

Estudo da Influência da Frequência de Oscilação do Arame nas Características dos Cordões em Soldagem TIG com Alimentação**(Study of the Influence of Wire Oscillation Frequency in Beads Characteristics on Wire Feed TIG)***Larissa Colares Maia¹, Kauê Correa Riffel¹, Rafael Albino Bernardi¹, Rafael Gomes Nunes Silva¹, Régis Henrique Gonçalves e Silva¹, Mateus Barancelli Schwedersky¹**¹Universidade Federal de Santa Catarina, LABSOLDA, Florianópolis, Santa Catarina, Brasil.
larissa.colares@posgrad.ufsc.br***Resumo**

Mesmo com o crescente interesse por parte da indústria no processo TIG com alimentação dinâmica e nas suas aplicabilidades, ainda são poucos os estudos que avaliam suas vantagens em relação aos processos convencionais. O processo TIG com alimentação dinâmica possui como principal característica a vibração do arame, o que altera o comportamento dinâmico da poça e proporciona melhoras nas propriedades do cordão, diminuição na falta de fusão e evitando defeitos como a porosidade e descontinuidades. Entre as variáveis operacionais do processo, está a frequência de vibração do arame, que possui valor zero para o TIG com alimentação contínua e valores de baixa ou alta frequência para a alimentação dinâmica. O presente trabalho busca avaliar a influência da frequência de vibração do arame nas características gerais do cordão de solda e na troca de calor na poça de fusão, com filmagem com câmera térmica. Testes foram realizados em chapas de aço carbono variando entre alimentação contínua e alimentação dinâmica, utilizando-se a frequência de oscilação do arame de 18 Hz. Análises foram realizadas para determinação de características geométricas dos cordões. Resultados indicam que a soldagem de aço-carbono com processo TIG com alimentação dinâmica não apresenta benefícios significativos em relação à alimentação contínua.

Palavras-chave: GTAW alimentado, oscilação de arame, alta frequência.

Abstract: *Even with the industry growing interest in the TIG process with dynamic wire feeding and its applicability, there are few studies that assess its advantages over conventional processes. The TIG process with dynamic wire feeding has as main feature the vibration of the wire, which changes the dynamic behavior of the pool and provides improvements in bead properties, decrease in lack of fusion and avoiding defects as porosity and discontinuities. Among the operating variables of the process is the wire vibration frequency, which has zero value for TIG with continuous feed and low or high values of frequency for dynamic feed. This study aims to evaluate the influence of wire vibration frequency in the general characteristics of the weld bead and the heat exchange in the weld pool by shooting with thermal camera. Tests were performed on carbon steel plates ranging from continuous feed and dynamic feed, using the wire oscillation frequency of 18 Hz. Analyzes were performed for determination of geometrical characteristics of the beads. Results indicate that the carbon steel TIG welding process with dynamic feeding has no significant benefits in relation to the continuous feeding.*

Key-words: wire feed GTAW; wire oscillation, high frequency.

1. Introdução

O processo TIG (do inglês, *Tungsten Inert Gas*) caracteriza-se pela formação de um arco voltaico entre o eletrodo não consumível de tungstênio e a peça a ser soldada, onde a corrente elétrica é conduzida por um gás inerte ionizado (plasma), responsável também pela proteção do eletrodo e da poça de fusão da oxidação [1]. Na soldagem de metais ferrosos, o eletrodo de tungstênio é mantido na polaridade negativa do arco elétrico, enquanto a peça é mantida na polaridade positiva, sendo os elétrons emitidos pelo cátodo de tungstênio.

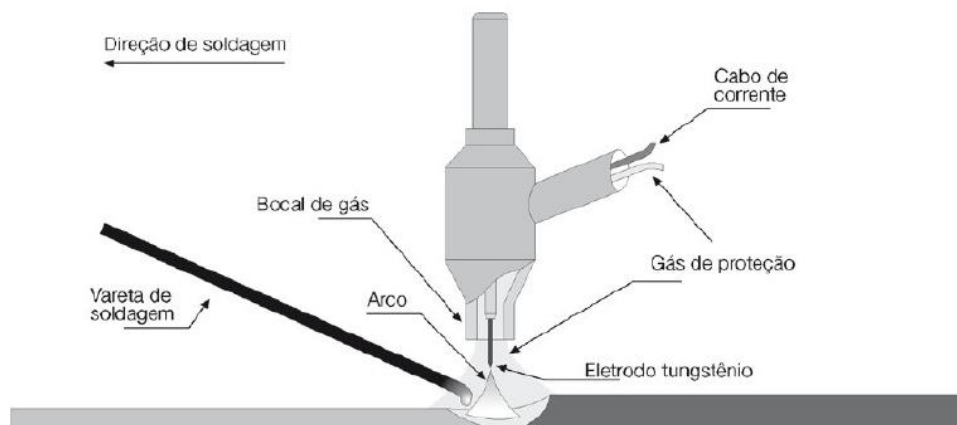


Figura 1. Ilustração do processo TIG com alimentação de material.

