

## ESTUDO DAS TENSÕES RESIDUAIS GERADAS NA SOLDAGEM GTAW DE AÇO AISI 316L

Marcel F. Souza, Eduardo L. Alcoforado, Mateus C. Martins, Maria Cindra Fonseca,

UFF – Universidade Federal Fluminense – Departamento de Engenharia Mecânica/  
PGMEC, Rua Passo da Pátria, 156, São Domingos, CEP 24210-240, Niterói, RJ.  
E-mail: mcindra@vm.uff.br.

### RESUMO

*O aço AISI 316L, por ter elevada resistência à corrosão e possuir boas propriedades mecânicas, normalmente é especificado para tubulações de trocadores de calor das indústrias químicas e petroquímicas. Entretanto, o estado das tensões residuais resultante do processo de soldagem desses aços, que dependendo da sua natureza e magnitude pode comprometer o desempenho destas tubulações em serviço, ainda é pouco estudado. Dessa forma, o presente trabalho apresenta o estudo das tensões residuais por difração de raios-X pelo método do  $\sin^2\psi$  de juntas de aço inoxidável AISI 316L soldadas pelo processo GTAW. Para complementar o estudo foram feitas análises microestrutural e de microdureza das juntas. Os resultados mostraram que velocidades de soldagem menores e, conseqüentemente, um maior aporte térmico geraram no metal de solda tensões residuais compressivas de maior magnitude, principalmente na direção transversal ao cordão.*

Palavras-Chave: aço AISI 316L, soldagem GTAW, tensões residuais, difração de raios-X.

### INTRODUÇÃO

O aço inoxidável austenítico AISI 316L é um material estrutural que tem sido amplamente usado em diversas áreas industriais, tais como nuclear, criogênica, construção naval e de petróleo e gás <sup>(1)</sup>.

As tensões residuais presentes no material influenciam as propriedades mecânicas dos materiais e, em particular, a resistência à fadiga. Está bem

estabelecido que tensões residuais trativas superficiais em um material, ao se somarem às tensões de serviço, podem provocar propagação de trincas e levar à ruptura prematura do componente, enquanto que as tensões residuais compressivas favorecem a longa vida em fadiga e aumentam a resistência à corrosão sob tensão, além de inibir a nucleação e a propagação de trincas <sup>(2)</sup>. Assim sendo, a resistência mecânica dos materiais metálicos é fortemente influenciada pelo estado de tensões residuais presente nas camadas superficiais do material <sup>(3)</sup>.

Na soldagem, além das tensões residuais, a presença de microestruturas deletérias nas zonas fundida e termicamente afetada pode comprometer o comportamento mecânico do material e a vida em serviço das estruturas e componentes <sup>(4)</sup>. A distribuição do campo de tensões residuais varia de acordo com os parâmetros utilizados no procedimento de soldagem, tais como o processo e a velocidade de soldagem, a composição química dos materiais de base e de adição, a espessura e a geometria de junta, o gás de proteção, tensão e corrente empregadas <sup>(4,5)</sup>.

O presente trabalho tem como objetivo estudar as tensões residuais geradas na soldagem de chapas de aço inoxidável austenítico AISI 316L pelo processo GTAW (*Gas Tungsten Arc Welding*). A caracterização microestrutural e da microdureza das juntas complementam o estudo.

## MATERIAIS E MÉTODOS

Foi estudado o aço AISI 316L, produzido na forma de chapa, com 5,2 mm de espessura, no estado solubilizado a 1050°C, com resfriamento em água. A composição química e as propriedades mecânicas do material estão apresentadas nas Tabelas 1 e 2, respectivamente.

Tabela 1 – Composição química do aço inoxidável AISI 316L (% em peso).

C	Si	Mn	P	S	Cr	Ni	Mo	N	Fe
0,015	0,46	0,73	0,031	0,001	16,67	11,06	2,03	0,05	Balanço

Tabela 2 – Propriedades mecânicas do aço AISI 316L.

