

Copyright 2010, ABRACO

Trabalho apresentado durante o INTERCORR 2010, em Fortaleza/CE no mês de maio de 2010.

As informações e opiniões contidas neste trabalho são de exclusiva responsabilidade do(s) autor(es).

Efeito de parâmetros de soldagem na resistência à corrosão intergranular de aço inoxidável com 11 %Cr avaliada pelo método de reativação eletroquímica
Gueder Alves Assumpção¹, Sergio Souto Maior Tavares², Temístocles de Sousa Luz³ e Marcelo Camargo Severo de Macedo³

Abstract

In this work the effect of welding parameters on the resistance to intergranular corrosion of a ferritic stainless steel, 410S with 11 % Cr was evaluated. The material was welded in TIG autogenous (without the addition of material). For all welding conditions, a welding speed of 3.6 mm/s was used. The welding voltage was 14 V. In Condition 1, the welding was performed using pulsed current with a pulse current of 300 A and a background current of 70 A. We used 0.5 s for the pulse current time and 0.4 s for the background current time. This resulted in a pulse frequency of 1.11 Hz and an average current of 198 A in condition 2, the same parameters (voltage, current) was used, changing only the pulse current time (0.4 s) and the background time (0.3 s) generating a pulse frequency of 1.43 Hz and an average current of 201 A. In condition 3, the conventional TIG (without pulse of current) was employed, applying a current of 200 A. Specimens were obtained from cut sections of the regions of the weld metal and heat affected zone, the latter being divided into four regions as distance to the weld metal. The technique of double-loop electrochemical potentiokinetic reactivation (DL-EPR) was used to assess the degree of sensitization with parameter I_r/I_a . The solution used was 0.14 mol/L H_2SO_4 + 0.0025 mol/L KSCN at 25 °C and scan rate of 1.67 mV/s. The metallurgical changes occurring in the in the welding metal and heat affected zones did not increase the degree of sensitization in relation to the base material.

Keywords: 410S ferritic stainless steel, sensitization, DL-EPR, TIG

Resumo

Neste trabalho, foi avaliado o efeito de parâmetros de soldagem, sobre a resistência à corrosão intergranular de um aço inoxidável ferrítico, 410S com 11 % de Cr. O material foi soldado em TIG autógeno (sem a adição de material). Para todas as condições de soldagens, foi utilizada uma velocidade de soldagem de 3,6 mm/s. A tensão de soldagem ficou em 14 V. Na condição 1, a soldagem foi realizada com corrente pulsada com corrente de pulso de 300 A e corrente de base 70 A. Utilizou-se 0,5 s para o tempo de pulso e 0,4 s para o tempo de base. Isso resultou em uma frequência de 1,11 Hz e uma corrente média de 198 A. Na condição 2, foram utilizados os mesmos parâmetros de corrente modificando apenas os tempos de pulso (agora 0,4 s) e de base (agora 0,3 s) gerando uma frequência de 1,43 Hz e uma corrente média de 201 A. Na condição 3, foi empregado o TIG convencional (sem pulsação da corrente), sendo aplicada uma corrente de 200 A. Corpos-de-prova foram

¹ Mestre em Engenharia Mecânica, PPGEM/UFES - IFES

² Doutor – Universidade Federal Fluminense (UFF)

³ Doutor – Universidade Federal do Espírito Santo (UFES)

obtidos a partir de cortes de seções da zona fundida e da zona termicamente afetada, sendo esta última dividida em cinco regiões conforme distância da zona fundida. A técnica de reativação eletroquímica potenciodinâmica na versão ciclo duplo (DL-EPR) foi utilizada para avaliar o grau de sensitização, por meio do parâmetro Ir/Ia. A solução utilizada foi de 0,14 mol/L H₂SO₄ + 0,0025 mol/LSCN à 25°C e velocidade de varredura de 1,67 mV/s. As alterações metalúrgicas ocorridas na zona fundida e zona termicamente afetada pelo calor não aumentaram o grau de sensitização em relação ao material base.

Palavras-chave: aço inoxidável ferrítico 410S, sensitização, DL-EPR, TIG

Introdução

Um fator importante na escolha de um aço inoxidável para uma determinada aplicação é a resistência à corrosão acrescida da resistência mecânica, ductilidade, soldabilidade, custo, entre outros fatores. Embora os aços inoxidáveis austeníticos apresentem melhor combinação entre propriedade mecânica e resistência à corrosão, o custo de fabricação, especialmente pelo preço do níquel é alto. Isso levou ao desenvolvimento e utilização dos aços inoxidáveis ferríticos. (CAMPBELL, 1992; PICKERING, 1976 e 1985). Os aços inoxidáveis são empregados na fabricação de eletrodomésticos, utensílios para cozinha e laboratórios, em aplicações a altas temperaturas, tais como sistema de exaustão e descarga de fumos provenientes da combustão de derivados do petróleo, indústria nuclear, etc. Em diversas destas aplicações, é necessário o uso de operações de soldagem. Os aços inoxidáveis estão sujeitos a vários problemas de corrosão localizada dentre eles podemos citar a corrosão intergranular, que é causada em materiais sensitizados pelo calor dos processos de soldagem ou tratamentos térmicos inadequados.

Após a soldagem é possível a ocorrência de corrosão intergranular, na qual o mecanismo atuante é semelhante ao que ocorre nos aços inoxidáveis austeníticos. O fenômeno responsável pela queda da resistência à corrosão consiste na precipitação de carbonetos de cromo nos contornos de grão, reduzindo os teores de cromo das regiões adjacentes ao contorno de grão. Esta redução na quantidade de cromo da matriz torna o material susceptível à corrosão (FOLKHARD, 1988). Nos aços ferríticos, a faixa de temperatura em que ocorre a precipitação das fases que provocam o empobrecimento em cromo é de 427 °C a 927 °C. O aquecimento acima destas temperaturas provoca dissolução dos carbonetos e nitretos e consequentemente supersaturação da matriz. Com o resfriamento, a solubilidade do carbono e nitrogênio é muito diminuída, provocando precipitação de carbonetos e nitretos. (HENTHORNE, 1972). Entretanto, ainda existe na literatura carência de informações relacionando os parâmetros de soldagem com a queda na resistência à corrosão de aços inoxidáveis ferríticos. Os métodos de avaliação da sensitização podem ser de imersão, como estão descritos, por exemplo, nas normas ASTM A262, para aços austeníticos e ASTM A763, para aços ferríticos. Nos últimos anos, tem-se desenvolvido amplamente o emprego de técnicas eletroquímicas, como alternativas aos ensaios de imersão para avaliar a suscetibilidade à corrosão intergranular de aços inoxidáveis e ligas de níquel. Este método denominado de reativação eletroquímica potenciodinâmica (EPR), tem três versões: o *Single Loop* (SL: ciclo simples), *Double Loop* (DL: ciclo duplo) e o *Simplified* (S: simplificado). As vantagens destes métodos em relação ao de imersão são principalmente o menor tempo de execução, maior economia e precisão. (SEDRIKS, 1996). Neste trabalho, foi avaliado o efeito de parâmetros de soldagem do processo GTAW, sobre a resistência à corrosão intergranular de um aço inoxidável ferrítico 410S com 11 % Cr.

Procedimento Experimental

Foi utilizada neste trabalho uma chapa de aço inoxidável ferrítico, fornecida pelo fabricante com dimensão de (150 x 65 x 6,3) mm³. A composição química está descrita na tabela 1.

