

INFLUÊNCIA DA FERRITA DELTA NAS PROPRIEDADES MECÂNICAS DE UM AÇO INOXIDÁVEL SOLDADO¹

Bruna Gomes França²
Ellen de Carvalho Pessanha³
Renata Barbosa Gonçalves⁴
Luis Augusto Hernandez Terrones⁵

Resumo

O objetivo deste presente trabalho é avaliar a quantidade de ferrita delta formada durante o processo de soldagem e sua influência nas propriedades mecânicas de um aço inoxidável austenítico. Foram analisadas amostras de aço inoxidável austenítico AISI 347 soldado nas condições com e sem tratamento térmico de solubilização à temperatura de 1.060°C. A composição química nominal deste aço é: 0,015%C; 0,48%Si; 20%Cr; 1,85%Mn; 0,15%P; < 0,20%Cu; 0,10%S; < 0,60%N; < 0,50%Mo e 10,1%Ni. As amostras foram preparadas metalograficamente através das etapas: corte; lixamento; polimento com a pasta de alumina e ataque eletrolítico, realizado com uma solução de 10 g de ácido oxálico em 100 ml de água destilada. A análise microestrutural na zona fundida indica a formação da fase ferrita delta com diferentes morfologias e que a quantidade desta fase diminui com o tratamento térmico de solubilização a 1.060°C. Os resultados do ensaio de tração mostram um aumento na ductilidade e diminuição nas propriedades de tensão de escoamento e de resistência à tração do material solubilizado, atribuídos à redução da fração volumétrica da fase ferrita delta. Após a deformação plástica do material, a análise microestrutural indica que a fratura pode ocorrer por nucleação da trinca através da ferrita delta.

Palavras-chave: Aço inoxidável ferrita delta.

INFLUENCE OF DELTA FERRITE IN MECHANICAL PROPERTIES OF WELDED STAINLESS STEEL

Abstract

The objective of this study is to evaluate the amount of delta ferrite formed during the welding process and its influence on mechanical properties of an austenitic stainless steel. Samples from austenitic stainless steel AISI 347 welded conditions with and without heat treatment of solubilization at a temperature of 1,060°C. The nominal chemical composition of the steel is: 0.015%C, 0.48%Si, 20%Cr, 1.85%Mn, 0.15%P, < 0.20%Cu, 0.10%S, < 0,60%N, < 0.50%Mo and 10.1%Ni. The samples were metallographically prepared through the steps of: cutting, grinding, polishing with the slurry of aluminum oxide and electrolyte etching performed with a solution of 10 g of oxalic acid in 100 ml distilled water. The microstructure analysis molten zone indicates the formation of delta ferrite phase with different morphologies which decreases the amount of this phase by thermal treatment of solubilization to 1,060°C. The assay results show an increase in tensile ductility and decrease in the properties of yield stress and tensile strength of the material solubilized attributed to reduced volume fraction of ferrite phase delta. After plastic deformation of the material, microstructure analysis indicates that the fracture can occur by nucleation of cracks through the delta ferrite.

Key words: Stainless steel delta ferrite.

¹ Contribuição técnica ao 67º Congresso ABM - Internacional, 31 de julho a 3 de agosto de 2012, Rio de Janeiro, RJ, Brasil

² Graduando em Eng. Metalúrgica e Materiais, Universidade Estadual do Norte Fluminense (UENF).

³ Mestrando em Eng. e Ciência dos Materiais, Universidade Estadual do Norte Fluminense (UENF).

⁴ Doutorando em Eng. e Ciência dos Materiais, Universidade Estadual do Norte Fluminense (UENF).

⁵ Doutor em Engenharia Metalúrgica e de Materiais, Universidade Federal do Rio de Janeiro (UFRJ) e Professor da UENF.

