

INFLUÊNCIA DO TRATAMENTO TÉRMICO DE ESTABILIZAÇÃO NA RESISTÊNCIA À CORROSÃO INTERGRANULAR DO AÇO INOXIDÁVEL AISI 347 FUNDIDO¹

Sérgio Souto Maior Tavares²
Vanessa Moura de Souza³
José Adailson de Souza⁴
Aline Yae Kina⁵

Resumo

Os aços inoxidáveis austeníticos estabilizados ao Nb, tal como o AISI 347, podem ser utilizados em elevadas temperaturas (500°C-800°C), devido a boa resistência à fluência da estrutura austenítica. A adição de Nb é feita para provocar a precipitação de carbonetos finos que endurecem e evitam a sensitização do material. Neste trabalho foi investigada a importância dos tratamentos térmicos de solubilização e estabilização de estruturas brutas de fusão do aço AISI 347. Como principais resultados, conclui-se que em peças fundidas e juntas soldadas para utilização em altas temperaturas a seqüência de solubilização (1100°C) e estabilização na faixa de 850°C a 950°C deve ser realizada para se evitar a precipitação de carbonetos de cromo e conseqüente corrosão intergranular. O aumento do tempo de solubilização a 1100°C promove uma maior dissolução da ferrita delta e redistribuição do Nb, aumentando, dessa forma, a resistência à corrosão intergranular após estabilização.

Palavras-chave: Aço AISI 347; Sensitização; Estabilização.

INFLUENCE OF STABILIZATION HEAT TREATMENT ON THE INTERGRANULAR CORROSION RESISTANCE OF CAST AISI 347 STAINLESS STEEL

Abstract

Nb-stabilized austenitic stainless steels (AISI 347, 321,...) can be selected to high temperature services (500°C-800°C), due to the high creep resistance of austenitic structure. Nb is added to form NbC fine carbides, which has two main functions: prevent intergranular corrosion and increase creep resistance. In the present work we investigated the importance of the solution and stabilization treatment in cast structures of AISI 347 steel. It was found that weld joints and cast components to be used at high temperatures must be solution treated at 1100°C and stabilized in the 850°C – 950°C range to avoid chromium carbide precipitation and intergranular corrosion. The increase of the solution treatment time dissolves more delta ferrite and promotes a higher corrosion resistance after stabilization.

Key-words: AISI 347 steel; Intergranular corrosion; Stabilization.

¹ Contribuição técnica ao 62º Congresso Anual da ABM – Internacional, 23 a 27 de julho de 2007, Vitória – ES, Brasil.

² D.Sc., Professor Adjunto do Departamento de Engenharia Mecânica (TEM) e do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica (PGMEC) da Universidade Federal Fluminense – UFF.

³ Aluna de iniciação científica do curso de graduação em Engenharia Química da Universidade Federal Fluminense – UFF.

⁴ Doutorando do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica (PGMEC) da Universidade Federal Fluminense – UFF.

⁵ Aluna de iniciação científica do curso de graduação em Engenharia Química da Universidade Federal Fluminense – UFF.

INTRODUÇÃO

O aço inoxidável AISI 347 é do tipo austenítico estabilizado ao Nb. A adição de Nb, em cerca de 10 vezes o teor de carbono em peso, tem como função provocar a precipitação de carbonetos NbC que evitam a sensitização e aumentam a resistência à fluência.^[1]

Os aços estabilizados AISI 347 e AISI 321 trabalhados podem ser então utilizados em temperaturas na faixa de 500 a 800°C, mas para tal devem passar por um tratamento térmico de estabilização. A estabilização deve provocar a precipitação dos carbonetos (NbC ou TiC), retirando todo carbono de solução sólida. A Figura 1 mostra de forma esquemática as curvas TTT dos carbonetos de nióbio (NbC) e cromo (Cr_{23}C_6). É interessante notar que, caso um aço solubilizado a cerca de 1100°C, venha a ser utilizado na faixa de 500 a 800°C, deve experimentar primeiramente a formação de Cr_{23}C_6 , e não do carboneto NbC. Dessa forma, a estabilização em temperaturas próximas ao nariz da curva do carboneto NbC torna-se fundamental para aplicações na faixa de sensitização (450°C-800°C).

