

EFEITO DE DIFERENTES TRATAMENTOS TÉRMICOS NAS PROPRIEDADES FÍSICAS DE CHAPAS SOLDADAS DO AÇO INOXIDÁVEL DUPLEX UNS S32304*

Gabriela Aksascki Caetano¹

Temístocles de Souza Luz²

Lucas Mirandola Coelho³

Jesualdo Luiz Rossi⁴

Marcos Tadeu D'Azeredo Orlando⁵

Resumo

O aço inoxidável duplex UNS S32304 tem sido investigado desde 2012 como candidato para construção de um receptáculo para transporte de material radioativo associado ao futuro Reator Multipropósito Brasileiro (RMB). O foco deste trabalho é avaliar o efeito das diferentes temperaturas de tratamento térmico nas propriedades físicas de chapas de UNS S32304 com espessura de 1,8 mm após processo de soldagem TIG autógeno. Utilizou-se corrente pulsada com polaridade direta, gás de proteção com uma mistura de argônio e 2% de nitrogênio e um sistema de acionamento automático com controle digital dos parâmetros. Os corpos de prova soldados e como recebido foram tratados termicamente durante 8h a temperaturas de 475, 600 e 750 °C em forno tipo mufla programável, com precisão de ± 5 °C com subsequente resfriamento ao ar. Estas amostras foram submetidas a ensaios de tração no simulador termomecânico Gleeble[®] 3800 (LNNano - CNPEM) e Gleeble[®] 3500 acoplado a difração de raios X com Luz Síncrotron (LNLS – CNPEM) com taxa de deformação de 10^{-4} s⁻¹. Comprovou-se que somente a amostra tratada a 600 °C mostrou um comportamento tensão-deformação similar à amostra como recebida. O tratamento a 600 °C em amostras soldadas é indicado por ser o mais adequado, apresentando limite de resistência à tração e alongamento superior à amostra somente soldada e sem tratamento térmico.

Palavras-chave: Aço inoxidável duplex; Tratamento térmico; Simulador termomecânico; Soldagem TIG.

EFFECT OF HEAT TREATMENTS ON THE PHYSICAL PROPERTIES IN UNS S32304 DUPLEX STAINLESS STEEL WELDED PLATES

Abstract

The duplex stainless steel UNS S32304 has been investigated since 2012 as a candidate for the construction of a receptacle for the transport of radioactive material associated with the future Brazilian Multipurpose Reactor (RMB). This work was focused on the effect of different heat treatment temperatures on the physical properties of UNS S32304 in samples with 1.8 mm of thickness after autogenous GTAW welding process. Pulsed current was used with direct polarity, argon and 2% of nitrogen as shielding gas and an automatic drive system with digital control of the parameters. The welded and received specimens were heat treated for 8h at 475, 600 and 750 °C in a programmable muffle furnace, with accuracy of ± 5 °C, and subsequent air cooling. These samples were submitted to stress tests in the thermal-mechanical simulator Gleeble[®] 3800 (LNNano - CNPEM) and Gleeble[®] 3500 coupled to X-ray diffraction with synchrotron radiation (LNLS - CNPEM) using deformation rate of 10^{-4} s⁻¹. It was verified that only samples treated at 600 °C showed a stress-strain behavior similar to samples as received. The heat treatment at 600 °C in the

welded sample indicated to be the most adequate, resulting in a maximum tensile stress and ductility higher than the welded sample without heat treatment.

Keywords: Duplex stainless steel; Heat treatment; Thermal-mechanical simulator; GTAW welding.

- ¹ *Bacharel em Engenharia Mecânica, Mestranda do departamento de Engenharia Mecânica, UFES, Vitória, Espírito Santo, Brasil.*
- ² *Bacharel em Engenharia Mecânica, Professor Doutor do departamento de Engenharia Mecânica, UFES, Vitória, Espírito Santo, Brasil.*
- ³ *Graduando em Engenharia Mecânica, monitor do laboratório de soldagem do departamento de Engenharia Mecânica, UFES, Vitória, Espírito Santo, Brasil.*
- ⁴ *Bacharel em Engenharia de Materiais, Professor Doutor do Instituto de Pesquisas Energéticas e Nucleares, IPEN, São Paulo, São Paulo, Brasil.*
- ⁵ *Bacharel em Física, Professor Doutor do departamento de Engenharia Mecânica, UFES, Vitória, Espírito Santo, Brasil.*

1 INTRODUÇÃO

Os aços inoxidáveis duplex (AIDs) são compostos por uma estrutura mista de ferrita e austenita, em proporções aproximadamente iguais, onde a austenita contribui com a tenacidade ao impacto, enquanto a ferrita melhora a resistência à tração e soldabilidade. Em termos corrosivos o balanço dessas fases contribui para um alto valor de PREN (Índice de resistência à corrosão por pites de aços inoxidáveis duplex) que mantém elevada a resistência à corrosão global do aço [1-6].

A excelente combinação de propriedades mecânicas e de resistência à corrosão dos AIDs torna este material bastante atrativo do ponto de vista econômico e tecnológico [1,4,7,8,9], o que é consequência do equilíbrio das fases ferrítica e austenítica, condição que é alcançada através de tratamento térmico de solubilização, seguido de um resfriamento rápido para evitar a precipitação de outras fases [10].

Essas precipitações ocorrem numa faixa de temperatura de 300 a 1000 °C, como resultado de condições de serviço, ciclos térmicos de soldagem ou tratamentos térmicos, e torna mais propensa a transformação da fase ferrítica em compostos intermetálicos (σ , χ), nitretos, carbonetos e a fase α' , que podem levar a redução de tenacidade, ductilidade e da resistência à corrosão [1,3,7,10].

