

Avaliação de procedimentos de soldagem qualificados ASME para otimizar o desempenho em corrosão de tubulações AISI 304L

L. H. Guilherme^{1,2}, A.C.F. de Jesus³, C.S. Fugivara², A.V. Benedetti²
lh.guilherme@soudap.com.br

¹Soudap Engenharia, Araraquara, São Paulo, Brasil

²Universidade Estadual Paulista (Unesp), Instituto de Química, Araraquara, São Paulo, Brasil

³Universidade de Araraquara (Uniar), Araraquara, São Paulo, Brasil

Resumo

O presente estudo teve por objetivo avaliar diferentes procedimentos de soldagem TIG para otimizar o desempenho de tubulações AISI 304L em aplicações corrosivas. Para tanto, produziu-se amostras soldadas pelo processo TIG onde a variável foi a densidade de corrente elétrica: usou-se corrente constante e corrente no modo pulsado. O comportamento eletroquímico das juntas soldadas foi avaliado pela técnica de polarização potenciodinâmica e pela técnica de reativação potenciocinética de duplo pulso. A caracterização microestrutural e da área exposta à varredura foi realizada por microscopia ótica e microscopia eletrônica de varredura. Os resultados indicaram que o processo TIG pulsado 250 Hz obteve os parâmetros eletroquímicos mais nobres, e atribuiu-se a melhor performance ao associar baixa densidade de corrente média e elevada velocidade de soldagem.

Palavras-chave: Comportamento eletroquímico, minicélula eletroquímica, TIG pulsado, tubulação AISI 304L, processos assépticos.

INTRODUÇÃO

Tubulação industrial é uma parte fundamental para processos químicos de transformação e há aplicações com alta exigência sob requisito de resistência à corrosão e assepsia nos mais variados segmentos (farmacêutico, químico, petroquímico, alimentício, bebidas, biotecnologia) ⁽¹⁻²⁾.

Uma especificação de procedimento de soldagem (EPS) define uma ampla faixa de ajuste para os parâmetros de soldagem TIG de tubulações, onde o foco tem sido a resistência mecânica da junta soldada. No entanto, a configuração do procedimento de soldagem gera a história térmica a ser aplicada na junta soldada, onde o ciclo térmico, a repartição térmica e as linhas isotermas definirão o comportamento no que se refere a solidificação e precipitação de fases na junta soldada e, conseqüentemente, seu comportamento eletroquímico ⁽³⁻⁶⁾.

Para contribuir com a literatura nessa direção, o presente trabalho teve por objetivo avaliar procedimentos de soldagem TIG com corrente constante e no modo pulsado sob requisitos de resistência à corrosão. Para tanto, técnicas eletroquímicas usando uma minicélula foram utilizadas para avaliar a resistência à corrosão da junta soldada, e microscopia ótica e eletrônica de varredura foram conduzidas para avaliar a microestrutura da junta soldada. Os parâmetros de soldagem foram obtidos a partir de especificações de procedimentos de soldagem (EPS) qualificados segundo ASME seção IX.

MATERIAIS E MÉTODOS

O metal de base usado foi o tubo de aço inoxidável AISI 304L padrão OD polido internamente para aplicação asséptica com diâmetro externo de seis (6) polegadas e espessura de parede de 2.0 mm. O metal de solda foi obtido pela fusão causada pelo arco elétrico das partes metálicas a serem unidas (metal de base), sem a deposição de metal de solda, operação denominada autógena. A Tabela 1 mostra a composição química do metal de base de acordo com o certificado de qualidade do fabricante.

Tabela 1. Composição química do tubo OD AISI 304L.

Amostra	Elementos (% em peso)										
	C	Cr	Ni	Mo	Mn	Si	P	S	Cu	Ti	Fe
AISI304L	0,02	18,12	8,00	0,085	1,14	0,41	0,031	0,002	0,1932	0,0035	Bal.

A indústria metal-mecânica utiliza amplamente os tubos de aço inoxidável padrão OD de parede fina na interligação de equipamentos de processo, e sua montagem normalmente é feita pela técnica popularmente denominada como “bocal colado”. Para esse estudo a preparação das amostras se deu pelo ajuste mecânico da face do tubo por uma máquina faceadora de tubos AXXAIR DC65, com posterior montagem das partes de tubo a serem soldadas em uma junta de topo sem abertura

(Figura 1). Um cuidadoso ponteamto foi realizado em oito pontos distribuídos pelo perímetro do tubo sem que houvesse a penetração do ponto de solda (pré-montagem pela fusão da superfície externa), utilizando arame AWS ER308L diâmetro 1.2 mm.

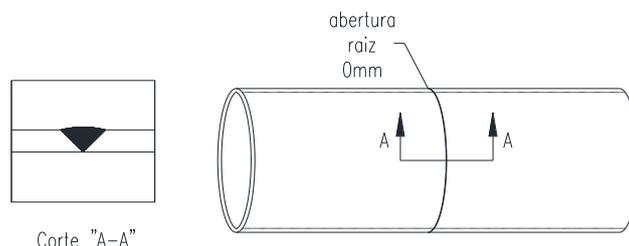


Figura 1. Desenho esquemático de preparação do corpo de prova.