1 INTRODUÇÃO

Dentre os diferentes tipos de aços inoxidáveis, a classe dos austeníticos é a mais amplamente utilizada, isto inclui em altas temperaturas e temperaturas criogênicas. Em muitos casos seu uso é como peças ou equipamentos conformados por soldagem. Após o processo de solda o material se caracteriza por apresentar três zonas microestruturalmente bem definidas: metal base (MB), zona termicamente afetada (ZTA) e zona fundida (ZF). Na zona fundida, devido às condições de resfriamento fora do equilíbrio, nos aços inoxidáveis austeníticos se precipita a fase ferrita delta numa matriz austenítica com diferentes morfologias, podendo-se, posteriormente dissolver e formar as fases intermetálicas sigma (σ), chi (χ) e de Laves.^(1,2)

A ferrita delta presente em pequenas quantidades diminuiu a susceptibilidade a trincas a quente e eleva a resistência à tração e pode ser benéfica na corrosão sob tensão. Ao precipitar a fase sigma quando aquecido entre 700°C-900°C pode reduzir a resistência ao impacto.⁽¹⁾

Uma grande porcentagem de ferrita delta afeta as propriedades mecânicas dos aços inoxidáveis austeníticos como ductilidade, tensão de escoamento e resistência à tração. Com isso o teor desta fase deve ser controlado. A fração volumétrica e distribuição da ferrita delta formada dependem de dois fatores principais: composição química do aço, especificamente dos valores de Cromo e Níquel equivalentes, e da velocidade de solidificação.^(2,3)

Neste trabalho aços inoxidáveis austeníticos soldados foram submetidos a tratamento térmico de solubilização para diminuir a fração volumétrica da ferrita delta presente na microestrutura principalmente na zona fundida.

1.1 Objetivo

O objetivo deste trabalho é determinar e avaliar a influência da ferrita delta nas propriedades mecânicas de um aço inoxidável austenítico 347 soldado e após tratamento térmico de solubilização a 1.060°C, utilizando as técnicas de MO, MEV e os ensaios de microdureza e de tração.

1.2 Revisão Bibliográfica

Para que um aço seja considerado inoxidável deve conter ao menos 12% em peso de Cromo, é este elemento que lhe confere elevada resistência a corrosão, sua principal propriedade. Isto é decorrente do fenômeno chamado passividade, que consiste na rápida formação de uma camada de óxido de cromo na superfície do material em contato com ar atmosférico ou outro meio oxidante. Esta camada se torna uma barreira a possíveis reagentes e a liga então é protegida contra ataques de meios corrosivos.⁽⁴⁾

Os aços inoxidáveis podem conter também pequenas adições de outros elementos de liga, adicionados intencionalmente com o intuito de conferir propriedades do aço para determinadas aplicações (Al, Mo, Cu, Ti, W, Nb, Co). De acordo com a microestrutura predominante os aços inoxidáveis podem ser classificados em quatro tipos: martensíticos, ferríticos, austeníticos e duplex. Os aços inoxidáveis os austeníticos são os mais amplamente utilizados, estes apresentam boa soldabilidade e resistência geral à corrosão.⁽⁵⁾

A microestrutura correspondente à zona fundida no aço inoxidável austenítico soldado dependerá das condições de resfriamento a qual o material foi submetido. Segundo Brooks, Williams e Thompson,⁽³⁾ as principais microestruturas encontradas de acordo com a relação de Cr/Ni são: somente austenita, austenita e ferrita eutética, austenita e ferrita em espinha ou vermicular, austenita e ferrita laminar ou rendilhada e, para maiores valores da relação Cr/Ni, ferrita e austenita de Widmanstätten.

Para reduzir os efeitos prejudiciais às propriedades mecânicas do aço inoxidável austenítico devido a uma alta fração volumétrica da fase ferrita delta, um tratamento térmico de solubilização é realizado. Ele consiste em submeter o aço inoxidável austenítico ao aquecimento em temperaturas elevadas, em torno de 1.000°C-1.100°C e depois resfriar-los rapidamente em água ou ao ar. Desta forma ele permite uma manter o carbono em solução sólida, dando ao material uma estrutura essencialmente austenítica, dissolvendo a maior quantidade possível de outros constituintes, como as fases intermetálicas e outros precipitados presentes na matriz. Esta estrutura apresenta uma melhor resistência a corrosão e ductilidade.

