

Avaliação multiparamétrica da estabilidade da variante CMT (Cold Metal Transfer) do processo MIG/MAG**(Multiparametric evaluation of the stability of the CMT (Cold Metal Transfer) variant of the MIG/MAG welding process)***Daniel Galeazzi¹, Régis Henrique Golçalves e Silva¹, Mateus Baracelli Schwedersky¹**¹Universidade Federal de Santa Catarina, CTC – Laboratório de Soldagem e Mecatronica LABSOLDA, Florianópolis, Santa Catarina, Brasil, daniel.galeazzi@posgrad.ufsc.br***Resumo**

Este trabalho apresenta o desenvolvimento e aplicação de dois métodos multiparamétricos para avaliar a estabilidade da variante CMT (Cold Metal Transfer) do processo MIG/MAG, com foco em aplicações na manufatura aditiva. Utilizando uma bancada robotizada equipada com sensores e câmeras de alta velocidade, analisou-se o comportamento da transferência metálica em diferentes velocidades de alimentação de arame (VA) e atmosferas gasosas (Ar, C8 e C25). O primeiro método baseia-se na identificação de ciclos satisfatórios por meio de critérios elétricos definidos, enquanto o segundo utiliza o cálculo da entropia dos sinais com base na teoria da informação. Os resultados demonstraram que a estabilidade do processo diminui com o aumento da VA, especialmente a partir de 8 m/min, independentemente da composição gasosa. Os dois métodos se mostraram complementares e eficazes na caracterização da estabilidade do processo CMT, permitindo a definição de uma faixa operacional estável para aplicações críticas como a manufatura aditiva.

Palavras-chave: CMT; estabilidade; entropia; transferência metálica; soldagem; manufatura aditiva.

Abstract: *This study presents the development and application of two multiparametric methods to assess the stability of the Cold Metal Transfer (CMT) variant of the MIG/MAG welding process, with emphasis on additive manufacturing applications. A robotic experimental setup equipped with sensors and high-speed imaging was used to analyze the metal transfer behavior at different wire feed speeds (WFS) and shielding gas compositions (Ar, C8, and C25). The first method is based on detecting satisfactory cycles through electrical signal criteria, while the second applies entropy calculation from information theory. Results showed that process stability decreases with increasing WFS, especially beyond 8 m/min, regardless of gas composition. Both methods proved effective and complementary in characterizing the CMT process stability, enabling the definition of an operational range suitable for additive manufacturing.*

Key-words: CMT; stability; entropy; metal transfer; welding; 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.

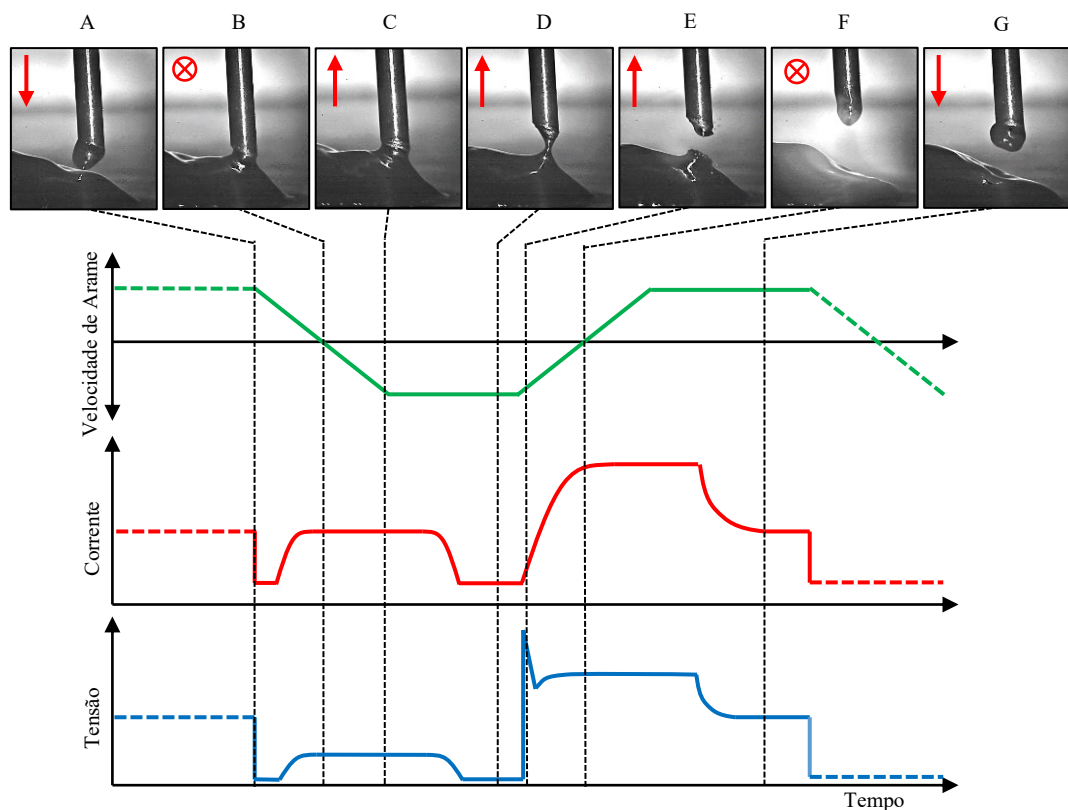


Figura 1. Formatos de onda de velocidade de arame instantânea, corrente e tensão típicos da variante CMT do processo MIG/MAG para aço e suas ligas.

