

INFLUÊNCIA DOS PARÂMETROS DE SOLDAGEM NA UNIÃO DISSIMILAR DE AÇOS INOXIDÁVEIS SOLDADOS POR FSW

Maria Claudia Theodoro, mariact@fem.unicamp.br¹

Victor Pereira Ferrinho, victor.ferrinho@lnnano.cnpem.br²

Antonio Jose Ramirez, ramirezlondono.1@osu.edu³

Paulo Roberto Mei, pmei@fem.unicamp.br¹

¹Faculdade de Engenharia Mecânica – UNICAMP, Rua Mendelejev, 200, Cidade Universitária “Zeferino Vaz”, Campinas, SP, CEP 13083-860,

²Laboratório Nacional de Nanotecnologia, Rua Giuseppe Máximo Scolfaro, 10.000 Polo II de Alta Tecnologia de Campinas - Campinas/SP, Brasil, CEP 13083-970,

³Department of Materials Science and Engineering/ The Ohio State University, 177 Watts Hall, 2041 N. College Rd., Columbus, OH 43210, USA.

COBEF2017-0066

Resumo: A atual necessidade econômica do país gera a busca por novas formas de otimizar processos, reduzir custos de produção e aumentar longevidade dos equipamentos e materiais. Na área de soldagem, isso foi traduzido na busca de métodos alternativos de soldagem, que pudessem gerar redução de custos de insumos e mão-de-obra, além de proporcionar soldas de alta qualidade. O objetivo deste trabalho foi testar o método de soldagem conhecido como Friction Stir Welding em uma união dissimilar de dois aços inoxidáveis austenítico 316L e superduplex 2507 de 6 mm de espessura. Foram realizadas 4 uniões nas quais variou-se os parâmetros primários de soldagem de velocidade de rotação (150 e 200 rpm) e de sentido de rotação da ferramenta (horário e anti-horário). Para a avaliação das juntas soldadas, foram medidos e analisados os parâmetros secundários de soldagem e realizados ensaios de dobramento de raiz, mapa de dureza e imagens metalográficas em microscópio óptico. Todas as juntas soldadas obtiveram penetração total. Os valores de dureza alcançados pelas juntas não demonstram uma relação direta dos parâmetros, mas uma combinação dos efeitos dos mesmos. Os valores medidos de temperatura e aporte térmico foram inferiores nas soldas realizadas a 150 rpm comparado às realizadas a 200 rpm, no entanto, o torque foi maior. Em ambas as juntas foi observado uma interface entre os dois aços bem definida no centro da Zona Misturada (ZM). Somente nas juntas soldadas no sentido anti-horário identificou-se uma região de mistura dos dois aços na região superior da ZM. Por apresentarem menores valores de parâmetros secundários, as soldas realizadas com velocidade de rotação da ferramenta de 150 rpm foram as mais adequadas para união de juntas dissimilares de 316L e 2507.

Palavras-chave: Soldagem dissimilar, Friction Stir Welding, aços inoxidáveis.

1. INTRODUÇÃO

Os aços inoxidáveis austeníticos são utilizados para trocadores de calor nas refinarias, onde normalmente o fluido que passa por ele é agressivo, contendo sulfatos e compostos orgânicos sulfurados, nitrogenados e oxigenados (Machado et al, 2003). A corrosão gera aumento de custos de manutenção dos equipamentos e, para isso, é necessário utilizar materiais que, além de possuírem boa tenacidade e resistência para suportar as altas pressões em temperaturas acima da ambiente, devem ser resistentes à corrosão. Além dos aços austeníticos, são muito utilizados também os aços inoxidáveis duplex, compostos em proporções quase iguais das fases ferrita e austenita, e que combinam propriedades de ambas as fases. São superiores em resistência mecânica e à corrosão relativamente aos aços austeníticos, mas possuem menor soldabilidade, sendo mais susceptíveis também a formar fases indesejadas a temperaturas mais altas como fase σ e carbonetos (Ramirez, 1997, 2001;

ASM 2005). São bastante utilizados no transporte e processamento de matéria-prima e derivados do petróleo. A união desses dois aços pode gerar redução de custos de fabricação das unidades de destilação e de processamento de petróleo e de manutenção das mesmas (Machado et al, 2003).