O material foi soldado utilizando o processo de soldagem TIG autógeno, sem metal de adição, automático, com o cordão realizado sobre a chapa, portanto não existindo junta, apenas fusão de material e deposição sobre a chapa. A velocidade foi de 3,6 mm/s e a tensão de 14,0 V. Foram utilizadas duas condições de soldagem em corrente pulsada e uma corrente em contínua. Os parâmetros estão descritos na tabela 2.

O cálculo da corrente média (I_m) e energia de soldagem (H) estão descritos nas equações (1) e (2) abaixo:

$$I_m = (I_p * t_p + I_b * t_b) / (t_p + t_b) \quad (1)$$

$$H = \frac{60 * V(I_p * t_p + I_b * t_b)}{V(t_p + t_b)} \quad (2)$$

O processo de soldagem TIG (Tungsten Inert Gas) utiliza um arco elétrico mantido entre um eletrodo não-consumível de tungstênio e a peça a soldar. A proteção de soldagem foi feita pelo gás de proteção argônio.

Microdureza

Foram levantados três perfis de microdureza com carga de 200 g e tempo de 30 s, nas amostras polidas até 1 µm, da região fundida até o metal de base, figura 1. Para tal foi utilizado um microdurômetro marca Pantec modelo HXD – 1000TM. (Laboratório de Tribologia, Corrosão e Materiais - UFES).

Corte das amostras

As amostras foram retiradas de cortes longitudinais do material soldado, conforme figura 2a, nas posições: centro da zona fundida, A1, divisão entre zona fundida e zona termicamente afetada (ZTA), A2, e distanciados 2 mm, 4 mm e 6 mm do início da zona termicamente afetada, A3, A4, A5 respectivamente. Foi retirada amostra com 2 mm de espessura e 36 mm² de área aproximadamente.

Por se tratar de solda que proporciona apenas a fusão do metal de base, também foram retiradas amostras da parte superior da zona fundida, figura 2b.

Grau de sensitização

A avaliação da susceptibilidade à corrosão intergranular foi verificada por meio do ensaio de reativação eletroquímica potenciodinâmica, na versão ciclo duplo (DL-EPR). Para isto, utilizou-se o potenciostato µAutolab Type III (Laboratório de metalografia e tratamento térmico – LABMETT / UFF), para análise das amostras retiradas com cortes transversais, e o potenciostato digital Omnimetra, Modelo PG-39 (Laboratório de Corrosão, Ifes), para as amostras com corte superior. O sistema opera com três eletrodos, o eletrodo de trabalho (metal a ser testado), um eletrodo auxiliar (eletrodo de platina) e um eletrodo de referência (eletrodo de calomelano saturado ECS).

As amostras foram embutidas em resina polimérica e lixadas até #400, a área ensaiada foi limitada com esmalte para evitar a corrosão por frestas. A área exposta à solução foi de aproximadamente 30 mm². A concentração da solução eletrolítica selecionada, por ser

considerada mais adequada, foi a de 0,14 mol/L H₂SO₄ + 0,0025 mol/L KSCN. Outras concentrações foram avaliadas, porém a selecionada permitiu maior correlação com a microestrutura.

As amostras foram anodicamente polarizadas a partir do potencial de corrosão aproximadamente - 600 mV_{SCE} até 400 mV_{ECS} com uma velocidade de varredura de 1,67 mV/s. Nesta polarização, ocorreu a dissolução ativa formando a camada passiva. Atingindo 400 mV_{ECS} a polarização foi revertida com mesma taxa e o ensaio foi finalizado no potencial de corrosão. A varredura reversa induziu a quebra da camada passiva nas regiões empobrecidas de cromo. Cada amostra foi ensaiada no mínimo três vezes. Foi mensurado o grau de sensitização (I_r/I_a), relação entre a densidade de corrente máxima na varredura anódica (I_a) e reversa (I_r), sendo tais valores medidos diretamente na curva, figura 3.

As amostras selecionadas foram polidas até o acabamento superficial de 1 µm, e analisadas antes e depois do ataque de corrosão. Antes do ataque de corrosão o ataque utilizado foi o Vilella (1 g de ácido pícrico + 100 ml de etanol + 5 ml de HCl) e as demais com ataque em ácido oxálico.

Após o ensaio de corrosão, as amostras foram observadas em microscópio óptico e eletrônico de varredura (MEV).

Resultados e Discussão

Avaliação do metal base

Inicialmente são apresentadas as microestruturas ópticas do aço tal como recebido que apresenta estrutura ferrítica, figura 4. O ataque metalográfico utilizado para revelar a microestrutura foi o Vilella.

O metal base apresentou estrutura direcionada menos atacada, figura 4, esta é conhecida como “bamboo shape” e também foi observada por LUZ (2009), para o material tratado em forno tipo contínuo.

Ainda no material de base, foi observada a presença de alguns precipitados nos contornos de grão, conforme a Figura 4c e 4d. O mesmo foi obtido por LUZ (2009), para o mesmo material. A presença destes precipitados evidencia um metal de base já sensitizado e passível de sofrer corrosão intergranular dependendo de sua aplicação. O grau de sensitização para o metal base avaliado pelo parâmetro I_r/I_a obtido por meio do ensaio DL-EPR apresentou um valor médio de $0,44 \pm 0,02$, figura 3a. A análise da amostra após ensaio mostra corrosão acentuada nos contornos de grão, figura 5.

Avaliação do material após soldagem

Microdureza

Era esperado que os processos pulsados melhorassem a dureza por meio do refino da microestrutura. As vantagens metalúrgicas da soldagem a arco pulsado são frequentemente relatadas na literatura, estas incluem refino de grão na zona fundida, redução da largura da zona termicamente afetada, menos distorção, controle da segregação, redução da sensibilidade a trinca a quente e redução da tensão residual (KOU, 1986; TSENG 1971; MADUSUDHAN, 1997). KUMAR (2008) obteve estrutura de grão refinado para soldas realizadas com corrente pulsada quando comparadas com corrente contínua. MADUSUDHAN (1997) obteve uma dureza superior nas soldas com corrente pulsada, em comparação com as juntas soldadas contínuas. Ele atribuiu, como possível causa do fenômeno, o refinamento da estrutura de grãos e baixa segregação de fases. Assim, a utilização do TIG pulsado melhorou as propriedades mecânicas da solda, devido ao

refinamento de grão, quando comparado com a soldagem com corrente contínua. O mesmo ocorreu neste trabalho, se forem comparadas os perfis de microdureza obtidas nas condições de soldagem 1, 2 e 3.

As três condições apresentaram valores da ordem de 300 HV na região da Zona Fundida, figura 6, este valor segundo LUZ (2009), seria devido à formação de martensita e refino de grão. Os valores obtidos na ZTA são da mesma ordem dos resultados de LUZ (2009) que estudou o mesmo aço, porém num processo de alimentação contínua (GMAW) com energia de soldagem de 14 kJ/cm. Segundo, LUZ (2009), a ZTA tem formação de martensita na região de grão grosseiro. LAKSHMINARAYANAN (2009), estudando o efeito do processo de soldagem autógeno na resistência mecânica e na tenacidade ao impacto de juntas soldadas de aço inoxidável ferrítico, obteve uma resistência mecânica do processo a corrente pulsada 5 % maior que para o contínuo, mesmo sendo a energia do processo contínuo 17 % maior que a do pulsado. Comparando os dois processos por corrente pulsada, a condição de soldagem 2, com maior frequência, apresentou valores de microdureza ligeiramente superiores que o da condição 1.