A variável de controle do processo TIG é a corrente elétrica, utilizando-se então fontes de controle de corrente. A soldagem pode ser realizada de forma autógena, sem adição de material, ou de forma alimentada, utilizando metal de adição, ilustrada na Figura 1. Na soldagem manual, o controle da deposição de material é feito pelo soldador, que com uma vareta metálica determina a quantidade de material e o momento de inserção do metal no arco voltaico. Com a mecanização do processo, permite-se realizar a alimentação de material de forma contínua ou de forma dinâmica, quando além da velocidade contínua de alimentação, se aplica avanço e recuo do arame. Os dois modos de alimentação de material são mostrados na Figura 2.

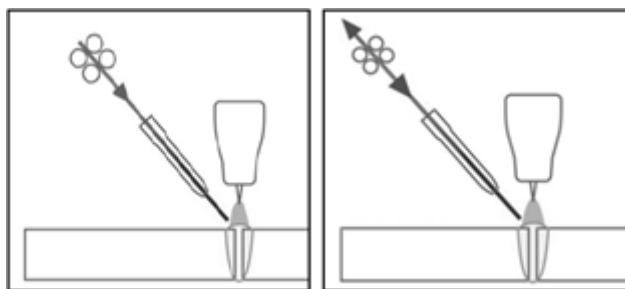


Figura 2. Representação esquemática do processo TIG com alimentação contínua (esquerda) e alimentação dinâmica (direita).

O TIG destaca-se dos demais processos de soldagem devido à produção de soldas com alta qualidade, aplicabilidade em diversos materiais e ausência de escória, respingos e fumos [3]. Entretanto, limitação como baixa taxa de deposição, resultando em baixa produção e altos custos, é atribuída ao TIG quando aplicado de forma manual. Técnicas foram desenvolvidas no que concerne à alimentação de arame, que juntamente com a automatização do processo, permite obter maiores velocidades soldagem e taxas de deposição, usufruindo das vantagens já citadas do TIG. [4]

O pré-aquecimento do arame (denominado em inglês como *hot wire*) é um dos procedimentos que possibilita maior velocidade de soldagem no TIG devido a propiciar o aumento da quantidade de metal depositado, permitindo também a redução da corrente de soldagem. Juntamente ao *hot wire*, a aplicação de movimentos de avanço e recuo do arame em alta frequência vem sendo divulgada por fabricantes como um procedimento capaz de aumentar em 100% a velocidade de soldagem em comparação ao processo convencional e em reduzir em 60% a diluição [4], além de redução na ocorrência de porosidades e maior molhabilidade do cordão. [5] Entretanto, pouco se sabe sobre a real influência da aplicação da oscilação de arame em tais resultados, sendo a literatura escassa e de caráter comercial. Equipamentos como o já citado TIP TIG, o tigSpeed e o Dabber TIG são exemplos de dispositivos comerciais capazes de efetuar o avanço e recuo de arame com valores de frequência de oscilação na faixa de 16 a 18 Hz, além do uso da técnica *hot wire*.



Figura 3. Equipamento TIP TIG (esquerda) e representação do movimento oscilatório do tracionador (direita).

O TIP TIG, utilizado no presente trabalho e mostrado na Figura 3, realiza o movimento do arame através da oscilação do mecanismo tracionador como um todo, sendo que os roletes direcionam o arame para frente enquanto o conjunto do tracionador se move para frente e para trás, resultando então no movimento de avanço e recuo do arame na saída da alimentação da tocha. Esse movimento fornece energia cinética para a poça de fusão, agitando-a e favorecendo a produtividade e a qualidade do processo. Segundo o fabricante, a agitação da poça e a energia adicionada no pré-aquecimento do arame criam uma dinâmica que desacelera a solidificação e aumenta a fluidez da poça de fusão, podendo-se assim adicionar mais arame, aumentando a taxa de deposição [5]. Wilson [6] cita que o TIP TIG surgiu como uma opção mais barata e simplificada em comparação a processos como o Tandem MIG e Laser híbrido, apresentando resultados bem melhores que os esperados para o processo TIG convencional. Também cita que o seu princípio pode ser aplicado não somente para o TIG, mas em versões Plasma e Laser, e para os mais diversos tipos de materiais.

