

AVALIAÇÃO DAS CARACTERÍSTICAS OPERACIONAIS EM ARAMES SÓLIDO E TUBULAR “METAL CORED” NA SOLDAGEM AUTOMATIZADA

Otávio Favoretti do Nascimento, otavio.favoretti@gmail.com¹

Marcos Lessa Kugizaki, marcoslk@gmail.com²

Lucas Dias Schuller, shullerlucas@yahoo.com.br²

André Gustavo de Sousa Galdino, andregsg@ifes.edu.br¹

Temístocles de Sousa Luz, temistocles.luz@icloud.com²

¹Instituto Federal do Espírito Santo, Avenida Vitória, 1729 – Jucutuquara, Vitória, Espírito Santo, CEP.: 29040-780.

²Universidade Federal do Espírito Santo, Avenida Fernando Ferrari, 514 – Goiabeiras, Vitória, CEP.: 29075-073.

Resumo: O processo de fabricação por soldagem se destaca em termos de volume de produção. Porém, fatores como mão de obra e insumos interferem diretamente no processo produtivo. Uma alternativa para minimizar custos e aumentar produtividade é a automação, pois há menor variância nos indicadores de qualidade devido à interferência da mão de obra, por exemplo. Em termos de soldagem, a estabilidade do processo é de suma importância para garantir maior qualidade das peças produzidas aliado ao consumo mais eficiente, aumentando, assim, a produtividade. Nesse contexto, esse trabalho teve como objetivo avaliar a estabilidade de dois consumíveis inseridos em uma mesma classe metalúrgica, com o intuito de estabelecer parâmetros de decisão para escolha do consumível, uma vez que isso incide em custos relativos em processos de grande volume. Para tanto, foram soldadas barras de aço SAE 1020 pelo processo GMAW por curto-circuito utilizando soldagem automatizada e os arames sólido da classe AWS ER70S6 e tubular metal cored TuBrod 70 MC Ultra, com energias de soldagem de 0,8, 1,0 e 1,2 kJ/mm. Foram avaliadas as facilidades e regularidades de curto-circuito e transferência de metal para cada tipo de arame. Se observou que o arame sólido apresentou melhor estabilidade na menor energia de soldagem, já que apresentou menores desvios padrões relativos para esses índices. Tal comportamento também foi observado para o arame tubular. Porém, quando se compara os dois tipo de arames, os índices de regularidade do arame tubular apresentam menor variância, o que indica que ele possui maior faixa de trabalho.

Palavras-chave: GMAW, estabilidade, arame tubular, arame sólido.

1. INTRODUÇÃO

A soldagem é um dos métodos mais importantes e utilizados para união dos materiais metálicos, tendo ampla aplicação em diversos setores, tais como: automobilístico, aeronáutico, naval, metalmeccânico, construção civil, etc. Na soldagem por arco elétrico, o processo *Gas Metal Arc Welding* (GMAW) é um dos processos mais utilizados, pois apresenta alta produtividade quando comparado a outros processos. Porém, uma de suas limitações se refere aos aspectos de interações químicas nas características metalúrgicas do depósito.

Essas limitações são atribuídas ao fato dos metais de adição, conhecidos como “arames sólidos”, apresentarem restrições em sua composição química, ou seja, não possibilitam a adição de maiores teores elementos de liga no depósito quando comparado a outros processos de soldagem tais como *Shielded Metal Arc Welding* (SMAW) ou *Submerged Arc Welding* (SAW). Outra limitação do processo é a complexidade e interação entre as variáveis presentes, pois exige maior conhecimento do operador para haver boa estabilidade operacional.

O processo de soldagem com arame tubular (*Flux Cored Arc Welding* – FCAW) surgiu para aprimorar propriedades relacionadas às características metalúrgicas do material depositado, tais como tenacidade e resistência mecânica. Esse processo se assemelha ao GMAW com relação às características operacionais, porém seu diferencial está no fato do arame ser constituído por uma fita metálica na forma de tubo, com núcleo preenchido por materiais chamados de fluxos.

Embora metalurgicamente tenha se evoluído no desempenho dos depósitos no que concerne aos processos produtivos, o controle dos parâmetros ainda é um ponto importante, demandando cada vez mais produtividade. Assim, quanto mais controlado for o processo, onde tal controle passa pela estabilidade do mesmo, melhor será a sua produtividade.

A estabilidade no processo de soldagem está pautada em uma correlação entre as forças que interagem no arco voltaico e geralmente é conduzida pela análise dos sinais adquiridos durante o processo de soldagem (Lancaster, 1987; Luksa, 1996). A utilização dos valores médios, tanto da corrente quanto da tensão, são comumente empregados para esse fim (Quinn *et al.*, 1999; Adolfsson *et al.*, 1999). Alguns pesquisadores avaliam as características estatísticas dos sinais durante o tempo de arco aberto para medir a estabilidade do arco, avaliando os desvios padrões, por exemplo, da frequência de curto-circuito (Hermans e Ouden, 1999; Scotti e Ponomarev, 2008; Mota, 1998; Rezende *et al.*, 2011). Outros pesquisadores apontam para a variação de tempo entre a transferência da gota da ponta do eletrodo a poça de fusão, ou seja, o período de transferência metálica (Liu e Siewent, 1989) ou ainda o desvio padrão dos valores máximos de corrente (Lucas, 1985). Embora tenham muitas metodologias para trabalhar a estabilidade do arco e, por conseguinte, a estabilidade do processo, a teoria mais favorável, segundo Modenesi e Nixon (1994) ainda está pautada na avaliação do desvio padrão do tempo de curto-circuito. Com base nesses estudos, outros pesquisadores desenvolveram técnicas que permitiram que processos, com alimentação contínua pudessem ser avaliados quanto às suas características operacionais (Farias, 1993; Mota, 1998).