Nesta variante, apesar do elevado nível de sofisticação ainda se tem dificuldades em termos de definição do conceito de estabilidade, devido a sua complexidade em função do elevado número de variáveis e interdependência entre elas.

O conceito de estabilidade na soldagem pode ser simplesmente descrito como o ato de manter o processo em funcionamento repetitivo, preservando suas características elétricas e físicas ao longo da operação, tais como corrente e tensão, velocidade de arame, ruído, luminosidade e continuidade do cordão, sem necessariamente otimizá-lo para uma determinada aplicação. Surge, então, a questão de como mensurar e quantificar a estabilidade do processo de soldagem e identificar as fontes de instabilidade, a fim de definir uma faixa de operação estável. Alguns autores, como Lankin [9], Kumar et al. [10, 11], Huang et al. [12], kang e Rhee [13], Suban e Tusek [14], Roca et al. [15], Silva et al. [16] e Galeazzi et al. [17] apresentam métodos para mensurar, de forma qualitativa ou quantitativa, a estabilidade do processo. Geralmente, esses métodos se concentram em verificar a continuidade

entre os ciclos de transferência, observando a tensão, corrente, período de transferência e até o ruído gerado pelo processo. Isso é feito por meio de índices estatísticos como desvio padrão, variância, coeficiente de variação ou desvio padrão relativo.

Estes métodos são bastante eficazes para lidar com operações que utilizam o processo MIG/MAG convencional. No entanto, quando aplicados a processos MIG/MAG com maior nível de sofisticação como curto-circuito controlado, pulsado e alimentação dinâmica, podem distorcer e erroneamente inferir estabilidade ou instabilidade. Isso é notável na variante CMT, a qual envolve um controle misto, abrangendo tanto a forma de onda de corrente quanto a velocidade de alimentação. Ambos, quando combinados, se apresentam como um modo de transferência metálica exclusivo, que pode ser referido como transferência metálica eletromecanicamente assistida. Diante deste cenário, se tem como objetivo apresentar um estudo sobre dois métodos de análise multiparamétrica para definição da estabilidade para a variante CMT.

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 CO₂ (C8) e 25% de CO₂ (C25) em balanço com argônio. Para a monitoração do processo, bem como das variáveis de soldagem foi utilizado um sistema de aquisição de dados de soldagem IMC SAP. A Figura 2 ilustra esquematicamente a bancada de experimentos utilizada e instrumentada com os sensores que compõem o SAP.

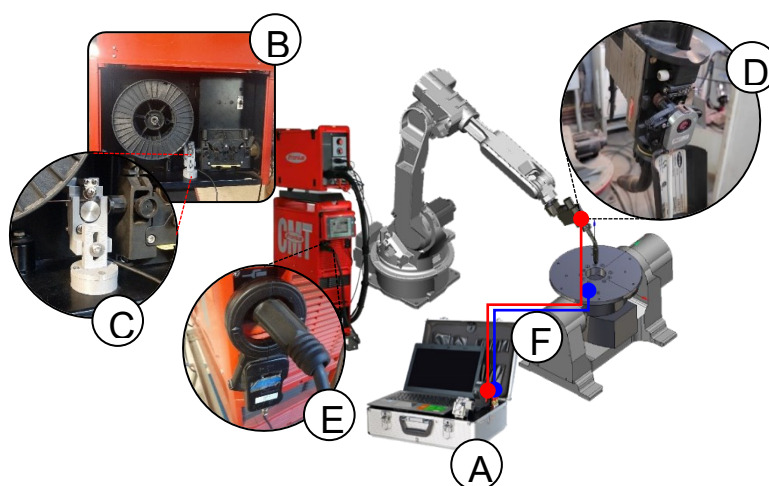


Figura 2. Disposição dos sensores utilizados para aquisição das variáveis de soldagem, onde: A) SAPV4.0; B) Cabeçote de alimentação; C) Encoder MVA médio; D) Encoder MVA instantâneo; E) Sensor de efeito Hall; F) Cabos para medição de tensão.

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.