2. Matérias e Métodos

A metodologia aplicada no presente trabalho busca avaliar os efeitos do uso da alimentação dinâmica com alta frequência na geometria do cordão de solda, no comportamento e na temperatura da poça de fusão, em comparação com alimentação contínua de arame. Dessa forma, foram realizados ensaios de soldagem de cordões em simples deposição em chapa plana com o uso da oscilação do arame e com alimentação contínua.

O equipamento TIP TIG consiste da fonte de soldagem, o cabeçote alimentador, que pode propiciar ou não a oscilação de arame, o manipulador robótico e a tocha de soldagem, além dos sistemas de regulação de parâmetros de soldagem. Durante a soldagem, foram capturadas imagens com o uso de uma câmera termográfica modelo FLIR SC 7000 e câmera de alta velocidade para as duas condições, que foram repetidas três vezes cada. Também foi utilizado um sistema de aquisição portátil (SAP) da empresa IMC, com o qual foram adquiridos valores de tensão e corrente em todos os ensaios. A bancada de ensaios é mostrada na Figura 4.



Figura 4. Bancada de ensaios com: 1 – Fonte de Soldagem e Cabeçote Alimentador, 2 – Manipulador Robótico, 3 – Tocha e alimentador de arame, 4 – Chapa plana, 5 – Câmera Termográfica FLIR SC 7000, 6 – SAP e 7 – Computador para aquisição de imagens termográficas.

Os ensaios se procederam com cordões em chapa plana de aço 1020 com $\frac{3}{8}$ ” de espessura, com arame de aço 70S-6 com 1 mm de diâmetro. Foi utilizado Argônio puro como gás de proteção, com uma vazão de 12

l/min. Foi utilizado um eletrodo de tungstênio dopado com Cério e com 3,2 mm de diâmetro. Também foram mantidos como parâmetros para todos os ensaios o uso de *hot wire*, alimentação por trás e transferência metálica por ponte. Os parâmetros elétricos da fonte e os demais parâmetros já citados são mostrados na Tabela 1. Para fim de comparação, os parâmetros da tabela foram mantidos em todos os ensaios, variando somente entre o modo de alimentação contínuo e a alimentação dinâmica com frequência de oscilação de 18Hz.

Foi realizado o corte transversal dos corpos de prova na metade de seus comprimentos para análise macrográfica. A análise visou obter valores de diluição, penetração, largura do cordão e identificar possíveis defeitos.

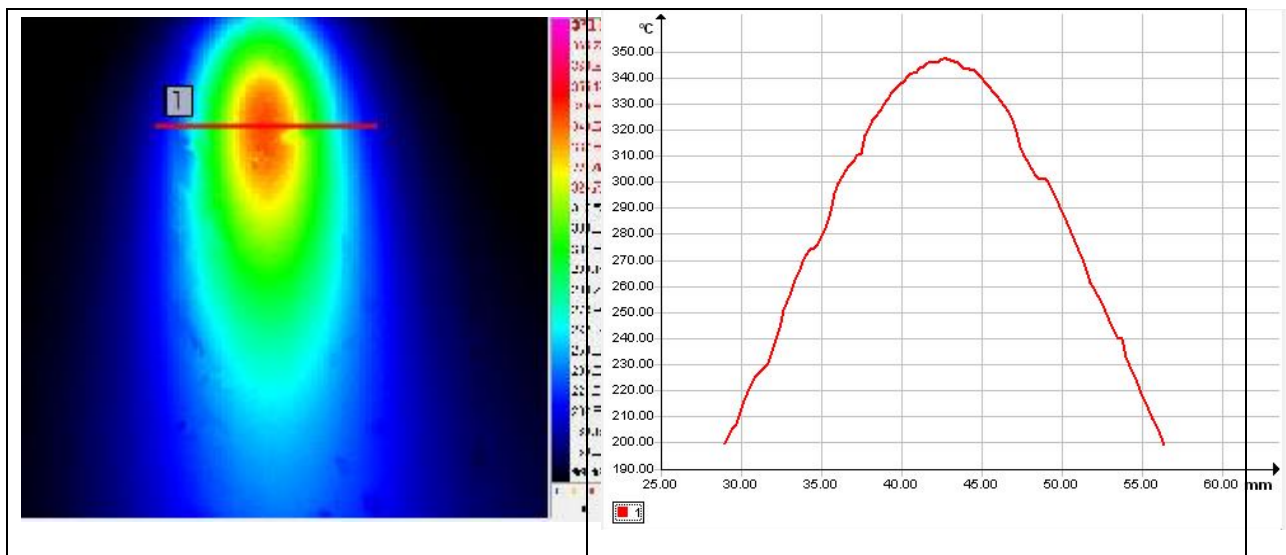
Tabela 1. Parâmetros de soldagem.