Esse trabalho teve por objetivo realizar uma abordagem comparativa entre dois arames comerciais do tipo sólido ER70S6 e tubular do tipo “*metal cored*” TuBrod 70 MC Ultra, avaliando suas características operacionais.

2. PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL

Nesse trabalho foi utilizado o aço SAE 1020, adquirido pelo Instituto Federal do Espírito Santo (IFES), Campus Vitória. A composição química desse aço está apresentada na Tab. 1.

Tabela 1 – Composição química do aço SAE 1020, como recebido.

Elementos químicos (%p)				
Fe	C	S	Mn	P
99,055	0,204	0,0185	0,685	0,0367

Para avaliação da estabilidade foram confeccionados 18 corpos de prova de aço SAE 1020 com dimensões de 150 x 50,8 x 6,35 mm. Esses corpos de prova foram soldados pelo processo GMAW com arames sólido da classe AWS ER70S6 e tubular *metal cored* TuBrod 70 MC Ultra com utilização de um robô de soldagem da marca Panasonic, modelo TM -1400WGIII, constituído de uma célula robótica modelo 20F1M, um manipulador com grau de liberdade de seis eixos e capacidade máxima de 4 kg no flange, apresentado na Fig. 1. O equipamento está acoplado a uma fonte de soldagem inversora de 100 kHz, com faixa de corrente de 350 A. O robô de soldagem pertence ao Laboratório de Soldagem do Departamento de Engenharia Mecânica da Universidade Federal do Espírito Santo (UFES).

Antes de efetuar a soldagem, as barras passaram por limpeza com escova de aço rotativa, sendo posteriormente pesadas numa balança de precisão. Após soldagem, as barras passaram por nova pesagem para avaliação do rendimento de deposição. A avaliação da estabilidade do arco elétrico foi realizada por meio de índices utilizados por Farias (1993) e Mota (1998) em seus estudos. As características operacionais dos consumíveis foram obtidas pela captura dos sinais de tensão e corrente elétrica por meio de um sistema de aquisição de dados portátil.



Figura 1 – Robô de soldagem Panasonic modelo TM -1400WGIII acoplado à célula robótica 20F1M.

O modo sinérgico presente na fonte de soldagem foi utilizado para selecionar os parâmetros de soldagem. Os corpos de prova foram soldados no modo convencional (curto-circuito), com corrente de soldagem de 150 A e tensão de 17 V, com três velocidades de soldagem diferentes, refletindo, desta maneira, em três níveis de energia de soldagem (1200, 1000 e 800 kJ/m). O gás de proteção utilizado em todas as condições de soldagem foi uma mistura contendo 75% Ar e 25% de CO₂. A Tabela 2 apresenta os parâmetros utilizados para realizar a avaliação da estabilidade, no qual três ensaios para cada nível de energia de soldagem foram realizados a fim de se obter maior confiabilidade dos resultados.

Tabela 2 – Parâmetros de soldagem para a soldagem dos ensaios preliminares no modo convencional

Processo	Ø arame (mm)	DPCP	Corrente (I)	Tensão (U)	V _s (m/min)	E (kJ/m)
Curto-circuito	1,2	15 mm	150 A	17 V	0,13	1200
					0,15	1000
					0,19	800

Foram avaliadas as seguintes características operacionais: facilidade de curto-circuito (F_{cc}); facilidade de transferência no metal (F_{tm}); regularidade de curto-circuito (R_{cc}); regularidade de transferência do metal (R_{tm}); e rendimento de deposição.

A F_{cc}, a F_{tm}, a R_{cc} e a R_{tm} foram calculadas de acordo com as Equações (1), (2), (3) e (4), respectivamente. Esses índices só se aplicam para avaliação da estabilidade utilizando a soldagem por curto-circuito.

$$F_{cc} = \frac{1}{T} \text{ (s}^{-1}\text{)} \quad (1)$$

$$F_{tm} = \frac{1}{t_{cc}} \text{ (s}^{-1}\text{)} \quad (2)$$

$$R_{cc} = \frac{T}{\sigma.T} \quad (3)$$

$$R_{tm} = \frac{t_{cc}}{\sigma.t_{cc}} \quad (4)$$

Onde:

T - Período médio de transferência da gota, (s);

t_{cc} - Tempo médio de curto-circuito (s);

σ.T - desvio padrão do período médio de transferência (ms);

σ. t_{cc} - desvio padrão do tempo de curto-circuito (ms).

