



**IBP1475\_18**  
**DESENVOLVIMENTO E AVALIAÇÃO DE**  
**MODALIDADES DO PROCESSO MIG/MAG EM**  
**OPERAÇÕES DE REVESTIMENTO VERTICAL COM**  
**LIGA 625**

Arthur Gondim Rodrigues<sup>1</sup>, Cleber Marques<sup>2</sup>, Régis H. G. e Silva<sup>3</sup>

**Copyright 2018, Instituto Brasileiro de Petróleo, Gás e Biocombustíveis - IBP**

Este Trabalho Técnico foi preparado para apresentação na Rio Oil & Gas Expo and Conference 2018, realizada no período de 24 a 27 de setembro de 2018, na cidade do Rio de Janeiro. Este Trabalho Técnico foi selecionado para apresentação pelo Comitê Técnico do evento, seguindo as informações contidas no trabalho completo submetido pelo(s) autor(es). Os organizadores não irão traduzir ou corrigir os textos recebidos. O material conforme, apresentado, não necessariamente reflete as opiniões do Instituto Brasileiro de Petróleo, Gás e Biocombustíveis, Sócios e Representantes. É de conhecimento e aprovação do(s) autor(es) que este Trabalho Técnico seja publicado nos Anais da Rio Oil & Gas Expo and Conference 2018.

---

## Resumo

A realização de operações de revestimento metálico por soldagem MIG/MAG tem sido objeto de estudo e vem evoluindo juntamente com os equipamentos e tecnologias associadas. Este trabalho visa avaliar os efeitos das modalidades em corrente pulsada e curto-circuito controlado com alimentação dinâmica (AD) em depósitos verticais utilizando a liga 625. Essas modalidades foram avaliadas individualmente e atuando em conjunto, por meio de um processo misto denominado MIG/MAG AD-P, resultado de desenvolvimentos de equipamentos e tecnologias brasileiras. Para os ensaios de atuação conjunta, definiu-se proporções entre os modos de transferência em 75%, 50% e 25% relativos ao número de ciclos em transferência pulsada e ciclos em curto-circuito AD. Foram observados depósitos com uma melhor molhabilidade utilizando maiores proporções do modo pulsado, entretanto aspectos relacionados a diluição não foram alterados. Averiguou-se que a ausência de efeitos na diluição se dá pela posição vertical. Através de ensaios na posição plana, concluiu-se que o aumento gradativo do aporte térmico causa uma taxa de diluição maior.

**Palavras-chave:** Soldagem. Alimentação dinâmica. Taxa de Diluição.

## Abstract

Metal cladding operations using GMAW have been studied and have been evolving along with its associated equipment and technologies. This work aims to evaluate the effects of the different transfer modes, pulsed current and controlled short-circuit with dynamic wire-feed (DWF), in vertical deposits using alloy 625. These modes were evaluated individually and acting together, through a mixed process called MIG/MAG AD-P, the result of Brazilian developments in equipment and technologies. For the evaluation of the combined process, standard ratios between the transfer modes were defined in 75%, 50% and 25% relative to the number of cycles in pulsed transfer and cycles in short-circuit DWF. Better wettability was observed using larger proportions of the pulsed mode, however aspects related to dilution were constant. It was found that the absence of dilution effects is due to the vertical position. By means of tests on flat position, it was concluded that the gradual increase of the thermal input causes a higher dilution rate.

**Keywords:** Welding. Dynamic feeding. Dilution rate.

<sup>1</sup> Mestrando, Engenheiro de Controle e Automação – LABSOLDA/UFSC

<sup>2</sup> Dr., Engenheiro Mecânico – LABSOLDA/UFSC

<sup>3</sup> Dr., Professor – LABSOLDA/UFSC

## 1. Introdução

No setor de petróleo e gás, as operações de revestimento metálico são comumente empregadas em função de condições favoráveis à ocorrência de corrosão as quais os diversos componentes estão submetidos. Em determinadas situações, a necessidade de revestir não está somente relacionada com o alto custo de se produzir uma peça inteira de material resistente à corrosão, há também uma necessidade de se garantir propriedades mecânicas que não poderiam ser atingidas pelas CRA's (*Corrosion Resistant Alloys*). “Uma grande variedade de ligas metálicas pode ser utilizada como CRAs, dentre as mais importantes pode-se destacar os aços inoxidáveis e ligas a base de níquel” (ASM International, 1993). Em um contexto voltado à manufatura de componentes revestidos, os processos de fabricação por soldagem têm significativa participação.

De maneira geral, as especificações para operações de revestimento metálico estão relacionadas com a espessura da camada depositada e o nível de diluição com o metal de base que, em essência, deve ter valores baixos. Além disso, características de cunho operacional também são avaliadas, como a capacidade de automação do processo, a taxa de deposição fornecida e a qualidade do depósito. A análise sobre todos esses aspectos influencia na tomada de decisão sobre qual o processo utilizar em determinada situação.