Equipamento	TIP TIG
Arame	70S-6
Diâmetro do Arame	1 mm
Diâmetro do eletrodo	3,2 mm
Corrente de Soldagem	150 A
Velocidade de Soldagem	20 cm/min
Velocidade de Alimentação de Arame	1,51 m/min
Vazão de gás	12 l/min
Tensão de referência (AVC)	10 V

3. Resultados e Discussão

3.1 Filmagem

A filmagem térmica foi realizada a fim de verificar se a oscilação do arame na frequência de 18Hz altera a temperatura da poça de fusão, intensificando ou reduzindo as trocas de calor. As imagens termográficas obtidas são mostradas na Figura 5, além do gráfico da temperatura ao longo da linha traçada na região de maiores temperaturas da poça de fusão. Os valores foram obtidos através do *software* de tratamento das imagens termográficas da câmera térmica.



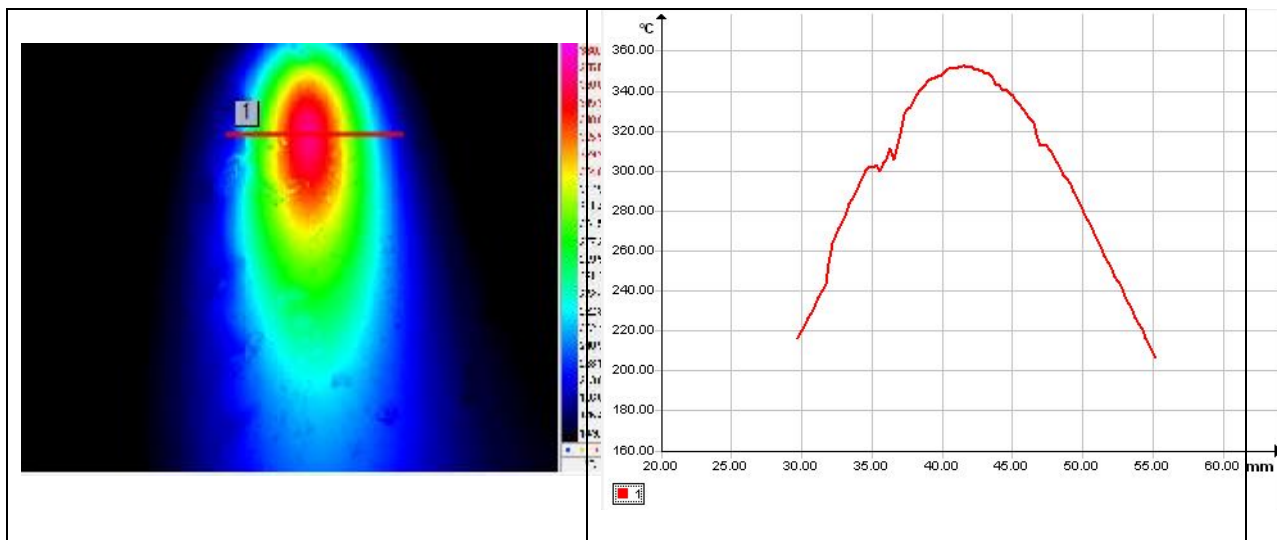


Figura 5. Resultados da filmagem térmica. Acima, imagem termográfica e gráfico da temperatura por posição ao longo da linha 1 para AD. Abaixo, para AC.

A temperatura máxima para cada condição foi de $(348,60 \pm 2,70) \text{ }^\circ\text{C}$ e $(356,13 \pm 13,73) \text{ }^\circ\text{C}$, para alimentação dinâmica e alimentação contínua, respectivamente. Os resultados mostram que com o uso da alimentação dinâmica, há um leve resfriamento da poça de fusão resultante de uma possível oscilação da poça devido o movimento de avanço e recuo do aram, o que intensificaria a perda de calor. Porém, esse efeito seria muito pequeno para gerar diferenças significativas nas condições dos ensaios realizados, a ser confirmado com os resultados das macrografias dos cordões de solda.

