

CARACTERIZAÇÃO DE UMA JUNTA SOLDADA DE INCONEL 625 OBTIDA PELO PROCESSO FRICTION STIR WELDING

Douglas Martinazzi¹
Guilherme Vieira Braga Lemos¹
Alexandre Bellegard Farina²
Luciano Bergmann³
Jorge Fernandez dos Santos³
Afonso Reguly¹

Resumo

Uma liga a base de Níquel, popularmente conhecida como Inconel 625[®], foi estudada no presente trabalho. O processo *Friction Stir Welding* (FSW) foi realizado com duas velocidades de rotação da ferramenta (1200 e 200 rpm) e velocidade de soldagem entre 1 mm/s. Adicionalmente, análises metalográficas e de microdureza foram realizadas nas juntas soldadas. A aplicação da soldagem no estado sólido foi efetiva e ocasionou um aumento de dureza nas juntas soldadas. Notou-se que um aporte térmico reduzido (velocidade rotação 200 rpm) é aconselhável de modo a produzir juntas soldadas livres de defeitos. Por outro lado, um maior velocidade de rotação (1200 rpm) causou um aumento excessivo no aporte térmico e a presença de porosidades.

Palavras-chave: Inconel 625[®]; Soldagem por fricção e mistura mecânica; Velocidade de rotação da ferramenta; Microestrutura.

CHARACTERIZATION OF A FRICTION STIR WELDED INCONEL 625 JOINT

Abstract

A Nickel superalloy, Inconel 625[®], was studied in the current work. Friction Stir Welding was carried out with tool rotational speeds ranging from 1200 to 200 rpm and welding speed between of 1 mm/s. In addition, metallographic and microhardness analyzes were performed in the joints. The solid state process was effective and resulted in increased microhardness in the welded joints. Finally, it is suggested that a lower heat input leads to sound welds. Increasing the tool rotational speed (1200 rpm) achieved a higher heat input and porosity formation.

Keywords: Inconel 625[®]; Friction stir welding; Tool rotational speed; Microstructure.

1 INTRODUÇÃO

A liga 625 (UNS N06625) é comumente utilizada na indústria aeroespacial, nuclear, óleo e gás devido as suas propriedades de elevada resistência mecânica e excelente resistência à corrosão [1,2]. Tradicionalmente, a união de materiais a base de Níquel é realizada através de processos de soldagem com fusão como o eletrodo revestido, MIG, TIG, entre outros [2,3]. Porém é sabido que estes processos de união promovem a solidificação do material e podem resultar em uma série de problemas relacionados à segregação, porosidades, distorção e tensões residuais [3,4]. Na zona afetada pelo calor (ZAC), ainda pode ocorrer a precipitação

de carbonetos, fases Laves e delta e o crescimento de grãos [5]. Sendo assim, um método moderno de união onde as temperaturas alcançadas são suficientes para que ocorra a recristalização, sem que ocasione a fusão do material, como o processo *Friction Stir Welding* [6] pode aumentar a resistência mecânica de juntas soldadas de Inconel 625 [7] e também evitar os problemas da soldagem tradicional com fusão. Neste contexto, o princípio básico do processo é resumido por meio da Figura 1. Os números indicam as principais variáveis envolvidas neste método, são elas: 1) peça de trabalho, 2) ferramenta de soldagem, 3) ombro

¹Programa de Pós-graduação em Engenharia de Minas, Metalúrgica e de Materiais - PPG3M, Universidade Federal do Rio Grande do Sul - UFRGS, Porto Alegre, RS, Brasil. E-mail: martinazzi.douglas@gmail.com

²Centro de Pesquisa e Desenvolvimento, Villares Metals S/A, Sumaré, SP, Brasil.

³Helmholtz-Zentrum Geesthacht - HZG, Institute of Materials Research, Materials Mechanics, Solid-State Joining Processes -WMP, Geesthacht, Germany.



da ferramenta, 4) pino da ferramenta, 5) face da solda, 6) o lado de retrocesso da solda, 7) o lado de avanço da solda e 8) buraco de saída.