A partir da literatura (TSENG, 1971) e trabalhos realizados (KUMAR, 2007; KUMAR, 2008), os parâmetros mais importantes e que possuem maior influência sobre o refinamento de grão da solda para o processo de soldagem pulsada foram identificados. Estes são: corrente de pulso, corrente de base e frequência de pulso. KUMAR (2007), estudando a influência dos parâmetros de soldagem do GTAW pulsado nas propriedades mecânicas de uma liga de alumínio AA 6061, verificou ser o pico de corrente e a frequência de pulso diretamente proporcionais à resistência mecânica, enquanto a corrente de base e o tempo de pulso foram inversamente proporcionais. O aumento dos dois primeiros parâmetros, mantendo os demais constantes, provocou o refino de grão da estrutura.

KUMAR (2008) investigou a otimização dos parâmetros de soldagem para o processo GTAW pulsado na propriedade mecânica de ligas de alumínio AA5456. Ele avaliou os parâmetros, corrente de pulso, frequência e corrente de base, para isso ele variou cada um desses parâmetros individualmente enquanto os demais foram mantidos constantes. Os resultados mostraram que a corrente de pulso e frequência são diretamente proporcionais à resistência mecânica, tensão de escoamento e microdureza, enquanto a corrente de base é inversamente proporcional. A condição de corrente pulsada com maior frequência apresentou maior profundidade da ZTA que a condição pulsada de menor frequência, entretanto não houve redução na largura da ZTA, apenas um perfil mais estreito. A solda com corrente contínua gerou um perfil mais uniforme. Os perfis da solda com ataque Vilella's mostraram a presença de duas regiões com forma de meia lua, figuras 7a e b. A meia lua interna é mistura de zona fundida com zona termicamente afetada de granulação grosseira. A segunda região trata-se da ZTA de granulação fina, figuras 7a e b.

Depois de selecionada a solução eletrolítica mais adequada ($0,14 \text{ mol/L H}_2\text{SO}_4 + 0,0025 \text{ mol/L KSCN}$) segundo a literatura (KIM, 2009) e ensaios preliminares, os ensaios foram realizados conforme descrito na seção de procedimentos experimentais. O grau de sensitização médio diminuiu para as amostras da condição de soldagem 2 e 3, figura 8. A condição de soldagem 3 também apresentou um leve melhora no valor médio. Essas reduções se atribuem provavelmente a taxas de resfriamentos maiores no processo de soldagem do que durante a fabricação do material. Ou uma leve solubilização seguida do resfriamento rápido. Para as três condições de soldagem a região de maior grau de sensitização ocorreu para a amostra A3. Isso sugere que as transformações metalúrgicas sofridas a esta distância, induzida pelo ciclo térmico de soldagem, favoreceram maior precipitação de carbonetos. Nesta amostras, ocorreu exposição mais longa a temperaturas de sensitização provocada pelo ciclo térmico de soldagem, (H.T. LEE, J.L. WU, 2009). Além

disto, a microestrutura após o ensaio de DL-EPR mostrou o contorno de grão mais atacado para a amostra A3, figura 9 a e b.

Em geral, as taxas de aquecimento e resfriamento, geradas pela soldagem, dependem das características da fonte utilizada, do processo de soldagem, espessura e geometria da solda, dentre outros fatores (C.M. ADAMS JR., 1976; K. POORHAYDARI, B.M. PATCHETT, D.G. IVEY, 2005). LEE E. WU (2009) avaliaram a influência da energia de soldagem do processo GTAW nas propriedades à corrosão, para tal mediram o ciclo térmico experimentado a várias distâncias da zona fundida utilizando termopares sobre a superfície. Foi observado que o ciclo térmico consiste de uma rápida subida até a temperatura de pico, seguido pelo resfriamento até a temperatura ambiente. Além disto, é evidente que a característica do ciclo térmico varia significativamente dependendo da proximidade do ponto de medição da fonte de calor de soldagem. Especificamente, o ciclo térmico experimentado na região próxima a zona fundida possui uma forma característica estreita (efeito do aquecimento e resfriamento mais rápido). As velocidades de resfriamento a partir da máxima temperatura diminuem quando a distância ao centro do cordão de solda aumenta (H.T. Lee, J.L. Wu, 2009). Embora não haja muita diferença na corrente média (± 1 A) e, portanto na energia de soldagem ao comparar o grau de sensitização com as condições de soldagem percebe-se que este se comportou inversamente proporcional à energia de soldagem. Uma vez que as condições 2 (pulsada, 201 A e 8,06 kJ/cm) e 3 (contínua, 200 A e 7,78 kJ/cm) apresentaram uma redução média maior que a 1 (pulsada, 198 A e 7,69 kJ/cm). Evidentemente, deve ser levado em conta que o desvio padrão dos resultados sugere uma diferença pequena entre a condição 1 e o metal de base, porém as condições 2 e 3 apresentaram comportamento diferente do material original. Ao comparar apenas as condições de soldagem pulsada, a condição de soldagem 2, que possui maior frequência, devido a um menor tempo de pulso e de base, propiciou menor grau de sensitização.

A análise microestrutural das amostras de topo da zona fundida mostra a presença de martensita (figura 10 a 12) e ferrita Widmanstätten (figura 10 a 12). Além disto, as micrografias revelam um menor ataque na região de contornos de grão em comparação com outras regiões. Por outro lado, o ataque nas amostras de zona fundida ensaiadas ocorre também no interior dos grãos, por exemplo, entre as ripas de martensita (figura 11 e 12).

Conclusões

- Todas as condições de soldagem apresentaram maior dureza na zona fundida e na ZTA atingindo valores da ordem de 300 HV contra 160 HV do material de base. Esta diferença está ligada à formação de martensita, em algumas regiões e de ferrita de Widmanstätten. Além do refino da microestrutura.
- Os perfis de microdureza mostraram que a maior profundidade afetada ocorreu para as condições 2 e 3, que possuem energias de soldagem praticamente iguais e ligeiramente superior a da condição 1.
- Os resultados de microdurezas revelaram ligeiro aumento para as condições de soldagem com corrente pulsada em comparação com a condição de corrente contínua. E comparando as condições de soldagem com corrente pulsada, a de maior frequência apresentou também maiores valores de microdureza. Este fato é atribuído a provável refino de grão da microestrutura.

- Os valores do grau de sensitização (Ir/Ia) mostraram que o metal de base já estava sensitizado.
- Os tratamentos térmicos de solubilização seguidos de resfriamento rápido foram eficientes em reduzir o grau de sensitização, tanto do metal base quanto das amostras soldadas.
- Em termos de grau de sensitização, as condições de soldagem 2 e 3 não afetaram a resistência a corrosão. Na média, a condição 1 também não afetou. Nestes casos, é possível relação com a energia de soldagem. Embora neste trabalho não haja precisão suficiente na corrente média, o grau de sensitização foi inversamente proporcional à energia de soldagem.
- O maior valor de grau de sensitização ocorreu para as amostras com cortes transversais a 2 mm da interseção entre zona fundida e zona termicamente afetada. Isso sugere que as transformações metalúrgicas sofridas a esta distância, induzidas pelo ciclo térmico de soldagem, favoreceram maior tempo de permanência na faixa de temperatura de sensitização.
- A morfologia do ataque após ensaio DL-EPR das amostras das zonas fundidas de topo mostraram um ataque mais uniforme. Inclusive entre ripas de martensita e outras interfaces formadas no processo de soldagem. Já no material de base e em outras regiões analisadas o ataque é mais pronunciado no contorno de grão e menos intenso no interior da matriz.