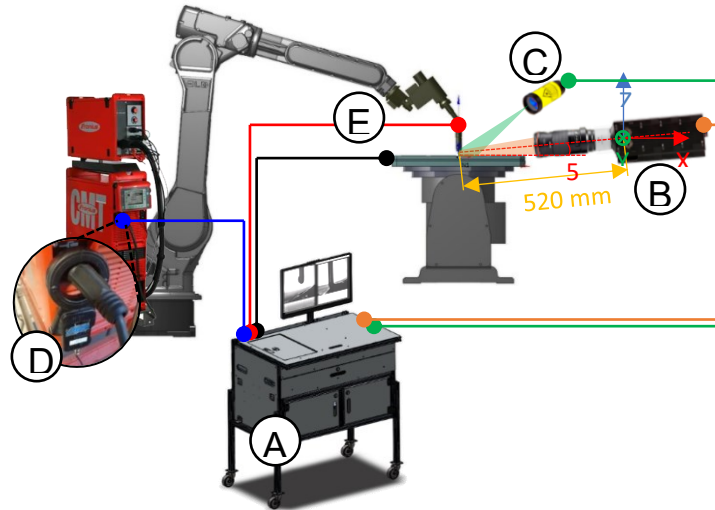


Figura 3. Disposição dos equipamentos utilizados para realização da filmagem em alta velocidade e aquisição das variáveis de soldagem, onde: A) Unidade de controle da câmera de alta velocidade e periféricos; B) Câmera IDT Y4-S2; C) Iluminação Laser Cavitária; D) Sensor de efeito Hall; E) Sensores para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

Inicialmente, foi realizada a delimitação de uma faixa operacional entre 4 e 8 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). Foram desenvolvidos dois métodos específicos de análise de estabilidade para a variante CMT, abrangendo tanto a análise da transferência metálica, através de filmagens em alta velocidade, quanto os sinais elétricos de soldagem.

O primeiro método se concentrou na avaliação da precisão do ciclo de transferência, através da verificação de cada estágio do processo, por meio da análise simultânea dos sinais de tensão e corrente ao longo de 5 segundos de aquisição. Esta análise foi conduzida com base na verificação prévia de n ciclos considerados satisfatórios, dos quais extraiu-se valores de referência, notadamente, os valores de corrente no início do curto-circuito e na reabertura subsequente, a partir de um valor de tensão de referência, neste caso, 7 V.

O valor de corrente de referência para o início do curto-circuito foi calculado a partir da média de 5 leituras posteriores à primeira leitura de tensão abaixo do valor de referência. Para o cálculo da corrente de referência na reabertura, utilizou-se a média de 5 leituras anteriores à primeira leitura acima da referência. Utilizando esses valores em comparação com os obtidos ao aplicar a mesma metodologia ao longo do período amostral proposto, foi calculado o número de acertos, ou seja, a quantidade de ciclos que passaram por todas as etapas esperadas e foram considerados satisfatórios. Para o cálculo do número de acertos, utilizou-se o seguinte critério: se a média e o desvio padrão de cinco leituras exceder o valor de referência e seu desvio padrão em qualquer uma dessas etapas, início do curto-circuito ou reabertura, o ciclo é classificado como inadequado; caso contrário, é classificado como satisfatório. A equação (1) expressa algebricamente a lógica criada.

$$C = \sum_{i=1}^n x_i \quad \text{se} \quad \begin{cases} I_c \pm \sigma_{I_c} \in [I_{cref} - \sigma_{I_{cref}}, I_{cref} + \sigma_{I_{cref}}] \\ I_r \pm \sigma_{I_r} \in [I_{rref} - \sigma_{I_{rref}}, I_{rref} + \sigma_{I_{rref}}] \end{cases} \quad (1)$$

Onde:

C = número de ciclos satisfatórios;

n = número total de ciclos;

x_i = Contador de ciclos satisfatórios;

I_c = Corrente média de 5 leituras no início do curto-circuito (A);

I_r = Corrente média de 5 leituras na reabertura do arco (A);

I_{cref} = Corrente de referência no início do curto-circuito (A);

I_{rref} = Corrente de referência na reabertura do arco (A);

σ_{I_c} = Desvio padrão da corrente no início do curto-circuito (A);

σ_{I_r} = Desvio padrão da corrente na reabertura do arco (A);

$\sigma_{I_{cref}}$ = Desvio padrão da corrente de referência no início do curto-circuito (A);

$\sigma_{I_{rref}}$ = Desvio padrão da corrente de referência na reabertura do arco (A);

Por fim, a partir do número de ciclos considerados satisfatórios, calculou-se o percentual de acertos ao longo dos n ciclos (Equação (2)). A avaliação de estabilidade é determinada por um limiar de 80%, a partir do qual o processo é considerado estável.

$$A = \frac{C}{n} \cdot 100 \quad (2)$$

Onde:

A = Percentual de acertos (%);

C = número de acertos satisfatórios;

n = total de ciclos.

O segundo método concentrou-se no cálculo da entropia por meio do método de Shannon, a qual é fundamentada nos princípios da teoria da informação. Inicialmente, realizou-se a identificação dos símbolos distintos presentes no sinal de tensão em um período amostral de 5 segundos de aquisição. Posteriormente, efetuou-se a contagem da frequência de ocorrência de cada símbolo, o que proporciona uma visão quantitativa da distribuição dos elementos no conjunto analisado. Com base nessa contagem, as probabilidades individuais de ocorrência para cada símbolo são determinadas. A fim de assegurar a estabilidade do cálculo, quaisquer elementos associados a probabilidades nulas foram excluídos da análise. A entropia é, então, calculada mediante a aplicação da fórmula de Shannon, que envolve a soma das probabilidades multiplicadas pelo logaritmo na base 2 das mesmas, expresso na equação (3). Por fim, a entropia é normalizada dividindo-se o resultado pelo logaritmo na base 2 do número total de símbolos contidos no sinal.

$$H(U) = - \sum_{i=1}^n p(U_i) \cdot \log p(U_i) \quad (3)$$

Onde:

$H(U)$ = entropia de tensão;

U = Tensão de soldagem;

$p(U_i)$ = Probabilidade de o i -ésimo valor de tensão.