Neste processo de união, o movimento realizado por uma ferramenta rotativa a partir de uma máquina rígida proporciona uma ação contínua de trabalho a quente que plastifica o metal no estado sólido. A junta soldada é formada pela mistura do metal quente, o qual é resfriado naturalmente logo após a passagem da ferramenta formando a junta soldada. Como nenhum material de adição é utilizado, a solda possui a mesma composição que o metal de base [9]. A busca pelos melhores parâmetros de processo e a influência destes nas juntas soldadas obtidas por FSW tem sido o tópico de grande atenção por diversos pesquisadores [10, 11]. Gharacheh et al. [11] investigaram a influência da velocidade de rotação da ferramenta (w) e a velocidade de soldagem (v) considerando a razão w/v nas propriedades de juntas soldadas de ligas a base de Magnésio obtidas pelo método FSW. Eles concluíram que um aumento da razão w/v leva a um aumento do aporte térmico e uma diminuição das propriedades mecânicas na zona de mistura da junta soldada.

Análises da microestrutura e propriedades mecânicas em seções transversais de juntas soldadas são normalmente empregadas na maioria dos trabalhos disponíveis na literatura.

Porém, um estudo das características da superfície de topo das soldas é essencial, visto que ela é quem está exposta ao ambiente e a sua integridade pode ser relacionada a fenômenos superficiais como a corrosão, desgaste e a fadiga. Assim, o presente trabalho faz a qualificação de juntas soldadas de Inconel 625 produzidas pelo processo FSW.

2 MATERIAIS E MÉTODOS

O material de base utilizado neste estudo foi a liga UNS N06625 na forma de chapas com 3,2 mm de espessura. Na Tabela 1 é mostrada a composição química das chapas utilizadas.

Inicialmente foi realizado o lixamento das chapas para remoção dos óxidos e as impurezas da superfície. Esta etapa é importante para um aumento da qualidade superficial das juntas soldadas.

O processo de soldagem FSW foi realizado no instituto de pesquisas *Helmholtz-Zentrum Geesthacht*, na Alemanha, com uma máquina rígida em forma de pórtico equipada com servomotores e um sistema de controle automatizado. Uma ferramenta de Nitreto Cúbico de Boro Policristalino (pcBN) grau Q70 [12] foi utilizada com ombro

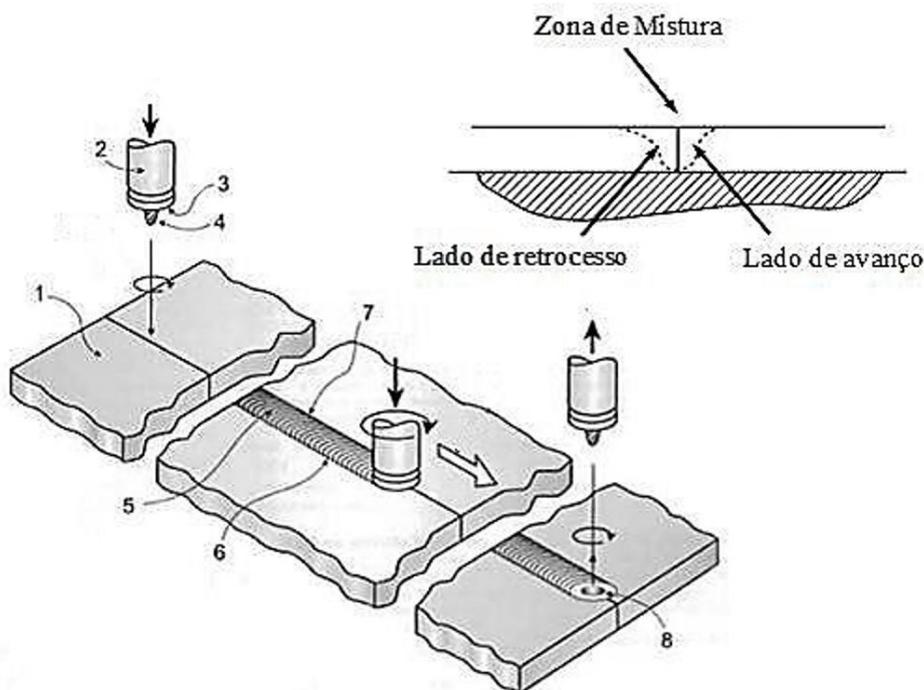


Figura 1. Princípio básico do processo de Soldagem por Fricção e Mistura Mecânica [8].

