

INFLUÊNCIA DO APORTE TÉRMICO SOBRE AS PROPRIEDADES DE JUNTAS SOLDADAS DOS AÇOS AISI 316 E AISI 316L *

Rafaela dos Santos Silva¹
Rudinei Demarque²
José Adilson de Castro³
Ellem Patrícia dos Santos⁴

Resumo

O presente estudo tem como objetivo avaliar a influência da variação do aporte térmico sobre as dimensões do cordão de solda, o espaçamento entre bandas de ferrita δ , a fração volumétrica de ferrita δ e a microdureza na zona fundida utilizando o processo TIG autógeno em chapas de aços inoxidáveis austeníticos AISI 316 e AISI 316L. Foi feita análise comparativa entre as amostras soldadas de ambos os aços soldados com aportes de 0,5, 1,5 e 2,5 kJ/mm. Os resultados mostraram que as dimensões do cordão, o espaçamento entre bandas de ferrita e a fração volumétrica de ferrita δ tornam-se maiores com o aumento do aporte. As amostras soldadas do aço AISI 316L, em comparação com as amostras do aço AISI 316, apresentaram aumento de cerca de 20% da área do cordão de solda para os aportes de 0,5 e 1,5 kJ/mm, enquanto que para o aporte de 2,5 kJ/mm houve redução de cerca de 20% da área. Análises mostraram que as amostras soldadas do aço AISI 316L apresentaram maior espaçamento entre bandas de ferrita e maiores frações de ferrita δ que o aço AISI 316. Quanto à microdureza, o estudo mostrou que quanto mais próximo do centro da zona fundida, maior é o valor de microdureza, sendo a microdureza do aço AISI 316 maior que a do aço AISI 316L.

Palavras-chave: Aços Inoxidáveis Austeníticos; Soldabilidade; Zona Fundida; Processo TIG Autógeno.

INFLUENCE OF HEAT INPUT ON THE PROPERTIES OF AISI 316 AND AISI 316L STEELS WELD JOINTS

Abstract

The present study has as objective to evaluate the influence of the variation of heat input on the dimensions of weld bead, the ferrite band spacing δ , the ferrite δ volumetric fraction and the microhardness in the molten zone using the autogenous TIG process in austenitic stainless steel plates AISI 316 and AISI 316L. A comparative analysis was performed between welded samples of both welded steels with 0.5, 1.5 and 2.5 kJ / mm. The results showed that the dimensions of the bead, the spacing between the ferrite bands and the δ ferrite volumetric fraction become larger with the increase of the heat input. Welded samples of AISI 316L steel, compared to AISI 316 steel samples, showed an increase of about 20% of the area of the weld bead for the heat input of 0.5 and 1.5 kJ / mm, whereas for the heat input of 2.5 kJ / mm there was a reduction of about 20% of the area. Analyzes showed that welded samples of AISI 316L steel presented greater spacing between ferrite bands and higher fractions of δ ferrite than AISI 316 steel. As for the microhardness, the study showed that the closer to the center of the molten zone, the higher the microhardness value, the microhardness of AISI 316 steel being greater than that of AISI 316L steel.

Keywords: Austenitic Stainless Steels; Weldability; Molten Zone; Autogenous TIG Process.

- ¹ *Engenheira Metalurgista, Mestranda em Engenharia Metalúrgica, Programa de Pós-graduação em Engenharia Metalúrgica e de Materiais, Escola de Engenharia Industrial Metalúrgica de Volta Redonda, Universidade Federal Fluminense, Volta Redonda, Brasil.*
- ² *Engenheiro Metalurgista, Mestre, Professor Assistente UFRJ-Campus Macaé, Doutorando em Engenharia Metalúrgica, Programa de Pós-graduação em Engenharia Metalúrgica e de Materiais, Escola de Engenharia Industrial Metalúrgica de Volta Redonda, Universidade Federal Fluminense, Volta Redonda, Brasil.*
- ³ *Engenheiro Metalurgista, Ph.D, Professor Adjunto, Programa de Pós-graduação em Engenharia Metalúrgica e de Materiais, Escola de Engenharia Industrial Metalúrgica de Volta Redonda, Universidade Federal Fluminense, Volta Redonda, Brasil.*
- ⁴ *Engenheira Metalurgista, Mestre em Engenharia Metalúrgica.*

1 INTRODUÇÃO

Dentre os aços inoxidáveis, o aço inoxidável austenítico é o que apresenta maior gama de utilização, já que apresentam boa tenacidade e resistência mecânica em temperaturas elevadas e podem ser empregados em diversos meios corrosivos, tanto em baixas como em alta temperatura. Além disso, o austenítico pode ser considerado o de melhor soldabilidade. Porém, devido às transformações que ocorrem na microestrutura quando expostos a altas temperaturas, as propriedades dos aços inoxidáveis austeníticos podem ser facilmente degradadas em operações de soldagem. Para evitar que isso ocorra, é necessária especial atenção nos parâmetros de soldagem, em especial o aporte térmico. Com base nessas informações, faz-se necessário o estudo das mudanças de propriedades da junta soldada de acordo com a variação do aporte.

