

# DETERMINAÇÃO DE PARÂMETROS DE SOLDAGEM PARA EXECUÇÃO DE SOBRECAMADA DE SOLDA EM BOCAIS DE REATORES NUCLEARES DO TIPO PWR<sup>1</sup>

*Gabriela Márcia Ribeiro<sup>2</sup>*

*Mariana Pessoa Medeiros<sup>2</sup>*

*Luciana Iglésias Lima<sup>3</sup>*

*Marco Antônio Dutra Quinan<sup>4</sup>*

*Mônica Maria de Abreu Mendonça Schwartzman<sup>4</sup>*

## **Resumo**

Em reatores nucleares do tipo PWR (Pressurized Water Reactor), soldas dissimilares à base de níquel têm apresentado susceptibilidade à corrosão sob tensão (CST). Uma alternativa de mitigação desta corrosão consiste na deposição de camadas de solda na superfície externa do bocal objetivando provocar a compressão da região sujeita à CST. O objetivo deste trabalho é apresentar um estudo preliminar na determinação dos parâmetros de soldagem para a realização destas sobrecamadas de solda, para isso foram realizadas deposições de solda em um corpo-de-prova previamente preparado soldado com a liga de níquel 182, simulando as condições de um bocal utilizado em uma usina nuclear do tipo PWR. O processo de soldagem utilizado foi o GTAW (Gas Tungsten Arc Welding) e o Inconel 52<sup>®</sup> como material de adição. As sobrecamadas foram realizadas nos metais de base, aço carbono e aço inoxidável, variando os parâmetros da soldagem e verificando o tempo de realização de cada cordão. As amostras foram posteriormente caracterizadas microestruturalmente. São apresentadas as macro e microestruturas obtidas através de microscopia ótica e ensaios de microdureza Vickers. Resultados preliminares evidenciaram a boa qualidade da solda mas uma pequena influência dos parâmetros de soldagem utilizados na microestrutura dos materiais de base (aço carbono e aço inoxidável). Os resultados obtidos no estudo serão utilizados como referência na construção de um modelo físico ("mock up") que simulará todas as condições de um bocal de pressurizador de um reator nuclear do tipo PWR.

**Palavras-chave:** Sobrecamada de solda; Liga de níquel 52; Reator PWR.

## **DETERMINATION OF WELD PARAMETER FOR PWR NOZZLE OVERLAY**

### **Abstract**

In Pressurized Water Reactors (PWR) nickel base alloys has shown susceptibility to stress corrosion cracking (SCC). A SCC mitigation alternative consists in a deposition, for welding process, of a compatible structural layer in the external surface of the weld to induce compression in the SCC region. In this work, will be present a preliminary study for the determination of the optimal weld parameters for application of the weld overlay deposition. Weld deposits were done in a specimen previously welded using the nickel base alloy 182 filler metal with the same weld conditions that is used in a PWR nuclear power plant. The weld overlay was deposited in the austenitic stainless steel and low alloy steel base metal by gas tungsten arc welding (GTAW) method using fillers of nickel base alloy 152. Metallographic and mechanical characterization were obtained by means of microhardness testing and light optical microscopy. The first results showed that the weld has good quality but a little influence of the weld parameters used in this study in the base metal microstructure. This results will be used as a reference in a physical models (mock up) that will be simulated the PWR nozzles conditions.

**Key words:** Weld overlay; Nickel base alloy 52; Pressurized water reactor.

<sup>1</sup> *Contribuição técnica ao 64º Congresso Anual da ABM, 13 a 17 de julho de 2009, Belo Horizonte, MG, Brasil.*

<sup>2</sup> *Bolsista de iniciação científica - Centro de Desenvolvimento da Tecnologia Nuclear*

<sup>3</sup> *Doutoranda - Escola de Engenharia da Universidade Federal de Minas Gerais*