Referências bibliográficas

- (C.M. ADAMS JR., 1976) - C.M. Adams Jr., Heat flow in welding, in: C. Weisman (Ed.), Fundamentals of Welding, vol. 1, Welding Handbook, seventh ed., American Welding Society, 1976, p. 90–97.
- (ASTM A262) - AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS (ASTM). 1988a Standard practices for detecting susceptibility to intergranular attack in austenitic stainless steels; A 262-86. Philadelphia. Section 3, v. 03.02. p. 1-18.
- (ASTM A763) - AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS (ASTM). 1988b. Standard practices for detecting susceptibility to intergranular attack in ferritic stainless steels; A 763-86. Philadelphia. Section 1, v. 01.03. p.463-445.
- (CAMPBELL, 1992) CAMPBELL, R.D. Ferritic stainless steel welding metallurgy. Key Engineering Materials, v.69&70, p.167-216, 1992.
- (FOLKHARD, 1988) - FOLKHARD, E. Welding Metallurgy of Stainless Steels. Springer-Verlag, 1988.
- (HENTHORNE, 1972) - HENTHORNE, M. Intergranular corrosion in iron and nickel base alloys. In: LOCALIZED CORROSION – CAUSE OF METAL FAILURE. ASTM, 1972. p. 66-119. (ASTM STP 516).
- (KIM, 2009) - Jeong Kil Kim, Yeong Ho Kim, Sang Ho Uhm, Jong Sub Lee, Kyoo Young Kim. Intergranular corrosion of Ti-stabilized 11 wt% Cr ferritic stainless steel for automotive exhaust systems, Corrosion Science *Volume 51, Issue 11, November 2009, Pages 2716-2723*, (2009)

- (KOU, 1986) - KOU S, LE Y. Nucleation mechanism and grain refining of weld metal. Weld J 1986;65(4):65-70.
- (KUMAR, 2007) - T. Senthil Kumar, V. Balasubramanian, M.Y. Sanavullah, Influences of pulsed current tungsten inert gas welding parameters on the tensile properties of AA 6061 aluminium alloy; Materials & Design, Volume 28, Issue 7, 2007, Pages 2080-2092.
- (KUMAR, 2008) - S. Babu, T. Senthil Kumar, V. Balasubramanian, Optimizing pulsed current gas tungsten arc welding parameters of AA6061 aluminium alloy using Hooke and Jeeves algorithm; Transactions of Nonferrous Metals Society of China, Volume 18, Issue 5, October 2008, Pages 1028-1036.
- (LAKSHMINARAYANAN, 2009) - AK Lakshminarayanan, K Shanmugam and V Balasubramanian; Effect of Autogenous Arc Welding Processes on Tensile and Impact Properties of Ferritic Stainless Steel Joints, Journal of Iron and Steel Research, International, Volume 16, Issue 1, January 2009, Pages 62-68, 16
- (LEE et WU, 2009) - H. T. Lee e J. L. Wu; Correlation between corrosion resistance properties and thermal cycles experienced by gas tungsten arc welding and laser beam welding Alloy 690 butt weldments; Corrosion Science, Volume 51, Issue 4, April 2009, Pages 733-743;
- (LUZ, 2009) - LUZ, T.S. Aspectos operacionais e metalúrgicos da soldagem do aço inoxidável ferrítico com 11% de cromo. Tese (Doutorado). Universidade Federal de Uberlândia, MG, 2009.
- (MADUSUDHAN, 1997) - MADUSUDHAN REDDY G, GOKHALE AA, PRASAD RAO K. Weld microstructure refinement in a 1441 grade Al-Lithium alloy. J Mater Sci 1997;32: 4117-21.
- (PICKERING, 1976). PICKERING, F. B. International Metals Reviews, Review 211, p 227-249, December, 1976.
- (PICKERING, 1985) - PICKERING, F. B. Physical Metallurgy of Stainless Steel Developments. The Institute of Metals, London, p 1-28, 1985.
- (SEDRIKS, 1996) - SEDRIKS, A.J. Corrosion of stainless steel. Second Edition. Princeton. New Jersey. 1996.
- (K. POORHAYDARI, 2005) - K. Poorhaydari, B.M. Patchett, D.G. Ivey, Estimation of cooling rate in the welding of plates with intermediate thickness, Weld. J. 84 (2005) 149-155.
- (TSENG, 1971) - TSENG CF, SAVAGE WF. The effect of arc oscillation in either transverse or longitudinal direction has beneficial effect on the fusion zone microstructure and tends to reduce sensitivity in hot cracking. Weld J 1971;50(11):777-86.

Tabela 1 - Composição química (% em massa)

Elemento	Al	C	Co	Cr	Cu	Mn	Mo	Nb
(% em massa)	0,002	0,0134	0,0201	11,004	0,0192	0,6149	0,0047	0,0031
Elemento	N	Ni	P	S	Si	Ti	V	W
(% em massa)	0,0144	0,367	0,018	0,0005	0,4507	0,0136	0,0405	0,0542

Tabela 2 - Parâmetros de soldagem

Condição de soldagem	I_p (A)	I_b (A)	t_p (s)	t_b (s)	Frequência (Hz)	I_m (A)	H (kJ/cm)
1	$300,0 \pm 1,5$	$70,0 \pm 1,5$	$0,50 \pm 0,01$	$0,40 \pm 0,01$	1,11	198	7,69
2	$300,0 \pm 1,5$	$70,0 \pm 1,5$	$0,40 \pm 0,01$	$0,30 \pm 0,01$	1,43	201	8,06
3	-	-	-	-	-	200	7,78

Legenda: I_p = corrente de pulso; I_b = Corrente de base (A); t_p = tempo de pulso; t_b = tempo de base; I_m = Corrente média (A) e H = energia de soldagem.