2 MATERIAL E MÉTODOS

2.1 Material

Foram analisadas amostras de aço inoxidável austenítico AISI 347 nas condições: i) como recebido; ii) soldado; e iii) com tratamento térmico de solubilização a temperatura de 1.060°C, durante 1,75 minutos por milímetro. As composições do metal base e do metal de adição são apresentadas nas Tabelas 1 e 2 respectivamente.

Tabela 1. Composição química do aço inoxidável austenítico AISI 347

Elemento	C	Si	Cr	Mn	P	Cu	S	N	Mo	Ni
(% em Peso)	0.015	0.48	20	1.85	0.15	<0.20	0.10	<0.60	<0.50	10.1

Tabela 1. Composição química do metal de solda ER308L

Elemento	C	Si	Cr	Mn	P	Cu	S	N	Mo	Ni
(% em Peso)	0.015	0.48	20	1.85	0.15	<0.20	0.10	<0.60	<0.50	10.0

2.2 Preparação Metalográfica

As amostras analisadas foram cortadas através do equipamento Mesoton, de maneira que o plano de observação seja perpendicular ao cordão de solda (Figura 1).



Figura 1. Macrografia do aço inoxidável austenítico AISI 347 soldado.

Após as etapas de lixamento e polimento com pasta de alumina de 1 μm e posteriormente de 0.3 μm , as amostras foram atacadas eletroliticamente de acordo com a norma ASTM 262-A.⁽⁶⁾ A solução utilizada como eletrólito: dissolução completa de 10 g de ácido oxálico ($\text{H}_2\text{C}_2\text{O}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$) em 100 ml de água destilada. Utilizou-se uma corrente de 0.18 A e uma diferença de potencial de 0.02 V.

2.3 Ensaio de Microdureza

O ensaio de microdureza foi realizado através do microdurômetro HMV- Microhardness Tester (Shimatzu), com uma carga de 20 gf. Para este ensaio, foram realizadas 10 indentações na zona fundida do aço inoxidável austenítico 347 nas condições de soldado e após o tratamento térmico de solubilização.

2.4 Ensaios de Tração

Os ensaios de tração foram realizados com uma velocidade de 2 mm/min. A geometria dos corpos de prova utilizados está mostrada na Figura 2. Estes corpos de prova foram usinados de maneira que o cordão de solda fosse localizado no centro do corpo de prova. Devido à geometria dos corpos de prova, os valores da tensão máxima ($\sigma_{\text{máx.}}$) foram corrigidos de acordo com os valores do fator concentrador de tensão (K_t).⁽⁷⁾

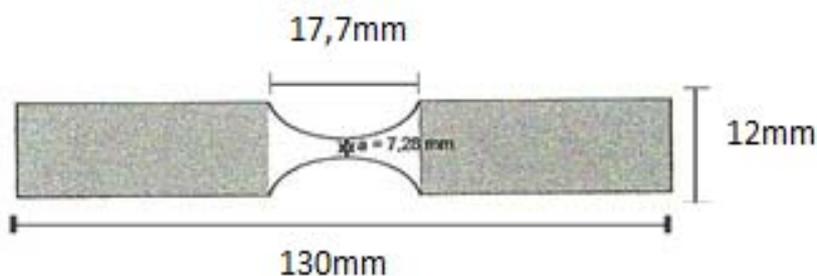


Figura 2. Geometria e medidas do corpo de prova de tração.

2.5 Análise Microestrutural

As amostras foram analisadas microestruturalmente através da microscopia ótica (NEOPHOT-32) e eletrônica de varredura (MEV, Shimadzu SSX-550) do Lamav, CCT, UENF.

3 RESULTADOS

3.1 Microestrutura

3.1.1 Material como recebido

Na condição de como recebido, a microestrutura do aço inoxidável 347 consiste de grãos austeníticos com tamanhos não uniformes, variando de 10 μm a 20 μm , e com morfologias poligonais. As Figuras 3a e 3b mostram as micrografias desta microestrutura.