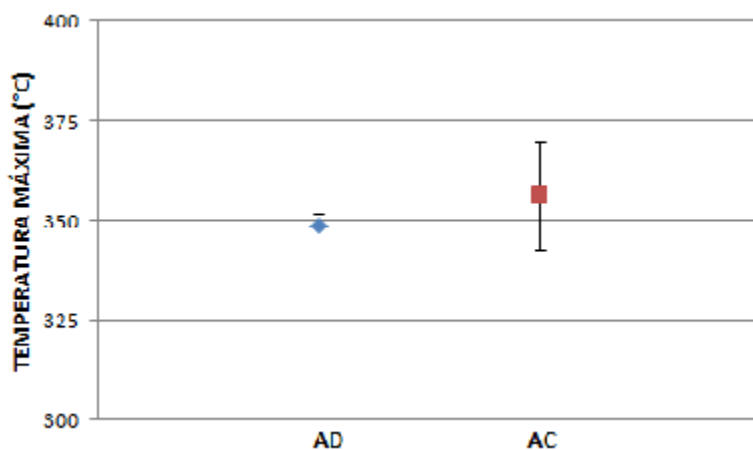


Figura 6. Gráfico com valor da temperatura máxima da poça de fusão

A filmagem com câmera de alta velocidade visou à verificação do comportamento da poça de fusão com o uso da alimentação dinâmica. Na Figura 7 são mostradas sequência de imagens para AD e AC, em que entre cada imagem foram avançados de 5 a 8 frames. Pode-se verificar na sequência indicada como AD, que há oscilação perceptível da poça de fusão devido aos movimentos de avanço e recuo do arame. Na primeira e terceira imagem da sequência superior, o arame foi empurrado em direção à poça, enquanto na segunda e na quarta imagem têm-se momentos onde o arame é recuado pelo cabeçote alimentador. Na sequência inferior, indicada como AC, mostram-se imagens capturadas com alimentação contínua de arame, onde a oscilação da poça não é perceptível visualmente.

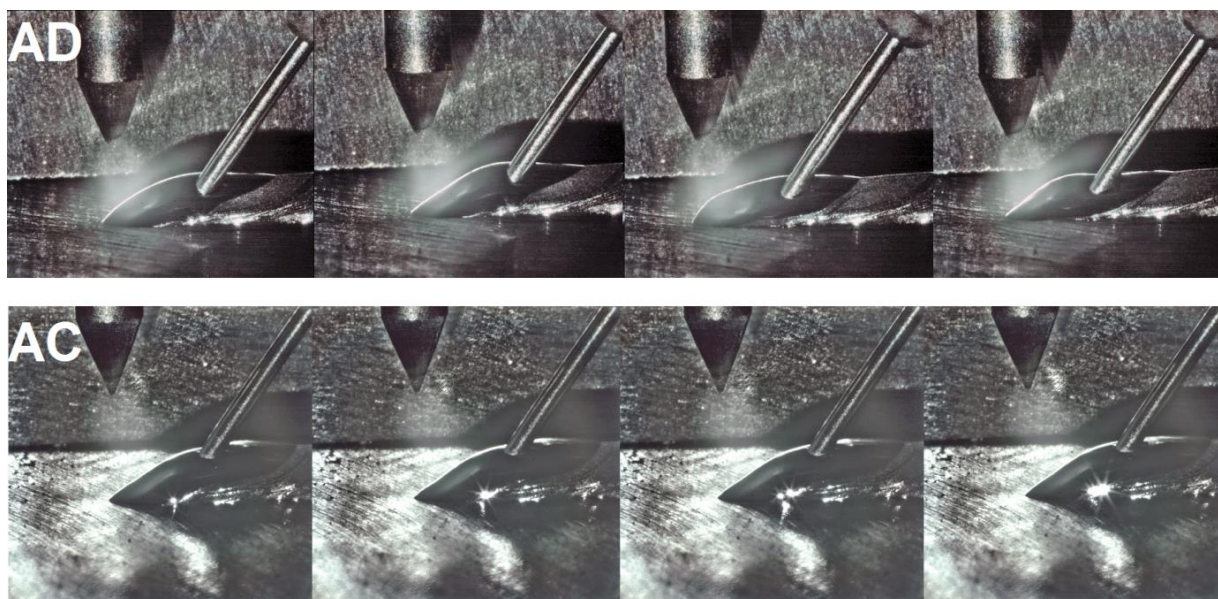


Figura 7. Imagens da poça de fusão para TIG com alimentação dinâmica (acima) e TIG com alimentação contínua (abaixo).

3.2 Análise das características geométricas

Com os parâmetros apresentados na Tabela 1 foi possível obter os cordões de solda mostrados na Figura 8. Nessa figura, pode-se observar o aspecto superficial do cordão de solda gerado com oscilação do arame (AD) e com alimentação contínua (AC). Estes não evidenciaram falhas ao longo da superfície dos cordões, não apresentando também diferenças superficiais significativas.



