

# UNIÃO DISSIMILAR DE AÇOS INOXIDÁVEIS AUSTENÍTICO UNS S31603 E SUPERDUPLEX UNS S32750 PELA TÉCNICA DE SOLDAGEM POR ATRITO COM PINO NÃO-CONSUMÍVEL

Theodoro, M. C.<sup>1</sup>; Ferrinho, V. P.<sup>1</sup>; Mei, P. R.<sup>2</sup>; Ramirez, A.J.<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Laboratório Nacional de Nanotecnologia, Campinas, SP, Brasil. [maria.theodoro@lnnano.org.br](mailto:maria.theodoro@lnnano.org.br)

<sup>2</sup> Fac. Engenharia Mecânica, Universidade Estadual de Campinas, Campinas, SP, Brasil.

## Resumo

*A fim de verificar a viabilidade de obter uniões dissimilares de aços inoxidáveis austenítico ABNT 316L e superduplex UNS S32750 através da técnica de Solda por Atrito com Pino Não-Consumível, foram feitas juntas em chapas de 6 mm de espessura, com ferramenta de PCBN WRe. Os parâmetros utilizados foram: frequência de rotação da ferramenta de 100- 300 rpm, velocidade de avanço de 100 mm.min<sup>-1</sup>. As juntas produzidas apresentaram boa aparência, adequada largura do cordão de solda, baixa rugosidade apesar de não apresentar penetração total. Foram preparadas amostras no sentido transversal ao sentido de soldagem e verificou-se que houve consolidação das juntas. No entanto, houve aquecimento da ferramenta próximo à temperatura limite (800 °C) e o torque e as forças axiais envolvidos chegaram próximo ao limite suportado pelo equipamento (180 N.m e 70 kN respectivamente).*

Palavras-Chave: Soldagem Por Atrito Com Pino Não-Consumível; Soldagem Dissimilar; Aço Inoxidável Duplex, Aço Inoxidável Austenítico.

## 1 – INTRODUÇÃO

O interesse da indústria química, petroquímica e de papel, em aços inoxidáveis austeníticos e duplex vem crescendo ao longo dos anos, em especial. Os aços inoxidáveis austeníticos são utilizados para trocadores de calor em refinarias e, normalmente, o fluido que passa por ele ainda é agressivo porque contém sulfatos e compostos orgânicos sulfurados, nitrogenados e oxigenados [1]. A corrosão reduz a vida útil e aumenta os custos de manutenção dos equipamentos e, para minimizá-los, 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, caracterizados por proporções quase iguais das fases ferrita e austenita e por combinarem propriedades de ambas as fases. Embora sejam superiores em resistência mecânica e à corrosão relativamente aos aços austeníticos, possuem menor soldabilidade [2; 3]. Ainda assim, 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 [1].

A soldagem por atrito com pino não-consumível (SAPNC) permite a união de materiais no estado sólido. Traz como vantagens a redução de macro e micro defeitos, a ausência trincas e porosidade causada pela fusão e ressolidificação do material e excelentes propriedades mecânicas da junta soldada [4]. Além disso, o processo mantém o balanço das fases presentes no material, o que é benéfico para diversos tipos de ligas. Dessa forma, utilizando a técnica de SAPNC na união dissimilar dos aços inoxidáveis austenítico e duplex, é possível, além de produzir a união sem defeitos, gerar melhoria das propriedades [5].

### 1.1 Características do material após a soldagem

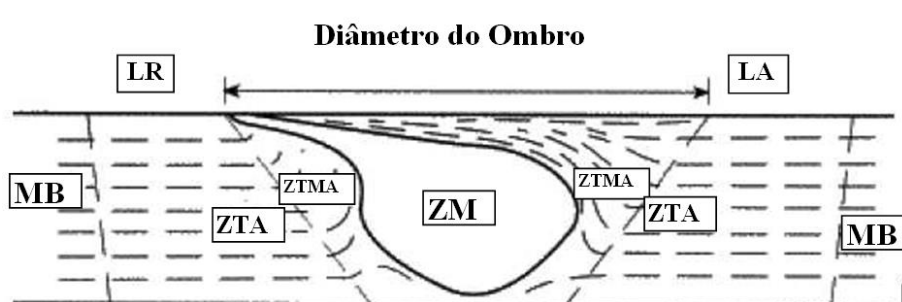


Figura 1 – Esquema da seção transversal da junta soldada por SAPNC, mostrando a zona misturada (ZM), a zona termomecanicamente afetada (ZTMA), a zona termicamente afetada (ZTA) e o metal de base (MB).