Tabela 1. Composição química da liga 625 (UNS N06625) (% em massa)

Elemento	Ni	Cr	Fe	Mo	Nb	Co	Mn	Al	Ti	Si	C
Liga 625	Bal.	21,7	4,7	8,6	3,38	0,03	0,09	0,13	0,18	0,18	0,015

de 25 mm de diâmetro e pino de 3 mm de comprimento. A rotação da ferramenta foi no sentido anti-horário e, sendo assim, o lado esquerdo do cordão de solda é chamado retrocesso (LR) e o lado direito de lado de avanço (LA). A direção de soldagem seguiu à direção de laminação da chapa. Para a obtenção dos cordões de solda foi utilizado um ângulo de ataque da ferramenta de $1,5^\circ$ em relação à vertical. Além disso, uma atmosfera protetora de argônio foi empregada com o objetivo de minimizar a oxidação da superfície durante a soldagem.

Para a caracterização das soldas, as amostras foram cortadas por eletroerosão e as análises microestruturais seguiram as práticas convencionais de metalografia e, por último, atacadas com os reagentes Adler e Gliceregia. A microscopia ótica foi utilizada para uma observação da microestrutura do material de base (MB) e da seção transversal da junta soldada, enquanto a microscopia eletrônica de varredura foi empregada para análise dos carbonetos e porosidades.

A resistência mecânica foi avaliada através de medidas de dureza Vickers. Os perfis de microdureza do metal de base ao longo da solda foram realizados com os seguintes parâmetros: carga 500 g durante 10 s e distância entre indentações de 0,2mm.

Por fim, os ensaios de dobramento de face (norma ASTM E190-08) foram realizados em uma máquina eletromecânica marca Instron modelo 5585H. A taxa de deslocamento da máquina foi de 1 mm/min, sendo ensaio quando completo (ângulo de dobra de 180°) realizado em duas etapas.

3 RESULTADOS E DISCUSSÃO

3.1 Parâmetros de Soldagem e Aporte Térmico

Dois juntas soldadas da liga 625 foram selecionadas, dentro de um grupo maior de amostras, para avaliação dos parâmetros de soldagem. Estes dados podem ser vistos resumidamente na Tabela 2. Assim, com base em estudos prévios ao presente trabalho e na aparência superficial das soldas percebeu-se que a *solda II* é a melhor condição de soldagem. De fato, os dados presentes na literatura [7] indicam que os parâmetros de processo foram os ideais, ou seja, selecionados de forma coerente.

3.2 Microestrutura

A liga 625 é um material não ferroso austenítico praticamente isotrópico ao longo das suas direções com estrutura cristalina cúbica de faces centradas (CFC). Na Figura 2 são apresentadas micrografias da liga 625 na condição de partida (material de base). Observa-se a presença de carbonitretos intragranulares ((M(C,N), onde o metal pode ser Nb ou Ti) e intergranulares ((M_6C e $M_{23}C_6$), onde o metal pode ser Cr ou Mo), além de maclas de recozimento. A identificação dos carbonetos seguiu procedimento já descrito na literatura [13,14]. A presença dos carbonetos indica que a liga está na condição Grau I da norma ASTM B446 [15] devido ao recozimento em baixa temperatura. Neste sentido, quando a liga 625 é recozida segundo a condição Grau I, ela apresenta maior resistência mecânica em relação a condição solubilizada (Grau 2) [13].

Tabela 2. Visão geral dos parâmetros de soldagem avaliados no trabalho

Amostras	Velocidade de soldagem, mm/s	Rotação, rpm	Superfície da junta soldada	Torque, N.m	Profundidade soldada, mm	Aporte térmico, kJ/mm
Solda I	1	1200	Média	30	2,11	3,77
Solda II	1	200	Excelente	110	1,81	2,30

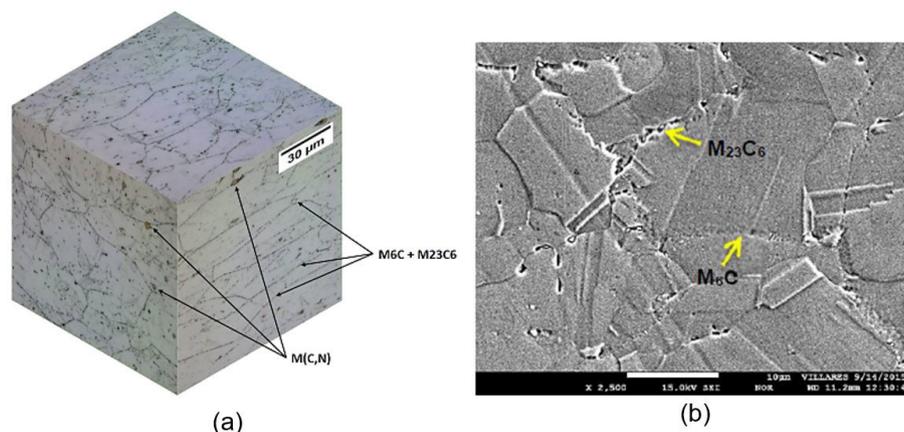


Figura 2. Material de base da Liga 625. (a) Microscopia ótica e (b) Micrografias obtidas por MEV em elétrons secundários.