Limite de escoamento (MPa)	Limite de resistência (MPa)	Alongamento (%)
240	510	40

Foram soldadas três juntas com chanfro reto de 100 x 200 mm de comprimento, em dois passes, na posição plana, pelo processo GTAW manual com tensão de 12 V e corrente contínua pulsada com pico de 130 A. Foi usado o metal de adição AWS ER 316L, de 1/8" de diâmetro, cuja composição química é apresentada na Tabela 3. A soldagem foi realizada sob proteção gasosa de argônio puro com vazão de 10 L/min. Um dispositivo de fixação e um mata-junta de cobre foram utilizados para evitar deformações e a dispersão do calor e suporte do metal fundido, respectivamente.

Tabela 3 – Composição química do metal de adição AWS ER 316L (% em peso).

C	Si	Mn	P	S	Cr	Ni	Mo	N	Fe
0,010	0,35	1,65	0,018	0,011	18,55	12,18	2,53	0,026	Balanço

O aporte térmico do processo foi calculado pela equação (A) e seu valor para cada junta soldada está mostrado na Tabela 4.

$$Q = \frac{V \times I \times 60}{1000 \times S} \times \eta \quad (A)$$

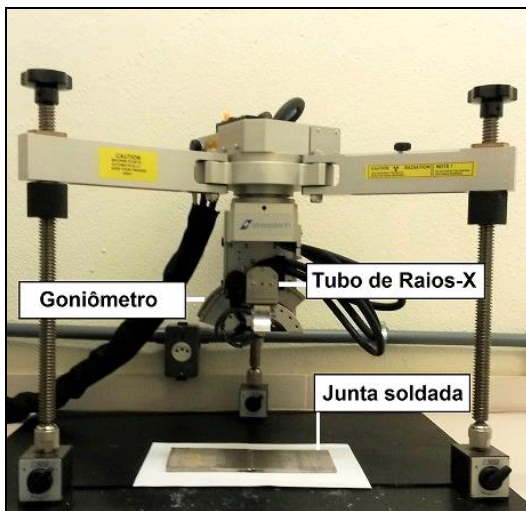
Onde: Q é o aporte térmico (kJ/mm), V é a tensão (V), I é a intensidade de corrente, S é a velocidade (mm/min) e  $\eta$  é a eficiência do processo de soldagem, que no caso do processo GTAW foi considerada igual a 0,7.

Tabela 4 – Velocidade de soldagem e aporte térmico.

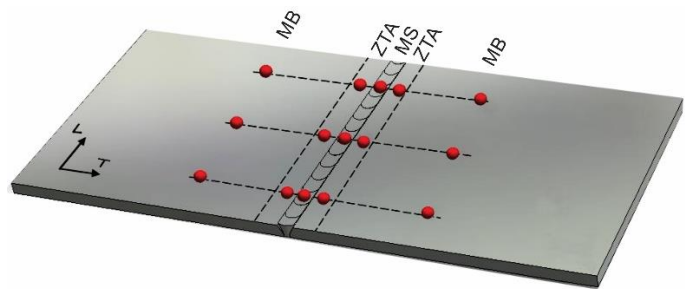
Amostra	Velocidade de soldagem (mm/min)		Aporte térmico (kJ/mm)	
	1º passe	2º passe	1º passe	2º passe
1	120	125	0,546	0,524
2	160	155	0,410	0,422
3	160	150	0,410	0,437

A medição das tensões residuais foi realizada no analisador de tensões *XStress 3000* (Figura 1a). Foi utilizado o método do  $\text{sen}^2\psi$ , usando radiação  $\text{CrK}\alpha$  ( $\lambda_{\text{CrK}\alpha} = 2,29092 \text{ \AA}$ ) para difratar o plano (311) da austenita com ângulo de difração  $2\theta = 148,52^\circ$ . Os ângulos de inclinação  $\psi$  escolhidos foram:  $0^\circ$ ,  $18^\circ$ ,  $27^\circ$ ,  $33^\circ$  e  $45^\circ$ .

