

# Controle Coordenado de Movimento de um Sistema Robótico Redundante para Manufatura Aditiva com Arame e Arco \*

Nicolas Lizarralde \* Fernando Coutinho \* Fernando Lizarralde \*

\* Programa de Eng. Elétrica, COPPE, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Brasil (e-mail: [nicolas.lizarralde, fernando.coutinho]@coppe.ufrj.br).

**Abstract:** This paper considers the trajectory tracking control of a robotic system for Wire Arc Additive Manufacturing (WAAM) of complex geometry parts. The considered (redundant) robotic system is composed by a robotic manipulator and a positioning table. In order to use the system redundancy, a task-priority based kinematic control scheme to control a manipulator and a positioning table coordinately is proposed. The manipulator and positioning table are considered as a single kinematic chain, defining the primary task as the trajectory tracking of the welding torch defined in the positioning table deposition frame and setting a secondary task to align the welding torch with a desired direction defined in the inertial frame (e.g., gravity direction). A complete Lyapunov stability analysis is performed considering unmodelled dynamics in the kinematic control loop. The effectiveness of the proposed method is shown experimentally on a WAAM robotic system composed of a six-axis industrial manipulator, a two-axis positioning table and a Cold Metal Transfer (CMT) power source.

**Resumo:** Neste trabalho é considerado o controle de seguimento de trajetória de um sistema robótico para Manufatura Aditiva com Arame e Arco (WAAM) de componentes de geometria complexa. O sistema robótico (redundante) considerado consiste num manipulador robótico e uma mesa posicionadora. Para aproveitar a redundância do sistema, é proposto um esquema de controle cinemático baseado em prioridade de tarefas para controlar coordenadamente o manipulador e a mesa. O conjunto manipulador/mesa é considerado como uma única cadeia cinemática, e define-se a tarefa principal como o seguimento de trajetória da tocha definida no sistema de coordenadas da deposição da mesa posicionadora e a tarefa secundária como alinhar a tocha com uma direção desejada definida no sistema de coordenadas inercial (e.g., na direção da gravidade). Uma análise completa da estabilidade de Lyapunov é realizada considerando a dinâmica não modelada na malha de controle cinemática. O método é validado através de experimentos realizados em um sistema robótico WAAM composto por um manipulador industrial de seis juntas, uma mesa posicionadora de dois eixos e uma fonte de solda Cold Metal Transfer (CMT).

**Keywords:** Additive Manufacturing; Coordinated Motion Control; Task-Priority Control; Robotic Manipulator

**Palavras-chaves:** Manufatura Aditiva; Controle de Movimento Coordenado; Controle por Prioridade de Tarefas; Manipulador Robótico

## 1. INTRODUÇÃO

Manufatura aditiva (AM) em metal, ou impressão 3D de metal, ganhou considerável interesse da academia e da indústria durante a última década. A AM em metal produz peças em camadas por fusão de pó ou arame, diferente de outros processos de fabricação comuns usados na indústria, como forjamento e fundição.

Dentre diversas formas de produção de peças metálicas com AM, destaca-se a Manufatura Aditiva com Arame e

Arco (*Wire Arc Additive Manufacturing* - WAAM) devido a sua capacidade de produzir peças grandes com geometrias distintas sem a necessidade de ferramentas especiais. WAAM é o processo que, auxiliado por um sistema robótico, deposita metal sobre uma superfície usando como matéria-prima um arame consumível combinado com um arco elétrico como fonte de calor. Sua principal vantagem é o uso de *hardware* padrão de soldagem robotizada robótica, como fonte de solda, tocha, sistema de alimentação de arame, mesa posicionadora, manipulador industrial e outros equipamentos e sensores de solda (Williams et al., 2016).

Em WAAM, a deposição é executada por meio de um braço robótico que guia a tocha ao longo da trajetória

\* Este trabalho foi financiado pela Shell Brasil Petróleo Ltda., Embrapii, ANP e Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior - Brasil (CAPES) - Código de Financiamento 001 e 88887.136349/2017-00, FAPERJ e CNPq.

planejada. Durante o processo de deposição, cada nova camada é depositada em cima das camadas já solidificadas enquanto se mantém a mesma distância bico de contato - peça (DBCP). Contudo, a altura de cada camada não é constante e depende de diversos parâmetros do processo (corrente elétrica do arco, velocidade de alimentação de arame, DBCP, velocidade de avanço, etc.). Portanto, a trajetória executada afeta diretamente a qualidade da peça impressa, pois é responsável por revestir cada camada com metal fundido, evitando eventuais falhas que possam ocorrer na peça final, como porosidade excessiva, falta de fusão e falha nas especificações geométricas.

Além disso, a direção da tocha e a inclinação da superfície são parâmetros importantes do processo. A direção da tocha tem grande influência sobre a penetração e a geometria do cordão depositado (Yao et al., 2020), e pode ser considerada flexível, já que sua variação ainda possibilita a produção de peças de qualidade desde que limitada a uma faixa (Evjemo et al., 2020). Uma inclinação excessiva da superfície de deposição pode fazer com que o material fundido se espalhe para áreas indesejáveis, o que pode levar a falhas como camadas irregulares ou falta de fusão entre as diferentes camadas (Bhatt et al., 2021).

O ângulo entre a direção de fabricação e a normal da superfície de deposição também é um parâmetro do processo WAAM que desperta interesse e precisa ser explorado, pois permite produzir peças de geometrias complexas (Xiong et al., 2017; Radel et al., 2019; Ni et al., 2022). Contudo, são necessários estudos aprofundados sobre a peça depositada, como tensões superficiais ou análise do centróide do cordão, para ajustar o parâmetro de deposição antes de produzir uma peça que atenda aos requisitos estabelecidos.

Comumente as mesas posicionadoras não são usadas de forma ativa durante a deposição. No entanto, os graus de liberdade (DOFs) adicionados ao sistema pela mesa posicionadora permitem o desenvolvimento de deposições multi-direcionais reorientando a peça durante o processo de deposição, reduzindo significativamente o tempo de produção (Ding et al., 2017) e aumentando a uniformidade de peças com geometria complexa. Convencionalmente, em processos de manufatura aditiva, a orientação da tocha é ortogonal a superfície de deposição (substrato), então as mesas posicionadoras são normalmente usada para alinhar a normal da superfície de deposição com o vetor de gravidade (Ding et al., 2017; Panchagnula and Simhambhatla, 2018) ou incorporar uma seção do substrato a peça final de forma a minimizar os gastos de produção (Lockett et al., 2017).

