



Associação Brasileira de Soldagem

XLVII CONSOLDA – Congresso Nacional de Soldagem  
III CBMAdi – Congresso Brasileiro de Manufatura Aditiva  
Joinville/SC Agosto de 2025

## Caracterização da Dinâmica da Transferência Metálica no Processo CMT com Aço Carbono

(Characterization of Metal Transfer Dynamics in the CMT Process with Carbon Steel)

Daniel Galeazzi<sup>1</sup>, Régis Henrique Golçalves e Silva<sup>1</sup>, Mateus Baracelli Schwedersky<sup>1</sup>, Marcelo Pompermaier Okuyama<sup>1</sup>, Cleber Marques<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Universidade Federal de Santa Catarina, CTC – Laboratório de Soldagem e Mecatronica LABSOLDA, Florianópolis, Santa Catarina, Brasil, daniel.galeazzi@posgrad.ufsc.br

### Resumo

*Este trabalho investiga o comportamento dinâmico da transferência metálica no processo Cold Metal Transfer (CMT) aplicado ao aço carbono. A análise abrange a influência da velocidade de alimentação do arame e da composição do gás de proteção sobre o movimento oscilatório do arame, a forma de onda do processo e as características geométricas dos cordões depositados. Para isso, foram utilizados sensores de alta resolução e filmagens em alta velocidade, além de ensaios metalográficos. Os resultados demonstraram que o processo CMT apresenta elevada controlabilidade da transferência metálica e da geometria dos depósitos, sendo o gás C8 (Ar + 8% CO<sub>2</sub>) o que proporcionou maior estabilidade e melhor equilíbrio entre penetração, diluição, molhabilidade e aparência superficial, tornando-se o mais indicado para aplicações em manufatura aditiva com aço carbono.*

**Palavras-chave:** CMT, transferência metálica, aço carbono, gás de proteção, WAAM, alimentação dinâmica, manufatura aditiva

**Abstract:** *This study investigates the dynamic behavior of metal transfer in the Cold Metal Transfer (CMT) process applied to carbon steel for additive manufacturing applications. The research focuses on how wire feed speed and shielding gas composition influence the oscillatory motion of the wire, the process waveform, and the resulting weld bead geometry. A combination of high-resolution sensor data and high-speed imaging was used to analyze the process in detail. Results show that the CMT process offers high control over metal transfer and deposited bead geometry. Among the tested gas mixtures, the C8 composition (92% Ar + 8% CO<sub>2</sub>) provided the best overall performance in terms of arc stability, moderate penetration, balanced bead shape, and good wettability, making it the most suitable shielding gas for additive manufacturing using carbon steel and the CMT process.*

**Key-words:** CMT, metal transfer, carbon steel, shielding gas, WAAM, dynamic feeding, additive manufacturing.

### 1. Introdução

Visando oferecer vantagens em relação ao MIG/MAG Convencional com transferência por curto-circuito que utiliza fontes com regulagem de tensão, novas variantes que utilizam a modulação da corrente foram desenvolvidas, impulsionadas pelo avanço na eletrônica, bem como do entendimento dos fenômenos físicos envolvidos na transferência metálica foi possível criar métodos de controle, por meio da modulação do formato de onda de corrente. Com isto, variantes do processo MIG/MAG foram desenvolvidas.

Um primeiro nível de sofisticação são as variantes classificadas como curto-circuito controlado e, como o nome sugere, concentra-se em controlar a forma de onda de corrente elétrica durante todas as etapas da transferência metálica, por meio da predição do contato e da ruptura da ponte metálica. Isso, quando em funcionamento adequado, promove maior estabilidade ao processo, permitindo o controle do diâmetro da gota, altura do arco, aporte térmico e da geometria do depósito final. Como resultado, tem-se uma transferência metálica, essencialmente por tensão superficial, que resulta em destacamentos suaves, quase sem respingos e fumos metálicos, frequentemente causados pelo rompimento abrupto da ponte metálica em altas correntes [1–4].

Em uma categoria de maior nível de sofisticação no controle, verifica-se uma versão MIG/MAG que vai além do controle da forma de onda de corrente, controlando sincronizadamente a dinâmica de deslocamento do arame eletrodo. Esse conceito de processo pode ser denominado MIG/MAG com destacamento de gotas mecanicamente assistidas ou MIG/MAG com alimentação dinâmica (AD) [4].

Nesta versão, a transferência metálica ocorre pela composição da ação da força de tensão superficial aliado ao recuo do arame-eletrodo que é sincronizado com a forma de onda de corrente (efeito pinch). Esse movimento de avanço e recuo é gerado por meio de um servomotor de elevada dinâmica, o qual é integrado a tocha de soldagem. Esse sistema juntamente com o sistema de controle de corrente integrado a fonte de soldagem proporciona ao MIG/MAG-AD alta controlabilidade da geometria do cordão depositado e da energia aportada, além de uma transferência metálica suave, sem respingos e pouca geração de fumos [5]. Este conceito de MIG/MAG com alimentação dinâmica foi inicialmente desenvolvido e patenteado pela empresa Fronius e recebeu o nome comercial de CMT (Cold metal transfer). Segundo o fabricante, o CMT foi desenvolvido originalmente para a união de alumínio em aço. Porém, devido ao maior nível de controle da transferência metálica e sua boa performance em outros materiais, o CMT vem sendo extensivamente aplicado na manufatura aditiva [4, 6–8].

O sistema CMT é composto por uma fonte, cabeçote alimentador de arame e tocha que, assemelha-se a um sistema push-pull. O principal diferencial fica por conta do sistema de alimentação de arame e seu controle, que deve atender ao requisito de movimento de avanço e recuo em frequências bastante elevadas, podendo chegar em até 130 Hz. Para esse objetivo, a alimentação dinâmica do arame é feita por um sistema composto por dois motores, um na tocha e outro no cabeçote alimentador, desacoplados por meio de um dispositivo denominado buffer, instalado no meio do mangote, o qual visa mitigar a dessincronização gerada de forma indireta pelo avanço e recuo do arame ao longo do processo.

