

## ESTUDO DA RESISTÊNCIA À COROSÃO DO AÇO INOXIDÁVEL LEAN DUPLEX UNS 32304 SOLDADO POR ATRITO COM PINO NÃO CONSUMÍVEL

Victor Hugo Ayusso<sup>1</sup>, Maysa Terada<sup>1</sup>, Víctor Ferrinho Pereira<sup>2</sup>, Célia Regina Tomachuk<sup>3</sup>, Jesualdo Luiz Rossi<sup>1</sup>, Antônio José Ramirez<sup>2</sup>, Isolda Costa<sup>1</sup>

<sup>1</sup>*Instituto de Pesquisas Energéticas e Nucleares (IPEN), Centro de Ciência e Tecnologia de Materiais (CCTM), Av. Prof. Lineu Prestes, 2242, 05508-000, São Paulo-SP, Brazil,*

<sup>2</sup>*Centro Nacional de Pesquisa e Energia de Materiais (CNPEM), Laboratório Nacional de Nanotecnologia (LNNano)*

<sup>3</sup>*Escola de Engenharia da Universidade de São Paulo, Departamento de Ciências Básicas e Ambientais.  
maysaterada@uol.com.br*

### RESUMO

*A Soldagem por Atrito com Pino Não Consumível vem sendo amplamente estudada visando a substituição dos métodos tradicionais de soldagem na produção, reparo e montagem de peças e tubulações. Trata-se de um processo com diversas vantagens para aplicações em condições extremas, daí a importância do estudo da resistência à corrosão não apenas das diferentes zonas geradas pelo processo como também dos pares galvânicos formados entre elas. Neste trabalho, amostras contendo zona misturada, zona afetada pelo calor, zona termo mecanicamente afetada e metal base foram retiradas de chapas do aço inoxidável lean duplex UNS 32304 Soldadas por Atrito com Pino Não Consumível e sua resistência à corrosão foi avaliada utilizando ensaios eletroquímicos. Os resultados indicaram que a zona afetada pelo calor foi a mais susceptível à corrosão localizada, ou seja, esta seria a região menos resistente à corrosão em uma peça soldada por este processo.*

Palavras-chave: UNS32304 lean duplex, FSW, corrosão

## INTRODUÇÃO

O aço inoxidável lean duplex UNS 32304 apresenta boas propriedades físicas e mecânicas, excelente resistência à corrosão e boa soldabilidade. Estas propriedades o tornam uma alternativa tanto técnica quanto economicamente superior aos outros tipos de aços inoxidáveis como os austeníticos AISI 304, 304L, 316, 316, 321 e 347, os ferríticos AISI 430 e 444 e os martensíticos AISI 410 e 420. A Soldagem por Atrito com Pino não Consumível (SAPNC) ou Friction Stir Welding (FSW) é um processo de união (mistura) no estado sólido desenvolvido em 1991<sup>(1)</sup>, em que o material ao longo do cordão de solda é aquecido e misturado plasticamente através da rotação de um pino não-consumível.<sup>(2)</sup> As vantagens do processo resultam do fato de que o FSW mistura as fases sólidas a uma temperatura de aproximadamente 70% do ponto de fusão e não permitem a precipitação de fases devido ao rápido resfriamento. Este processo tem sido estudado para aplicações em tubos de petróleo / gás e indústria aeroespacial, e produz zonas com microestruturas e propriedades únicas que são muito diferentes das observadas em soldagens por processos convencionais. Trabalhos anteriores sugerem que o processo de FSW diminui a resistência à corrosão das zonas misturadas dos aços inoxidáveis duplex,<sup>(3)</sup> mas que ainda assim suas propriedades seriam superiores às dos aços austeníticos.

## PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL

A composição química do aço inoxidável UNS 32304 foi medida por emissão óptica e o resultado obtido é dado na Tab. 1. Todos os elementos químicos estão dentro da composição nominal determinada, exceto o Cu, que não deveria estar presente nesta liga.

Tabela 1 – Composição química do aço inoxidável lean duplex UNS 32304 medida por emissão óptica.

	<b>C</b>	<b>Cr</b>	<b>Ni</b>	<b>Mo</b>	<b>Mn</b>	<b>Si</b>	<b>Cu</b>	<b>P</b>	<b>S</b>	<b>Fe</b>
<b>UNS 32304</b>	0,023 ±0,004	22,64 ± 0,06	3,210 ±0,112	0,154 ±0,002	1,417 ±0,0003	0,437 ±0,0008	0,481 ±0,005	0,042 ±0,000	<0,0003	Bal.