A avaliação do rendimento de deposição foi obtida por meio da razão entre massa de arame integrada ao metal de base pela massa de arame consumida durante a operação de soldagem, sendo utilizada a Eq. (5) (Mota, 1998; Farias, 1993).

$$R = \frac{(M_f - M_i)}{m_s} \times 100 \quad (5)$$

Onde:

M_f – massa final da chapa (g);

M_i – massa inicial da chapa (g);

m_s – massa de arame consumida (g).

Com o controle de produção inserido no controle do robô de soldagem, todo o consumo registrado permitiu a avaliação mais detalhada da produtividade. Assim, para a definição da massa de arame consumida, foi retirado o comprimento equivalente durante o tempo de arco aberto para cada uma das soldas realizadas e efetivada a pesagem em uma balança de precisão com resolução de 0,01 g da marca Shimadzu do Brasil, modelo BL 3200 H, pertencente ao Laboratório de Plasma Aplicado e Engenharia de Superfícies do Instituto Federal do Espírito Santo (IFES), campus Vitória.

3. RESULTADOS E DISCUSSÃO

A Figura 2 retrata o comportamento dinâmico das soldas realizadas na menor energia. Observa-se que há certa similaridade entre as soldagens com arame sólido e arame tubular em função de ter sido utilizado o processo de

soldagem no modo tensão constante. Os parâmetros que foram utilizados como referenciais para medida da estabilidade do processo estão pautados na manutenção de alguns fatores durante a soldagem, como, por exemplo, os aspectos dinâmicos da corrente e tensão, que foram utilizados na composição das Eq. (1) a (4). Nessa figura é observado o mesmo intervalo de soldagem (aproximadamente 200 ms), tempo suficiente para verificar alguns pequenos eventos entre as curvas dos sinais das duas amostras. Levando-se em consideração que o t_{cc} foi referenciado a partir da tensão de 10 V, entendendo que as demais quedas poderiam ser apenas instabilidades do processo, não haveria, portanto, transferência de massa nesse intervalo. O mesmo se estabelece quanto ao intervalo desse t_{cc} , onde convencionou-se, com base nos trabalhos de Farias (1993) e Mota (1998), que em intervalos inferiores a 2,0 ms a transferência de massa também não seria estabelecida, sendo, portanto, tais curtos-circuitos apenas eventos aleatórios, como citado anteriormente.

Diante do exposto, observa-se na Figura 2(a) que o t_{cc} , mantém-se, a princípio, mais constante no intervalo apresentado, bem como no intervalo entre os eventos observados. Embora os índices nesse estudo estejam pautados na observação do sinal de tensão, é nítido que o sinal de corrente nos mostra alguns detalhes, também importantes no tocante à estabilidade. Nota-se no intervalo de 12,40s a 12,45s da Fig. 2(b) que o sinal de corrente apresenta alguns eventos com maior frequência, destoando dos demais eventos do intervalo maior. Levando em consideração que, embora se processe a soldagem em uma situação de curto-circuito, a frequência e a regularidade com que os eventos são estabelecidos, haverá interferência direta na qualidade do processo. Comparando-se os dois oscilogramas apresentados na Figura 2, é possível perceber maior regularidade dos eventos para a soldagem com o arame sólido. Na Figura 3, o mesmo se observa para energia de 1200 kJ/m. Entretanto, foi observado que os oscilogramas apresentam maior variabilidade em seus sinais, sugerindo maior instabilidade com esse valor de energia tanto para arame sólido, quanto para arame tubular.

Foi observada uma maior incidência de fumos durante a soldagem com arame tubular, o que corrobora com os sinais dinâmicos. Em virtude de sua própria configuração, a inserção de elementos, mesmo que metálicos, em sua composição, acabam gerando algum efeito físico-metalúrgico, que pode afetar diretamente o processo. Mota (1998), em suas análises, observou o efeito do fluxo nos arames autoprotetidos. Embora o efeito aqui apresentado, a princípio, se distingue do que foi observado por esse pesquisador, acredita-se que em virtude do balanço composicional utilizado para se estabelecer metalurgicamente uma estrutura com resistência e tenacidade compatível com as normas que regem o seu uso, os elementos inseridos no arame tubular *metal cored*, quando fundidos no arco voltaico, promovem a formação de maior volume de fumos e interferência na característica estática do arco voltaico, alterando, assim, os sinais de corrente e tensão.

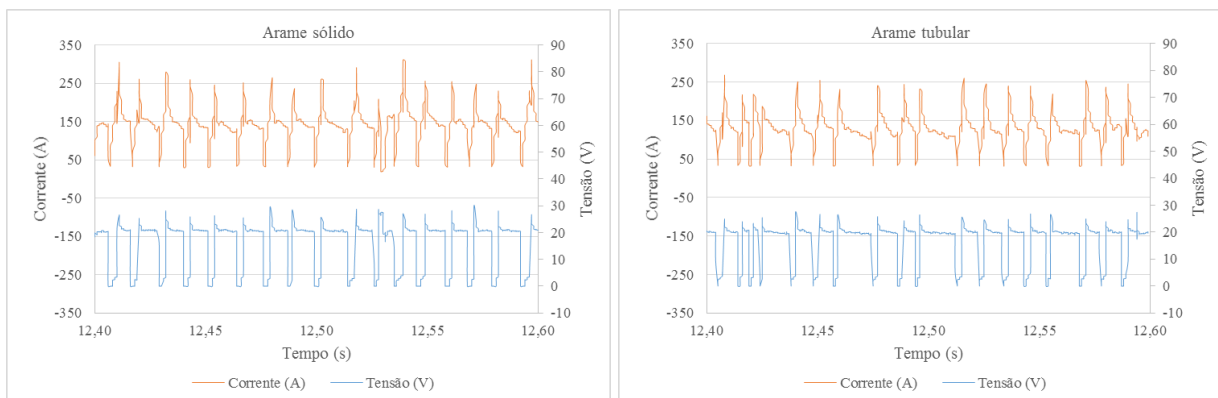


Figura 2 – Oscilogramas para as soldas com energia 800 kJ/m. a) arame sólido. b) arame tubular.