Figura 8. Cordões de solda realizados AD – Alimentação Dinâmica e AC – Alimentação Contínua.

Os valores de corrente e tensão de soldagem foram aquisitados com o equipamento SAP. Os valores de corrente média e tensão média são mostrados na Tabela 2. Valores aquisitados de tensão média, corrente média e potência média, além do valor da potência média de soldagem, também obtido com o SAP. Os valores médios dos três ensaios foram calculados e também são mostrados na Tabela 2. Nota-se que o valor da corrente permanece o mesmo em todas as condições ensaiadas, fato característico do comando de corrente da fonte de soldagem. A tensão, comandada pelo Controle de Altura de Arco (AVC), permanece em valores próximos a tensão de referência de 10 V. A potência média dos ensaios AD1, AD2 e AD3 é somente 1,6% maior que a potência média dos ensaios AC1, AC2 e AC3, não se caracterizando como uma diferença expressiva de potência.

Na Figura 9 tem-se o gráfico com as médias e os desvios-padrões da tensão e da potência média para as duas condições, mostrando que as faixas de valores para ambas as condições se sobrepõem.

Tabela 2. Valores aquisitados de tensão média, corrente média e potência média.

	Ensaio	Tensão média (V)	Corrente média (A)	Potência média (W)
Alimentação Dinâmica	AD1	10,4	139	1445
	AD2	10,2	139	1415
	AD3	10,6	139	1476
	MÉDIA	10,4	139	1445,33
	DESVIO-PADRÃO	0,2	0	30,50
Alimentação Contínua	AC1	10,5	139	1452
	AC2	10,1	139	1402
	AC3	10,2	139	1414
	MÉDIA	10,27	139	1422,67
	DESVIO-PADRÃO	0,21	0	26,10

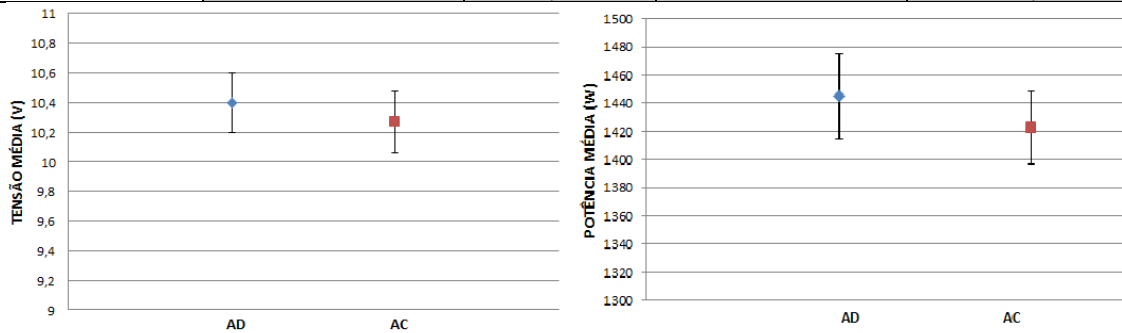


Figura 9. Gráficos com valores de tensão média e potência média.

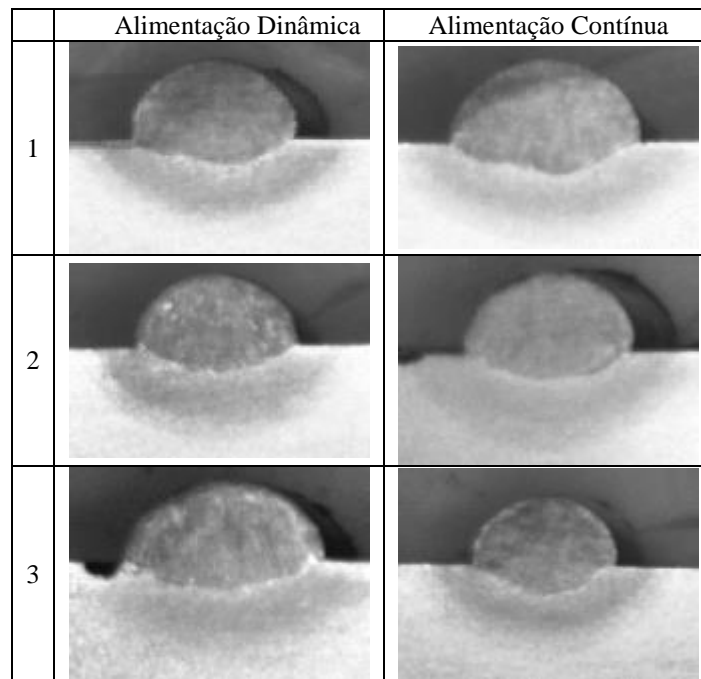


Figura 10. Imagens macrográficas dos cordões de solda.

