

# AVALIAÇÃO DA RESISTÊNCIA A CORROSÃO POR PITTES EM JUNTAS SOLDADAS DE AÇOS INOXIDÁVEL DUPLEX E SUPERDUPLEX<sup>1</sup>

*Philippe Ferreira Peçanha de Souza<sup>2</sup>*

*Ruben Rosenthal<sup>3</sup>*

*Ronaldo Pinheiro da Rocha Paranhos<sup>4</sup>*

## **Resumo**

Este trabalho apresenta uma metodologia para a condução do ensaio conforme ASTM-G48 método A envolvendo juntas soldadas. Foram avaliados o metal base e juntas soldadas de aço inoxidável duplex e super-duplex. As atividades incluíram a montagem dos dispositivos necessários ao ensaio, a preparação dos corpos de prova, preparação da solução de cloreto férrico, a realização dos ensaios, método de limpeza (antes e após o ensaio), o cálculo e a análise dos resultados obtidos. A microestrutura do metal base e do metal de solda foi caracterizada por metalografia ótica. Os resultados mostram que, para o caso de juntas soldadas, é necessário um cuidadoso procedimento de limpeza durante o ensaio conforme ASTM G-48 para que os resultados sejam confiáveis. Ambos os metais base apresentaram baixos valores de perda de massa após o ensaio, ou seja, uma elevada resistência à corrosão por pitting. Já para a junta soldada, apenas o aço super-duplex apresentou boa resistência à corrosão por pitting, ou seja, uma baixa perda de massa. A menor resistência à corrosão por pitting para as juntas soldadas com aço duplex (ou seja, elevado valor de perda de massa), foi atribuída ao maior teor de ferrita delta verificado na microestrutura desta junta soldada.

**Palavras-chave:** ASTM G-48; Corrosão; Soldagem; Aço inoxidável duplex; Superduplex.

## **CORROSION TEST ACCORDING TO ASTM G-48 METHOD AT WELDED JOINTS OF DUPLEX AND SUPERDUPLEX STAINLESS STEEL**

### **Abstract**

This work shows a methodology to carry out tests according to ASTM-G48 method A for the case of welded joints. Both base metal and welded joints of duplex and superduplex stainless steel were evaluated. The activities included the set up of the apparatus needed to the test, preparation of specimens and the ferric chloridric solution, the performance of the test, cleaning methods (before and after the test) and the calculation of the results of weigh loss per area. Microstructure of both base metal and weld metal was also characterized by optical metalography. The results show that, for the case of welded joints, it is necessary a careful cleaning procedure during the test according ASTM G-48 in order that the obtained results can be reliable. Both base metals presented low values of weight loss after the test, what means a high pitting corrosion resistance. For the welded joints, only the superduplex shows low weight loss. The lower pitting corrosion resistance of the duplex stainless steel welded joint was attributed to the higher delta ferrite content verified at the microstructure of this welded joint.

**Key words:** ASTM G-48; Pitting corrosion; Welding; Duplex stainless steel; Superduplex stainless steel.

<sup>1</sup> *Contribuição técnica ao 63º Congresso Anual da ABM, 28 de julho a 1º de agosto de 2008, Santos, SP, Brasil*

<sup>2</sup> *Aluno de Graduação Eng. Metalúrgica e de Materiais, LAMAV/CCT/ UENF.*

<sup>3</sup> *Prof. Associado do LAMAV/CCT/UENF ruben@uenf.br*

<sup>4</sup> *Prof. Associado do LAMAV/CCT/UENF paranhos@uenf.br*

## 1 INTRODUÇÃO

Os aços inoxidáveis duplex (AID) e super-duplex (AISD) vêm atraindo um número cada vez maior de setores da indústria, devido a suas propriedades mecânicas e resistência à corrosão quando comparado aos outros tipos de aços inoxidáveis. Estes materiais ampliaram o campo de atuação dos aços inoxidáveis tradicionais.<sup>[1]</sup> Estas características podem ser alteradas quando o material é submetido a múltiplos ciclos térmicos como os que ocorrem durante a soldagem.<sup>[1,2]</sup>

As propriedades mecânicas e químicas apresentadas pelos aços inoxidáveis duplex proporcionaram um aumento significativo em seu uso principalmente em aplicações junto à indústria química, petroquímica, de papel e celulose, usinas de tratamento de água e engenharia marinha.<sup>[3]</sup>

O ensaio de corrosão conforme norma ASTM G-48 Método A<sup>[4]</sup> tem por objetivo avaliar a resistência à corrosão por pitting em ambientes clorados, submetendo um corpo de prova a uma solução de 6% de cloreto férrico à temperatura de 35° C por um período de 24 h. A perda de massa por área da superfície do corpo de prova é calculada antes e após o ensaio. Quanto menor este valor, melhor a resistência ao pitting do material.