O movimento coordenado manipulador/mesa posicionadora é abordado para tarefas de soldagem em Ahmad and Luo (1988), onde calcula-se a cinemática inversa do braço em termos do caminho de soldagem e o movimento da mesa é restringido de forma a garantir que a normal da superfície de soldagem esteja na direção da gravidade, enquanto as singularidades da cadeia cinemática são evitadas utilizando otimização não linear. O alinhamento entre a direção da tocha, normal da superfície e vetor de gravidade também é tratado em Kim et al. (1998), onde foi desenvolvida uma metodologia para o planejamento de trajetória que garante o alinhamento desses vetores de forma a melhorar a qualidade da soldagem.

Neste trabalho, considera-se o problema de seguimento de trajetória para um sistema WAAM composto por um robô manipulador e uma mesa posicionadora. O objetivo de controle é fazer com que o ponto central da ferramenta (Tool Center Point - TCP) execute uma trajetória de deposição definida no sistema de coordenadas de deposição solidário ao flange da mesa posicionadora. O TCP também deve seguir uma orientação desejada com respeito ao sistema inercial, como por exemplo manter a direção da gravidade. Para que ambos objetivos sejam alcançados, utiliza-se o conceito de prioridade de tarefas para robôs redundantes (Nakamura et al., 1987). Nesta abordagem, é definido um objetivo principal (rastreamento da trajetória de deposição, por exemplo) e cada subtarefa (alinhamento da orientação da tocha com o vetor de gravidade) é definida no espaço nulo da tarefa de maior prioridade.

A principal contribuição deste trabalho é o uso completo da redundância do sistema WAAM robótico para o controle coordenado de movimento da pose da tocha enquanto também se considera restrições adicionais do processo, como por exemplo alinhamento da tocha ou restrições de velocidade/aceleração. Uma análise de estabilidade completa demonstra a propriedade de estabilidade assintótica do sistema em malha fechada, inclusive considerando a presença de dinâmicas não-modeladas (ex. da malha interna de controle do robô), que garante a performance da deposição.

Além disso, a estratégia proposta permite o uso ativo da mesa posicionadora durante deposições, tornando o processo de AM mais versátil, aumentando a variedade de peças que podem ser produzidas. Adicionalmente, o esquema proposto aceita correções de trajetória durante a deposição utilizando dados de sensores (câmeras, perfilômetros, etc), permitindo controle da geometria do cordão.

Resultados experimentais obtidos a partir de um robô Kuka KR90 e uma mesa posicionadora Kuka KP2 ilustram a viabilidade do método proposto.

## 2. FORMULAÇÃO DO PROBLEMA

Este trabalho aborda o tema de produção de peças complexas por WAAM sob uma perspectiva de controle para rastreamento de trajetória de robôs industriais. O processo de produção de peças complexas por WAAM parte de um modelo CAD que é dividido em seções (para a abordagem multidirecional ou para aumentar a qualidade da peça redistribuindo a transferência de calor, por exemplo) e cada seção é dividida em camadas. Uma seção serve como a superfície de deposição para uma seção subsequente que é geralmente uma superfície não plana, ex. flanges e tubos. A Figura 1 mostra o procedimento de um flange com pescoço produzido por WAAM.

A deposição do flange com pescoço de aço é uma tarefa desafiadora. O tubo central é depositado para criar a estrutura principal (Figura 1b-c) e depois é espessado quando necessário, para criar o anel externo (Figura 1d-e) para formar a estrutura da peça completa (Figura 1f).

Portanto, deseja-se realizar, com o TCP do robô, o seguimento de trajetória de posição e orientação definida no sistema de coordenadas de deposição enquanto a orienta-

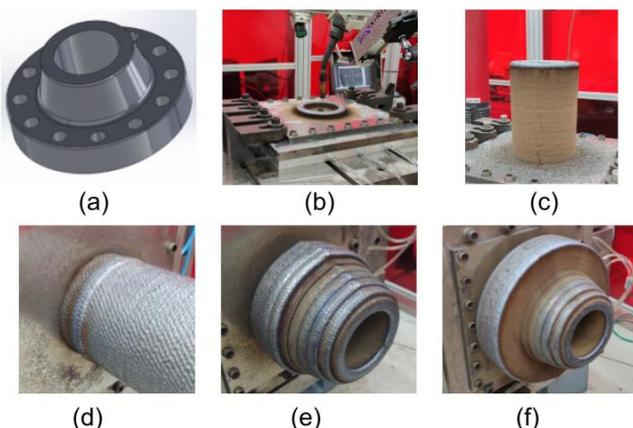


Figura 1. Procedimento de deposição do flange com pescoço: (a) CAD do flange, (b) deposição das primeiras cinco camadas do tubo central, (c) tubo central totalmente depositado, (d) espessamento do tubo central, (e) deposição do anel externo, (f) flange totalmente depositado, pronto para pós-processamento

ção do TCP mantém uma orientação relativa ao sistema de coordenadas inercial.

O sistema discutido neste trabalho consiste em um braço robótico de  $n$  graus de liberdade ( $n$ -DOF) ( $n \geq 6$ ) com uma tocha de solda e uma mesa posicionadora, que definem uma cadeia cinemática redundante de  $m$ -DOF. A configuração do sistema junto com alguns sistemas de coordenadas importantes usados neste artigo são mostrados em Figura 2.

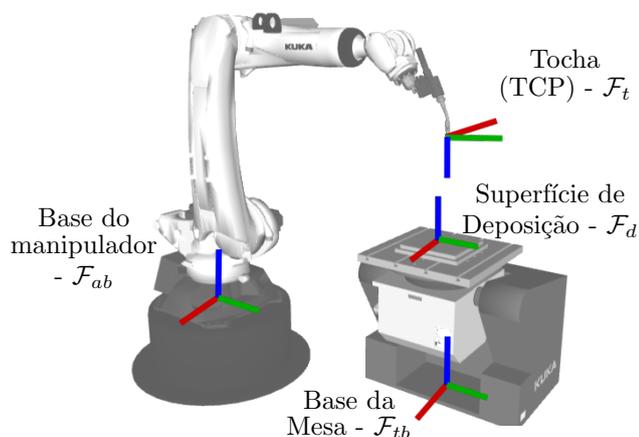


Figura 2. Configuração do sistema WAAM, composto por manipulador de 6-DOF e mesa posicionadora de 2-DOF.