2 MATERIAIS E MÉTODOS

2.1 Materiais

Para o processo de soldagem, foram utilizadas seis chapas de aço inoxidável austenítico laminado a quente, sendo três de AISI 316 e três de AISI 316L, ambas com as dimensões apresentadas na tabela 1.

Tabela 1. Dimensões das chapas dos aços AISI 316 e AISI 316L

Comprimento (mm)	Largura (mm)	Espessura (mm)
110	60	10

2.2 Método de Soldagem

Cada uma das três chapas foi submetida ao processo de soldagem TIG (Tungsten Inert Gas) autógeno, de maneira que ambas as chapas, AISI 316 e AISI 316L, foram soldadas com os aportes de 0,5, 1,5 e 2,5 kJ/mm. Vale lembrar que o cálculo do aporte térmico é feito de acordo com a equação 1, sendo que o fator de rendimento η igual a 0,8 para o processo TIG autógeno.

$$\text{Aporte Térmico} = \frac{\text{Tensão} \times \text{Corrente} \times \eta}{1000 \times \text{Velocidade de Soldagem}} \quad (1)$$

Para facilitar o registro dos dados, as amostras do aço AISI 316 soldadas com os aportes de 0,5, 1,5 e 2,5 kJ/mm foram nomeadas de 5, 15 e 25, respectivamente, enquanto que as amostras do aço AISI 316L foram nomeadas de 5L, 15L e 25L. Para o controle da velocidade da tocha durante a soldagem, foi utilizado um inversor de frequência. A frequência definida no inversor é o que permite calcular a velocidade de soldagem. Os parâmetros utilizados no processo de soldagem se encontram na tabela 2.

Tabela 2. Parâmetros do processo de soldagem

Amostra	5	15	25	5L	15L	25L
Corrente (A)	306	306	306	306	306	306
Tensão (V)	16,3	15,3	15,5	15,5	14,9	14,6
Velocidade (mm/s)	7,98	2,49	1,51	7,58	2,43	1,42
Frequência (Hz)	15,65	5,16	3,10	15,65	5,16	3,10

2.3 Caracterização Microestrutural

Para fins comparativos, foi cortada e embutida uma amostra como recebida de ambos os aços. As mesmas foram lixadas em lixadeira manual utilizando lixas de carbetto de silício na granulometria de 220 a 4000 mesh. Em seguida as amostras foram polidas mecanicamente utilizando como abrasivo solução de alumina de 1 μm e 0,05 μm e, então, as amostras foram atacadas por imersão com Água Régia, com composição conforme a tabela 3. As amostras foram analisadas por microscopia óptica (MO). Foi feita medição do tamanho de grão, quantificação de ferrita δ e medição de microdureza Vickers.

Tabela 3. Composição do reagente Água Régia

Ácido Clorídrico (HCl) 37%	30 ml
Ácido Nítrico (HNO₃)	10 ml

Após o processo de soldagem, foi retirada uma amostra de cada chapa, sendo que estas não foram embutidas. A preparação metalográfica das amostras soldadas foi a mesma que a das amostras como recebidas. Assim como as amostras como recebidas, as amostras soldadas foram analisadas por microscopia óptica (MO) e foi feita quantificação de ferrita δ e medição de microdureza Vickers. Para estas amostras também foi feito medição do espaçamento entre bandas de ferrita δ e análise macrográfica das juntas soldadas.

3 RESULTADOS E DISCUSSÃO

3.1 Análise das amostras como recebidas

A figura 1 mostra a microestrutura dos aços AISI 316 e AISI 316L, respectivamente. Nota-se a presença de ferrita δ entre os grãos austeníticos e de maclas de recozimento, que se formaram devido ao processo de laminação a quente das amostras como recebidas.