Por sua baixa complexidade de execução e baixo custo, este ensaio pode ser amplamente utilizado para a avaliação de juntas soldadas, ou, mais particularmente, de procedimentos de soldagem.

O objetivo deste trabalho é apresentar detalhadamente as etapas necessárias à execução do ensaio conforme norma ASTM G-48 para o caso de juntas soldadas. Foram usados e avaliados tubos do metal base e juntas soldadas em aço inoxidável duplex e super-duplex.

## 2 MATERIAIS E MÉTODOS

Na preparação das juntas soldadas, foram usados dois tubos de aço inoxidável duplex (AID) e um tubo de aço inoxidável super-duplex (AISD). A tabela 1 mostra suas respectivas classificações e diâmetros. A composição química, segundo o fabricante dos tubos,<sup>[5]</sup> pode ser visto na Tabela 2.

**Tabela 1.** AID e AISD usados, classificação e dimensões.

METAL BASE – TUBOS					
AÇO	GRAUS			$\Phi_{int}$ (mm)	e (mm)
	UNS	ASTM	SAF		
AID	S31803	A-790	2205	50,80	3,9
	S32205			152,40	7,1
AISD	S32750	A-790	2507	76,20	5,5

Legenda:  $\Phi_{int}$  - diâmetro interno do tubo ; e - espessura da parede do tubo.

**Tabela 2.** Composição Química Nominal (% Peso) dos Aços Inoxidáveis.<sup>[5]</sup>

	C máx	Si máx	Mn máx	P máx	S máx	Cr	Ni	Mo	N
AID	0,030	1,0	2,0	0,030	0,015	22	5	3,2	0,18
AISD	0,030	0,8	1,2	0,035	0,015	25	7	4	0,3

O tubo de AID de espessura 3,9 mm foi soldado apenas com processo TIG. Já o tubo AID de espessura 7,1 mm e o tubo AISD de espessura 5,5 mm foram soldados com passe de raiz por processo TIG e enchimento com processo eletrodo

revestido (SMAW). Detalhes dos procedimentos de soldagem podem ser encontrados em outro trabalho.<sup>[6]</sup>

O metal de adição, vareta para o processo TIG e eletrodo revestido para o processo SMAW, foram distintos para o AID e AISD soldados. A composição química dos consumíveis usados, segundo o fabricante,<sup>[7]</sup> assim como sua classificação segundo a norma AWS 5.9-93<sup>[8]</sup> é mostrada na Tabela 3.

**Tabela 3.** Composição química típica dos eletrodos e varetas Metais de Adição<sup>[7]</sup> e respectiva classificação conforme AWS 5.9-93<sup>[8]</sup>

		$\Phi$ (mm)	AWS 5.9	C	Si	Mn	Cr	Ni	Mo	N	Cu	W
AID	VAR	2,4	ER 2209	0,015	0,4	1,7	22,5	8,8	3,2	0,15	-	-
	ER	2,4	E 2209-17	0,03	0,9	0,8	23,0	9,0	3,2	0,17	-	-
AISD	VAR	2,4	ER 2553	0,02	0,3	0,8	25,5	9,5	3,7	0,22	0,6	0,6
	ER	2,4	E 2553-15	0,03	0,5	1,1	25,0	9,3	3,7	0,22	0,7	0,6

Legenda: VAR - vareta usada como metal de adição no processo TIG; ER - eletrodo revestido usado como metal de adição no processo SMAW;  $\Phi$  – diâmetro do eletrodo.

#### Notas Importantes:

i) O eletrodo E2209-17 tem revestimento rutilico. O E2553-15 tem revestimento básico.

ii) Os valores indicados indicam a composição química (% peso) da vareta. No caso do eletrodo revestido indica a composição típica do metal de solda depositado.