O material soldado pelo processo de SAPNC apresenta quatro regiões, diferenciadas pelo tipo de influência recebida na soldagem: a zona misturada (ZM), a zona termomecanicamente afetada (ZTMA), a zona termicamente afetada (ZTA) e o metal de base (MB). A ZM é a região pela qual passou o pino, de forma a misturar o material deformado. Geralmente, essa região apresenta tamanho de grão muito

menor em comparação com as demais regiões. A ZTMA é a região externa à ZM, e se caracteriza por ter sofrido a deformação plástica causada pelo movimento de rotação do pino e mudanças microscópicas devido à temperatura provocada pelo atrito, mas não foi misturada. A ZTA é a parte que sofreu influência somente da temperatura provocada pelo atrito do pino e do ombro com o material. O MB é a região que possui as mesmas propriedades do material antes de ser soldado.

Essas regiões não têm perfil simétrico em relação ao centro da junta soldada. Isso se deve à rotação e translação do pino, que gera os chamados lado de avanço (LA) e lado de retrocesso (LR). O LA é o lado em que ocorre a maior deformação plástica e a maior velocidade relativa durante a soldagem, enquanto o LR é onde há a menor velocidade relativa e a maior parte da mistura do material deformado, pois este é forçado contra o sentido de avanço [4].

## 2- MATERIAIS E MÉTODOS

### 2.1 Materiais estudados

Para a obtenção das juntas soldadas foram utilizadas chapas 6 x 95 x 450 mm. O aço 316L foi fornecido pela Villares Metals® e o superduplex UNS S32750 pela Outokumpu®; suas composições encontram-se na Tab. 1. A chapa de aço inoxidável duplex foi posicionada no lado de avanço (LA) e a chapa de aço inoxidável austenítico, no lado de retrocesso (LR), uma vez que o aço S32750 possui maior dureza e resistência mecânica do que o aço 316L, e por isso necessita de maior atrito e esforço para se deformar plasticamente.

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

Aço	Cr	Ni	Mo	Mn	C	N	Si	Cu	P	Ti	S
UNS S31603(1)	16,5	10,0	2,04	1,30	0,016	0,037	0,50	0,06	0,032	0,002	0,001
UNS S32750 (2)	24,9	6,9	3,79	0,78	0,020	0,260	0,25	0,34	0,023	-----	0,001

(1) Aço inoxidável austenítico equivalente ao AISI/ABNT 316L. Composição fornecida pela Villares Metals®.

(2) Aço inoxidável superduplex equivalente ao SAF 2507. Composição química fornecida pela Outokumpu®.

### 2.2 União por SAPNC

A máquina utilizada para a soldagem foi a Friction Stir Welding RM-2 da TTI® (Transformation Technologies Inc.), podendo operar até 70 kN de força axial e torque máximo de 186 N.m. Foi utilizada ferramenta do compósito de 60%<sub>volume</sub> de nitreto cúbico de boro policristalino com 40% da liga W-Re (PCBN-WRe), da qual

75%<sub>peso</sub> é W e 25%, Re. A temperatura máxima recomendada de operação da ferramenta é de 800°C e a temperatura da ferramenta durante o processo de soldagem é medida por meio de um termopar acoplado à ferramenta.



Figura 2 – a) Máquina de SAPNC. b) ferramenta de PCBN-WRe, com indicações do pino e do ombro.

### 2.3 Análise Metalográfica e Ensaio

As juntas com melhor resultado foram cortadas e embutidas em baquelita, lixadas com lixas de granas de 200 a 2000 e polidas com pasta de diamante de 1  $\mu\text{m}$ . Com o intuito de observar a microestrutura, o preenchimento total da junta e a presença de defeitos internos, como cavidades e outros, as amostras foram submetidas a ataque eletrolítico em solução de 40% de ácido nítrico em água, a 1,5 V por 60 segundos. As amostras foram observadas em microscópio ótico Olympus BX51M. Foram também realizados ensaios de dobramento e por líquidos penetrantes.