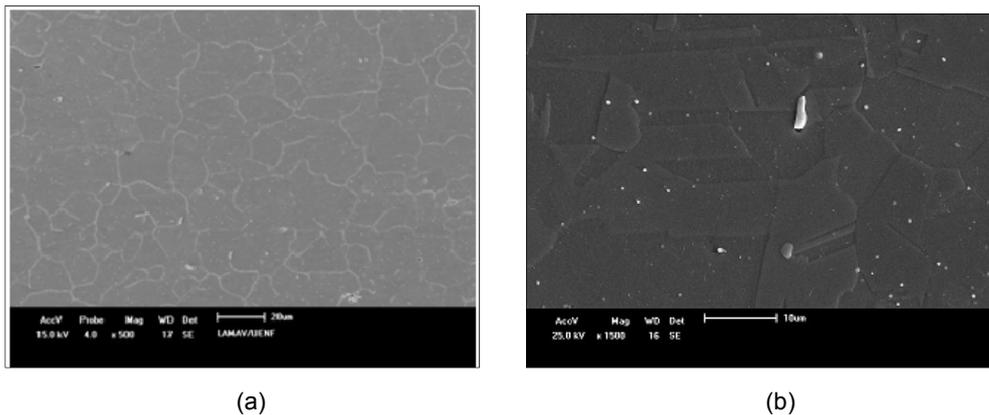


Figura 3. Micrografias do aço inoxidável austenítico tipo 347 (a) MEV-SE, 500x; (b) MEV-SE, 1.500x.

A Figura 3b revela também, com um maior aumento, a presença de partículas de carbeto no interior dos grãos austeníticos angulares.

3.1.2 Material soldado

As micrografias óticas mostrados nas Figuras 4a e 4b mostram que a zona fundida apresenta uma microestrutura que consiste em uma matriz austenítica, com a fase ferrita delta precipitada em diferentes morfologias: vermicular, acicular e de contorno de grão.

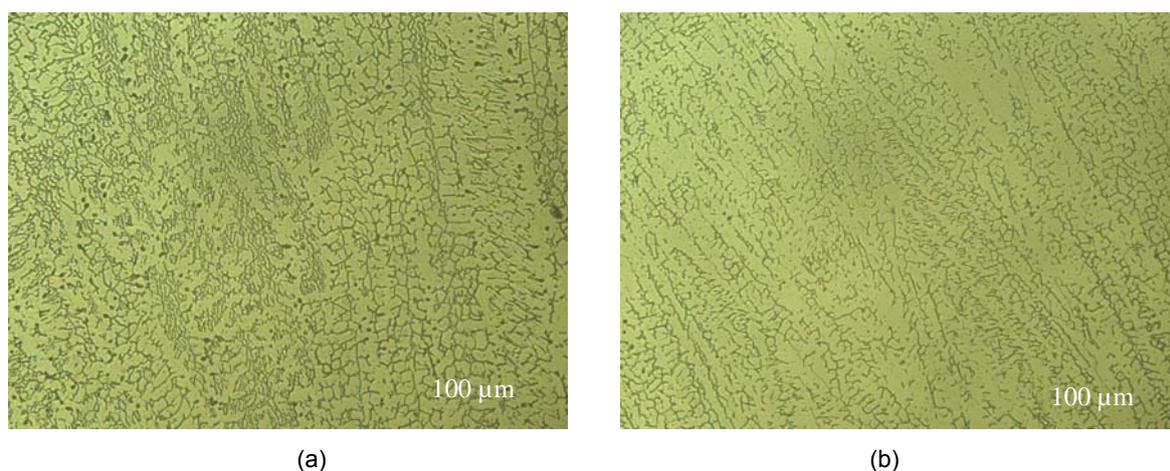


Figura 4. Micrografias óticas da zona fundida do aço inox AISI 347 soldado evidenciando a formação da ferrita delta (a) acicular e vermicular; e (b) de contorno de grão (CC, 200x).

