



SEI-SICITE 2021

Pesquisa e Extensão para um mundo em transformação

XI Seminário de Extensão e Inovação
XXVI Seminário de Iniciação Científica e Tecnológica
08 a 12 de Novembro - Guarapuava/PR



Estudo da estabilidade de uma soldagem de revestimento utilizando processo FCAW pulsado através da avaliação de oscilogramas de corrente e tensão

Stability study of a coating welding using pulsed FCAW process through the evaluation of current and voltage oscillograms

Alisson Caetano Neves (orientado)^{1*}, João Roberto Sartori Moreno (orientador)^{1*},
Celso Alves Corrêa^{2†}, Emillyn Ferreira Trevisani Olívio^{2*}.

RESUMO

O presente trabalho tem por finalidade quantificar a estabilidade de uma solda de revestimento por processo FCAW pulsado. Soldas de revestimento foram realizadas em corpos de prova de aço SAE 1020, com arame tubular do tipo inoxidável martensítico 410NiMo com 1,2 mm de diâmetro. Oscilogramas de corrente e tensão foram analisados para verificar a estabilidade do processo. Foram avaliadas a regularidade de transferência metálica por meio de pulsos de tensão em momentos de corrente de pico, a manutenção das variáveis por meio de valores médio e desvio padrão comparados ao regulado na fonte de soldagem, e a análise do Índice Vilarinho de Regularidade. Ao fim, foi possível constatar a regularidade do processo, confirmando o fenômeno de desprendimento de gota e também quantificando a estabilidade do processo através da análise da manutenção dos parâmetros durante o processo e o Índice Vilarinho com valor médio de 0,27 das amostras, configurando, com isto, processo estável e bem parametrizado.

Palavras-chave: FCAW pulsado, análise de estabilidade do arco elétrico, índice Vilarinho de regularidade, soldagem de revestimento

ABSTRACT

This work aims to quantify the stability of a pulsed FCAW coating welding. Coating welds were performed on SAE 1020 steel specimens, with tubular wire of the martensitic stainless type 410NiMo with 1.2 mm in diameter. Current and voltage oscillograms were used to verify the stability of the process. Was verified the voltage pulses at peak current moments, the maintenance of the variables through mean values and standard deviation compared to those regulated in the welding source, and through the Vilarinho Regularity Index. It was possible to verify the regularity of the process, confirming the phenomenon of drop detachment and also quantifying the stability of the process through the analysis of the maintenance of parameters during the process and the Vilarinho Regularity Index with average value of 0.27 from the samples, thus configuring a stable and well-parameterized process.

Keywords: FCAW pulsed, electric arc stability analysis, Vilarinho regularity index, coating welding.

¹Programa de Pós-Graduação em Eng. Mecânica, Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Cornélio Procópio, Brasil

²Depto. Acadêmico de Mecânica, Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Cornélio Procópio, Brasil

*alissonneves@alunos.utfpr.edu.br; *joaosartori@utfpr.edu.br; †cacorrea@utfpr.edu.br; *emillynfnf@utfpr.edu.br



1 INTRODUÇÃO

A análise do fenômeno de estabilidade do arco elétrico em processo de soldagem FCAW (*Flux Cored Arc Welding*) pulsado foi o objetivo deste trabalho. Processos de soldagem com arame tubular tem por princípio o uso do arco elétrico como fonte calorífica, que é mantido entre a peça e um arame consumível contínuo, sendo possível a utilização de proteção adicional por gases (AMERICAN WELDING SOCIETY, 1991).

Os processos FCAW combinam características de processos de soldagem por eletrodo revestido (proteção do cordão de solda por escória), dos processos MIG/MAG (uso de gases de proteção e a alimentação contínua de consumível) e resultados de deposição superior a estes citados (NORRISH, 2006). Estas características benéficas advêm de particularidades do processo, tal como o consumível, composto por um arame oco, tendo em seu conteúdo (fluxo) elementos adicionais que proporcionam características metalúrgicas, além de auxiliar na formação de escória e de gases de proteção.