## 3- RESULTADOS E DISCUSSÕES

Foram realizadas cinco juntas soldadas com diferentes parâmetros (Tab. 2), tendo como principal variável a velocidade de rotação da ferramenta. A última junta foi realizada com controle de força axial ao invés de controle de posição da ferramenta a fim de obter melhor controle sobre a qualidade, a aparência e a penetração da junta. As juntas foram feitas até ser atingida a melhor combinação de parâmetros como menores temperaturas e forças envolvidas, boa aparência, menor rugosidade e ausência de defeitos internos e externos.

**Tabela 2 – Parâmetros de soldagem por SAPNC utilizados nos testes para o presente trabalho.**

Nº da junta	Penetração (mm)	Vel. avanço (mm/min)	Frequência de rotação (rpm)	Tipo de controle	Aporte térmico (kJ.mm <sup>-1</sup> )	Torque máx. (N.m)	Força axial máx. (kN)	Temp. máx. (°C) (*)
01	5,54	100	300	Posição	1,81	100	58,5	811
02	5,47		200		1,63	150	54,0	760
03	5,47		200-150-100		1,41	120-150-225	48,5	750
04	5,47		150		1,23	140	47,0	680
05	5,42		Força Z (57 kN)	1,60	180	-	805	

(\*) Temperatura Máxima registrada da ferramenta.

Ao iniciar a soldagem com 100 rpm, o torque da ferramenta ultrapassou o limite da máquina, impossibilitando de concluir a união das chapas. Na junta 05 a força de penetração máxima não foi 47 kN, como foi obtido como referência na junta anterior, pois não gerava boa penetração da ferramenta nas chapas, por isso foi necessário aumentar a força vertical para aumentar a penetração da ferramenta.

Nas juntas feitas com controle de posição, a força vertical, a temperatura da ferramenta e o aporte térmico diminuem à medida que a frequência de rotação do processo é reduzida. Isso é devido à diminuição do atrito da ferramenta com o material provocado pela rotação da mesma, o que gera menos calor. No entanto, ao se operar em controle de força, o aporte térmico, o torque e a temperatura da ferramenta aumentaram enquanto a penetração diminuiu. Esse resultado não era esperado e será necessário reproduzir mais juntas com os mesmos parâmetros para confirmar os valores encontrados e assim determinar as possíveis causas.

As juntas 02 (Fig. 3a), 04 e 05 (Fig. 3b) apresentaram os melhores resultados: boa largura do cordão de solda e redução ou ausência de defeitos superficiais, sendo que a junta 05 não apresentou rebarba no lado de avanço. Todas as outras apresentaram defeitos como elevada rugosidade, excesso de aquecimento do material, falta de penetração e rebarba. A elevada rugosidade e a rebarba são ocasionadas pelo aquecimento excessivo da junta durante a soldagem. Não foi observada aderência do material soldado ao material de suporte, nem falta de preenchimento.

Apesar de não ser detectado pelo ensaio por líquidos penetrantes, o ensaio de dobramento indicou que não houve penetração total das juntas realizadas, sendo necessária uma ferramenta com pino maior para unir os materiais até à raiz.