<sup>4</sup> *Doutor - Centro de Desenvolvimento da Tecnologia Nuclear*

## 1 INTRODUÇÃO

As soldas entre dois metais diferentes, denominadas soldas dissimilares (*Dissimilar Metal Welds – DMWs*), são utilizadas em diversos segmentos da indústria. No caso específico de usinas nucleares, tais soldas são necessárias para conectar tubulações de aço inoxidável com componentes fabricados em aço carbono.<sup>(1)</sup> Os materiais de adição mais utilizados neste tipo de solda são as ligas de níquel 182 e 82, de composição semelhante à da liga de níquel 600, originalmente selecionados devido à sua elevada resistência à corrosão e coeficiente de expansão térmica próximo do aço baixa liga utilizado nos vasos de pressão dos reatores (VPR) e das tubulações de aço inoxidável. Contudo, com a continuidade das operações dos reatores, trincas associadas a soldas indicam uma suscetibilidade ao processo de PWSCC (*Primary Water Stress Corrosion Cracking*), devido às tensões de tração decorrentes dos processos de soldagem e das condições de operação.<sup>(2,3)</sup>

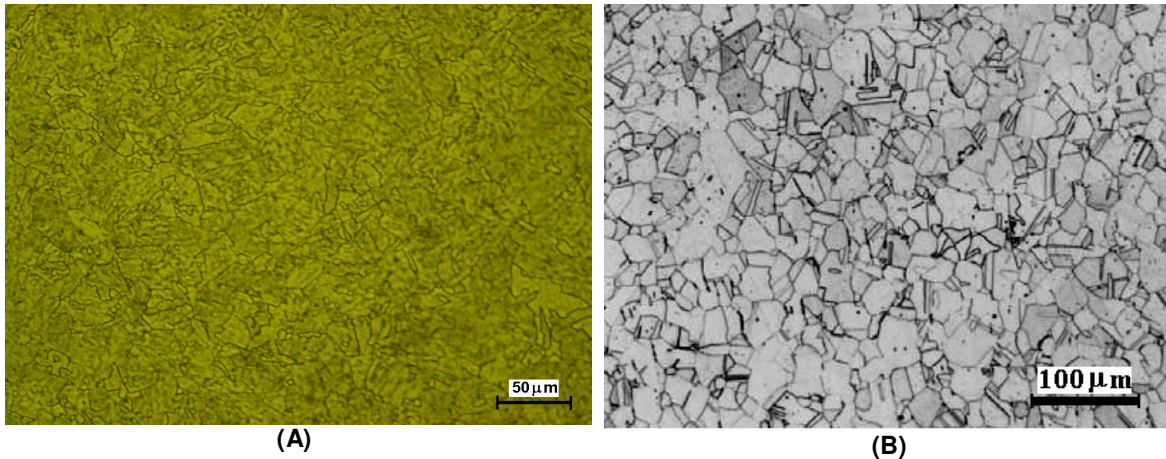
A PWSCC é uma forma de fissuração por corrosão sob tensão (CST) em ligas de níquel no ambiente do circuito primário de um reator nuclear do tipo PWR. Consistindo em um processo de degradação para o qual concorrem a presença de ambiente agressivo, de tensões de tração e a suscetibilidade dos materiais. Na usina nuclear de Angra 1 verifica-se o emprego das ligas de níquel 182/82 em componentes, como por exemplo, nas soldas dissimilares dos bocais do pressurizador e do gerador de vapor.<sup>(4)</sup>

Uma alternativa de mitigação da PWSCC na região das soldas em bocais, consiste na deposição, por processo de soldagem, de uma camada estrutural de Inconel 52<sup>®</sup>, um material compatível com as soldas dissimilares, na superfície externa do bocal com o objetivo de provocar a compressão da região sujeita a fissuração por PWSCC.

Este trabalho apresenta um estudo preliminar de determinação dos parâmetros de soldagem, corrente e pré aquecimento para a realização das sobrecamadas de solda. A soldagem foi realizada nos metais de base, aço carbono e aço inoxidável utilizando o processo de soldagem a arco GTAW (Gas Tungsten Arc Welding) e o Inconel 52<sup>®</sup> como material de adição. As amostras foram posteriormente caracterizadas microestruturalmente. São apresentadas as macro e microestruturas obtidas através de microscopia ótica e ensaios de microdureza Vickers. Os resultados obtidos no estudo serão utilizados como referência na construção de um modelo físico (*mock up*) que simulará todas as condições de um bocal de pressurizador de um reator nuclear do tipo PWR.

