

ESTUDO DA MICROESTRUTURA E SUSCEPTIBILIDADE À CORROSÃO INTERGRANULAR DOS AÇOS INOXIDÁVEIS FERRÍTICOS COMERCIAIS AISI 430, AISI 430Ti, AISI 430Nb E AISI 430(Ti + Nb) SUBMETIDOS AO PROCESSO DE SOLDAGEM TIG

Caroline Nazaré Gonçalves¹
Paulo José Modenesi²
Luiza Esteves³
Neice Ferreira⁴

Resumo

Neste trabalho a microestrutura e a resistência à corrosão intergranular dos aços inoxidáveis ferríticos AISI 430 estabilizados com Nb, Ti e (Ti + Nb) submetidos ao processo de soldagem TIG foram investigadas. A caracterização estrutural dos cordões de solda e identificação dos microconstituintes presentes foram revelados utilizando o reagente Vilella e examinados em microscópio óptico (MO) e/ou microscópio eletrônico de varredura (MEV). A susceptibilidade à sensibilização foi avaliada através de análises metalográficas (MO e MEV) após ataque eletrolítico (Prática W da norma ASTM 763). As análises microestruturais relataram alta concentração de carbonetos de cromo na zona fundida (ZF) e na zona termicamente afetada (ZTA) dos aços AISI 430 não estabilizado e AISI 430 estabilizado com Ti, mostrando que esses aços ficaram susceptíveis à corrosão intergranular. Nos aços estabilizados com Nb e (Nb + Ti) a estabilização foi suficiente para que o cromo permanecesse em solução sólida. A Prática W revelou corrosão generalizada no interior dos grãos do aço AISI 430 e a presença de valas no AISI 430 Ti o que indica que o aço sensibilizou. Já os aços estabilizados com Nb e (Ti + Nb) mantiveram boa resistência à corrosão após a soldagem.

Palavras-chave: Aço inoxidável ferrítico; Estabilização; Soldagem; Sensibilização.

STUDY OF THE MICROSTRUCTURE AND SUSCEPTIBILITY TO INTERGRANULAR CORROSION OF COMMERCIAL FERRITIC STAINLESS STEEL AISI 430, AISI 430Ti, AISI 430Nb AND AISI 430 (Ti + Nb) WELDED BY GTAW PROCESS

Abstract

This work investigated the microstructure and the intergranular corrosion resistance of the AISI 430 ferritic stainless steels stabilized with Nb, Ti and (Ti + Nb) submitted to GTAW welding process. The structural characterization of the weld beads and identification of the microconstituents present were revealed using the Vilella reagent and examined under an optical microscope (MO) and/or scanning electron microscope (SEM). The susceptibility to sensitization was evaluated through metallographic analyzes (MO and MEV) after electrolytic etching (Practice W of

ASTM 763). The microstructural analyzes reported a high content of chromium carbides in the weld zone (WZ) and in the heat affected zone (HAZ) of steels AISI 430 not stabilized and AISI 430 stabilized with Ti, showing that both steel are susceptible to intergranular corrosion. In the steels with Nb and (Nb + Ti) the stabilization was sufficient to chromium remain in solid solution. Practice W revealed general corrosion inside the grains of AISI 430 steel and the presence of ditches in AISI 430 Ti indicating that the steel sensitized. However, the steels stabilized with Nb and (Ti + Nb) maintained good corrosion resistance after welding.

Keywords: Ferritic stainless steel; stabilization; welding; Degree of sensitization.

¹ *Mestranda/Engenharia Metalúrgica, Materiais e de Minas, DEMET, UFMG, Belo Horizonte, Minas Gerais, Brasil.*

² *Doutor, Professor titular, DEMET, UFMG, Belo Horizonte, Minas Gerais, Brasil.*

³ *Doutora, Centro de Desenvolvimento da Tecnologia Nuclear, Belo Horizonte, Minas Gerais, Brasil.*

⁴ *Mestranda, Centro de Desenvolvimento da Tecnologia Nuclear, Belo Horizonte, Minas Gerais, Brasil.*

1 INTRODUÇÃO

Osaços inoxidáveis ferríticos pela ausência de níquel em sua composição e sua estrutura cristalina cúbica de corpo centrado, são caracterizados por baixo custo, boa condutividade térmica e baixa expansão linear quando comparados com os austeníticos. Além disso tendem a possuir uma maior resistência à corrosão atmosférica e à corrosão sob tensão em meios contendo cloreto [1-2]. Os ferríticos são comumente aplicados em sistemas de exaustão de automóveis, câmaras de combustão, peças de forno, recipientes para alimentos e indústrias químicas. Para a maioria dessas aplicações, a soldagem é o principal meio adotado [2].