A soldagem das amostras foi realizada por quatro (4) distintos procedimentos de soldagem, conforme descrito abaixo e parâmetros apresentados na Tabela 2:

- (1) Soldagem TIG corrente constante: Aplicação de corrente contínua e polaridade direta para um ajuste de corrente constante (75 A).
- (2) Soldagem TIG pulsado 1 Hz: Aplicação de corrente modo pulsado e forma de onda de 50% entre a corrente de pico e a corrente de base. Para esse procedimento usou-se a frequência de pulso de 1 Hz.
- (3) Soldagem TIG pulsado 40 Hz: Semelhante ao procedimento descrito em (2), com alteração da frequência de pulso para 40 Hz.
- (4) Soldagem TIG pulsado 40 Hz: Semelhante ao procedimento descrito em (2), com alteração da frequência de pulso para 250 Hz.

Tabela 2. Parâmetros de soldagem TIG.

Procedimento de soldagem	Corrente de base (A)	Corrent de pico (A)	Frequência de pulso / onda	Tensão (V)	Velocidade de soldagem (mm/min)	Heat input (KJ mm ⁻¹)
TIG corrente constante	75±1		n.a.	12.2±1	131.93	0.42
TIG pulsado 1 Hz	20±1	85±1	1 / 0,5	12.1±1	59.62	0.64
TIG pulsado 40 Hz	20±1	85±1	40 / 0,5	12.1±1	63.65	0.60
TIG pulsado 250 Hz	20±1	85±1	250 / 0,5	12.1±1	96.71	0.39

Distância bico de contato-peça (DBCP): 10±1 mm.

Gás de proteção / Vazão / Polaridade: 99.9% Ar / 15 L min⁻¹ / CCPD(-).

Para o procedimento de soldagem TIG pulsado a corrente média (I_m) é a média ponderada das correntes de pulso e de base, assumindo-se um formato de onda regular (50%), expresso pela equação A. Sendo que I_m pode ser, para efeito de análise, comparada à corrente média de soldagem do procedimento TIG corrente constante. O controle da transferência metálica é dado pela relação $I_p \times t_p$, uma vez

que o fator governante para a coalescência dos metais no modo pulsado está relacionado à energia gasta durante o pulso (proporcional ao produto da amplitude da corrente de pulso e pela sua duração). O aporte térmico foi calculado de acordo com a definição do código ASME seção IX exposta pela equação B ⁽⁷⁾.

$$I_m = \frac{(I_p t_p + I_b t_b)}{(t_p + t_b)} \quad (A)$$

Onde: I_m : corrente média de soldagem; I_p : corrente de pulso; I_b : corrente de base; t_p : tempos de pulso; t_b : tempos de base.

$$E = \frac{A \cdot V}{V_s} \quad (B)$$

Onde: E: aporte térmico; A: densidade de corrente; V: tensão do arco elétrico; V_s : velocidade media de soldagem.

A caracterização microestrutural e os ensaios eletroquímicos foram realizados através da vista transversal da solda conforme corte AA' da Figura 1. Para tanto, as amostras foram embutidas em resina epoxy, lixadas e polidas conforme segue: (a) para microscopia ótica (MO) e microscopia electronica de varredura (MEV) conduziu-se o lixamento até a lixa 2000 grit e o polimento em solução com pasta de diamante em suspensão com granulometria de 6 μm , 3 μm e 1 μm ; (b) para os ensaios eletroquímicos o lixamento foi conduzido até a lixa 2000 grit.

A análise microestrutural por MO foi obtida utilizando-se o microscópio metalográfico trinocular XJM 902, onde as amostras tiveram a microestrutura revelada através do uso de solução água régia, e no MEV utilizou-se da técnica de elétrons retroespalhados sem ataque.

Para os ensaios eletroquímicos foi utilizada uma minicélula construída pelo grupo de pesquisa ⁽⁸⁻⁹⁾ com uma área exposta a varredura de $2,5 \times 10^{-2} \text{ cm}^2$ (\varnothing 1.7 mm). Com o uso de um potenciostato EG&G mod. Princeton Applied Reserach 283 (software Power Suite) aplicou-se duas técnicas eletroquímicas para avaliar o comportamento da junta soldada: (i) técnica de polarização potenciodinâmica; (ii) técnica de reativação potenciocinética de duplo ciclo (DL-EPR). As microrregiões de interesse foram a linha de fusão e a zona fundida da solda.

Conduziu-se a polarização potenciodinâmica em 3.5% NaCl a 25 °C, onde o potencial de pite (E_{pit}) foi o principal parâmetro eletroquímico de interesse. As

medidas foram realizadas a partir de -50 mV vs. E_{OCP} até +1000 mV ou até obter o potencial de pite (E_{pit}), com velocidade de varredura de 1 mV/s, em triplicata.