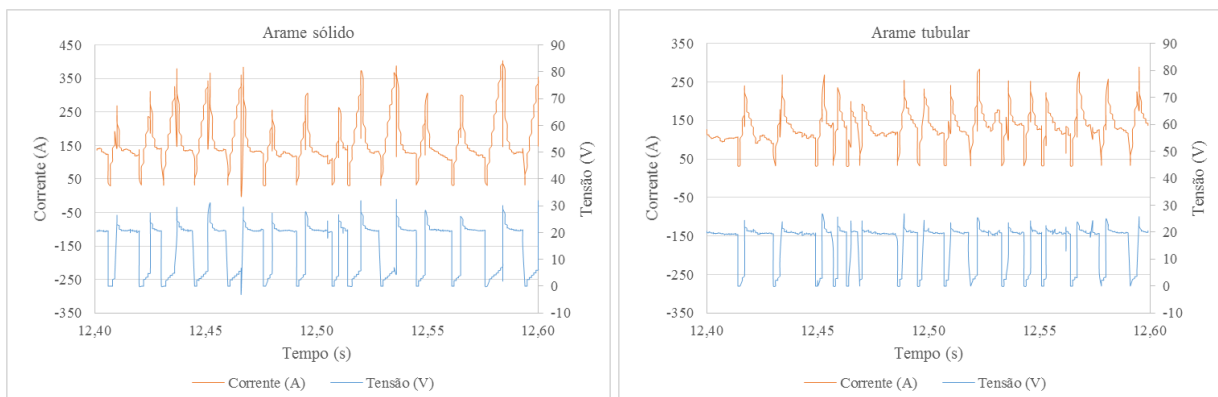


Figura 3 – Oscilogramas para as soldas com energia 1.200 kJ/m. a) arame sólido. b) arame tubular

Com relação ao processo, os dois arames apresentam certa semelhança. Logo, se for levado em consideração os aspectos geométricos como fator de escolha de consumível, a princípio há boa uniformidade entre os dois consumíveis. Isso pode ser verificado observando-se os dois depósitos apresentados na Fig. 4.



Figura 4 – Aspecto dos cordões no nível de energético de 800 kJ/m: (a) 13S-sólido; (b) 12T-tubular.

3.1 Avaliação da estabilidade

Quando se avalia todo o espectro da soldagem, é possível observar com mais detalhes os aspectos de estabilidade em cada condição executada. Levando-se em consideração os aspectos do modo de transferência metálica (curto-circuito), as variáveis frequência de curto-circuito (F_{cc}) e facilidade transferência de metal (F_{tm}) retratam um aspecto de produtividade, os quais, através dos desvios padrões relativos ao tempo e à frequência de curtos-circuitos poderão retratar a diferença de estabilidade entre uma solda e outra. A Tabela 3 apresenta os resultados obtidos nos ensaios realizados para avaliar a estabilidade do arco para transferência por curto-circuito com arames sólido ER70S6 e tubular *metal cored*. Através de tal Tabela é possível observar que tanto a frequência de curtos-circuitos quanto os seus tempos de incidência para o arame sólido tendem a serem maiores, já que os índices retratam os inversos do tempo e do período de curtos-circuitos. Com isso, verifica-se que a soldagem com arame tubular em relação ao arame sólido apresenta maiores valores de F_{tm} , o que indica que esse consumível tem uma maior frequência de formação das gotas, refletindo assim em um tamanho de gotas menores e, por conseguinte, maior incidência das mesmas.

Por si só, o fator de produtividade só se completa com a sua regularidade, ou seja, se esses eventos tendem a se manter constantes durante todo o processo. Através do desvio padrão relativo, é possível estabelecer um fator de comparação. Nota-se nitidamente maior regularidade no tamanho das gotas para o arame sólido, se comparado com o arame tubular em análise. O índice R_{cc} para o arame sólido se mostra bem mais elevado, isso vem a retratar uma formação bem homogênea das gotas transferidas.

Tabela 3 – Resultados obtidos na avaliação da estabilidade do arco para as soldagens.