As micrografias da zona fundida obtidas por MEV, especificamente na região do centro da solda, também mostra a microestrutura que se baseia em uma matriz

austenítica e ferrita delta presente em morfologias diversas. Estas micrografias são reveladas nas Figuras 5a e 5b.

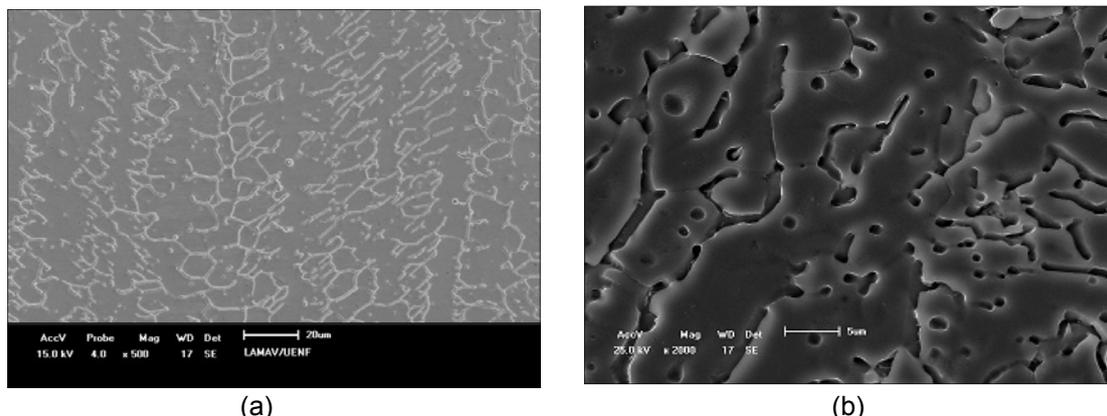


Figura 5. Micrografias por MEV da ZF do aço inox AISI 304 soldado evidenciando a formação da ferrita delta no centro da solda: (a) MEV-SE; e (b) MEV-BSE.

3.1.3 Material soldado e solubilizado

A microestrutura da zona fundida do material solubilizado também apresenta a matriz composta pela fase austenita e a ferrita delta precipitada no interior e nos contornos de grão. Porém esta última fase aparece em uma fração volumétrica inferior ao material na condição soldado, devido ao tratamento térmico de solubilização, como evidencia as Figuras 6a e 6b.

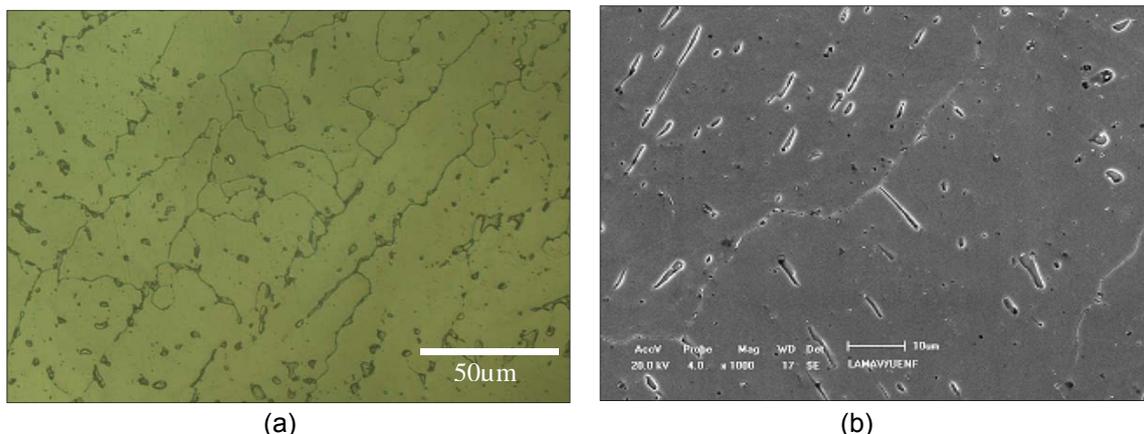


Figura 6. Micrografias da zona fundida do aço inoxidável AISI 304 soldado e solubilizado evidenciando a presença da ferrita delta (a) MO, 500x; e (b) MEV-SE, 1.000x.