Estes procedimentos ofereceram uma medida objetiva da incerteza inerente ao sinal, possibilitando uma avaliação quantitativa do nível de dispersão dos dados. Isso, por sua vez, permitiu a mensuração da estabilidade do processo e viabilizou a delimitação da faixa operacional viável com base na estabilidade.

3. Resultados e Discussão

A forma de onda da variante CMT para o aço é bastante característica, conforme exemplificado na Figura 1, apresentando um pulso de corrente de alta intensidade, uma rampa não linear ou exponencial decrescente até um ponto de base, seguido de um pulso de corrente na fase de curto-circuito que culmina em um segundo ponto de base próximo ao momento de destacamento. O comportamento expresso é o esperado ao longo de toda a operação. Contudo, como vivemos em um mundo probabilístico, é esperado que em algum momento da operação ocorram divergências do esperado, caracterizando uma instabilidade que pode ser tolerável dependendo da sua intensidade.

Na variante CMT, como ilustrado na Figura 4, os pontos de instabilidade na transferência metálica ocorrem durante a reabertura (4). Isso se deve à ruptura prematura da ponte metálica causada pelo acoplamento incompleto e/ou insuficiente da gota à poça (1) metálica. Tal falha acontece devido à incorreta interpretação do curto-circuito pelo sistema de avanço, que deveria manter a aceleração do arame em direção à poça, em vez de iniciar a desaceleração. Isso, somado ao efeito pinch fomentado pela força de Lorentz induzida pelo pulso de corrente na fase de curto-circuito (2, 3), gera uma instabilidade que facilita a transferência da gota para a poça [18]. Por outro lado, independentemente do comportamento dinâmico da alimentação de arame, quando é detectada a ruptura da ponte metálica (4), o controle da fonte encerra a etapa de curto-circuito e inicia o recuo do arame, simultaneamente ao pulso de corrente associado à fase de arco (5).

Esse comportamento específico torna a quantificação da estabilidade do processo difícil por métodos convencionais, uma vez que ao analisar o comportamento do período ou do tempo de curto-circuito, não se observa uma diferença expressiva em relação à média. Nesse contexto, a partir da observação dos pontos de início e fim do curto-circuito considerando o comportamento esperado, foi desenvolvido um método específico. Esse método foca em identificar o número de períodos corretos em uma amostra de n períodos e, a partir disso, estimar um percentual de acertos. Além desse método, outro método baseado na teoria da informação foi utilizado. Esse método calcula a entropia do sinal a partir do teorema de Shannon.

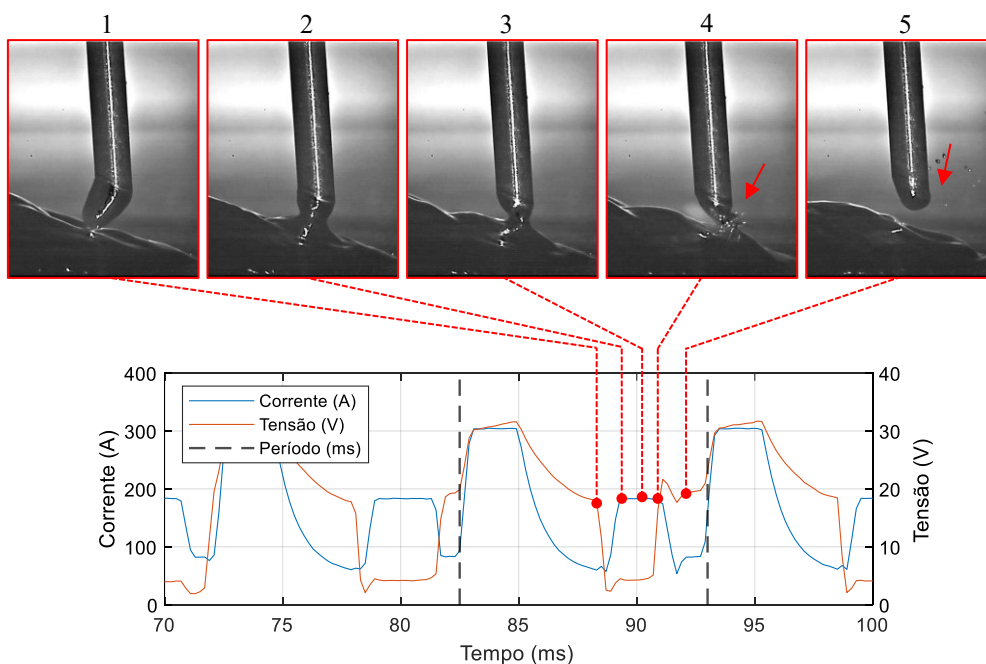


Figura 4. Momento de instabilidade registrado por filmagem em alta velocidade para VA programada de 5 m/min e mistura C25.