O processo de soldagem MIG/MAG, com suas diversas versões, tem um vasto campo de aplicação para essa finalidade. “Versões que utilizam corrente pulsada possuem destaque para operações de revestimento, devido suas vantagens de estabilidade e controlabilidade da transferência metálica e da poça de fusão, além de menor tendência de falta de fusão e porosidades” (Silva, 2013). Apesar dessas características, a corrente pulsada promove uma alta potência para a quantidade de arame que está sendo depositada, o que pode influenciar nos níveis de diluição. Por esse motivo, modalidades que fornecem um relativo menor aporte de calor, como os curto-circuito controlados, têm sido exploradas. Vários trabalhos (Pickin et. al., 2010; Silva et. al., 2015; Egerland, 2009) avaliam o *Cold Metal Transfer* (CMT) para realização de procedimentos de cladeamento. Na Figura 1 tem-se um gráfico comparativo entre os processos CMT e MIG/MAG pulsado relacionando a taxa de deposição de material em função da potência instantânea do arco.

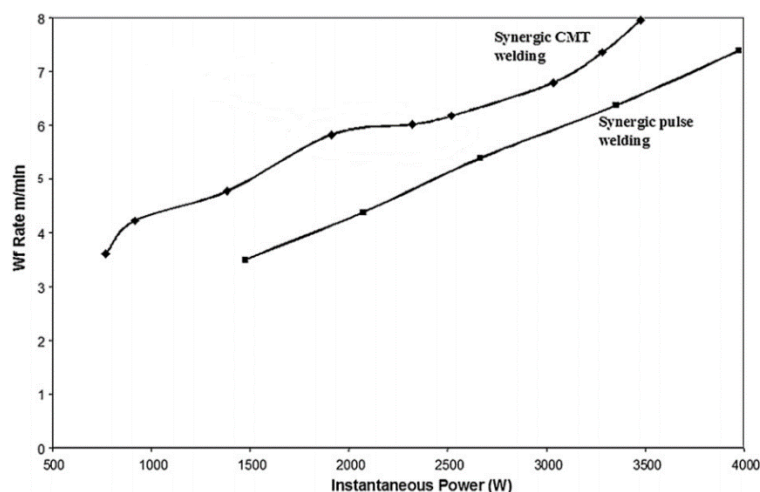


Figura 1. Comparativo entre taxas de deposição para o programa sinérgico CMT e soldagem pulsada utilizando arame Al 4043. Adaptado de (Pickin, Williams, & Lunt, 2010).

O trabalho de Pickin et al. (2010) compara os processos CMT e Pulsado em um revestimento multipasses utilizando ligas de alumínio. Pickin et al. mostram que, a cada passe sucessivo, o depósito utilizando CMT exibe uma razão de diluição decrescente e uma altura de

reforço crescente. Em contrapartida, o uso de corrente pulsada promove uma diluição maior e mais uniforme com uma altura de reforço reduzida. Por fim, os autores concluem que o processo CMT pode ser utilizado em tal aplicação e que, com o refino de parâmetros, permite obter um melhor controle sobre a diluição.

A adição de pulsos de corrente, promovendo o destacamento de gotas e transferência metálica por voo livre, combinada com períodos de transferência por curto-circuito no processo CMT deu origem a uma nova versão, o CMT *Pulse* (CMT+P). O acréscimo de pulsos intercalados com curtos-circuitos flexibiliza a regulação do procedimento com a possibilidade de adoção de diferentes níveis de aporte térmico, sem comprometer a estabilidade do arco e mantendo-se ausente de respingos. Dessa forma, a faixa de potência que o processo atua aumenta significativamente. De acordo com o fabricante, “este processo atinge qualquer valor na faixa de energia entre CMT e arco pulsado” (Fronius International GmbH, 2018). O gráfico b da Figura 2 ilustra a faixa de potência em que se encontram os processos em questão para a linha sinérgica do arame 4043 de 1,2mm de diâmetro.

O trabalho de Pang et al. (2016) defende que o aporte térmico pode ser melhor ajustado e controlado no processo CMT+P quando comparado ao processo CMT tradicional. Como resultado, o perfil de penetração e as dimensões do cordão de solda também podem ser controlados, variando-se o número de curtos-circuito CMT e pulsos de corrente. A Figura 2a mostra o esquemático para o formato da onda do CMT+P para um macroperíodo composto por 4 ciclos do processo pulsado e 2 ciclos do processo CMT.