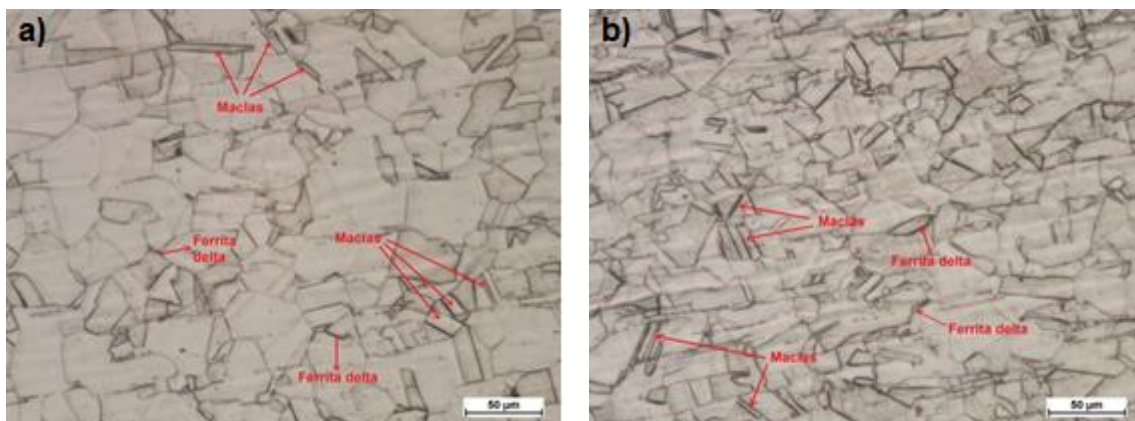


Figura 1. Microestrutura dos aços (a) AISI 316 e (b) AISI 316L. Ataque: Água Régia. Aumento: 200X.

O tamanho médio dos grãos, calculado pelo método dos interceptos lineares de Heyn de acordo com a norma ASTM E112, foi de 43 μm com intervalo de confiança de 3 μm para a amostra AISI 316 e 31 μm com intervalo de confiança de 2 μm para a amostra 316L. O resultado do tamanho de grão ASTM foi 6 para o aço AISI 316 e 7 para o aço AISI 316L.

A quantificação de ferrita δ , feita pelo software Image J, resultou em 9,84% de ferrita δ com intervalo de confiança de 0,18% para o aço AISI 316. Já o aço AISI 316L, que possui maior teor de elementos de liga ferritizantes, como molibdênio, apresentou 12,30% de ferrita δ com intervalo de confiança de 0,21%.

3.2 Ciclo térmico de soldagem

A figura 2 mostra os ciclos térmicos de soldagem obtidos com o auxílio de um termopar durante o processo de soldagem TIG autógeno dos aços AISI 316 e AISI 316L. O termopar acoplado a amostra 5 não registrou valores de temperatura, não sendo possível plotar as curvas de ciclo térmico para a amostra em questão. As curvas mostram que menores velocidades de soldagem resultam em aportes maiores, como mostrado na equação 1, e maiores aportes resultaram em maiores temperaturas de pico atingida pelas amostras pois quanto menor a velocidade de soldagem, mais tempo o arco elétrico permanece na amostra e, portanto, maior a temperatura atingida pelo mesmo. As curvas dos ciclos térmicos também mostram que quanto maior a temperatura de pico, maior é o tempo de resfriamento, como se pode notar ao comparar o tempo de resfriamento da amostra 5L, aproximadamente 50 segundos, com o tempo de resfriamento da amostra 25L, acima de 600 segundos.

