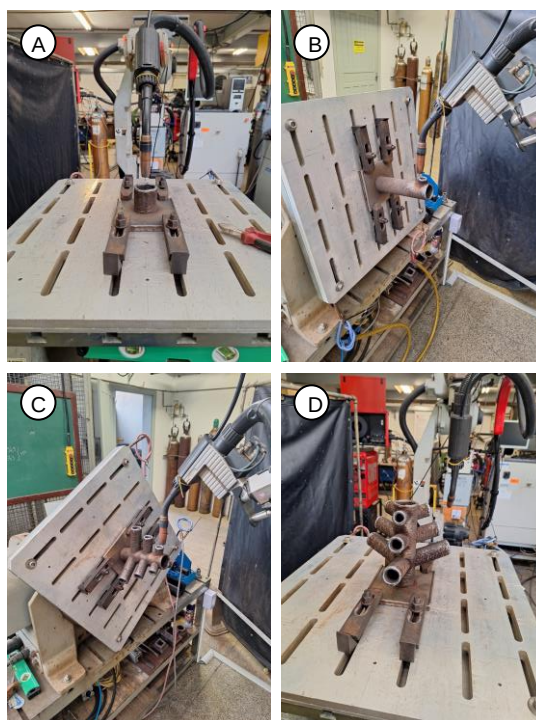


Figura 7. Algumas etapas da fabricação do cilindro com derivações (Árvore de Natal).

O resultado da fabricação desta peça pode ser visualizado na Figura 8. A peça apresentou continuidade e isenção de defeitos superficiais. Os resultados das medições realizadas nos diferentes segmentos da peça. As medições indicaram conformidade com os valores nominais com baixo desvio.



Característica	Segmento A			Segmento B		
	Nominal (mm)	Média (mm)	Desv. Pad. (mm)	Nominal (mm)	Média (mm)	Desv. Pad. (mm)
Diâmetro	50	53.4	0.6	40	41.1	0.5
Comprimento	200	202.1	0.3	90	91.5	0.5
Espessura da Parede	6	6.8	0.3	6	6.9	0.3

Característica	Segmento C			Segmento D		
	Nominal (mm)	Média (mm)	Desv. Pad. (mm)	Nominal (mm)	Média (mm)	Desv. Pad. (mm)
Diâmetro	35	36	0.4	30	30.6	0.5
Comprimento	60	60.9	0.4	30	30.5	0.4
Espessura da Parede	6	6.7	0.3	6	6.3	0.4

Figura 8. Resultado da fabricação do tubo de parede simples com derivações.

A Outra peça com parede simples foi o logotipo do LABSOLDA. Neste caso, além da parede simples, foram exploradas paredes finas e combinações de geometrias, como semicírculos, curvas agudas e suaves, bem como proximidade de cordões. Contudo, foi possível identificar apenas um leve ressalto em um trecho da peça, resultado do acúmulo de material devido à baixa velocidade de deslocamento praticada nessa região, particularmente nas curvas de 180°. Essa redução de velocidade é oriunda de uma limitação do robô, que executa uma desaceleração para executar o movimento com baixa incerteza. É possível forçar o manipulador a manter a velocidade, porém isto pode acarretar um erro geométrico da trajetória. Sendo assim, visando maior assertividade na geometria da peça sacrificou-se a minimamente precisão da velocidade média de soldagem. Embora esse detalhe não tenha comprometido a integridade da peça, é digno de nota, pois ângulos excessivamente agudos não foram explorados neste estudo. A Figura 9 ilustra a aparência final da peça, a qual apresenta continuidade e ausência de defeitos, assim como as demais. As medições evidenciaram uma proximidade com os valores nominais, acompanhadas de um desvio padrão relativamente baixo.



Característica	Nominal (mm)	Média (mm)	Desv. Pad. (mm)
Comprimento A	95	95.5	0.2
Comprimento B	105	105.4	0.3
Largura A	40	40.6	0.2
Largura B	50	50.3	0.2
Largura C	85	85.6	0.3
Altura	30	30.1	0.2
Espessura da Parede	4	4.2	0.2

Figura 9. Resultado da fabricação do logotipo de LABSOLDA.