A Friction Stir Welding (FSW) é conhecida como a mais recente técnica de soldagem por atrito, que proporciona a união de materiais sem que estes cheguem à temperatura de fusão. Traz como vantagens a redução de macro e micro defeitos, a ausência de porosidade causada pela fusão do material e excelentes propriedades mecânicas da junta soldada (Mishra, Mahoney, 2007). Dessa forma, utilizando a técnica de FSW na união de materiais dissimilares como os aços inoxidáveis austeníticos e duplex é possível, além de produzir a união sem defeitos e em aumento excessivo de temperatura que leve à formação de fases indesejadas, gerar melhoria das propriedades (Santos, 2011).

2. MATERIAIS E MÉTODOS

2.1. Aços utilizados

Para a obtenção das juntas soldadas foram utilizadas chapas 5,9 x 95 x 450 mm. O aço 316L foi fornecido pela Villares Metals e o duplex 2507 pela empresa Outokumpu. A composição química dos aços utilizados encontra-se na Tabela 1).

Tabela 1 – Composição química dos aços utilizados (% em massa)

Aço	Cr	Ni	Mo	Mn	C	N	Si	Cu	P	Ti	S
316L (1)*	16,5	10,0	2,04	1,30	0,016	0,037	0,50	0,06	0,032	0,002	0,001
2507 (2)	24,9	6,9	3,79	0,78	0,020	0,260	0,25	0,34	0,023	-----	0,001

(1) Composição química fornecida pela Villares.

(2) Composição química fornecida pela Outokumpu.

(*) Equivalente ao aço inoxidável austenítico AISI/ABNT 316L.

2.2. Máquina e Ferramenta de FSW

A máquina utilizada para a soldagem foi a Friction Stir Welding RM-2 da TTI (Transformation Technologies Inc). Foi utilizada ferramenta de compósito de 60% de nitreto cúbico de boro policristalino, com 40% da liga tungstênio-rênio (PCBN-WRe), da qual 75% em peso são W e 25%, Re.



Figura 1– Máquina RM-2 de SAPNC pertencente ao Laboratório Nacional Nanotecnologia (à esquerda) e ferramenta de PCBN-WRe (à direita).

2.3. Parâmetros

Foram utilizados os parâmetros primários de soldagem mostrados na Tab. (2).

Tabela 2 – Parâmetros primários de soldagem por FSW utilizados no presente trabalho.

Junta	Sentido de rotação da ferramenta	Velocidade de Rotação da ferramenta (rpm)	Velocidade de Avanço (mm/min)
A	anti-horário	200	100
B	anti-horário	150	
C	horário	150	
D	horário	200	

Após a soldagem, as amostras foram embutidas em baquelite, lixadas com lixas de granas de 200 a 2000, polidas com pasta de diamante de 1 µm e submetidas a ataque eletrolítico em solução de 40% de ácido nítrico em água, a 1,5 V por 60 segundos. Após isso, foram observadas em microscópio ótico Olympus BX51M pertencente ao do Laboratório Nacional de Nanotecnologia.

Foi feito também o mapa de dureza em todas as juntas no microdurômetro Leco LM-100AT aplicando uma carga de 300 g por 15 s.

3. RESULTADOS E DISCUSSÕES

Todas as juntas apresentaram boa largura de cordão de solda. As juntas A e D apresentaram um pouco de rebarba, enquanto as juntas B e C não apresentaram rebarba nenhuma. Com exceção das rebarbas e do engaste superaquecido da junta A, não foram observados outros defeitos superficiais. Esses poucos defeitos apresentados não são considerados relevantes para as juntas uma vez que o local, o modo como se apresentam e a intensidade não afetam significativamente as propriedades das juntas.