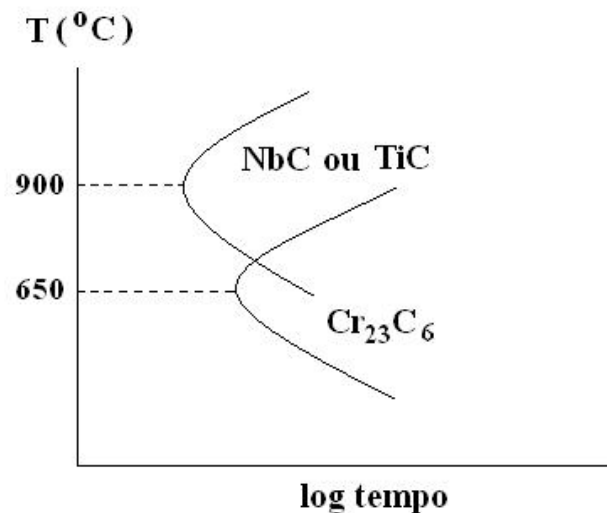


Figura 1: Curvas TTT esquemáticas para precipitação dos carbonetos de Nb e Cr nos aços inoxidáveis austeníticos.

Neste trabalho, investigamos os processos de estabilização e sensitização do aço AISI 347 com estrutura bruta de fusão, tal como encontrado em juntas soldadas e peças fundidas.

MÉTODOS EXPERIMENTAIS

Arames de solda TIG com a composição mostrada na Tabela 1 foram fundidas em forno a arco do Laboratório de Metalografia e Tratamentos Térmicos da UFF.

Tabela 1: Composição química do aço estudado (% em peso).

C	Si	Mn	S	P	Cr	Nb	Mo	Cu	Ni
0,045	0,870	1,460	0,012	0,016	19,100	0,550	0,030	0,070	9,650

As amostras fundidas foram, em seguida, tratadas termicamente de diversas formas, conforme esquematizado na Figura 2. Parte das amostras foi solubilizada e estabilizada e outra parte foi estabilizada sem solubilização prévia. Após o tratamento de estabilização as amostras foram sensitizadas a 600°C por 24h e 48h. Amostras fundidas, sem qualquer tratamento térmico, também foram sensitizadas. Os tratamentos de solubilização foram realizados a 1100 por 1h ou 5h, seguido de resfriamento rápido em água.

A resistência à corrosão intergranular foi avaliada por ensaios de polarização eletroquímica de reativação cíclica, citados na literatura internacional como EPR-DL (*electrochemical potentiodynamic reactivation-double loop*).^[2] Este ensaio foi realizado à temperatura ambiente em uma célula convencional de três eletrodos em uma solução 0,5 M H₂SO₄ + 0,01 M KSCN. Os eletrodos de trabalho foram preparados embutindo-se a amostra a ensaiar em resina e lixando-os até a lixa 400. Um fio de platina foi utilizado como contra-eletródo. Um eletródo de calomelano saturado foi usado como referência. O ensaio consiste em realizar uma varredura de potencial no sentido anódico a partir do potencial de circuito aberto (potencial de corrosão, E_{corr.}) até 0,3 V, quando a varredura passa a ser no sentido catódico até retornar ao E_{corr.}. Em todos os ensaios a velocidade de varredura adotada foi 1mV/s, nos sentidos anódico e catódico. O grau de sensitização medido por este ensaio é dado pela relação I_r/I_a, sendo I_r a corrente máxima do pico de reativação e I_a a corrente máxima do pico de ativação (Figura 3).

As microestruturas das amostras foram analisadas por microscopia ótica e eletrônica de varredura, e por difração de raios-X. As amostras para microscopia foram atacadas eletroliticamente em solução 10% de ácido oxálico e com ataque de Behara.^[3] A difração de raios-X foi realizada em difratômetro Phillips X'Pert com tubo de cobalto e monocromador.