Tipo do Arame	Energia kJ/m	Transferência de metal			
		Facilidade		Regularidade	
		$F_{cc} (s^{-1})$	$F_{tm} (s^{-1})$	R_{cc}	R_{tm}
Sólido	1200	65,32	216,92	3,99	2,76
		67,70	230,95	3,36	2,62
		70,42	245,70	4,26	2,56
	1000	74,35	261,78	5,45	2,89
		72,89	256,41	4,59	2,67
		73,10	255,75	5,70	3,01
	800	80,19	282,49	6,20	3,58
		81,97	283,29	6,01	3,57
		82,51	271,74	4,44	3,04
Tubular Metal Cored	1200	92,34	361,01	2,06	2,22
		88,42	354,61	2,19	2,54
		94,97	384,62	2,23	2,99
	1000	96,62	384,62	2,01	2,89
		92,94	393,70	2,00	3,30
		85,84	341,30	2,26	2,53
	800	97,18	384,62	2,18	3,10
		97,37	396,83	2,05	3,50
		93,55	369,00	2,25	2,91

Observando a Figura 5, nota-se com maior clareza o efeito da energia de soldagem e do tipo de arame sobre os índices de facilidade de transferência metálica. Nitidamente se verifica que ambos afetam significativamente na facilidade de transferência metálica, sendo que o tipo de arame é o fator que mais influencia tanto F_{cc} quanto F_{tm} . De maneira geral, quanto maior o valor de F_{cc} , maior a quantidade de gotas formadas e, no caso de F_{tm} , quanto maior, menor o volume das gotas transferidas (Mota, 1998).

Analisando com mais detalhes a supracitada Figura, nota-se ainda a influência da energia imposta, onde tal efeito é mais proeminente para o arame sólido. Embora a variação da energia seja estabelecida pela variação da velocidade, esse fator em si acaba interferindo o processo, uma vez que, com a diminuição da velocidade, o calor tende a ficar mais concentrado, interferindo, assim, na poça de fusão. Segundo Stava (1993) e Maruyama *et al.* (1995) o processo GMAW no modo tensão constante promoverá a formação de respingos, oriundos do contato e da reignição do arco. A maior parte da instabilidade estaria relacionada ao princípio da geração dos respingos. Para tanto, o controle indutivo torna-se premente para esse melhor controle. O modo sinérgico em que foi operado busca o controle desses fenômenos, minimizando o fenômeno de respingos e, por conseguinte, evitar quedas na produtividade. Uma vez que o processo de soldagem foi similar para ambos os consumíveis (arames sólido e *metal cored*), outro fenômeno estaria interferindo na instabilidade do sistema. Levando em consideração que a inserção dos elementos de liga pode interferir no ambiente do plasma gerado, possivelmente a vaporização de alguns metais gerou pequenas variações nos campos, interferindo na estabilidade. Essa estabilidade necessariamente não estaria pautada somente na variação dos sinais, mas também do próprio ambiente, como o caso da energia instantânea do sistema arco voltaico – poça de fusão. Assim, o calor do arco influencia na vaporização e no acúmulo de energia na poça de fusão, uma vez que com menor velocidade, o arco tende a ficar mais tempo sobre o metal já fundido, promovendo maior vaporização e também mais vórtices devido às linhas de convecção, além de promover maior oscilação da poça. Todos esses fenômenos podem interferir no tamanho das gotas, promovendo maior fusão do arame e, conseqüentemente, maior volume das mesmas quando esse deveria ser menor devido à maior energia. Isso pode ser constatado pelos resultados de F_{cc} e F_{tm} , onde quanto maior a energia, menores são seus valores, ou seja, maiores as gotas e menor será a incidência das mesmas.

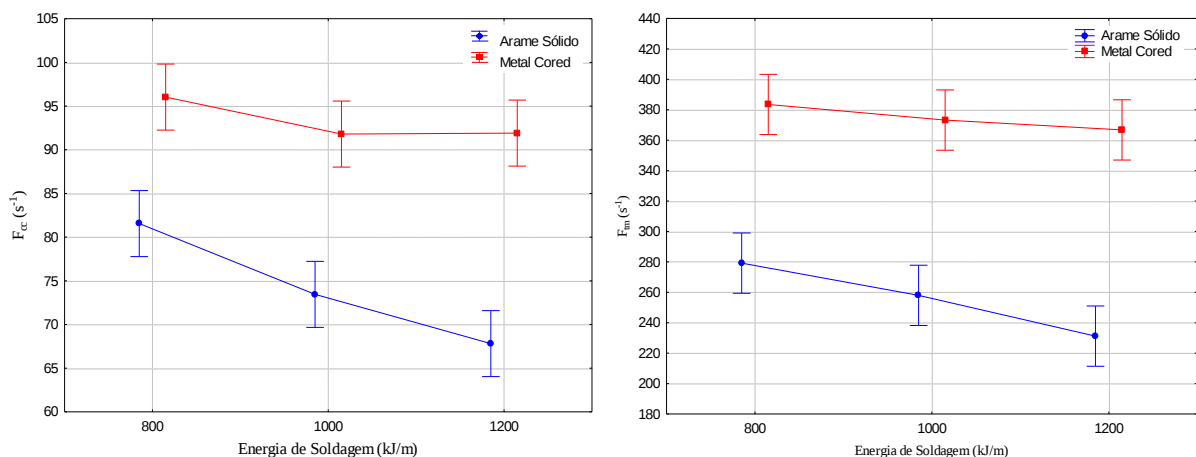


Figura 5 – Relação entre os índices de facilidade de transferência metálica e os fatores arame e energia.