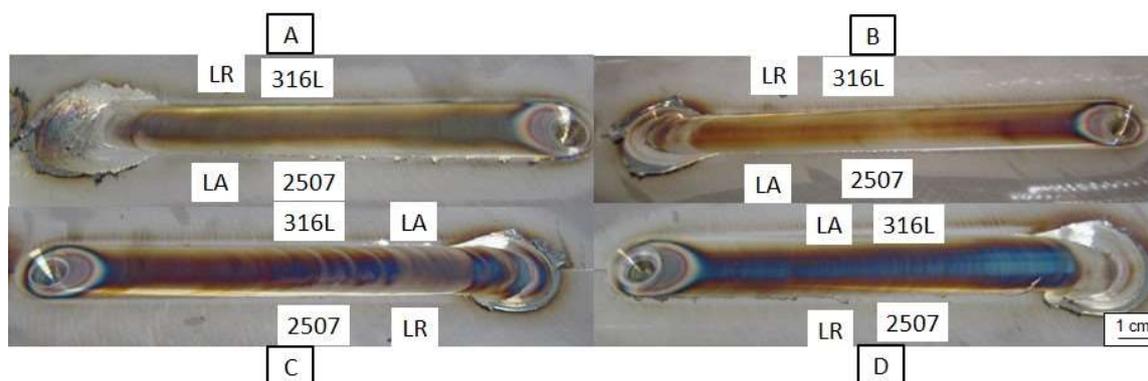


Figura 2 – Imagens das juntas A, B, C e D logo após soldadas.

4. Os parâmetros secundários registrados de cada soldagem se encontram na

5. Tabela 3 – Parâmetros primários e secundários de soldagem.

Junta	Sentido de Rotação da ferramenta	Velocidade de Rotação (rpm)	Força de Penetração (kN)	Força de avanço (kN)	Torque (N.m)	Aporte Térmico (kJ/mm)	Temperatura da ferramenta (°C)
A	anti-horário	200	54	8,4	123,6	1,55	755
B	anti-horário	150	60	12,0	152,8	1,44	714
C	Horário	150	62	5,2	158,2	1,49	703
D	Horário	200	60	4,7	127,7	1,60	784

Como mostrado na [Erro! Autoreferência de indicador não válida.](#)), nos parâmetros secundários de soldagem o sentido de rotação da ferramenta influenciou somente na força de avanço, sendo mais alta nas juntas soldada no sentido anti-horário (8,4 e 12,0 kN) em comparação às soldadas com a ferramenta no sentido horário (5,2 e 4,7 kN). No entanto, a velocidade de rotação foi determinante, gerando diferenças significativas nos esforços da ferramenta e geração de calor.

As juntas realizadas com velocidade de rotação de 200 rpm apresentaram aporte térmico e temperatura da ferramenta maiores do que as realizadas a 150 rpm. Entretanto, o torque foi bem menor do que nas juntas B e C (123,6 e 127,7 N.m contra 152,8 e 158,2 N.m). As forças de penetração da ferramenta apresentaram variação não significativa entre as juntas, com diferença máxima de 8 kN entre A e C.

Nenhuma das forças e temperaturas registradas ultrapassam as forças e temperaturas críticas de operação da máquina, o que torna as soldagens viáveis e seguras em termos de operação e durabilidade da máquina e ferramenta. Por nenhuma das juntas ter apresentado defeitos superficiais relevantes, aumento considerável da temperatura da ferramenta, ou das forças envolvidas, todas elas foram consideradas soldas estáveis.

Os ensaios de dobramento foram realizados em todas as juntas, uma vez que todas elas apresentaram boas características superficiais de soldagem e bons parâmetros secundários. Todas as juntas apresentaram penetração total, tal como mostrado na Figura 3).), juntamente com os parâmetros primários.

Tabela 3 – Parâmetros primários e secundários de soldagem.