## 2 MATERIAL E MÉTODOS

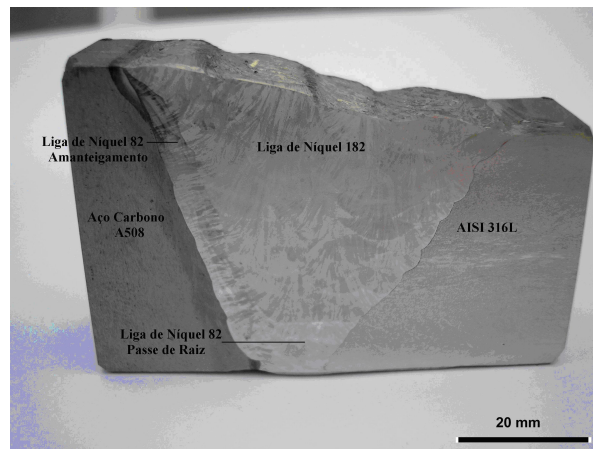
As deposições de solda foram realizadas em um corpo de prova previamente preparado de soldas dissimilares de aço carbono SA 508 cl.3 e aço inoxidável AISI 316L como metais de base, a liga de níquel 82 no amanteigamento e a liga de níquel 182 como materiais de solda. A composição química dos materiais é apresentada na Tabela 1. As micrografias dos materiais base são mostradas na Figura 1. A análise micrográfica revelou que o aço SA 508 cl.3 é composto por uma estrutura com presença de bainitas, e o aço AISI 316L é composto por grãos poligonais de austenita com a presença de ferrita delta em pequena quantidade. A Figura 2 apresenta uma macrografia da solda onde foram depositados os cordões de solda.



**Figura 1.** Micrografias dos metais base (A) SA 508 cl.3. Aumento de 200x, (B) AISI 316L.

**Tabela 1 – Composição química dos materiais base e de adição (% em peso)**

	C	Mn	Si	P	S	Cr	Ni	Nb	Ti	Cu	Mo	Al
316L	0,023	1,458	0,475	0,021	0,003	16,732	9,834	0,0199	0,029	0,142	2,097	0,011
SA 508	0,213	1,336	0,227	0,005	0,003	0,089	0,682	0,002	0,001	0,0559	0,505	0,011
182	0,047	5,810	0,572	0,015	0,006	14,930	71,820	1,890	0,183	0,019	-	-
82	0,04	2,81	0,09	0,003	0,001	19,6	73,10	2,44	0,35	0,01	-	-



**Figura 2.** Macrografia da solda onde foram depositados os cordões de solda.

A soldagem da sobrecamada foi realizada nos metais de base, aço carbono e aço inoxidável utilizando o processo de soldagem a arco GTAW (Gas Tungsten Arc Welding) e o arame de Inconel 52<sup>®</sup> com espessura de 1,2 mm como material de adição, seguindo uma Especificação de Procedimento de Soldagem (EPS) preliminar, na qual, para cada cordão variou-se os principais parâmetros da soldagem corrente, temperatura de pré-aquecimento e velocidade de deposição. As deposições consistiram de cordões únicos e sequências de cordões nas várias regiões do corpo de prova. A temperatura de pré aquecimento foi mantida entre 150°C e 200°C. A Tabela 2 apresenta a composição química do metal de adição Inconel 52<sup>®</sup> e a Tabela 3 apresenta os parâmetros de soldagem.

**Tabela 2** - Composição química do metal de adição Inconel 52<sup>®</sup> (%em peso).

%	Ni	C	Mn	Fe	S	Si	Mo	Cu	Cr	Ti	Al	P	Nb	Al+Ti	Outros
52	Resíduo	0,04	1,0	7,0 -11,0	0,015	0,50	0,50	0,30	28,0 -31,5	1,0	1,10	0,03	0,10	1,5	0,50

Fonte: R. Miteva e N. G. Taylor, 2006 NESC.

**Tabela 3** – Parâmetros de soldagem da deposição da sobrecamada.

Amostra	1	2	3	4	5	6	7	8
Material	SA 508	316L	SA 508	316L	SA 508	316L	SA 508	316L
Corrente (A)	100	100	130	130	90	90	130	130
Tensão (V)	9,5	9,5	11	11	10	10	11	11
Pré-aquecimento	Sem	Sem	Sem	Sem	Com	Com	Com	Com

Nas amostras 1, 2, 3 e 4 foi depositado um cordão, nas amostras 5 e 7 foram depositados quatro cordões e nas amostras 6 e 8 foram depositados três cordões, obedecendo os parâmetros apresentados na Tabela 3.