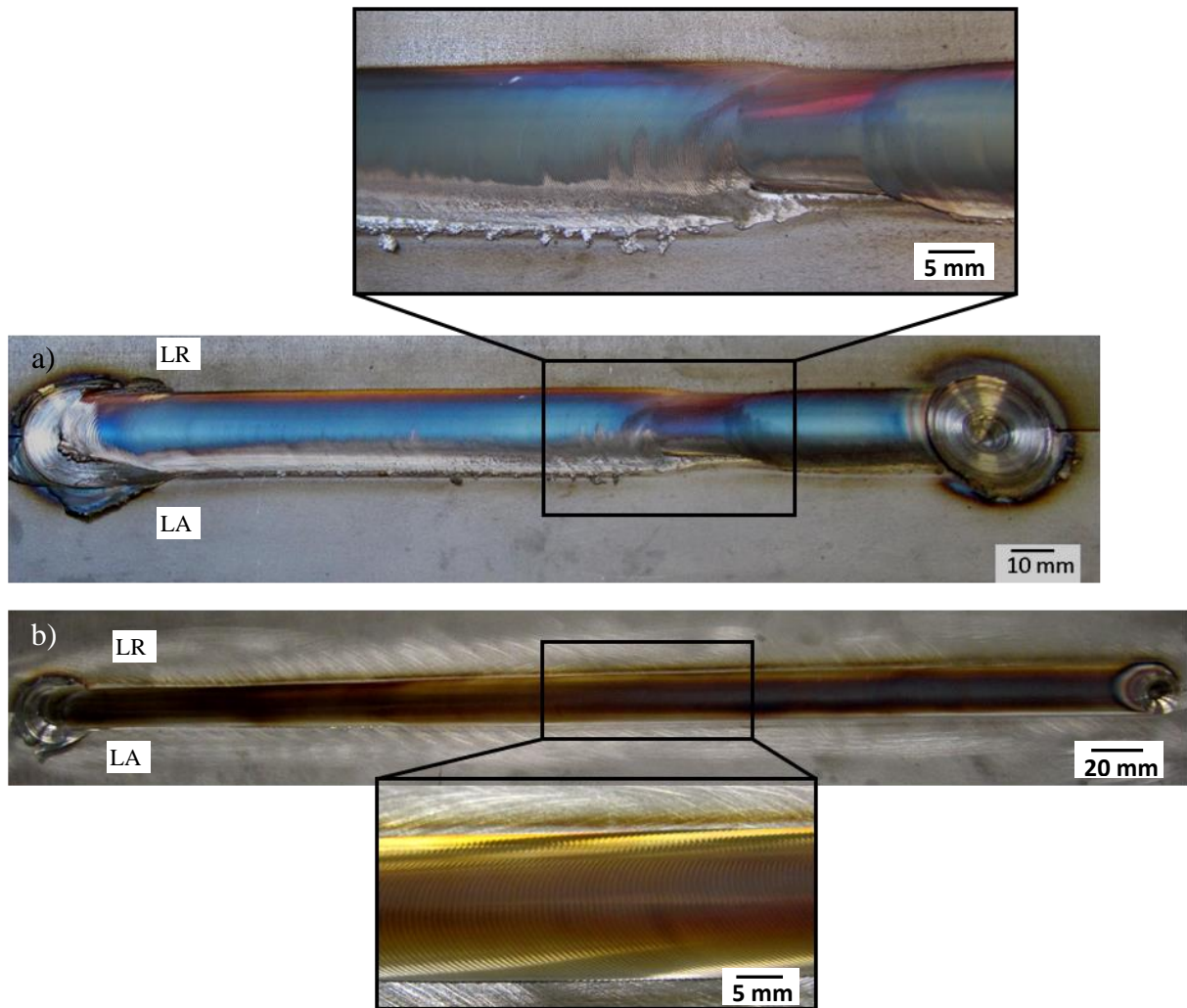


Figura 3 – a) Junta 02 (300 rpm e  $100 \text{ mm}\cdot\text{min}^{-1}$ ) em controle de posição. A região de cordão mais estreito apresenta falta de penetração por parte da ferramenta, representando um tipo de defeito externo. Há uma pequena quantidade de rebarba e rugosidade no lado de avanço (região em detalhe). b) Junta 05, (controle de força em 57 kN), sem defeitos superficiais ou rebarbas.

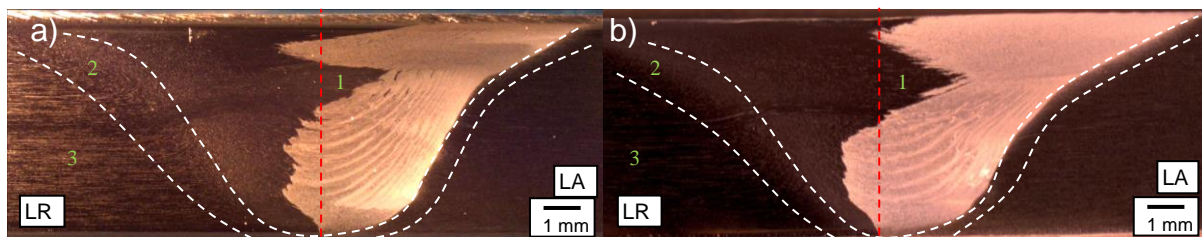


Figura 4 – Macrografia da junta 02 (a) e 05 (b) com o aço austenítico no lado do retrocesso (LR) e aço duplex no lado de avanço (LA). Nota-se em ambas as juntas uma interface bem definida na Zona Misturada (ZM) entre a parte que possui microestrutura duplex (região mais clara) e a que possui microestrutura totalmente austenítica (região mais escura), além de ausência de defeitos gerados por falta de preenchimento. Indicados nas figuras estão as zonas de solda: (1) ZM, (2) ZTMA e (3) ZTA/MB. Ataque eletrolítico usando solução de 40% de ácido nítrico em água, a 1,5 V por 60 segundos. A linha tracejada ao centro indica o centro da junta soldada.