Junta	Sentido de Rotação da ferramenta	Velocidade de Rotação (rpm)	Força de Penetração (kN)	Força de avanço (kN)	Torque (N.m)	Aporte Térmico (kJ/mm)	Temperatura da ferramenta (°C)
A	anti-horário	200	54	8,4	123,6	1,55	755
B	anti-horário	150	60	12,0	152,8	1,44	714
C	Horário	150	62	5,2	158,2	1,49	703
D	Horário	200	60	4,7	127,7	1,60	784

Como mostrado na [Erro! Autoreferência de indicador não válida.](#)), nos parâmetros secundários de soldagem o sentido de rotação da ferramenta influenciou somente na força de avanço, sendo mais alta nas juntas soldada no sentido anti-horário (8,4 e 12,0 kN) em comparação às soldadas com a ferramenta no sentido horário (5,2 e 4,7 kN). No entanto, a velocidade de rotação foi determinante, gerando diferenças significativas nos esforços da ferramenta e geração de calor.

As juntas realizadas com velocidade de rotação de 200 rpm apresentaram aporte térmico e temperatura da ferramenta maiores do que as realizadas a 150 rpm. Entretanto, o torque foi bem menor do que nas juntas B e C (123,6 e 127,7 N.m contra 152,8 e 158,2 N.m). As forças de penetração da ferramenta apresentaram variação não significativa entre as juntas, com diferença máxima de 8 kN entre A e C.

Nenhuma das forças e temperaturas registradas ultrapassam as forças e temperaturas críticas de operação da máquina, o que torna as soldagens viáveis e seguras em termos de operação e durabilidade da máquina e ferramenta. Por nenhuma das juntas ter apresentado defeitos superficiais relevantes, aumento considerável da temperatura da ferramenta, ou das forças envolvidas, todas elas foram consideradas soldas estáveis.

Os ensaios de dobramento foram realizados em todas as juntas, uma vez que todas elas apresentaram boas características superficiais de soldagem e bons parâmetros secundários. Todas as juntas apresentaram penetração total, tal como mostrado na Figura 3).

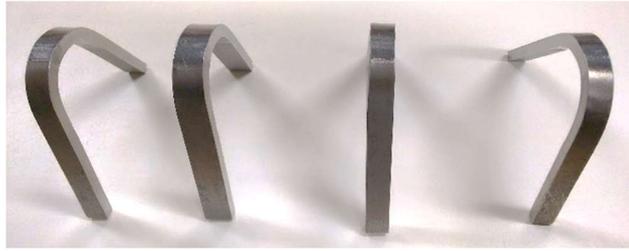


Figura 3 – Ensaio de dobramento das juntas soldadas. Da esquerda para a direita, junta A, B, C e D.

Foram feitas imagens metalográficas das quatro juntas realizadas e todas apresentaram alguns aspectos em comum. O primeiro deles é que em nenhuma das imagens foi encontrado defeito interno de soldagem, o que indica que todas as juntas estão validadas e apresentam bons resultados de soldagem. O segundo aspecto comum é uma interface bem definida entre ambos os aços na região central da zona mistura (ZM), no qual os dois aços não se misturam, como pode ser visto na

Figura 4). Nessa interface definida, a região escura da ZM possui estrutura metálica duplex (ferrita e austenita em proporções semelhantes e distribuídas homogeneamente), enquanto a região clara possui estrutura austenítica. O terceiro aspecto é a presença de linhas de fluxo na metade inferior da ZM no lado de avanço (LA). Essas linhas de fluxo são caracterizadas por faixas alternadas de tamanhos de grão distintos, mas que mantém a estrutura metálica predominante (duplex nas juntas A e B e austenítica nas juntas C e D) (Fig. (5)).