Após a operação de soldagem, a peça foi cortada e as amostras foram embutidas, lixadas e polidas até 1 $\mu$ m para a análise macro e micrográfica com reagentes e tempos de ataque compatíveis para identificação da microestrutura, baseadas no Metals Handbook<sup>(5)</sup> e otimizados em laboratório. A Tabela 4 apresenta as condições de ataque metalográfico.

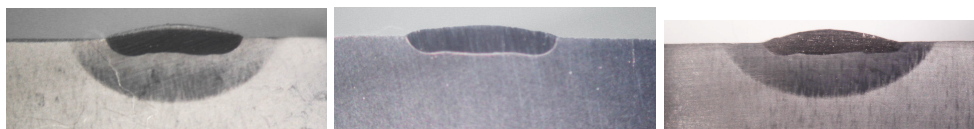
**Tabela 4.** Condições de ataque metalográfico.

Amostra	Condições de Ataque
<b>Macrografia</b>	
Aço Carbono – ASTM A508	Marble – 5 segundos (Imersão)
Aço Inoxidável – AISI 316	Marble – 10 segundos (Imersão)
<b>Micrografia</b>	
Aço Carbono – ASTM A508	Nital 2% - 15 segundos (Imersão)
Aço Inoxidável – AISI 316	Ácido oxálico 10% -1A, 2V, 30 segundos (Ataque Eletrolítico)

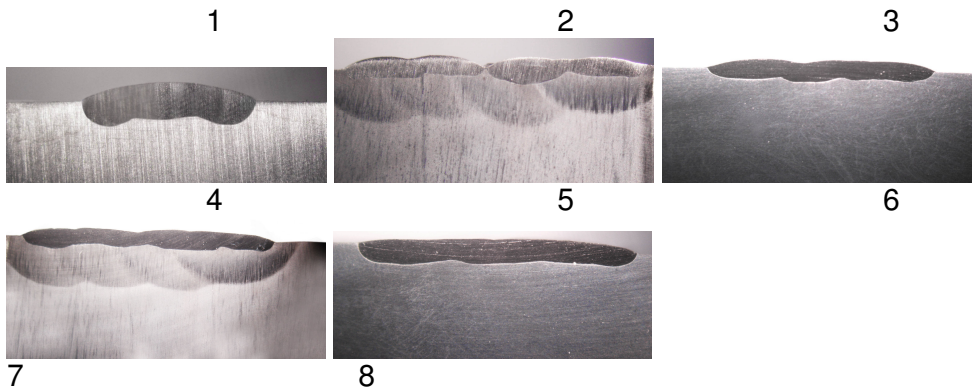
Para a avaliação da microdureza das amostras foram realizados perfis ao longo da linha de fusão e perpendicularmente ao cordão de solda, como mostrado na Figura 3. Os perfis de microdureza foram levantados com um microdurômetro Durimet da Leitz, utilizando um penetrador Vickers e uma carga de 100g, as medidas foram realizadas com um espaçamento de 0,5 mm.

### 3 RESULTADOS E DISCUSSÃO

A Figura 4 apresenta as macrografias das amostras com a deposição da sobrecamada. Observa-se nas amostras a ausência de defeitos de solda e a continuidade metálica. As medidas das dimensões da solda como comprimento e penetração tiveram pouca variação.