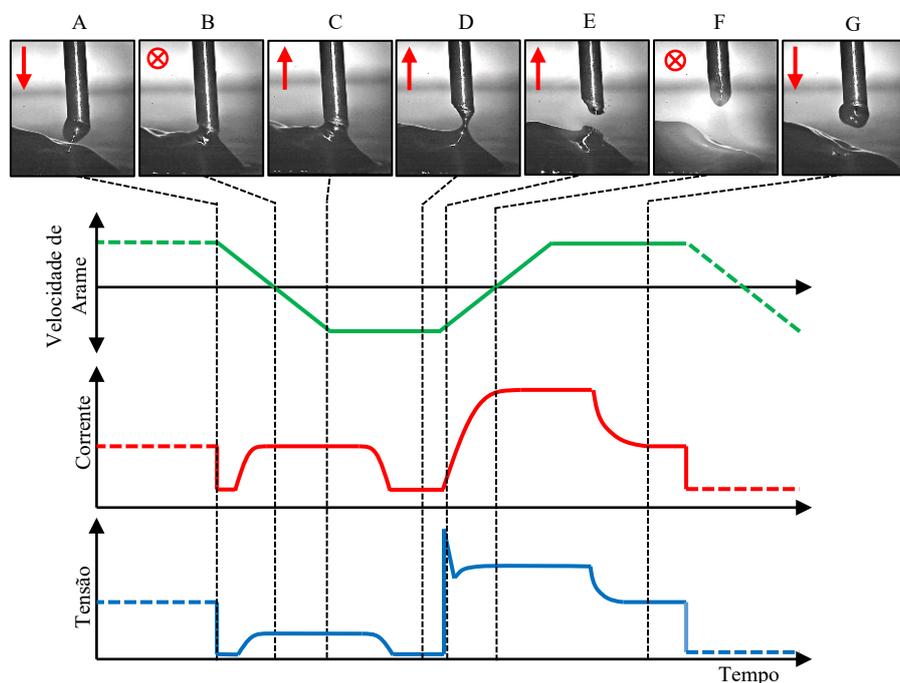


Figura 1. Formatos de onda de velocidade de arame instantânea, corrente e tensão típicos da variante CMT do processo MIG/MAG para aço e suas ligas.

Utilizando aço carbono, pode-se citar o trabalho de Kazanas, et al. [9] que analisaram a produção de paredes inclinadas utilizando a variante CMT e arame de aço ER70S-6. Convencionalmente, o ângulo da tocha de soldagem é mantido ortogonal ao substrato, isso pode causar problemas de acessibilidade e pode exigir que a peça seja movida durante o processo de deposição. Em seus experimentos, os autores, investigaram de forma sistemática a relação entre velocidade de alimentação e velocidade de deslocamento sobre a qualidade do cordão de solda depositado. Por meio desta relação, foi construída uma base de dados de parâmetros que serviu como referência para realização dos depósitos inclinados. Além disto, seções fechadas também foram exploradas. Os resultados mostraram a capacidade da variante CMT na construção de peças fora de posição, por meio da construção de paredes entre 0 e 180°. Tankova, et al. [10], utilizando aço carbono ER70S-6, realizaram a caracterização mecânica e microestrutural de paredes fabricadas utilizando o CMT. A caracterização mecânica consistiu em analisar os resultados de corpos de provas de tração fabricados em duas condições, nas paredes como construídas e usinadas, extraídos em diferentes direções (0°, 45° e 90°) relativa à trajetória de construção da peça. Os resultados indicaram que, no geral, os corpos de prova usinados apresentaram maior resistência e ductilidade em todos os ensaios. Adicionalmente, a tensão de escoamento e a resistência à tração dos corpos de prova usinados não variaram com a direção, o que não foi o caso dos corpos de prova extraídos das paredes como construídas, o que foi atribuído à variação da rugosidade/textura da superfície e à presença de defeitos na superfície. Em relação a microestrutura, os resultados demonstraram que a parede exibiu três regiões distintas: uma região inferior próxima ao substrato, a qual exibiu uma zona parcialmente transformada, uma zona recristalizada e uma zona de grão grosseiro; a região

do meio, que foi a mais predominante em toda a parede, apresentou uma microestrutura com ferrita poligonal e perlita lamelar intergranular; e a região superior, que mostrou uma mistura de microestruturas de ferrita acicular e bainita. De modo geral, as paredes apresentaram apenas distinções entre como fabricados e usinados. Contudo, ambas as condições apresentaram valores satisfatórios que satisfizeram os requisitos mínimos da norma.

Analogamente, Huang, et al. [11], também utilizando o CMT e aço ER70S-6 aprofundaram o estudo na caracterização mecânica e microestrutural de paredes fabricadas com diferentes estratégias de deposição, por exemplo, inversão da direção de soldagem a cada camada (bidirecional), inversão de trajetória a cada três camadas, fabricação de meia parede, resfriamento total e deposição da segunda metade utilizando, ambas utilizando inversão da direção de soldagem a cada camada, por fim direção de deposição constante (unidirecional). A caracterização mecânica consistiu em analisar os resultados dos ensaios de tração de corpos de prova de tração extraídos utilizando a mesma metodologia de Tankova, et al. [10], ou seja, em duas condições, nas paredes como construídas e usinadas. No entanto, em mais direções, isto é, 0°, 30°, 45°, 60° e 90° e duas espessuras de parede 3 e 8 mm. Os resultados obtidos corroboram com Tankova, et al. [10], indicando que os corpos de prova extraídos como construídos apresentam anisotropia e redução da resistência e ductilidade. Huang et al. [11] atribui esse comportamento à textura da superfície, mas também as baixas taxas de resfriamento reflexo do processo WAAM. Em relação a microestrutura, os resultados demonstraram isotropia e fases semelhantes as identificadas por Tankova, et al. [10].

Outros estudos também abordaram de forma sistemática as propriedades mecânicas e metalúrgicas do aço ER70S-6 utilizando o processo CMT para a fabricação de paredes. Dentre esses estudos, pode-se citar as pesquisas de Ermakova, et al. [12], Nagasai, et al. [13] e Silvestru, et al. [14], cujos resultados experimentais foram consistentes com os obtidos por Tankova et al. [10] e Huang, et al. [11], em termos de características mecânicas e metalúrgicas. Isso reforça o aspecto crucial da aplicação do CMT, que é o controle preciso da transferência metálica, conferindo estabilidade e regularidade aos depósitos.

Embora a variante CMT seja amplamente aplicada em operações de manufatura aditiva, ainda são pouco explorados seu funcionamento detalhado e os efeitos associados à dinâmica de oscilação do arame durante a transferência metálica. Frente a essa lacuna na literatura, este estudo tem como objetivo caracterizar a transferência metálica da variante CMT aplicada ao aço carbono, considerando a influência da velocidade de alimentação do arame e da composição do gás de proteção.