Os AIDs têm sido desenvolvidos para terem uma excelente soldabilidade. Uma vez que grande parte das aplicações atuais desses aços envolve algum processo de soldagem [2,10]. Contudo, a exposição do material a ciclos térmicos durante o processo de soldagem favorece a precipitação de fases deletérias, modifica a microestrutura e as propriedades do aço [11] e leva ao desenvolvimento de tensões residuais na junta soldada, que podem gerar formação de trincas e maior propensão para a ocorrência de fadiga ou fratura frágil [12]. Além disso, durante a soldagem, há um desbalanceamento no equilíbrio de fases, devido às elevadas taxas de resfriamento.

Tratamentos térmicos são realizados para que o material atinja determinadas propriedades mecânicas, que visam à remoção de tensões, aumento da resistência mecânica, melhora da ductilidade, usinabilidade, resistência ao desgaste, entre outros [7,13].

As simulações físicas são capazes de reproduzir condições reais em um laboratório, através da combinação de ciclos mecânicos e térmicos, permitindo simular condições de processamento de materiais.

Corpos de prova foram submetidos a diferentes temperaturas de tratamento térmico visando avaliar os efeitos sobre as propriedades mecânicas pós-soldagem do AID UNS S32304.

Este trabalho apresenta um estudo restrito sobre o efeito dos tratamentos térmicos nas propriedades mecânicas do AID UNS S32304, através de ensaios de tração em um simulador termomecânico. Ressalta-se que este material é candidato a revestimento externo do receptáculo para transporte de materiais radioativos do Reator Multipropósito Brasileiro (RMB).

2 DESENVOLVIMENTO

2.1 Materiais e Métodos

Utilizou-se tiras de um AID de baixa liga, caracterizado como UNS S32304 com espessura de 1,8 mm e 72,0 mm de largura. O material foi fornecido em fitas metálicas que foram produzidas pelo processo de laminação a quente seguido de

tratamento térmico a 1050 °C e resfriamento ao ar. A composição química foi caracterizada por fluorescência de raios X (FRX) em um espectroscópio da marca Shimadzu, modelo EDX-720, e está exposta na Tabela 1.

Tabela 1. Composição química do AID UNS S32304 analisada por FRX

| %Mn | %Cr | %Ni | %Mo | %Cu | %Fe |
|----------|-----------|----------|----------|----------|--------|
| 1,57 (2) | 22,55 (1) | 3,47 (1) | 0,24 (2) | 0,36 (1) | 73 (1) |

A soldagem das chapas foi do tipo união através do procedimento TIG autógeno, com utilização da máquina de solda Digiplus A7 da IMC Soldagem. Para garantir a repetibilidade dos parâmetros, utilizou-se um processo automatizado que manteve constantes a velocidade e a tensão de soldagem. Um sistema da SPS - Sistemas e Processos de Soldagem, modelo MCS 2000, permitiu o suporte e a movimentação da tocha, com controle automático de altura do arco (AVC) através do monitoramento da tensão de soldagem, referenciado por valor pré-estabelecido. O aparato experimental encontra-se na Figura 1.

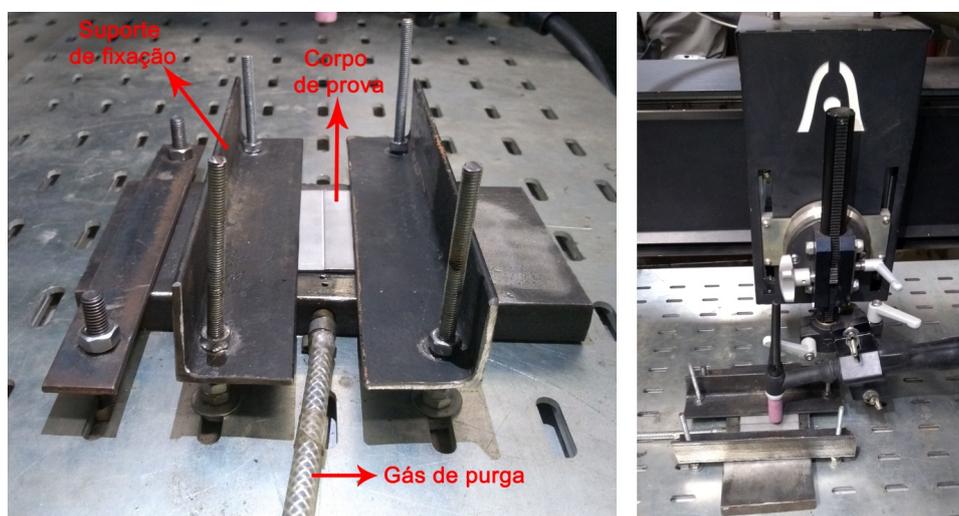


Figura 1. Aparato de soldagem TIG para as chapas de aço inoxidável duplex UNS S32304.

Além disso, para assegurar o controle digital dos parâmetros, utilizou-se um sistema de aquisição dos sinais de soldagem da IMC Soldagem que possibilita o acompanhamento em tempo real da soldagem e, através da aquisição desses sinais, uma avaliação das condições e/ou instabilidades do ensaio realizado.

As chapas soldadas foram retiradas do suporte de fixação somente após atingirem a temperatura ambiente, para evitar variação da taxa de resfriamento de um corpo de prova para outro, o que poderia interferir no balanço microestrutural do aço. As temperaturas foram coletadas por um pirômetro Fluke 574 – 3V.

Utilizou-se corrente pulsada com polaridade direta, gás de proteção com uma mistura de argônio (Ar) e 2% de nitrogênio (N₂) com vazão de 10 L/min e gás de purga com uma mistura de Ar e 10% de N₂ com mesma vazão, com o intuito de proteger a poça de fusão contra oxidação e evitar as perdas de N₂ na raiz da solda. Vale ressaltar que a atmosfera controlada no processo de soldagem tem o objetivo de manter o balanço das fases ferrítica/austenítica próxima ao ideal na zona fundida (ZF) e na zona termicamente afetada (ZTA) conforme observado por [14], já que o nitrogênio é um elemento estabilizante da austenita, que aumenta seu teor e permite a difusão do nitrogênio para a mesma durante a soldagem, evitando a precipitação de nitretos [2,3].