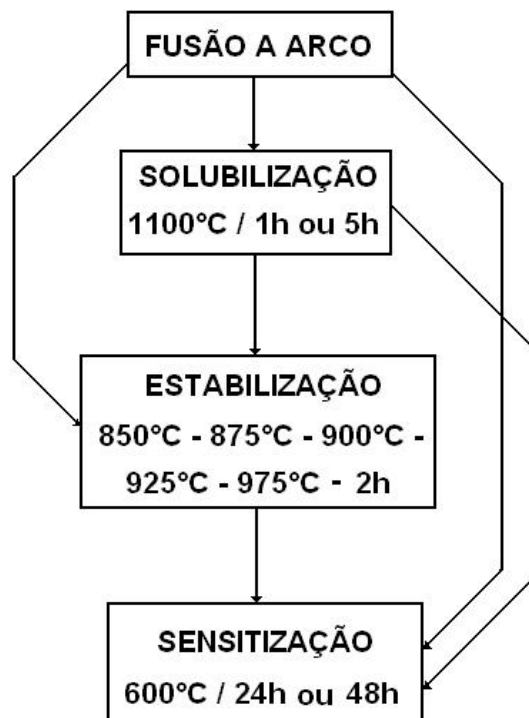


Figura 2: Esquema de produção das amostras.

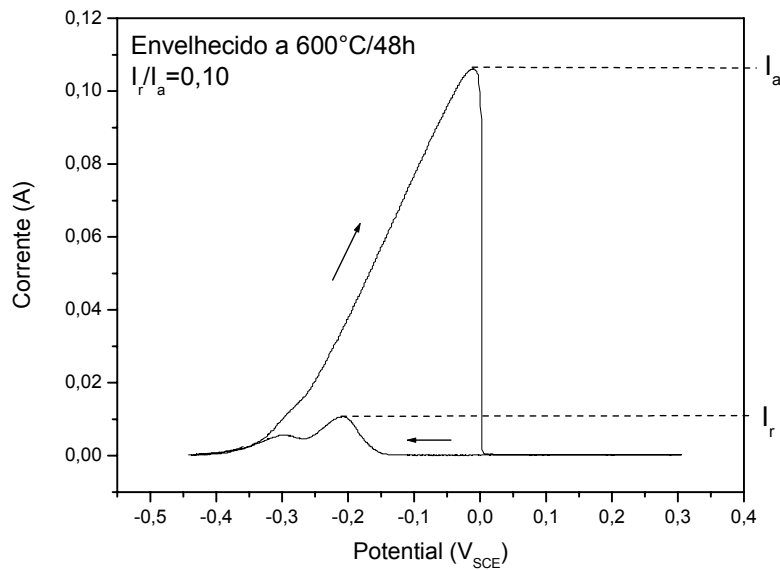


Figura 3: Curva de EPR da amostra fundida e sensitizada a 600°C por 24 horas. $I_r/I_a = 0,10$.

RESULTADOS

As Figuras 4(a-b) mostram a microestrutura do material como fundido, contendo austenita e ferrita delta. Um estudo por espectroscopia por energia dispersiva (EDS) em microscópio eletrônico de varredura, comparando as composições das duas fases presentes no material, mostra que o nióbio é concentrado na ferrita delta (Figura 5).

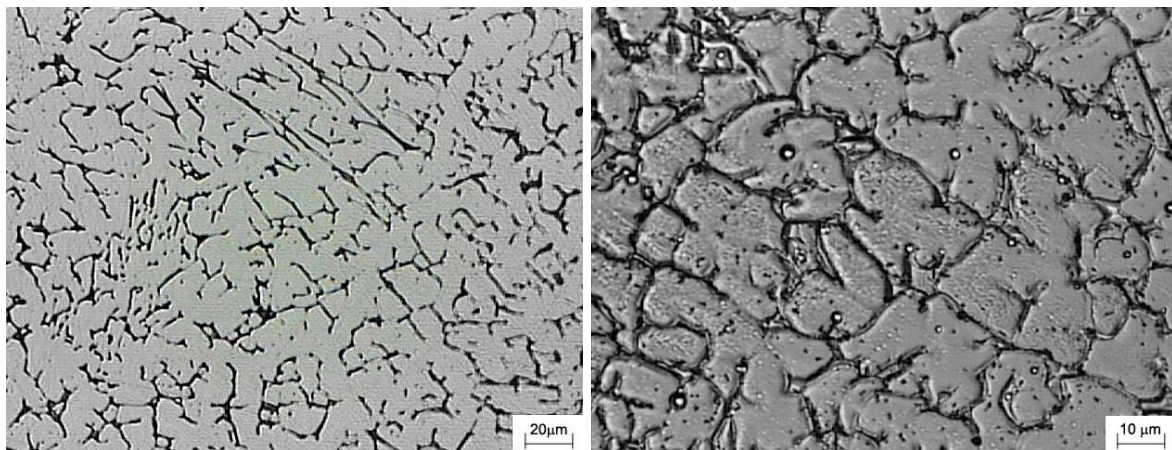


Figura 4: Microestrutura do material bruto de fusão: (a) ataque de Behara; (b) ataque eletrolítico com solução de ácido oxálico.