## 2. Matérias e Métodos

Para a realização deste estudo foi utilizado uma bancada de experimento composta por um robô antropomórfico YASKAWA Motoman HP20D de 6 eixos integrado a uma mesa posicionadora YASKAWA Motopos MPD 250B com 2 eixos e 250 kg de payload, uma fonte de soldagem Fronius CMT Advanced 4000R com controlador RCU 5000i. Como material de adição foi utilizado o arame de aço ER70S6 de 1.2 mm, depositado sobre substrato de aço carbono ASTM A36, como misturas gasosas foram utilizadas três composições, sendo elas: argônio puro (Ar), mistura com 8% de CO<sub>2</sub> (C8) e 25% de CO<sub>2</sub> (C25) em balanço com argônio.

Inicialmente, foi realizada a delimitação de uma faixa operacional entre 4 e 7 m/min na fonte, definindo assim os limites a serem estudados para a variante CMT e expandindo o estudo utilizando três diferentes misturas gasosas (Ar, C8 e C25). Para a monitoração do processo, bem como das variáveis de soldagem foi utilizado um sistema de aquisição de dados de soldagem IMC SAP. As aquisições de dados concentraram-se na medição das variáveis referentes a dinâmica do arame, isto é, velocidade instantânea de arame na tocha utilizando um encoder, onde foram analisadas a máxima velocidade no avanço e no recuo do arame, a amplitude de oscilação, onde foi analisada a amplitude de avanço livre, avanço em ponto, recuo em ponto e recuo livre. A Figura 2 ilustra esquematicamente a bancada de experimentos utilizada e instrumentada com os sensores que compõem o SAP. Além disso, uma caracterização geométrica dos cordões de solda foi realizada, para isto, em cada cordão de solda três macrografias foram realizadas, de modo a extrair dados como: largura, altura, penetração, ângulo de molhamento, diluição e área.

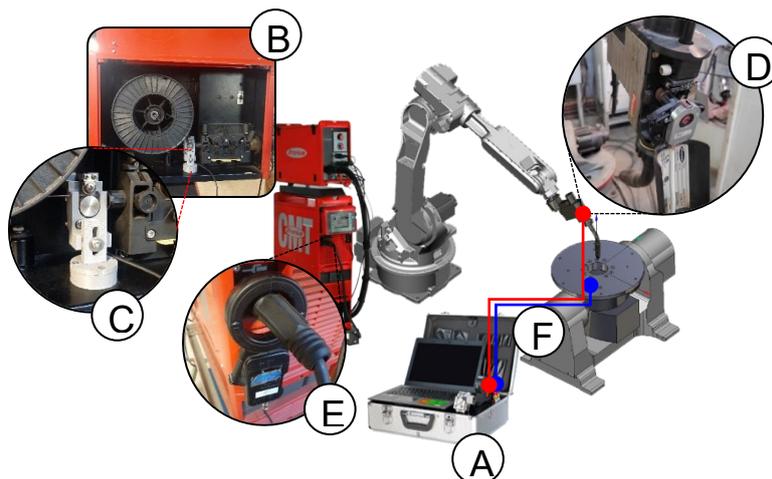


Figura 2. Disposição dos sensores utilizados para aquisição das variáveis de soldagem, onde: A) SAPV4.0; B) Cabeçote de alimentação; C) Encoder MVA médio; D) Encoder MVA instantâneo; E) Sensor de efeito Hall; F) Cabos para medição de Tensão.

Para complementar a análise realizada por meio dos sinais oriundos do SAP, filmagens em alta velocidade foram realizadas para não só observar, mas também validar as hipóteses criadas com base nos sinais dos encoders. Portanto, para aquisição dos fenômenos concernentes à dinâmica da transferência metálica do processo de soldagem analisado, foi utilizado um sistema de filmagem em alta velocidade. O sistema é composto por uma câmera IDT Motion Pro Y4-S2, munida de uma lente Canon EF 180 mm L USM, um duplicador Canon 2x, um filtro ótico Edmund Optics, um sistema de iluminação Laser Cavitar Cavilux HF e um sistema de aquisição de dados IDT, DAS Motion Pro. A disposição da câmera em relação região de interesse foi definida em um plano inclinado em cinco graus colinear ao sentido de soldagem, conforme ilustra o esquemático do posicionamento na Figura 3.

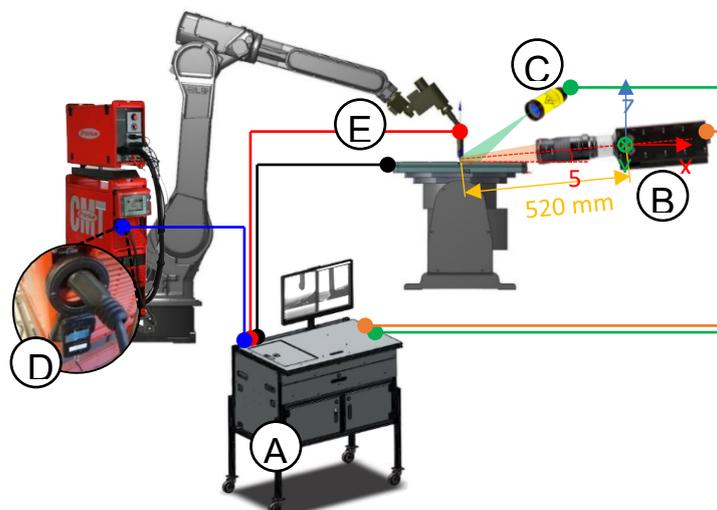


Figura 3. Disposição dos equipamentos utilizados para realização da filmagem em alta velocidade e aquisição das variáveis de soldagem, onde: A) Unidade de controle da câmera de alta velocidade e periféricos; B) Câmera IDT Y4-S2; C) Iluminação Laser Cavitar; D) Sensor de efeito Hall; E) Sensores para medição de tensão.

### 3. Resultados e Discussão

Para esta análise, a velocidade do arame foi medida tanto no cabeçote alimentador quanto na tocha de soldagem, especificamente no rolete acoplado ao servomotor da tocha CMT, conforme descrito na metodologia. Os gráficos da Figura 4 ilustram a diferença entre o comportamento da velocidade do arame entre o cabeçote alimentador e na tocha, considerando uma VA programada de 6 m/min com C8 como mistura gasosa.