No processo de soldagem TIG (*Tungsten Inert Gas*) ou GTAW (*Gas Tungsten Arc Welding*), a coalescência dos metais é alcançada pelo aquecimento destes com um arco elétrico entre um eletrodo não consumível de tungstênio e a peça [3]. Esse processo é geralmente mais usado para a fabricação de componentes de aços inoxidáveis ferríticos de baixa espessura por resultarem soldas de alta qualidade [4].

A soldagem de aços inoxidáveis ferríticos tende a ser limitada uma vez que pode vir acompanhada de perda de tenacidade e ductilidade e pelo aumento à susceptibilidade à corrosão [5]. A fragilização está relacionada a diversos fatores com destaque para o crescimento de grão e formação de martensita na zona fundida (ZF) e na zona termicamente afetada (ZTA). Já a sensitização, susceptibilidade à corrosão intergranular, é causada pela depleção de cromo em regiões adjacentes aos contornos de grão na ZFe na ZTA durante o resfriamento a partir de temperaturas suficientemente elevadas [6-10].

Extensivos estudos são promovidos para entender os mecanismos de sensitização como também para obter meios de prevenir e controlar esse fenômeno. Alguns desses estudos propõem a redução de elementos intersticiais na liga (C e N), a adição de elementos estabilizadores, e a redução da energia de soldagem para prevenir a sensitização [6-8].

Os principais elementos estabilizadores utilizados para controlar a corrosão em aços inoxidáveis ferríticos são o Ti e o Nb. Tanto o primeiro quanto o segundo possuem energia livre de formação como C e N inferiores à energia de ligação do Cr com esses mesmos elementos, possibilitando a formação de precipitados de Ti(C,N) e Nb(C,N) no

lugar de carbonetos e nitretos de Cr. Dessa forma, a resistência à corrosão do aço permanece elevada quando soldado.

Alguns autores como Kriskiak [9] e Gordon e Benekon [11] mostraram que com a adição de Ti houve a formação de precipitados mais estáveis que os de Cr elevando a temperatura de sensibilização. Além disso, a resistência à corrosão por pite também foi aumentada. Porém, para casos de resfriamento rápido, não houve tempo suficiente para a formação de carbonetos e nitretos de Ti levando à precipitação destes elementos com Cr. Esta precipitação causou o empobrecimento de Cr na região em torno do precipitado resultando em perda na resistência à corrosão.

Com relação ao Nb, Gordon e Benekon [11] mostraram que a adição desse elemento, apesar de fornecer uma cinética de formação de precipitados mais lenta que os de Ti, também proporcionaram a formação de carbonetos e carbonitretos que dificultaram a sensibilização. Todavia, a inclusão desse elemento veio acompanhada com perda de ductilidade na solda. Além disso, há o alto custo do Nb [12].

A adição desses elementos de liga pode ser realizada mutuamente (Ti+Nb). Segundo Modenesi [5], esse tipo de estabilização tende a minimizar a perda de propriedades mecânicas quando comparado ao aço não estabilizado ou com adição de um único elemento. No entanto, deve-se ater aos teores ideais de elementos estabilizadores onde a adição insuficiente permite a formação de precipitados de Cr, tornando o aço susceptível à corrosão, e a adição em altos teores tende a elevar a deterioração das propriedades mecânicas [11]. De acordo com Yan et al [13], a estabilização simultânea exibe uma resistência à corrosão intermediária aos aços estabilizados somente com Ti ou Nb.

Apesar do grande número de pesquisas realizadas com a estabilização de aços inoxidáveis ferríticos com os elementos de liga Nb, Ti e (Ti+Nb) ainda não se tem um consenso sobre qual dessas adições é de fato a mais vantajosa em relação às propriedades finais do aço soldado. Neste estudo foram comparados aços com diferentes estabilizações, visando contribuir para o entendimento de diferenças na microestrutura e de corrosão de juntas soldadas [9,11,14,15].

Para a realização desse estudo, foram escolhidos quatro aços inoxidáveis ferríticos AISI 430 sendo um não estabilizado, e os outros estabilizados com Ti, Nb e (Ti+Nb). Os aços foram submetidos à soldagem TIG e posteriormente foram realizadas análises microestruturais e ensaios eletroquímico - Prática W da norma ASTM 763 para a análise da susceptibilidade à corrosão intergranular.

2 DESENVOLVIMENTO

2.1 Materiais e Métodos

As composições químicas dos aços inoxidáveis ferríticos comerciais AISI 430, AISI 430Nb, AISI 430Ti e AISI 430(Ti + Nb), utilizados neste estudo são dadas na Tabela 1. As chapas de aços fornecidas pela *APERAM SOUTH AMERICA* foram laminadas à frio resultando em uma espessura média de 1,5 mm.