Nas Figuras 3a e 4a são apresentadas macrografias da seção transversal das soldas analisadas. De forma geral, observa-se que a soldagem por fricção e mistura mecânica levou a um refino de grão na solda em relação ao material de base (Figura 2). A microestrutura da *solda I* (Figura 3a) apresentou um fluxo de material mais heterogêneo na seção transversal e também porosidades que podem ser vistas nas Figuras 2b e c.

Na Figura 4, o menor aporte térmico (*solda II*) ocasionou refino de grão maior quando comparado à condição com maior aporte térmico (*solda I*). Durante o processo de soldagem, as condições de processo da *solda II* promoveram uma maior deformação do material e, conseqüentemente, uma recristalização dinâmica mais efetiva que produziu um menor tamanho de grão devido ao menor aporte térmico. Assim, uma microestrutura mais homogênea pode ser vista nas Figuras 4a, b e c.

Comparando-se os resultados da *solda I* e *II*, observa-se que a velocidade de rotação de 1200 rpm levou a porosidades no cordão de solda e presença de precipitados. Por outro lado, para a condição de menor aporte térmico (*solda II*), a microestrutura mostrou-se limpa de precipitados, elevada qualidade do cordão de solda e microestruturas muito refinadas em relação ao metal de base. Como o mecanismo principal

de endurecimento da liga 625 é através da diminuição do tamanho de grão [13], sugere-se que a *solda II* tem maior resistência mecânica.

De modo mais detalhado, análises micrográficas da superfície da melhor solda obtida (*solda II*) também foram realizadas. Como pode ser visto na Figura 5, são observadas regiões distintas ao longo da direção transversal, são elas: o material de base (MB), a região de interface no lado retrocesso (RILR), a zona de mistura (ZM), e a região de interface no lado avanço (RILA). Uma visão geral da macroestrutura da superfície da junta soldada pode ser vista na Figura 5a. Em direção à solda propriamente dita, a Figura 5b ilustra a região de interface localizada no lado de retrocesso (lado esquerdo) da junta soldada, região onde ocorreu deformação de alguns grãos. No entanto, por se tratar de uma zona de transição, a distinção do seu início é difícil. Logo após esta região, pode ser notada a zona de mistura da soldagem por fricção, região onde ocorreu refino de grão oriundo da alta deformação e recristalização dinâmica (Figura 5d). Em geral, microestruturas refinadas apresentam melhores propriedades mecânicas. Por fim, a Figura 5f apresenta a interface localizada ao lado direito da solda (ZILD).