Considera-se que a trajetória desejada é livre de singularidades e pré-planejada, possivelmente por um *software* que é capaz de planejar a trajetória a partir de um modelo CAD da peça a ser produzida (Michel et al., 2019). Também se considera que o manipulador industrial tem cadeia cinemática conhecida, além de uma malha interna de controle de velocidade suficientemente rápida de modo que o controle cinemático baseado em comandos de velocidade de juntas seja implementado.

Para fabricar uma peça usando um processo WAAM em uma superfície não plana, os vetores normais da superfície

(ou direções de fabricação) podem se desalinhar do vetor de gravidade. Para algumas outras tarefas de deposição, pode ser necessário inclinar a direção da tocha em relação a esses outros vetores. A Figura 3 mostra uma representação desses vetores para uma tarefa a ser executada em um substrato de superfície curva.

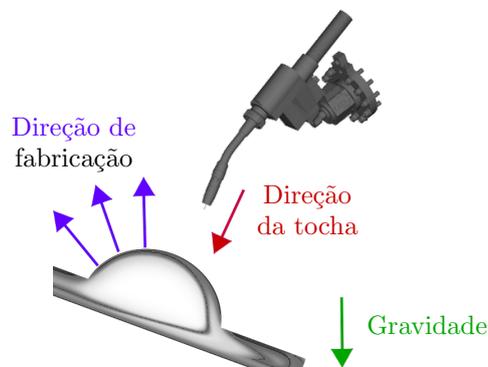


Figura 3. Representação da deposição em um substrato curvo.

A solução proposta neste trabalho consiste em uma estratégia de controle coordenado de movimento baseado em prioridade de tarefas para sistemas robóticos redundantes. A ideia principal é controlar o sistema robótico de forma a realizar uma tarefa de deposição, onde o TCP, definido na ponta da tocha de solda, segue uma trajetória desejada mantendo o DBCP a uma distância constante da superfície de deposição. A trajetória é definida com respeito ao sistema de coordenadas de deposição, que, controlando a mesa posicionadora, é compensada pelo movimento do braço para controlar o ângulo entre a direção da tocha, o vetor normal da superfície de deposição e o vetor de gravidade. Assim, um controle coordenado do braço do robô e da mesa posicionadora é extremamente relevante.

### 3. MODELO CINEMÁTICO

Para executar o controle de movimento coordenado do sistema, o braço robótico e a mesa posicionadora são considerados como uma única cadeia cinemática de  $m$ -DOF. Neste caso, a base da cadeia cinemática é definida no sistema de coordenadas de deposição ( $\mathcal{F}_d$ ), passando pelo sistemas de coordenadas da base da mesa ( $\mathcal{F}_{tb}$ ), pela base do manipulador ( $\mathcal{F}_{ab}$ ), e termina no sistema de coordenadas do TCP ( $\mathcal{F}_t$ ) (Figura 2).

A cinemática direta é dada por (Siciliano et al., 2009):

$$x = \begin{bmatrix} p \\ q \end{bmatrix} = k(\theta) \quad (1)$$

onde  $x$  é a pose do TCP em relação a  $\mathcal{F}_d$ ,  $p \in \mathbb{R}^3$  é a posição do TCP,  $q = [q_s \ q_v^T]^T$  é o quatérnio unitário que representa a orientação  $R \in SO(3)$  do TCP, onde  $q_s \in \mathbb{R}$  e  $q_v \in \mathbb{R}^3$  são as partes escalar e vetorial do quatérnio (Siciliano et al., 2009), e  $\theta \in \mathbb{R}^m$  é o vetor de posição de juntas. Observe que  $\theta$  consiste nas posições de juntas da mesa posicionadora e do manipulador, o que significa  $\theta = [\theta_t^T \ \theta_a^T]^T$ , onde  $\theta_t \in \mathbb{R}^{m-n}$  é o vetor de posição de juntas da mesa posicionadora, e  $\theta_a \in \mathbb{R}^n$  é o vetor de posição de juntas do manipulador.

A cinemática diferencial é dada por:

$$v = \begin{bmatrix} \dot{p} \\ \dot{\omega} \end{bmatrix} = J(\theta) \dot{\theta} \quad (2)$$

onde  $\dot{p}, \dot{\omega} \in \mathbb{R}^3$  são as velocidades linear e angular do TCP, respectivamente, em relação a  $\mathcal{F}_d$ ,  $\dot{\theta} \in \mathbb{R}^m$  é o vetor de velocidade de juntas, e  $J(\theta) \in \mathbb{R}^{6 \times m}$  é o jacobiano que representa o mapeamento de velocidade de juntas  $\dot{\theta}$  para velocidades lineares/angulares do TCP ( $v$ ) em relação ao  $\mathcal{F}_d$ , representadas em  $\mathcal{F}_d$ .

O modelo cinemático (2) tem a seguinte propriedade (Dixon, 2007):

**(P1)** O Jacobiano  $J(\theta)$  é limitado para todo  $\theta$ , i.e.  $\|J(\theta)\|_\infty \leq c_0, \forall \theta_i \in [0, 2\pi)$ , onde  $c_0 > 0$  e  $i = 1, \dots, m$ .

Além disso, a relação entre a derivada do quatérnion ( $\dot{q}$ ) e a velocidade angular ( $\omega$ ) é dada pelo Jacobiano de representação ( $J_r(q)$ ):

$$\dot{q} = J_r(q)\omega = \frac{1}{2} \begin{bmatrix} -q_v^T \\ q_s I - q_v \times \end{bmatrix} \omega \quad (3)$$

onde  $(q_v \times)$  é a matriz antissimétrica que representa o produto vetorial.

#### 4. CONTROLE CINEMÁTICO

A maioria dos manipuladores industriais/comerciais possuem a arquitetura de controle fechada no sentido que o usuário não pode modificar o algoritmo e parâmetros do controlador das juntas. Portanto, consideraremos o caso de manipuladores que permitem o comando via velocidade de juntas  $u$ , e que possuem um controlador interno que garante que  $\dot{\theta} - u \in \mathcal{L}_2 \cap \mathcal{L}_\infty$ , ou seja, suficientemente rápido.