A deposição de cordão sobre chapa foi dado pelo processo TIG mecanizado. A Figura 1 representa a bancada de teste que foi composta por um dispositivo de movimento (tartaruga) acoplado a uma placa de cobre utilizada para uniformizar as condições de extração de calor, onde foram colocados os corpos-de-prova a serem soldados. Essa disposição permitiu o ajuste preciso da velocidade de soldagem enquanto a tocha esteve estacionária. Foi utilizado também um dispositivo de fixação que permitiu um ajuste para o posicionamento da tocha, permitindo manter a distância entre o eletrodo e o corpo-de-prova (comprimento de arco) constante para todos os testes.

Tabela 1: Composição química dos aços fornecidos

AISI 430	%C	%Mn	%Si	%P	%Cr	%Ni	%Mo	%Al	%Nb	%Ti	%N (ppm)
Não estabilizado	0,050	0,179	0,347	0,0341	16,16	0,146	0,005	0,002	0,005	0,002	624
430 Nb	0,021	0,15	0,37	0,026	16,37	0,141	0,007	0,002	0,412	0,000	259
430 Ti	0,017	0,19	0,40	0,023	16,32	0,276	0,011	0,003	0,008	0,13	113
430(Ti + Nb)	0,007	0,12	0,48	0,032	17,28	0,185	0,008	0,004	0,204	0,13	213

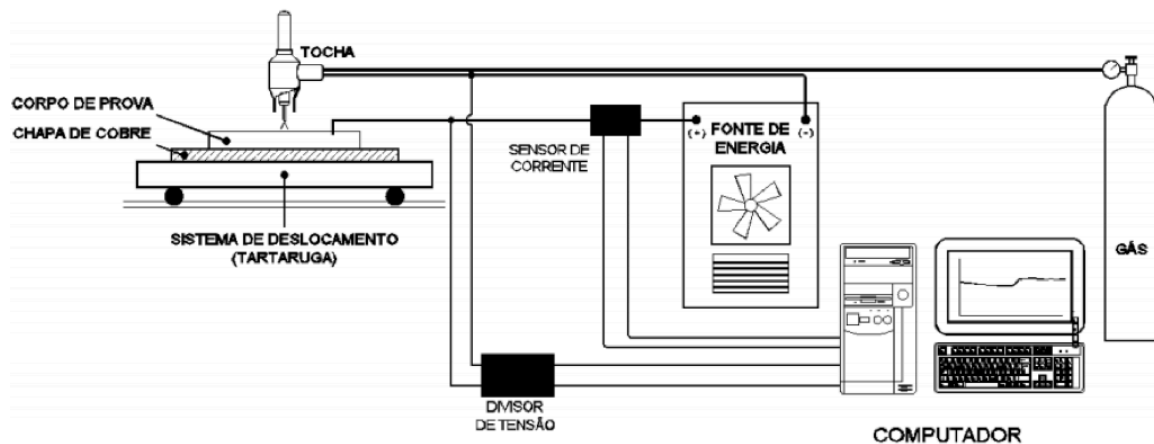


Figura 1: Esquema da montagem para testes e aquisição de dados

A distância entre o eletrodo e a peça para todos os ensaios foi 2 mm e o valor da corrente elétrica ajustado para 120 A. Os valores de tensão adquiridos ficaram entre 11,0 e 13,0 V e uma média de 12,0 V. Para obter a mesma energia de soldagem, a velocidade de soldagem foi ajustada em 4,17 mm/s para todas as amostras.

Assim, através da Equação 1 é possível calcular a energia de soldagem do processo de soldagem TIG autógeno, no valor de 0,345 kJ/mm, o mesmo utilizado em todas as amostras.

$$H = \left(\frac{1}{vT}\right) \int_0^T VI dt \approx \frac{VI}{v}$$

(1)

A caracterização microestrutural dos cordões de solda e identificação dos microconstituintes presentes foram realizados utilizando o reagente Vilella (1 g de ácido pícrico + 5 ml de ácido clorídrico + 100 ml de álcool etílico), o qual revela a presença de partículas de segunda fase e martensita em aços inoxidáveis ferríticos e austeníticos. Depois de revelada a microestrutura, os corpos-de-prova foram examinados em microscópio óptico e/ou microscópio eletrônico de varredura.

A análise de susceptibilidade à corrosão intergranular foi realizada seguindo a Prática W da norma ASTM 763. A Prática W é um método rápido de identificação por exame metalográfico posterior a um ataque eletrolítico em uma solução de 10% p de ácido oxálico ($H_2C_2O_4 \cdot 2H_2O$) e uma densidade de corrente de 1 A/cm² a temperatura ambiente. A Prática é simples e é utilizada apenas para aceitação de um material e não para a sua rejeição. A estrutura adquirida através do exame metalográfico pode ser classificada como “degrau” que significa que o material não está sensibilizado uma vez que os contornos de grão estão livres de precipitados de carbonetos de cromo, estrutura tipo “vala” que indica a presença de carbonetos ricos em cromo nos contornos de grão ou “mista” que possui algumas valas além dos degraus, mas sem contornar completamente um único grão.