A partir dessas considerações sobre o comportamento da instabilidade e aplicando o método descrito na metodologia, observou-se que a estabilidade do CMT diminui à medida que a velocidade de alimentação aumenta. Isso acontece independentemente do percentual de CO₂ no gás de proteção, como evidenciado no gráfico apresentado na Figura 5. O gráfico ilustra o percentual de acertos na transferência metálica para a faixa de velocidade de arame (VA) de 4 a 8 m/min, considerando as misturas de argônio e as misturas C8 e C25.

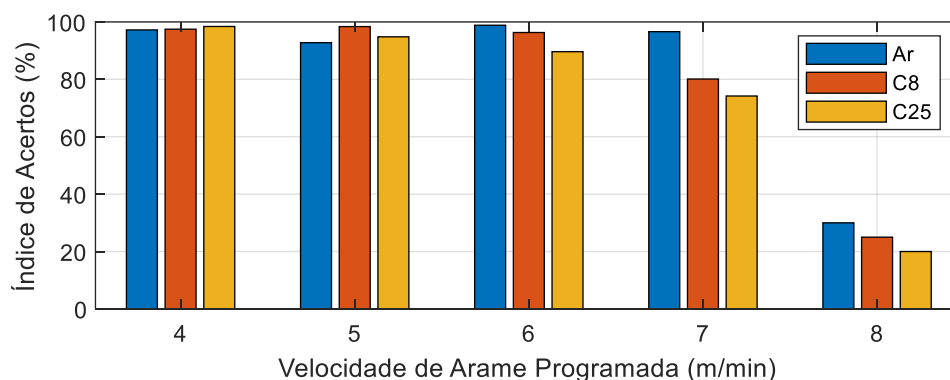


Figura 5 – Percentual de acertos de reabertura.

Aplicando a método de Shannon para calcular a entropia dos sinais de corrente e tensão obteve-se os dados presentes no gráfico da Figura 6. Foi possível verificar que o nível de entropia se mantém, na média, constante independente da mistura gasosa, apresentando um aumento significativo a partir da VA programada de 8 m/min. Neste contexto, é possível inferir que a entropia do sinal aumenta à medida que a instabilidade do processo aumenta, o que corrobora com os dados obtidos utilizando o método de cálculo de acertos da reabertura e se mostrando também como um método viável para determinação da estabilidade do processo.

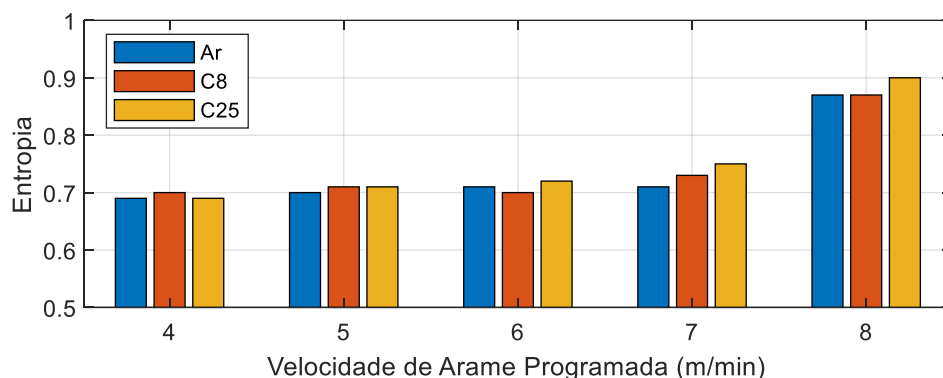


Figura 6 – Entropia de Shannon do sinal de corrente de reabertura.

Esta redução na acurácia da reabertura para a VA programada de 8 m/min ocorre devido a intensidade do pulso de corrente na fase de curto-circuito que, neste caso, gera o colapso prematuro da ponte metálica durante esta etapa, como mostram os frames da Figura 7, que corroboram com os resultados de Galeazzi et al. [18], os quais mostraram que o pulso de corrente na fase de curto-circuito tem como função principal auxiliar na estricção da ponte metálica atuando de modo a intensificar o efeito *pinch* por meio do aumento da força de Lorentz, sincronizado ao recuo do arame eletrodo. Além disso, observou-se um valor médio de corrente de aproximadamente 230 A.