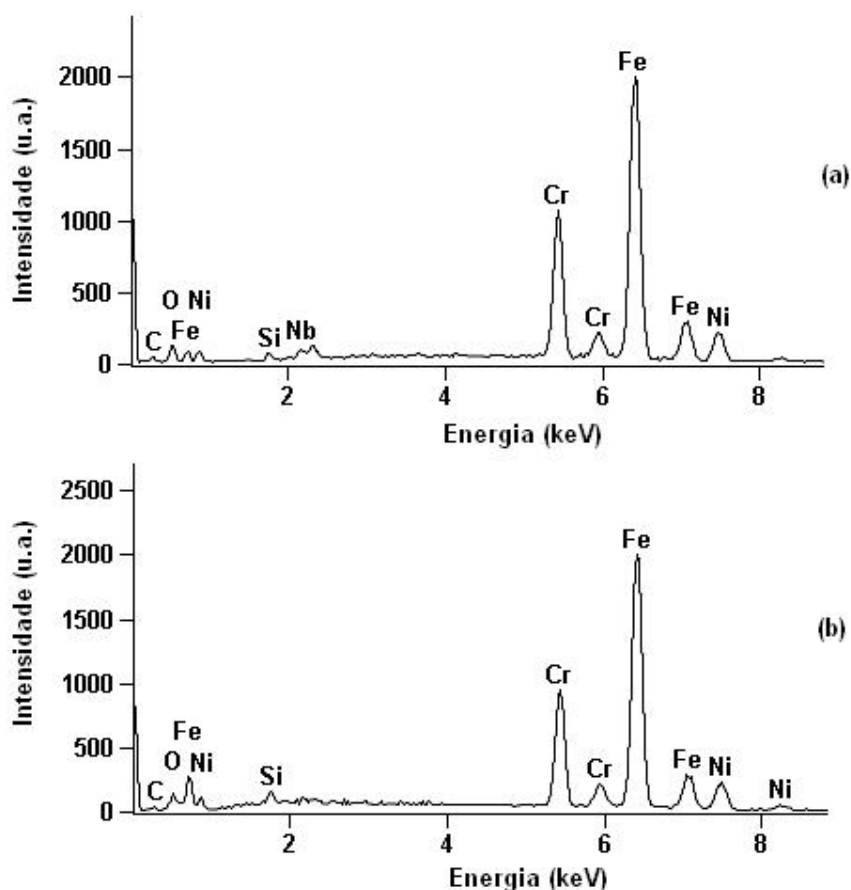


Figura 5: Espectro de EDS da amostra fundida: (a) ferrita delta; (b) austenita.

O material fundido não se encontra sensitizado, pois a alta velocidade de resfriamento evita a precipitação de carbonetos de cromo. Entretanto, se a estrutura bruta de fusão é envelhecida a 600 °C ocorre intensa precipitação de Cr_{23}C_6 , conforme observado na figura 6(a). O ensaio de EPR nesta condição mostra o aspecto típico de material sensitizado (Figura 3).

A Figura 6(b) mostra a microestrutura do material fundido e estabilizado a 850 °C, e em seguida envelhecido a 600 °C. O que se observa é que, apesar da precipitação fina de NbC na austenita, o material também sofre severa sensitização. As Figuras 7(a-b) mostram as curvas de EPR das amostras que, sem solubilização prévia, foram estabilizadas a 850 °C e 875 °C, e finalmente envelhecidas a 600 °C. Em todos os casos a estabilização não foi efetiva em evitar a sensitização do material a 600 °C.