Nos testes DL-EPR foram usados a solução de 0.5M H_2SO_4 + 0.01M KSCN a temperatura de 25 °C, que teve como parâmetro eletroquímico de interesse o grau de sintetização (DOS – degree of sensitization). O teste foi configurado para varrer a faixa de potencial de -0.5 V à +0.2 V, retornando ao potencial -0.5 V, com taxa de varredura de 1.67 mV/s, em triplicata. Inspeção por MO da área molhada (área exposta à varredura) foi feita após cada teste DL-EPR.

RESULTADOS E DISCUSSÃO

A microestrutura do metal de base AISI 304L é tipicamente austenítica, contudo, a zona fundida da solda possui fração volumétrica de ferrita-delta (δ), importante microconstituente para se evitar a trinca de solidificação⁽⁶⁾, e o teor de ferrita- δ de cada amostra soldada é mostrado na Tabela 3.

Tabela 3. Teor de ferrita- δ medido por ferritoscópio.

Soldagem TIG	δ (%)
Corrente constante 90 A	11.1±0.3
Pulsado 1 Hz	10.6±0.2
Pulsado 40 Hz	10.4±0.3
Pulsado 250 Hz	9.3±0.2

A caracterização microestrutural por microscopia ótica (MO) indicou que a amostra soldada pelo processo TIG corrente constante obteve a partir de linha de fusão, ao ser fundido o metal de base pelo arco elétrico, uma solidificação com a presença dos microconstituintes γ e δ . A solidificação incia-se pela porção do metal de base fundido com presença de fase líquida nos contornos de grãos da ZTA ⁽⁵⁾, e foi observado a morfologia de ferrita acicular (Fig. 2.a) a partir da linha de fusão e, devido a menor taxa de resfriamento no centro do cordão de solda, ocorreu o crescimento da ferrita com morfologia dendrítica na região central da zona fundida da solda (Fig. 2.b). Importante ressaltar uma relevante coesão para um crescimento epitaxial entre a ferrita acicular e a ferrita dentrítica, fator que tende a maximizar fenômenos como crescimento de grão e microsegregação.

As amostras soldadas pelo processo TIG pulsado (independente da frequência de pulso) apresentam diferenças microestruturais principalmente na microrregião da linha de fusão. A transferência metálica que utilizou frequência de 1 Hz apresentou a

maior coesão entre os grãos equiaxiais do metal de base, a ferrita acicular nucleada na microrregião da linha de fusão e a ferrita na forma dendrítica que nucleou e cresceu em direção ao centro da zona fundida da solda. Essa coesão foi atribuída a mais baixa velocidade média de soldagem e velocidade de solidificação, uma vez que com o aumentar da frequência de pulsação (40 Hz e 250 Hz) e consequente aumento da velocidade de soldagem, o crescimento epitaxial se tornou menos regular e passou a ser observado um crescimento competitivo entre grãos da linha de fusão (Fig. 2.d para 40 Hz e Fig. 2.e para 250 Hz). O centro da zona fundida das soldas TIG pulsado solidificaram predominantemente com ferrita de morfologia dendrítica (Fig. 2.f).