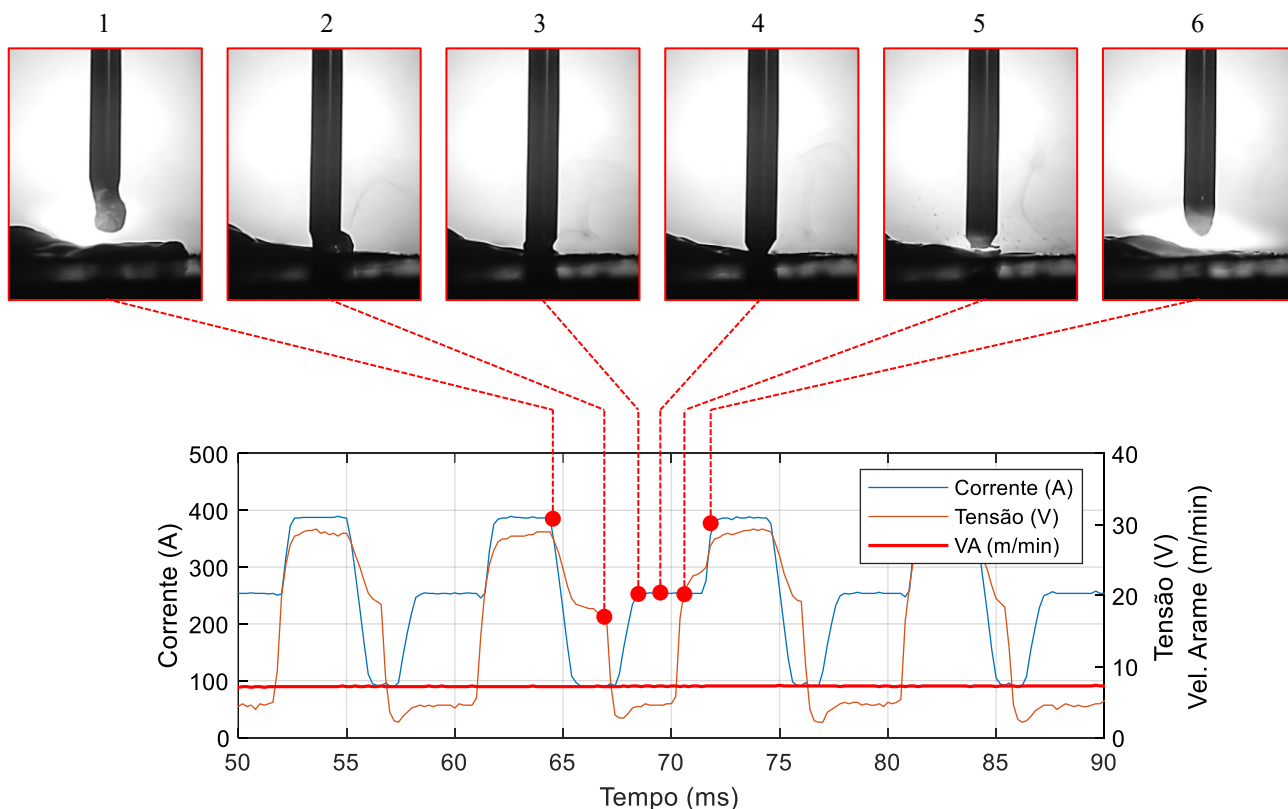


Figura 7 – Registro de colapso prematuro da ponte metálica em correntes elevadas para a VA programada de 8 m/min utilizando C8.

Além da reabertura incorreta do arco, foram observadas gotas secundárias na sequência do pulso de corrente durante a fase de arco. Estas gotas podem ser visualizadas na Figura 8. Acredita-se que este fenômeno ocorreu devido à intensidade do pulso, combinada com a elevada potência gerada, que se manteve na faixa de 4,5 kW para todas as misturas. Estas gotas ocorreram, em maioria, com uma frequência de aproximadamente 1 a cada 10 ciclos.