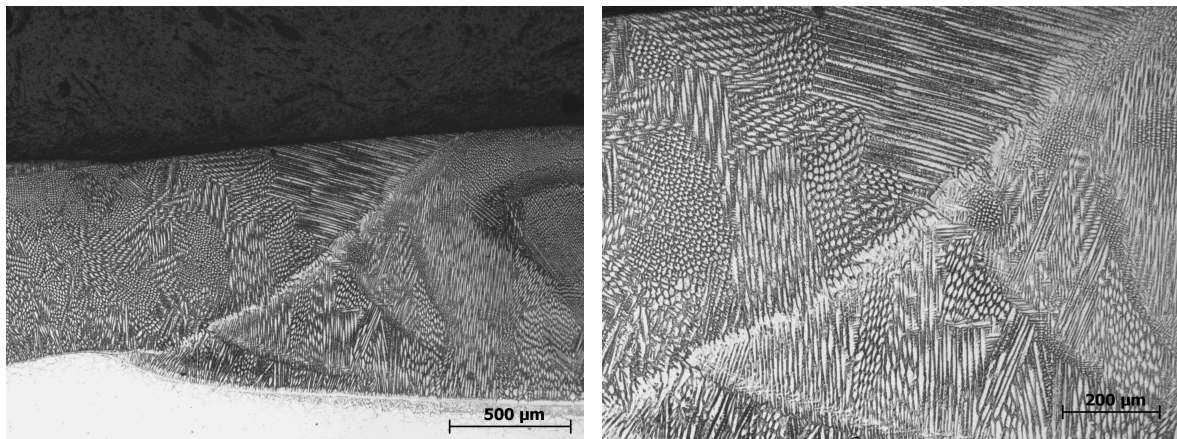






**Figura 4.** Macrografias das amostras com a deposição da sobrecamada.

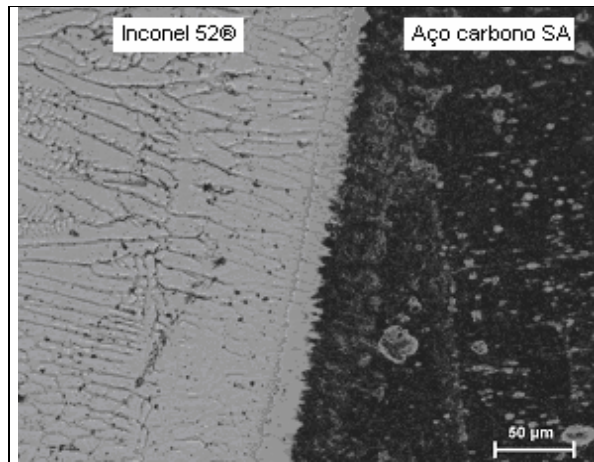
Nas micrografias apresentadas na Figura 5 pode-se observar a qualidade da solda pela ausência de poros, trincas e fissuras e ainda pela continuidade metálica nas regiões de fusão, bem como uma estrutura de solidificação dendrítica e equiaxial.



**Figura 5.** Micrografia da região de solda Inconel 52<sup>®</sup>.

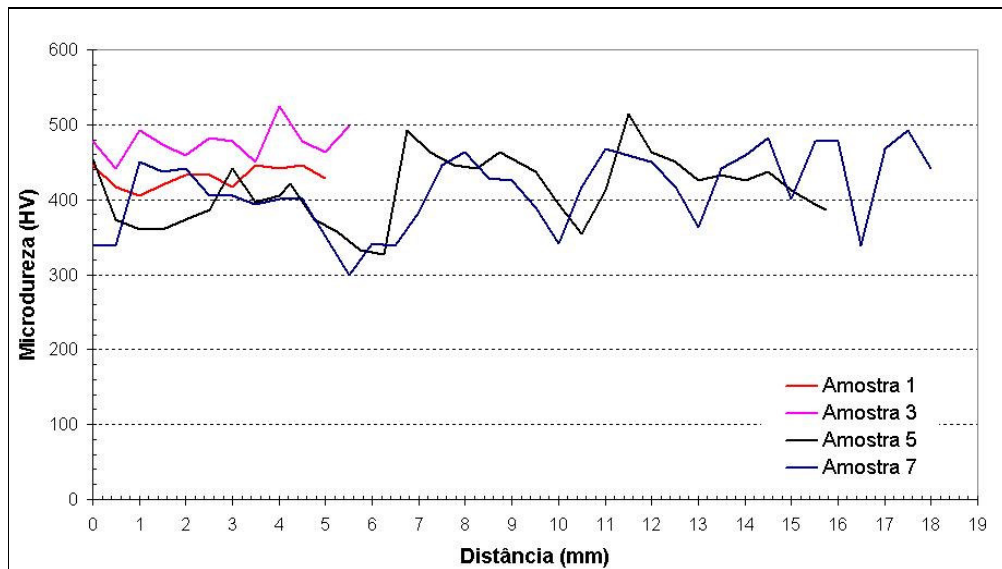
A Figura 6 mostra a região da zona afetada pelo calor (ZAC) do aço carbono SA 508. A microestrutura consiste de uma estrutura martensítica, além de transformações parciais da estrutura ferrítica. Não houve variações microestruturais nos diferentes parâmetros aplicados. A micrografia do metal de base apresentou uma estrutura de têmpera, típica dos aços carbono.