3.2 Microdureza

Os valores de microdureza na zona fundida do aço inoxidável austenítico soldado e solubilizado e os valores médios para cada condição são mostrados na Tabela 3.

Tabela 3. Tabela comparativa dos valores de microdureza na ZF das amostras antes e após tratamento térmico de solubilização

Amostra		Ensaio de Microdureza (HV)										HV
Soldada	ZF	210	210	205	205	197	195	197	219	201	201	204
Solubilizada	ZF	197	180	191	187	194	205	201	191	189	198	193

3.3 Ensaios de Tração

Na Figura 7a é apresentada a curva de Tensão x Deformação de engenharia, referente ao material na condição de soldado. A curva Tensão x Deformação de engenharia correspondente ao material soldado e solubilizado é mostrada na Figura 7b.

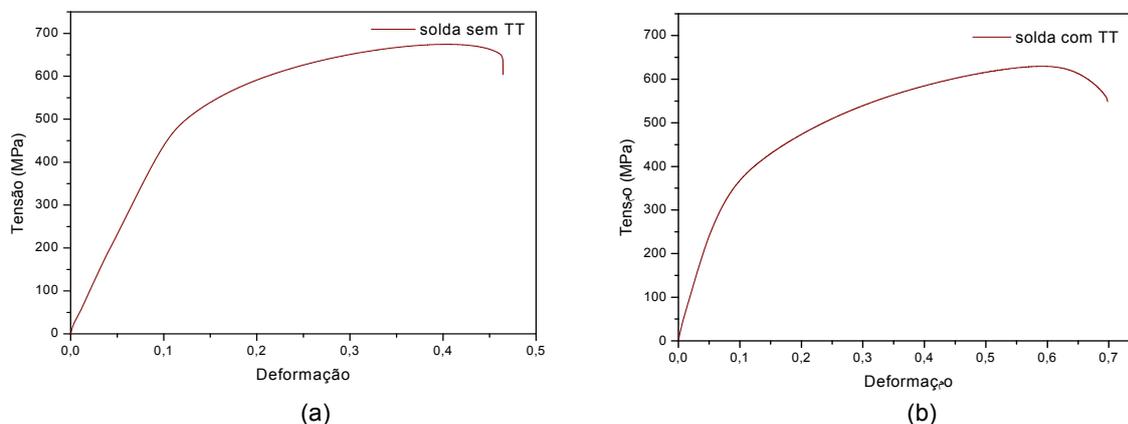


Figura 7. Curvas Tensão x Deformação de engenharia do corpo de prova: (a) soldado; e (b) solubilizado.

3.3.1 Microestrutura após ensaio de tração

A análise macroestrutural dos corpos de prova após o ensaio de tração indica que a fratura dos corpos de prova foi localizada próximo ao centro da Zona Fundida. As micrografias da Zona Fundida após a deformação são mostradas na Figura 8.

A microestrutura da zona fundida do material soldado, após deformação plástica do corpo de prova devido ao ensaio de tração, é apresentada na Figura 8a. Na condição soldado e solubilizado, a micrografia do material é mostrada na Figura 8b.