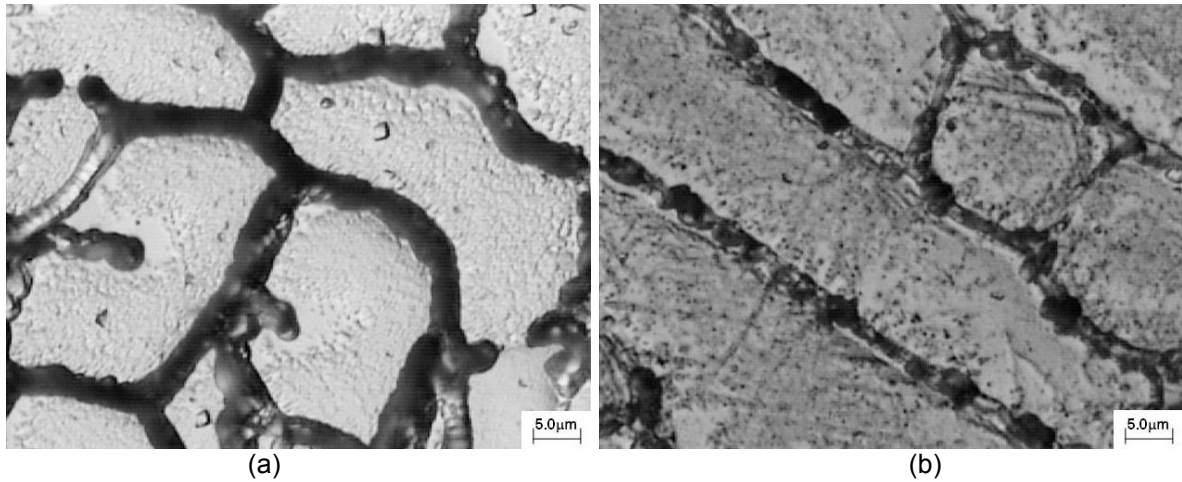


Figura 6: Microestruturas obtidas com ataque eletrolítico em ácido oxálico: (a) Material envelhecido a 600°C por 48 horas; (b) material estabilizado a 850°C e envelhecido a 600°C por 24 horas.

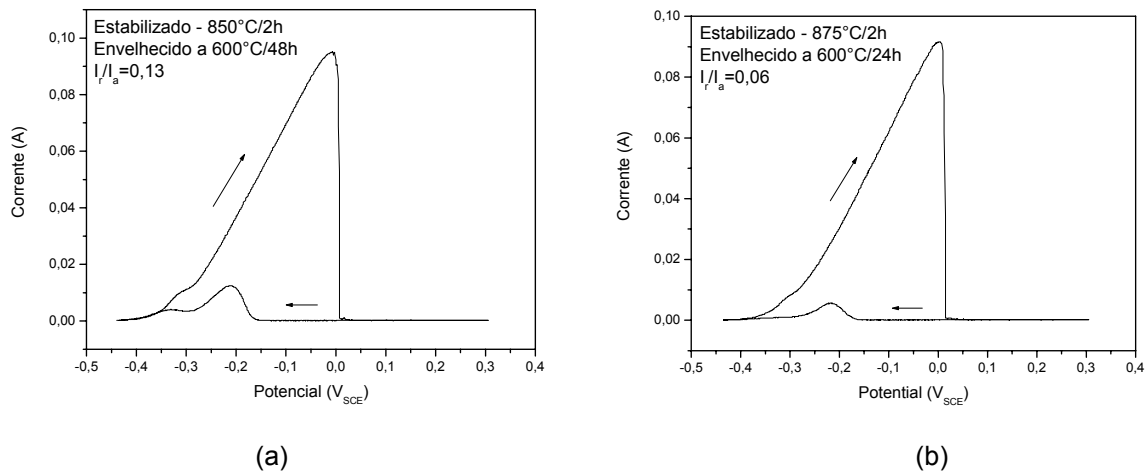


Figura 7: Curvas de EPR de amostras estabilizadas a 850°C (a) e 875°C (b), e envelhecidas a 600°C.

A Figura 8 mostra o comportamento do grau de sensibilização, medido pela razão I_r/I_a em função da temperatura de estabilização para as amostras estabilizadas com e sem solubilização prévia a 1100°C por 1 hora. Observa-se, portanto, um grande decréscimo dos valores de I_r/I_a devido à realização do tratamento de solubilização antes da estabilização, para todas as temperaturas de estabilização experimentadas, exceto 975°C. Estes resultados também mostram que a máxima temperatura de estabilização do material solubilizado a 1100°C por 1h deve ser 950°C.