A estrutura martensita também é observada pela elevada dureza nos perfis de microdureza das linhas de fusão do aço carbono. Não observou tratamento térmico de um cordão sobre outro, pois permanece a dureza e a estrutura de têmpera no aço carbono.

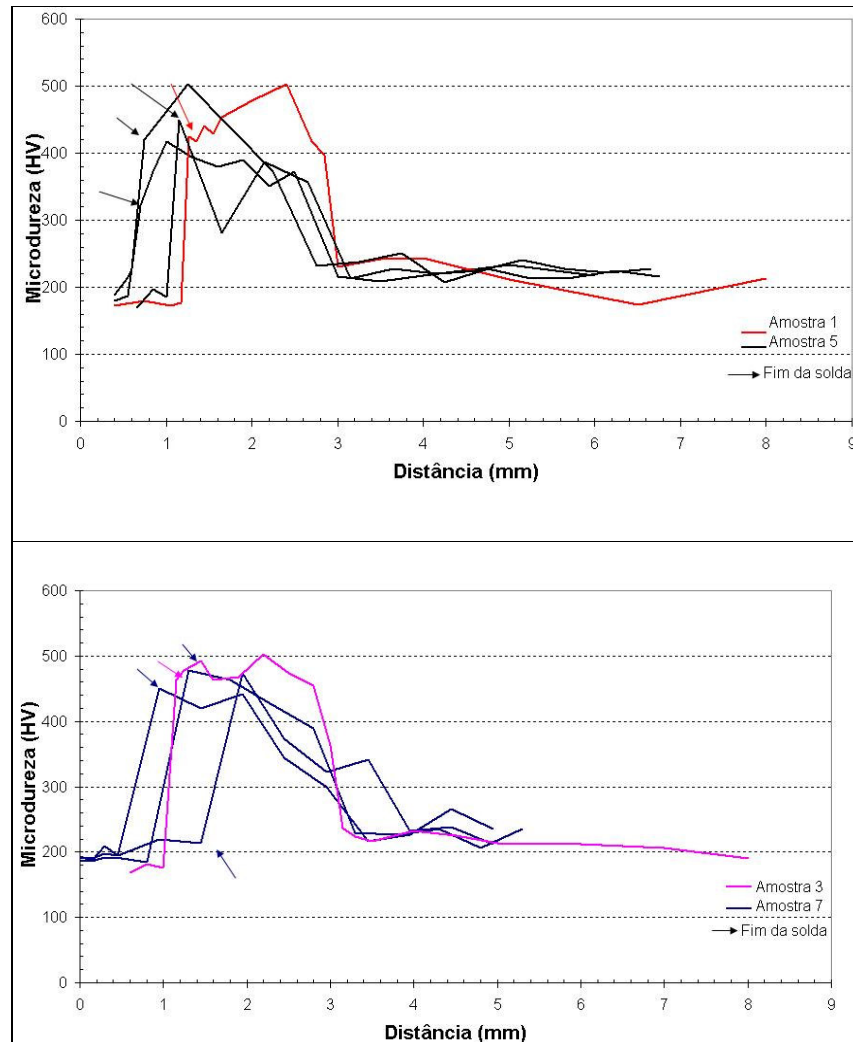


**Figura 6.** Micrografia da ZAC do aço carbono SA

A Figura 7 apresenta os perfis de microdureza da linha de fusão para as amostras de aço carbono SA 508 e a Figura 8 os perfis de microdureza verticais ao cordão de solda.