O uso da variante com corrente contínua pulsada implica em maior possibilidade de controle e parametrização do processo, de forma a auxiliar no alcance de metas de qualidade final e rentabilidade. A corrente pulsada é caracterizada pela alternância periódica da intensidade da corrente entre dois patamares, correntes de base e pico, que são controlados pelo tempo de permanência nestes patamares, chamados de tempo de pico e tempo de base (BRACARENSE, 2000). A utilização da corrente pulsada surgiu a partir do desenvolvimento de fontes de soldagem com mais tecnologia de controle embarcada, possibilitando um controle mais apurado da transferência metálica e de temperatura de processo (CORRÊA, 2000). Em condições onde o processo é bem parametrizado e os valores devidamente regulados, é possível o controle de deposição periódica do material, em períodos de corrente de pico (KHAN, 2009).

Ao mesmo tempo que os processos FCAW proporcionam maior capacidade de atingimento de resultados satisfatórios em termos de produto final, o mesmo também apresenta maior complexidade de parametrização (MARQUES; MODENESI; BRACARENSE, 2009). Variáveis de influência no resultado final, como: intensidade de corrente e tensão, diâmetro do arame, composição química do consumível combinado ao metal de base, gases de proteção, distância do bico de contato peça, posições e velocidade de soldagem; todas com influências no resultado final, conferindo assim uma complexidade maior de ajustes quando comparado à processos de soldagem mais simples.

Espera-se de um revestimento de qualidade uma concentração da deposição na região superficial da peça, baixa penetração, maior largura do cordão e baixa diluição. A avaliação do comportamento do arco elétrico, bem como os oscilogramas resultantes e do comportamento do sinal de tensão e corrente durante períodos de corrente de pico (ZHANG et al., 1998). Estes servem de importante indicador da forma de transferência metálica, e suas variações, um indicativo de estabilidade. Processos instáveis, em algumas instâncias, são identificados por um cordão de solda não-uniforme, alta taxa de respingos e até mesmo interrupções da realização por conta de fechamento de arco.

2 PROCEDIMENTOS OPERACIONAIS DA PESQUISA

Os experimentos foram realizados em corpos de prova de aço SAE 1020, com dimensões 185 mm de comprimento, 63,5 mm de largura e 12,7 mm de espessura. Foi utilizado um arame tubular inoxidável martensítico com diâmetro de 1,2 mm, especificação AWS EC410NiMo, padrão ASME 2007, seção II, parte C (ESAB, 2006). O local de realização do experimento foi montado para realizar a soldagem e a captura simultânea de sinais, sendo constituída da fonte de soldagem com tocha refrigerada à água, sistema de movimentação da tocha automatizado, transdutores de corrente e tensão e sistema de aquisição de dados



(CORRÊA, 2018). O sistema de aquisição de dados usado constituiu-se de transdutores de corrente e tensão marca SECON, modelo 600R010VAC / 100 V010VAC – 220VAC, com faixa de medição para corrente de - 600 A à 600 A e de 0 à 100V para tensão. O sistema de aquisição de dados usado foi um NI cDAQ-9172 e um NI-9205 (sistema analógico), com 8 entradas, 16 canais, 250kS/s de taxa de aquisição e 16 bits de resolução.

Como forma de reduzir o número de variáveis de influência para análise, foram definidos os parâmetros a permanecerem constantes durante o procedimento, tendo em vista o enfoque do trabalho na avaliação dos sinais de corrente e tensão. Estes parâmetros constantes são os listados na Tab. 1. A partir da realização do processo, são extraídos do sinal um total de 5 amostras com duração de 0,5 segundo, para avaliar localmente a estabilidade do processo e, com isso, estabelecer o comportamento do processo após sua realização.

Foram adotadas três metodologias de avaliação da estabilidade do processo. O primeiro método é a avaliação do comportamento dos oscilogramas com relação a manutenção do sinal de soldagem, feito através da avaliação dos valores extraídos de corrente e tensão, seus valores médio e respectivos desvios padrão (BRAGA, 1997). O segundo método está em avaliar a ocorrência da transferência de uma gota durante os períodos de corrente de alta, característica desejada em processos de soldagem com corrente pulsada. Este fenômeno é possível de verificar-se através da ocorrência de picos de tensão durante períodos de corrente de pico (WU et al., 2005). Por fim, o terceiro método de avaliação está na verificação da manutenção do sinal de corrente por meio de critério de estabilidade chamado de Índice Vilarinho de Regularidade de transferência metálica, baseado na premissa de que a estabilidade do processo é intrinsecamente ligada à frequência de curto circuitos (transferências metálicas) (REZENDE et al., 2011). O índice é calculado por meio da Eq. (1), onde t_a e t_c são, respectivamente, os tempos médio de arco aberto e de curto circuito, enquanto que σ é o desvio padrão para ambas as grandezas.