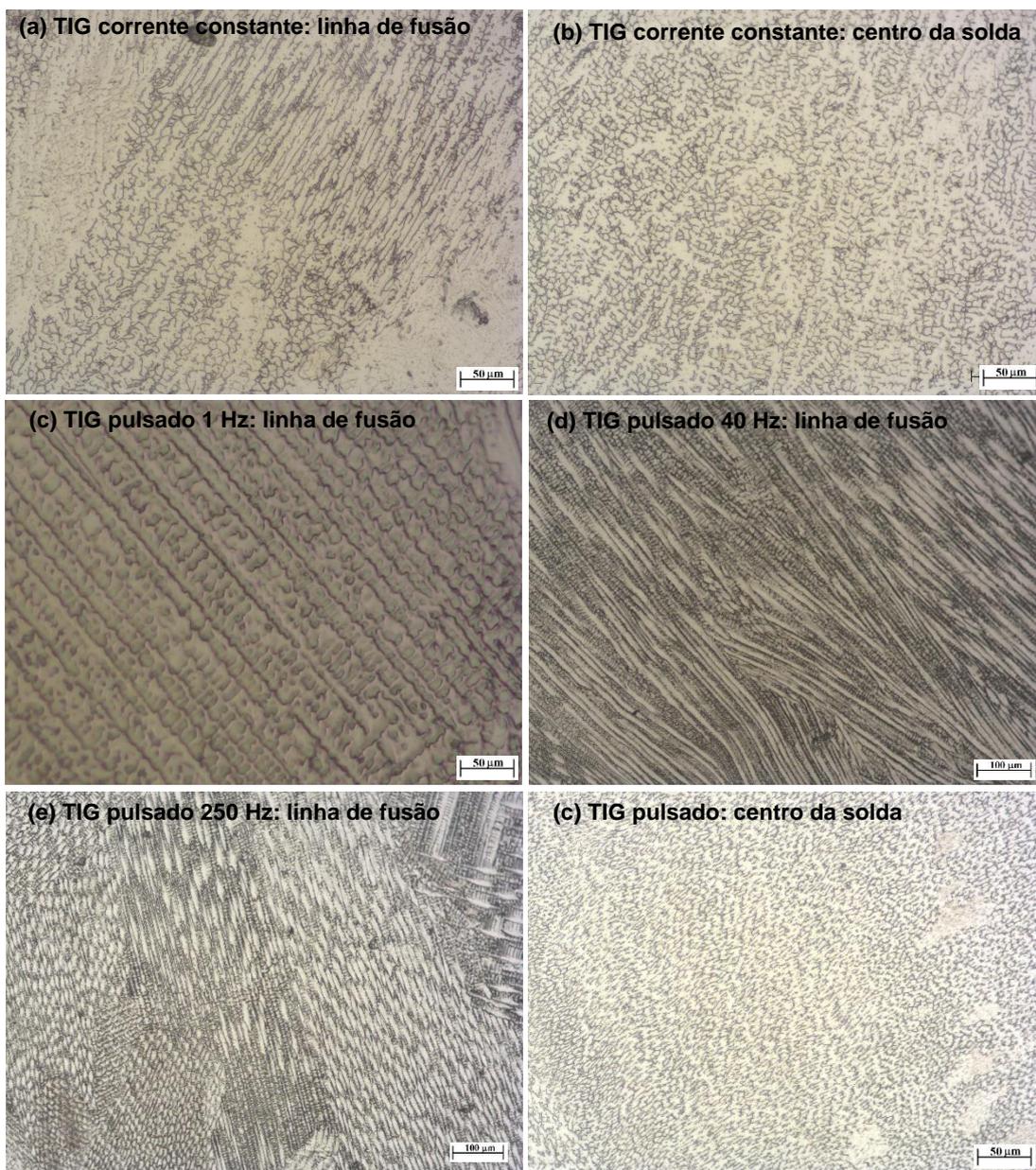
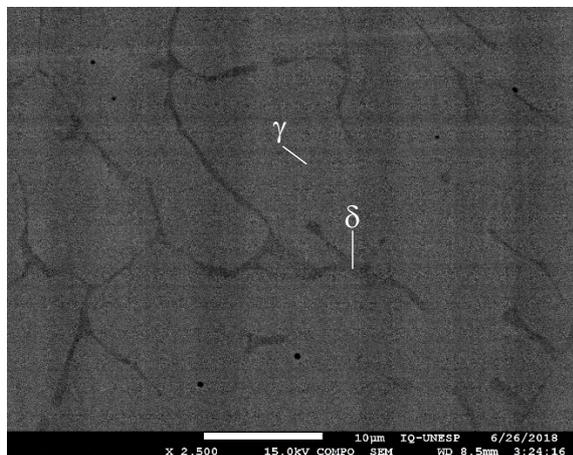


Figura 2. Microscopia ótica das juntas soldadas.

A morfologia e composição química das fases γ e δ foram investigadas com o uso do MEV no modo elétrons retroespalhados (BSE) e a microanálise química por EDS, conforme mostra a Figura 3.



	<i>Cr</i>	<i>Mn</i>	<i>Fe</i>	<i>Ni</i>
<i>Fase α</i>	25.49	1.53	67.67	5.31
<i>Fase γ</i>	19.07	1.97	70.32	8.64

Figura 3. Morfologia e composição química típica das fases austenita e ferrita- δ .

A Figura 4 apresenta as curvas de polarização potenciodinâmica em 3.5% NaCl das amostras soldadas, e a Figura 5 destaca o potencial de pite de cada amostra / microrregião na forma de um histograma. Sob o critério de potencial de pite, atribuiu-se a melhor performance nos testes de polarização potenciodinâmica em 3.5% NaCl para a amostra soldada pelo processo TIG pulsado 1 Hz. A literatura já esclareceu que a nucleação de pites tende a ocorrer preferencialmente na interface γ / α em uma junta soldada de aço inoxidável com microestrutura bifásica ⁽³⁻⁴⁾. Portanto, entende-se que a microestrutura da zona fundida obtida pelo procedimento de soldagem de menor velocidade de deslocamento resultou em uma interface γ / α de maior espaçamento (relativamente aos outros procedimentos de soldagem) como consequência de uma solidificação de menor velocidade e uma poça de fusão calma (visto a menor frequência de bombardeamento de elétrons ao usar 1 Hz). Um importante ponto a ser destacado é a elevada densidade de corrente observada durante o comportamento anódico passivo para essa EPS (10^{-5} e 10^{-4}), pois isso pode implicar em degradação preferencial de fase (ferrita) previamente ao pite conforme já mencionado na literatura para juntas soldadas de aço inoxidável austeníticos ⁽³⁾. Os procedimentos de soldagem com frequência de 40 Hz e 250 Hz apresentaram desempenho relativamente iguais sob critério de potencial de pite para as microrregiões avaliadas. Contudo, o procedimento de soldagem TIG pulsado