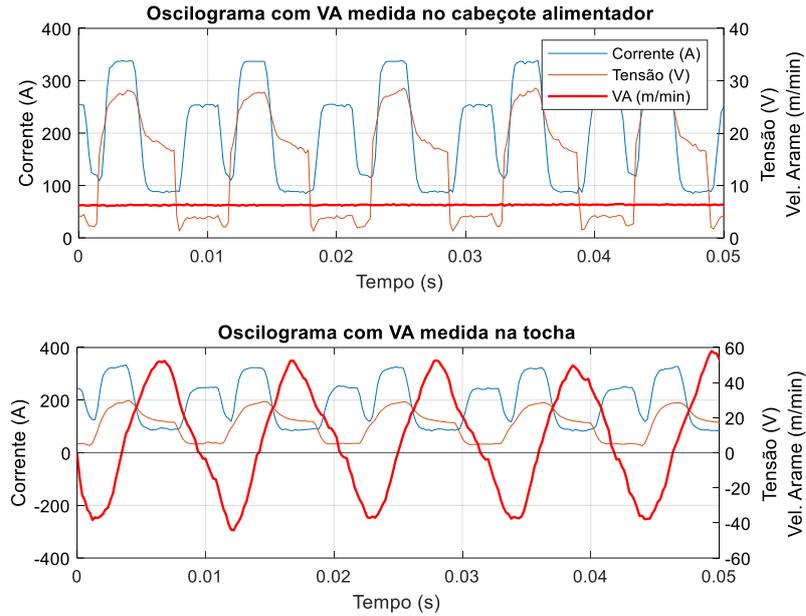


Figura 4. Oscilogramas do processo CMT com destaque a diferença entre VA lida no cabeçote alimentador e na tocha.

O comportamento dinâmico da oscilação do arame na tocha de soldagem foi observado e está apresentado nos gráficos da Figura 5.

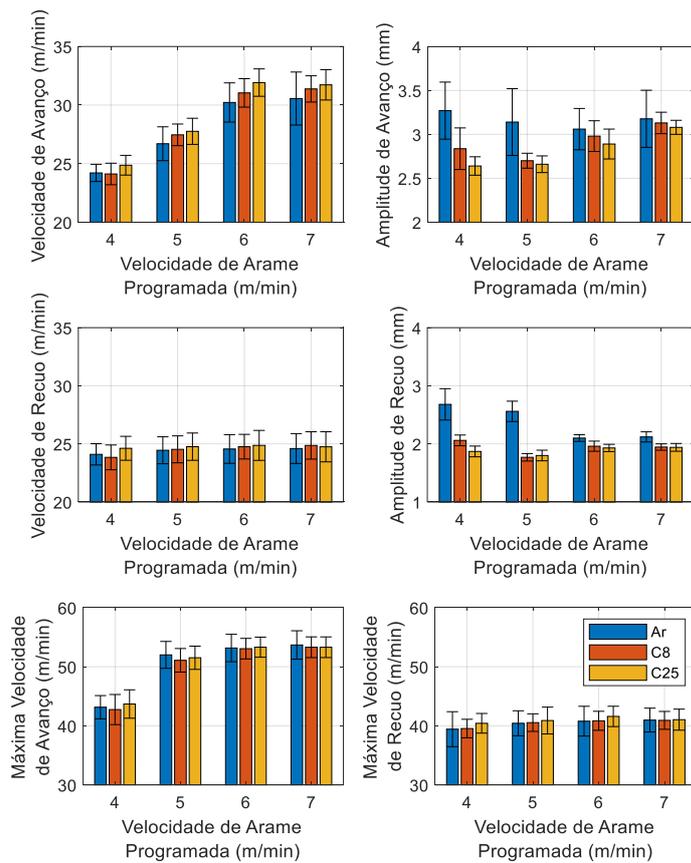


Figura 5. Comportamento dinâmico da velocidade arame na tocha para o processo CMT com diferentes VAs e misturas gasosas.

Pode-se notar uma tendência quase linear na velocidade média de avanço do arame, variando de aproximadamente 25 m/min até 34 m/min. Entre as VAs 6 e 7 não se verificou diferença na velocidade de avanço média, o que sugere um limite. Na fase de recuo, foram registrados valores semelhantes em toda a faixa operacional

estudada, em torno de 25 m/min. As velocidades máximas de avanço observadas foram da ordem de 50 m/min, com exceção do caso com VA programada de 4 m/min, que apresentou valores máximos da ordem de 42,5 m/min. Para o recuo, foram registrados valores da ordem de 40 m/min em todas as faixas. Observando a amplitude de avanço e recuo para cada faixa operacional, bem como para cada mistura gasosa, é possível verificar que houve apenas um desbalanço para o argônio. Este apresentou tanto amplitudes de avanço quanto de recuo relativamente maiores que os demais para as faixas de 4 e 5 m/min.

Para complementar a análise do movimento do arame, utilizou-se filmagens em alta velocidade. Nestes experimentos, identificou-se que a amplitude de movimento consiste em uma composição de etapas. O avanço é composto por duas etapas, o avanço livre e o avanço em ponte ou mergulho do arame. O primeiro refere-se ao movimento do arame do seu ponto mais externo até o contato com a gota, definindo o curto-circuito. O segundo é o comprimento deslocado em direção à poça após o contato. Por outro lado, a amplitude de recuo também é composta por duas etapas, aqui denominadas recuo em ponte e recuo livre. O primeiro pode ser interpretado como o alongamento da poça devido à tensão superficial, e o segundo como o comprimento recuado após a ruptura da ponte metálica. A Figura 6 ilustra, por meio de frames extraídos da filmagem em alta velocidade, as etapas que compõem a amplitude de avanço e de recuo.

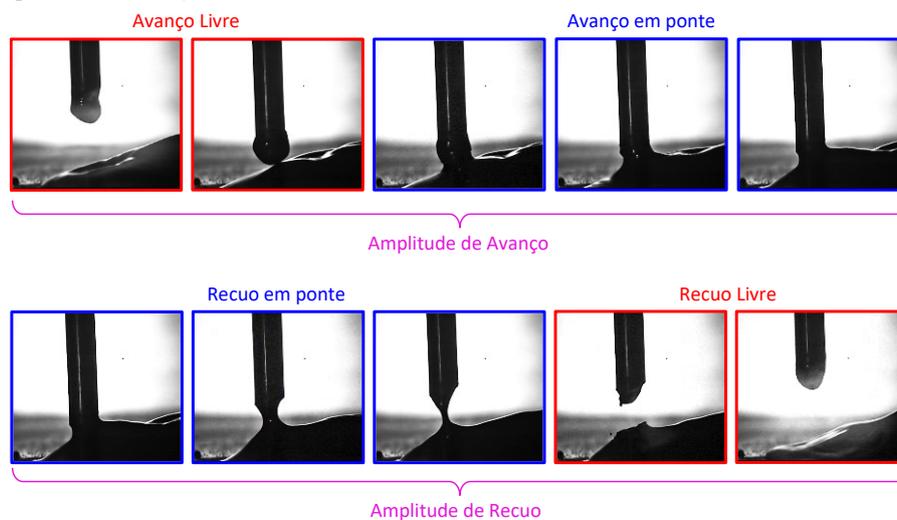


Figura 6. Decomposição das etapas de amplitude para o avanço e recuo do arame.