Para o ensaio de corrosão conforme a norma ASTM G-48 Método A, foram cortadas amostras dos tubos com dimensões aproximadas de 50x25 mm. No caso das juntas soldadas, o cordão de solda foi posicionado na longitudinal do corpo de prova, de forma a promover uma maior exposição do metal de solda e zona termicamente afetada (ZTA) ao ambiente corrosivo. A identificação dos corpos de prova é mostrada na tabela 4.

Os corpos de prova foram lixados com lixa 100 para eliminar qualquer defeito superficial e rugosidade excessiva. Todas as bordas foram arredondadas com o objetivo de reduzir possíveis concentrações de tensões.

O aparato para o ensaio foi um recipiente de banho-maria com controle de temperatura. Este foi cheio com água e regulado à temperatura de 35°C no console do equipamento até estabilizar a temperatura do banho. Um becker graduado de 600 ml foi usado para conter a solução de cloreto férrico e o corpo de prova, sendo este imerso no recipiente de banho-maria para a execução do ensaio.

Para que a amostra tivesse a mínima área possível de contato com a vidraria durante o ensaio, foram usados suportes de vidro no fundo do becker para evitar contato do corpo de prova com a vidraria. A amostra foi posicionada em sobre os suportes e imersa na solução, como mostra a Figura 1.

A solução foi preparada diluindo-se 50 g de cloreto férrico ( $\text{FeCl}_3 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ ) em 450 ml de água destilada. O volume da solução durante o ensaio foi calculado para obter-se cerca de 5 ml por  $\text{cm}^2$  do corpo de prova e concentração de aproximadamente 6% de  $\text{FeCl}_3$ .

A área superficial dos corpos de prova foi determinada medindo-se o comprimento e altura de todas as faces com uma escala graduada de precisão de 1 mm. Desta forma, foi possível calcular a área da superfície dos corpos de prova.

Utilizando o aparelho de limpeza por ultra-som, foi realizada a limpeza de cada amostra por cinco minutos. Após ser retirada do aparelho de ultra-som com o auxílio de uma pinça, lavada com acetona e secada com ar quente, as amostras foram pesadas em balança de precisão de quatro casas decimais.

Um filme de PVC (filmito) foi usado para isolar a abertura do becker, impedindo que a solução evapore. Além do termostato do equipamento de banho maria, um termômetro graduado foi usado para um melhor acompanhamento da temperatura durante o ensaio. Após 24 horas de ensaio, o equipamento de banho maria foi desligado e com uma pinça a amostra retirada do becker com a solução de cloreto férrico.

**Tabela 4.** Identificação dos corpos de prova submetidos ao ensaio de corrosão conforme ASTM G-48 Método A.

Medida do Tubo ( $\Phi_{int}$ (mm))	Material do Tubo	Identificação do Tubo	Identificação do CP	Observação
(50,80)	AID	01	CP-06	Junta Soldada
			CP-08-MB-01	Metal Base
			CP-08-MB-02	Metal Base
			CP-08-01	Junta Soldada
			CP-08-02	Junta Soldada
(76,20)	AISD	02	CP-09-MB-01	Metal Base
			CP-09-MB-02	Metal Base
			CP-09	Junta Soldada
			CP-10	Junta Soldada
(152,40)	AID	03	CP-11-01	Junta Soldada
			CP-11-02	Junta Soldada
			CP-13	Junta Soldada



**Figura 1** Posicionamento do CP nos suportes de vidro

Para a limpeza da amostra após o ensaio, foram encontradas algumas dificuldades na seleção do método de limpeza a ser adotado (mecânica ou ultra-som) e em que quantidade usá-las. Foi então elaborado um procedimento para a limpeza das amostras com base na norma ASTM G-1,<sup>[9]</sup> padronizando esta etapa do ensaio, fornecendo maior credibilidade aos resultados obtidos.