250 Hz obteve uma performance para a linha de fusão que demonstrou menores densidades de corrente durante o comportamento anódico passivo, fator que é positivo e indica portanto maior nobreza desse procedimento do que o obtido pelo TIG pulsado 40 Hz. O procedimento de soldagem TIG corrente constante apresentou o menor desempenho relativo, fator atribuído à história térmica da junta soldada. Esse procedimento caracteriza-se pelo maior aporte térmico, maior velocidade de soldagem e elevada taxa de resfriamento; condições que afetam a diluição, microsegregação e crescimento de fases.

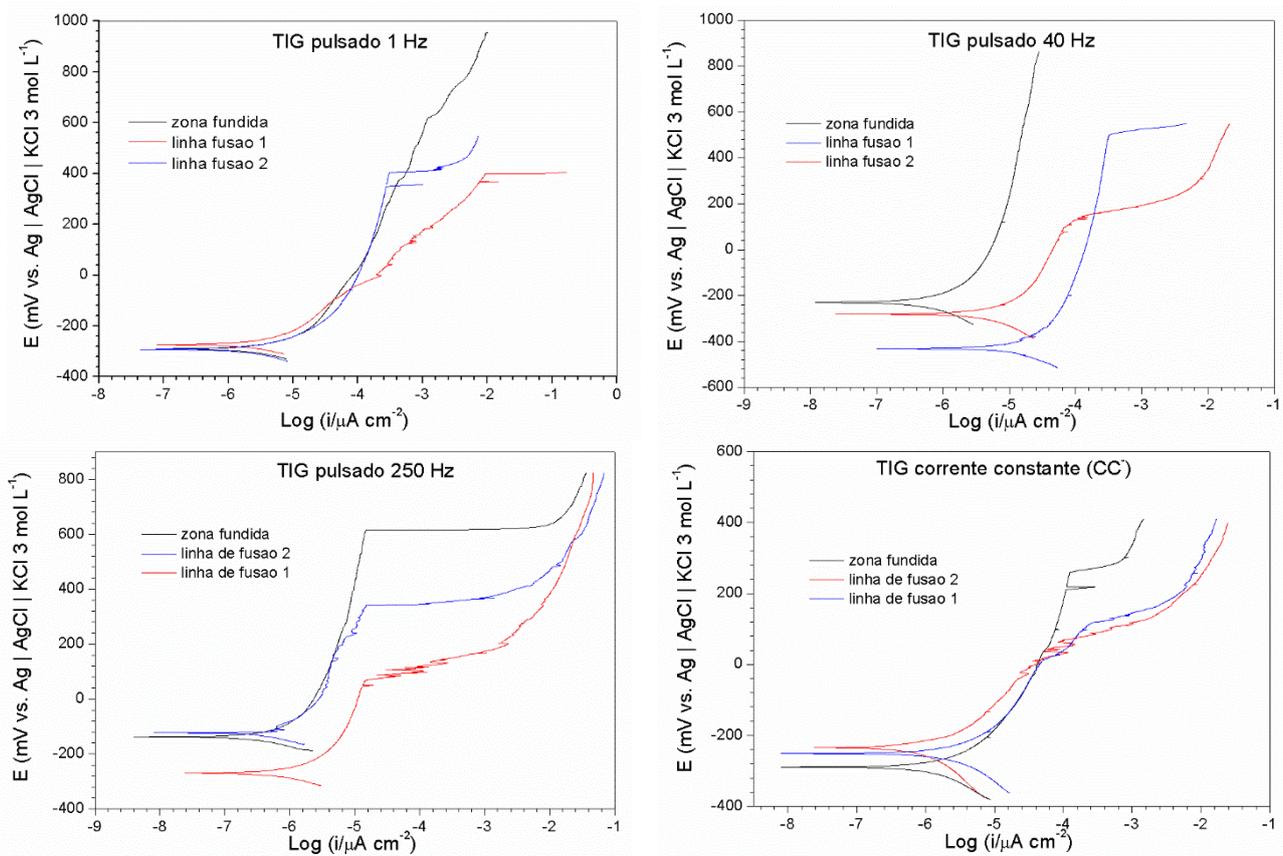


Figura 4. Curvas de polarização potenciodinâmica em 3.5% NaCl.