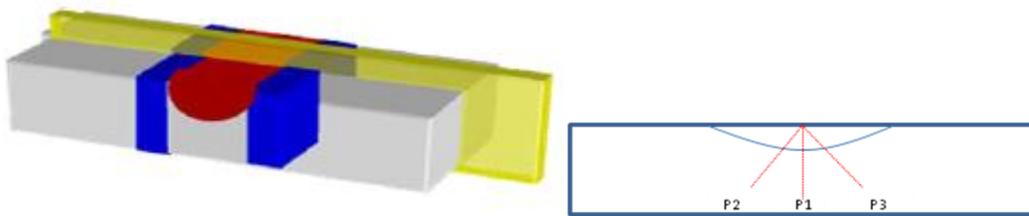


Figura 1. a) corte da amostra para microdureza e b) esquema perfis

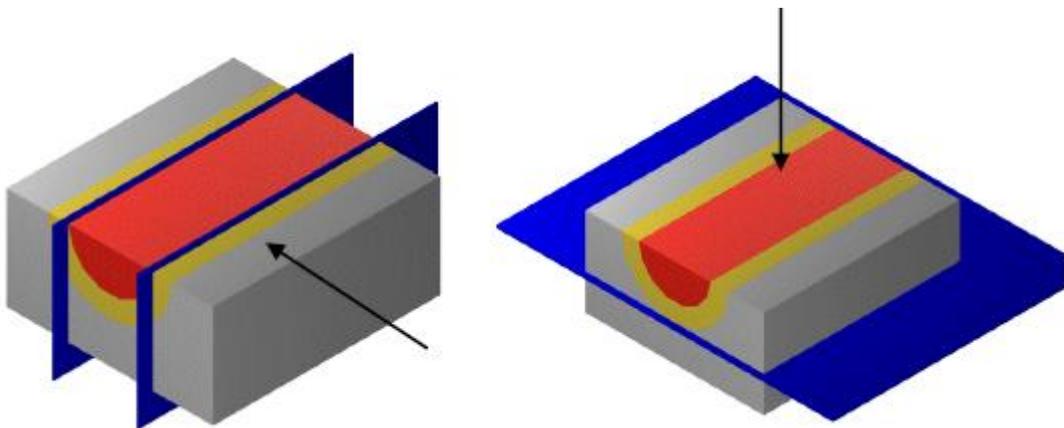


Figura 2. Corte das amostras, setas indicam região ensaiada. a) Longitudinal amostra A2 (intercessão entre Zona Fundida e ZTA). b) de topo, região ensaiada, Zona Fundida superior ao corte.

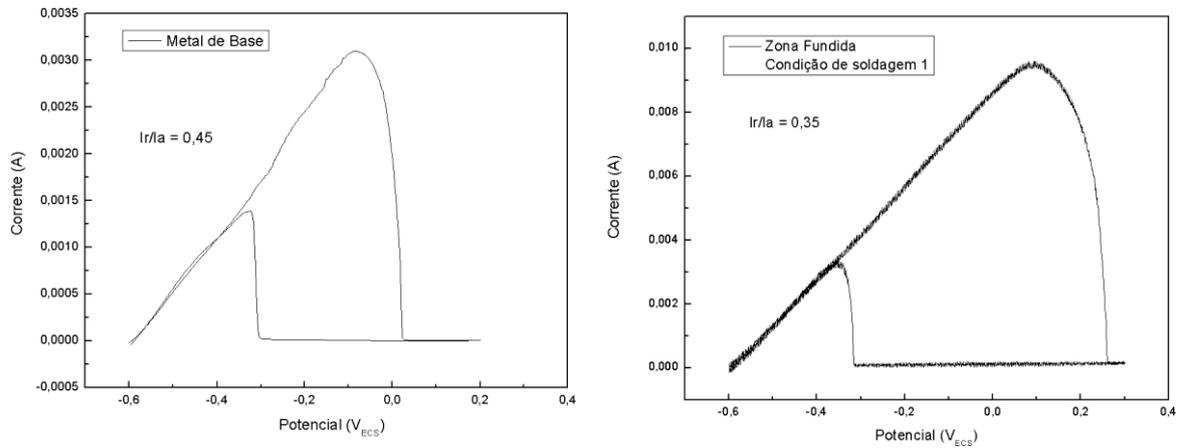
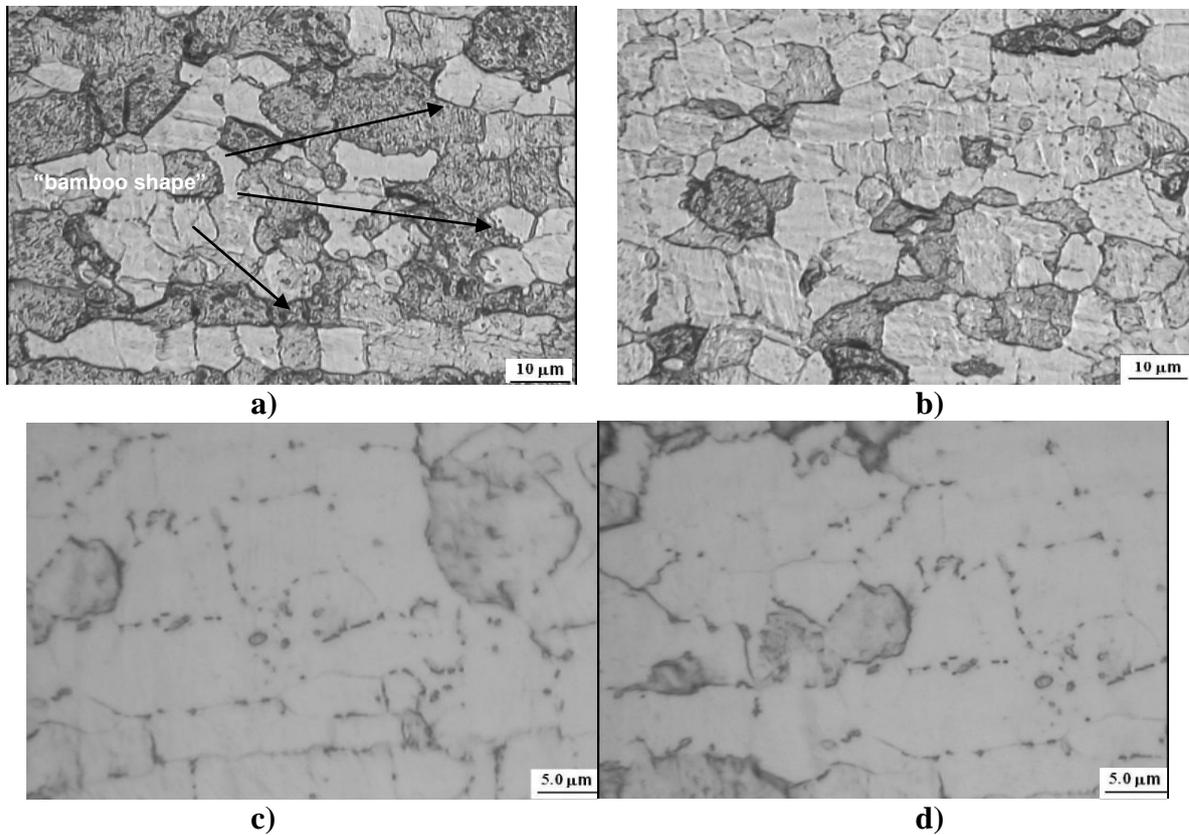


Figura 3 – a) curva de potencial do metal de base e b) curva de potencial da zona fundida na condição de soldagem 1.



a) b) c) d)
Figura 4 - Metal base. a) e b) Vilella. c) e d) Oxálico.