As tensões residuais foram analisadas em três seções transversais (início, meio e término do cordão de solda) na face e na raiz da junta, nas direções longitudinal (L) e transversal (T). Para cada seção transversal foram avaliadas as tensões residuais no metal de solda (MS), a esquerda e a direita da progressão de soldagem na zona termicamente afetada (ZTA-E e ZTA-D) e no metal de base (MB-E e MB-D), conforme representado na Figura 1b.



(a)



(b)

Figura 1: (a) Analisador de tensões; (b) Pontos analisados na junta soldada.

As análises, metalográfica e de microdureza, foram realizadas em uma amostra retirada do início do cordão de solda. A amostra foi preparada em uma politriz metalográfica com lixas 80, 100, 200, 220, 400, 500, 600 e 1200, seguido de polimento com alumina com granulometria de  $1 \mu\text{m}$  e  $0,1 \mu\text{m}$ . Após limpeza por ultrassom, a amostra foi atacada com uma solução de ácido oxálico com água, na proporção de 10 g por 100 ml de água, por 2 minutos.

O ensaio de microdureza Vickers foi realizado em um microdurômetro, modelo HVS-1000 da marca Time, com aplicação de carga de 4,9 N por 15 segundos.

## RESULTADOS E DISCUSSÃO

As tensões residuais transversais e longitudinais para cada um dos cinco pontos avaliados na face e na raiz são apresentadas através da média aritmética das três seções transversais das juntas soldadas. As Figura 2 e 3 mostram, respectivamente, as tensões residuais na face e raiz da junta 1.

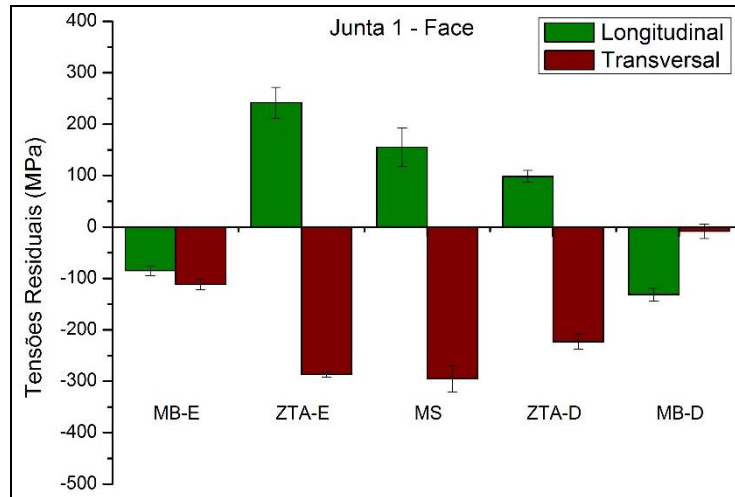


Figura 2: Tensões residuais na face da junta 1.

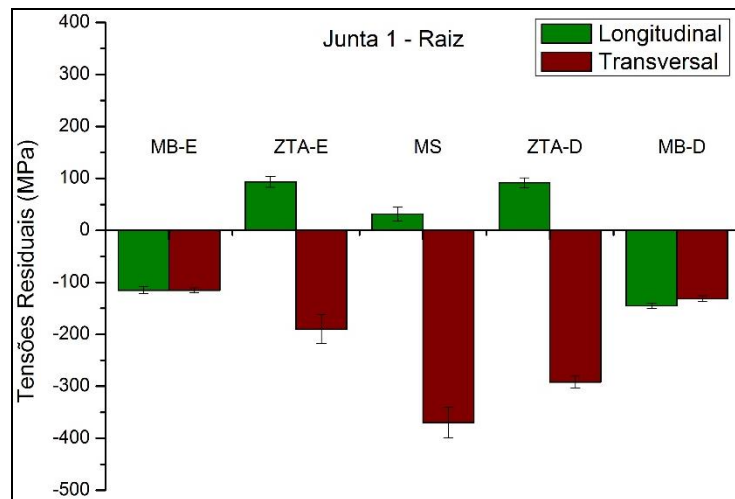


Figura 3: Tensões residuais na raiz da junta 1.