$$IV_{cc} = \frac{\sigma_{t_a}}{t_a} + \frac{\sigma_{t_c}}{t_c}. \quad (1)$$

Por fim, de forma a avaliar a manutenção dos parâmetros durante o processo, foi estabelecido um parâmetro percentual ε Eq. (2), que leva em conta a razão entre o valor mensurado a partir dos oscilogramas e o regulado na máquina de soldagem, estabelecendo que o quão mais próximo o valor estiver de 100%, para mais ou para menos, mais regular o comportamento (NEVES et al., 2021).

$$\varepsilon = \frac{\text{Variável mensurada}}{\text{Regulado na máquina}}. \quad (2)$$

Tabela 1 – Parâmetros de soldagem para a realização do experimento.

Parâmetros	Valores	Parâmetros	Valores
Vazão de gás:	15 L/min	Polaridade:	DCEP
Velocidade de alimentação arame:	8 m/min	Mistura do gás:	Ar + 2%O
Velocidade de soldagem:	40 cm/min	Posição de soldagem:	Plana
Distância bico de contato peça:	35 mm	Ângulo da tocha:	90°
Temperatura de soldagem:	150°C	N° de cordões:	1
Características da corrente pulsada		Valores	
Corrente de pico:		350 A	
Corrente de base:		160 A	
Tempo de pico:		8 ms	
Tempo de base:		30 ms	
Corrente média:		200 A	
Frequência média:		26,32 Hz	

Fonte: Autoria Própria.

<https://eventos.utfpr.edu.br/sicite2021>



3 RESULTADOS

A escolha das amostras foi feita considerando momentos próximos ao início e encerramento do processo e pontos espaçados pela duração da soldagem. O comportamento do processo, melhor visualizado a partir dos oscilogramas de corrente e tensão das amostras, pode ser observado na Fig. 1, enquanto que os valores médios e desvio padrão das variáveis durante todo o processo é visto na Tab. 2.

Observa-se na Fig. 1 que, para cada momento de corrente de pico, há a ocorrência simultânea de um pico no sinal de tensão ao fim do tempo de pico. Esse fenômeno é devido ao distúrbio causado pelo desprendimento de material da ponta do arame tubular para a poça de soldagem. Desta forma, é possível notar a ocorrência do fenômeno de destacamento de gota dentro dos instantes desejados, configurando, desta forma, a ocorrência de um processo de maneira estável (ESSERS; VAN GOMPEL, 1984).

Tabela 2 – Caracterização dos sinais do processo.

Parâmetros	Valores	ϵ [%]
Corrente de Pico (I_p)	$313,09 \pm 1,05$ A	89,45
Corrente de Base (I_b)	$147,44 \pm 0,18$ A	92,15
Tempo de Pico (t_p)	$8,35 \pm 0,76$ ms	104,38
Tempo de Base (t_b)	$29,00 \pm 1,27$ ms	96,67
Corrente Média (I_m)	$184,49 \pm 2,52$ A	92,25
Tensão Média (\bar{V})	$34,07 \pm 1,05$ V	***

Fonte: Autoria Própria.

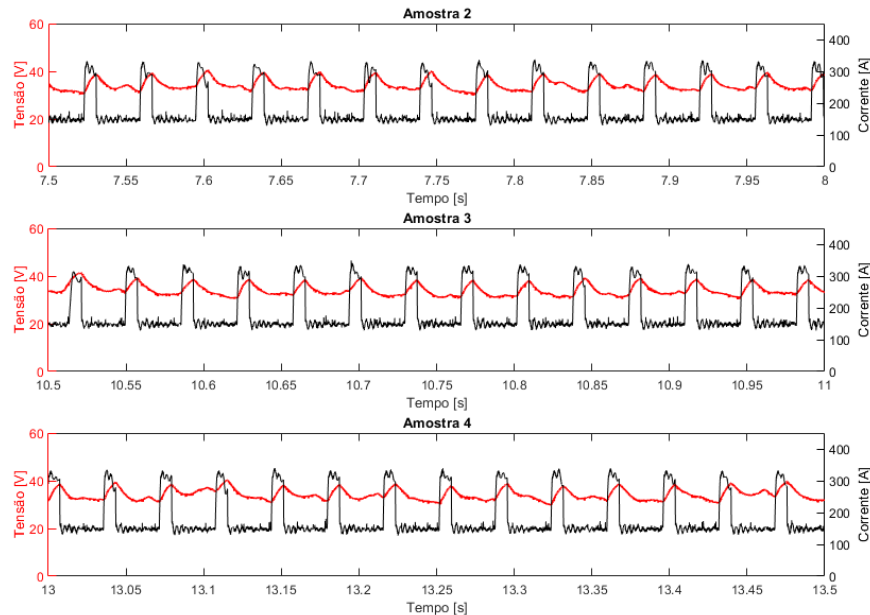
Tabela 3 – Caracterização dos oscilograma nas amostras.