Das juntas realizadas, somente as 02 e 05 foram submetidas à análise metalográfica (Fig. 4). Nessas análises foi possível observar que as mesmas não

apresentaram defeitos causados por falta de preenchimento. Além disso, ambas aparentaram ter penetração total, o que foi posteriormente confirmado pelo teste de líquidos penetrantes. Em ambas as juntas há uma interface bem definida na ZM entre a parte que possui microestrutura duplex (região mais clara) e a que possui microestrutura totalmente austenítica (região mais escura), o que mostra que não houve mistura dos aços a ponto de gerar uma nova região de composição diferente àquelas dos metais de base.

A junta 05 aparenta ter maior influência do ombro do que do pino, apesar do mesmo ter penetrado menos no material, uma vez que a extensão da ZM e da ZTMA, na superfície da junta, é maior do que a solda 02, possuindo um perfil menos acentuado. Isso se deve ao fato de a junta 05 ser mais quente do que a junta 02, influenciando mais a microestrutura.

#### **4- CONCLUSÕES**

Juntas dissimilares de aços inoxidáveis austenítico ABNT 316L e duplex UNS S32750 podem ser unidas pelo processo de SAPNC. Os melhores parâmetros encontrados para chapas de 6 mm de espessura utilizando ferramenta de PCBN-WRe foram frequência de rotação de 150 e 200 rpm, velocidade de avanço de 100 mm.min<sup>-1</sup>. Essas juntas apresentaram baixa rugosidade, pouca rebarba e ausência de defeitos internos. A junta 05 apresentou maior influência do ombro da ferramenta do que a junta 02.

#### **5- AGRADECIMENTOS**

Os autores gostariam de agradecer ao LNNano/CNPEM pelo suporte técnico e infraestrutura, ao CNPq pela bolsa concedida, à Faculdade de Engenharia Mecânica (FEM) pelo mestrado e à Petrobrás, pelo projeto e equipamentos.

#### **6- REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS**

1. MACHADO, J. P. S. E., et al. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE P&D EM PETRÓLEO E GÁS. 2, 2003. Rio de Janeiro. **Influência do óleo nacional pesado na corrosão de aços inoxidáveis. Anais...** Natal: ABGP, 2003. v. 11, p 4066-4071.

2. ASM Metals Handbook: Properties and Selection: Irons, Steels, and High Performance Alloys. United States of America: Metals Handbook, 2005, v. 1. pp. 1304, 1353, 1354, 1395, 1396.
3. ASM Metals Handbook: Corrosion. United States of America: Metals Handbook, 2005, v. 13. pp. 265, 266, 269, 275, 276.
4. MISHRA, Rajiv S.; MAHONEY, Murray W. **Friction Stir Welding and Process**. USA: ASM International, 2007. v. 1 , pp. 1- 5.
5. SANTOS, Tiago F. A. In: International Offshore and Polar Engineering Conference. 21, 2011, Maui. **Correlating Microstructure and Performance of UNS S32750 and S32760 Superduplex Stainless Steels Friction Stir Welding (Proceedings)**.... Danvers: ISOPE, 2011. v. 4. 534 -540.

***Dissimilar friction stir welding between AISI 316L austenitic stainless steel and UNS S32750 superduplex stainless steel***

***Abstract***

*In order to verify the viability of dissimilar AISI 316L austenitic and UNS S32750 superduplex stainless steels joining by FSW, 6-mm-thick plates were welded using a PCBN-WRe tool. The welded joints were performed in position control mode at rotational speeds of 100-300 rpm and travelling speed of 100 mm.min<sup>-1</sup>. These welded joints showed adequate bead width, low roughness and good appearance. Metallographic analysis showed no internal defects. However, tool temperature reached its limit (800 °C) and spindle torque and vertical forces were near the limit supported by FSW machine (180 N.m and 70 kN respectively).*

Keywords: Friction stir welding; Dissimilar welding; duplex stainless steel, austenitic stainless steel.