O ensaio em ácido oxálico foi realizado de acordo com o procedimento da Prática W. As amostras foram polidas até diamante de 1 µm e atacadas por um período de 90 s em uma solução de 10% p $H_2C_2O_4 \cdot 2H_2O$. Foi utilizada uma fonte para aplicar o potencial de forma a atingir a densidade de corrente desejada para cada corpo-de-prova.

2.2 Resultados

2.2.1 Microestrutura

As Figuras 2 e 3 mostram as micrografias dos cordões de solda obtidas através do MO e do MEV respectivamente. A composição química dos precipitados foi analisada através de EDS (*Energy Dispersive X-Ray Spectroscopy*).

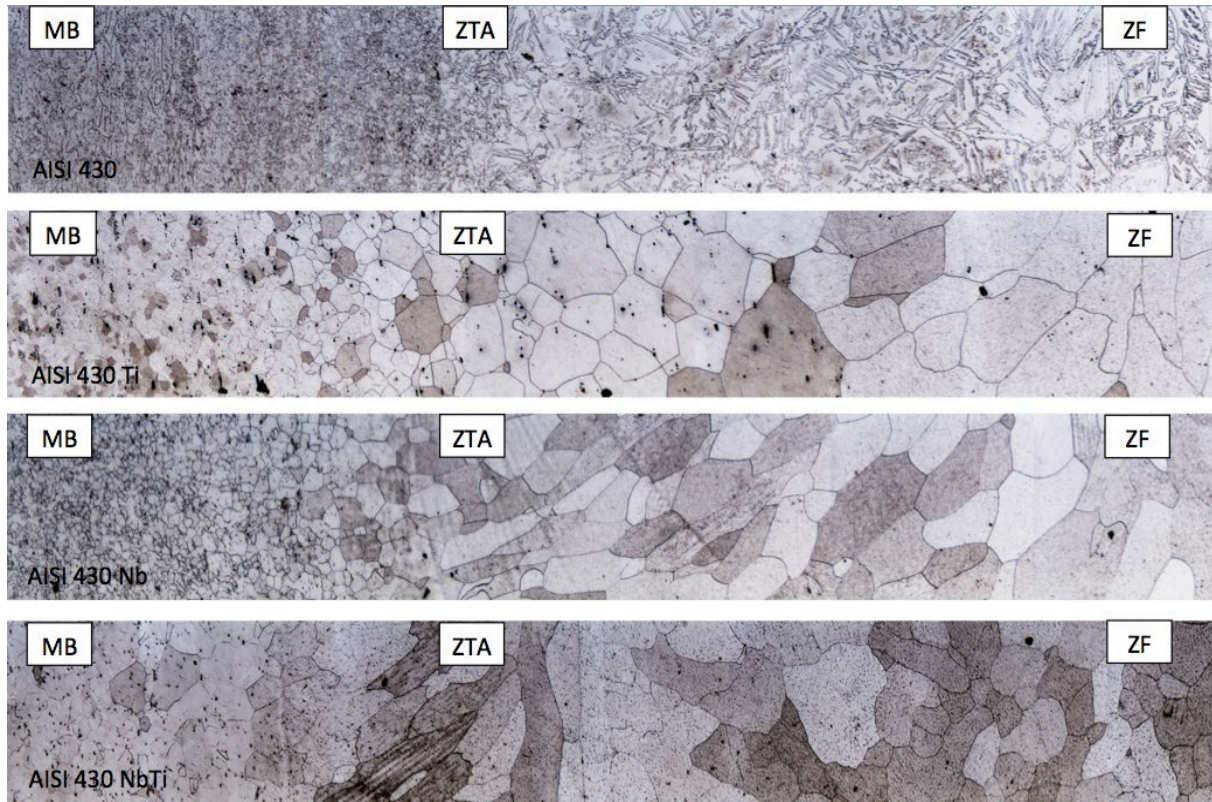


Figura 2: Micrografias óptica do aço AISI 430, AISI 430Ti, AISI 430Nb e AISI 430 (Ti + Nb) respectivamente.

No aço AISI 430 não estabilizado, Figura 2, observa-se que a ZTA e a ZF apresentaram uma rede de martensita junto aos contornos de grão da ferrita além de precipitados finos de carbonetos e nitretos de Cr. Essa microestrutura é justificada pelos altos teores de (C+N) que favorecem a formação da austenita em temperaturas altas, mesmo para elevados teores de cromo. Desta forma, durante a soldagem, o aço sofre transformação parcial da ferrita em altas temperaturas apresentando estrutura bifásica, austenita + ferrita, e estrutura ferrita + martensita após o resfriamento rápido [5].

O EDS desse aço, Figura 3a, revelou precipitados esféricos contendo elevados teores de carbono e cromo, o que de acordo com a literatura são carbonetos de cromo $M_{23}C_6$, e precipitados mais alongados contendo esses elementos mais nitrogênio, o que indica ser carbonitretos de cromo.