	Amostra 1 (6,319-6,819)	Amostra 2 (7,5-8,0)	Amostra 3 (10,5-11,0)	Amostra 4 (13,0-13,5)	Amostra 5 (15,12-15,62)	ϵ [%]
I_m [A]	191,75	183,08	183,85	184,62	178,62	92,19
I_p [A]	320,75	310,32	310,20	312,89	315,01	89,67
I_b [A]	147,66	146,71	147,40	147,47	147,09	92,04
t_p [ms]	12,20	8,00	8,10	8,10	8,00	111,00
t_b [ms]	35,70	28,00	28,00	27,90	34,60	102,8
f [Hz]	20,87	27,78	27,70	27,78	23,47	96,96
\bar{V} [V]	30,05	34,25	34,08	34,17	34,86	***
Nº picos	10	14	14	14	14	94,29
IV_{cc}	0,26	0,20	0,36	0,37	0,15	***

Fonte: Autoria Própria.

Relacionado à manutenção do sinal, nota-se a regularidade e proximidade dos valores frente ao parametrizado na fonte de soldagem. Isto também é corroborado pela baixa dispersão (desvio padrão) dos valores dos parâmetros, mostrando regularidade no processo e no comportamento da fonte. A Tab. 3 apresenta os resultados dos valores de caracterização do processo mensurados a partir das amostras e a comparação com o regulado na fonte. Os parâmetros de caracterização de corrente apresentam proximidade com o geral mensurado dos oscilogramas. Os pontos discrepantes estão nas amostras 1 e 5 e seus respectivos tempos de pico e tempo de base, mas estando dentro do esperado por serem instantes de distúrbios iniciais pela abertura de arco. Quanto aos valores de IV_{cc} , os mesmos ajudam a corroborar com os resultados estáveis apresentados, sendo os momentos mais instáveis apresentados ainda estando dentro das características de um processo realizado de maneira regular (REZENDE et al., 2011; FERREIRA et al., 2019).

Figura 1 – Oscilogramas de corrente e tensão sobrepostos.



Fonte: Autoria Própria.

4 CONCLUSÕES

Através das metodologias utilizadas, foi possível estabelecer condições práticas de verificação da estabilidade do processo FCAW à corrente pulsada utilizado em soldas de revestimento. A visualização do fenômeno de destacamento de gota por meio dos oscilogramas de corrente e tensão sobrepostos é uma maneira rápida de compreender a ocorrência periódica do fenômeno e sua manutenção. O janelamento das amostras de 0.5s permitiu demonstrar a variabilidade da estabilidade que naturalmente ocorre em um único processo de soldagem, além de ter dado condições de avaliar a estabilidade macro do processo por meio do comportamento entre as amostras. Em relação ao processo avaliado, constatou-se a realização de uma solda estável, sem a ocorrência de anomalias durante o sinal, com resultados de parametrização com baixa dispersão e próximo ao configurado. A utilização do Índice Vilarinho deu base para a avaliação quantitativa da estabilidade do processo, demonstrando, por meio de seus resultados, um processo estável, com valor mínimo observado na amostra 5 ($IV_{cc} = 0,15$), valor máximo na amostra 4 ($IV_{cc} = 0,37$), média e desvio padrão de $0,27 \pm 0,1$.

REFERÊNCIAS

- AMERICAN WELDING SOCIETY. **Welding Handbook**. 8. Ed. Miami/FL: American Welding Society. V. 2. 1991. DOI: [10.1007/978-1-349-03073-6](https://doi.org/10.1007/978-1-349-03073-6).
- BRACARENSE, Alexandre Queiroz. **Processo de soldagem TIG/GTAW**. Belo Horizonte/MG: Universidade Federal de Minas Gerais. 2000. P.21.
- BRAGA, Eduardo de Magalhães. **Soldagem a arame tubular autoprottegido em corrente pulsada**. 1997. F. 95. Diss. (Mestrado) – Universidade Federal do Pará, Programa de Pós-graduação em Engenharia Mecânica, Belém/PA.