Na Figura 10. Imagens macrográficas dos cordões de solda. Figura 10 são apresentadas as macrografias das sessões transversais dos seis corpos de prova. Percebe-se que o uso da alimentação dinâmica não alterou visivelmente a geometria da sessão transversal do cordão em relação à alimentação contínua. Defeitos como porosidade, falta de fusão ou mordeduras não são observados em nenhuma das imagens macrográficas, não podendo se traçar um comparativo entre a qualidade dos cordões.

Na Tabela 3 têm-se os valores de largura do cordão, penetração e diluição de cada corpo de prova. O cálculo da diluição se faz pela razão entre a área do cordão localizada se caracterizava somente por metal de base antes

da soldagem e a área total do cordão de solda, conforme a equação 1. Na Figura 11 têm-se gráficos que apresentam valores médios de largura do cordão, penetração e de diluição para AD e AC. Pelos valores apresentados tanto pela Tabela 3 como pelos gráficos pela Figura 11, nota-se que a diferença entre as médias não é consideravelmente grande, principalmente entre os valores das médias da largura do cordão e da diluição. Logo, um teste de hipóteses se faz necessário para poder se afirmar com certo nível de confiança se os valores obtidos com as amostras podem realmente indicar se os valores para a população são diferentes.

$$Diluição (\%) = \left[\frac{A_P}{(A_R + A_P)} \right] \times 100 \quad (1)$$

Tabela 3. Valores de largura, penetração e diluição obtidos com análise macrográfica.

	Ensaio	Largura (mm)	Penetração (mm)	Diluição (%)
Alimentação Dinâmica	AD1	4,26	0,66	24,62
	AD2	3,92	0,65	22,6
	AD3	4,00	0,65	24,65
	MÉDIA	4,06	0,65	23,95
	DESVIO-PADRÃO	0,18	0,01	1,17
Alimentação Contínua	AC1	4,29	0,75	24,58
	AC2	3,98	0,71	24,57
	AC3	3,85	0,83	25,64
	MÉDIA	4,04	0,76	24,93
	DESVIO-PADRÃO	0,30	0,06	0,61

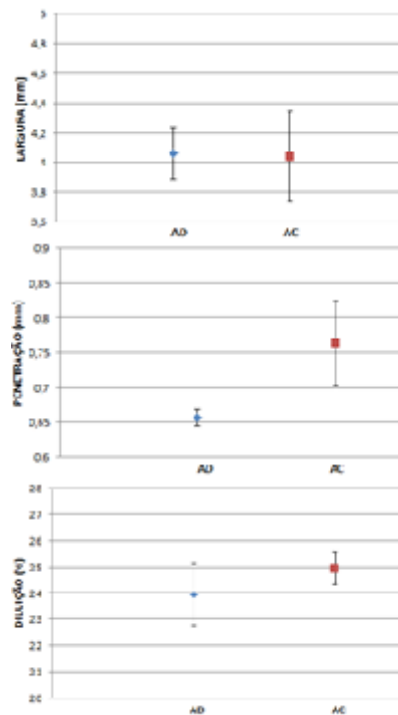


Figura 11. Gráficos com valores de largura do cordão, penetração e diluição.

3.3 Testes de Hipóteses

Foram escolhidos os parâmetros geométricos do cordão de solda para os testes de hipótese entre duas médias: largura do cordão, penetração, diluição. Os testes foram realizados para nível de confiança de 95%, sendo a hipótese nula que as médias para AD e AC são iguais e a hipótese alternativa de que a média com maior valor seria realmente maior que o valor da média mais baixa. Como foram realizadas três medições de cada parâmetro, o coeficiente T foi calculado pela Equação 2 e comparado com os valores tabelados do coeficiente t de Student disponíveis em [7].

$$T = \frac{\bar{X}_1 - \bar{X}_2}{\sqrt{(n_1 - 1)s_1^2 + (n_2 - 1)s_2^2}} \cdot \sqrt{\frac{n_1 \cdot n_2 (n_1 + n_2 - 2)}{n_1 + n_2}}$$

(2)

Onde \bar{X}_1 e \bar{X}_2 são as médias das amostras a serem comparadas no teste, s_1 e s_2 são desvios-padrões amostrais, n_1 e n_2 são os números de amostras de cada condição. Os valores obtidos para T e o resultado do teste de hipóteses para cada parâmetro são mostrados na Tabela 4.