Após o procedimento de limpeza, as amostras foram pesadas novamente em balança de precisão de quatro casas decimais. Com o peso final, foi calculada a perda de massa, conforme mostra a equação abaixo.

$$\Delta M = (M_i - M_f) / A \quad (\text{eq. 1})$$

Legenda:

$\Delta M$  → Perda de massa relativa ( $\text{g}/\text{m}^2$ )

$M_i$  → Massa inicial (g)

$M_f$  → Massa final (g)

$A$  → Área superficial ( $\text{m}^2$ )

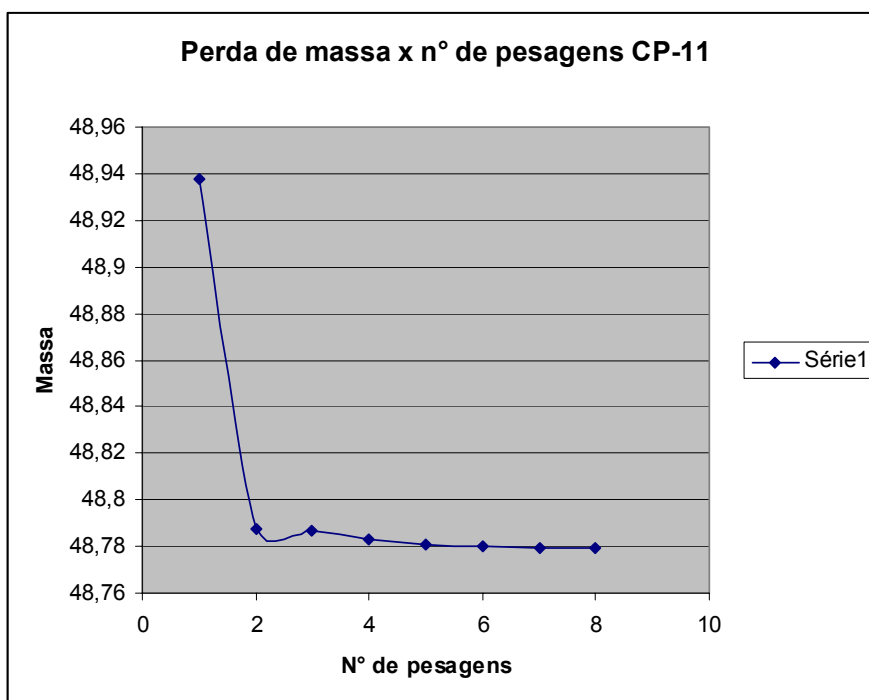
Foi considerado aprovado as amostras que ao final do ensaio tiveram perda de massa inferior a  $4 \text{ g}/\text{m}^2$  e que não apresentava pittes visíveis a um aumento de 20 vezes.

A microestrutura do metal base e das juntas soldadas foi avaliada por metalografia ótica, sendo usado o ataque químico BEHARA (3g de  $\text{K}_2\text{S}_2\text{O}_5$ , 10g  $\text{Na}_2\text{S}_2\text{O}_3 \cdot 5\text{H}_2\text{O}$  em 100ml de água destilada).

### 3 RESULTADOS E DISCUSSÃO

O procedimento de limpeza elaborado teve como base a norma ASTM G-01<sup>[9]</sup> para que a remoção do produto de corrosão oriundo do ensaio fosse o mais eficiente possível. O método é baseado na repetição de ciclos de limpeza do corpo de prova por ultra-som até que o corpo de prova não mais apresente uma perda de massa considerável.

Seguindo este procedimento, depois de retirado do Becker, a amostra foi lavada em água corrente e submetida a limpeza por ultra-som durante 5 min. Assim que terminado a ultra-som a amostra era lavada em acetona, seca com ar quente e efetuada a pesagem. Esta rotina de limpeza foi repetida até que após duas pesagens consecutivas a massa se mantivesse inalterada, como mostra a figura 2. Este procedimento garantiu que todo o produto de corrosão oriundo do ensaio fosse removido, porém evitando que partes de metal fossem removidas. Este procedimento tem impacto direto no resultado final do ensaio, uma vez que qualquer diferença de massa altera significativamente os resultados.



**Figura 2** – Gráfico de perda de massa obtido com os resultados do procedimento de limpeza adotado.

Para o AISD foram preparadas 2 amostras relativas ao metal base (CP-09-MB-01 e CP-09-MB-02) e 2 amostras relativas à junta soldada (CP-09 e CP-10). A Tabela 5 apresenta os resultados de perda de massa obtidos.