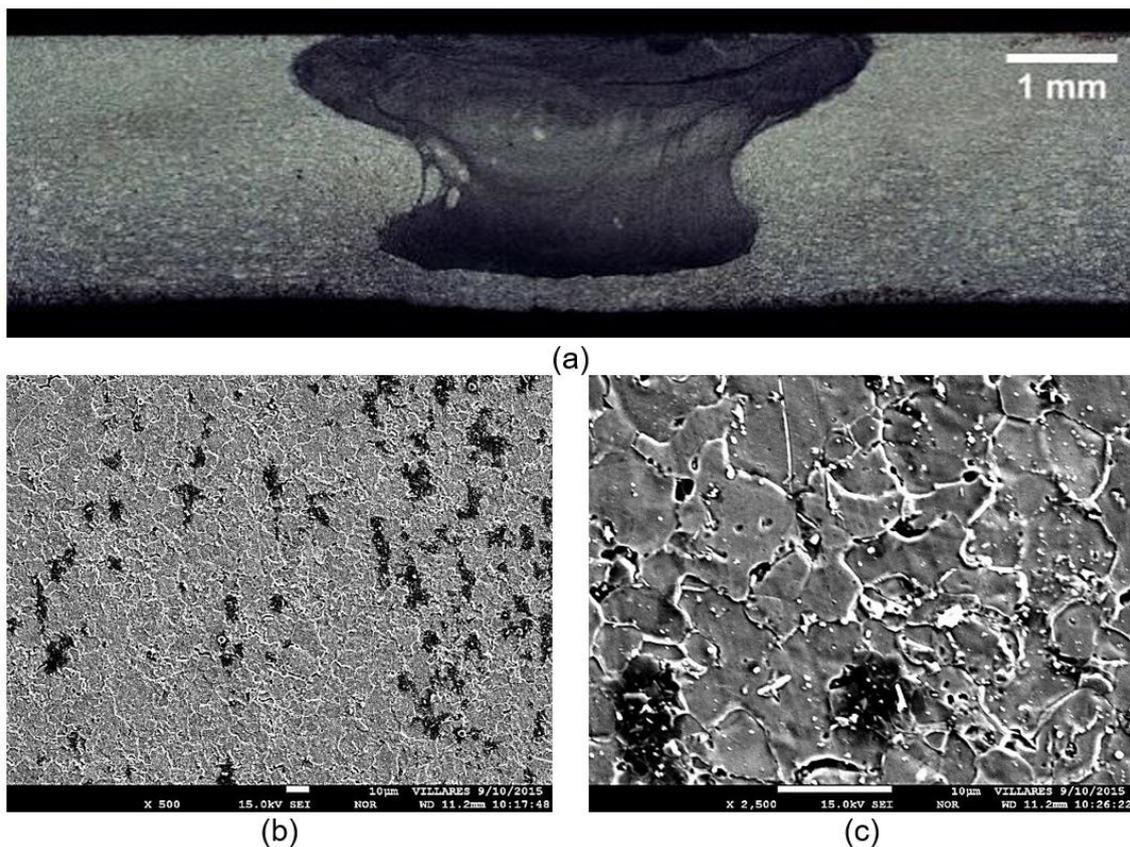


Figura 3. *Solda I.* (a) Seção transversal da junta soldada obtida por microscopia ótica após ataque com o reagente Adler. (b) e (c) Micrografias da zona de mistura obtidas por MEV em elétrons secundários após ataque metalográfico com o reagente Glicerégia [7].

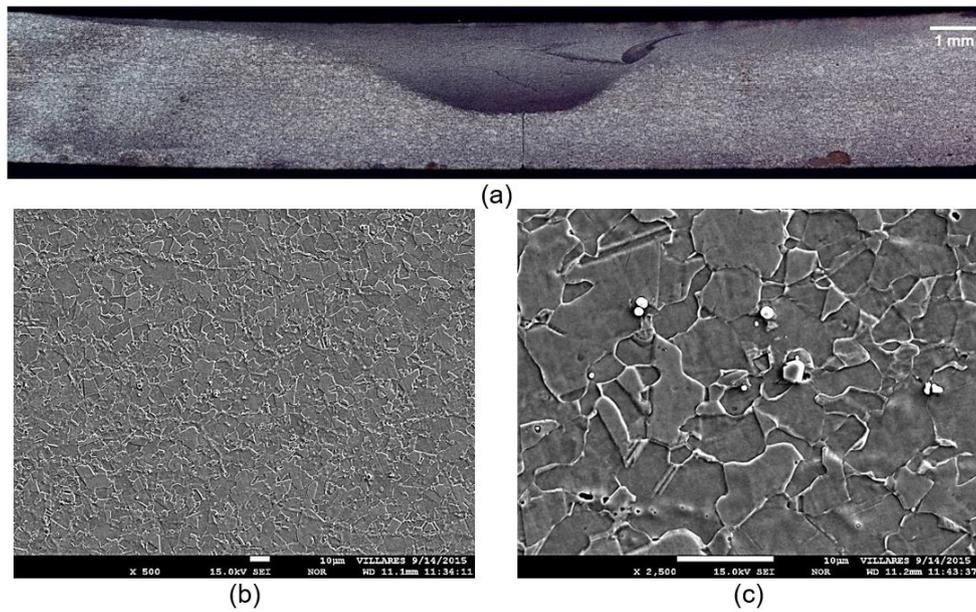


Figura 4. Solda II. (a) Seção transversal da junta soldada obtida por microscopia ótica após ataque com o reagente Adler. (b) e (c) Micrografias da zona de mistura obtidas por MEV em elétrons secundários após ataque metalográfico com o reagente Glicerégia [7].