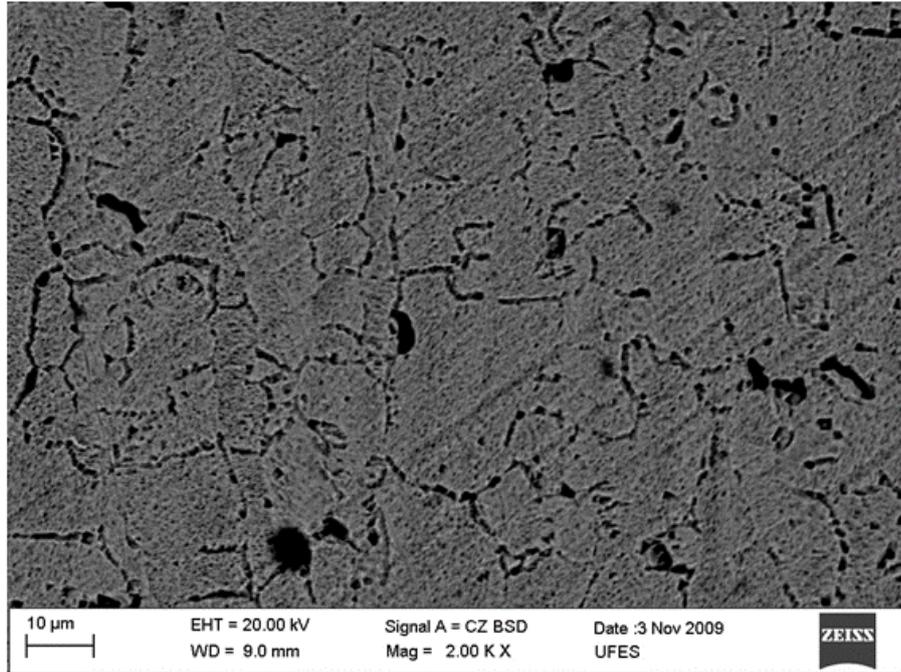


Figura 5. Micrografia obtida em MEV, após o ensaio DL-EPR, contorno de grão atacado.

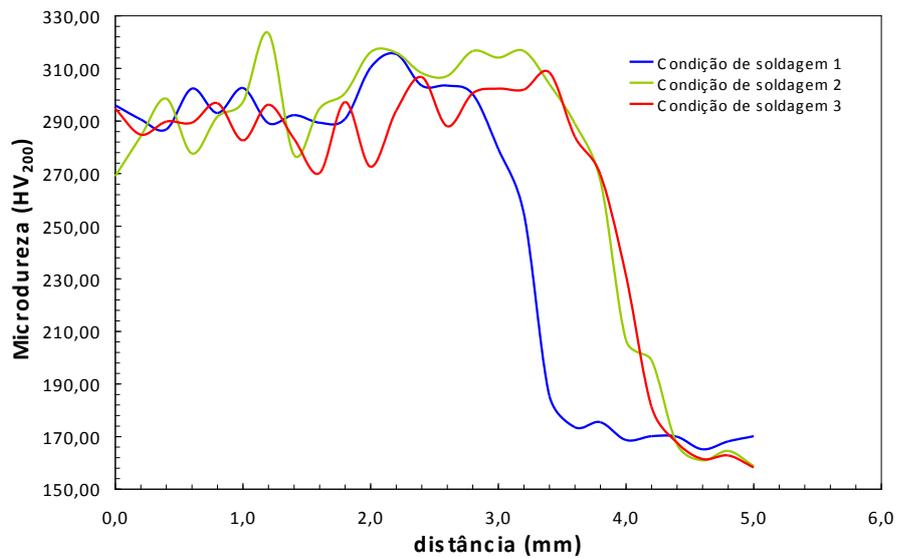


Figura 6. Perfis de microdureza para as três condições de soldagem

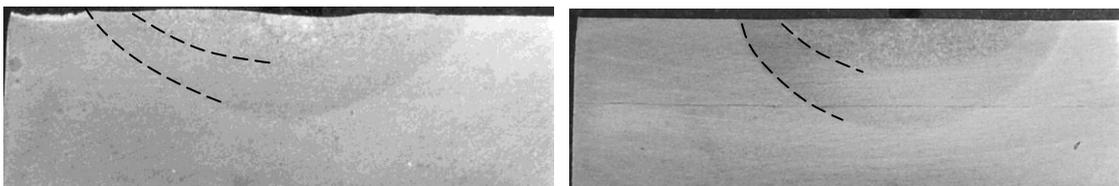


Figura 7. Perfil da solda ataque Vilella. a) condição 1 (TIG corrente pulsada em menor frequência) e b) condição 3 (TIG corrente contínua).

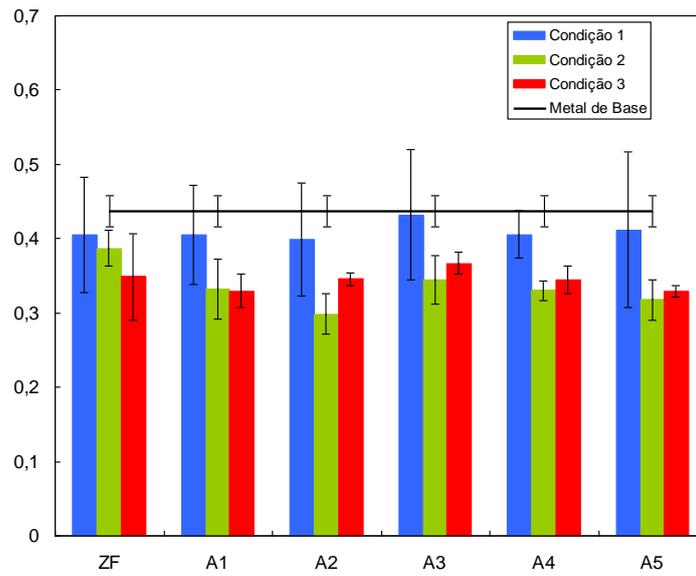
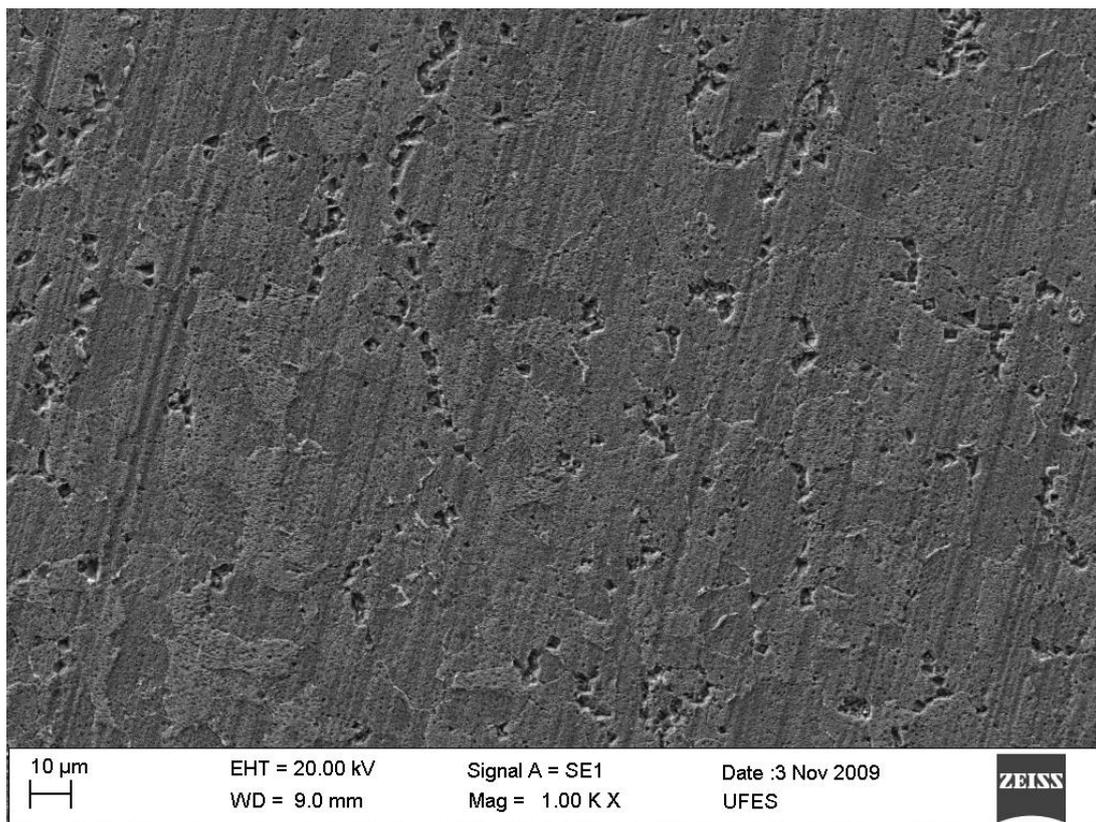
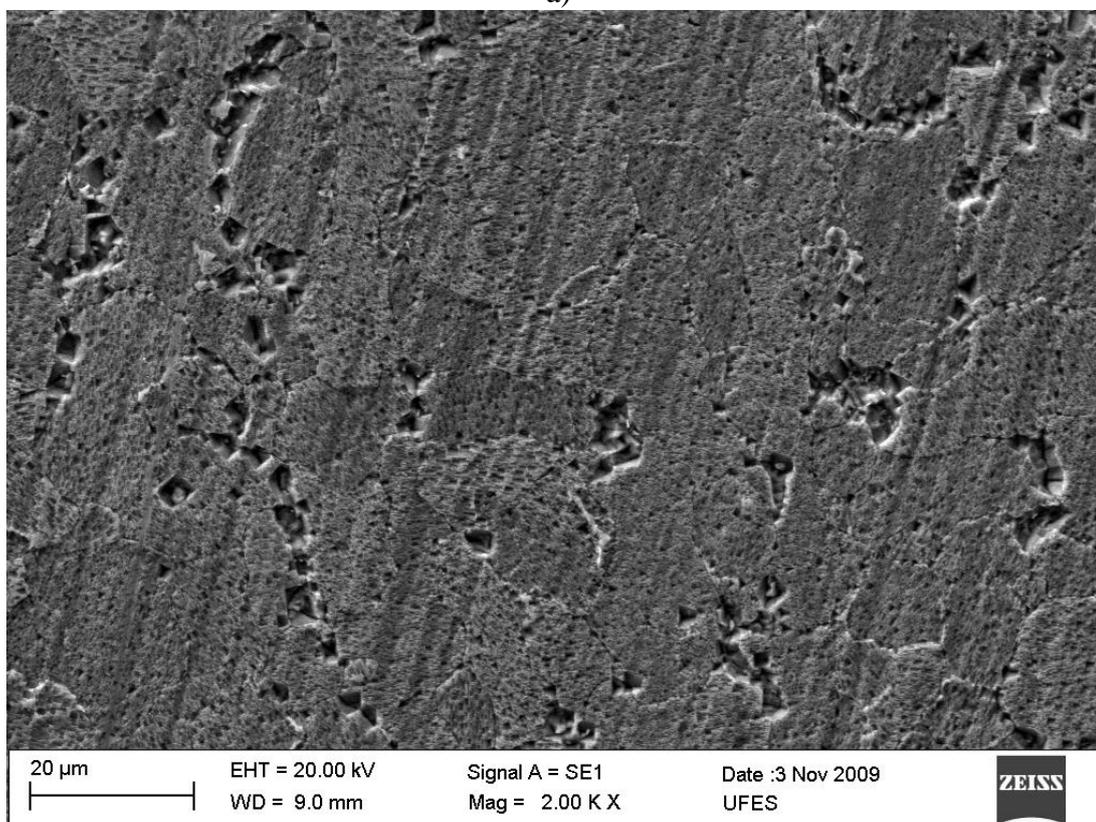