Desta forma, considerando a abordagem de controle cinemático, o movimento do robô pode ser descrito por:

$$\dot{\theta}_i = u_i + \sigma_i, \quad i = 1, \dots, m \quad (4)$$

em que  $\dot{\theta}_i$  é a velocidade angular da  $i$ -ésima junta,  $u_i$  é o sinal de controle de velocidade comandando o driver do motor da  $i$ -ésima junta, e  $\sigma_i \in \mathcal{L}_2 \cap \mathcal{L}_\infty$  é um sinal que caracteriza a dinâmica não modelada da  $i$ -ésima junta (proveniente da malha interna de controle dinâmico do manipulador).

*Observação 1.* A condição  $\dot{\theta} - u \in \mathcal{L}_2 \cap \mathcal{L}_\infty$  pode ser considerada como uma hipótese ad-hoc (comumente adotada na implementação de controle cinemático), mas é viável/aceitável na maioria das aplicações de robôs industriais/comerciais (Wang et al., 2018).

Assim, substituindo (4) em (2), obtém-se o seguinte sistema de controle:

$$v = J(\theta) (u + \sigma) \quad (5)$$

e o sinal de controle  $u$  pode ser projetado para fazer  $(p, q)$  seguirem uma trajetória desejada  $(p_d, q_d)$ . Como o sistema é redundante, restrições adicionais também podem ser satisfeitas. A seguinte lei de controle é utilizada:

$$u = J^\dagger(\theta) u_k + J^\#(\theta) \mu \quad (6)$$

onde  $J^\dagger \in \mathbb{R}^{m \times 6}$  é a matriz pseudo-inversa de  $J$  que minimiza localmente a norma da velocidade das juntas, e  $J^\# \in \mathbb{R}^{m \times m}$  expande o espaço nulo de  $J$ :

$$J^\dagger = J^T (J J^T)^{-1} \rightarrow J J^\dagger = I \quad (7)$$

$$J^\# = I - J^\dagger J \rightarrow J J^\# = 0 \quad (8)$$

Assim, o sistema (5)–(6) é dado por:

$$v = u_k + J(\theta) \sigma \quad (9)$$

onde  $u_k$  é projetado para que a pose do TCP siga uma trajetória desejada. A variável de controle adicional  $\mu$  em (6) não afeta a pose do TCP ( $\mu$  está no espaço nulo do Jacobiano) e, portanto, pode ser usada para realizar uma tarefa secundária com o grau adicional de mobilidade  $m-n$ , ex. alinhar o eixo  $z$  do TCP com o vetor de gravidade para fins de deposição.

A relação (9) é válida se e somente se as seguintes hipóteses são verdadeiras (Leite et al., 2020): **(A1)** o modelo cinemático do robô é conhecido; **(A2)** a lei de controle  $v_k$  não leva o manipulador para configurações singulares.

##### 4.1 Projeto de Controle da Tarefa Primária

O erro de posição  $e_p$  é definido por  $e_p = p_d - p$  onde  $p_d$  é a posição desejada de  $\mathcal{F}_t$  em relação a  $\mathcal{F}_d$ , dada pela trajetória de deposição. O erro de orientação  $e_q$  é definido por  $e_q = [e_{qs} \quad e_{qv}^T]^T = q_d \otimes q^{-1}$  onde  $q_d$  é a orientação desejada de  $\mathcal{F}_t$  em relação a  $\mathcal{F}_d$ , e  $\otimes$  denota o operador de produto de quatérnions.

O sinal de controle  $u_k$  é definido:

$$u_k = \begin{bmatrix} K_p e_p \\ K_o e_{qv} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \dot{p}_d \\ \dot{\omega}_d \end{bmatrix} \quad (10)$$

onde  $K_p = k_p I$  e  $K_o = k_o I$  são os ganhos do controlador, e  $\dot{p}_d, \dot{\omega}_d \in \mathbb{R}^3$  são as velocidades linear e angular desejadas, respectivamente.

Assim, considerando (9) e (10), a dinâmica do erro em malha fechada é dada por:

$$\begin{bmatrix} \dot{e}_p \\ \dot{e}_q \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \dot{p}_d - \dot{p} \\ \dot{\omega}_d - \omega \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -K_p e_p \\ -K_o e_{qv} \end{bmatrix} - J(\theta) \sigma \quad (11)$$

e  $K_p, K_o > 0$ .

Considerando a propriedade **(P1)**,  $J(\theta) \in \mathcal{L}_\infty$ , e dado que  $\sigma \in \mathcal{L}_2 \cap \mathcal{L}_\infty$ , então  $J(\theta)\sigma \in \mathcal{L}_2$ . Assim, pode-se considerar que existe uma constante positiva  $L_m$  tal que  $\int_0^t \sigma^T J^T J \sigma d\tau \leq L_m$ . Portanto, podemos apresentar o seguinte teorema com propriedades da estabilidade do sistema em malha fechada:

*Teorema 1.* Considere o sistema em malha fechada descrito por (11). Considere que  $p_d(t)$  é contínuo por partes e uniformemente limitado. Sob as hipóteses (A1) e (A2), e considerando  $\sigma \in \mathcal{L}_2 \cap \mathcal{L}_\infty$ , as seguintes propriedades são satisfeitas: (i) todos os sinais do sistema em malha fechada são uniformemente limitados; (ii)  $\lim_{t \rightarrow \infty} e_p(t) = 0$ ,  $\lim_{t \rightarrow \infty} e_{qv} = 0$  e  $\lim_{t \rightarrow \infty} e_{qs}(t) = \pm 1$ .

*Prova:* vide (Lizarralde et al., 2021).

##### 4.2 Projeto de Controle da Tarefa Secundária

A variável de controle adicional  $\mu$  em (6) pode ser usada para realizar uma tarefa secundária com os graus de mobilidade redundantes  $m-n$ .

Aqui, a tarefa secundária é alinhar o eixo  $z$  do TCP com a direção da gravidade (ou qualquer outra direção desejada

descrita no sistema de coordenadas inercial). Assim,  $\omega$  pode ser projetada para controlar 2 graus de mobilidade redundantes para alinhar o eixo  $z$  do TCP em uma direção desejada  $z_d$  sem alterar a pose  $x$  do TCP em relação a  $\mathcal{F}_d$ .