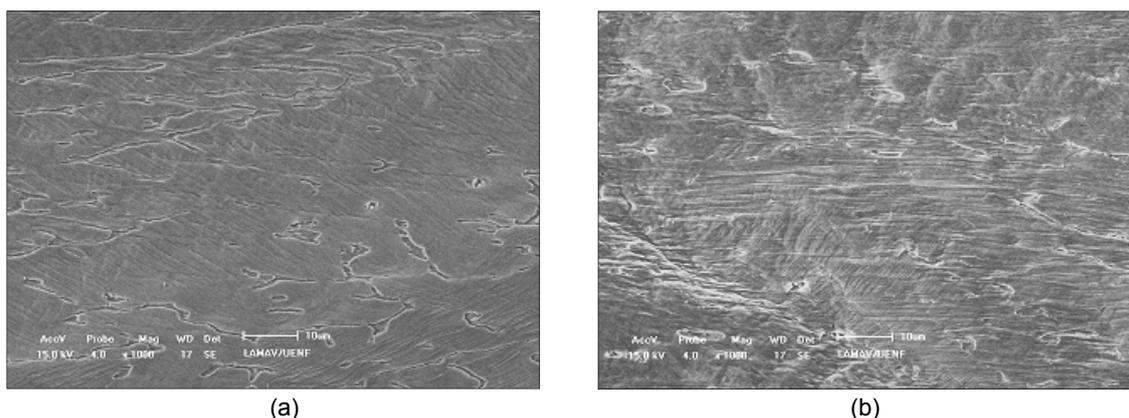


Figura 8. Micrografias ZF do material após ensaio de tração, MEV-SE, 1.000x: (a) soldado; e (b) solubilizado.

4 DISCUSSÃO

As micrografias da Figura 3 do aço inoxidável austenítico na condição de como recebido mostram uma microestrutura de grãos austeníticos poligonais não uniformes. No interior destes grãos podem ser observadas pequenas partículas de carbeto e maclas. Esta caracterização mostra a microestrutura típica de aços

inoxidáveis austeníticos. Por exemplo, no trabalho de Sasikala et al.,⁽²⁾ se determinou a presença de grãos equiaxiais na microestrutura inicial do AISI 316 e 316L(N).

Na Zona Fundida do AISI 347 sem tratamento térmico de solubilização, a microestrutura resultante é composta por uma matriz austenítica com a fase ferrita delta distribuída no interior desta matriz com diversas morfologias: vermicular, acicular e de Widmanstätten (Figuras 4a e 4b). A diferença entre as morfologias da ferrita delta presente se deve as condições de resfriamento fora do equilíbrio e a relação entre Cr/Ni.⁽³⁾

Em pesquisa realizada por Sasikala et al.,⁽²⁾ a ferrita delta presente também foi encontrada em uma morfologia vermicular, distribuída praticamente de forma uniforme numa matriz de austenita no aço inoxidável austenítico 316 SS e 316L(N) SS, após processo de solda. Microestruturas semelhantes também foram encontradas por Brooks e Thompson,⁽⁸⁾ nas zonas fundidas do AISI 308 e AISI 300. Nestes aços foram observadas a ferrita delta precipitada nas morfologias vermicular e de Widmanstätten (AISI 308) e laminar (AISI 300).

Após o aço inoxidável austenítico AISI 347 ser submetido ao tratamento térmico de solubilização a 1.060°C a fração volumétrica de ferrita delta presente diminui consideravelmente (Figuras 6a e 6b).

A determinação da fração volumétrica da ferrita delta no material soldado, quantificada pela técnica de contagem de pontos com aumentos de 200x e 400x, resultou em média de 23%. Após tratamento térmico de solubilização, esta fração volumétrica é reduzida para 5% em média.

Na comparação entre as curvas Tensão x Deformação de engenharia do corpo de prova soldado e com tratamento térmico de solubilização (Figuras 7a e 7b), é percebido uma diminuição nas propriedades de tensão de escoamento e resistência à tração no material solubilizado. Esta redução se deve à diminuição da fração volumétrica da ferrita delta, que atua como mecanismo de travamento das discordâncias, cuja movimentação é responsável pela deformação plástica do material.

Com a redução da fração de ferrita delta presente, menores valores de tensões serão necessários para dar início à deformação plástica e menor será o valor máximo da tensão aplicada que material suporta. Desta forma, os valores das tensões de escoamento e de resistência máxima a tração da amostra solubilizada serão inferiores. A ductilidade, porém, tem um aumento no material solubilizado, pois o material possui uma maior capacidade de se deformar plasticamente até a sua ruptura. Isto está de acordo com os valores de dureza encontrados, em que o valor desta propriedade diminui após a solubilização.