Chapas de 350 mm (c) 70 mm (l), 1,8 mm (e) do aço inoxidável duplex UNS32304 foram soldadas pelo processo FSW, com um pino de comprimento 1,8

mm de nitreto de boro cúbico policristalino (60% NBPC-40% WRe/25% Re) e um ombro de 25 mm. A velocidade de rotação utilizada foi e 200 rpm e a velocidade de avanço da soldagem foi de 100 mm/min.

As amostras foram retiradas a partir do metal base (MB) e da secção transversal das chapas soldadas de acordo com as Figs. 1 e 2, contendo MB, zona termicamente afetada (ZTA), zona termo-mecanicamente afetada (ZTMA) e zona misturada (ZM). Todas as amostras foram embutidas em baquelite e tinham a área de 1,0 cm<sup>2</sup>. As amostras foram lixadas e polidas até 1 µm. Algumas foram imersas em uma solução de Behara Modificado (80 ml Água deionizada, 20 ml Ácido Clorídrico, 1 g Metabissulfito de Potássio e 2 g Bissulfito de Amônio), à temperatura ambiente por 20 s e depois observadas no microscópio óptico. Outras foram preparadas para os ensaios eletroquímicos com contato elétrico estabelecido com fio de cobre, como ilustra o esquema apresentado na Fig. 3.

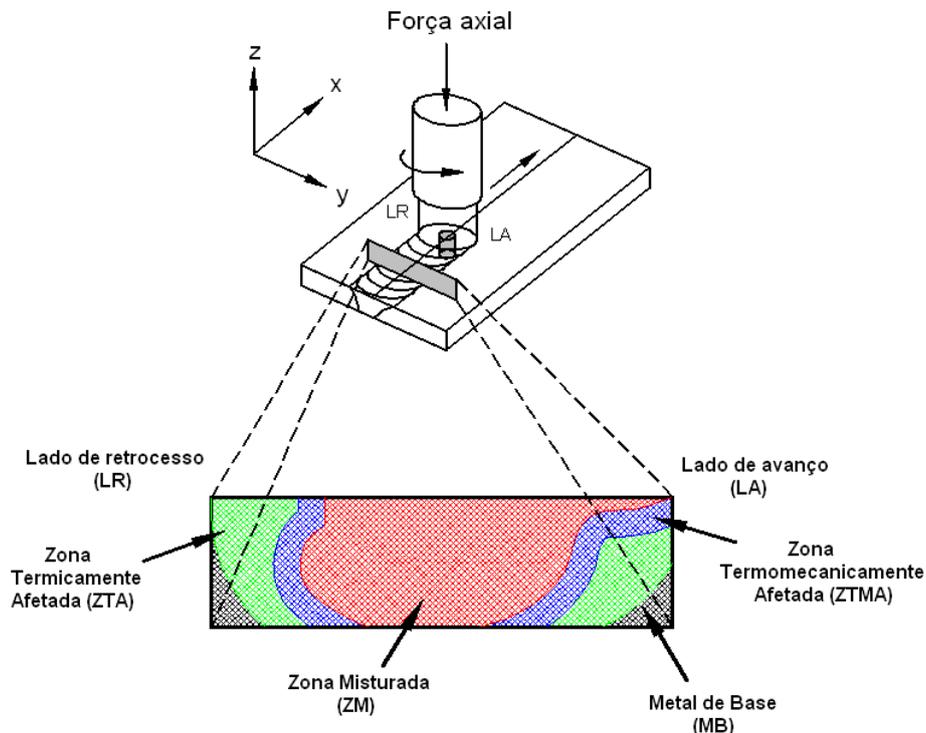


Figura 1: Macrorregiões observadas na seção transversal da junta soldada utilizando o processo de FSW.