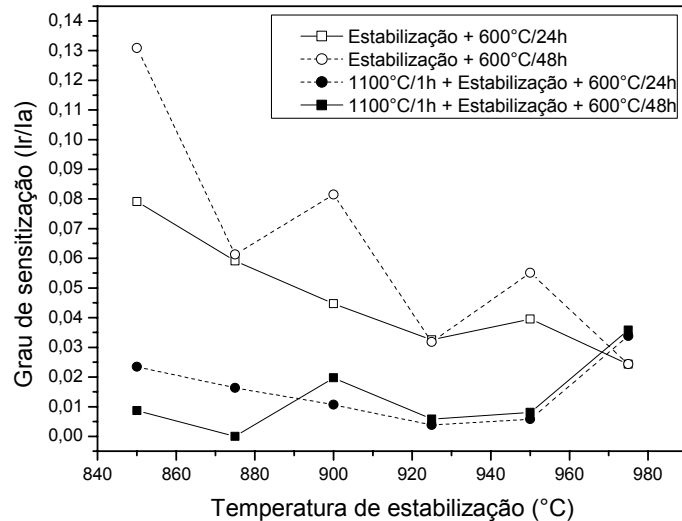


Figura 8: Comportamento do grau de sensibilização em função da temperatura de estabilização para amostras com e sem solubilização prévia a 1100°C por 1 hora.

O tratamento de solubilização melhora os efeitos da estabilização posterior pois dissolve parte da ferrita delta e promove a redistribuição do Nb, elemento que deve se combinar com o carbono da liga e, assim, evitar a precipitação dos carbonetos de cromo. Apesar da grande melhoria obtida com a solubilização a 1100°C por 1 hora, os valores de I_r/I_a ainda apresentam um pequeno pico de reativação, conforme mostrado na Figura 9. O aumento do tempo de solubilização para 5h produz resultados ainda mais satisfatórios, conforme mostrado na comparação da Figura 10.

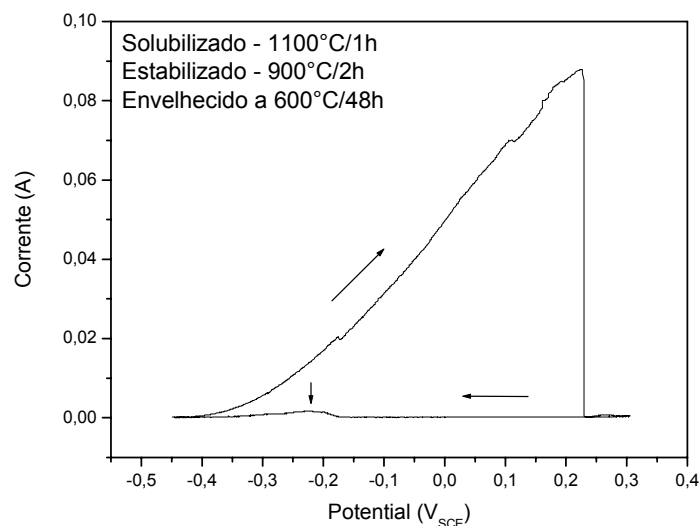


Figura 9: Curva de EPR do material solubilizado a 1100°C por 1h, estabilizado a 900°C e envelhecido a 600°C por 48h.

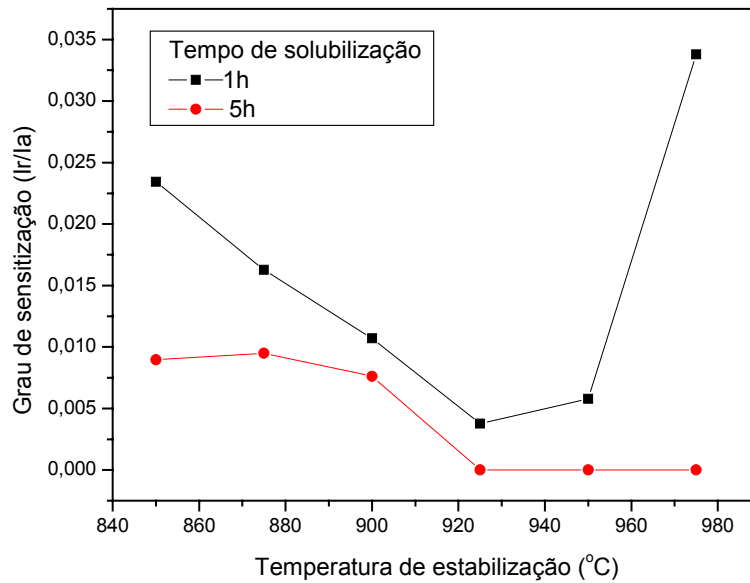


Figura 10: Comportamento do grau de sensitação em função da temperatura de estabilização para amostras com e sem solubilização prévia a 1100°C