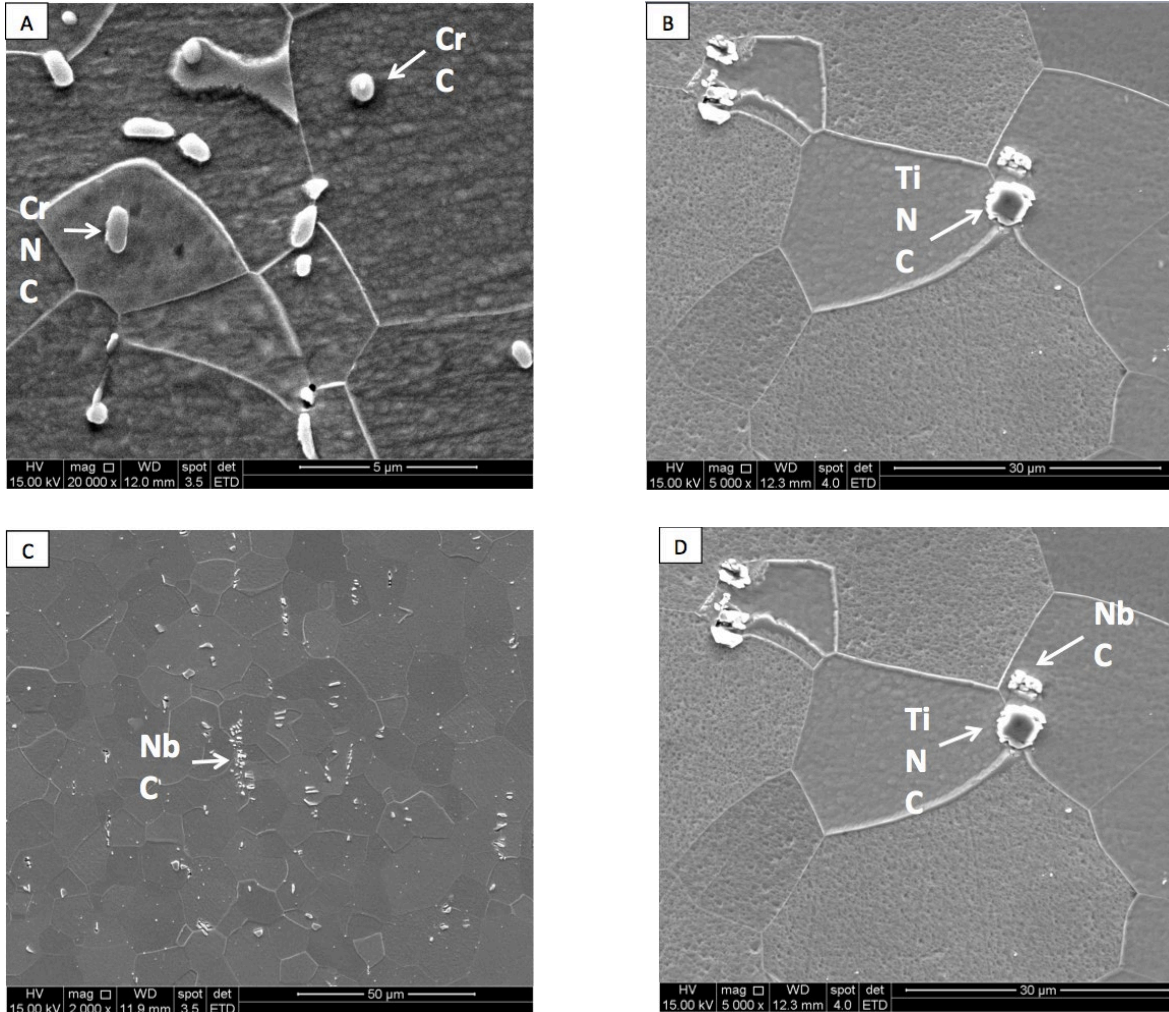


Figura 3: Micrografias obtidas pelo MEV (a) AISI 430, (b) AISI 430Ti, (c) AISI 430Nb e AISI 430 (Ti + Nb)

Nos aços estabilizados, nota-se uma microestrutura completamente ferrítica. A adição de elementos estabilizantes gamâgenios reduz e/ou inibe o campo de existência da austenita. Segundo Modenesi [5], pequenas adições de Nb e Ti (inferiores a 1%) suprimem esta formação. Isso é justificado pelo fato desses elementos substituírem parcialmente ou completamente os carbonetos e nitretos de Cr por carbonitretos de Ti(C,N) ou de Nb(C, N). Esses precipitados são mais estáveis que o de Cr e menos solúveis e só se dissolvem na matriz ferrítica em temperaturas superiores a 1200°C. Ao limitar a dissolução tanto de C quanto de N na ferrita em temperaturas elevadas os estabilizantes reduzem o efeito dos elementos alfa-gênios e limitam e/ou impedem a formação de austenita entre 900 e 1200 °C [11]. Assim, os aços adequadamente estabilizados devem apresentar uma microestrutura completamente ferrítica até a sua fusão e após o resfriamento.