Figura 8. Grau de sensitização de amostras após soldagem. ZF: amostras de topo (material depositado). A1 a A5: amostras transversais. Condição 1: TIG pulsada, condição 2: TIG pulsada com maior frequência, condição 3: TIG corrente contínua. O valor médio obtido para o metal de base (bem como o desvio padrão) é representado como uma linha para efeito de comparação.



a)



b)

Figura 9. Amostra A3 condição de soldagem 2 (TIG pulsado maior frequência).

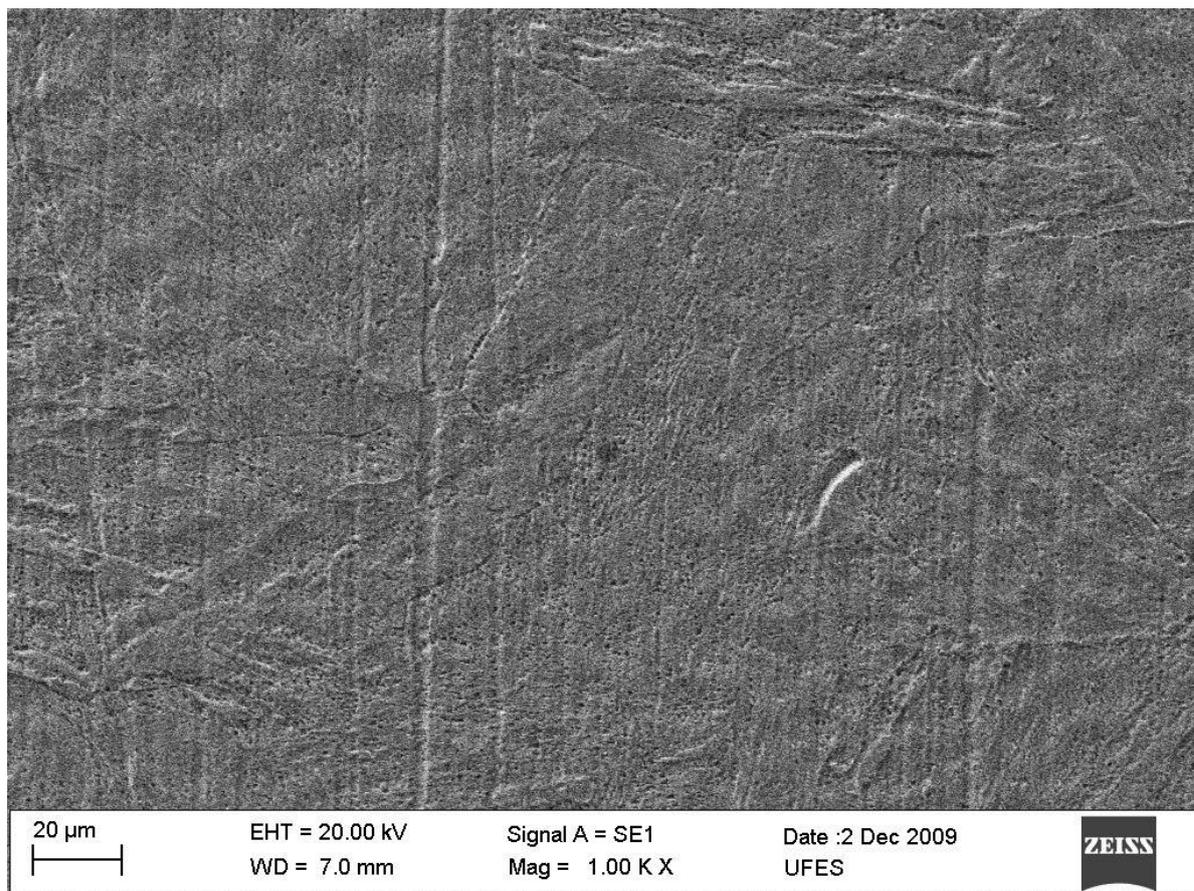


Figura 10. Zona Fundida, condição de soldagem 1 (GTAW com menor frequência). Detalhe da figura 5.20 presença de martensita e ferrita Widmanstätten.