Ao analisar as amplitudes e descompor as partes livre e acoplada, utilizando os sinais tanto da filmagem em alta velocidade quanto do SAP, obteve-se os gráficos apresentados na Figura 7.

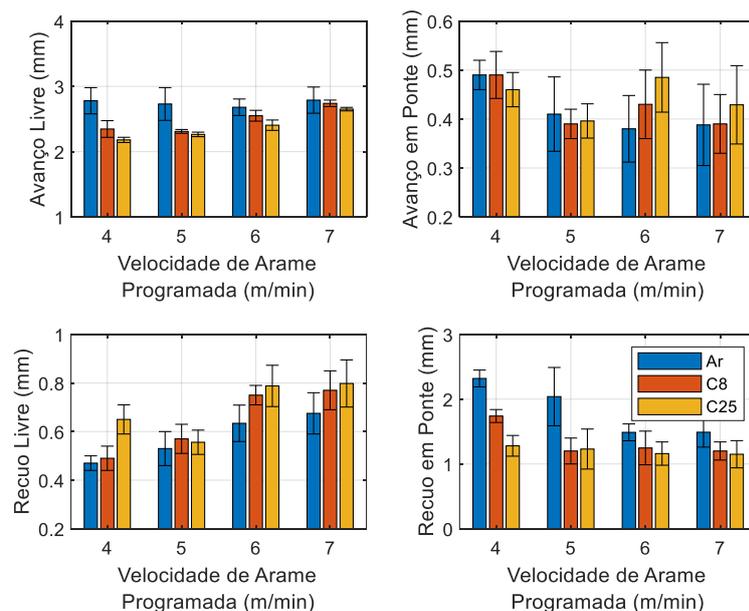


Figura 7. Comportamento da amplitude de avanço e recuo para processo CMT com diferentes VAs e misturas gasosas.

A amplitude de avanço para a amostra analisada sempre começa no meio do pulso de corrente, onde a velocidade é zero e a amplitude é máxima. O arame acelera até atingir sua máxima velocidade ao longo de um período e então começa a desacelerar na iminência do curto-circuito. No entanto, após o curto-circuito, o arame continua avançando em direção à poça por alguns décimos de milímetro até parar completamente, como mostrado no detalhe 'Início do curto-circuito' nos oscilogramas da Figura 8, que exemplifica o fenômeno utilizando o conjunto de dados da mistura gasosa C8.

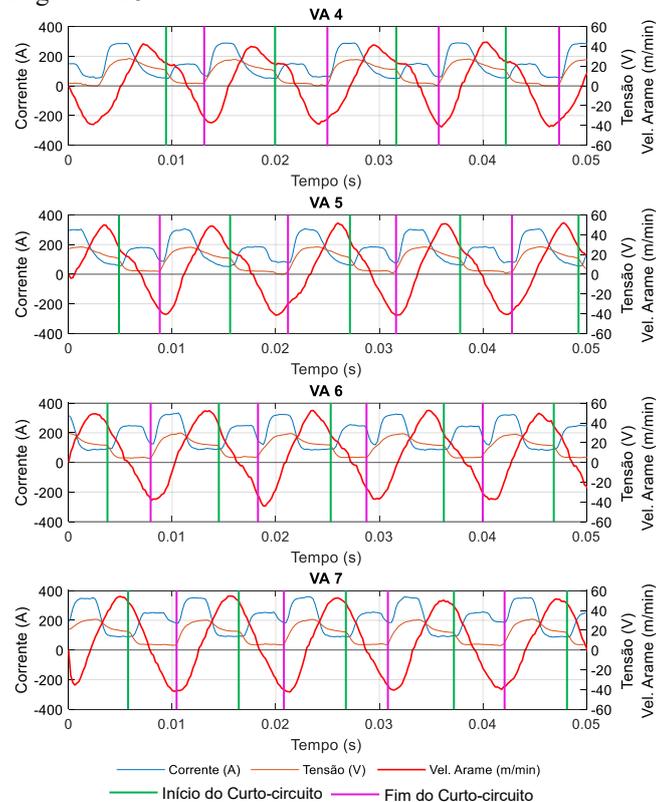


Figura 8. Oscilogramas do processo CMT para diferentes VAs utilizando a mistura gasosa C8.

Como visto na Figura 7, os valores médios de mergulho ou avanço em ponte não apresentam uma tendência definida, variando na média de 0,4 a 0,5 mm independente da VA programada ou mistura gasosa, acredita-se que este comportamento aleatório pode ser decorrência da inércia desaceleração do servomotor.

Um fato interessante é que o recuo do arame promove uma abertura do arco com uma altura relativamente grande em comparação ao processo convencional. Isso ocorre independentemente da intensidade do pulso de corrente, o que resulta em uma redução da densidade de corrente na região. Isso, por sua vez, leva a uma redução significativa da pressão do arco sobre a poça de fusão, o que tende a gerar, entre outras características, baixa diluição e penetração. Esse aspecto é particularmente relevante do ponto de vista da manufatura aditiva.

Outro detalhe observado por meio da filmagem em alta velocidade diz respeito ao alongamento da ponte metálica, o qual varia em função do gás utilizado e da VA. No conjunto amostral analisado, verificou-se um maior alongamento da ponte metálica na iminência do destacamento para o argônio nesta faixa de VA. Este alongamento é ilustrado nos frames a seguir, na Figura 9.