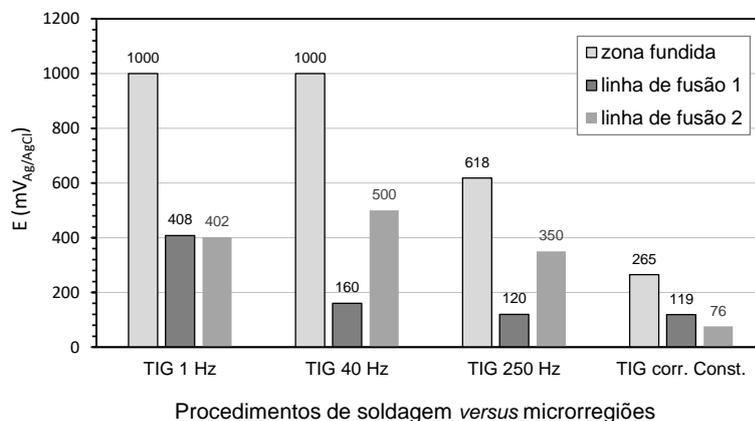


Figura 5. Histograma do potencial de pite (E_{pit}).

Os testes DL-EPR tiveram como objetivo mensurar o grau de sensitização (DOS - degree of sensitization) de cada microrregião (linha de fusão e zona fundida da solda) das juntas soldadas utilizando-se uma minicélula eletroquímica. Os resultados demonstraram que o procedimento de soldagem TIG pulsado 250 Hz obteve os mais nobres resultados para a linha de fusão (DOS=5.94%) e zona fundida da solda (DOS=0.14%), indicando menor ocorrência de microrregiões enriquecidas em Cr em função da história térmica causada pela soldagem. O procedimento de soldagem TIG pulsado 1 Hz obteve índices DOS pouco superiores quando comparado ao TIG pulsado 250 Hz, contudo, deve-se destacar que o pico de dissolução da ferrita atingiu altíssimos valores (120 mA/cm²) e, após esse pico, a microrregião manteve uma alta densidade de corrente, o que pode ser associado a um processo seletivo de corrosão durante o comportamento anódico passivo. Os procedimentos de soldagem TIG corrente constante e TIG pulsado 40 Hz apresentaram desempenho semelhante com pico de dissolução da ferrita na faixa de 40-50 mA/cm² e DOS da microrregião linha de fusão em elevados índices na faixa de 18-26%. O histograma dos índices DOS e as curvas dos testes DL-EPR são apresentados nas Figuras 6 e 7, respectivamente.

Observou-se a área exposta à varredura por microscopia ótica após cada teste DL-EPR e, de modo geral, a fase ferrita foi preferencialmente atacada, como mostra a Figura 8. O pico de dissolução da ferrita causou sua corrosão preferencial revelando a morfologia da fase. Na Figura 8.a é mostrado parcialmente a área molhada (área exposta à varredura) de um teste realizado na microrregião linha de fusão, onde observou-se a ferrita acicular na extremidade esquerda da figura e, ao observar o centro da área molhada, nota-se a ferrita na forma de dendrita (Fig. 8.d).

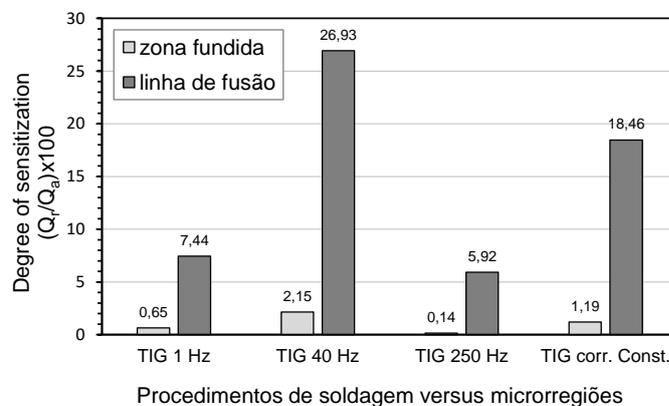


Figura 6. Histograma do grau de sensitização (DOS).