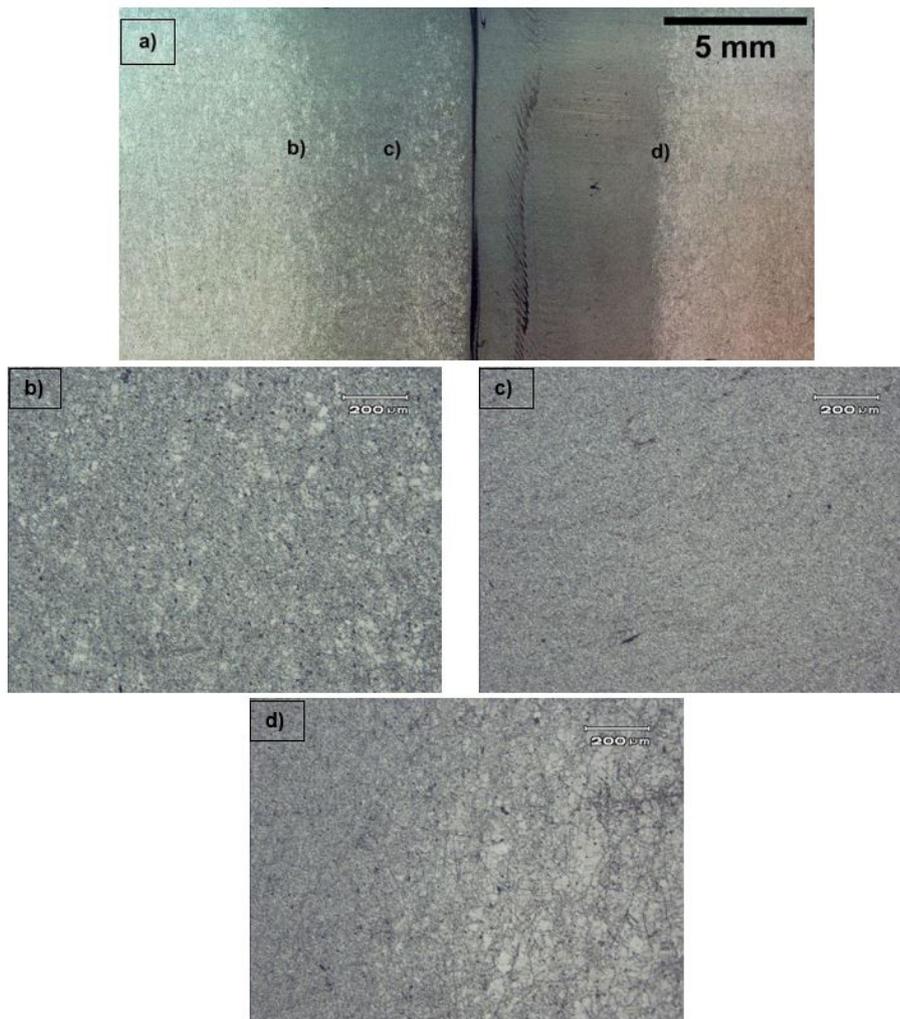


Figura 5. Superfície de topo da solda II (a) visão geral, (b) interface lado esquerdo, (c) zona de mistura, (d) interface lado direito.

3.3 Microdureza

Os perfis de microdureza medidos na seção transversal das juntas soldadas são mostrados na Figura 6. Ambas as soldas apresentaram um aumento de microdureza na junta soldada, resultante da redução no tamanho de grão.

O material de base apresentou valores entre 243 a 275 HV, fato que pode ter influência dos diferentes carbonetos presentes na liga (MC , M_6C e $M_{23}C_6$). A chapa soldada com maior aporte térmico (*solda I*) alcançou os menores valores de microdureza (270-305HV) ao longo do cordão de solda devido ao excessivo aporte térmico. Além disso, a *solda I* apresentou maior variação de microdureza ao longo do perfil medido. A chapa soldada com aporte

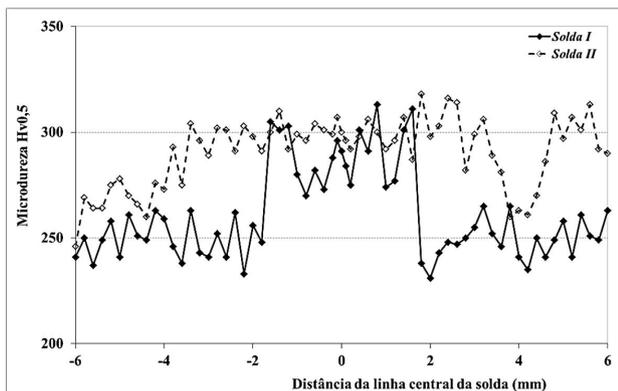


Figura 6. Perfis de microdureza para as soldas I e II.

térmico intermediário, mas melhor aparência superficial (*solda II*) apresentou valores de microdureza próximos a 300 HV na região da solda.