Com o intuito de avaliar os índices de regularidade de transferência, o índice R_{cc} foi avaliado por retratar o quão próximo da igualdade os tempos em que os eventos de curtos-circuitos acontecem. Levando-se em consideração as características dinâmicas ilustradas nas Fig. 2 e 3, nota-se uma distribuição mais regular dos curtos-circuitos para a soldagem com o arame sólido em menor energia. Observando-se a Figura 6, a avaliação estatística apontou também nessa direção, onde os maiores índices apontam para essa condição. Nesse contexto, a condição de arame sólido em baixa energia, aqui representada por 800 kJ/m, apresenta curtos-circuitos em intervalos mais bem definidos que para a mesma condição com o arame tubular. Os tempos de curtos-circuitos para o arame sólido apresentaram-se superiores aos do arame tubular, após avaliação dos oscilogramas e dos resultados dos índices de estabilidade.

A princípio, como citado outrora, a inserção dos elementos de liga para a compensação metalúrgica provavelmente interferiu no arco e na característica do material fundido. Possivelmente a mudança na característica do fundido poderá mudar a viscosidade da gota, interferindo nas forças que controlam o tamanho da gota e, conseqüentemente, a transferência. Segundo Allum (1985) e Haidar (1998), a formação da gota no processo GMAW é regida por diversas forças, tanto de origem eletromagnética, quanto mecânica; logo, o ambiente acaba interferindo diretamente nessa dinâmica. Ainda, devido à característica construtiva do arame tubular *metal cored*, a passagem da corrente elétrica para esses tipos de arames fica restrita principalmente na parte da capa metálica que comporta o fluxo, produzindo, assim, maior densidade de corrente para os mesmos, aumentando pontualmente o calor na gota, o que poderá diminuir sua viscosidade e, dessa forma, mudar o seu volume (Moreira, 2008).

Com relação à estabilidade do processo, de forma geral, o processo, a princípio, tenderá a ser mais estável, com transferência mais regular, refletindo-se inclusive no desempenho, ou seja, na produtividade. A instabilidade poderá levar a perdas durante o processo por diversos motivos. Observando os dados da Fig. 6 (b), nota-se que a diferença entre

os arames sólidos e “*metal cored*”, com relação ao índice R_{tm} , quando se avalia o tipo de arame, parece não ter um efeito significativo, sendo mais proeminente na variação da energia. Esse efeito pode ser visto nas Figuras 2 e 3, quando se observa o tempo de curto-circuito, o qual se mostra praticamente o mesmo, embora haja variação no período em que esses eventos aconteceram.

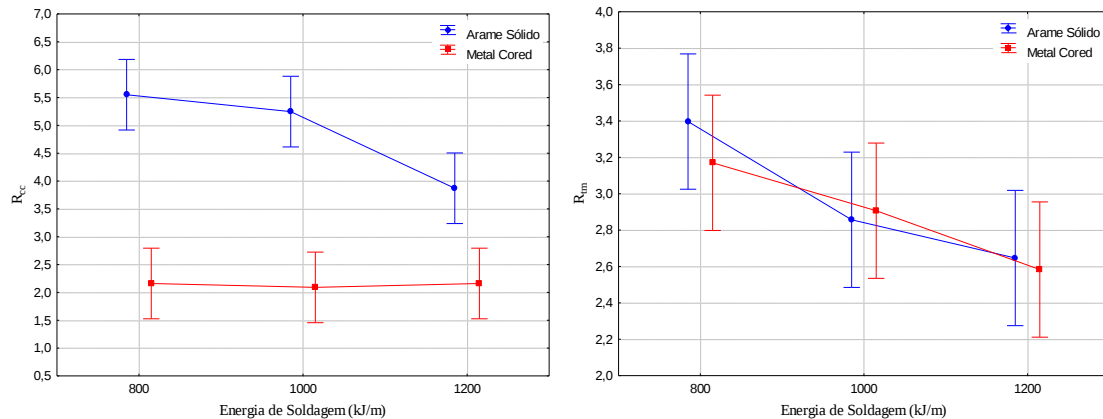


Figura 6 – Relação entre os índices de regularidade de transferência metálica e os fatores arame e energia.

A avaliação do comportamento do rendimento de deposição entre os três níveis de energias utilizados foi realizada para os dois arames em estudo. A Figura 7 retrata o efeito tanto da energia, quanto do tipo de consumível sobre o rendimento do processo. Nota-se que em ambos arames e para todas as condições de energias aplicadas, o processo se mostrou bastante eficiente, com médias superiores a 95%. Cabe ressaltar, no entanto, que o processo foi realizado através de procedimento automático com uma fonte com controle sinérgico, o que tende a melhorar o desempenho do processo. Isso, no entanto, acontece para todas as condições avaliadas. Com esse controle, observa-se nas Figuras 2 e 3 que a dinâmica da corrente difere um pouco do que convencionalmente é estabelecido nas fontes eletromagnéticas ou mesmo nas fontes eletrônicas de menor volume de controle. Há certo patamar na descida da corrente, como se a indutância estivesse em controle contínuo, evitando efeitos mais danosos do curto-circuito, como cita Stava (1998) e Haidar (1993). Logo, é esperado melhor desempenho do processo para tais fontes.