Nas Figuras 2 e 3 é possível perceber a natureza compressiva das tensões residuais no metal de base, oriundas do processo de fabricação por laminação da chapa. Tanto na face quanto na raiz das juntas, as tensões residuais das ZTAs e do MS apresentaram a mesma natureza trativa na direção longitudinal, com valor máximo de 240 MPa na ZTA-E da face e de 90 MPa nas ZTAs da raiz. Já na direção

transversal, as tensões residuais são compressivas, com pico de -290 MPa na ZTA-E e MS da face da junta e de -370 MPa no MS da raiz. Esta diferença na natureza das tensões residuais nestes pontos pode ser explicada pelas condições de restrição distintas usadas no processo durante a execução da soldagem.

As Figuras 4 e 5 apresentam as tensões residuais na face e raiz da junta 2, respectivamente.

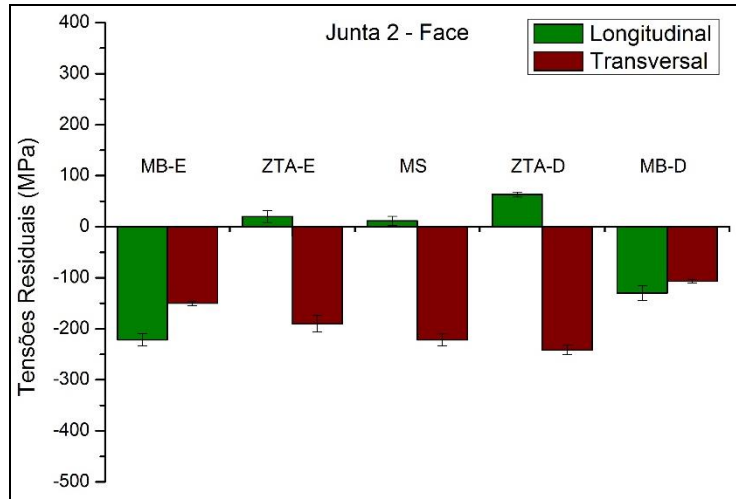


Figura 4: Tensões residuais na face da junta 2.

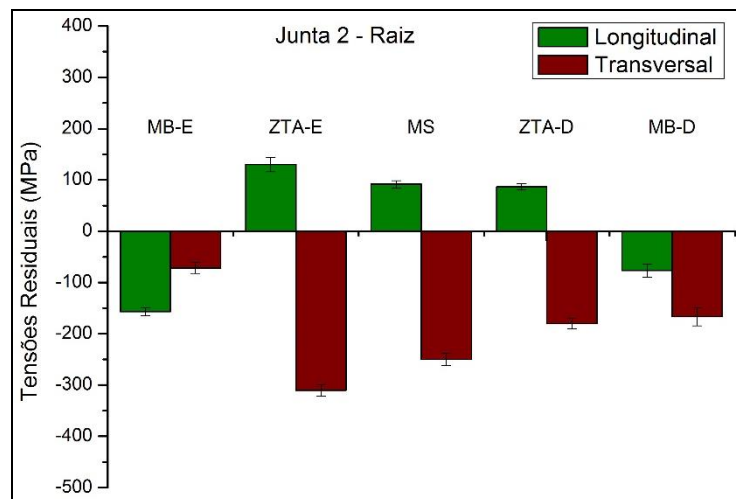


Figura 5: Tensões residuais na raiz da junta 2.

As tensões residuais longitudinais analisadas na junta 2 apresentaram comportamento trativo em todas as regiões, exceto no MB. Todavia, as tensões da raiz apresentaram maior magnitude do que na face, tanto no MS quanto na ZTA, atingindo 130 MPa na ZTA-E. Já os valores das tensões transversais se apresentaram compressivas em todas as regiões para ambas superfícies.

As Figura 6 e 7 apresentam as tensões residuais na face e raiz da junta 3, respectivamente. Esta junta apresentou maior heterogeneidade na face em relação as juntas 1 e 2, com valor de tensão de 370 MPa para a ZTA-E no sentido longitudinal e de -400 MPa para a ZTA-D no sentido transversal. É possível observar que em todas as regiões, tanto na raiz como na superfície, as tensões residuais transversais são compressivas.