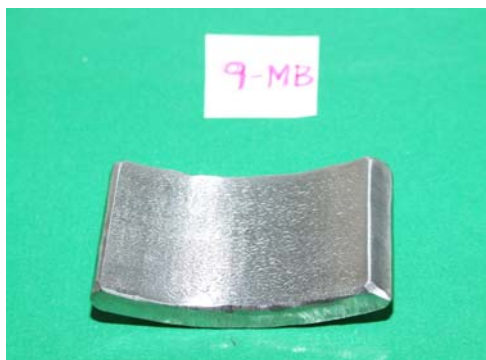
Observa-se o metal base AISD apresentou uma perda de massa de  $0,22 \text{ g/m}^2$  (linha 1 e 2 da Tabela 5) Estes resultados se enquadram no critério de aceitação adotado, de  $4 \text{ g/m}^2$  máximo, também usado pela norma ET-200 Apêndice 16. A figura 3 mostra a ausência de pites visíveis ao longo de toda a amostra, justificando a baixa perda de massa obtida.

Para as amostras referentes à junta soldada em AISD, a perda de massa obtida foi de  $2,83$  e  $0,45 \text{ g/m}^2$  respectivamente (linhas 3 e 4 da Tabela 5). A Figura 4 mostra a ausência de pites visíveis a olho nu.

Os resultados mostrados na Tabela 5 mostram que apesar de todas as amostras em AISD testadas (metal base e junta soldada) adequarem-se ao critério de aceitação adotado, as amostras referentes ao metal base obtiveram melhor resistência a corrosão por pitting, ou seja, menor perda de massa quando comparadas às amostras de junta soldada em AISD.

**Tabela 5.** Resultado de perda de massa por área para as amostras de AISD.

Tubo de Origem	Identificação do CP	Tipo do CP	Massa Inicial (g)	Massa Final (g)	Área ( $\text{m}^2$ )	Perda de massa por área ( $\text{g/m}^2$ )
02	CP-09-MB-01	Metal Base	51,2385g	51,2379g	0,0030950	$0,22 \text{ g/m}^2$
02	CP-09-MB-02	Metal Base	50,2319g	50,2312g	0,0031150	$0,22 \text{ g/m}^2$
02	CP-09	Junta Soldada	52,7954g	52,7863g	0,003267	$2,83 \text{ g/m}^2$
02	CP-10	Junta Soldada	36,7335g	36,7324g	0,0024393	$0,45 \text{ g/m}^2$



**Figura 3** – Amostra do metal base de AISD (CP-09-MB-02) após o ensaio.



**Figura 4** – Amostra da junta soldada de AISD (CP-09) após o ensaio

Para o AID foram preparadas 2 amostras relativas ao metal base (CP-08-MB-01 e CP-08-MB-02) e 6 amostras relativas às juntas soldadas (CP08-01, CP-08-02, CP-06, CP-11-01, CP-11-02 e CP-13). A Tabela 6 apresenta os resultados de perda de massa obtidos.

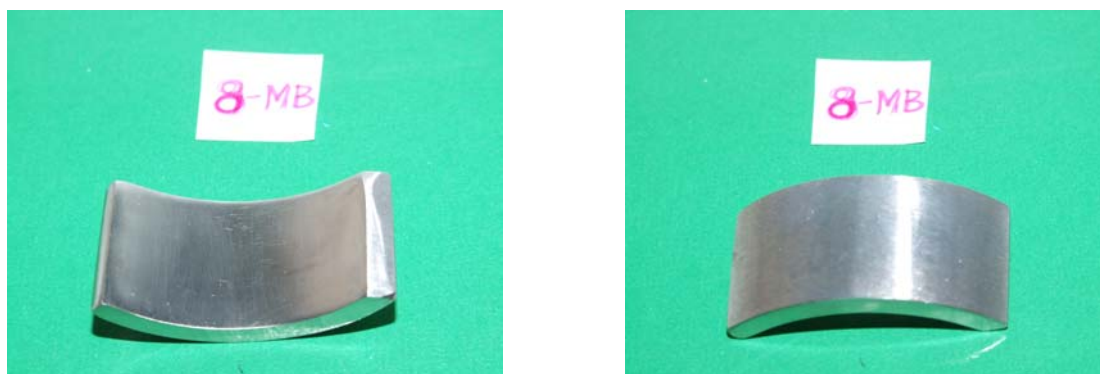
No caso do metal base AID (linhas 1 e 2 da Tabela 6), observa-se que a perda de massa obtida foi de, respectivamente, 1,27 e 0,43 g/m<sup>2</sup>. Estes resultados se enquadram no critério de aceitação adotado. A Figura 5 mostra a ausência de pites visíveis ao longo de toda a amostra, justificando a baixa perda de massa obtida.