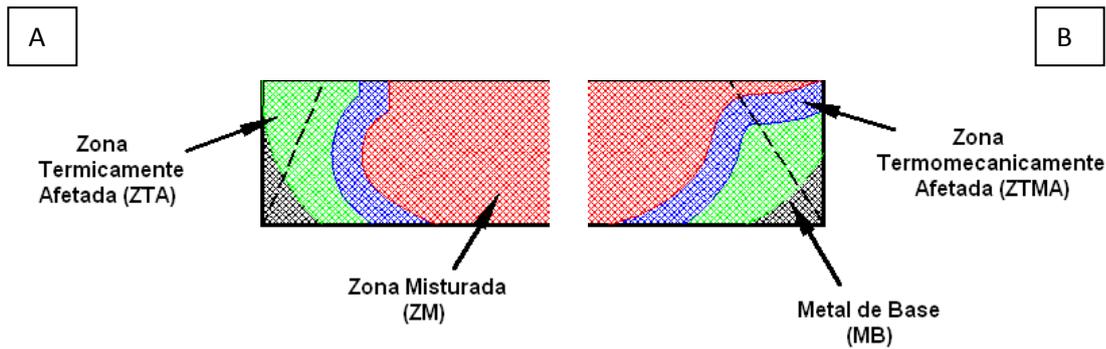


Figura 2: Amostras retiradas da seção transversal da chapa soldada por FSW contendo MB, ZTA, ZTMA e ZM. a) lado de retrocesso (ZTAR) e b) lado de avanço (ZTAA).

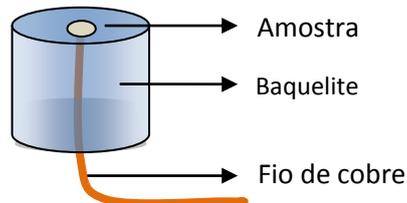


Figura 3: Esquema do eletrodo de trabalho utilizado nos ensaios eletroquímicos.

A resistência à corrosão das diferentes amostras foi determinada utilizando espectroscopia de impedância eletroquímica e curvas de polarização anódicas. Todos os testes foram realizados em uma solução de NaCl a 3,5%, à temperatura ambiente, utilizando uma célula de três eletrodos de configuração, um com um fio de platina e um eletrodo de Ag/AgCl como contra eletrodo e o eletrodo de referência, respectivamente.

A quantidade de ferrita de cada amostra foi medida usando um ferritoscópio e os resultados foram correlacionados com a resistência à corrosão.

## RESULTADOS DISCUSSÕES

A quantidade de ferrita foi medida em todas as amostras. Amostras contendo a junta soldada apresentaram uma diminuição de até 5% de ferrita em relação ao MB, especialmente na ZTA. Além disso, a diminuição foi mais acentuada no lado de retrocesso que no lado de avanço.

Os resultados de espectroscopia de impedância eletroquímica indicam a presença de um óxido de elevada estabilidade na superfície do aço inoxidável lean duplex soldado por FSW na ZTA no lado de avanço, com ângulos de fase próximos a  $-80^\circ$  em médias frequências em todas as amostras analisadas – Fig. 4. Em baixas frequências, os ângulos de fase diminuíram para  $-60^\circ$  nas amostras de MB e de junta soldada do lado de avanço mas um resultado ainda mais baixo foi detectado nas amostras do lado de retrocesso. Todos os diagramas de fase de Bode apresentaram dois picos associados com a camada de óxido formada sobre a superfície e o processo de transferência de carga.