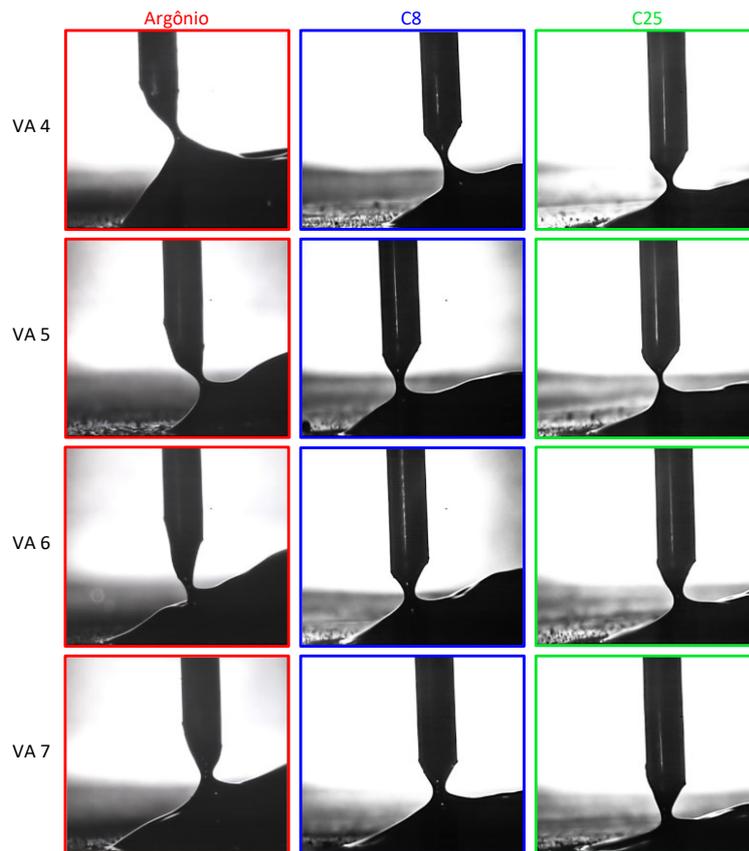


Figura 9. Alongamento máximo da poça da ponte metálica na iminência do destacamento.

O alongamento da ponte metálica, neste caso, está intrínseco a tensão superficial da poça de fusão, a qual pode ser considerada função da temperatura e da composição química. O argônio, conforme indicado por Hertel et al. [15] e Kah e Martikainen [16], devido à sua baixa condutividade térmica, não promove um aquecimento tão expressivo da poça em comparação com as misturas contendo  $\text{CO}_2$ . Estas últimas, além de possuírem maior condutividade térmica - o que resulta em um aquecimento mais intenso da poça - também estimulam reações exotérmicas de oxidação da poça devido à presença de oxigênio, uma vez que a presença de também  $\text{CO}_2$  aumenta o potencial de oxidação [17]. Combinados, esses fatores levam a uma tensão superficial da poça de fusão inferior àquela observada no caso do argônio puro. Os frames aquisitados corroboram com essa hipótese uma vez que é possível verificar, por exemplo, para VA 4 uma diminuição expressiva do alongamento da ponte metálica à medida que se tem o aumento da concentração de  $\text{CO}_2$ .

Além disto, vale salientar que para os experimentos com argônio, em especial a VA 4, verificou-se entre outros fenômenos um aumento nos tempos de curto-circuito e arco, possivelmente decorrência do aumento da tensão superficial que resultou em um alongamento demasiadamente elevado da ponte metálica, gerando assim uma reabertura do arco em uma altura elevada, o que incorre em uma maior distância a ser percorrida pelo arame eletrodo para o próximo curto-circuito, aumentando assim o tempo de arco, o período de destacamento e diminuindo a frequência. A diminuição da frequência de destacamento pode gerar uma redução da corrente média e consequentemente da potência, o que gera uma reação em cadeia de diminuição progressiva do aporte de calor e diminuição da temperatura da poça, podendo incorrer nos fenômenos de alongamento da poça observados, os quais dependem da tensão superficial que é uma variável também dependente da temperatura.

Por outro lado, ao aumentar a velocidade de avanço (VA) acima de 5 m/min, ocorre um aumento na corrente média e na potência, o que tende a elevar a temperatura da poça de fusão. Essa elevação pode ser observada indiretamente pela equalização do alongamento da ponte metálica entre as diferentes misturas gasosas, conforme demonstrado no gráfico de recuo em ponte da Figura 7.

Outro detalhe observado refere-se a ruptura da ponte metálica para o gás argônio nas faixas de VA de 4 e 5 m/min, que ocorre em uma altura de arco maior que os demais gases devido ao excessivo recuo, sendo assim, o pulso de corrente subsequente, mesmo apresentado o mesmo valor, tende a apresentar uma densidade de corrente inferior aos demais. Esta redução na densidade de corrente em função da altura do arco gera uma redução da pressão do arco sobre a poça o que somado às características físicas do argônio, pode contribuir para uma redução da penetração, diluição e produzir cordões excessivamente convexas, como será discutido a posteriori.

Observando os valores médios da VA tanto para o cabeçote alimentador como para a tocha é possível perceber uma coerência entre os valores programados e os valores aquisitados, e com relativa baixa incerteza. A VA média resultante na tocha, calculada por meio da média da curva de velocidade instantânea, exibiu valores médios levemente menores que os lidos no cabeçote, contudo, dentro da incerteza calculada, como mostram os gráficos da Figura 10.

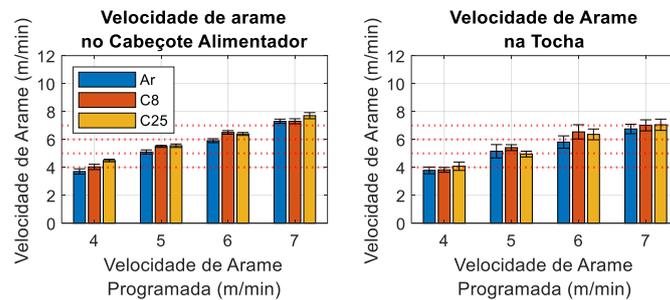


Figura 10. Comparação da VA média medida no cabeçote alimentador (Bloco de Rolete) e VA média na tocha.

A velocidade média de arame na tocha bem como do processo é ditada predominantemente pela velocidade de avanço e amplitude de avanço, uma vez que foram os únicos dados que apresentam variação significativa dentre os demais. Os gráficos da Figura 8 mostram a diferenciação entre as curvas de velocidade instantânea à medida que se aumenta a VA para a amostra com a mistura gasosa C8. Vale salientar que os demais gases apresentaram o mesmo comportamento. Este comportamento da VA instantânea aliado à forma de onda de corrente oferece, portanto, alterações sobre o diâmetro de gota praticado por cada faixa de VA programada, uma vez que não se pode afirmar que há diferença entre os períodos de transferência.

Por fim, o resultado gerado pela composição da forma de onda de corrente, comportamento dinâmico da oscilação do arame e mistura gasosa repousa sobre a aparência superficial e geometria do cordão de solda.

O resultado referente a aparência superficial mostra cordões depositados convexos e escamados para o argônio e cordões moderadamente molhados e lisos para as misturas C8 e C25, porém, para o C25 foi observado ilhas de sílica na superfície e nos flancos dos cordões, conforme mostram as fotos na Figura 11.



Figura 11 – Aparência superficial dos cordões depositados.

Por meio de ensaios de macrografias, estes presentes na Figura 12, não foi verificado nenhum defeito interno, porém foi observado uma diminuição significativa na convexidade e altura dos cordões e um aumento na penetração, largura e diluição à medida que se aumenta a quantidade de CO<sub>2</sub> na mistura gasosa.