Considere agora a cinemática diferencial do manipulador, examinando apenas a velocidade angular do TCP com respeito a  $\mathcal{F}_{ab}$  dado por:

$$\omega_a = J_{ao}(\theta) \dot{\theta} \quad (12)$$

onde  $\omega_a$  é a velocidade angular do TCP com respeito a  $\mathcal{F}_{ab}$ , e  $J_{ao} \in \mathbb{R}^{3 \times n}$  é o Jacobiano de orientação do manipulador. Note que, nesse caso, as primeiras  $m - n$  colunas de  $J_{ao}$  são zeros dado que  $\omega_a$  não depende das juntas da mesa.

Naturalmente, a tarefa de alinhar o TCP com uma direção desejada  $z_d$  (por exemplo, vetor de gravidade) pode ser realizada controlando as rotações em torno dos eixos  $x$  e  $y$ . Portanto, é conveniente particionar (12) como:

$$\omega_a = \begin{bmatrix} \omega_s \\ \omega_z \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} J_s(\theta) \\ J_z(\theta) \end{bmatrix} \dot{\theta} \quad (13)$$

onde  $\omega_s \in \mathbb{R}^2$ ,  $\omega_z \in \mathbb{R}$ ,  $J_s(\theta) \in \mathbb{R}^{2 \times m}$  e  $J_z(\theta) \in \mathbb{R}^{1 \times m}$ . Assim, de (13) e (4), o sistema de controle nesses DOFs é dado por:

$$\omega_s = J_s(\theta) [u + \sigma] \quad (14)$$

onde o sinal de controle completo  $u$  é considerado (velocidade de juntas da mesa/manipulador).

Substituindo a lei de controle cinemática proposta (6) em (14):

$$\omega_s = J_s(\theta) J^\dagger(\theta) u_k + J_s(\theta) J^\#(\theta) \mu + J_s(\theta) \sigma \quad (15)$$

Desta forma,  $\mu$  pode ser projetado para obter a dinâmica de  $\omega_s$  desejada:

$$\mu = (J_s J^\#)^\dagger [-J_s J^\dagger u_k + \mu_k] \quad (16)$$

onde  $\mu_k \in \mathbb{R}^2$  pode ser projetado para realizar a segunda tarefa desejada.

Assim, considerando (15) e (16):

$$\omega_s = \mu_k + J_s(\theta) \sigma \quad (17)$$

*Observação 2.* Considerando a seguinte propriedade (Maciejewski and Klein, 1985):  $J^\#(J_\phi J^\#)^\dagger = (J_\phi J^\#)^\dagger$ , e  $\mu$  dado por (16), então a lei de controle  $u$  (6) pode ser implementada como:  $u = J^\dagger(\theta) u_k + \mu$ .

Considerando  $z_t$  o eixo  $z$  do TCP ( $\mathcal{F}_t$ ) e a direção  $z_d$  desejada, ambos representados em  $\mathcal{F}_{ab}$ , o erro de orientação pode ser definido em termos de quatérnio unitário (Siciliano et al., 2009):

$$e_0 = \cos\left(\frac{\alpha}{2}\right) \\ e_s = \sin\left(\frac{\alpha}{2}\right) r = [e_{s_{qv1}} \ e_{s_{qv2}} \ 0]^T \quad (18)$$

onde  $\alpha$  é o ângulo entre  $z_t$  e  $z_d$ , e  $r$  é o eixo da rotação necessária para alinhar  $z_t$  e  $z_d$ . Note que  $e_s \rightarrow 0$  para  $z_t \rightarrow z_d$ . A dinâmica do erro é dada por:

$$\begin{bmatrix} \dot{e}_0 \\ \dot{e}_s \end{bmatrix} = J_r \begin{bmatrix} e_0 \\ e_s \end{bmatrix} \omega_a \quad (19)$$

e o sinal de controle  $\mu_k$  da tarefa secundária pode ser definido:

$$\mu_k = K_s [e_{s_{qv1}} \ e_{s_{qv2}}]^T \quad K_s > 0 \quad (20)$$

portanto podemos apresentar o seguinte teorema com propriedades da estabilidade da tarefa secundária:

*Teorema 2.* Considere o sistema em malha fechada descrito por (19)-(20). Sob as hipóteses (A1) e (A2), e considerando  $\sigma \in \mathcal{L}_2 \cap \mathcal{L}_\infty$ , as seguintes propriedades são satisfeitas: (i) todos os sinais do sistema em malha fechada são uniformemente limitados; (ii)  $\lim_{t \rightarrow \infty} e_s = 0$ , ou seja,  $\lim_{t \rightarrow \infty} z_t = z_d$ .

*Prova:* Similar à prova do Teorema 1, mas considerando a candidata a função de Lyapunov:

$$V = (1 - e_0)^2 + e_s^T e_s \quad (21)$$

## 5. CONFIGURAÇÃO EXPERIMENTAL

Nos testes experimentais, utilizamos um sistema robótico composto por um braço robótico Kuka KR90 de 6DOF e uma mesa posicionadora Kuka KP2 de 2DOF, ambos controlados por um controlador Kuka KRC4 com complementos de software Kuka.RSI (Robot Sensor Interface) instalados (Arbo et al., 2020). A tocha, conectada a uma fonte de solda Fronius CMT, é conectada ao efetuador do robô (Figura 4).

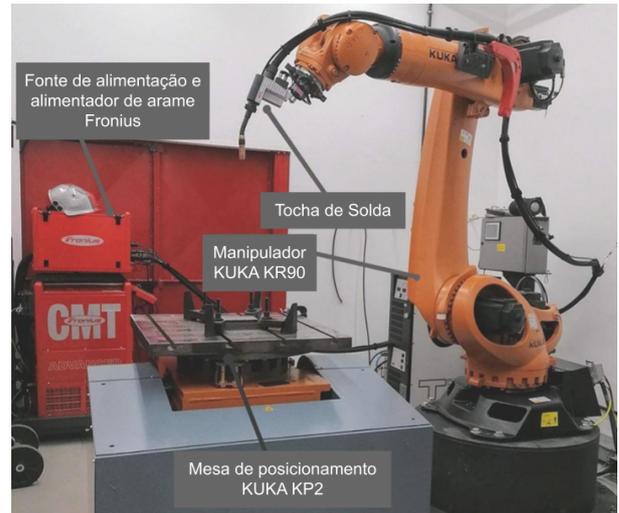


Figura 4. Configuração do sistema WAAM, consistindo em um manipulador KUKA KR90, mesa posicionadora KUKA KP2, tocha de solda, fonte de solda Fronius CMT e um alimentador de arame.