Em síntese, o algoritmo de predição de diretrizes e parâmetros, demonstrou eficácia para a fabricação das peças de validação. Essas peças foram produzidas respeitando os valores nominais e as tolerâncias requeridas. O algoritmo se mostrou consistente e preciso, garantindo a integridade e a qualidade das peças fabricadas. Esses resultados validam a robustez e a confiabilidade do método proposto, destacando sua viabilidade para a fabricação de componentes com precisão e consistência.

4. AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem ao grupo de pesquisa Labsolda, à Universidade Federal de Santa Catarina (UFSC) e ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica (POSMEC) pelo suporte técnico, científico e estrutural para a realização deste trabalho.

5. CONSIDERAÇÕES FINAIS E CONCLUSÕES

Este trabalho, concebido em um ambiente multidisciplinar, teve como principal objetivo o desenvolvimento de um sistema integrado de manufatura aditiva focado no planejamento e parametrização do processo de soldagem orientado a relação CAD-to-part. Em vista das diversas frentes exploradas, apresenta-se a seguir algumas conclusões específicas:

- Verificou-se que na sobreposição vertical os cordões, na média, tendem a apresentar larguras levemente maiores e alturas levemente menores do que as do cordão base. Portanto, para correta definição do incremento vertical é necessário diminuir, na média, 10% da altura do cordão base, possibilitando menores variações da DBCP, ou realizar a correção de forma adaptativa para cada caso, assim como foi realizado neste trabalho;
- Para a sobreposição horizontal verificou-se que o modelo desenvolvido para sobreposição é eficiente e converge com demais modelos desenvolvidos na literatura, sendo que, para uma sobreposição adequada à distância entre centros de cordões deve ser igual a 67% da largura do cordão base;
- O algoritmo de predição de parâmetros mostrou-se eficaz, uma vez que a parametrização segmentada das peças é feita de maneira adaptativa baseada na base de dados e diretrizes pré-estabelecidas.
- O algoritmo mostrou-se eficaz não só para parametrização de peças, mas para revestimento e construção de anexos.

6. REFERÊNCIAS

- Ali, Y. *et al.* Wire arc additive manufacturing of hot work tool steel with CMT process. *Journal of Materials Processing Technology*, v. 269, p. 109–116, 1 jul. 2019.
- Bai, X. *et al.* Numerical analysis of heat transfer and fluid flow in multilayer deposition of PAW-based wire and arc additive manufacturing. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, v. 124, p. 504–516, 1 set. 2018.
- Galeazzi, D. Desenvolvimento de um sistema integrado de manufatura aditiva por deposição a arco usando a variante GMAW com alimentação dinâmica CMT. [s.l.], tese de doutorado, UFSC, 2024.
- Ding, D. *et al.* A tool-path generation strategy for wire and arc additive manufacturing. *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, v. 73, n. 1–4, p. 173–183, 2014.
- Ding, D. *et al.* A practical path planning methodology for wire and arc additive manufacturing of thin-walled structures. *Robotics and Computer-Integrated Manufacturing*, v. 34, p. 8–19, 2015a.
- Ding, D. *et al.* A multi-bead overlapping model for robotic wire and arc additive manufacturing (WAAM). *Robotics and Computer-Integrated Manufacturing*, v. 31, p. 101–110, fev. 2015b.
- Ding, D. *et al.* Wire-feed additive manufacturing of metal components: technologies, developments and future interests. *International Journal of Advanced Manufacturing Technology* Springer London, , 26 out. 2015c.
- Ding, D. *et al.* Bead modelling and implementation of adaptive MAT path in wire and arc additive manufacturing. *Robotics and Computer-Integrated Manufacturing*, v. 39, p. 32–42, 1 jun. 2016.
- Frazier, W. E. Metal Additive Manufacturing: A Review. *Journal of Materials Engineering and Performance*, v. 23, n. 6, p. 1917–1928, 8 jun. 2014.
- Furukawa, K. New CMT arc welding process – welding of steel to aluminium dissimilar metals and welding of super-thin aluminium sheets. *Welding International*, v. 20, n. 6, p. 440–445, jun. 2006.
- Mehnen, J. *et al.* Design for Wire and Arc Additive Layer Manufacture. *Em: Global Product Development*. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, 2011. p. 721–727.
- Mvola, B.; Kah, P.; Layus, P. Review of current waveform control effects on weld geometry in gas metal arc welding process. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, v. 96, n. 9–12, p. 4243–4265, 22 jun. 2018.
- Posch, G.; Chladil, K.; Chladil, H. Material properties of CMT—metal additive manufactured duplex stainless steel blade-like geometries. *Welding in the World*, v. 61, n. 5, p. 873–882, 17 set. 2017.
- Suryakumar, S. *et al.* Weld bead modeling and process optimization in Hybrid Layered Manufacturing. *CAD Computer Aided Design*, v. 43, n. 4, p. 331–344, abr. 2011.
- Wang, Z. *et al.* Prediction of bead geometry with consideration of interlayer temperature effect for CMT-based wire-arc additive manufacturing. *Welding in the World*, v. 65, n. 12, p. 2255–2266, fev. 2021.
- Xiong, J. *et al.* Bead geometry prediction for robotic GMAW-based rapid manufacturing through a neural network and a second-order regression analysis. *Journal of Intelligent Manufacturing*, v. 25, n. 1, p. 157–163, fev. 2014.
- Xiong, J.; ZHANG, G. Adaptive control of deposited height in GMAW-based layer additive manufacturing. *Journal of Materials Processing Technology*, v. 214, n. 4, p. 962–968, 2014.
- Yang, Q. *et al.* Microstructure and mechanical properties of AlSi7Mg0.6 aluminum alloy fabricated by wire and arc additive manufacturing based on cold metal transfer (WAAM-CMT). *Materials*, v. 12, n. 16, 1 ago. 2019.