Comparando-se os resultados obtidos das medidas de dureza com a microestrutura verifica-se que a presença de precipitados para a *solda I* aumentou localmente a dureza da solda. Os resultados dos parâmetros da *solda II* indicam que os maiores ganhos em termos de resistência mecânica na liga 625 são para a redução no tamanho de grão e não através de precipitação, isto é, de forma geral, a liga 625 apresentará melhor resistência mecânica quanto menor for o tamanho de grão e mais limpa for sua microestrutura [13].

3.4 Dobramento

Ensaio de dobramento de face foram realizados de acordo com a norma ASTM E190-08. Neste contexto, a presença de descontinuidades tende a gerar um concentrador de tensões. Quando o corpo de prova é submetido por esforços, neste ensaio o próprio dobramento, a tensão de tração fica ampliada localmente e, portanto, pode ocasionar a fratura. Assim, as Figuras 7a e b mostram a *solda I* fraturada antes mesmo de atingir os 180° propostos no ensaio. Este fato é coerente com as análises em MEV (Figura 3), as quais mostraram a presença de porosidades. Por outro lado, a melhor junta soldada obtida (*solda II* - Figura 4), ou seja, não apresentou porosidades e obteve uma microestrutura limpa de precipitados e, portanto, aprovada no ensaio dobramento de face (Figuras 7c, d).

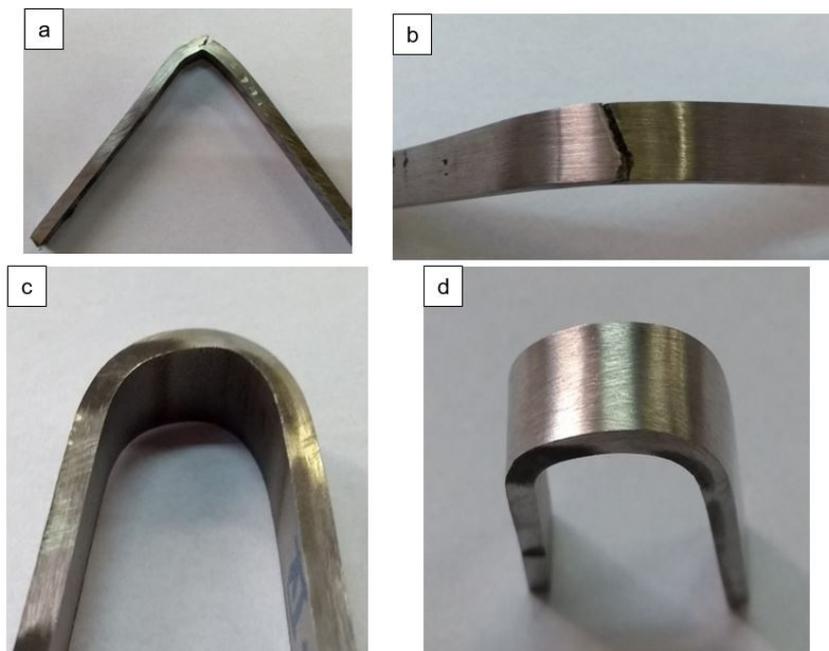


Figura 7. Ensaio de dobramento de face: (a) e (b) *solda I* fraturada, (c) e (d) *solda II* aprovada.

4 CONCLUSÕES

Com base nos resultados obtidos no presente trabalho foi possível concluir-se que:

- A solda I, com o maior aporte térmico em razão de sua maior velocidade de rotação da ferramenta (1200 rpm), apresentou menor largura do cordão de solda na seção transversal. Por outro lado, a solda II, obtida com velocidade de rotação de 200 rpm, ocasionou uma maior largura do cordão de solda na seção transversal;
- Para a obtenção de uma junta soldada com microestrutura homogênea na zona de mistura, sem

porosidades e aprovada no ensaio de dobramento de face, aconselha-se um aporte térmico reduzido, ou seja, a utilização de uma velocidade de rotação de 200 rpm associada a uma velocidade de soldagem de 1 mm/s.