Devido ao ataque químico utilizado é possível distinguir a fase austenita da fase ferrita em imagens de magnificação maiores, nas quais a fase ferrita apresenta uma coloração mais escura do que a fase austenita. Sendo assim foi possível contar as fases em imagens com 500x de magnificação e verificar que, na interface dos dois metais na ZM, a parte duplex possui a mesma proporção de fases do que o metal de base superduplex e a parte austenítica possui a mesma porcentagem de fase do que o metal de base austenítico.

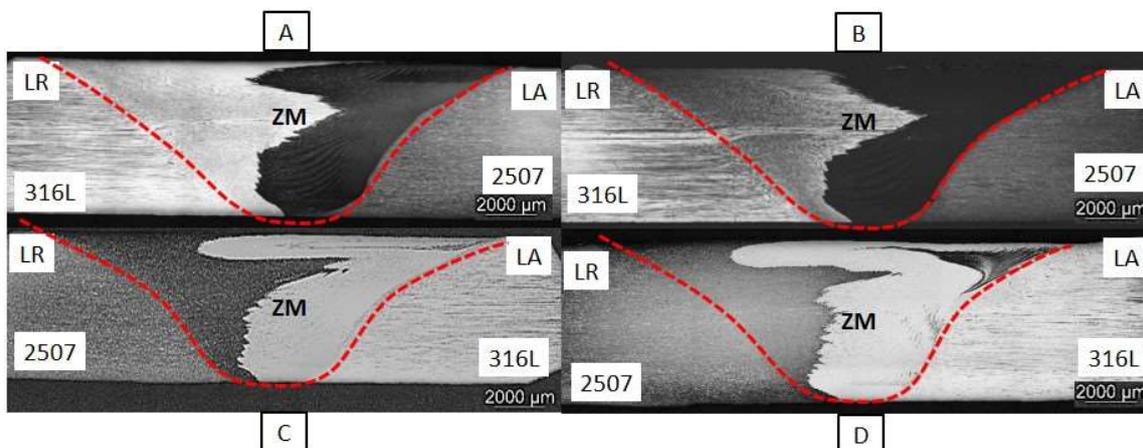


Figura 4 – Imagens metalográficas das juntas A, B, C e D. A região escura na ZM apresenta estrutura duplex (austenita e ferrita), enquanto a região clara apresenta em sua maioria austenita, com poucos traços de ferrita.

Outros aspectos que não são comuns a todas as juntas foram observados, provocados pelos diferentes comportamentos dos materiais perante a diferença dos parâmetros primários. Dentre esses aspectos está a diferença de perfil da interface dos aços na ZM, que é semelhante nas juntas soldadas com o mesmo sentido de rotação da ferramenta. No entanto, esse perfil difere entre as juntas de diferentes sentidos de rotação da ferramenta. Nas juntas A e B, a linha da interface apresenta ângulos agudos, o que sugere que a fluidez e movimentação dos materiais foram menor e exigiu mais esforços, enquanto as juntas C e D possui um aspecto mais fluido, com linha mais curva, indicando uma movimentação maior dos materiais na região superior da ZM e menor na parte inferior.

Na parte superior da ZM no LA há a presença de linhas de fluxo de estrutura duplex na metade superior das juntas A e B, sendo que nas juntas C e D há a presença de uma mistura de duplex com a fase austenita que não apresenta faixas alternadas de tamanhos de grãos distintos (Figura 5)). Essa região de mistura nas juntas C e D foram denominadas “região misturada”.

Essa região é maior na junta D do que na junta C. Uma região de estrutura predominantemente austenítica dentro da parte duplex da ZM (região misturada), não foi identificado nas juntas A e B. Esse fenômeno, juntamente com o perfil da interface no centro da ZM pode ter sido causado pela diferença do comportamento do material quando submetido a diferentes forças de avanço, sendo necessário forças maiores para produzir a mistura efetiva de ambos os aços. No entanto, se faz necessário novos testes para a confirmação dessa teoria.