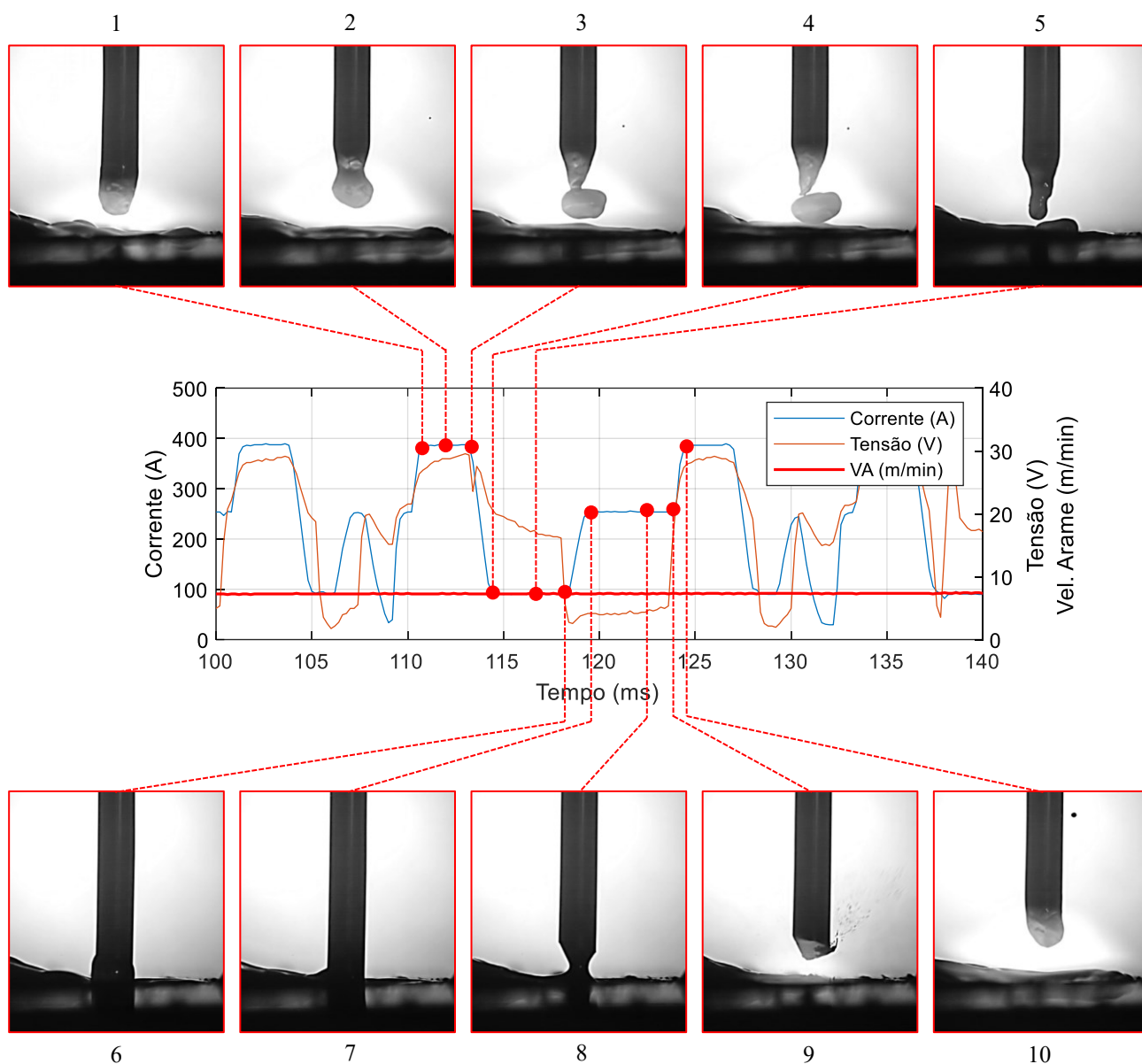


Figura 8 – Registro de gota secundária destacada durante a fase de arco para a VA programada de 8 m/min utilizando C8

Todos esses fenômenos acabam reduzindo a precisão da transferência nesta faixa. Embora o processo opere adequadamente sem limitações significativas à sua aplicação, resultando cordões retilíneos e homogêneos (Figura 9), a forma de onda produzida não segue o padrão esperado, típico da variante. Estas instabilidades, principalmente a reabertura em correntes elevadas geram fumos, vapores e respingos, além de provocar efeitos físicos sobre a poça de fusão, como aumento da pressão e oscilação, que influenciam diretamente na geometria do cordão. Esses aspectos são cruciais para a manufatura aditiva, devido aos longos ciclos de deposição.

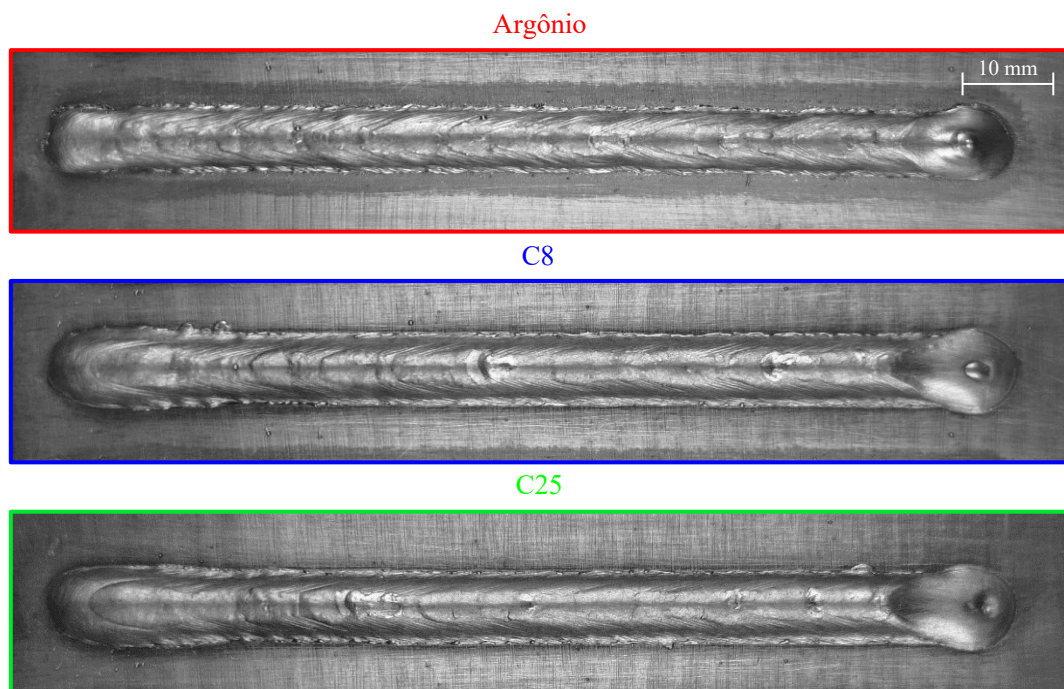


Figura 9 – Aparência superficial dos cordões depositados com a VA programada de 8 m/min e velocidade de deslocamento de 60 cm/min.