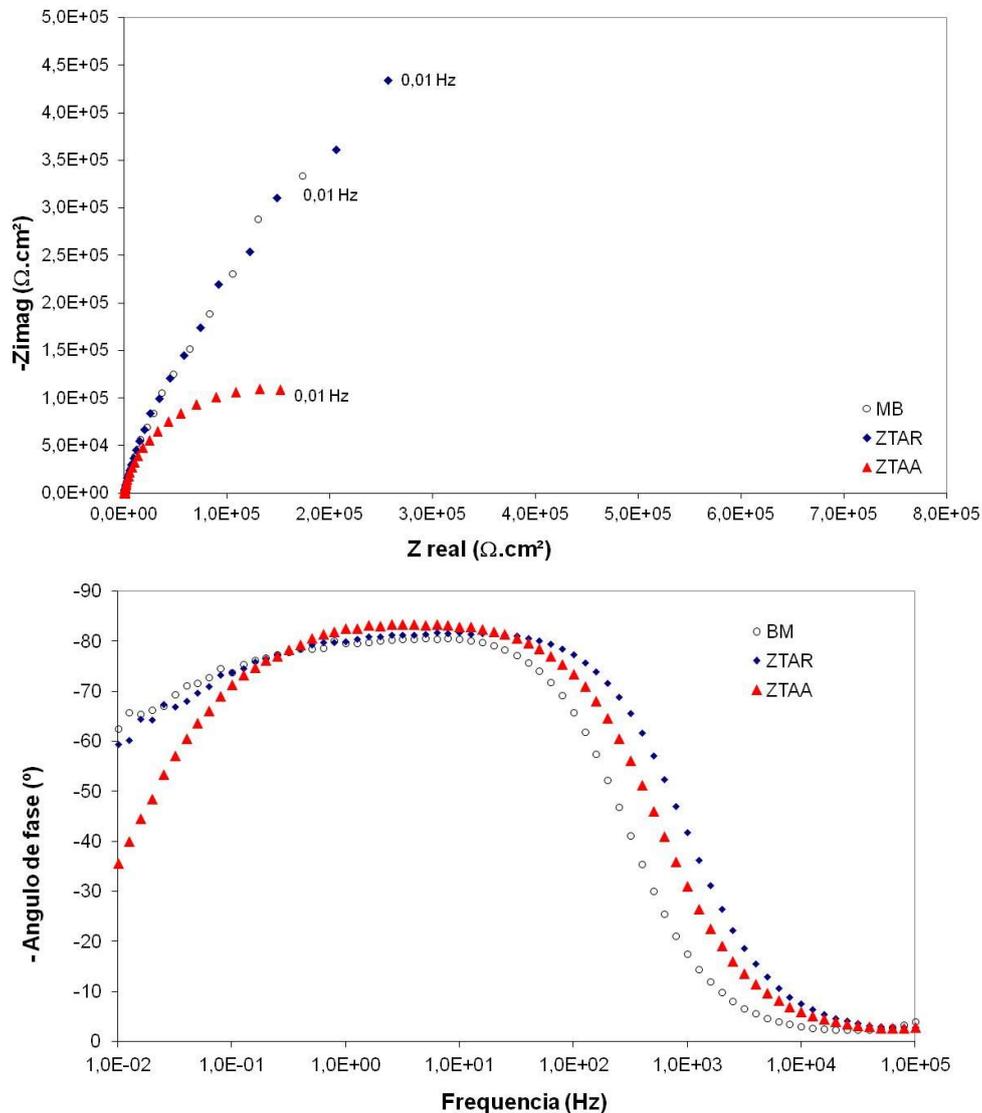


Figura 4 – Espectroscopia de impedância eletroquímica do aço inoxidável lean duplex UNS 32304 após 24 h de imersão em solução de NaCl a 3,5%, a temperatura ambiente. Diagramas de Nyquist e Bode ângulo de fase.

Os ensaios de polarização potenciodinâmica indicam que as correntes de corrosão das juntas soldadas aumentaram duas ordens de grandeza em relação ao metal de base – Fig. 5. No entanto, ainda apresentam valores típicos de materiais passivos. Regiões de instabilidade puderam ser observadas em todas as amostras ensaiadas mas apenas nas amostras ZTAR foram encontrados indícios de corrosão localizada por microscopia eletrônica de varredura – Fig. 6. Os resultados eletroquímicos indicam que o lado de retrocesso é mais susceptível à corrosão que o lado de avanço, provavelmente devido à diferença microestrutural encontrada na zona termicamente afetada destas amostras. No entanto, devido ao tamanho reduzido das zonas, uma análise utilizando técnicas localizadas deve ser realizada visando maiores esclarecimentos.