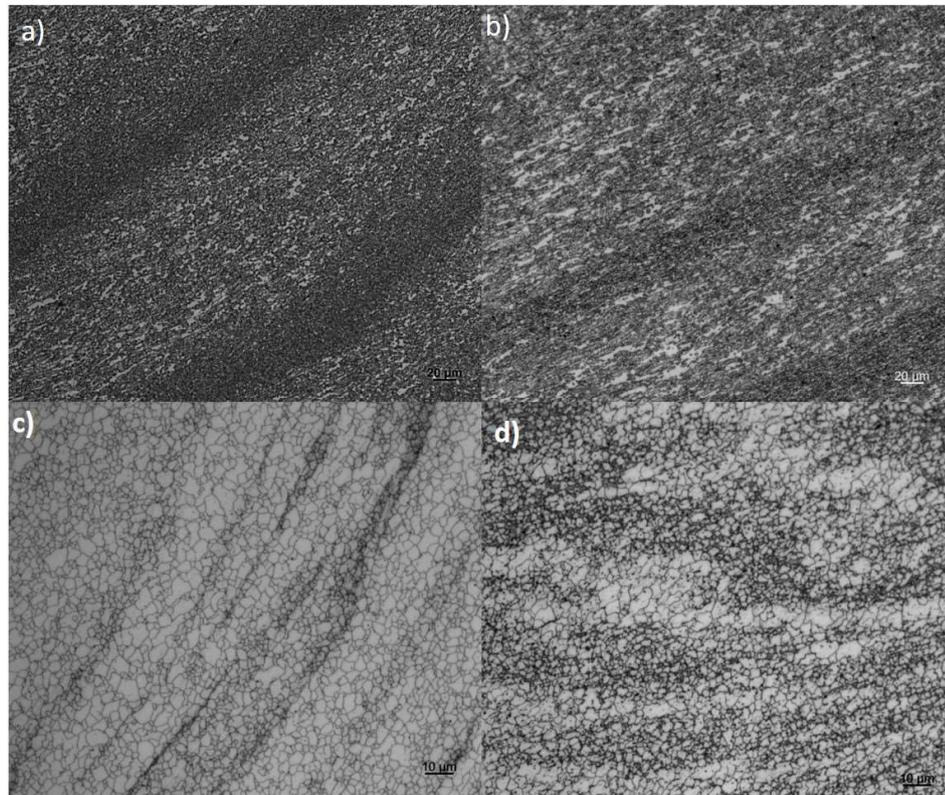


Figura 5 – Linhas de fluxo no LA a) da região inferior da junta A; b) da região superior da junta A; c) da região inferior da junta D e d) da região superior da junta D. Nas imagens a) e b) temos as fases austenita e ferrita em proporções iguais às do aço superduplex e a diferença de coloração da figura se deve à diferença de tamanho de grão da região. Nas imagens c) e d) os grãos claros correspondem à fase austenita enquanto os grãos escuros correspondem à fase ferrita.

Em relação a dureza alcançada pelas juntas (

Figura 6)), novamente nota-se aspectos semelhantes entre as juntas. Em primeiro lugar, as regiões de maior dureza encontram-se em duas regiões: Na parte superior, de ambos os lados (LA e LR (lado de retrocesso)), próximo à ZTMA. No LA, nas juntas A e B essa região coincide com as linhas de fluxo superiores e nas juntas C e D, coincide com a região misturada. A outra região de maior dureza se encontra na parte inferior da junta (de ambos os lados), próxima a raiz da solda, formando uma linha. Essa região coincide com a base das linhas de fluxo. Apesar de não serem vistos nitidamente na metalografia, no mapa de dureza é possível identificar a base das linhas de fluxo no LR, assim como as linhas de fluxo superiores.