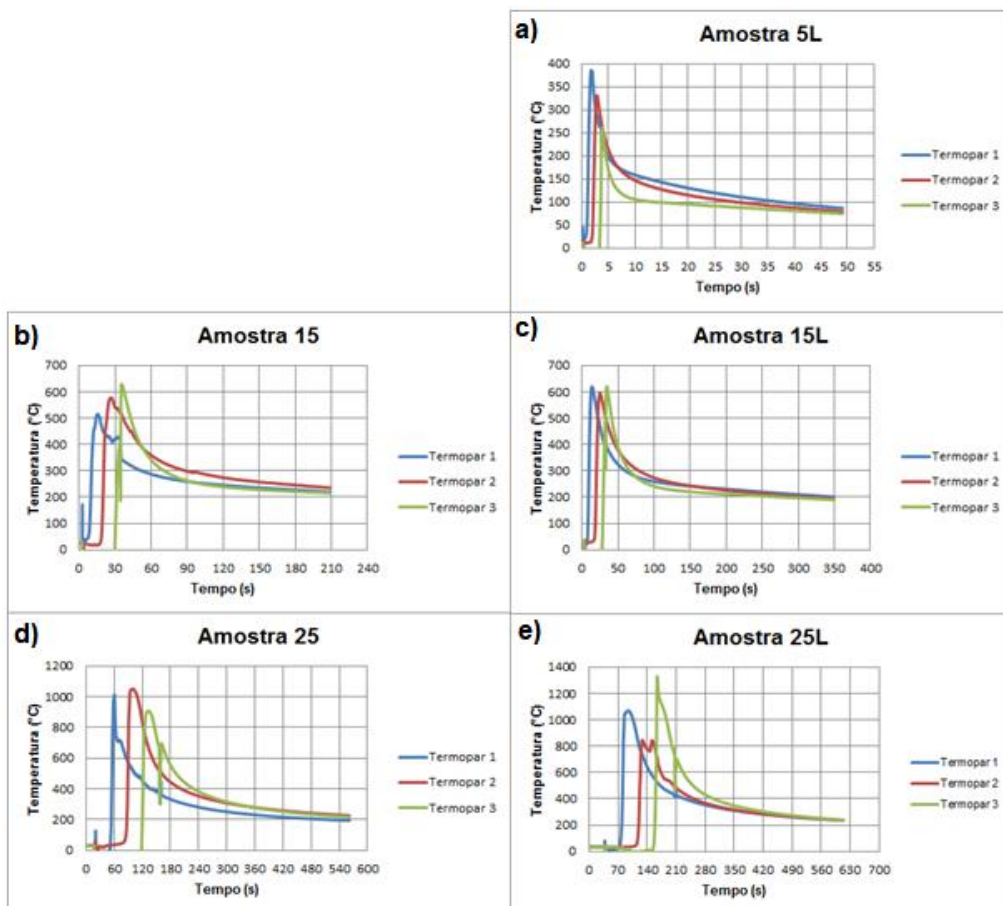


Figura 2. Ciclos térmicos de soldagem para as amostras de AISI 316 e AISI 316L. (a) Amostra 5L, (b) Amostra 15, (c) Amostra 15L, (d) Amostra 25, (e) Amostra 25L.

3.3 Dimensionamento do cordão de solda

Os valores médios de largura e profundidade, obtidos através de um perfilômetro, para cada amostra soldada se encontram na tabela 4. Os resultados de largura e profundidade aumentam com o aumento do aporte térmico, pois quanto maior o aporte, maior a profundidade do cordão de solda e a largura do mesmo.

Tabela 4. Medidas de largura e profundidade do cordão de solda

Amostra	Largura (mm)	Profundidade (mm)	Amostra	Largura (mm)	Profundidade (mm)
5	8,511	2,865	5L	12,207	2,208
15	9,047	2,956	15L	12,714	2,495
25	15,262	4,221	25L	14,444	3,005

Os resultados dos valores aproximados das áreas das juntas soldadas, obtidos pelo software Geogebra, se encontram na tabela 5. Percebe-se um aumento nos valores da área do cordão de solda à medida que o aporte térmico aumenta. Logo, conforme observado por Souza et al. [6], as dimensões do cordão de solda aumentam à medida que se aumenta o aporte térmico.

Tabela 5. Valores da área do cordão de solda de cada amostra

Amostra	Área (mm ²)	Amostra	Área (mm ²)
5	13,33	5L	16,46
15	14,93	15L	18,64
25	36,22	25L	29,20

3.4 Análise por MO das amostras soldadas

As figuras 3, 4 e 5 mostram a microestrutura da zona fundida (ZF) das amostras soldadas com os aportes de 0,5 (amostras 5 e 5L), 1,5 (amostras 15 e 15L) e 2,5 (amostras 25 e 25L), respectivamente. É possível visualizar que as microestruturas consistem em austenita e ferrita em rede ou vermicular.

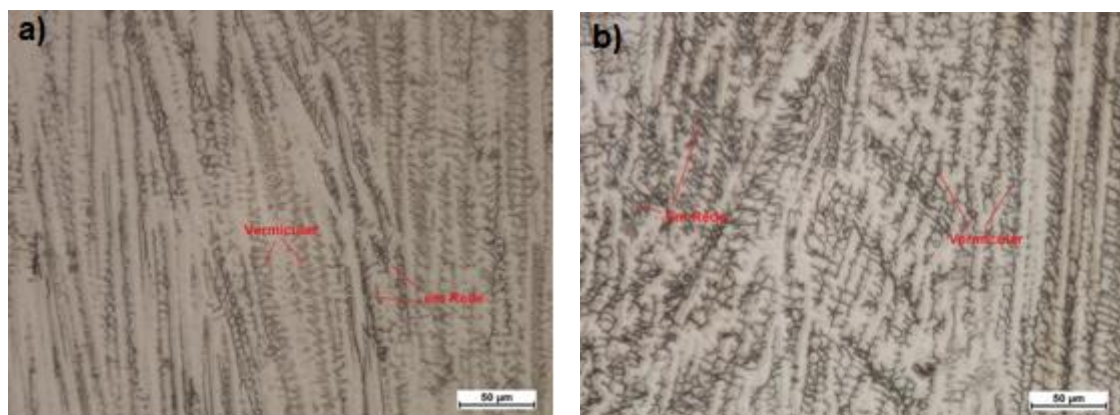


Figura 3. (a) ZF das amostra 5 (AISI 316), (b) ZF da amostra 5L (AISI 316L). Ataque: Água Régia. Aumento: 200X.