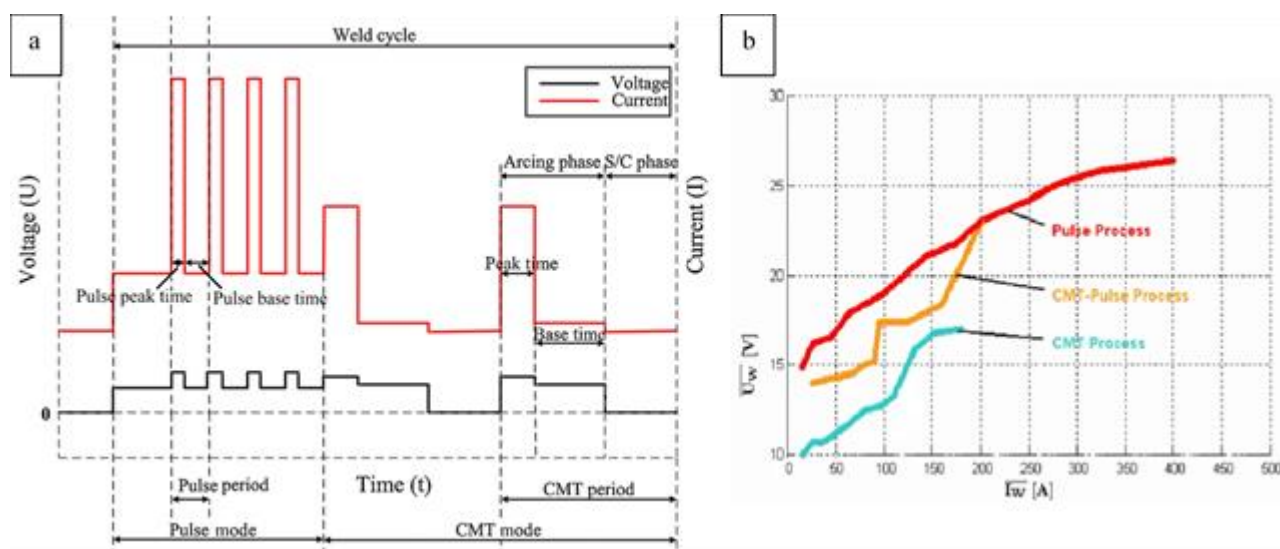


Figura 2. a) Esquemático para a forma de onda do processo CMT+P com 4 ciclos de processo pulsado e 2 ciclos CMT. Adaptado de (Pang, Hu, Shen, Wang, & Liang, 2016).

b) Relação entre tensão média e corrente média para os processos pulsado, CMT e CMT+P. Linha sinérgica do arame 4043 1,2 mm de diâmetro. Adaptado de (Kazmaier, 2010).

O CMT tem como característica fundamental a capacidade de controlar a transferência metálica utilizando o recurso de recuo do arame após a ocorrência do curto-circuito. “Versões que utilizam essa estratégia estão sendo denominadas de MIG/MAG com Alimentação Dinâmica do arame (MIG/MAG AD)” (Marques, 2017). O alto nível de controle que se obtém sobre processos desse tipo abre espaço para desenvolvimentos correlatos, que combinam diferentes formatos de onda de corrente no objetivo de ampliar a gama de aplicação do processo, fornecendo diferentes relações entre potência de soldagem e material depositado. Sendo assim, o presente trabalho tem por objetivo apresentar os desenvolvimentos relacionados com a implementação de técnicas próprias de controle do processo MIG/MAG AD, intercalando ciclos com maior nível de potência

fornecidas pela pulsação da corrente, configurando uma versão mista, aqui denominada de MIG/MAG AD-P. A quantidade de ciclos a executar em cada processo é configurável e os efeitos da relação entre o número de períodos de transferência em cada processo também é objeto de estudo neste trabalho.

Em geral, os trabalhos correntes na literatura exploram o processo CMT+P para soldagem de ligas de alumínio em posição plana. Entretanto, o emprego de novas tecnologias pode ser benéfico em situações mais próximas do que se encontra em operação, como o uso de ligas nobres e posições desfavoráveis ao procedimento. Como resultado prático de soldagem em uma aplicação do equipamento MIG/MAG-AD desenvolvido foram realizados procedimentos que visa o revestimento na posição vertical, utilizando como material de adição o arame da liga de níquel 625 sobre uma superfície de aço carbono. Objetiva-se concluir acerca das influências da técnica de alimentação dinâmica de arame no resultado do revestimento, bem como da alternância entre os modos pulsado e curto circuito de transferência metálica do processo MIG/MAG.

## 2. Metodologia

Os ensaios foram realizados visando simular uma aplicação de revestimento em posição vertical, sentido descendente. Os corpos de prova foram preparados em dimensões de 200 mm de comprimento e 100 mm de largura a partir de uma chapa de aço carbono 1020 de 12,7 mm (1/2") de espessura. Como arame de adição utilizou-se a liga de níquel 625, diâmetro de 1,2 mm. A proteção gasosa foi feita com uma mistura binária de argônio (75%) e hélio (25%).

A fim de se obter uma comparação direta do resultado de cada ensaio, optou-se por padronizar os parâmetros de velocidade de arame e de movimento do manipulador da tocha de soldagem em todos experimentos. Através de ensaios prévios, a velocidade de soldagem foi definida devido às limitações do processo pulsado, que apresenta uma maior tendência para o escorrimento da poça em posição vertical, exigindo valores mais elevados de velocidade de soldagem. Assim estabeleceu-se a velocidade de 60 cm/min (10 mm/s) para todos ensaios. As especificações do procedimento comuns a todos os ensaios podem ser observadas na Tabela 1 e o esquemático na Figura 3.

Tabela 1. Especificações comuns a todos ensaios.

Material de adição	Inconel 625; Ø1,2 mm
Material de base	Aço carbono SAE 1020
Gás de proteção	75% Ar + 25% He
Vazão de gás	17 l/min
Posição de soldagem	Vertical descendente
Ângulo de ataque	20° puxando
DBCP	17 mm
Velocidade de soldagem	10 mm/s

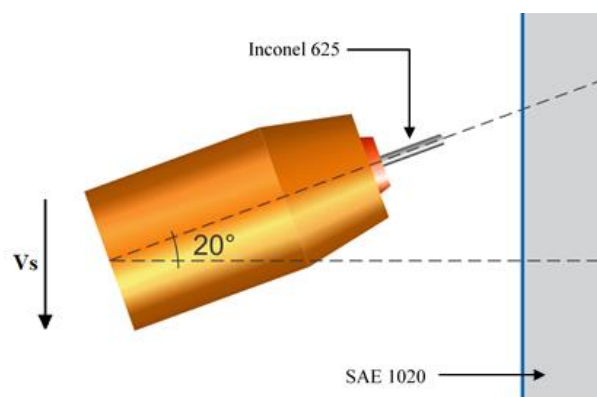


Figura 3. Esquemático do procedimento.