Para as juntas soldadas com AID (linhas de 3 a 8 da Tabela 6), observa-se perda de massa de, respectivamente 79,2; 38,4; 51,4; 55,3; 52,5 e 57,5 g/m<sup>2</sup>. Estes resultados não atendem o critério de aceitação adotado. A Figura 6 mostra que vários pites podem ser observados ao longo da amostra, tanto pelo lado interno como externo do tubo, justificando a grande perda de massa obtida em todos os ensaios das juntas soldadas em AID.

A diferença entre os resultados do metal base e das juntas soldadas em AID mostra que a seleção do procedimento de soldagem, assim como os consumíveis de soldagem, têm um papel fundamental nos resultados obtidos, havendo assim, a necessidade de revisá-los para obter uma melhora nos resultados.

**Tabela 6.** Resultados de perda de massa por unidade de área para as amostras de AID.

Identificação do Tubo de Origem	Identificação do CP	Tipo do CP	Massa Inicial (g)	Massa Final (g)	Área (m <sup>2</sup> )	Perda de massa por área (g/m <sup>2</sup> )
01	CP-08-MB-01	Metal Base	33,6253g	33,6219g	0,002668	1,27 g/m <sup>2</sup>
01	CP-08-MB-02	Metal Base	36,7335g	36,7324g	0,002529	0,43 g/m <sup>2</sup>
01	CP-08-01	Junta Soldada	24,6751g	24,5007g	0,0022016	79,2 g/m <sup>2</sup>
01	CP-08-02	Junta Soldada	21,1233g	21,0530g	0,001827	38,4 g/m <sup>2</sup>
01	CP-06	Junta Soldada	16,2390g	16,1646g	0,001448	51,4 g/m <sup>2</sup>
03	CP-11-01	Junta Soldada	48,9374g	48,7869g	0,002718	55,3 g/m <sup>2</sup>
03	CP-11-02	Junta Soldada	47,0599g	46,9215g	0,002634	52,5 g/m <sup>2</sup>
03	CP-13	Junta Soldada	56,6645g	56,4870g	0,003088	57,5 g/m <sup>2</sup>



**Figura 5** – Aspecto da amostra do metal base de AID após o ensaio (CP-08-MB-02).



**Figura 6** – Aspecto de amostra de junta soldada em AID após o ensaio (CP-11-02).

A microestrutura dos aços AID e AISD, quando atacadas com o reagente Behara, apresenta a ferrita com uma coloração escura enquanto a austenita permanece com coloração clara.

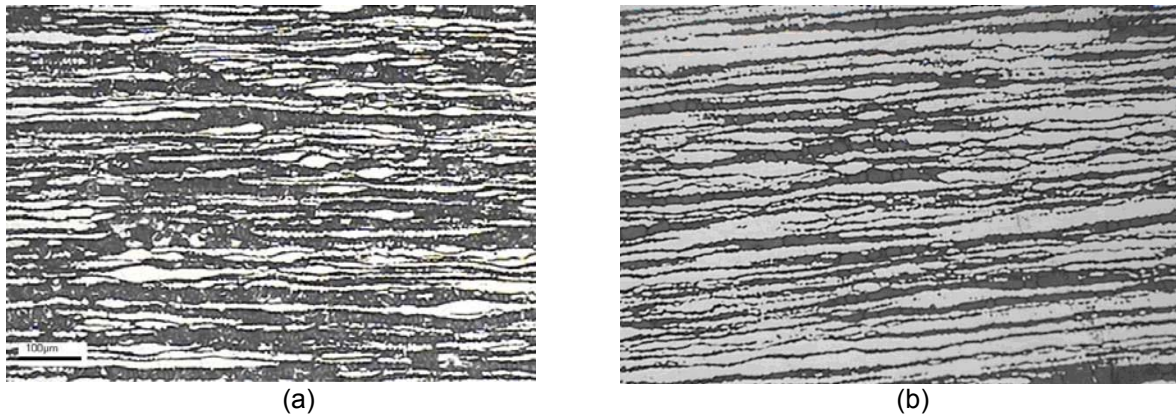
A Figura 7 mostra a microestrutura do metal base AID e AISD. Pode ser observado que o metal base AISD apresenta maior quantidade de austenita que o metal base AID. Esta diferença é atribuída ao maior teor de Cr, Ni, Mo e N no AISD (Tabela 2),<sup>[5]</sup> justificando o menor valor de perda de massa obtido pelo AISD quando comparado ao AID (Tabelas 5 e 6).