Kuka.RSI é uma interface de software para comunicação entre o robô industrial e um conjunto de sensores. Com um KRC4 que tenha RSI instalado, pode-se configurar uma interface Ethernet para conectar com um computador rodando um servidor User Datagram Protocol (UDP), permitindo uma comunicação em tempo real (ciclo de 4ms) do robô com um PC, permitindo a leitura da posição de junta do robô e envio de comandos de correção de posição de junta.

Um PC rodando Linux OS Ubuntu 18.04 LTS é usado para executar o Robot Operating System (ROS) Melodic, um *framework* de código aberto para o desenvolvimento de aplicações robóticas. Uma versão modificada do pacote ROS *kuka\_experimental* (Eriksen, 2017) é utilizada para comunicação com a rede RSI através de uma *hardware interface*. As mudanças foram feitas para incluir os modelos

KR90 e KP2 e para aceitar comandos de velocidade ao invés de usar o *framework ros\_control* (Chitta et al., 2017). Embora exista um tópico ROS que permite a publicação de comandos de velocidade, o *hardware interface* calcula e envia os comandos para o KRC4 como correções de posição conjunta a uma taxa fixa de 250 Hz.

Um segundo PC é usado para implementar o algoritmo de controle no MATLAB R2021a. O ROS Toolbox é usado para executar um nó de ROS que se comunica com o ROS master do primeiro PC. O algoritmo de controle adquire informações de posição da junta pelo tópico */joint\_states* e envia a velocidade de junta desejada para o tópico */robot\_joint\_command* a 50 Hz. A Figura 5 mostra um diagrama ilustrando a configuração da comunicação.

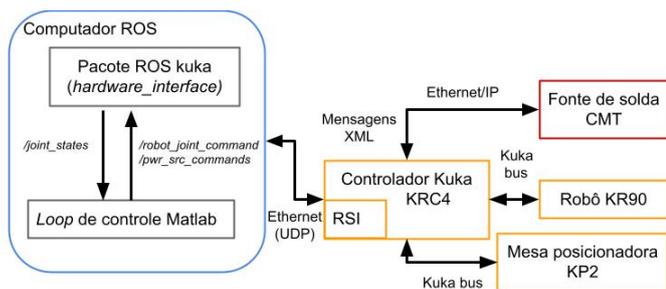


Figura 5. Diagrama da comunicação utilizada nos experimentos

## 6. RESULTADOS EXPERIMENTAIS

Resultados experimentais usando a configuração descrita na Seção 5 são apresentados para ilustrar a estratégia de controle proposta. Para explorar o problema do movimento coordenado, um cilindro de aço é fixado no topo da mesa posicionadora e a trajetória de deposição é planejada na superfície do cilindro. Para fins de demonstração da estratégia de controle, trajetórias senoidais são utilizadas devido à sua simplicidade, mas outras trajetórias de deposição comuns também podem ser executadas, como passo paralelo e oscilado. Para representar uma simulação do processo de deposição, uma caneta é fixada na ponta da tocha com o objetivo de traçar a trajetória desejada na superfície do cilindro (Figura 6).

### 6.1 Calibração da localização do cilindro

Primeiramente, a posição do cilindro com relação a  $\mathcal{F}_d$  foi determinada utilizando um laser 2D (perfilômetro), montado no efetuador do braço robótico. Os perfilômetros geralmente são usados apenas para analisar o perfil 2D de pequenas seções da peça e medir folgas, degraus e ângulos. No entanto, agrupando cada perfil escaneado, uma nuvem de pontos 3D da peça pode ser construída, assumindo que a pose do perfilômetro em relação ao TCP (e, portanto, em relação a um sistema de coordenadas inercial) é conhecida. Ainda assim, os perfilômetros geralmente têm um alcance limitado ( $\sim 250$  mm). Portanto, um braço robótico equipado com um perfilômetro (Figura 7) pode ser usado para executar uma trajetória de varredura desejada.

A estratégia de controle coordenado proposta foi utilizada para manter o perfilômetro 250 mm acima da superfície do cilindro, a partir de uma estimativa aproximada de sua



Figura 6. Configuração experimental: cilindro acoplado à mesa posicionadora e a caneta acoplada à ponta da tocha.

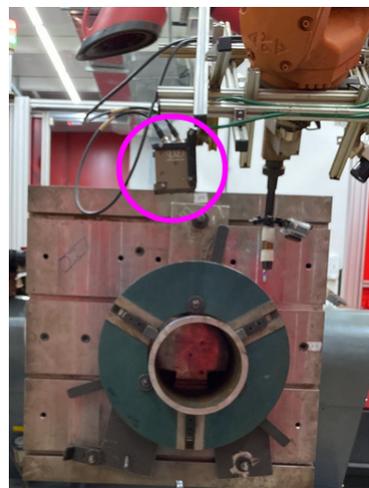


Figura 7. Perfilômetro (Micro-Epsilon scanCONTROL 2950-100/BL) acoplado no efetuador do manipulador.

posição. Para este experimento,  $p_{dz}$  em (22) é mantido constante para que o perfilômetro possa varrer uma determinada seção do cilindro.

Escaneamento do Cilindro - Nuvem de Pontos

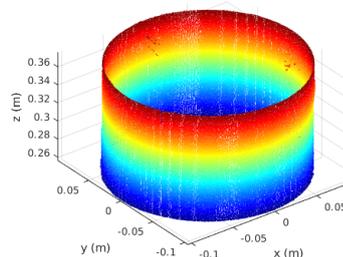


Figura 8. Nuvem de pontos gerada a partir do escaneamento do cilindro.

A nuvem de pontos resultante é mostrada na Figura 8. Observe que a seção do cilindro ilustrada pela nuvem de pontos não representa o cilindro inteiro, pois a altura real do cilindro é de aproximadamente 30 cm, que é maior que o campo de medição do perfilômetro. Ainda assim,

a nuvem de pontos pode ser usada para calibrar o cilindro por meio da função `pcfitcylinder()` no MATLAB (*PCL library*), resultando numa estimativa das características do cilindro (direção do eixo principal, posição de sua base, entre outras), utilizadas para realização dos experimentos posteriores.