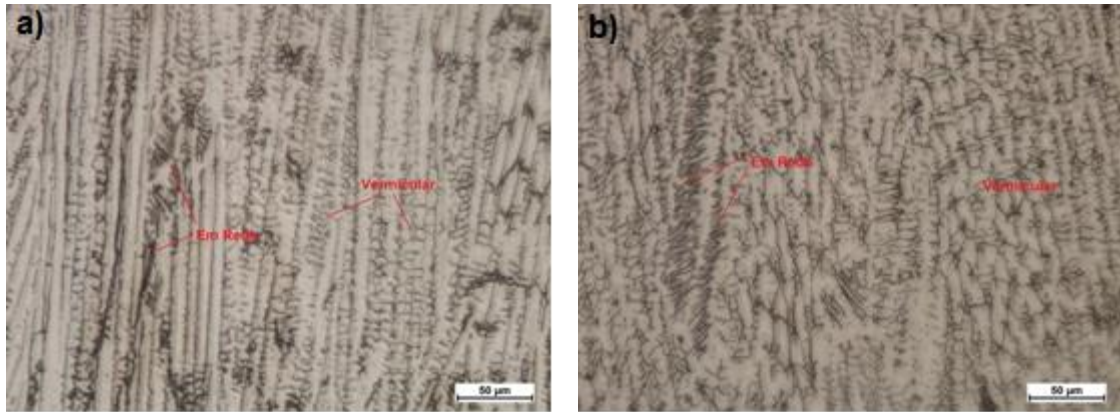


Figura 4. (a) ZF das amostra 15 (AISI 316), (b) ZF da amostra 15L (AISI 316L). Ataque: Água Régia. Aumento: 200X.

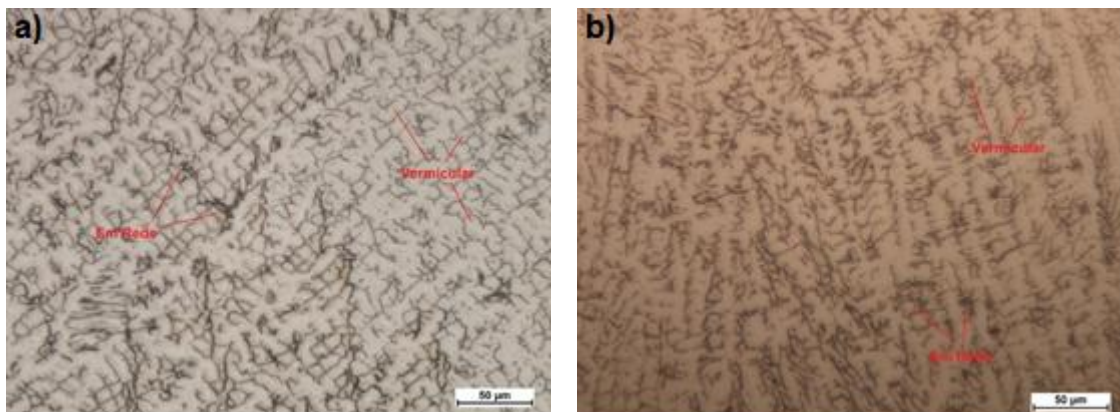


Figura 5. (a) ZF das amostra 25 (AISI 316), (b) ZF da amostra 25L (AISI 316L). Ataque: Água Régia. Aumento: 200X.

As figuras 6, 7 e 8 mostram a microestrutura da zona termicamente afetada (ZTA) das amostras soldadas com os aportes de 0,5 (amostras 5 e 5L), 1,5 (amostras 15 e 15L) e 2,5 (amostras 25 e 25L), respectivamente.

Com as micrografias é possível visualizar que as características da microestrutura, como espaçamento e fração volumétrica de ferrita δ , das juntas soldadas, tanto da ZF como da ZTA, de ambas as amostras variam com o aumento do aporte térmico.