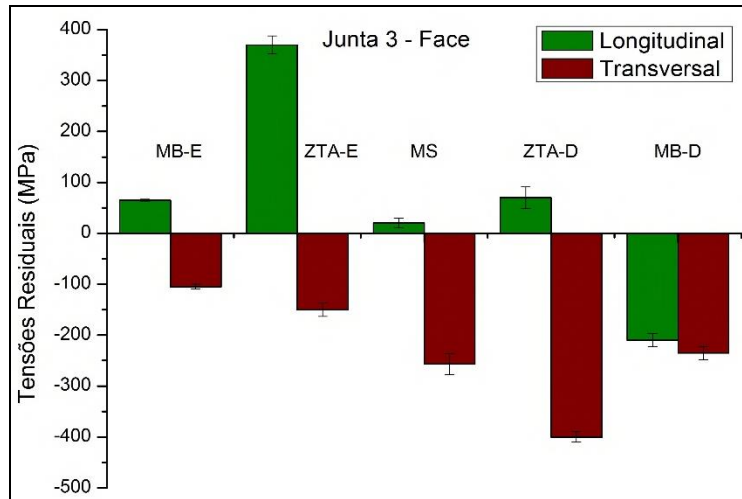


Figura 6: Tensões residuais na face da junta 3.

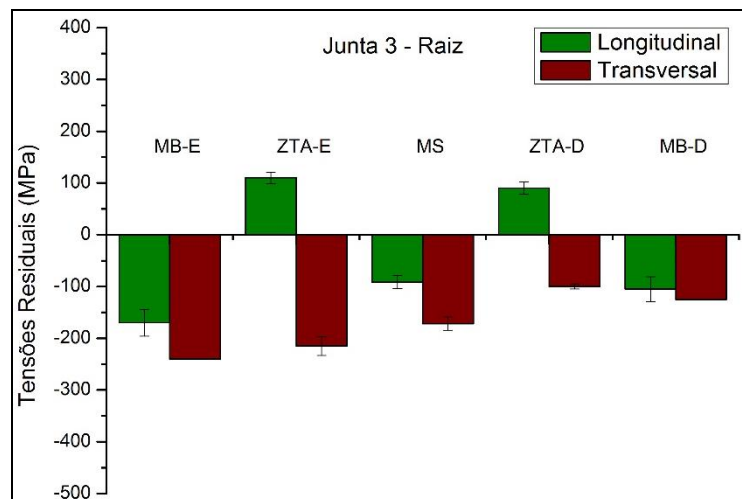


Figura 7: Tensões residuais na raiz da junta 3.

Ao analisar o comportamento das tensões residuais longitudinais nas ZTAs das três juntas é possível perceber que elas são similares e coerentes com os resultados obtidos por Vasantharaja et al. (2015), que analisaram as tensões residuais na soldagem TIG de aço AISI 316-LN usando a técnica por ultrassom no MB e nas ZTAs, onde encontraram tensões residuais trativas semelhantes às deste estudo.

Infelizmente eles não avaliaram o centro do cordão, devido às limitações da técnica ultrassônica.

A Figura 8 apresenta os perfis das tensões residuais transversais das três juntas soldadas. As juntas 2 e 3 apresentaram perfis semelhantes, apesar da diferença de magnitude das tensões residuais. Entretanto, a junta 1 apresentou um comportamento diferente das demais, com o MS contendo tensões compressivas mais elevadas do que nas juntas 2 e 3, tanto na raiz quanto na face. Isto se deve, provavelmente, à menor velocidade de soldagem, e conseqüentemente, ao maior aporte térmico na soldagem desta junta.