O eletrodo utilizado foi de tungstênio dopado com 2% de tório e afiado a 60°. Os demais parâmetros utilizados na soldagem estão expostos na Tabela 2.

Tabela 2. Parâmetros de soldagem TIG para chapas do aço inoxidável duplex UNS S32304

| Corrente média | Corrente de base | Corrente de pico | Tensão Média | Velocidade | Tempo de pico | Tempo de base |
|----------------|------------------|------------------|--------------|------------|---------------|---------------|
| 143 A | 106 A | 180 A | 13 V | 37 cm/min | 8,3 ms | 8,3 ms |

As Figuras 2A e 2B mostram os corpos de prova já usinados de acordo com o croqui fornecido pelo LNNano/LNLS para atender as especificações do simulador termomecânico Gleeble® (Figura 2C).

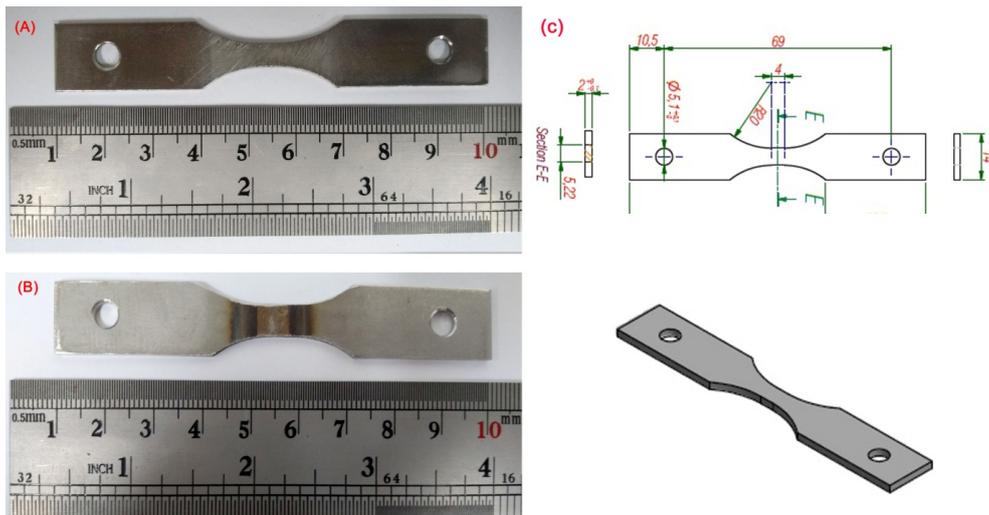


Figura 2. Corpos de prova do AID UNS S32304 usinados: (A) material sem solda e (B) material soldado. (C) Dimensões do corpo de prova utilizado na Gleeble®.

Os corpos de prova foram desbastados lateralmente em um centro de usinagem da marca Romi, modelo D600. Os furos foram realizados em furadeira de coluna manual da marca Kone, modelo KM32, e o raio foi usinado em uma fresadora ferramenteira da marca WMW.

Os tratamentos isotérmicos foram realizados nos corpos de prova sem solda e após soldagem a fim de verificar o efeito da temperatura no material estudado. O tratamento térmico ocorreu em forno tipo mufla programável, na região de gradiente de ± 2 °C, com precisão de ± 5 °C, nas temperaturas de 475 °C, 600 °C e 750 °C todos com duração de 8 horas e resfriados ao ar, conforme esquema da Figura 3.

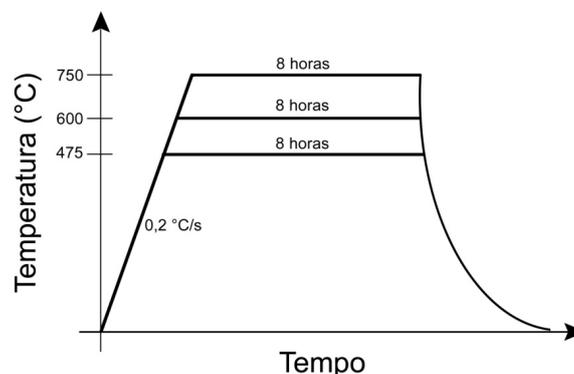


Figura 3. Esquema do tratamento térmico realizado nos corpos de prova do AID UNS S32304 com e sem solda.

Ensaio de tração foram realizados em um simulador termomecânico Gleeble® modelo 3800, instalado no Laboratório Nacional de Nanotecnologia (LNNano) e em um em um simulador termomecânico Gleeble® modelo 3500 acoplado a difração de raios X (DRX) com Luz Síncrotron, instalado na linha XTMS no Laboratório Nacional de Luz Síncrotron (LNLS), ambos localizados no Centro Nacional de Pesquisa em Energia e Materiais (CNPEM).

Os corpos de prova foram montados dentro de uma câmara bombeada a vácuo, com pressão mínima de 10^{-2} Torr. A tensão mecânica foi aplicada ao longo da direção de laminação com uma taxa de deformação de 10^{-4} s⁻¹. E a energia utilizada na medida de DRX foi de 6,093 keV ($\lambda = 0,203497$ nm).

2.2 Resultados e discussão

A Figura 4 mostra as curvas Tensão–Deformação de engenharia obtidas nos ensaios de tração para dois corpos de prova em cada condição estudada, com exceção da amostra na condição como recebida (CR). Os números 475, 600 e 750 equivalem às temperaturas dos tratamentos térmicos realizados.