No aço AISI 430Ti observa-se que a adição de Ti resultou em uma ZF com estrutura de grãos finos e equiaxiais e a ZTA com crescimento de grão limitado. Segundo a literatura, os precipitados de TiN formados na zona fundida tendem a agir como nucleantes para a solidificação heterogênea. Já na ZTA das soldas, esses precipitados podem ancorar os contornos de grão retardando um intenso crescimento de grão.

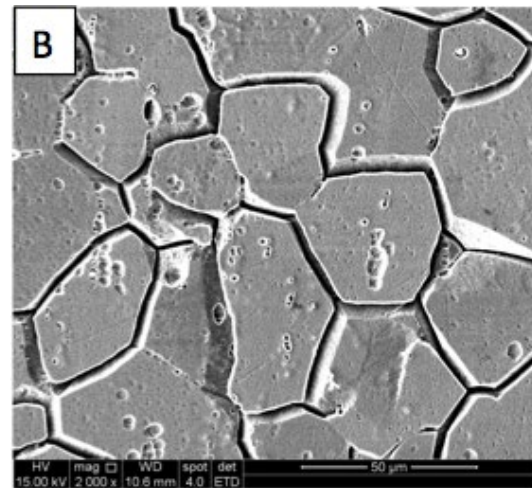
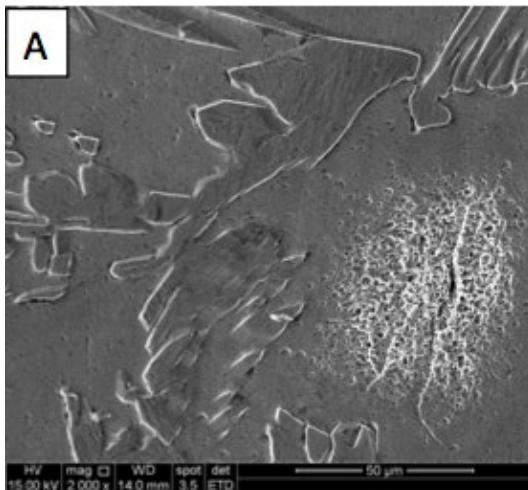
O AISI 430 estabilizado com Nb (Figura 2) revelou crescimento epitaxial dos grãos, onde os grãos da ZF se formaram como um prolongamento dos grãos do metal base [16]. Conforme a literatura, a adição de Nb gera um efeito de ancoramento dos contornos de grão (*pinning*), que reduz a taxa de crescimento de grão, resultando em grãos mais finos do que aqueles do mesmo aço não estabilizado. O EDS desse aço, Figura 3c, apresentou precipitados intra e intergranulares de carbonetos de Nb [11,17,18].

O aço inoxidável ferrítico AISI 430 com estabilização dupla (Ti+Nb) apresentou a ZF com uma estrutura grosseira (Figura 2) e com precipitados finos inter e intragranulares de carbonetos e carbonitretos de Ti e Nb, Figura 3d, e a ZTA com crescimento de grãos.

2.2.2 Prática W

A zona fundida do aço 430, Figura 4a, após ataque eletrolítico da Prática W, revela a presença de ataque generalizado no interior dos grãos o que pode estar associado com a fina precipitação intragranular de carbonetos e/ou nitretos de cromo [19]. Esse resultado está de acordo com Honeycombe, Folkhard e Sedriks [20-22] que estabeleceram a teor de elementos intersticiais (C + N) que um aço inoxidável ferrítico não estabilizado pode tolerar para ser imune à corrosão intergranular deve ser inferior a aproximadamente 0,00015%. No caso do aço estudado, esta quantidade encontra-se muito acima deste valor.

Não foram observados indícios de corrosão associados com a presença de martensita ao longo dos contornos de grão na ZF e ZTA. Uma possível razão para este resultado seria uma redução na concentração de carbono nas regiões adjacentes à martensita o que minimizou a formação de valas nesses locais.