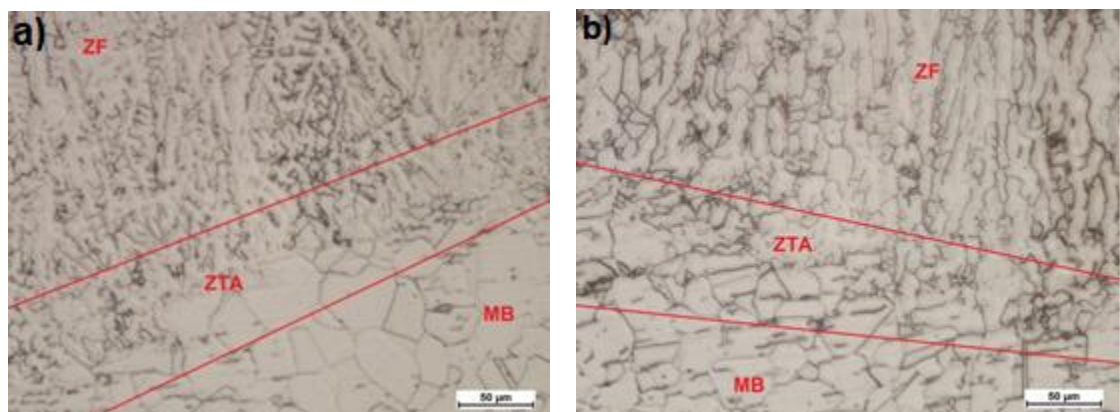


Figura 6. (a) ZTA das amostra 5 (AISI 316), (b) ZTA da amostra 5L (AISI 316L). Ataque: Água Régia. Aumento: 200X.

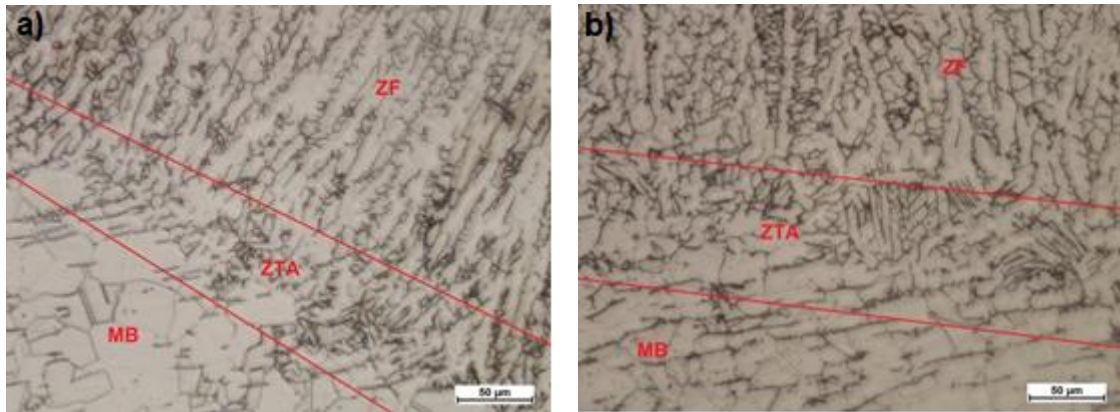


Figura 7. (a) ZTA das amostra 15 (AISI 316), (b) ZTA da amostra 15L (AISI 316L). Ataque: Água Régia. Aumento: 200X.

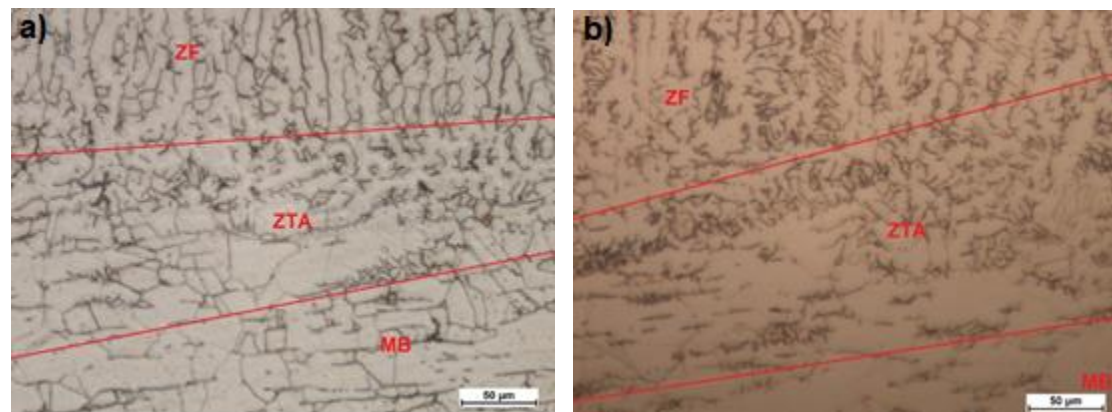


Figura 8. (a) ZTA das amostra 25 (AISI 316), (b) ZTA da amostra 25L (AISI 316L). Ataque: Água Régia. Aumento: 200X.