Isso, no entanto, possibilitou que se avaliasse mais criteriosamente o efeito da energia e consumível. Assim, o melhor efeito de rendimento para o arame sólido foi observado. Os autores citados nesse trabalho descrevem que o arame tubular, mesmo na modalidade *metal cored*, tem formação periférica da gota, podendo em alguns casos, provocar dispersão da mesma, mesmo sendo transferência por curto-circuito. Uma vez que há maior densidade de corrente, a possível gota mais energética e, dessa forma, mais fluida, tenderá a possuir maior dinâmica, que poderá favorecer a dispersão dessa quando submetida aos diversos campos de interação durante sua transferência da ponta do arame até a poça fundida, como no caso da vaporização metálica dos elementos constituintes do núcleo do arame tubular *metal cored*.

De forma geral, embora os dois arames possuam algumas diferenças com relação à estabilidade, o efeito no processo não apresenta grande impacto, tomando como referência uma metodologia mais robusta de controle, como é o caso do controle sinérgico. Observando os dados da Figura (7), a diferença entre as melhores condições de rendimento estaria na faixa de 2%, o que por si só, dependendo do volume de operação, poderá ser compensado por outros mecanismos, tais como, corrente, tensão, *stick-out*, velocidade de alimentação do arame, velocidade de soldagem.

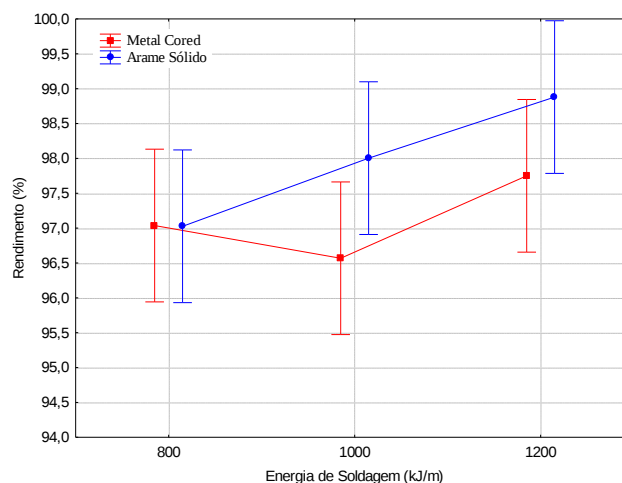


Figura 7 – Correlação entre a energia de soldagem e o tipo de arame sobre o rendimento do processo

Isso, no entanto, abre outras discussões quanto aos fatores de custo envolvidos. Se forem levadas em consideração as características dos procedimentos aplicados nesse trabalho, é possível afirmar que, em termos de processo, a soldagem dos dois arames tem certa similaridade quanto ao custo envolvido na execução. Por ambos serem consumíveis contínuos, já apresentam boa produtividade, o que os equipara com relação ao custo de procedimento. Não se presenciou a incidência de escória para a soldagem com os dois consumíveis em discussão. Logo, tirando os efeitos gerados pelas interações metalúrgicas, as quais poderão inserir aspectos de resistência e tenacidade ao depósito, os dois consumíveis são competitivos, com leve vantagem do consumível sólido. Quando se levanta os custos comerciais de produto, essa similaridade pode ser posta em cheque. Embora o mercado tenha muita variabilidade, existe uma diferença significativa entre os dois consumíveis aqui estudados. O quilograma do arame tubular *metal cored* pode chegar a atingir valores superiores ao dobro do consumível sólido de mesma classe. Assim, se apenas forem considerados os aspectos de processo (operacionalidade) e comercial, a princípio, o consumível sólido se apresenta com grande vantagem sobre o consumível tubular *metal cored*. Esses aspectos devem ser considerados durante a escolha do tipo de consumível a ser utilizado.

4. CONCLUSÕES

O comportamento dinâmico das soldas realizadas aponta para maior homogeneidade dos sinais de curto-circuito na soldagem com arame sólido comparado com a com arame tubular *metal cored*;

Dos consumíveis avaliados, o arame sólido apresenta, pelos sinais dinâmicos, maior diâmetro das gotas em transferência e, dessa forma, menor frequência de transferência;

O consumível sólido apresenta melhor estabilidade dinâmica que o tubular, ainda que essa seja tênue.

No geral, os dois consumíveis se mantiveram bem próximos quanto às características de produtividade e operação nas mesmas condições de operação, devendo haver outros pontos a serem levados em consideração na escolha de determinado consumível.

5. AGRADECIMENTOS

Os autores gostariam de agradecer ao Laboratório de Soldagem do Departamento de Engenharia Mecânica da Universidade Federal do Espírito Santo e ao Instituto Federal do Espírito Santo pelos suportes técnico e financeiro concedidos a esse trabalho.