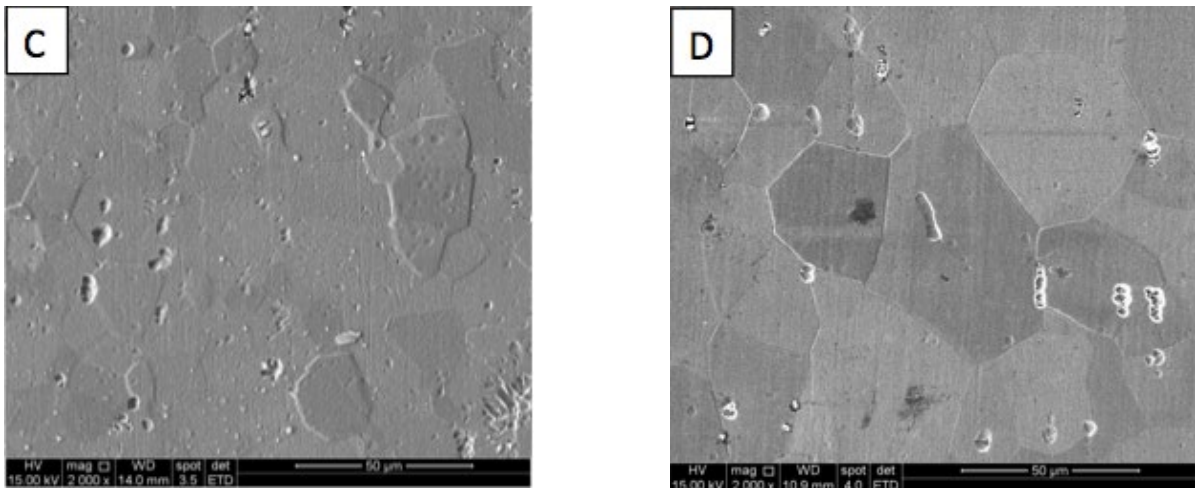


Figura 4: MEV- Prática W (a) AISI 430, (b) AISI 430Ti, (c) AISI 430Nb e AISI 430 (Ti + Nb)

Já no aço AISI 430 estabilizado com Ti, Figura 4b, pôde-se observar contornos de grãocircundados por valas indicando uma forte sensitização. Isto pode ter ocorrido pelo fato da quantidade de Ti não ter sido suficiente para uma completa estabilização, possibilitando a formação de carbonetos de cromo nos contornos durante o resfriamento da solda. De acordo com Tomari et al. [23], o teor de titânio necessário para estabilizar aços inoxidáveis ferríticos é de aproximadamente 0,25% e segundo a norma ASTM A240/A240M é recomendado um teor mínimo deste elemento igual a 6 vezes o teor de (C + N) e uma quantidade máxima de 0,50%. Estes valores são superiores ao presente no aço AISI 430Ti fornecido indicando que este não está completamente estabilizado. As figuras 4c e 4d mostram as micrografias dos aços estabilizados com Nb e (Nb + Ti) respectivamente. Esses aços apresentaram estrutura tipo degrau, o que sugere ausência de precipitados de carbonetos de cromo nos contornos de grão, isto é, esses aços não estão sensitizados. Conforme Modenesi [5], a estimativa para a estabilização completa do aço inoxidável com Nb é $\%Nb(\min) = 7,7(C + N)$ e segundo DeArdo [24], é necessária a relação $\%(Nb + Ti) \geq 0,08 \frac{\%C}{\%N}$. A partir dos resultados foi observado que a estabilização com Nb e a estabilização mútua de Ti + Nb, com teores adequados para estabilização completa, são eficientes para evitar que o aço inoxidável ferrítico AISI 430 sensitize após ter sido submetido ao processo de soldagem.

3 CONCLUSÃO

Baseado nos resultados obtidos a partir da análise metalográfica e do ataque eletrolítico – Prática W, nos aços AISI 430, AISI 430Ti, AISI 430Nb e AISI 430 (Ti + Nb) soldados, as seguintes conclusões podem ser dadas:

Com a ausência de elementos estabilizantes na aço inoxidável ferrítico AISI 430, a região da solda foi composta por martensita nos contornos de grão da ferrita nas regiões da ZF e na ZTA e a presença de precipitados finos de carbonetos e carbonitretos de cromo. A Prática W revelou que a formação de precipitados de Cr resultou em um aço susceptível à corrosão intergranular e generalizada.

O aço inoxidável ferrítico estabilizado com Ti apresentou uma microestrutura completamente ferrítica de grãos equiaxiais, porém a estabilização com esse

elemento parece não ter sido suficiente para prevenir a corrosão intergranular na região da solda. A Prática W revelou valas nos contornos de grão, indicando que o material sensibilizou.

A estabilização com Nb foi suficiente para que o Cr permanecesse em solução sólida após o processo de soldagem. A análise metalográfica revelou microestrutura com grãos colunares na ZF e precipitados finos inter e intragranulares de carboneto de Nb. O ataque eletrolítico revelou estrutura tipo degrau, comprovando que a adição de Nb é eficiente para manter a resistência à corrosão do aço após ter sido submetido à soldagem.

A análise metalográfica da estabilização dupla (Ti + Nb) revelaram grãos grosseiros na ZF e intenso crescimento de grão na ZTA. A Prática W comprovou que a estabilização mútua resultou em uma solda resistente à corrosão intergranular.

Agradecimentos

Agradecemos às agências governamentais brasileiras (CNPQ, CAPES e FAPEMIG) pelo apoio financeiro para esta pesquisa e ao Centro de Desenvolvimento da Tecnologia Nuclear – CDTN e UFMG pelo suporte técnico.