3.5 Espaçamento entre bandas de ferrita δ das amostras soldadas

As medidas de espaçamento médio, obtidas pelo software Image J, e o intervalo de confiança de 95% para o espaçamento entre as bandas de ferritas δ das amostras soldadas se encontram na tabela 6. Percebe-se que maiores aportes dão origem a maior espaçamento entre as ferritas δ , pois quanto maior o aporte, menor a taxa de resfriamento da junta. Portanto, durante a solidificação, as bandas de ferrita δ terão mais tempo para crescer, aumentando o espaçamento entre as ferritas.

Tabela 6. Medidas de espaçamento entre bandas de ferrita δ

Amostra	5	15	25	5L	15L	25L
Espaço (μm)	(6,51 \pm 0,22)	(7,99 \pm 0,27)	(9,84 \pm 0,28)	(7,08 \pm 0,22)	(9,05 \pm 0,24)	(10,10 \pm 0,19)

3.6 Quantificação de ferrita δ das amostras soldadas

A tabela 7 mostra os resultados obtidos através do software ImageJ para a quantificação de ferrita δ das amostras soldadas. Como esperado, a fração volumétrica de ferrita δ torna-se maior com o aumento do aporte, pois quanto maior o aporte, menor a velocidade de resfriamento e mais tempo haverá para formação de ferrita δ . De acordo com Callister [4], a formação de ferrita δ também pode ser explicada pela difusão do carbono, que é calculado pela equação da difusão mostrada na equação 2, sendo D o coeficiente de difusão, D_0 e Q (energia de ativação)

constantes determinadas experimentalmente, R a constante dos gases (8,314 J/mol K) e T a temperatura. Nota-se que, quanto maior a temperatura, maior será o coeficiente de difusão do carbono, isto é, mais carbono será difundido para a austenita, havendo maior formação de ferrita. Portanto, para maiores aportes térmicos, que resultam em maiores temperaturas de pico, maior a porcentagem de ferrita δ .

$$D = D_0 \exp \frac{-Q}{RT} \quad (2)$$

Tabela 7. Quantificação de ferrita δ

Amostra	5	15	25
Ferrita (%)	(16,40±0,69)	(21,40±0,55)	(23,13±0,77)

Amostra	5L	15L	25L
Ferrita (%)	(19,79±0,31)	(22,14±0,32)	(24,05±0,41)

3.7 Ensaio de microdureza Vickers

O ensaio de microdureza, feito com carga de 300 gF durante 20 s, para as amostras como recebidas foi feito em sete pontos distintos, resultando em 176 HV com intervalo de confiança de 0,29 HV para o AISI 316 e 169 HV com intervalo de confiança de 0,50 HV para o AISI 316L. A microdureza das amostras soldadas, medidas também com carga de 300 gF durante 20 s, foi feita em dez pontos, sendo três no metal base e sete na zona fundida, com o objetivo de mostrar as mudanças que ocorrem na microdureza à medida que se aproxima do centro do cordão de solda. A distância entre cada identificação foi de aproximadamente 1,0 mm e os resultados das medições se encontram na tabela 8. Os gráficos mostrados na figura 9 ilustram o comportamento da microdureza de ambos os aços.

Tabela 4. Valores de microdureza das amostras soldadas

Amostra 5 (HV)	Amostra 15 (HV)	Amostra 25 (HV)	Amostra 5L (HV)	Amostra 15L (HV)	Amostra 25L (HV)
174	173	173	164	168	167
174	177	177	171	171	177
170	184	184	174	182	170
191	202	202	177	186	181
187	210	210	179	198	189
198	206	206	182	204	204
204	202	202	187	206	202
216	212	212	181	210	208
208	216	216	186	204	206
212	216	216	189	212	218