### 6.2 Experimento 1 - Trajetória senoidal

No primeiro experimento, o objetivo é uma trajetória de deposição na superfície de um cilindro. A trajetória consiste em uma onda senoidal na superfície, mantendo o efetuador normal à superfície. O efetuador também deve estar paralelo à direção da gravidade ao longo de toda a trajetória, descrita em (22)-(27).

$$p_d(t) = \begin{bmatrix} p_{dx}(t) \\ p_{dy}(t) \\ p_{dz}(t) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} (-0,1493) \sin(2\pi t/120) \\ (0,1493) \cos(2\pi t/120) \\ (0,03) \cos(2\pi t/6) + 0,2109 \end{bmatrix} \text{ m} \quad (22)$$

$$q_d(t) = q_0(t) \otimes q_1 \quad (23)$$

$$z_d = [0 \ 0 \ -1] \quad (24)$$

onde:

$$\gamma(t) = \text{atan2}(p_{dy}(t), p_{dx}(t)) \quad (25)$$

$$q_0 = [\cos(\gamma(t)/2) \ 0 \ 0 \ \sin(\gamma(t)/2)]^T \quad (26)$$

$$q_1 = [0,7071 \ 0 \ -0,7071 \ 0]^T \quad (27)$$

O sistema é inicializado próximo à posição inicial da trajetória. Na primeira etapa do experimento, o TCP vai para a posição inicial da trajetória, e então em torno de  $t = 4,1$  s a trajetória começa.

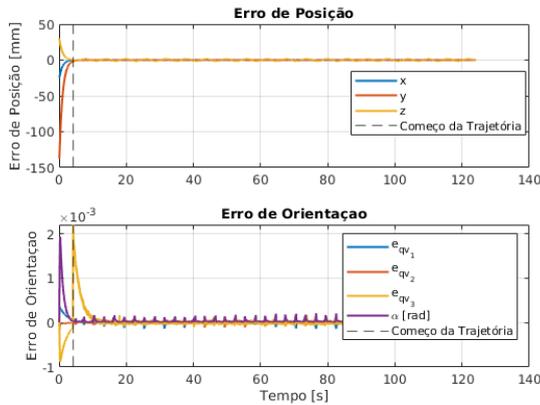


Figura 9. Experimento 1: Erro de seguimento da tarefa primária ( $e_p$ ,  $e_{qv}$ ) e desalinhamento de orientação da tarefa secundária ( $\alpha$ ).

Pode-se observar na Figura 9 que o erro de posição converge para zero na primeira seção do experimento, quando o TCP vai para a posição inicial da trajetória. Após o início da trajetória, pode-se notar que o elemento  $z$  de  $e_p$  oscila com amplitude de 1 mm. Essa oscilação residual é causada por um pequeno atraso de 0,1 s na comunicação devido à resposta do KRC4, além da comunicação ROS (Arbo et al., 2020). A Figura 9 também ilustra o comportamento do erro de orientação do TCP em relação a  $\mathcal{F}_d$  e  $\mathcal{F}_{ab}$ . Pode-se observar que  $e_{qv}$  (erro de orientação do TCP com respeito a  $\mathcal{F}_d$ ) e  $\alpha$  (desalinhamento entre  $z_t$  e  $z_d$ , definido em (18)) são aproximadamente zero ao longo de toda a trajetória.

### 6.3 Experimento 2 - Trajetória senoidal com inclinação

No segundo experimento, o objetivo é uma trajetória de deposição constituída por uma onda senoidal, semelhante à primeira. No entanto, o efetuador deve estar levemente inclinado (10 graus) em relação à normal da superfície, mas ainda sendo paralelo à direção da gravidade ao longo de toda a trajetória (Figura 10). A única mudança está em (27), que foi modificada para:

$$q_1 = [0,6482 \ 0 \ -0,7660 \ 0]^T \quad (28)$$

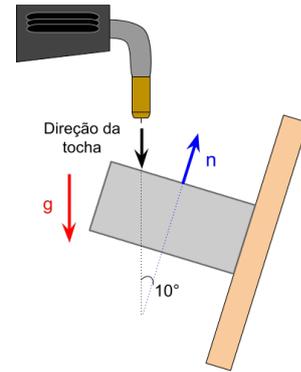


Figura 10. Orientação desejada para o TCP em relação à superfície do cilindro e ao vetor de gravidade.

O sistema é inicializado próximo à posição inicial da trajetória, com o TCP apontando para a normal da superfície do cilindro. Portanto, na primeira seção do experimento, quando o TCP vai para a posição inicial da trajetória, a mesa se move aproximadamente 10 graus em torno de seu eixo de inclinação, e em torno de  $t = 8,0$  s a trajetória começa.

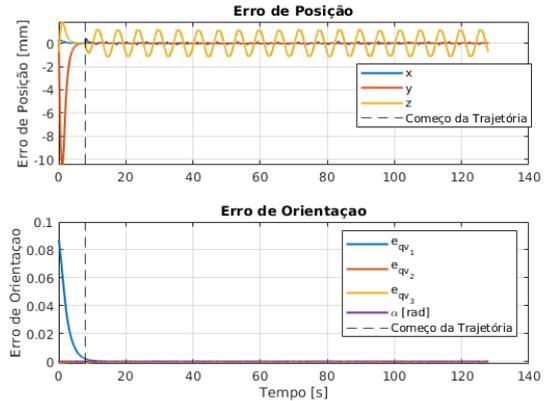


Figura 11. Experimento 2: Erro de seguimento da tarefa primária ( $e_p$ ,  $e_{qv}$ ) e desalinhamento de orientação da tarefa secundária ( $\alpha$ ).

O erro de posição, observado na Figura 11, converge para zero na primeira etapa do experimento, quando o TCP vai para a posição inicial da trajetória. Após o início da trajetória, pode-se notar que o elemento  $z$  de  $e_p$  também oscila com amplitude de 1,5 mm, também causado por atraso na comunicação. A Figura 11 também descreve o comportamento do erro de orientação do TCP. Observe que o erro de orientação inicial não é tão próximo de zero quanto no Experimento 1. No entanto, após o início da

trajetória, pode-se ver que  $e_{qv}$  e  $\alpha$  são aproximadamente zero ao longo de toda a trajetória.

## 7. CONCLUSÕES

Neste trabalho é considerado o movimento coordenado de um robô de soldagem e uma mesa posicionadora, utilizada de forma ativa, para realizar deposições com WAAM. Os dois robôs são considerados uma única cadeia cinemática redundante e, usando um esquema de controle cinemático baseado em prioridade de tarefas, uma estrutura é desenvolvida para permitir que a trajetória de deposição seja realizada mantendo os ângulos desejados entre a normal da superfície de deposição, direção da tocha e direção da gravidade.