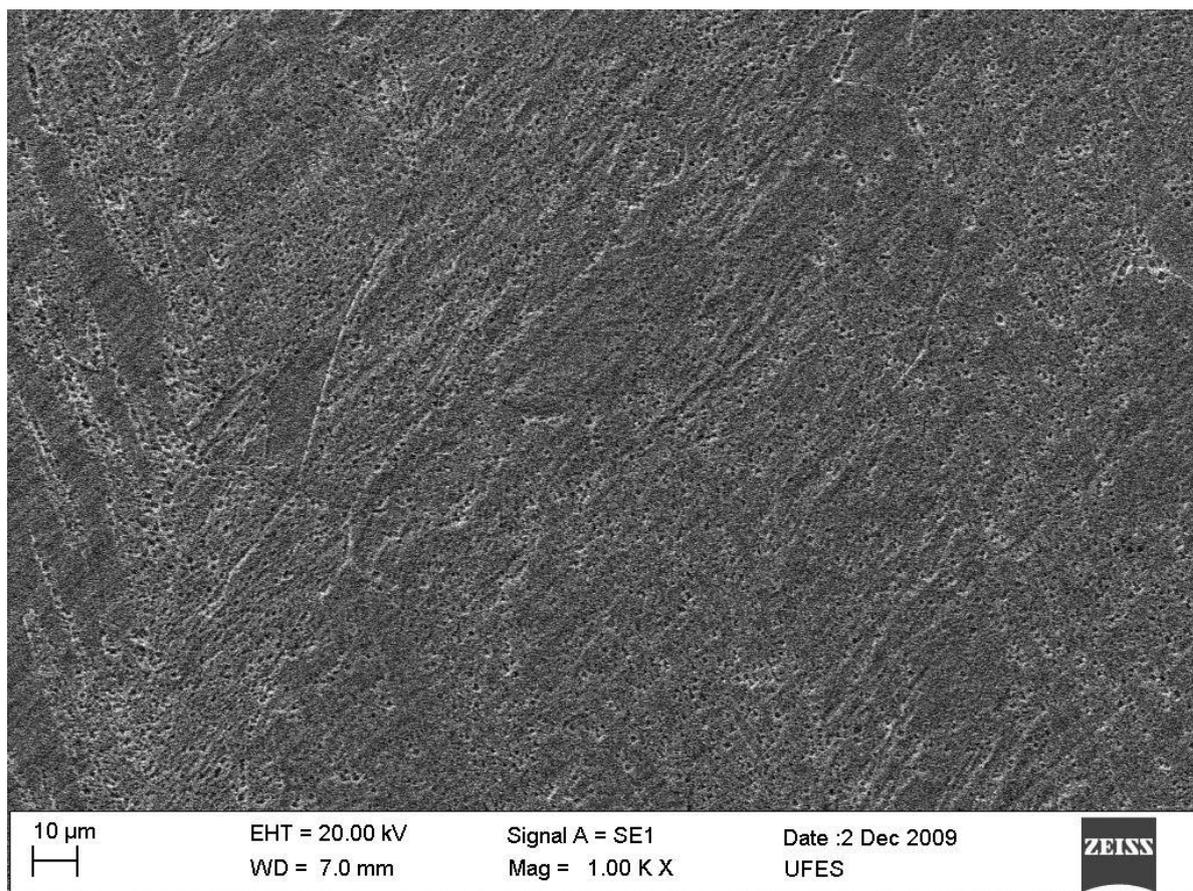


Figura 11. Zona Fundida, condição de soldagem 3 (GTAW corrente contínua). Corrosão uniformemente distribuída e entre as ripas de martensita

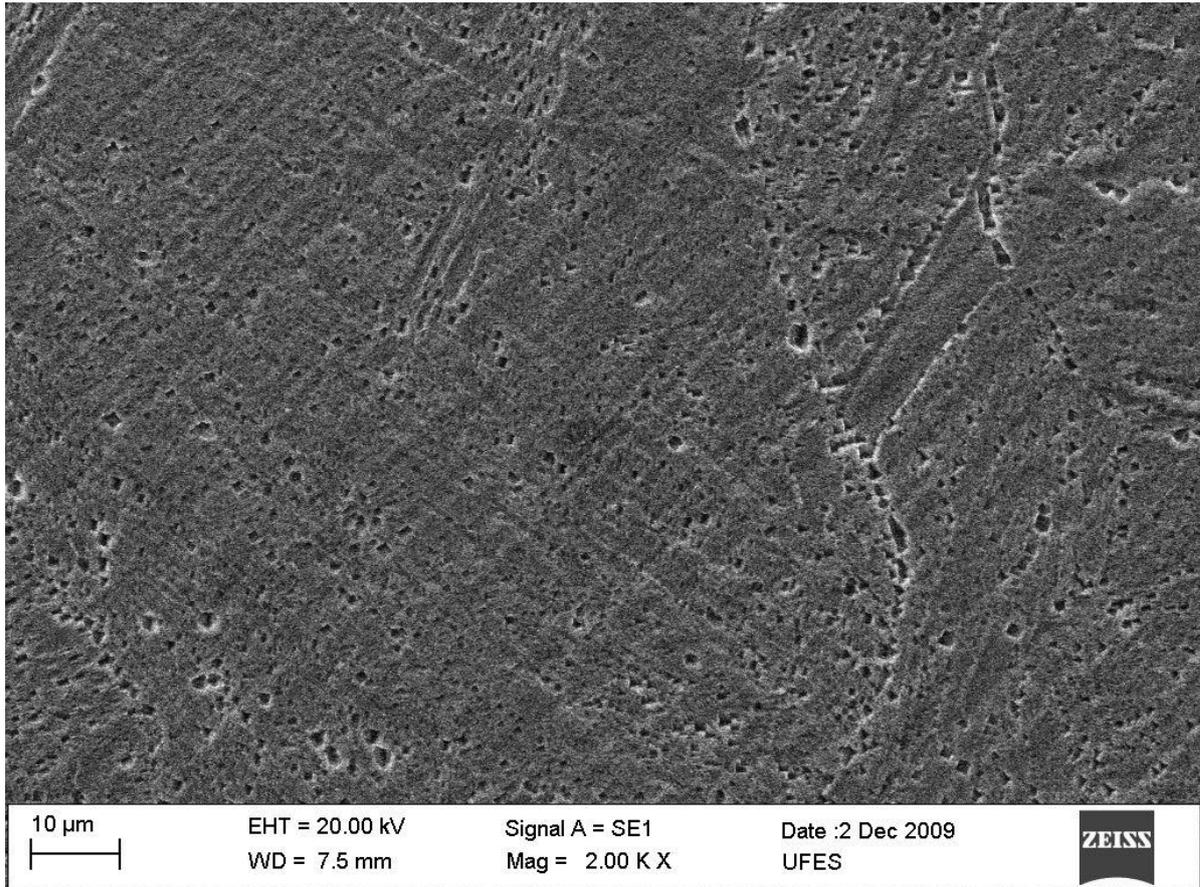


Figura 12. Zona Fundida, condição de soldagem 3 (GTAW corrente contínua). Corrosão uniformemente distribuída.