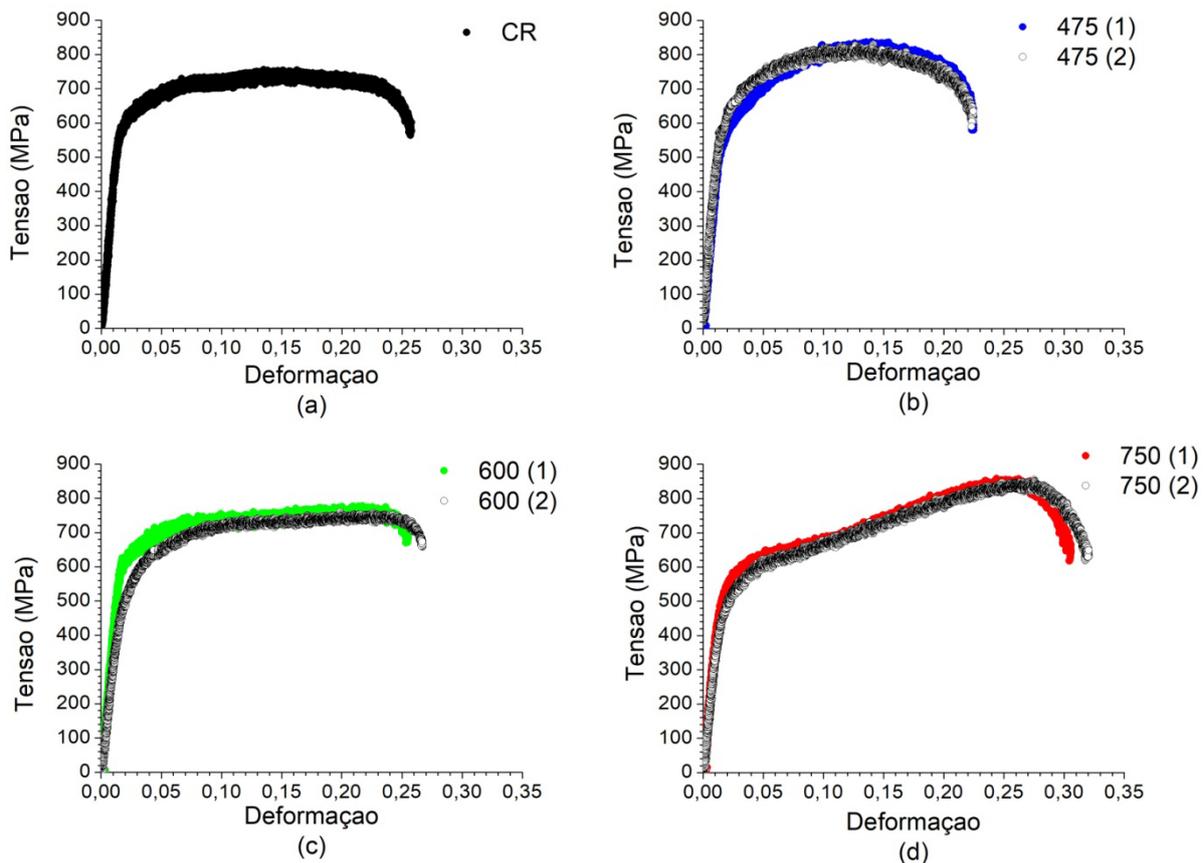


Figura 4. Curvas Tensão x Deformação de engenharia para dois corpos de prova do AID UNS S32304 em cada condição estudada, com exceção da amostra como recebida (a), amostras tratadas termicamente a (b) 475 °C, (c) 600 °C e (d) 750 °C obtidas no simulador Gleeble® 3800.

Como houve um comportamento similar em cada condição, selecionou-se uma curva de cada situação estudada conforme Figura 5.

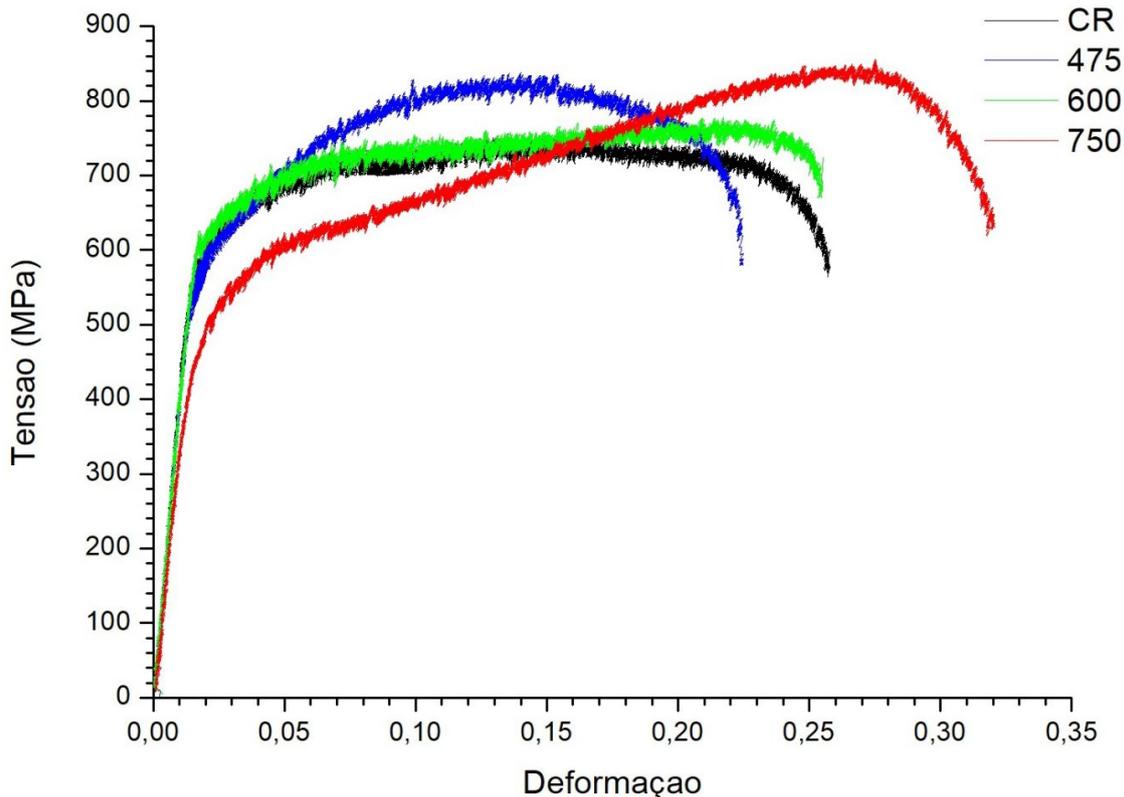


Figura 5. Curvas Tensão x Deformação de engenharia das amostras do AID UNS S32304 nas condições como recebida (CR) e tratada termicamente a 475, 600 e 750 °C obtidas no simulador Gleeble® 3800.