Segundo trabalho de Guan et al.,⁽⁹⁾ alterações nas propriedades mecânicas, como a resistência à tração e ductilidade em um aço inoxidável austenítico AISI 321 soldado, podem ser diretamente atribuídas à formação de fases secundárias, tais como carbeto do tipo $M_{23}C_6$ e fases intermetálicas como as fases σ e χ .

A Figura 8a apresenta uma micrografia da microestrutura da amostra soldada e deformada em tração. Observa-se que o empilhamento das discordâncias, formando bandas de deslizamento na matriz, é bloqueado sobre a ferrita delta que se encontra presente nos contornos de grão, isto pode originar a propagação de trinca através da ferrita delta.

Após o tratamento térmico de solubilização a micrografia da amostra submetida ao Ensaio de Tração (Figura 8b), mostram a ferrita delta orientada de acordo com a

direção da carga sob a qual o material foi submetido no ensaio. Pode ser evidenciado que a trinca se propaga ao longo da ferrita delta.

De acordo com pesquisa realizada por Guan et al.,⁽⁹⁾ com relação a trincas e fases precipitadas no aço inoxidável austenítico AISI 321 após processo de soldagem, é possível que a trinca formada se propague mais rapidamente ao longo da fase intermetálica σ , esta última dada a partir da dissolução da ferrita delta.

5 CONCLUSÃO

O aço inoxidável austenítico 347 apresenta uma microestrutura monofásica de grãos austeníticos com pequenas partículas de carbeto e maclas no seu interior. A zona fundida deste material é caracterizada de uma matriz austenítica e ferrita delta como fase dispersa com diferentes morfologias: vermicular, acicular e de Widmanstätten. A fração volumétrica da ferrita delta reduz com o tratamento térmico de solubilização a 1.060°C, diminuindo os valores da tensão de escoamento, tensão de resistência máxima a tração, porém aumentando a ductilidade. Existem evidências que a fratura ocorre por propagação da trinca na ferrita delta.

Agradecimentos

Os autores agradecem à UENF pela ajuda para realizar o presente trabalho.

REFERÊNCIAS

- 1 VASUDEVAN, M.; BHADURI, A.K.; BALDEV, R.; PRASAD, R. Delta ferrite prediction in stainless steel welds using neural network analysis and comparison with other prediction methods. *Journal of Materials Processing Technology*, v.142, n.1, p. 20-28, 2003.
- 2 SASIKALA, G.; MATHEW, M. D.; BHANU SANKARA RAO, K.; MANNAN, S. L. Creep deformation and fracture behavior of types 316 and 316L(N) stainless steel and their weld metals. *Metallurgical and Materials Transactions A*, v.31, n. 4, p. 1175-1185, abril 2000.
- 3 BROOKS, J. A.; WILLIAMS, J. C.; THOMPSON, A. W. Trends in welding research, OHIO: Ed. S. A. David, 1982, p. 331-335.
- 4 MODENESI, P. J. Soldabilidade dos Aços Inoxidáveis. São Paulo: Ed. SENAI – SP, 2001, p. 36-49.
- 5 ASM HANDBOOK, Properties and Selection: Irons, Steels and High-Performance Alloys, OHIO: Ed. ASM INTERNATIONAL Handbook Committee, v.1, 1995.
- 6 AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS (ASTM), Standard practices for detecting susceptibility to intergranular attack in austenitic stainless steels; A262-86. Philadelphia, v. 03.02, p. 1-18, 1990.
- 7 PILKEY, W. D. Peterson's Stress Concentration Factors. New York: Ed. Wiley Interscience Publication, 1997, p. 86.
- 8 BROOKS, J. A.; THOMPSON, A. W. Microstructural development and solidification cracking susceptibility of austenitic stainless steel welds. *International Materials Reviews*, v.36, n.1, p. 16-44, 1991.
- 9 GUAN, K. S.; XU, X. D.; ZHANG, Y. Y.; WANG, Z. W. Cracks and precipitate phases in 321 stainless steel weld of flue gas pipe. *Engineering Failure Analysis*, v. 12, n. 4, p. 623-633, august 2005.