6. REFERÊNCIAS

- Adolfsson, S., Bahrami, A., Bolmsjo, G. and Claessom, I., 1999, "On-Line Quality Monitoring in Short-Circuit Gas Metal Arc Welding", *Welding Journal*, No.2, pp.59s-73s.
- Allum, C. J., 1985, "Metal transfer in arc welding as a varicose instability. II. Development of model for arc welding", *J. Phys. D: Appl. Phys.* 18, pp.1447.
- Farias, J. P., 1993, "Magnésio metálico como componente do revestimento na soldagem com eletrodos ao C-Mn-Ni", Tese de Doutorado, Programa de Pós Graduação em Engenharia Mecânica, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis.
- Haidar, J., 1998, "An analysis of the formation of metal droplets in arc welding", *J. Phys. D: Appl. Phys.* 31, pp.1233-1244.
- Hermans, M. J., Ouden, G. D., 1999, "Process Behavior and Stability in Short Circuit Gas Metal Arc Welding", *Welding Journal* pp.137s-141s.
- Lancaster, J. F., 1984, "The Physics of Welding, Pergamon Press" 1984.
- Liu, S., and Siewert, T. A. 1989, "Metal transfer in gas metal arc welding: droplet rate", *Welding Journal* 68(2): 52-s to 58-s.
- Lucas, W. 1985, "Computers in arc welding - the next industrial revolution, part 3: instrumentation and process analysis.", *Metal Construction* 17(7): 431-436.
- Luksa, K., 2006, "Influence of weld imperfection on short circuit GMA welding arc stability", *Journal of Materials Processing Technology*, Vol.175, pp.285-290.
- Maruyama, T., Okada, M., Hida, Y., Honma, M., Minato, T., 1995, "Current Waveform Control in Gas Shielded Arc Welding for Robotic Systems", *Kobelco Technology*, pp. 10-13.
- Modenesi, P. J., Nixon, J. H., 1994, "Arc Instability Phenomena in GMA Welding", *Welding Journal*. 9 (1994) 219s-224s.
- Moreira, A. F., 2008, "Influência da atmosfera protetora no cordão de solda obtido através dos processos de soldagem GMAW e FCAW", Tese de Mestrado, Programa de Pós Graduação em Engenharia Mecânica, Universidade Federal Paulista, São Paulo, Brasil.
- Mota, C. A. M., 1998, "Níquel e Manganês como controladores da Tenacidade na Soldagem com Arames Tubulares Autoprottegidos", Tese de Doutorado, Programa de Pós Graduação em Engenharia Mecânica, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, Brasil.
- Quin, T. P., Smith, C., McCowan, C. N., Blachowiak, E. and Madigan, R. B., 1999, "Arc Sensing for Defects in

- Constant Voltage Gas Metal Arc Welding”. Welding Journal. No.9, pp.322-328.
- Rezende, G. M. C., Liskévyck, O., Vilarinho, L. O., Scotti, A., 2011, “Um critério para determinar a Regulação da Tensão em Soldagem MIG/MAG por Curto-Circuito”, Soldagem e Inspeção, Vol.16, No. 2, São Paulo, Brasil, pp. 98-103.
- Scotti, A., Ponomarev, V, 2008, “Soldagem MIG/MAG: Melhor entendimento/Melhor desempenho”, Editora Artliber, 2ª Ed, São Paulo, Brasil, pp.288.
- Stava, E., 1993, “A New, Low-Spatter Arc Welding Machine” Weld. J., pp 25-29.

7. RESPONSABILIDADE AUTURAL

Os autores são os únicos responsáveis pelo conteúdo deste trabalho.

EVALUATION OF THE OPERATIONAL CHARACTERISTICS IN SOLID AND CORED TUBULAR WIRES IN AUTOMATED WELDING

Otávio Favoretti do Nascimento, otavio.favoretti@gmail.com¹

Marcos Lessa Kugizaki, marcoslk@gmail.com²

Lucas Dias Schuller, shullerlucas@yahoo.com.br²

André Gustavo de Sousa Galdino, andregsg@ifes.edu.br¹

Temistocles de Sousa Luz, temistocles.luz@icloud.com²

¹Instituto Federal do Espírito Santo, Avenida Vitória, 1729 – Jucutuquara, Vitória, Espírito Santo, CEP.: 29040-780.

²Universidade Federal do Espírito Santo, Avenida Fernando Ferrari, 514 – Goiabeiras, Vitória, CEP.: 29075-073.

Abstract: *The welding manufacturing process stands out in terms of production volume. However, factors such as labor and inputs directly affect the production process. One of the alternatives to minimize costs and increase productivity is automation, since there is less variance in quality indicators due to labor interference, for example. In terms of welding, the process stability is of the utmost importance to ensure higher quality of the weld joints with a more efficient way of consumption, thus increasing productivity. In this context, this work had the objective of evaluating the stability of two consumables classified in the same metallurgical class, in order to establish decision parameters for consumable choice, since this affects the costs in large-scale projects. For this purpose, SAE 1010 steel bars were welded by automated short-circuit GMAW with AWS ER70S6 solid wire and TuBrod 70 MC Ultra cored tubular wire with welding energies of 0.8, 1.0 and 1.2 kJ / mm. The easiness and evenness of short-circuit and transfer of metal were evaluated for each type of wire. It was observed that the solid wire achieved better stability at the lower welding energy, since it had smaller relative standard deviations for these indices. Such behavior was also observed for tubular wire. However, when comparing the two types of wires, the evenness of tubular wire regularity attained smaller variance, which suggests that it has a larger working range.*

Keywords: *GMAW, stability, solid wire, tubular wire.*