A figura 8 mostra a microestrutura do metal de solda da junta soldada com AID e AISD. Também pode ser observado que o metal de solda AISD apresenta



maior quantidade de austenita que o metal de solda AID. O maior teor de ferrita no metal de solda AID foi atribuída ao menor teor de Cr, Ni, Mo, N, Cu e W em relação ao metal de solda AISD (Tabela 3). Esta diferença pode justificar a maior resistência a corrosão por pites da junta soldada com AISD.

Uma alternativa que pode ser tomada na soldagem do AID seria usar os consumíveis de soldagem prescritos para o AISD. De fato, verifica-se na figura 6 que a maior parte dos pites foram observados ao longo do cordão de solda. Outra possível solução seria usar adição de nitrogênio ao gás de proteção no processo TIG.



**Figura 7** Microestrutura do metal base. Aumento 200X. (a) AID; (b) AISD.



**Figura 8** Microestrutura do metal de solda. Aumento 200x. (a) AID; (b) AISD.

## 5 CONCLUSÕES

Com base nos resultados apresentados, pode-se obter as seguintes conclusões:

O ensaio de corrosão conforme G-48 requer um aparato de fácil montagem, baixo custo e boa reprodutibilidade, podendo ser utilizado para avaliar tanto o metal base como juntas soldadas.

O procedimento de limpeza aqui sugerido assegura boa confiabilidade dos resultados.

O AISD, tanto metal base como junta soldada apresentaram baixos valores de perda de massa, ou seja, elevada resistência a corrosão por pites.

O AID, apenas o metal apresentou baixo valor de perda de massa, o que não ocorreu para as juntas soldadas.

A baixa resistência a corrosão por pites das juntas soldadas em AID foi atribuída ao maior teor de ferrita delta obtida, quando comparado ao metal de solda com AISD.

## Agradecimentos

Os autores agradecem ao CNPq e Faperj pelo apoio concedido.

## REFERÊNCIAS

- 1 Modenesi, P. Soldabilidade dos Aços Inoxidáveis. Coleção Tecnologia da Soldagem, SENAI, 2001.
- 2 Brandi, S.D. Estudo da soldabilidade do aço inoxidável duplex DIN W. 1.4462 (UNS S31803). 1992. Tese de doutorado, USP, São Paulo.
- 3 Borsato, K. S. Caracterização Microestrutural e de Propriedades Mecânicas de Chapas Espessas de Aço Inoxidável Duplex UNS S31803, Submetido à Ciclos Térmicos de Soldagem. 2001. Tese de Doutorado, UFSC, Santa Catarina.
- 4 ASTM G48-03 Standard Test Methods for Pitting and Crevice Corrosion Resistance of Stainless Steels and Related Alloys by Use of Ferric Chloride Solution. 2007.
- 5 [http://www.smt.sandvik.com/sandvik/0140/internet/se01264.nsf/GenerateFrameSet1?readForm&url=http://www.smt.sandvik.com/sandvik/0140/internet/se01264.nsf/\(DocumentsInternetWeb\)/2946DE25F21F683E03256D670066B5C7](http://www.smt.sandvik.com/sandvik/0140/internet/se01264.nsf/GenerateFrameSet1?readForm&url=http://www.smt.sandvik.com/sandvik/0140/internet/se01264.nsf/(DocumentsInternetWeb)/2946DE25F21F683E03256D670066B5C7). Acessado em 05/08/2007.
- 6 Vasconcellos, P.I.G. Soldagem em campo de tubos de aço inox duplex e superduplex. Projeto de dissertação de mestrado em *Engenharia e Ciências dos Materiais*, PPGECM/CCT/UENF PECEM. 2005
- 7 <http://www.bohler-brasil.com.br/>. Acessado em 10/10/2007.
- 8 AWS 5.9-93 Specification for Bare Stainless Steel Welding Electrodes and Rods. American Welding Society, USA, 1993.
- 9 ASTM G1-03 Standard Practice for Preparing, Cleaning, and Evaluating Corrosion Test Specimens. 2005.