Ambos processos foram parametrizados de forma que resultassem em uma velocidade média de arame de 5,0 m/min. Para o processo pulsado a parametrização seguiu a premissa de uma gota por período, garantindo estabilidade e controlabilidade ao mesmo, conforme a metodologia proposta por Amin (1983). Já para o processo com alimentação dinâmica, o levantamento de

parâmetros foi realizado de forma empírica com o auxílio de ferramentas de medição de variáveis de soldagem. Os parâmetros essenciais levantados para ambos processos se encontram na Tabela 2.

Tabela 2. Principais parâmetros dos processos.

	<b>Pulsado</b>	<b>AD</b>
Ip (A)	380	280
tp (ms)	1,9	4,0
Ib (A)	95	100
tb (ms)	7,7	-
Ic (A)	-	70
Va (m/min)	5,0	5,0

Para realização das análises, em todos os ensaios foram adquiridos os parâmetros elétricos de soldagem com taxa de aquisição de 5 kHz. O resultado dos depósitos foi avaliado em inspeção visual e macrografia de seção transversal. O cálculo da diluição foi realizado conforme a Equação 1, onde  $A_r$  representa a área do reforço e  $A_p$  a área penetrada.

$$d_{\%} = \frac{A_r}{A_r + A_p} \cdot 100 \quad (1)$$

Inicialmente foram realizados ensaios de um único passe para diferentes percentuais entre ciclos de pulsado e ciclos de MIG/MAG AD, conforme indicado na Tabela 3. O objetivo seria de analisar a influência da alternância de modos de transferência bem como a proporção entre modos na diluição e no aspecto superficial do depósito sem a influência dos passes subsequentes em operações verticais. Para atingir as proporções definidas, determina-se ainda o macroperíodo como 4 períodos de transferência metálica, seja esta por voo livre, para o caso do MIG/MAG Pulsado, ou curto-circuito.

Tabela 3. Matriz de ensaios para cordões individuais.

	<b>% Pulsado</b>	<b>% MIG AD</b>	<b>Divisão do macroperíodo</b>
Ensaio 1	100	0	4P
Ensaio 3	75	25	3P + 1AD
Ensaio 4	50	50	2P + 2AD
Ensaio 5	25	75	1P + 3AD
Ensaio 2	0	100	4AD

Para todos os ensaios foi utilizada a fonte de soldagem DIGIPlus do fabricante IMC Soldagem, com capacidade de corrente de 600 A. Tanto o software quanto a arquitetura de controle eletrônico da fonte foram abertos pelo fabricante e modificados para o desenvolvimento deste trabalho. O protótipo de tocha de soldagem conta com um servomotor integrado ao corpo da mesma para promover a alimentação dinâmica, resultado de desenvolvimentos da equipe do LABSOLDA/UFSC.

Para aquisição de imagens da transferência metálica foi utilizada a câmera de alta velocidade modelo Y4-S2 do fabricante IDT. As imagens foram gravadas a uma taxa de 5000 frames por segundo, sincronizadas com a aquisição de dados de tensão e corrente do arco elétrico.

### 3. Resultados e Discussões

O primeiro ensaio consistiu na execução de um depósito utilizando o processo puramente pulsado (100% Pulsado). O processo foi devidamente parametrizado de forma a resultar em uma

gota por período com o destacamento da mesma durante a etapa de base. A aquisição de dados realizada durante o ensaio pode ser visualizada na Figura 4.

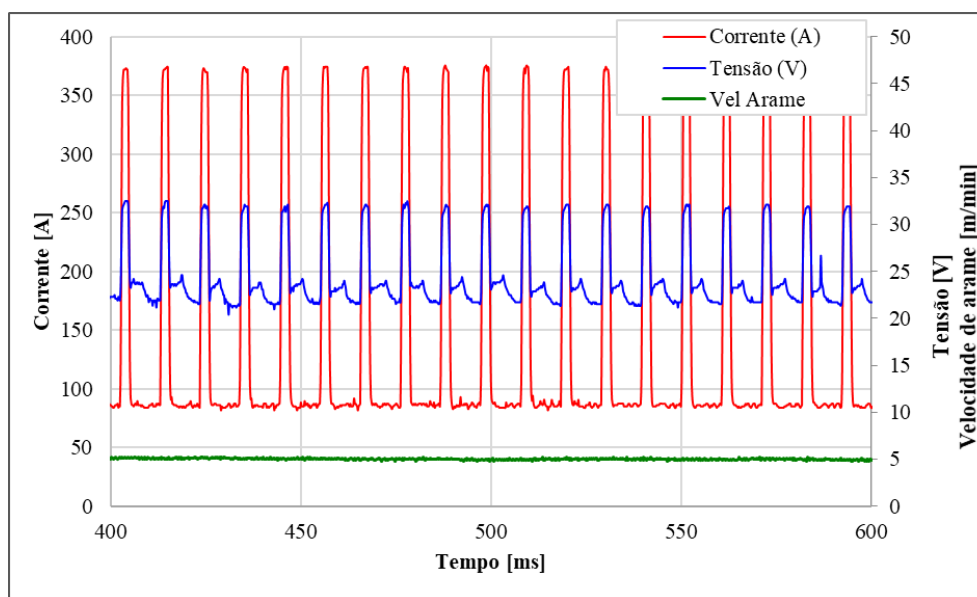


Figura 4. Oscilogramas de corrente, tensão e velocidade de arame para o Ensaio 1 (100% Pulsado).