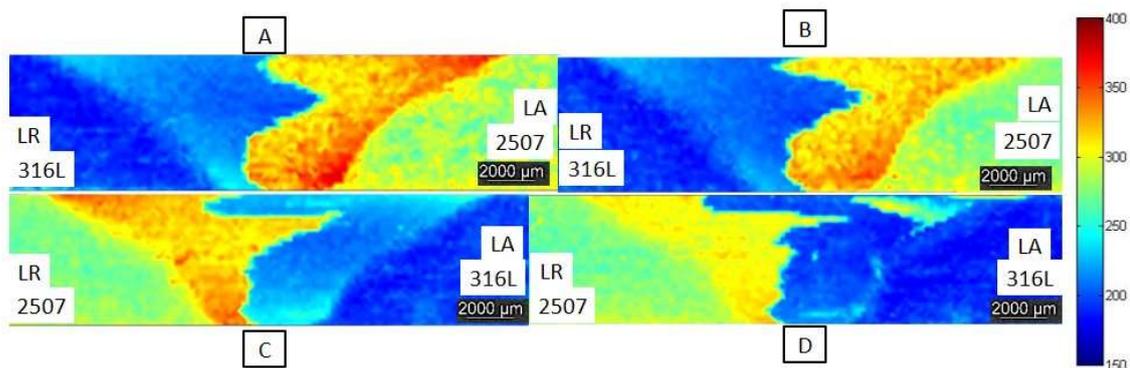


Figura 6 – Mapa de dureza das juntas soldadas A, B C e D. A dureza mínima registrada é 150 HV e a máxima, 400 HV.

No entanto, novamente há a influência dos parâmetros primários no valor máximo de dureza. A junta A apresenta os maiores valores de dureza para o aço duplex tanto na região superior quanto na região próxima à raiz da ZM, enquanto a junta C apresentou os maiores valores, nas mesmas regiões, para o aço austenítico. As juntas B e C apresentaram valores máximos de dureza do aço duplex na ZM semelhantes. A junta D foi a que apresentou menores valores de dureza na ZM em ambos os aços. A região de mistura na junta D apresentou dureza semelhante a do aço duplex na região da ZM da mesma junta.

4. CONCLUSÕES

Todos os parâmetros testados produziram juntas soldadas consolidadas, estáveis e sem defeitos superficiais e internos significativos. Todos os parâmetros primários influenciaram nos parâmetros secundários e/ou propriedades mecânicas das juntas, sendo uns mais significativamente que outros. A velocidade de rotação da ferramenta influenciou no aporte térmico, torque e temperatura da ferramenta. As juntas realizadas a 200 rpm apresentaram aporte térmico e temperatura da ferramenta mais altos quando comparados com as juntas realizadas a 150rpm. No entanto, o torque foi mais baixo para aquelas e relação a estas.

O sentido de rotação da ferramenta influenciou na força de avanço e perfil de soldagem. As juntas soldadas com sentido de rotação horário apresentaram um fluxo de material mais fluido do que as juntas soldadas no sentido anti-horário.

A junta A e C apresentaram os maiores valores de dureza na ZM dos aços duplex e austenítico, respectivamente. A junta D foi a que apresentou menor dureza em ambos os aços na ZM. A diferença dos perfis de dureza nas juntas não apresenta relação direta com os parâmetros de soldagem, sendo, portanto, uma combinação de vários fatores que ainda precisam ser estudados.

A variação de rotação da ferramenta altera a dureza da solda e gera uma região de mistura dos materiais, o que pode auxiliar no estudo do fluxo dos materiais no processo de soldagem por FSW.

Por apresentarem parâmetros secundários menores, as juntas soldadas com velocidade de rotação a 150 rpm forma consideradas as mais adequadas para soldagem dissimilar dos aços inoxidáveis austenítico 316L e superduplex 2507.

5. AGRADECIMENTOS

Os autores gostariam de agradecer o LNNano/CNPEM pelo suporte técnico e infraestrutura durante os trabalhos de microscopia optica, dureza e soldagem, ao CNPq pela bolsa concedida e à Faculdade de Engenharia Mecânica (FEM) pela oportunidade de doutorado.