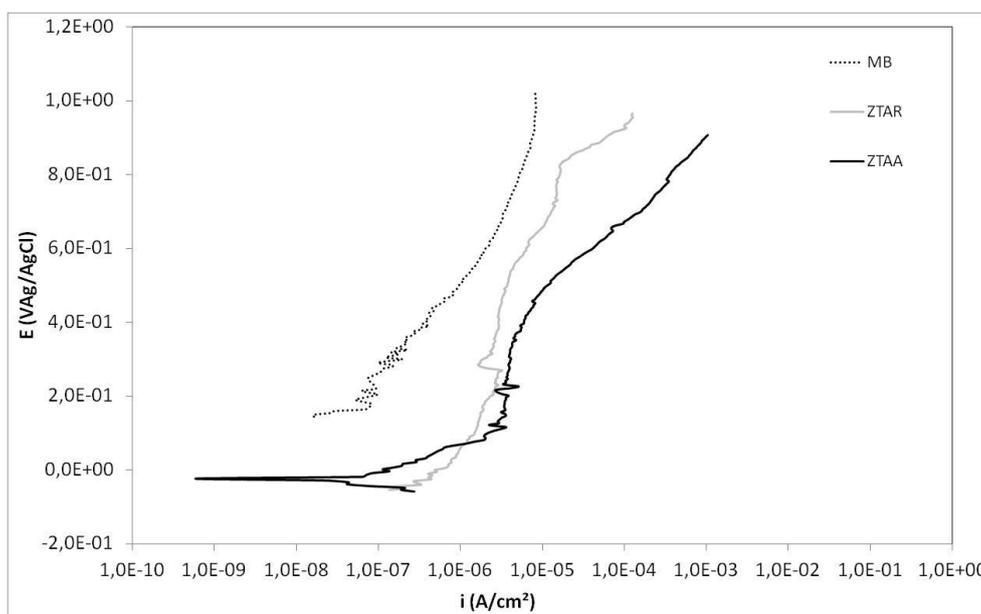


Figura 5 – Diagramas de polarização potenciodinâmica anódica do aço inoxidável lean duplex UNS 32304 após 24 h de imersão em solução de NaCl a 3,5%, a temperatura ambiente.

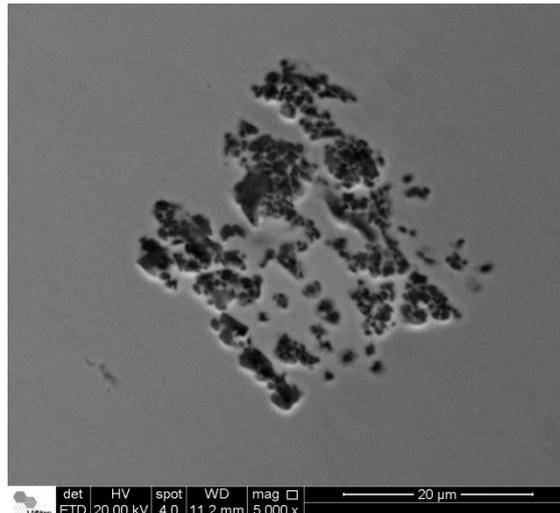


Figura 6: Corrosão localizada na Z-TAR do aço inoxidável lean duplex UNS 32304 soldado por FSW após polarização potenciodinâmica anódica em solução de 3,5% de NaCl. MEV. Elétrons secundários.

## CONCLUSÕES

As juntas soldadas por FSW apresentaram quantidades de ferrita inferiores às do metal de base, especialmente no lado de retrocesso.

Os testes eletroquímicos indicaram a elevada estabilidade da camada de óxido sobre a superfície das amostras e a menor resistência à corrosão localizada das juntas soldadas em comparação com o metal de base. O lado de avanço apresentou os menores valores de impedância e de ângulo de fase em baixas frequências mas apenas no lado de retrocesso foram observadas regiões de corrosão localizada após os ensaios de polarização potenciodinâmica anódica.

## AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem a CNEN pelo apoio financeiro a Victor Hugo Ayusso, a CAPES pelo apoio financeiro a Dra. Maysa Terada e a Petrobras pelo fornecimento de amostras.

## REFERÊNCIAS

1. THOMAS, W.M. et al, U.S. Patent No. 5,460,317.
2. ELLIS, M.; STRANGWOOD, M., *TWI Bull.*, v. 6, p. 138–146,1995.

3. MAGNANI, M. et al, Microstructural and Electrochemical Characterization of Friction Stir Welded Duplex Stainless Steels, *Int. J. Electrochem. Sci.*, v. 9, p. 2966 – 2977, 2014

## **STUDY OF THE CORROSION RESISTANCE OF FRICTION STIR WELDED LEAN DUPLEX UNS 32304 STAINLESS STEEL**

### **ABSTRACT**

The friction stir welding has been widely studied to substitute the traditional welding used in repairing and production of pipelines. The study of the corrosion resistance of the friction stir welded materials is obligatory as this process can be used under extreme conditions. In this work, samples containing stir zone, heat affected zone, thermomechanically affected zone and base metal were taken from plates of lean duplex UNS 32304 stainless steels friction stir welded and their corrosion resistance was evaluated using electrochemical tests. The results indicated that the heat affected zone is the most susceptible to the localized corrosion.

Keywords: UNS32304 lean duplex, FSW, corrosion