As principais propriedades mecânicas obtidas a partir destas curvas são apresentadas na Tabela 3.

Tabela 3. Principais propriedades mecânicas das amostras do AID UNS S32304 nas condições como recebida (CR) e tratada termicamente a 475, 600 e 750 °C

| Amostra | Tensão de escoamento (MPa) | Limite de resistência à tração (MPa) | Alongamento (%) |
|---------|----------------------------|--------------------------------------|-----------------|
| CR | 537 ± 27 | 736 ± 27 | 25,7 |
| 475 °C | 555 ± 31 | 820 ± 31 | 22,4 |
| 600 °C | 605 ± 13 | 760 ± 13 | 25,4 |
| 750 °C | 442 ± 39 | 835 ± 39 | 32,0 |

O resultado experimental exposto na Figura 5 foi alcançado mediante repetibilidade do ensaio de tração, ou seja, as respostas obtidas foram muito próximas quando se aplicou repetidamente as mesmas condições de ensaios para cada um dos dois corpos de prova. Pode-se notar que no início do carregamento, ainda na região elástica, as tensões são bem próximas. Contudo, as propriedades diferem a partir do limite de escoamento.

A amostra tratada a 475 °C apresenta menor alongamento, o que pode estar relacionado à precipitação de fases deletérias. Uma das fases, conhecida como alfa linha (α'), é a principal causa do endurecimento, fragilização e perda de tenacidade dos AIDs nesta temperatura, que é conhecida como temperatura de fragilização [2,11]. As outras fases precipitadas são a austenita secundária (γ_2) e nitreto de cromo (Cr_2N), que foram observadas por [1,4,10,15,16].

O tratamento térmico a 600 °C manteve a característica da curva tensão-deformação de engenharia e suas principais propriedades mecânicas bem próximas da amostra como recebida, o que é justificado tendo em vista a menor precipitação de fases deletérias nesta temperatura, conforme investigado por outros autores [1,7,8,9,17].

A temperatura de tratamento térmico de 750 °C, apesar de mostrar melhores valores de limite de resistência à tração e alongamento, favorece a precipitação de fases deletérias, como γ_2 , Cr_2N e fase sigma (σ) conforme reportado na literatura [2,9,10,15,16,17].

Como a amostra tratada termicamente a 600 °C apresentou maior similaridade das propriedades mecânicas em relação à amostra como recebida, o que é desejável por manter as propriedades originais do material como recebido, decidiu-se fazer uma investigação comparativa das amostras soldadas sem tratamento térmico e com tratamento térmico. Deve-se destacar que como a amostra tratada a 750 °C apresentou o maior alongamento e o maior limite de resistência à tração, essa temperatura também foi investigada por DRX com Luz Síncrotron para a amostra soldada.

A Figura 6 mostra as curvas Tensão–Deformação de engenharia das amostras apenas soldada (Solda), soldada com subsequente tratamento térmico a 600 °C (Solda + 600) e soldada com subsequente tratamento térmico a 750 °C (Solda + 750) durante 8h seguido de resfriamento ao ar.