- CORRÊA, Celso Alves. **Aço inoxidável martensítico aplicado em revestimento pelo processo MIG pulsado e convencional**. 2000. F. 91. Diss. (Mestrado) – Universidade Estadual de Campinas, Faculdade de Engenharia Mecânica, Campinas/SP. <http://repositorio.unicamp.br/jspui/handle/REPOSIP/265296>.
- CORRÊA, Celso Alves. **Uma contribuição ao processo de soldagem de revestimento com arame tubular pulsado de um aço CA6NM aplicando o método Taguchi**. 2018. P. 118. Diss. (Doutorado) – Universidade Estadual de Campinas, Faculdade de Engenharia Mecânica, Campinas/SP. <http://repositorio.unicamp.br/jspui/handle/REPOSIP/331460>.
- ESAB. OK TUBROD 410NiMo MC. Especificações e Downloads. 2006. Disponível em: <<https://esab.com.br/br/pt/products/filler-metals/gas-shielded-flux-cored-wires-fcaw/stainless-steel-wires/ok-tubrod-410nimo-mc.cfm>>. Acesso em: 04 set. 2021.
- ESSERS, W.; VAN GOMPEL, M. R. M. Arc control with pulsed GMA welding. **Welding Journal**, v. 63, p. 26-32, 1984. ISSN 0043-2296.
- FERREIRA, G. R. B.; CAMPOS, R. A.; MOREIRA FILHO, R. M.; SCOTTI, A.; LAGARES JR., M. L. Uma metodologia para análise da distribuição de contagem dos picos de tensão de reignição para avaliação da estabilidade do processo gmaw curto-circuito. **Soldagem & Inspeção**. 24:9, 2019. DOI: [10.1590/0104-9224/si24.07](https://doi.org/10.1590/0104-9224/si24.07).
- KHAN, Md. Ibrahim. **Welding science and technology**. New Delhi/IN: New Age International, 2009. P. 288.
- MARQUES, Paulo Villani; MODENESI, Paulo José; BRACARENSE, Alexandre Queiroz. **Soldagem: Fundamentos e Tecnologia**. 3ª edição atualizada. Belo Horizonte/MG: Editora UFMG, 2009. ISBN 978-85-7041-748-0.
- NEVES, Alisson Caetano; MORENO, João Roberto Sartori, CORRÊA, Celso Alves; OLÍVIO, Emillyn Ferreira Trevisani. Study of arc welding stability in flux cored arc welding process and pulsed continuous current. **Welding International**. 2021. DOI: [10.1080/09507116.2021.1971936](https://doi.org/10.1080/09507116.2021.1971936).
- NORRISH, John. **Advanced Welding Processes**. Amsterdam/NL: Woodhead Publishing, 2006. P.304. (Woodhead Publishing Series in Welding and Other Joining Technologies). ISBN 978-1-84569-130-1. DOI: [10.1533/9781845691707.1](https://doi.org/10.1533/9781845691707.1).
- REZENDE, G. M. C.; LISKÉVYCH, O.; VILARINHO, L. O., SCOTTI, A. Um critério para determinar a regularidade da tensão em soldagem mig/mag por curto-circuito. **Soldagem & Inspeção**, v. 16(2), 98-103. 2011. DOI: [10.1590/S0104-92242011000200002](https://doi.org/10.1590/S0104-92242011000200002).
- WU, C. S.; CHEN, M. A.; LU, Y. F. Effect of current waveforms on metal transfer in pulsed gas metal arc welding. **Meas. Sci. Technol.** v. 16, 2459-2465. 2005. DOI: [10.1088/0957-0233/16/12/009](https://doi.org/10.1088/0957-0233/16/12/009).
- ZHANG, YM; LIGUO, E; KOVACEVIC, R et al. Active metal transfer control by monitoring excited droplet oscillation. **WELDING JOURNAL-NEW YORK-**. Citeseer, v. 77, 388-s. 1998. DOI: [10.1.1.1079.844](https://doi.org/10.1.1.1079.844).