Agradecimentos

Os autores agradecem o Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq) através do programa Ciência sem Fronteiras e CAPES (projeto 209602/2013-9), assim como o Instituto Helmholtz-Zentrum Geesthacht GmbH (Germany) pelo suporte para execução deste trabalho.

REFERÊNCIAS

- 1 Pollock TM, Tin S. Nickel-based superalloys for advanced turbine engines: chemistry, microstructure, and properties. *Journal of Propulsion and Power*. 2006;22(2):361-374.
- 2 Lemos GVB, Simoni L, Bergmann L, Souza D, Araujo DB, Santos JF, et al. Caracterização preliminar da microestrutura em cordões de solda da liga 625 produzidos através dos processos de SFMM e MIG. In: Anais do 41º Congresso Nacional De Soldagem; Salvador, Bahia. Associação Brasileira de Soldagem, São Paulo; 2015
- 3 Avery RE, Tuthill AH. Guidelines for welded fabrication of nickel alloys for corrosion resistente service. USA: A Nickel Development Institute; 1994. 35 p.
- 4 Sorensen CD, Nelson TW: 'Friction stir welding of ferrous and nickel alloys', in 'Friction stir welding and processing', (ed., Mishra R S, Mahoney M W, ed), Vol. 6, 111-121; 2007, Materials Park, OH, ASM International.
- 5 Davis JR, editor. Corrosion of weldments. USA: ASM International; 2006
- 6 Thomas WM, Nicholas ED, Needham JC, Murch MG, Temple-Smith P, Dawes CJ. Friction-stir butt welding. GB Patent UK 9125978.8, International patent application No. PCT/GB92/02203. 1991.
- 7 Lemos GVB, Hanke S, Santos JF, Bergmann L, Reguly A, Strohaecker TR. Progress in friction stir welding of Ni alloys. *Science and Technology of Welding and Joining*. 2017;22(8):643-657. <http://dx.doi.org/10.1080/13621718.2017.1288953>.
- 8 International Organization for Standardization. ISO 25239-1:2011: Friction stir welding — Aluminium — Part 1: vocabular. Genebra: ISO; 2011.
- 9 Zucchi F, Trabaneli G, Grassi V. Pitting and stress corrosion cracking resistance of friction stir welded AA 5083. *Materials and Corrosion*. 2001;52(11):853-859.
- 10 Peel M, Steuwer A, Preuss M, Withers PJ. Microstructure, mechanical properties and residual stresses as a function of welding speed in aluminium AA5083 friction stir welds. *Acta Materialia*. 2003;51(16):4791-4801.
- 11 Gharacheh MA, Kokabi AH, Daneshi GH, Sarrafi SR. The influence of the ratio of "rotational speed/traverse speed" (ω/v) on mechanical properties of AZ31 friction stir welds. *International Journal of Machine Tools & Manufacture*. 2006;46:1983-1987.
- 12 Perrett J, Martin J, Peterson J, Steel R, Packer S. Friction stir welding of industrial steels. *Friction Stir Welding and Processing*. 2011;6:65-72.
- 13 Farina AB. Efeito do teor de ferro e do tratamento térmico na microestrutura e propriedades da liga UNS N06625. [tese]. São Paulo: Universidade de São Paulo; 2014.
- 14 Ferrer L, Pieraggi B, Uginet JF. Microstructural evolution during the thermomechanical processing of alloy 625. In: Loria EA. Superalloys 718, 625 and various derivatives. Canada: The Minerals, Metals and Materials Society; 1991. p. 217-228.
- 15 American Society for Testing and Materials. ASTM Standard B446. Standard Specification for Nickel-Chromium-Molybdenum-Columbium Alloy (UNS N06625), Nickel-Chromium-Molybdenum-Silicon Alloy (UNS N06219), and Nickel-Chromium-Molybdenum-Tungsten Alloy (UNS N06650)* Rod and Bar. West Conshohocken: ASTM International; 2008. <http://dx.doi.org/10.1520/B0446-03R08E01>.

Recebido em: 4 Ago. 2017

Aceito em: 16 Nov. 2017