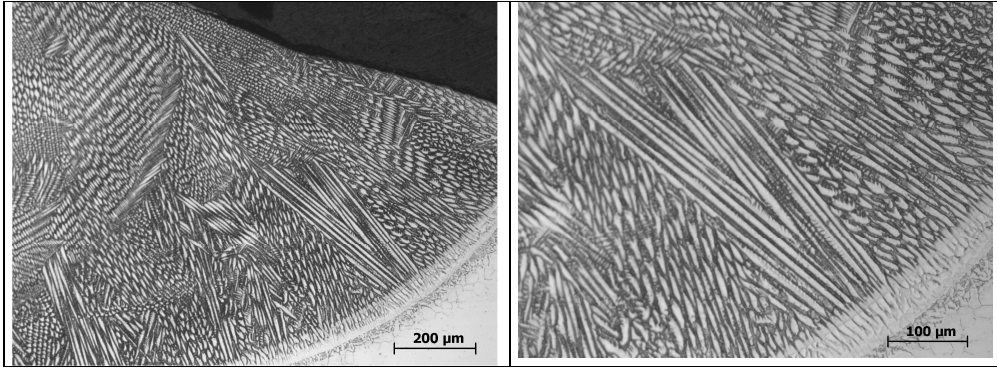
**Figura 7.** Microdureza da linha de fusão das amostras de aço carbono SA 508



**Figura 8.** Microdureza dos perfis verticais das amostras de aço carbono AS 508

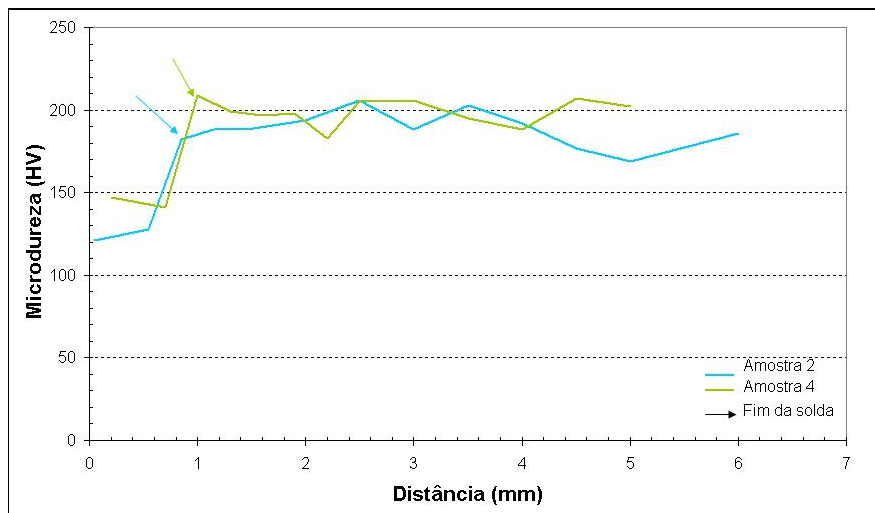
A microdureza do aço carbono demonstrou valores elevados entre 300 e 520. Nas regiões de deposição da sobrecamada onde aplicou-se o pré aquecimento a microdureza apresentou valores menores quando comparados com os valores das regiões onde o pré-aquecimento não foi aplicado, demonstrando pequena influencia do pré-aquecimento. Em todos os perfis verticais de aço carbono identificou-se uma ZAC com extensão de aproximadamente 3 mm.

A Figura 9 apresenta as micrografias da ZAC das amostras de aço inoxidável 316L demonstrando a presença de uma estrutura dendrítica na zona de fusão e ainda uma relação epitaxial dos grãos da zona de fusão em direção ao metal de base. Pode se observar a distinção entre as regiões de soldagem, a zona de fusão, a região não misturada e a zona parcialmente fundida. Os cordões de solda exercem pouca influência sobre o metal de base demonstrado pelo leve crescimento de grão na ZAC, porém observa-se fusões parciais tanto no inonel quanto no aço inoxidável e um estudo mais detalhado dessas regiões deve ser realizado com a utilização de microscopia eletrônica (MEV). Em todos os perfis verticais de aço carbono identificou-se uma ZAC com extensão de aproximadamente 3 mm.