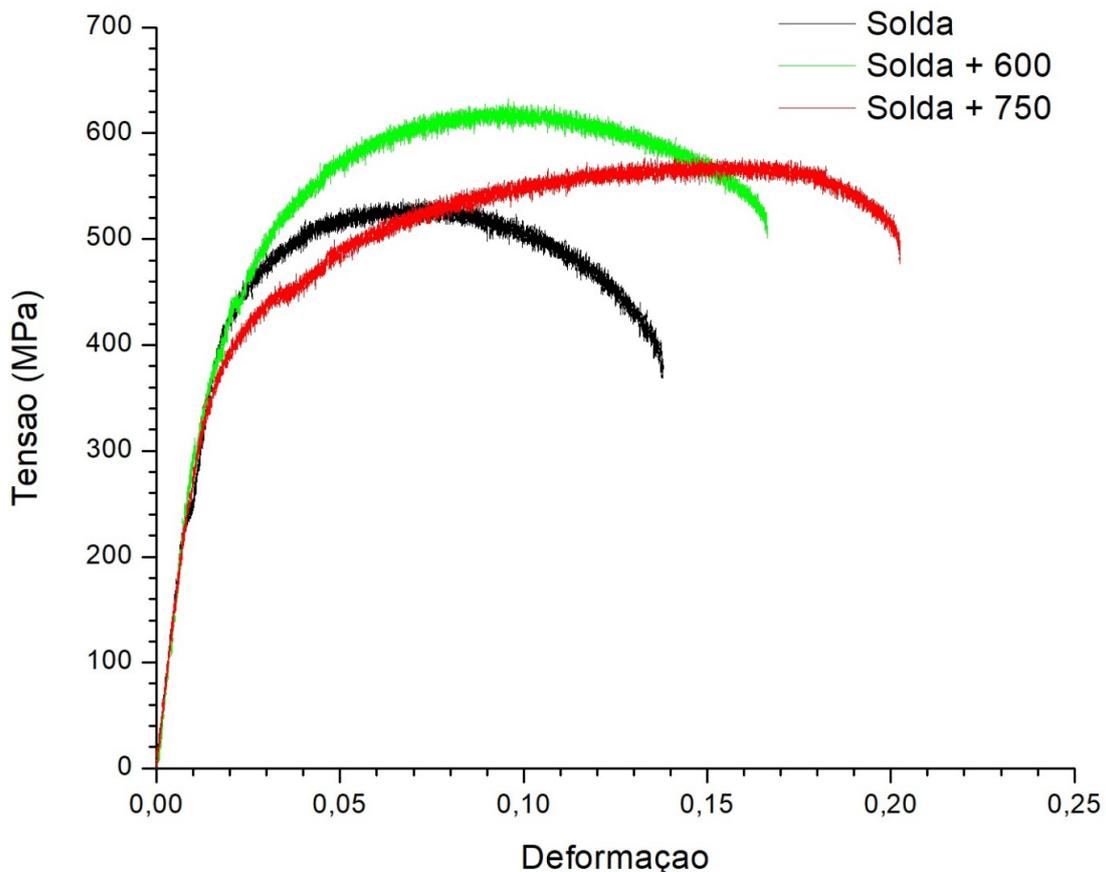


Figura 6. Curvas Tensão x Deformação de engenharia das amostras do AID UNS S32304 nas condições soldada (Solda), soldada com posterior tratamento térmico a 600 °C (Solda + 600) e soldada com posterior tratamento térmico a 750 °C (Solda + 750) obtidas no simulador Gleeble® 3500 acoplado a DRX.

As principais propriedades mecânicas obtidas a partir destas curvas são apresentadas na Tabela 4.

Tabela 4. Principais propriedades mecânicas das amostras do AID UNS S32304 nas condições soldada (Solda), soldada com posterior tratamento térmico a 600 °C (Solda + 600) e soldada com posterior tratamento térmico a 750 °C (Solda + 750)

| Amostra | Tensão de escoamento (MPa) | Limite de resistência à tração (MPa) | Alongamento (%) |
|-------------|----------------------------|--------------------------------------|-----------------|
| Solda | 379 ± 15 | 525 ± 15 | 13,8 |
| Solda + 600 | 376 ± 28 | 617 ± 28 | 16,6 |
| Solda + 750 | 368 ± 22 | 566 ± 22 | 20,2 |

A Figura 7 mostra de forma gráfica as propriedades mecânicas das amostras soldadas com e sem tratamento térmico a 600 °C e a 750 °C.

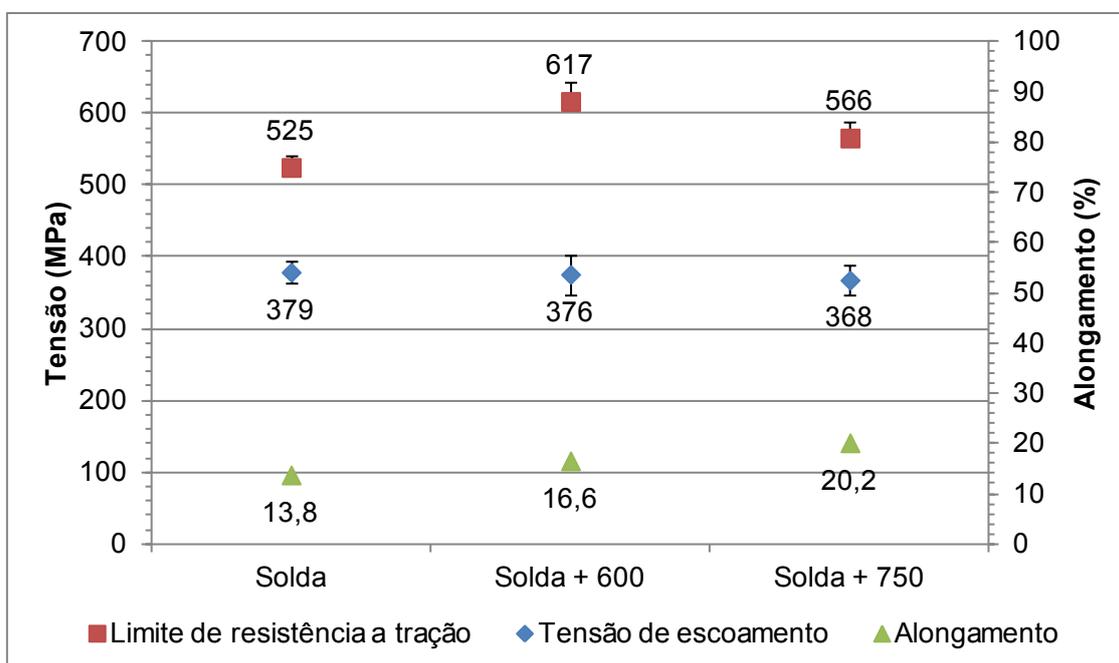


Figura 7. Principais propriedades mecânicas das amostras do AID UNS S32304 nas condições soldada (Solda), soldada com posterior tratamento térmico a 600 °C (Solda + 600) e soldada com posterior tratamento térmico a 750 °C (Solda + 750).

O tratamento térmico a 600 °C na amostra soldada promoveu melhora nos valores de limite de resistência à tração e alongamento em relação à amostra soldada sem tratamento térmico. Para o limite de escoamento, a redução foi inferior a 1% e se encontra dentro da barra de erros.

Em relação à amostra soldada com posterior tratamento térmico a 750 °C verificou-se que há um aumento considerável no valor do alongamento, conforme aconteceu para as amostras apenas tratadas nesta mesma temperatura, contudo houve perda na resistência mecânica.

Além disso, é possível observar pelos difratogramas (Figura 8), obtidos na linha XTMS do LNLS simultaneamente com o ensaio de tração, que para a amostra soldada e tratada a 750 °C houve alargamento do pico da fase ferrítica (α) a 60° (seta vermelha), o que indica que há precipitação de outras fases.