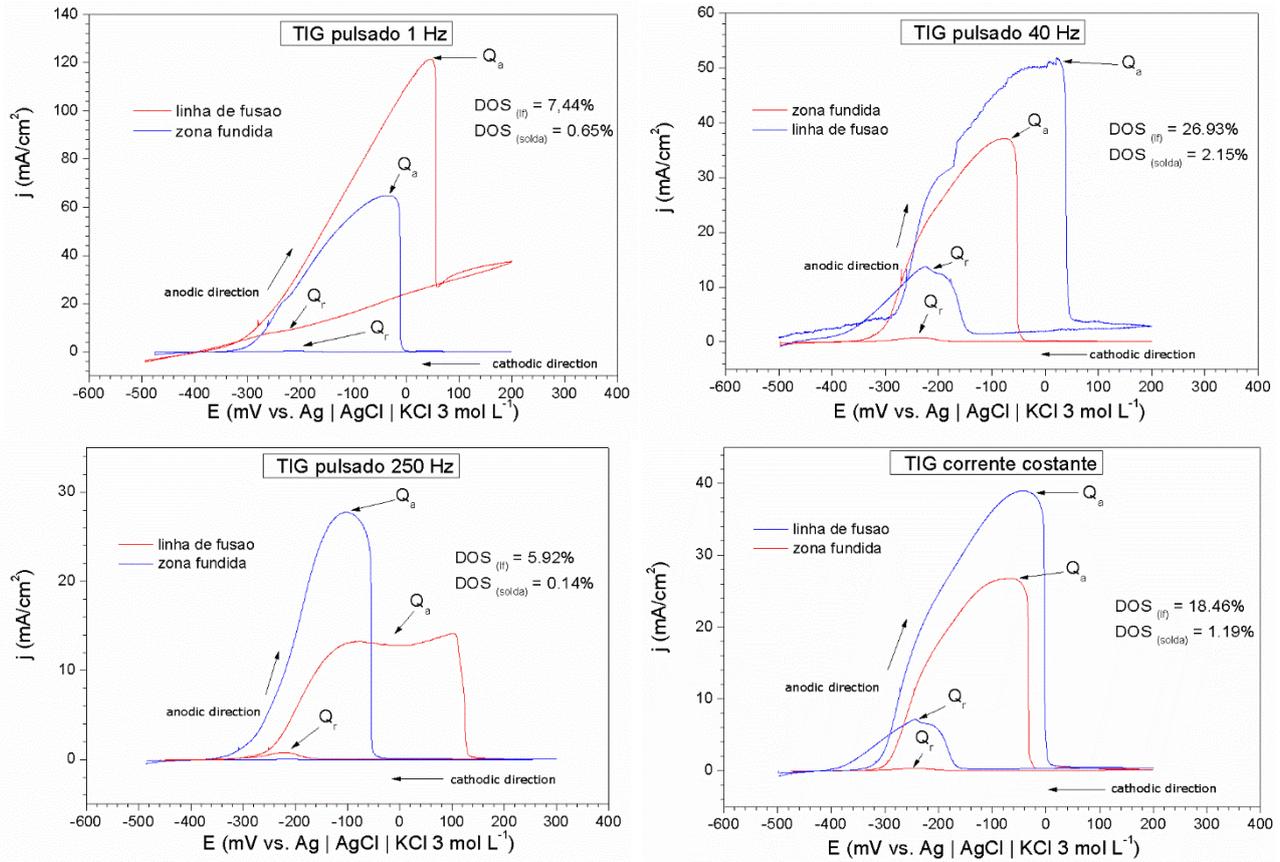


Figura 7. Curvas DL-EPR obtidas na solução 0.5 M H₂SO₄ + 0.01 M KSCN.

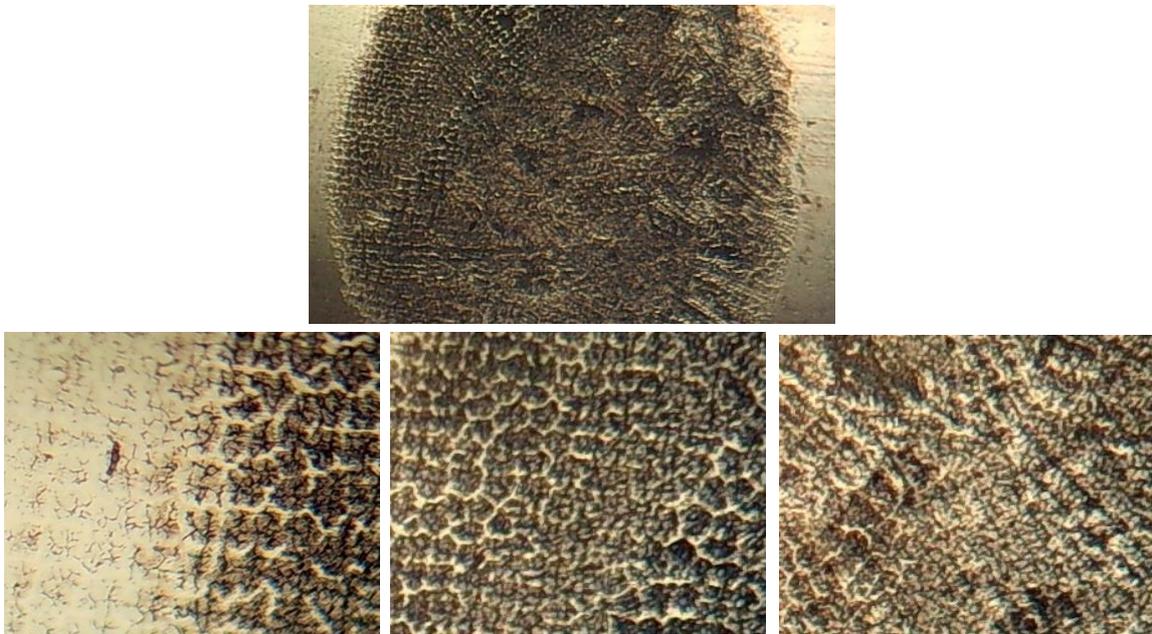


Figura 8. Micrografia obtida após testes DL-EPR em 0.5 M H₂SO₄ + 0.01 M KSCN observando em (a) área exposta à veredura da linha de fusão, (b) fronteira do microcapilar, (c) microrregião da interface metal de base / zona fundida onde os grãos apresentaram crescimento celular, (d) microrregião onde observou-se crescimento dendrítico da fase ferrita- δ .