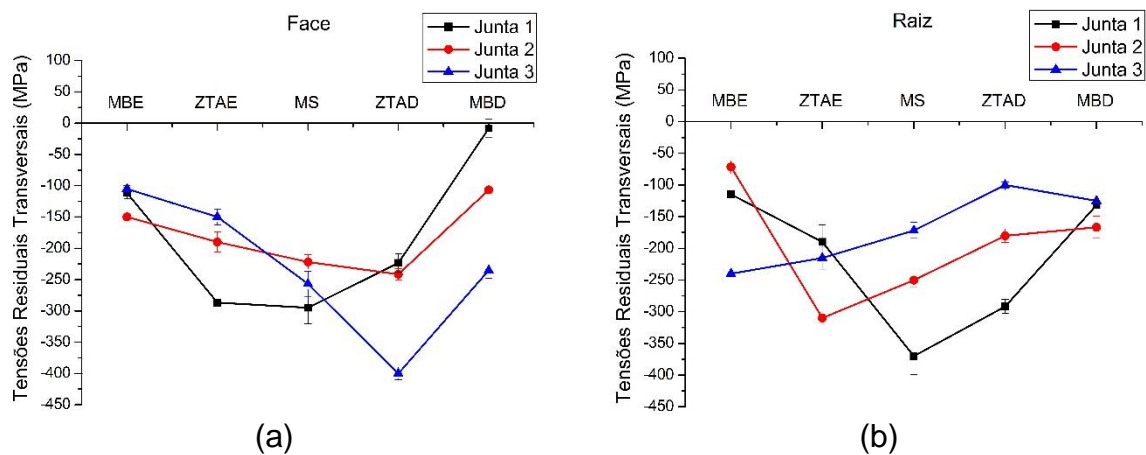


Figura 8: Tensões residuais transversais nas juntas: (a) Face; (b) Raiz.

Os resultados da análise microestrutural de uma das juntas soldadas estão apresentadas na Figura 9. Analisando a microestrutura das regiões do MB, ZTA e MS da junta, é possível constatar a presença de maclas e inclusões no MB austenítico. A microestrutura austenítica do MB permanece na ZTA, entretanto é possível constatar um crescimento dos grãos em relação ao MB, devido ao maior aporte térmico. Conforme a Figura 10, o MS apresenta microestrutura dendrítica, formada pelo crescimento da ferrita- $\delta$  ao longo da matriz austenítica, semelhante aos resultados obtidos por Rajani et al. (2012) e Silva et al. (2009).



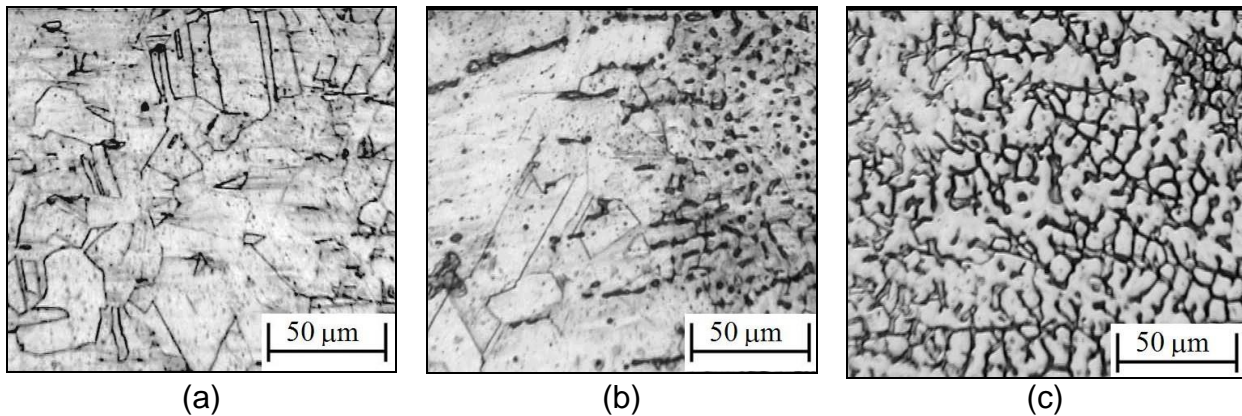


Figura 9: Microestruturas da junta soldada 1: (a) MB, (b) ZTA e (c) MS.