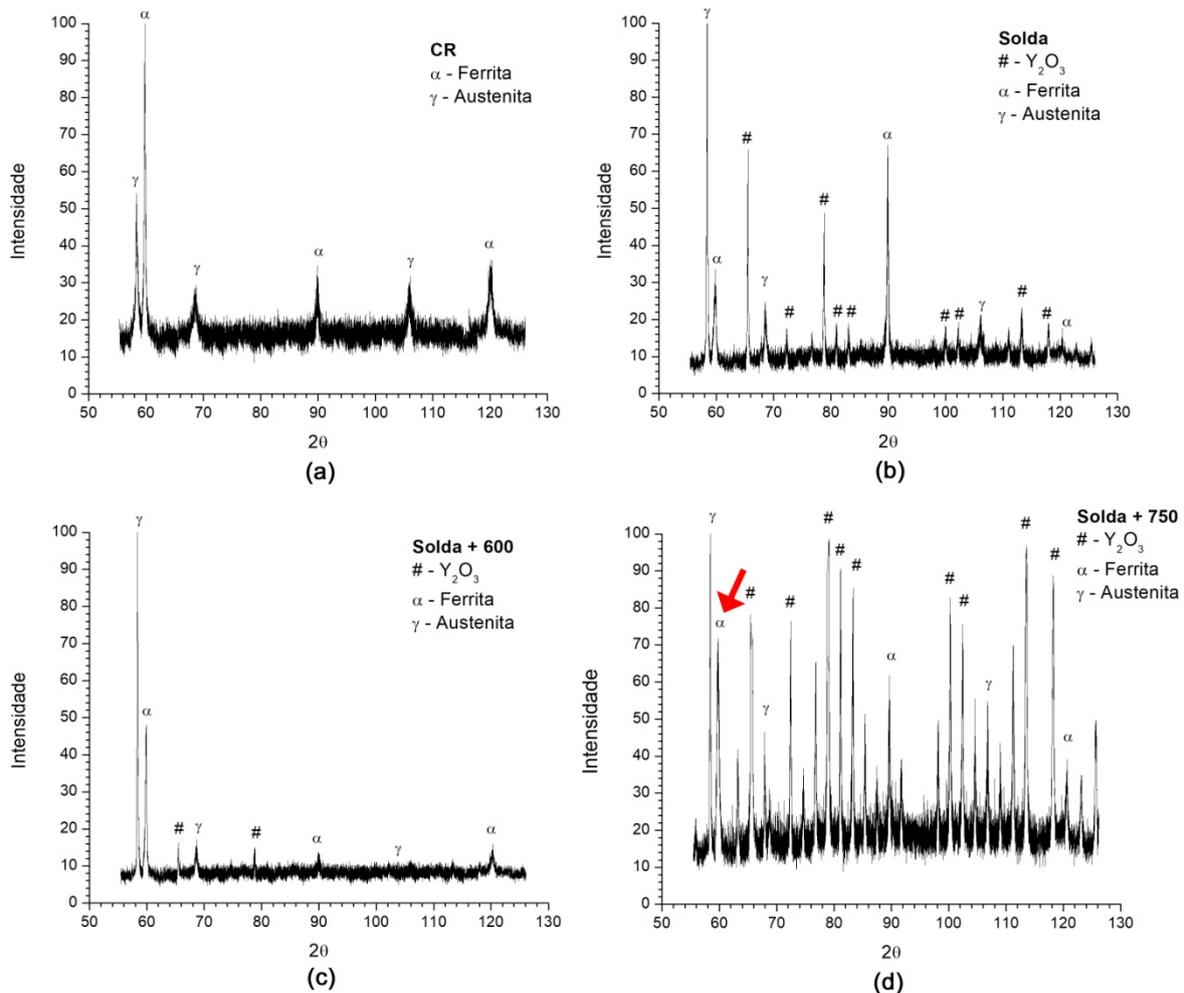


Figura 8. Comparação dos difratogramas característicos obtidos simultaneamente com ensaio de tração na linha XTMS do LNLs de algumas das chapas do AID UNS S32304 na condição (a) como recebida, (b) soldada, (c) soldada com subsequente tratamento térmico a 600 °C e (d) soldada com subsequente tratamento térmico a 750 °C. $\lambda = 0,203497$ nm. O composto Y_2O_3 (#) foi utilizado como calibre interno para avaliação do deslocamento dos picos das amostras.

O feixe de raios X gerado por Luz Síncrotron é monocromático e tem uma secção transversal de 1 mm². Portanto eles iluminam apenas regiões específicas da amostra. As Figuras 8b, 8c e 8d representam difratogramas obtidos na região fundida da solda. Nota-se claramente que na zona fundida a proporção entre a fase ferrítica (α) e austenítica (γ) sofre uma modificação de seu balanceamento quando comparado à condição como recebida (Figura 8a). Em especial verifica-se que a solda tratada posteriormente com 600 °C por 8h apresenta somente os picos associados às fases γ e α . Amostras soldadas e posteriormente tratadas a 750 °C apresentam picos de difração extras, o que indicam presença de outras fases.

A Figura 8d é um caso representativo de outras amostras similares. Constata-se que a zona fundida da amostra soldada e posteriormente tratada a 750 °C apresenta um aumento singular da fração da fase ferrítica, indicando a formação de fases intermetálicas que se precipitam no interior da ferrita, consumindo-a. A presença de picos extras (além das fases γ , α e #) comprova a formação de fases intermetálicas. Esse comportamento da zona fundida da amostra soldada e tratada termicamente a 750 °C (Figura 8d) já tinha sido observado em outro trabalho [15], que estudou a

influência de diferentes tratamentos térmicos em amostras de AID UNS S32304, através de DRX e microscopia óptica.

O difratograma de raios X da Figura 8c indica que a região do cordão de solda, após ser tratado a 600 °C por 8h não apresenta sinais de fases intermetálicas.