Nota-se que durante o tempo de base há um pico de tensão, indicativo do destacamento de gotas para os processos cujo modo de transferência metálica se dá por voo livre, a exemplo do pulsado, fenômeno descrito por Amin (1983). A regularidade da transferência observada no oscilograma da Figura 4 também aponta para a estabilidade e controlabilidade alcançada com o processo. O destacamento de gotas, a regularidade e comportamento geral do processo foi confirmado por meio da filmagem em alta velocidade. Alguns quadros, bem como os respectivos instantes no período, do ensaio 1 estão mostrados na Figura 5.



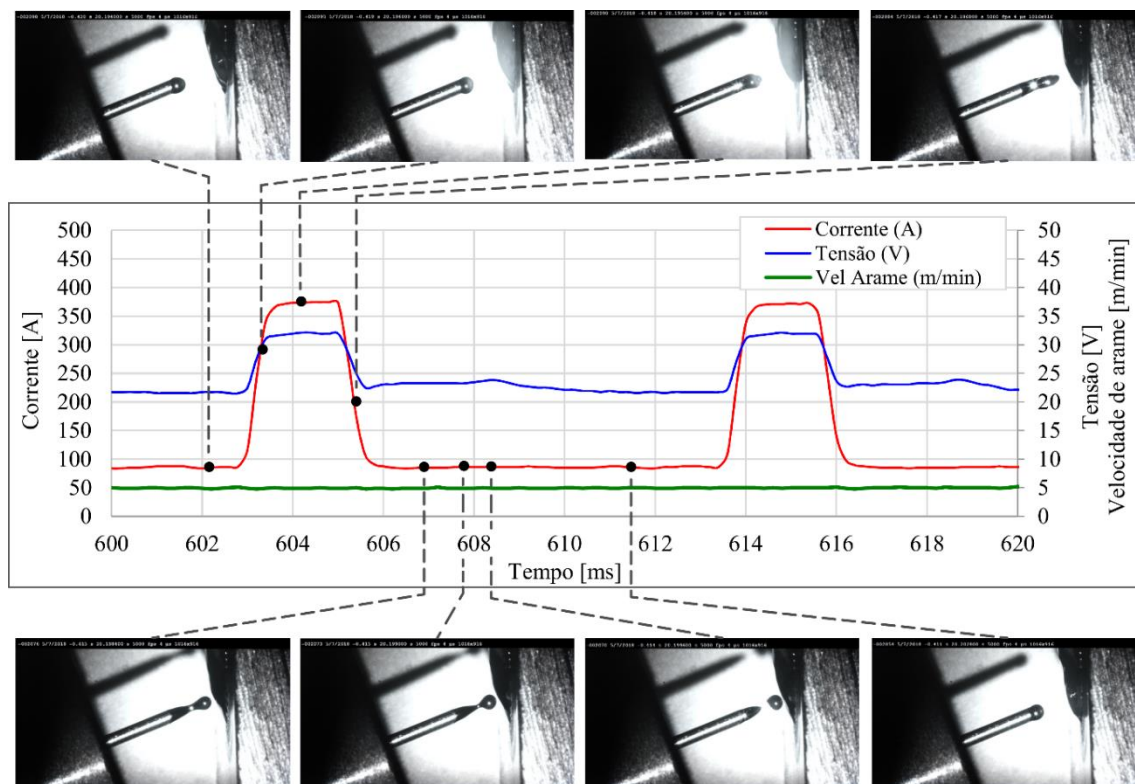


Figura 5. Detalhamento do período de transferência do processo pulsado regulado.

De forma semelhante ao primeiro experimento, o ensaio 2 constituiu da execução de um depósito utilizando o processo MIG/MAG AD com transferência unicamente por curto-circuito (0% pulsado), de forma controlada e sincronizada com o movimento do arame. Na Figura 6 é mostrada o oscilograma referente a este ensaio. A modalidade MIG/MAG AD teve fundamentação com o trabalho de (Marques, 2017), que obteve bons resultados de deposição em ligas de alumínio e aço carbono.