CONCLUSÕES

Com base nos resultados pode-se concluir que:

- A soldagem TIG pulsado com frequência de pulsação de 250 Hz resultou em uma junta soldada com melhor comportamento eletroquímico diante dos resultados obtidos nos ensaios de polarização potenciodinâmica em solução de 3.5% NaCl e nos ensaios de reativação potenciocinética de duplo ciclo (DL-EPR) na solução de 0.5M H₂SO₄ + 0.01M KSCN.
- O procedimento de soldagem TIG pulsado 1 Hz obteve satisfatórios parâmetros eletroquímicos como E_{pit} e DOS. No entanto, em ambos os testes observou-se que a linha de fusão resultou em elevadas densidade de corrente durante o comportamento anódico passivo, fator que comprometeu a qualidade de seus resultados. A hipótese tem como base a menor velocidade de soldagem obtida pela frequência de pulsação de 1 Hz (~65 mm/min), afetando negativamente as linhas isotermas e conseqüentemente a metalúrgia da junta soldada.
- A escolha da frequência de pulsação para um procedimento de soldagem TIG pulsado deve considerar a velocidade de soldagem, evitando um lento deslocamento para que se obtenha uma linha de fusão / ZTA de maior resistência à corrosão.
- A soldagem TIG corrente constante se refere ao processo mais comumente empregado pela indústria e, segundo os resultados aqui apresentados, há disponível no mercado nacional equipamentos de soldagem que permitem otimizar a qualidade das soldas que são empregadas em meio asséptico ou corrosivo.

AGRADECIMENTOS

Os autores gostariam de agradecer a Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de São Paulo (FAPESP) pelo auxílio à pesquisa processo nº. 2016/08439-0 e a bolsa de treinamento técnico processo nº. 2018/02514-5, e também a empresa Soudap Engenharia pelo fornecimento das amostras soldadas.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- (1) TELLES, P.C.S.T. **Vasos de pressão**. 2nded. Rio de Janeiro: LTC, 2005.
- (2) TELLES, P.C.S.T. **Tubulações industriais: materiais, projeto e desenho**. 10nded. Rio de Janeiro: LTC, 2012.
- (3) GUILHERME, L.H. **Influência da fase sigma na corrosão em microrregiões de juntas soldadas por processos MIG do aço inoxidável AISI 316L**. 2017. 198p. Tese (Doutorado em Engenharia de Materiais) – Escola de Engenharia de São Carlos – Universidade de São Paulo, EESC/USP, São Carlos.
- (4) MAGNABOSCO, R. **Influência da microestrutura no comportamento eletroquímico do aço inoxidável UNS S31803 (SAF 2205)**. 2001. 181 p. Tese (Doutorado) – Escola Politécnica (POLI), Departamento de Engenharia Metalúrgica e de Materiais, Universidade de São Paulo (USP).
- (5) WAINER, E.; BRANDI, S.D.; MELLO, F.D.H. **Soldagem: processos e metalurgia**. São Paulo: Edgar Blüncher, 1992.
- (6) LIPPOLD, J.C.; KOTECKI, D.J. **Welding metallurgy and weldability of stainless steels**. Nova Jersey: John Wiley, 2005.
- (7) THE AMERICAN SOCIETY OF MECHANICAL ENGINEERS. ASME Seção IX: boiler and pressure vessel code - **welding and brazing qualifications** - international code. New York, 2010a.
- (8) GONÇALVES, H. M. **Estudo do comportamento eletroquímico localizado nas diferentes regiões da liga AA2024-T3/AA7475-T651 soldada por FSW**. 2018. 131p. Tese (doutorado em Química) – Instituto de Química de Araraquara – Universidade Estadual Paulista, IQ/UNESP, Araraquara.
- (9) UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO (USP), SÃO CARLOS-SP, Luis Henrique Guilherme et. al. **Microcélula eletroquímica para ensaios de corrosão e sistema de medição de corrosão em microrregiões**. INPI nº. BR-10-2014-012647-3. Maio 2014.

Assessment of ASME welding procedures qualified to optimizing the corrosion performance of AISI 304L pipeline

ABSTRACT

The aim of this study was assessment different welding procedures specifications TIG to optimizing the pipeline performance AISI 304L for corrosion applicance. Therefore, TIG welded joints were made with application of constant current and pulsed current. Electrochemical behavior of welded joints were assessment by potentiodynamic polarization curves and double loop electrochemical potentiokinetic reactivation test. Optical microscopy and scanning electron microscopy were applied to characterize of microstructure and exposed surface at electrochemical tests. The results show that the 250 Hz pulsed TIG process obtained the noblest electrochemical behavior, and it is correlated to low current setting and high speed of welding.

Key-words: *Electrochemical behavior, electrochemical minicell, TIG pulsed, AISI 304L pipeline, aseptic process.*