REFERÊNCIAS

- 1 Fujita N, Ohmura K, Yamamoto A. Changes of microstructures and high temperature properties during high temperature service of Niobium added ferritic stainless steels. *Mat. Sci. Eng.* 2003;351:272-281.
- 2 Mallaiah G, Kumar A, Reddy PR, Reddy GM. Influence of grain refining elements on mechanical properties of AISI 430 ferritic stainless steel weldments – Taguchi approach. *Materials and Design.* 2012;36(1):443-450.
- 3 American Welding Society. *Welding Handbook. Welding Science and Technology.* 9 ed. 2001.
- 4 Pickering FB. The metallurgical evolution of stainless steels. *International Metals Reviews.* 1976;227-268.
- 5 Modenesi PJ. *Soldabilidade dos Aços Inoxidáveis.* Departamento de Engenharia Metalúrgica e de Materiais. Universidade Federal de Minas Gerais. Belo Horizonte; 2016.
- 6 Amuda MOH, Mridha S. An overview of sensitization dynamics in ferritic stainless steel welds. *International Journal of Corrosion.* 2011;2011(9).
- 7 Bond AP. Mechanism of intergranular corrosion in ferritic stainless steels. *Transactions of the Metallurgical Society of American Institute of Mining, Metallurgical, and Petroleum Engineers.* 1960;245: 2127-2134.
- 8 Demo JJ. Mechanism of high temperature embrittlement and loss of corrosion resistance in AISI type 446 stainless steel. *Corrosion.* 1971;27(12):531-544.

- 9 KrysiakKF. Welding Behavior of Ferritic Stainless Steel-An Overview. Welding Journal. 1986;65(4):37-41.
- 10 Reddy GM, MeshranSD. Grain refinement in ferritic stainless weld through magnetic arc oscillations and its effect on tensile property. Indian Welding Journal. 2006;39(3):35-41.
- 11 GordonW, BennekonAV. Review of stabilization of ferritic stainless steels. Materials Science and Technology. 1996;12:126-131.
- 12 Fujita N, BadeshiaHKDH, KikuchiM. Precipitation sequence in niobium-alloyed ferritic stainless steel. Modelling Simul. Sci. Mater. Sci. Eng. 2004;12:273-284.
- 13 Yan H, BiH, LiX, XuZ. Microstructure and texture of Nb+Ti stabilized ferritic stainless steel. Materials Characterization. 2008;59(12):1741-1746.
- 14 SiqueiraRP. Efeitos da Orientação na Recristalização do Aço Inoxidável Ferrítico AISI 430 com Grãos Grosseiros e Estabilizados ao Nióbio [tese de doutorado]. Lorena: Escola de Engenharia de Lorena; 2010.
- 15 El-KashifE, AsakuraK, KosekiT, Shibata K. Effect of boron, niobium and titanium on grain growth in ultra-high purity 18% Cr ferritic stainless steel. ISIJ International. 2004;44:1568-1575.
- 16 Modenesi PJ, Marques PV; Santos DB. Introdução à metalurgia da soldagem. Departamento de Engenharia Metalúrgica e de Materiais. Universidade Federal de Minas Gerais. Belo Horizonte; 2016.
- 17 Farina AB. Avaliação da Sequência de Transformação de Fases do Aço AISI 430 Tradicional [tese de Mestrado]. São Paulo: Escola Politécnica da USP; 2010.
- 18 SimGM, Ahn JC, Hong SC, Lee KJ, Lee KS. Effect of Nb precipitate coarsening on the high temperature strength in Nb containing ferritic stainless steels. Materials Science and Engineering A. 2005;396(1-2):159-165.
- 19 Serna-GiraldoCA. Resistência à corrosão intergranular do aço inoxidável ferrítico UNSS 43000: avaliação por método de reativação eletroquímica, efeito do tratamento térmico e mecanismo de sensibilização [tese de doutorado]. São Paulo: Escola Politécnica da Universidade de São Paulo; 2006.
- 20 Honeycombe RWK. Aços: Microestrutura e propriedades. Fundação Calouste Gulbenkian. 1982:16-18.
- 21 FolkhardE. Welding metallurgy of stainless steels. Springer-Verlag. Wien New York. 1988;103-110.

22 SedriksAJ. Corrosion of Stainless Steel. 2 ed. New Jersey: Princeton; 1996.

23 Tomari H, Fujiwara K, Shimogori K, Fukuzuka T, Kanda M. Intergranular stress corrosion cracking of 13% Cr and 18% Cr ferritic stainless steels in high temperature high purity water. Corrosion. 1982;38(5):283-294.

24 DeArdo AJ, Garcia CI, Hua M, Tither G, Hulka K. Ferritic stainless steel – the metallurgical background and benefit of dual stabilization”. Stainless Steels. 1996;96:287-298.