6. REFERÊNCIAS

ASM Metals Handbook, 2005, “Properties and Selection: Irons, Steels, and High Performance Alloys”. United States of

- America: Metals Handbook, v. 1. pp. 1304, 1353, 1354, 1395, 1396.
- ASM Metals Handbook, 2005, "Corrosion". United States of America: Metals Handbook, v. 13. pp. 265, 266, 269, 275, 276.
- Machado, J. P. S. E., et al. 2003, "Influência do óleo nacional pesado na corrosão de aços inoxidáveis", Anais do Congresso Brasileiro de P&D em Petróleo e Gás, Vol. 11, Natal, Brasil, p 4066-4071.
- Mishra, Rajiv S.; MAHONEY, Murray W, 2007, "Friction Stir Welding and Process". USA: ASM International, v. 1 , pp. 1-5.
- Ramirez, Antonio J. L, 1997, "Estudo da precipitação de nitreto de cromo e fase sigma por simulação térmica da zona afetada pelo calor na soldagem multipasse de aços inoxidáveis duplex", Dissertação de Mestrado, Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, São Paulo.
- Ramirez, Antonio J. L, 2001, "Precipitação de fases intermetálicas e austenita secundária na ZAC de soldagens multipasse de aços inoxidáveis duplex", Dissertação de Doutorado, Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, São Paulo.
- Santos, Tiago F. A., 2011, "Correlating Microstructure and Performance of UNS S32750 and S32760 Superduplex Stainless Steels Friction Stir Welding", Proceedings of the International Offshore and Polar Engineering Conference, Vol. 4 , Maui. EUA, p. 534 -540.

7. DIREITOS AUTORAIS

Os autores são os únicos responsáveis pelo conteúdo do material impresso incluído no seu trabalho.

THE INFLUENCE OF FSW PARAMETERS IN A STAINLESS STEELS DISSIMILAR UNION

Maria Claudia Theodoro, mariact@fem.unicamp.br¹
Victor Pereira Ferrinho, victor.ferrinho@lnnano.cnpem.br²
Antonio Jose Ramirez, ramirezlondono.1@osu.edu³
Paulo Roberto Mei, pmei@fem.unicamp.br¹

¹Faculty of Mechanical Engineering – UNICAMP, Rua Mendeleev, 200, Cidade Universitária "Zeferino Vaz", Campinas, SP, Brazil, CEP 13083-860,

²Brazilian Nanotechnology National Laboratory, Rua Giuseppe Máximo Scolfaro, 10.000 Polo II de Alta Tecnologia de Campinas - Campinas/SP, Brasil, CEP 13083-970,

³Department of Materials Science and Engineering/ The Ohio State University, 177 Watts Hall, 2041 N. College Rd., Columbus, OH 43210, USA.

COBEF2017-0066

Abstract: Brazil's economic needs aims to seek new ways to optimize processes, low production costs and increase the life of materials and equipments. In meanings of welding, the aim was to search alternative welding methods that would reduce inputs and labor costs, in addition to provide high quality welds. The objective of this work was to perform dissimilar stainless steels (austenitic 316L and superduplex 2507) union by Friction Stir Welding in 6mm thick plates. Four dissimilar welds were performed varying the tool rotation speed (150 and 200 rpm) and direction (clockwise and counter-clockwise). All joints were performed with full penetration and had good appearance and no internal defects. The value of the hardness in the SZ do not have a direct relation to a particular parameter, but is a combination of the effects of each primary parameter. The tool temperature and the heat input were higher with the 200 rpm joints compared with the 150 rpm joints. However, the torque was lower. In both joints a well-defined interface between both steels was observed in the center of the Stirred Zone (SZ). Only in joints performed in counter-clockwise tool direction appeared a mixed region of both steels in upper region of the SZ. For presenting low forces during weld, the joints performed with 150 rpm were the bests parameters for dissimilar weld with 316L and 2507.

Key-words: Dissimilar Welding, Friction Stir Welding, Stainless Steels.

1. COPYRIGHT

Authors are solely responsible for the content of the printed material included in their work.