Os resultados obtidos demonstram que a variante CMT do processo MIG/MAG apresenta uma sensível variação na estabilidade conforme a velocidade de alimentação de arame e o tipo de gás de proteção utilizados. A aplicação dos métodos propostos permitiu identificar com clareza os pontos de instabilidade, especialmente relacionados à reabertura do arco e ao destacamento de gotas secundárias em velocidades mais elevadas. Notou-se que o uso de argônio puro acentua essas instabilidades, ao passo que as misturas C8 e C25 promovem maior controle e repetibilidade na transferência metálica. Assim, a combinação das análises por precisão de ciclos e entropia revelou-se eficiente para mapear a faixa operacional estável do processo, sendo esta limitada a uma VA de até 7 m/min, o que fornece subsídios práticos importantes para aplicações industriais de manufatura aditiva que exigem elevada confiabilidade no processo.

4. Conclusões

1. Dois métodos de avaliação de estabilidade foram propostos e validados para a variante CMT do processo MIG/MAG: um baseado na precisão dos ciclos de transferência e outro no cálculo da entropia dos sinais elétricos.
2. Ambos os métodos demonstraram ser eficazes na identificação de instabilidades associadas ao aumento da velocidade de alimentação de arame, especialmente a partir de 8 m/min.
3. A ocorrência de reaberturas incorretas e gotas secundárias foi mais frequente em altas velocidades, impactando a transferência metálica e a estabilidade do processo, mesmo com diferentes misturas gasosas.
4. Apesar das instabilidades detectadas, os cordões depositados apresentaram geometria satisfatória, mas com aumento de respingos e emissão de fumos, o que pode comprometer aplicações na manufatura aditiva de longo prazo.
5. Com base nos resultados, recomenda-se limitar a VA em 7 m/min como valor máximo para garantir a estabilidade do processo CMT neste contexto.
6. Observou-se que o uso de argônio puro como gás de proteção resultou em menor estabilidade do processo em comparação com as misturas Ar+CO₂ (C8 e C25). O argônio apresentou maior ocorrência de instabilidades durante a reabertura do arco, o que compromete a regularidade da transferência metálica. Assim, as misturas C8 e C25 demonstraram ser mais adequadas para aplicações com a variante CMT, favorecendo uma operação mais estável em faixas elevadas de velocidade de alimentação.

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] LANKIN, Y.N. Indicators of stability of the GMAW process. *Paton Weld. J.*, v. 1, p. 6–13, 2011.
- [10] KUMAR, V., ALBERT, S.K., CHANDRASEKHAR, N. Signal processing approach on weld data for evaluation of arc welding electrodes using probability density distributions. *Measurement*, v. 133, p. 23–32, 2019. <https://doi.org/10.1016/j.measurement.2018.09.076>
- [11] KUMAR, V., ALBERT, S.K., CHANDRASEKHAR, N., JAYAPANDIAN, J. Evaluation of welding skill using probability density distributions and neural network analysis. *Measurement*, v. 116, p. 114–121, 2018. <https://doi.org/10.1016/j.measurement.2017.11.009>
- [12] HUANG, S.H., LIU, P., MOKASDAR, A., HOU, L. Additive manufacturing and its societal impact: A literature review, 2013.
- [13] KANG, M.J., RHEE, S. The statistical models for estimating the amount of spatter in the short circuit transfer mode of GMAW. *Weld. J.*, v. 80, p. 1–8, 2001.
- [14] SUBAN, M., TUŠEK, J. Dependence of melting rate in MIG/MAG welding on the type of shielding gas used. *J. Mater. Process. Technol.*, v. 119, p. 185–192, 2001. [https://doi.org/10.1016/S0924-0136\(01\)00940-2](https://doi.org/10.1016/S0924-0136(01)00940-2)
- [15] ROCA, A.S., FALS, H.C., FERNÁNDEZ, J.B., MACÍAS, E.J., ADÁN, F.S. New stability index for short circuit transfer mode in GMAW process using acoustic emission signals. *Sci. Technol. Weld. Join.*, v. 12, p. 460–466, 2007. <https://doi.org/10.1179/174329307X213882>
- [16] SILVA, R.H.G., GALEAZZI, D., ROCHA, P.C.J., VIVIANI, A.B., BERNARDI, R.A. Multiple output analysis for advanced waveform and controlled short-circuit MIG/MAG variants. *Weld. World*, v. 65, p. 2267–2282, 2021. <https://doi.org/10.1007/s40194-021-01176-2>
- [17] GALEAZZI, D., SILVA, R.H.G., VIVIANI, A.B., JAEGER, P.R., SCHWEDERSKY, M.B. 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>
- [18] GALEAZZI, D., SILVA, R.H.G., PIGOZZO, I.O., DA ROSA, A.F., PEREIRA, A.S., MARQUES, C. Analysis of current pulse during short-circuit phase in CMT version of GMAW process under a view of additive manufacturing. *Weld. World*, v. 66, p. 1369–1380, 2022. <https://doi.org/10.1007/s40194-022-01298-1>