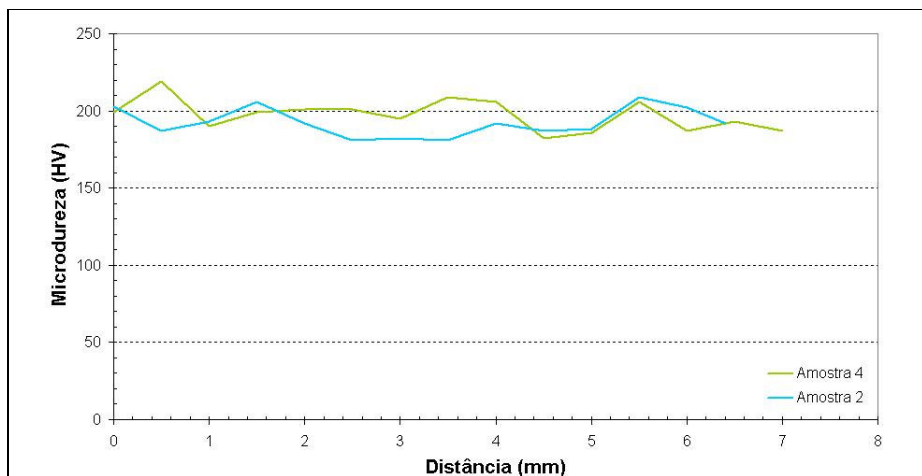


**Figura 9.** Micrografias da ZAC das amostras de aço inoxidável 316L

A Figura 10 apresenta os perfis de microdureza da linha de fusão para as amostras de aço inoxidável AISI 316L e a Figura 11 os perfis de microdureza verticais ao cordão de solda. Na microdureza das amostras de aço inoxidável AISI 316L a ZAC manteve valores próximos das medidas de dureza obtidas para o metal de base ( ) e para a camada de solda de Inconel 52<sup>®</sup> (120 e 200 HV), garantindo uma boa continuidade metálica.



**Figura 10.** Microdureza dos perfis verticais das amostras 2 e 4 do aço inoxidável AISI 316L.



**Figura 11.** Microdureza da linha de fusão das amostras 2 e 4 do aço inoxidável AISI 316L

## 4 CONCLUSÃO

- A solda de Inconel 52<sup>®</sup> apresentou uma estrutura típica de zona fundida, não apresentando porosidades e trincas.
- Com os parâmetros de soldagem utilizados foram obtidas uma microestrutura de têmpera na ZAC das amostras de aço carbono SA 508.
- Houve uma pequena influência favorável da temperatura de pré aquecimento em relação a diminuição dos valores de dureza.
- Observou-se a pequena influência do ciclo térmico no material de base pelo pequeno aumento de grão e tamanho da ZAC.
- Não foi observado o efeito do tratamento térmico de um cordão sobre o outro na ZAC em relação aos valores de microdureza.
- Os valores de microdureza revelaram a boa continuidade metálica da solda.

Outros parâmetros de soldagem serão considerados em estudos futuros de modo a atenuar a dureza na ZAC do aço carbono SA 508 e na formação de uma microestrutura bainítica.

## Agradecimentos

Os autores agradem à Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de Minas Gerais – FAPEMIG, ao CNPq e a Financiadora de Estudos e Projetos – FINEP pelo apoio financeiro.

## REFERÊNCIAS

- 1 Jang, C., Lee, J., Kim, J. S., Jin, T.E., Mechanical property variation within Inconel 82/182 dissimilar metal weld between low alloy steel and 316 stainless steel, Int. J. of Press. Vessels and Piping, in press.
- 2 SCOTT, P.M. An Overview of Materials Degradation by Stress Corrosion in PWRs. Eurocorr- Annual European Corrosion Conference of the European Federation of Corrosion, Nice, Acropolis, 12 – 16 de Setembro, 2004.
- 3 GOMEZ-BRICEÑO, D., SERRANO, M. Aleaciones Base Níquel em Condiciones de Primario de Los Reactores Tipo PWR. Materiales, Março, 2005.
- 4 NETWORK FOR EVALUATING STRUCTURAL COMPONENTS – NESC. Assesment of Dissimilar Weld Integrity: Final Report of the NESC-III Projectt, Luxembourg, 2006. ISSN 1018-5593.
- 5 ASM – American Society for Metals – Metals Handbook 8<sup>o</sup> ed – In: Metallographic Technique for Specific Metals and Alloys, v. 8, p.101, 1973