5. RESPONSABILIDADE PELAS INFORMAÇÕES

Os autores é são os únicos responsáveis pelas informações incluídas neste trabalho.

COBEF2025-0367 WIRE ARC ADDITIVE MANUFACTURING: CHALLENGES AND SOLUTIONS IN THE CONTROL OF THE CAD TO PART RELATIONSHIP

Daniel Galeazzi, daniel.galeazzi@posgrad.ufsc.br¹

Régis Henrique Gonçalves e Silva, regis.silva@ufsc.br¹

Mateus Barancelli Schwedersky, m.barancelli@ufsc.br¹

¹ Universidade Federal de Santa Catarina, LABSOLDA – UFSC

Abstract. Wire Arc Additive Manufacturing (WAAM) is an emerging process that has been gaining increasing interest in both industry and academia due to its ability to fabricate complex parts with minimal material waste and high industrial flexibility. Additionally, it allows for the production of customized parts using one or more materials, resulting in components with specific characteristics tailored to functional demands—a technique known as Functionally Graded Materials (FGM). However, for the manufactured parts to be functionally applicable in industrial environments, various technological and scientific barriers must be overcome. In this context, sophisticated welding processes are commonly employed, with GMAW, particularly its dynamic wire-feed variant, CMT (Cold Metal Transfer), being the most widely used. Despite the sophistication of the processes employed, many challenges remain. One of the main obstacles in Wire Arc Additive Manufacturing lies in the CAD to Part relationship, that is, ensuring the fidelity between the digital model (CAD) and the final produced part. To achieve this correspondence, welding parameters must be aligned with the deposition path by controlling vertical and horizontal increments, travel speed, and other path-related parameters to ensure they correspond to the weld bead dimensions, which are a direct result of the welding process. This work aims to explore the CAD to Part relationship, highlighting the main challenges and potential solutions for producing parts using carbon steel wire and the CMT process. To this end, a methodology was developed to address the related issues, focusing on mapping and understanding the geometric behavior of weld beads in their vertical, horizontal, and intersectional overlaps. This approach enabled the creation of a parameter database for the material and process employed, which, through an inference machine, predicts the necessary parameters for the deposition path (vertical increment, horizontal increment, and operational guidelines) to maintain the CAD to Part relationship. The results indicated that the developed method allows for accurate trajectory prediction, i.e., the increments. Using this algorithm, parts were fabricated, presenting appropriate geometry, free of defects, and with low standard deviation relative to the CAD model.

Keywords: Wire-arc direct energy deposition (WA-DED), Wire Arc Deposition-Based Additive Manufacturing, automation, MIG/MAG Welding, Expert system.

RESPONSIBILITY NOTICE

The author(s) is (are) the only responsible for the printed material included in this paper.