A Figura 11(a) apresenta a microestrutura da amostra solubilizada a 1100°C por 1 hora, onde se pode ainda observar grande quantidade de ferrita delta, com alta concentração de nióbio. O aumento do tempo de solubilização para 5h promove uma maior dissolução da ferrita delta e, conseqüentemente uma melhor redistribuição do Nb. Essa diferença microestrutural explica os valores mais baixos de Ir/Ia das amostras solubilizadas por 5h e estabilizadas. É interessante notar que até mesmo a estabilização a 975°C é efetiva quando se realiza a solubilização por 5h.

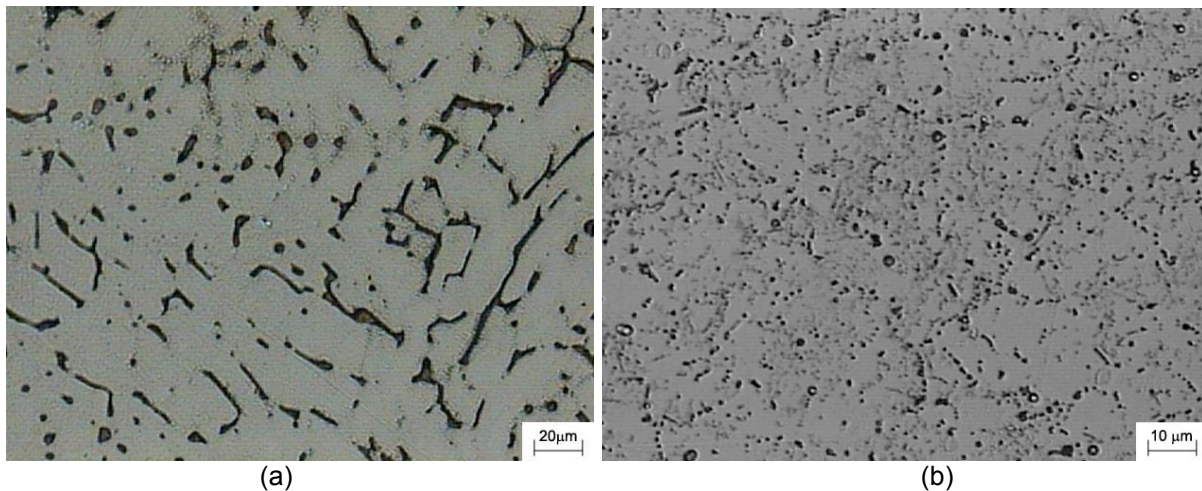


Figura 11: Microestruturas das amostras solubilizadas por 1h (a) e 5h (b).

CONCLUSÕES

Os ensaios de corrosão por polarização eletroquímica de reativação cíclica (aqui chamados de DL-EPR), realizados no aço inoxidável AISI 347 fundido, permitiram concluir que um tratamento térmico de solubilização a 1100°C, antecedendo os tratamentos térmicos de estabilização na faixa de 850°C a 975°C, é de extrema importância para utilização do material em temperaturas na faixa de 500 a 800°C.

Ao aumentar o tempo de solubilização a 1100°C, de 1h para 5h, observou-se uma maior resistência à corrosão intergranular do aço nas condições citadas.

As amostras que não foram submetidas a um tratamento prévio de solubilização apresentaram elevado índice de I_r/I_a , o que corresponde a um elevado grau de sensibilização.

REFERÊNCIAS

- 1 J. Enerman, M. Schwind, H.-O. Andren, J.-O Nilsson, A. Wilson, J. Agren, *Acta Mater.* **54** (2006) 67-76.
- 2 N. Lopez, M. Cid, M. Puiggali, I. Azkarate, A. Pelayo, *Mat. Science and Eng. A* **229** (1997) 123.
- 3 Vander Voort, *Metallography-Principles and Practices*, McGraw-Hill, 1984.