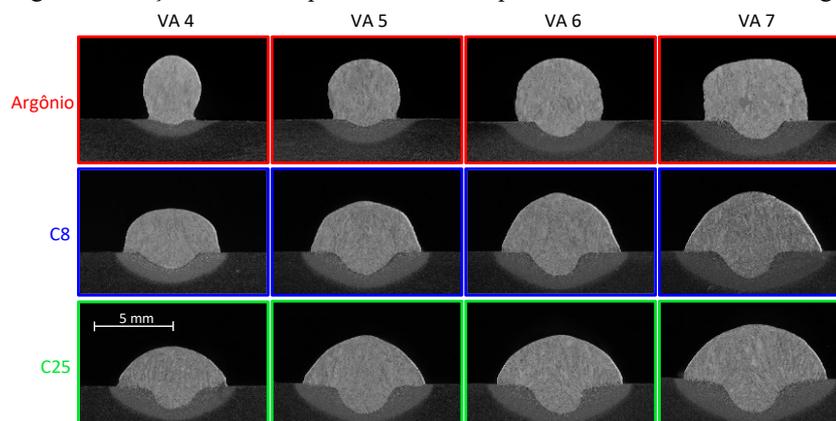


Figura 12. Macrografias dos cordões depositados.

As medições das macros apresentadas nos gráficos da Figura 13 indicam que a mistura gasosa, em específico a quantidade de CO<sub>2</sub>, possui uma influência significativa sobre a geometria do cordão mesmo mantendo constante parâmetros como VA e forma de onda de corrente. Estas alterações são reflexo direto das características físicas de interação do gás de proteção com o meio. Para o argônio, por exemplo, é possível verificar cordões altos e estreitos, com baixa molhabilidade, diluição e aparência convexa. Estas características, em especial a excessiva convexidade, do ponto de vista da manufatura aditiva não são aprazíveis, pois baixa molhabilidade tende a dificultar a sobreposição horizontal de cordões, uma vez que a tendência de sobreposição incompleta nos flancos é elevada [18–21]. Por outro lado, para o C25 verificou-se cordões baixos e largos com maior penetração, diluição e molhamento em relação aos demais. Para o C8 foi observado características intermediárias entre o argônio e C25. Além disso, verifica-se uma variação relevante na área fundida ou área total, o que demonstra uma variação na taxa de deposição em função do gás de proteção para uma mesma velocidade de arame programada.

Em síntese, considerando não só a geometria dos cordões e aparência superficial, mas também a estabilidade do processo bem como todas as suas características dinâmicas de transferência metálica definiu-se o gás C8, dentre as misturas analisadas, como a mistura gasosa mais adequada para as operações de manufatura aditiva utilizando aço como matéria-prima e o CMT, pois oferece além de maior estabilidade em relação aos demais, cordões com moderada penetração e uma forma equilibrada em termos de altura, largura, molhabilidade tanto para operações com cordões simples como sobreposições. Portanto, a partir deste ponto, todos os ensaios foram realizados com C8 como mistura gasosa.

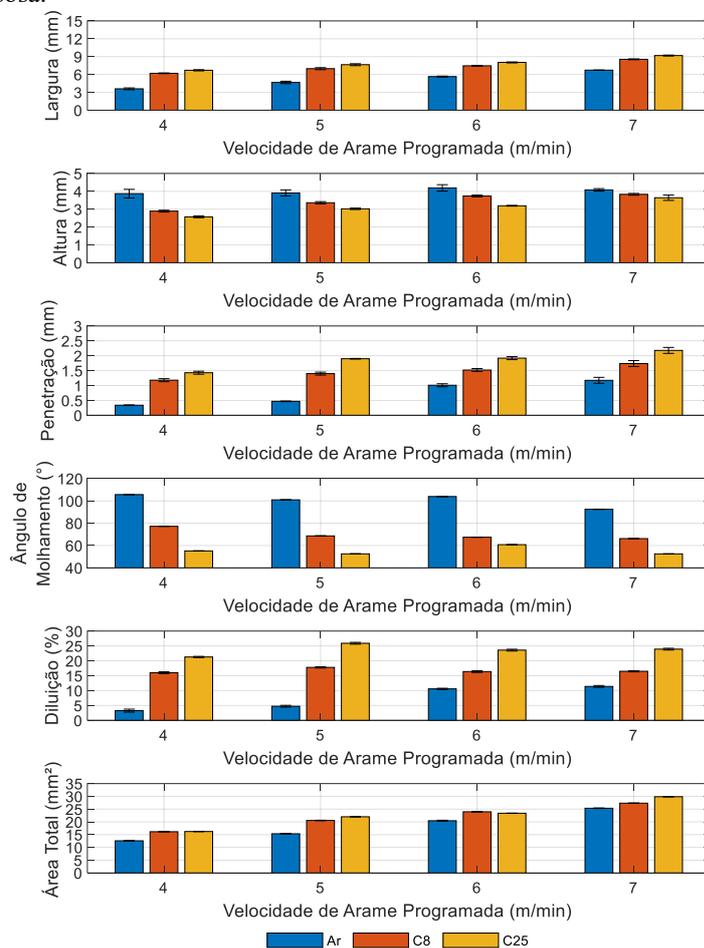


Figura 13. Medições das principais características dos cordões depositados.

#### 4. Conclusões

1. A transferência metálica no processo CMT é altamente influenciada tanto pela velocidade de alimentação do arame quanto pela composição do gás de proteção, afetando diretamente a geometria do cordão e a estabilidade do processo.
2. O movimento dinâmico do arame na variante CMT ocorre em etapas distintas de avanço e recuo, sendo possível caracterizá-las com precisão por meio da combinação entre aquisição de dados e filmagem em alta velocidade.

3. A composição do gás de proteção exerce papel crucial na tensão superficial da poça de fusão, alterando a morfologia da ponte metálica, o tempo de arco, a frequência de destacamento e a densidade de corrente do processo.
4. O gás argônio puro resultou em cordões com maior convexidade e menor molhabilidade, características indesejáveis em aplicações de manufatura aditiva.
5. A mistura gasosa C25 promoveu maior penetração e diluição, mas gerou ilhas de sílica na superfície dos cordões, o que pode comprometer a qualidade superficial da peça.
6. A mistura C8 proporcionou o melhor desempenho geral, com estabilidade no processo, boa molhabilidade, penetração moderada e cordões com geometria adequada, sendo, portanto, a mais recomendada para manufatura aditiva com aço carbono utilizando o processo CMT.