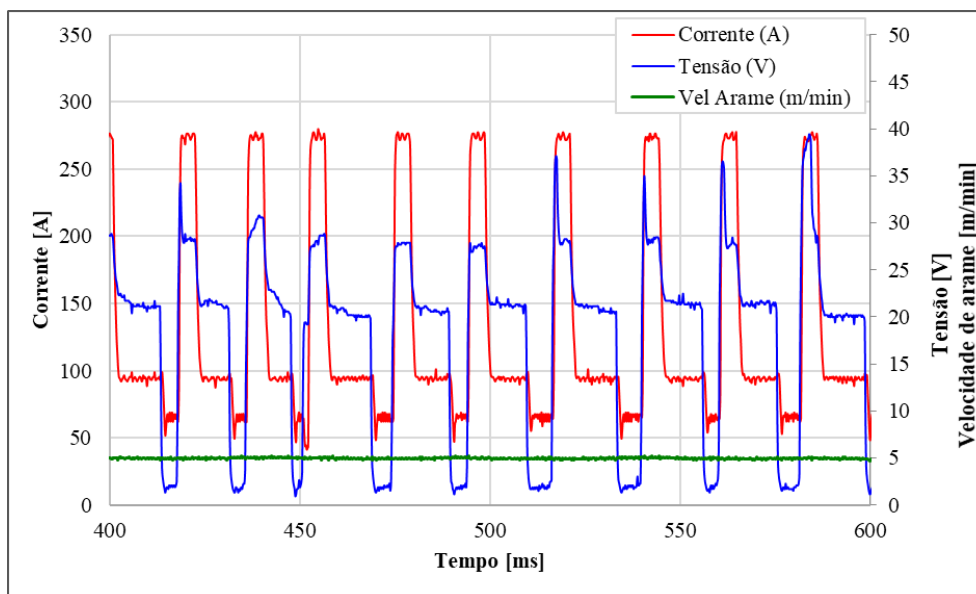


Figura 6. Oscilogramas de corrente, tensão e velocidade de arame para Ensaio 2 (0% Pulsado).

Os demais experimentos foram realizados com o processo MIG/MAG AD-P, processo resultante da alternância entre os modos pulsado e curto-circuito AD. Os mesmos parâmetros regulados para os processos dos ensaios anteriores foram utilizados, variando-se apenas a quantidade de períodos em transferência pulsada/curto-circuito. Em uma analogia pode-se comparar ao que se tem em um pulsado térmico, com dois níveis de energia. A principal diferença é que no MIG/MAG AD-P a variação de energia é acompanhada por diferentes modos de transferência e, para a condição ensaiada, a velocidade de arame resultante em cada uma das fases seria a mesma.

Os ensaios seguiram as proporções, previamente definidas na metodologia. O ensaio 3 foi realizado com uma proporção de 75% do macroperíodo no processo pulsado, o ensaio 5 com 50% e, por fim, o ensaio 5 com 25%. A Tabela 4 mostra os parâmetros elétricos médios aquisitados durante os ensaios e os oscilogramas dos mesmos se encontram na Figura 7.

Tabela 4. Parâmetros elétricos médios dos ensaios.

Valores médios	Ensaio 1	Ensaio 3	Ensaio 4	Ensaio 5	Ensaio 2
Corrente (A)	143	127	125	121	129
Tensão (V)	24,6	22,1	20,1	18,9	18,5
Potência (W)	3899	3159	2898	2669	2920