Estudos já realizados sobre tensões residuais [18] para este mesmo material, sob mesma condição de soldagem, comprovam que o tratamento térmico a 600 °C promove o alívio de tensões residuais, sem que ocorra a precipitação de fases intermetálicas.

Portanto, os resultados obtidos por difração de raios X com Luz Síncrotron na região da zona fundida indicam claramente que o tratamento térmico a 600 °C com 8h de encharque apresenta o melhor resultado, tendo em vista o benefício obtido no alívio de tensões residuais, já reportado na literatura [18], bem como o ganho na resistência mecânica e alongamento aliado a menor precipitação de fases deletérias.

3 CONCLUSÃO

Este estudo comprovou que as amostras sem solda e apenas tratadas a 600 °C por 8h apresentaram um comportamento tensão-deformação similar à amostra como recebida. Com base nestes resultados, este trabalho indica ser o tratamento térmico de 600 °C por 8h o mais adequado para amostras soldadas utilizando o processo TIG autógeno com gás de proteção com uma mistura de argônio e 2% de nitrogênio, objetivando o alívio das tensões residuais geradas pela solda.

Ressalta-se que o comportamento observado para as amostras soldadas com subsequente tratamento térmico a 600 °C apresentaram concordância com as amostras sem solda que foram somente tratadas a 600 °C.

Adicionalmente, o estudo revelou que as amostras soldadas com subsequente tratamento térmico a 600 °C apresentaram limite de resistência à tração e alongamento superior às amostras soldadas sem tratamento térmico aliado a menor precipitação de fases deletérias.

Portanto, concluiu-se que o tratamento térmico a 600 °C com encharque de 8h para as amostras soldadas mostrou-se o mais adequado para otimizar as propriedades físicas do aço inoxidável duplex UNS S32304.

Agradecimentos

Os autores agradecem a CAPES – Pró-Estratégia 2224/2012 e ao CNPQ pelas bolsas e ao LNNano (proposta: STC 22766), LNLS (proposta: XTMS 20170659) e ao CNPEM pelo apoio na utilização da Gleeble® e difração de raios X com Luz Síncrotron.

REFERÊNCIAS

- 1 Charles J. Duplex stainless steels, a review after DSS'07 held in Grado. *Revue de Métallurgie*. 2008; 155–171.
- 2 Gunn RN. Duplex stainless steel: microstructure, properties and application. Abington: Woodhead Publishing Ltd; 1997.
- 3 Lippold JC, Kotecki DJ. *Welding Metallurgy and Weldability of Stainless Steel*. Hoboken: John Wiley & Sons, 2005.
- 4 Sahu JK, Krupp U, Ghosh RN, Chrit H-J. Effect of 475 °C embrittlement on the mechanical properties of duplex stainless steel. *Materials Science and Engineering A*. 2009; 508: 1-14.

- 5 Hwang H, Park Y. Effects of heat treatment on the phase ratio and corrosion resistance of duplex stainless steel. *Materials Transactions*. 2009; 50: 1548–1552.
- 6 Ha H-Y, Jang M-H, Lee T-H, Moon J. Interpretation of the relation between ferrite fraction and pitting corrosion resistance of commercial 2205 duplex stainless steel. *Corrosion Science*. 2014; 89: 154-162.
- 7 IMO. Orientações práticas para processamento dos aços inoxidáveis Duplex. 2ª edição. Londres: International Molybdenum Association; 2012.
- 8 Pohl M, Storz O, Glogowski T. Effect of intermetallic precipitations on the properties of duplex stainless steel. *Materials Characterization*. 2007; 58: 65-71.
- 9 Nilsson JO. Super duplex stainless steels. *Materials Science and Technology*. 1992; 8: 685-700.
- 10 Londoño AJR. Precipitação de fases intermetálicas e austenita secundária na ZAC de soldagens multipasse de aços inoxidáveis duplex. Tese de doutorado. Escola Politécnica da Universidade de São Paulo. 2001.
- 11 Ramirez AJ, Lippold JC, Brandi SD. The Relationship between Chromium Nitride and Secondary Austenite Precipitation in Duplex Stainless Steels. *Metallurgical and Materials Transactions A*. 2003; 34A: 1575-1597.
- 12 Marques PV, Modenesi PJ, Bracarense AQ. Soldagem. Fundamentos e tecnologia. 3ª edição. Belo Horizonte: Editora UFMG, 2011.
- 13 Callister WD, Rethwisch DG. Ciência e Engenharia de Materiais: Uma Introdução. 8ª edição. John Wiley & Sons; 2008.
- 14 Santos RS. Influência do efeito da temperatura de pré-aquecimento, do tipo de corrente e do gás de proteção na soldagem de chapas finas de aço inoxidável duplex UNS S31803. Dissertação de Mestrado. Universidade Federal do Espírito Santo. 2016.
- 15 Machado CdSC. Perfis de tensão residual do aço duplex UNS S32304 submetido a diferentes processos de soldagem TIG e condições de tratamento térmico. Dissertação de Mestrado. Universidade Federal do Espírito Santo. 2015.
- 16 Milagre MX. Perfis de tensão residual do aço duplex UNS S32304 submetido a processo de soldagem TIG e diferentes condições de tratamento térmico de têmpera. Dissertação de Mestrado. Universidade Federal do Espírito Santo. 2015.
- 17 Calliari I, Brunelli K, Zanellato M, Ramous E, Bertelli R. Microstructural modification during isothermal ageing of a low nickel duplex stainless steel. *J Mater Sci*. 2009; 44: 3764-3769.
- 18 Milagre MX, Machado CSC, Orlando MTD, Rossi JL, Martinez LG, Macêdo MCS, Scandian C. Efeito do tratamento térmico na magnitude das tensões residuais do aço inoxidável duplex UNS S32304. In *Anais do V Encontro Científico de Física Aplicada; Blucher Proceedings*. 2014; 1: 118-121. ISSN 2358-2359.