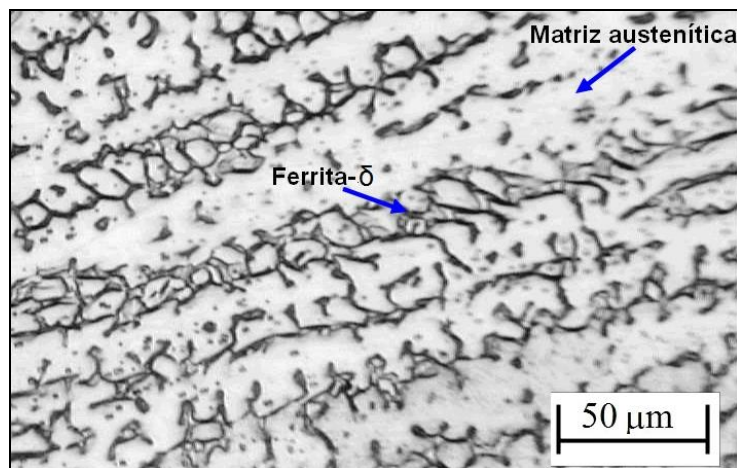


Figura 10: Microestrutura do metal solda.

Devido ao aporte térmico do processo de soldagem, ocorre a formação de uma poça de fusão de grande volume com baixa taxa de resfriamento, resultando em uma baixa taxa de cristalização. Neste caso, a velocidade de resfriamento é insuficiente para a formação de grãos equiaxiais na ZTA.

A Figura 11 apresenta os resultados obtidos para a microdureza.

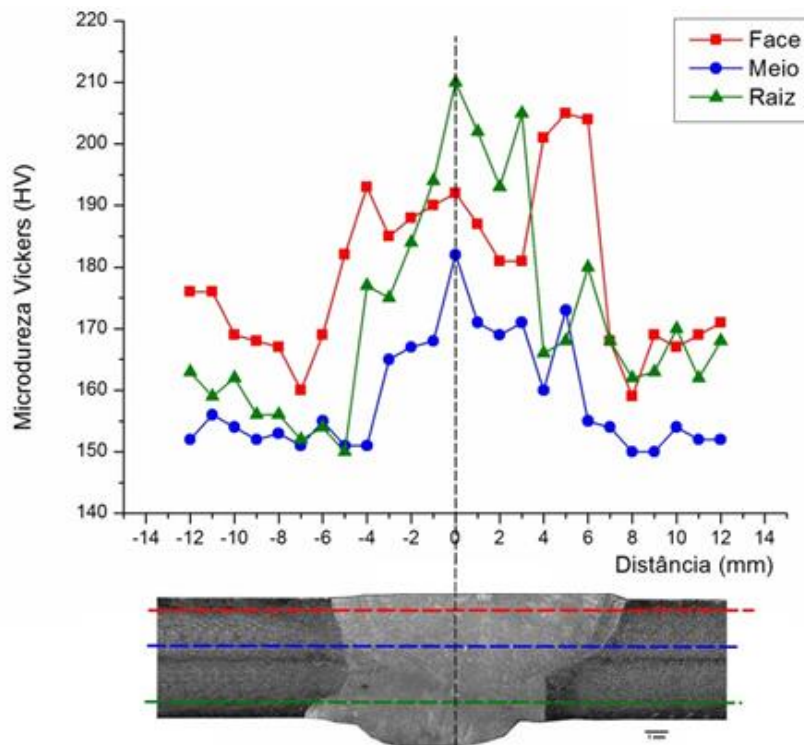


Figura 11: Perfil de microdureza Vickers.

O metal de solda apresenta os maiores valores de microdureza da junta devido à presença de ferrita delta, de granulometria mais refinada, em comparação com a austenita. Já o metal de base, constituído por uma microestrutura austenítica de grãos grosseiros, possui valores de microdureza inferiores às demais regiões. Feng et al. (2015) constataram no MS uma microdureza média 4% superior em relação ao MB, sendo esta diferença consideravelmente inferior à observada na Figura 11, onde a microdureza média do MS é aproximadamente 10% superior à verificada no MB.