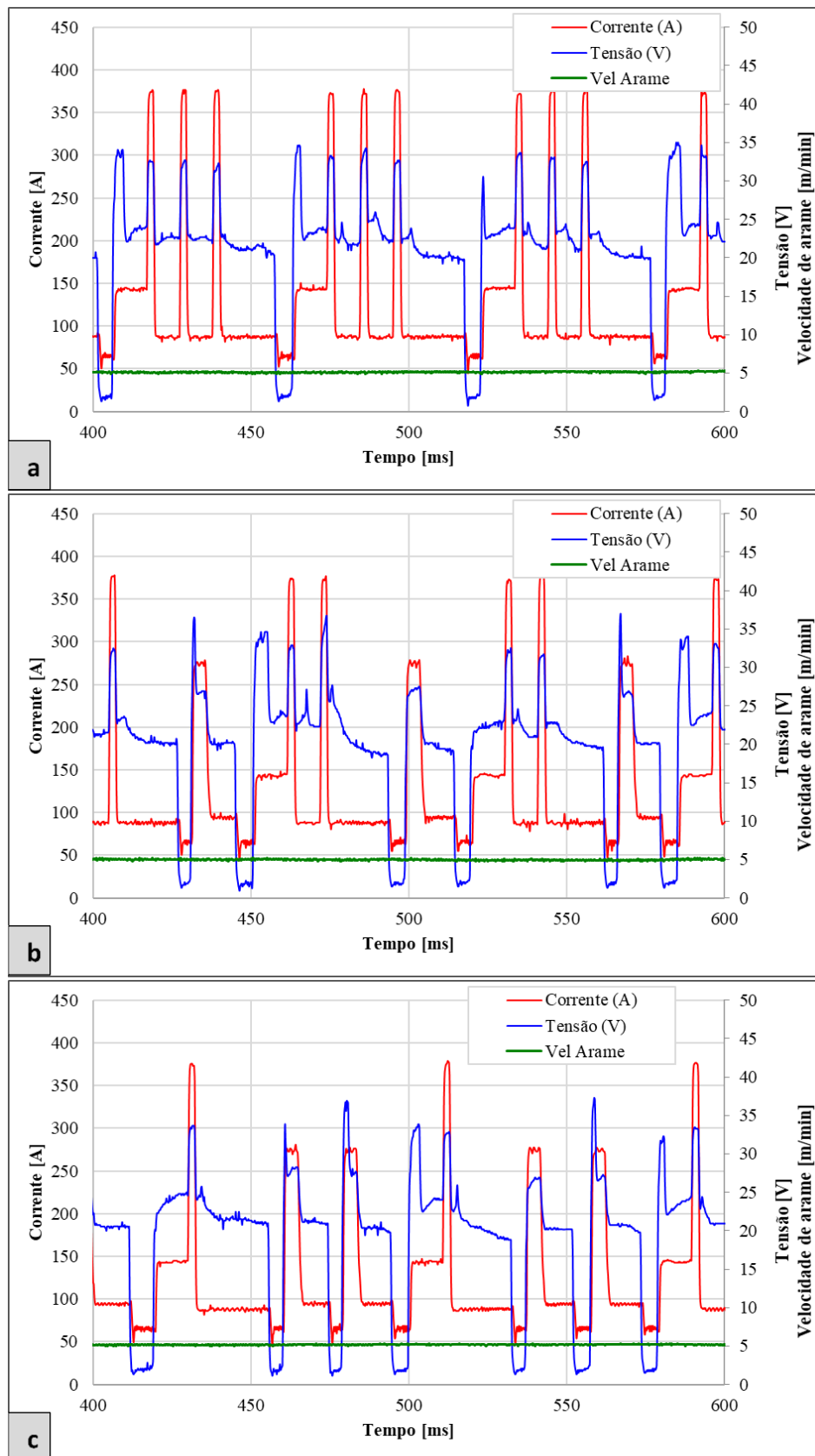


Figura 7. Oscilogramas de corrente, tensão e velocidade de arame para os ensaios utilizando o processo misto MIG/MAG AD-P.

a) Ensaio 3 (75% Pulsado); b) Ensaio 4 (50% Pulsado); c) Ensaio 5 (25% Pulsado).

A secção transversal dos corpos de prova foi preparada para análise metalográfica. As imagens obtidas estão expostas na Figura 8, juntamente com o aspecto superficial dos cordões depositados. A medição de dados referentes a largura, altura e ângulo de contato do reforço destes ensaios pode ser observada na Tabela 5.

Com relação à largura do reforço, pode-se verificar que o aumento no número de pulsos gera um maior espalhamento do cordão, fato proveniente do maior aporte térmico fornecido por este processo, uma vez que a velocidade de alimentação permanece constante. De forma semelhante, observa-se os efeitos do maior aporte térmico na altura do reforço. Como existe uma maior tendência a melhorar os níveis de molhabilidade do depósito com o aumento na proporção de pulsos, conseqüentemente a altura do reforço segue a direção inversa, quanto maior a potência fornecida no depósito, menor será a altura do reforço. Dessa forma, há sempre um comprometimento entre molhabilidade e altura do reforço que deverá ser considerado nas especificações de um procedimento de revestimento.

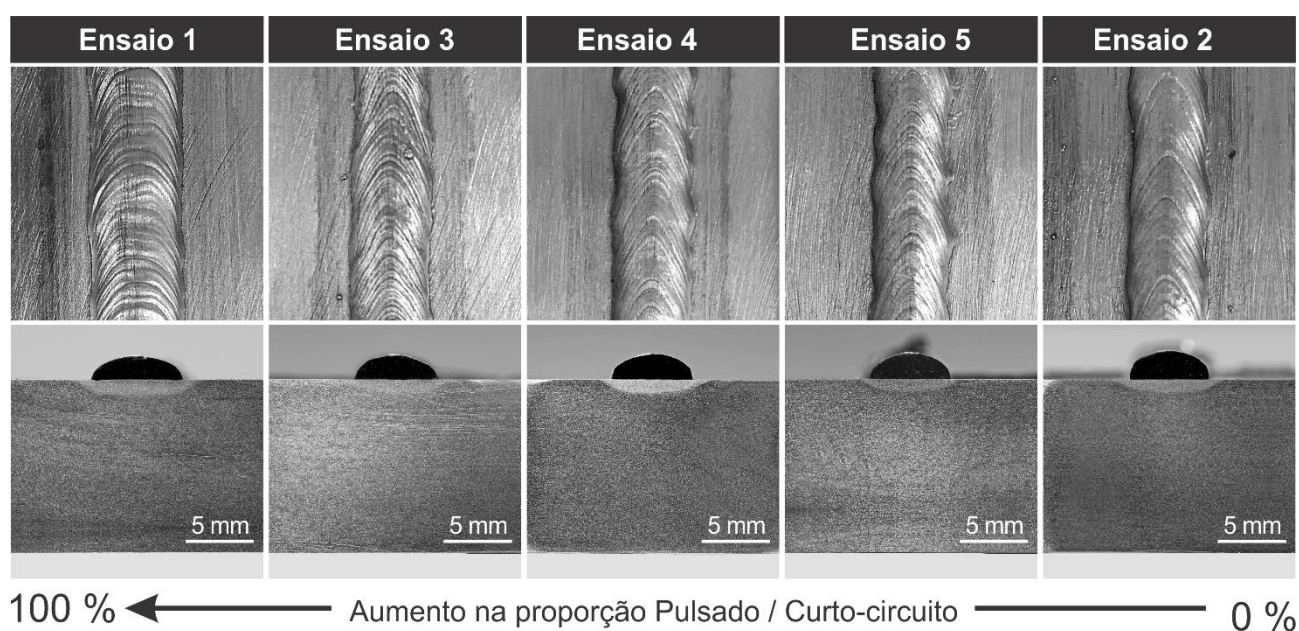


Figura 8. Secção transversal e aspecto superficial dos depósitos efetuados na posição vertical.

Tabela 5. Dados das secções transversais dos depósitos.