A estabilidade assintótica do sistema em malha fechada é demonstrada via Lyapunov, considerando a dinâmica não modelada da malha de controle interna do manipulador. A eficácia da abordagem foi demonstrada em dois robôs industriais Kuka usando comandos de correção de posição de juntas.

Para trabalhos futuros uma deposição real de um flange com pescoço será realizada e estudaremos o planejamento automático da trajetória da camada subsequente utilizando um perfilômetro para mapear o cordão ou camada depositada anteriormente. Também planejamos usar a altura e a largura dos cordões medidas com uma câmera térmica para reajustar o DBCP durante a deposição. O relaxamento da orientação da tocha ou sua alteração durante uma tarefa de deposição é outro foco de estudo do nosso grupo de pesquisa.

**Agradecimentos:** Os autores gostariam de agradecer à equipe do LNT-SOLD/UFRJ pela contribuição nos tópicos relacionados a WAAM.

## REFERÊNCIAS

- Ahmad, S. and Luo, S. (1988). Coordinated motion control of multiple robotic devices for welding and redundancy coordination through constrained optimization in cartesian space. In *Proc. of the 1988 IEEE Int. Conf. on Robotics and Automation*, 963–968 vol.2.
- Arbo, M., Eriksen, I., Sanfilippo, F., and Gravidahl, J. (2020). Comparison of KVP and RSI for controlling KUKA robots over ROS. *IFAC-PapersOnLine*, 53, 9841–9846.
- Bhatt, P.M., Kulkarni, A., Malhan, R.K., and Gupta, S.K. (2021). Optimizing part placement for improving accuracy of robot-based additive manufacturing. In *2021 IEEE International Conference on Robotics and Automation (ICRA)*, 859–865.
- Chitta, S., Marder-Eppstein, E., Meeussen, W., Pradeep, V., Rodríguez Tsouroukdissian, A., Bohren, J., Coleman, D., Magyar, B., Raiola, G., Lüdtke, M., and Fernández Perdomo, E. (2017). ros\_control: A generic and simple control framework for ros. *The Journal of Open Source Software*.
- Ding, Y., Dwivedi, R., and Kovacevic, R. (2017). Process planning for 8-axis robotized laser-based direct metal deposition system: A case on building revolved part. *Robotics and Computer-Integrated Manufacturing*, 44, 67–76.
- Dixon, W. (2007). Adaptive regulation of amplitude limited robot manipulators with uncertain kinematics and dynamics. *IEEE Trans. on Automat. Control*, 52(3), 488–493.
- Eriksen, I. (2017). *Setup and Interfacing of a KUKA Robotics Lab*. Master's thesis, Norwegian University of Science and Technology.
- Evjemo, L., Moe, S., and Gravidahl, J. (2020). Robotised wire arc additive manufacturing using set-based control: Experimental results. *IFAC-PapersOnLine*, 53, 10044–10051. doi:10.1016/j.ifacol.2020.12.2725.
- Kim, D.W., Choi, J.S., and Nnaji, B.O. (1998). Robot arc welding operations planning with a rotating/tilting positioner. *International Journal of Production Research*, 36(4), 957–979.
- Leite, A.C., Cruz, F.L., and Lizarralde, F. (2020). Adaptive passivity-based hybrid pose/force control for uncertain robots. In *21th IFAC World Congress*, volume 53, 3854–3860. Berlin.
- Lizarralde, N., Menegaldo, L., and Lizarralde, F. (2021). Controle híbrido de posição e força baseado em passividade de um manipulador robótico com aplicação em exames de ultrassonografia. In *Simpósio Brasileiro de Automação Inteligente-SBAI*, volume 1.
- Lockett, H., Ding, J., Williams, S., and Martina, F. (2017). Design for Wire + Arc Additive Manufacturing: design rules and build orientation selection. *J. of Engineering Design*, 28(7-9), 568–598.
- Maciejewski, A. and Klein, C. (1985). Obstacle avoidance for kinematically redundant manipulators in dynamically varying environments. *Int. J. Robotics Research*, 4(3), 109–117.
- Michel, F., Lockett, H., Ding, J., Martina, F., Marinelli, G., and Williams, S. (2019). A modular path planning solution for wire + arc additive manufacturing. *Robotics and Computer-Integrated Manufacturing*, 60, 1–11.
- Nakamura, Y., Hanafusa, H., and Yoshikawa, T. (1987). Task-priority based redundancy control of robot manipulators. *The International Journal of Robotics Research*, 6(2), 3–15.
- Ni, M., Qin, X., Hu, Z., Ji, F., Yang, S., and Wang, S. (2022). Forming characteristics and control method of weld bead for GMAW on curved surface. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 119, 1883–1908.
- Panchagnula, J.S. and Simhambhatla, S. (2018). Manufacture of complex thin-walled metallic objects using weld-deposition based additive manufacturing. *Robotics and Computer-Integrated Manufacturing*, 49, 194–203.
- Radel, S., Diourte, A., Soulié, F., Company, O., and Bordreuil, C. (2019). Skeleton arc additive manufacturing with closed loop control. *Additive Manufacturing*, 26, 106–116.
- Siciliano, B., Sciavicco, L., Villani, L., and Oriolo, G. (2009). *Robotics: Modelling, Planning and Control*. Springer-Verlag, 1 edition.
- Wang, H., Cheah, C.C., Ren, W., and Xie, Y. (2018). Passive Separation Approach to Adaptive Visual Tracking for Robotic Systems. *IEEE Trans. on Control Syst. Techn.*, 26(6), 2232–2241.
- Williams, S.W., Martina, F., Addison, A.C., Ding, J., Pardal, G., and Colegrove, P. (2016). Wire + Arc Additive Manufacturing. *Materials Science and Technology*, 32, 641–647.
- Xiong, J., Lei, Y., Chen, H., and Zhang, G. (2017). Fabrication of inclined thin-walled parts in multi-layer single-pass gmaw-based additive manufacturing with flat position deposition. *Journal of Materials Processing Technology*, 240, 397–403.
- Yao, P., Tang, H., Zhou, K., Lin, H., Xu, Z., and Du, X. (2020). Influence of inclination of welding torch on weld bead during pulsed-gmaw process. *Materials (Basel, Switzerland)*, 13(11), 2652.