## 5. Agradecimentos

Os autores agradecem ao Laboratório de Soldagem e Mecatrônica – LABSOLDA da Universidade Federal de Santa Catarina (UFSC) pelo suporte técnico e infraestrutura oferecida durante a realização deste trabalho. Agradecem também à Petrobras e à Shell pelo apoio financeiro e incentivo à pesquisa aplicada em processos de soldagem e manufatura aditiva. Este estudo foi parcialmente financiado pela Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior – Brasil (CAPES).

## 6. Referências Bibliográficas

- [1] SILVA, R.H.G.; DUTRA, J.C.; GOHR, R.; OLIVEIRA, M.A. Controlled Short-Circuiting MIG/MAG Welding Process (CCC) Applied to the Root Pass in the Construction of Offshore Oil Pipelines – Process Analysis Tools. In: ISOPE, 2006. p. 5.
- [2] WU, Y.; KOVACEVIC, R. Mechanically assisted droplet transfer process in gas metal arc welding. *Proc. Inst. Mech. Eng. B J. Eng. Manuf.*, v. 216, p. 555–564, 2002. <https://doi.org/10.1243/0954405021520247>
- [3] FILHO, H.; SILVA, R.H.G.; DUTRA, J.C. Comparação do Processo MIG/MAG em Transferência por Curto-Circuito com Controle de Corrente (CCC) com o Processo STT na Soldagem de Passes de Raiz em Dutos. In: XXXVIII CONSOLDA, Ouro Preto, MG, 2012.
- [4] MVOLA, B.; KAH, P.; LAYUS, P. Review of current waveform control effects on weld geometry in gas metal arc welding process. *Int. J. Adv. Manuf. Technol.*, v. 96, p. 4243–4265, 2018. <https://doi.org/10.1007/s00170-018-1879-z>
- [5] FURUKAWA, K. New CMT arc welding process – welding of steel to aluminium dissimilar metals and welding of super-thin aluminium sheets. *Weld. Int.*, v. 20, p. 440–445, 2006. <https://doi.org/10.1533/wint.2006.3598>
- [6] KAH, P.; SUORANTA, R.; MARTIKAINEN, J. Advanced gas metal arc welding processes. *Int. J. Adv. Manuf. Technol.*, v. 67, p. 655–674, 2013. <https://doi.org/10.1007/s00170-012-4513-5>
- [7] CUNNINGHAM, C.R.; FLYNN, J.M.; SHOKRANI, A.; DHOKIA, V.; NEWMAN, S.T. Invited review article: Strategies and processes for high quality wire arc additive manufacturing. *Addit. Manuf.*, v. 22, p. 672–686, 2018. <https://doi.org/10.1016/j.addma.2018.06.020>
- [8] PICKIN, C.G.; WILLIAMS, S.W.; LUNT, M. Characterisation of the cold metal transfer (CMT) process and its application for low dilution cladding. *J. Mater. Process. Technol.*, v. 211, p. 496–502, 2011. <https://doi.org/10.1016/j.jmatprotec.2010.11.005>
- [9] KAZANAS, P.; DEHERKAR, P.; ALMEIDA, P.; LOCKETT, H.; WILLIAMS, S. Fabrication of geometrical features using wire and arc additive manufacture. *Proc. Inst. Mech. Eng. B J. Eng. Manuf.*, v. 226, p. 1042–1051, 2012. <https://doi.org/10.1177/0954405412437126>
- [10] TANKOVA, T. et al. Characterization of robotized CMT-WAAM carbon steel. *J. Constr. Steel Res.*, v. 199, p. 107624, 2022. <https://doi.org/10.1016/j.jcsr.2022.107624>
- [11] HUANG, C. et al. Mechanical testing and microstructural analysis of wire arc additively manufactured steels. *Mater. Des.*, v. 216, p. 110544, 2022. <https://doi.org/10.1016/j.matdes.2022.110544>
- [12] ERMAKOVA, A. et al. Investigation of mechanical and fracture properties of wire and arc additively manufactured low carbon steel components. *Theor. Appl. Fract. Mech.*, v. 109, p. 102685, 2020. <https://doi.org/10.1016/j.tafmec.2020.102685>
- [13] NAGASAI, B.P.; MALARVIZHI, S.; BALASUBRAMANIAN, V. Effect of welding processes on mechanical and metallurgical characteristics of carbon steel cylindrical components made by wire arc additive manufacturing (WAAM) technique. *CIRP J. Manuf. Sci. Technol.*, v. 36, p. 100–116, 2022. <https://doi.org/10.1016/j.cirpj.2021.11.005>
- [14] SILVESTRU, V.-A. et al. Performance under tensile loading of point-by-point wire and arc additively manufactured steel bars for structural components. *Mater. Des.*, v. 205, p. 109740, 2021. <https://doi.org/10.1016/j.matdes.2021.109740>

- [15] HERTEL, M. et al. The role of metal vapour in gas metal arc welding and methods of combined experimental and numerical process analysis. *Plasma Chem. Plasma Process.*, v. 37, p. 531–547, 2017. <https://doi.org/10.1007/s11090-017-9790-1>
- [16] KAH, P.; MARTIKAINEN, J. Influence of shielding gases in the welding of metals. *Int. J. Adv. Manuf. Technol.*, v. 64, p. 1411–1421, 2013. <https://doi.org/10.1007/s00170-012-4111-6>
- [17] SILVA, R.H.G. Soldagem MIG/MAG em Transferência Metálica por Curto-Circuito Controlado Aplicada ao Passe de Raiz. 2005.
- [18] GALEAZZI, D. et al. Evaluation of thermal and geometric properties of martensitic stainless steel thin walls built by additive manufacturing cold metal transfer (CMT) processes. *Int. J. Adv. Manuf. Technol.*, v. 120, p. 2151–2165, 2022. <https://doi.org/10.1007/s00170-022-08921-x>
- [19] DING, D.; PAN, Z.; CUIURI, D.; LI, H. A multi-bead overlapping model for robotic wire and arc additive manufacturing (WAAM). *Robot. Comput.-Integr. Manuf.*, v. 31, p. 101–110, 2015. <https://doi.org/10.1016/j.rcim.2014.08.008>
- [20] DING, D.; PAN, Z.; CUIURI, D.; LI, H. A practical path planning methodology for wire and arc additive manufacturing of thin-walled structures. *Robot. Comput.-Integr. Manuf.*, v. 34, p. 8–19, 2015. <https://doi.org/10.1016/j.rcim.2015.01.003>
- [21] DING, D.; PAN, Z.; CUIURI, D.; LI, H. A tool-path generation strategy for wire and arc additive manufacturing. *Int. J. Adv. Manuf. Technol.*, v. 73, p. 173–183, 2014. <https://doi.org/10.1007/s00170-014-5808-5>