	<b>Ensaio 1</b>	<b>Ensaio 3</b>	<b>Ensaio 4</b>	<b>Ensaio 5</b>	<b>Ensaio 2</b>
Altura do reforço (mm)	1,71	1,77	1,88	1,95	2,01
Largura do reforço (mm)	6,73	5,96	5,99	5,98	5,77
Ângulo de contato (°)	109,4	98,0	103,6	102,8	91,1

As informações acerca destes ensaios revelaram uma diluição muito baixa para todas condições, o que contraria as informações encontradas no trabalho de Pang et al. (2016). Entretanto, trabalhos conduzidos pela equipe do LABSOLDA-UFSC destacam que “a penetração e a diluição na posição vertical são significativamente menores do que na posição plana” (Carvalho, 2015).

Para verificar os efeitos da posição de soldagem na diluição e evidenciar diferenças entre os depósitos, foram realizados ensaios na posição plana, também utilizando a liga 625. Os parâmetros do ensaio 1 (100% pulsado), ensaio 2 (0% pulsado) e ensaio 4 (50% pulsado) foram mantidos e novos ensaios foram conduzidos. As secções transversais dos corpos de prova foram devidamente

preparadas e o resultado da maior potência fornecida pelo modo pulsado foi evidenciado, conforme reportado por Pang et. Al. A Figura 9 mostra as seções transversais dos depósitos na posição plana, juntamente com diluição determinada por meio de software.



Figura 9. Seção transversal dos depósitos efetuados na posição plana e respectivas diluições.  
a) MIG/MAG AD; b) MIG/MAG AD-P (50%); c): MIG/MAG Pulsado.

#### 4. Conclusões

Para as condições ensaiadas neste trabalho, o aumento da proporção de pulsos de corrente em um macroperíodo no processo MIG/MAG AD-P é benéfica com relação a molhabilidade do depósito. Não foram observados efeitos na diluição para aplicações verticais. Por outro lado, em posição plana, esse efeito foi evidenciado, aumentando a diluição à medida que se aumenta o número de períodos de transferência por corrente pulsada.

Para procedimentos de revestimento com a liga 625 em aplicações em posição vertical verticais, o uso de processos que fornecem um maior aporte térmico se mostrou mais indicado. O emprego do MIG/MAG AD-P pode ser benéfico quando ajustado em faixas de maiores energias, como por exemplo 90% pulsado. O uso eventos de transferência por curto-circuito, mesmo em baixas proporções, pode promover um melhor controle térmico sobre a poça de fusão, evitando efeitos observados com a utilização do processo puramente pulsado, como o escorrimento da poça de fusão mesmo em baixas taxas de deposição. Outro fator que torna o MIG/MAG AD-P atraente é o fato de possibilitar o controle da altura do arco periodicamente para o processo, uma vez que há um cíclico contato entre o arame e a poça de fusão e um posterior retorno do arame por um comprimento de arco predeterminado. Este contato e retorno do arame pode contornar um eventual desequilíbrio na transferência metálica e evitar oscilações no comprimento médio do arco.

#### 5. Agradecimentos

Os autores agradecem a toda equipe do LABSOLDA e da empresa IMC-Soldagem pelo fornecimento de equipamentos, esforço, apoio e serviços prestados, ao CNPq, Petrobras e Finep pelo suporte financeiro e apoio aos projetos de P&D, ao POSMEC e UFSC pela oportunidade de desenvolvimento pessoal, profissional e acadêmico.

#### 6. Referências

- Amin, M. (1983). Pulse Current parameters for arc stability and controlled metal transfer in arc welding. *Metal Construction*(15), 272-278.
- ASM International. (1993). *ASM Handbook* (Vol. 6).
- Carvalho, R. S. (2015). *Tecnologias para Execução de Revestimentos via Soldagem Automática de Paredes D'água de Usinas Termelétricas*. Tese de Doutorado, Florianópolis.
- Evans, J. (2012). COLD METAL TRANSFER – Robotics.
- Fronius International GmbH. (12 de Junho de 2018). Fonte: [www.fronius.com/en/welding-technology/our-expertise/welding-processes/cmt-pulse](http://www.fronius.com/en/welding-technology/our-expertise/welding-processes/cmt-pulse)
- Kazmaier, J. (2010). CMT Advanced Technology - An Arc Process Revolution. *Fronius International GmbH*. Wels, Thalheim, Áustria.
- Marques, C. (2017). *Análise de técnicas e efeitos físicos da alimentação dinâmica do arame no processo de soldagem MIG/MAG com vistas ao desenvolvimento de um sistema nacional flexível*. Tese de Doutorado, Florianópolis.
- Pang, J., Hu, S., Shen, J., Wang, P., & Liang, Y. (2016). Arc characteristics and metal transfer behavior of CMT + P welding process. *Journal of Materials Processing Technology*.
- Pickin, C., Williams, S., & Lunt, M. (2010). Characterisation of the cold metal transfer (CMT) process and its application for low dilution cladding. *Journal of Materials Processing Technology*.
- Silva, R. H. G. et. al. (Agosto de 2015). Inovações em Revestimentos Automatizados de Tubos e Paredes d'Água de Caldeiras de Unidades de Geração Termelétrica para Mitigação de Desgaste. *Congresso de Inovação Tecnológica em Engenharia Elétrica*.