Tabela 4. Resultados do teste de hipóteses.

Parâmetros	\bar{X}_{AD}	S_{AD}	\bar{X}_{AC}	S_{AC}	T	$t_{0,05}$	Resultado
Largura	4,06 mm	0,18	4,04 mm	0,30	0,15	2,92	Não rejeita hipótese nula
Penetração	0,65 mm	0,01	0,76 mm	0,06	3,13	2,92	Rejeita hipótese nula
Diluição	23,95 %	1,17	24,93 %	0,61	1,29	2,92	Não rejeita hipótese nula

Do ponto de vista estatístico, somente a penetração apresentaria variação significativa ao utilizar a alimentação dinâmica, sendo menor que a penetração do cordão obtido com alimentação convencional. Com a alimentação dinâmica, a largura do cordão apresentou aumento de 0,2 mm e a diluição apresentou uma diminuição de 1%, diferença não significativa de acordo com o teste de hipóteses. Logo, o uso da oscilação de arame nas condições ensaiadas não apresentou uma alteração considerável nas características do cordão medidas, não sendo identificado real benefício para aplicação na condição ensaiada.

4. Conclusões

Com base nos ensaios e as análises realizadas no presente trabalho, concluiu-se que o uso da do movimento de avanço e recuo de arame no processo TIG, denominado no presente trabalho como alimentação dinâmica, gera oscilação na poça de fusão facilmente perceptível em filmagens com câmera de alta velocidade, tal oscilação não observada em filmagens no processo com alimentação contínua. Segundo fabricante, essa oscilação tornaria esse processo benéfico para a soldagem em condições em que se há tendência a defeitos por excesso de porosidades e falta de fusão.

Os cordões obtidos com alimentação dinâmica não apresentaram aspecto superficial e geometria do cordão significativamente diferentes do processo com alimentação contínua, ambos com *hot wire*. As macrografias de não mostram a incidência de defeitos nos cordões obtidos nos ensaios, não podendo se constatar melhora na qualidade dos cordões com uso da alimentação dinâmica.

Através do teste de hipóteses, somente a penetração seria significativamente menor em comparação a alimentação contínua. A diminuição da diluição e o aumento da largura do cordão não foram consideradas estatisticamente significativas. Também foram realizadas aquisições de tensão e quantificação da potência média, constatando-se que não há alteração significativa nos mesmos para as condições ensaiadas. Logo, o uso da oscilação do arame na frequência de 18Hz não se mostrou como uma técnica que gera alterações significativas no resultado da soldagem de aço-carbono na posição plana com o processo TIG *hot wire*.

Os resultados obtidos nesse trabalho indicam que para as condições testadas, o uso de equipamentos que possibilitam o avanço e recuo do arame não é interessante, devido ao maior custo dos mesmos. Entretanto, o estudo da aplicação desses equipamentos para soldagem de aços inoxidáveis e superligas resistentes à corrosão ainda se faz necessário, a fim de verificar se o processo apresenta reais benefícios para aplicação de revestimento com esses materiais. Verificação de vantagens citadas pelos fabricantes, como aumento de produção do TIG com alimentação dinâmica em relação ao convencional, e testes em soldagem nas posições vertical e sobrecabeça, também podem ser consideradas como perspectivas futuras.

5. Referências Bibliográficas

- [1] GERKEN, J.M. Gas Tungsten Arc Welding. James F. Lincoln Arc Welding Foundation. p 42 .
- [2] CIRINO, L. M. Estudos dos Efeitos da Polaridade na Soldagem com Corrente Contínua e Alternada pelos Processos TIG e MIG/MAG: 2009. Dissertação (Mestrado) – Departamento de Engenharia Mecânica, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis.
- [3] AMERICAN WELDING SOCIETY, Welding Handbook, v.2, 8^a Ed., 1987, Miami.
- [4] EWM Group. <<https://www.ewm-group.com/en/service/news/458-tigspeed.html>>. Acesso em: 22 agosto 2016.

- [5] WILSON, M. TIP TIG: new technology for welding. In: Industrial Robot: Na International Journal. 2007. ISSN 0143-991X. DOI 10.1108/01439910710832057. p. 462-466.
- [6] TIP TIG... The evolution of TIG. <<http://tiptig.businesscatalyst.com/tiptig-benefits/>>. Acesso em: 23 agosto 2016.
- [7] MONTGOMERY, D.C.; RUNGER, G. C. Estatística Aplicada e Probabilidade para Engenheiros. 4ª Ed. LTC. 2009. P. 445.