## CONCLUSÕES

O presente trabalho, que teve como objetivo estudar as tensões residuais geradas na soldagem de chapas de aço inoxidável austenítico AISI 316L pelo processo GTAW, permite as seguintes conclusões:

1. Os perfis de tensões residuais revelam que a velocidade de soldagem e o aporte térmico influenciaram as tensões residuais geradas na soldagem das três juntas, sendo as tensões residuais na direção transversal do metal de solda mais

compressivas, quando usada uma menor velocidade de soldagem e, conseqüentemente, um maior aporte térmico.

2. O processo de soldagem alterou a microestrutura austenítica do MB, apresentando um MS composto por ferrita- $\delta$  na matriz austenítica.
3. Os maiores valores de microdureza da junta estão no metal de solda, sendo que na face este valor está localizado próximo a margem direita da solda, enquanto que no meio e na raiz estes valores estão localizados no centro da seção transversal do MS.

## AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem ao CNPq, à CAPES e à FAPERJ pelo suporte financeiro, que permitiu a realização do presente trabalho e à White Martins, pela soldagem das amostras.

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- 1) FENG, Y.; LUO, Z.; LIU, Z.; LI, Y.; LUO, Y.; HUANG, Y. Keyhole gas tungsten arc welding of AISI 316L stainless steel. **Materials and Design**, v. 85, p. 24-31, 2015.
- 2) CINDRA FONSECA, M. P. **Evolução do estado de tensões residuais em juntas soldadas de tubulação durante ciclos de fadiga**. 2000. Tese (Doutorado em Engenharia Metalúrgica e de Materiais) - COPPE/UFRJ, Rio de Janeiro.
- 3) BARSOU, Z. Residual stress analysis and fatigue of multi-pass welded tubular structures. **Engineering Failure Analysis**, v. 15, p. 863–874, 2008.
- 4) WITHERS, P. J.; BHADSHIA, H. K. D. H. Residual stress part 2 - Nature and origins. **Materials Science and Technology**, v. 17, p. 366-375, 2001.
- 5) LEE, C. H.; CHANG, K. H. Comparative study on girth weld-induced residual stresses between austenitic and duplex stainless steel pipe welds. **Applied Thermal Engineering**, v. 63, p. 140-150, 2014.
- 6) ACEVEDO, C.; NUSSBAUMER, A. Effect of tensile residual stresses on fatigue crack growth and S–N curves in tubular joints loaded in compression. **International Journal of Fatigue**, v. 36, p. 171-180, 2012.

- 7) RAJANI, H.R.Z.; TORKAMANI, H.; SHARBATI, M.; RAYGAN, S. Corrosion resistance improvement in Gas Tungsten Arc Welded 316L stainless steel joints through controlled preheat treatment. **Materials and Design**, v. 34, p. 51-57, 2012.
- 8) SILVA, C.C.; MIRANDA, H.C.; SANT'ANA, H.B.; FARIAS, J.P. Microstructure, hardness and petroleum corrosion evaluation of 316L/AWS E309MoL-16 weld metal. **Materials characterization**, v. 60, p. 346-52, 2009.
- 9) P. VASANTHARAJA, M. VASUDEVAN, P. PALANICHAMY. Effect of welding processes on the residual stress and distortion in type 316LN stainless steel weld joints. **Journal of Manufacturing Processes**, v. 19, p. 187-193, 2015.

## **STUDY OF RESIDUAL STRESS GENERATED IN GTAW WELDING OF AISI 316L STEEL**

### **ABSTRACT**

The AISI 316L steel due to its high corrosion resistance and good mechanical properties is typically specified for heat exchanger pipes of the chemical and petrochemical industries. However, the residual stresses state resulting from the welding process of these steels, that depending on their nature and magnitude can compromise the performance of these pipes in service, it is still little studied. In this way, this paper presents the study of residual stresses by X-ray diffraction, by  $\sin^2\psi$  method, of AISI 316L stainless steel joints welded by GTAW process. The microstructure and hardness analysis of the joints were performed in order to complement the study. The results have shown that lower welding speeds and hence a larger heat input generates compressive residual stresses of greater magnitude in the weld metal, mainly in the transverse direction to the weld bead.

Key-words: AISI 316L steel, Welding, GTAW, residual stresses, X-ray diffraction.