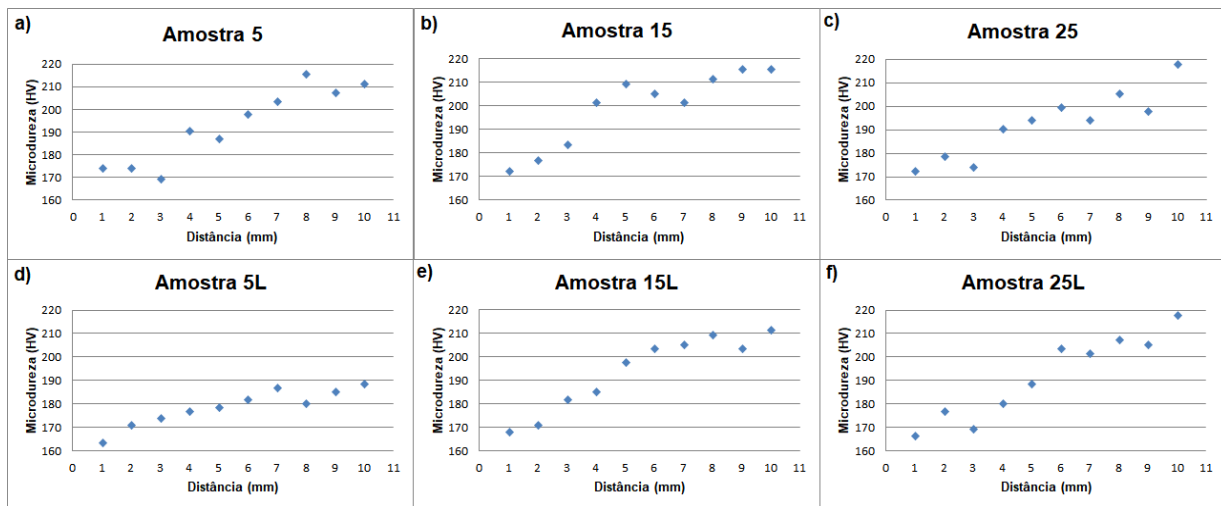


Figura 9. Gráficos de microdureza das amostras soldadas, (a) Amostra 5, (b) Amostra 15, (c) Amostra 25, (d) Amostra 5L, (e) Amostra 15L, (f) Amostra 25L.

Como já era esperado, os valores de microdureza aumentam à medida que a ZF se aproxima, se tornando maiores quanto mais próximo for do centro da ZF. Nota-se que quanto maior o aporte, maiores os valores de microdureza. Isso ocorre devido a maior quantidade de ferrita δ , que é uma fase com maior dureza que a austenita e, já mencionado, quanto maior o aporte, maior a formação de ferrita δ , portanto, maior a microdureza do material. Nota-se que as amostras 5L, 15L e 25L apresentam continuidade entre os pontos de distância 3 e 4, enquanto que as amostras 5, 15 e 25 apresentam certa descontinuidade. Isso ocorreu por que durante a medição das amostras do aço AISI 316L o quarto ponto caiu na ZTA, enquanto que o mesmo não aconteceu para as amostras AISI 316. Analisando os dados apresentados na tabela 8 é possível notar a variabilidade dos valores de microdureza, podendo ser visualizada nos gráficos da figura 8. Isso ocorre porque o ensaio de microdureza possui indentador com dimensões pequenas, na escala de micrometros. Logo, ao realizar o ensaio, o indentador pode atingir regiões com predominância de ferrita δ (maior dureza) ou regiões de austenita (menor dureza), o que faz com que haja variações nos valores de microdureza. Nota-se ainda que, apesar do aumento de microdureza na zona fundida de ambos os aços, o mesmo não é tão significativo, com variações em torno de 45 HV para as amostras de AISI 316 e em torno de 50 HV para as amostras de AISI 316L.

4 CONCLUSÃO

Quanto ao dimensionamento do cordão de solda, as amostras 5L e 15L apresentaram área do cordão de solda aproximadamente 20% maior que a área das amostras 5 e 15, respectivamente. Já a amostra 25L apresentou área 19% menor que a amostra 25.

O aumento do aporte térmico de soldagem de ambos os aços acarretou no aumento do espaçamento entre bandas de ferrita δ , da fração volumétrica de ferrita δ e do aumento nas dimensões do cordão de solda. Quanto a fração volumétrica de ferrita δ , na amostra 5L apresentou 17% de ferrita a mais que a amostra 5, a amostra 15L apresentou 3% de ferrita a mais que a amostra 15 e a amostra 25L apresentou 4% de ferrita a mais que a amostra 25. Quanto ao espaçamento entre bandas de ferrita, a amostra 5L apresentou espaçamento 8% maior que a amostra 5, a amostra 15L apresentou espaçamento 12% maior que a amostra 15 e a amostra 25L apresentou

espaçamento 3% maior que a amostra 25. Portanto, o estudo mostrou que o aço AISI 316L apresenta maior fração volumétrica de ferrita δ e maior espaçamento entre bandas de ferrita que o aço AISI 316, independente do aporte térmico.

O ensaio de Microdureza Vickers mostrou que a microdureza do aço AISI 316 é cerca de 4% maior que a do aço AISI 316L, o que já era esperado, pois o aço AISI 316L possui menor teor de carbono, o que faz com que sua dureza seja menor. Para as amostras soldadas, quanto mais próximo do centro do cordão de solda, maior a microdureza. Analisando os resultados obtidos para cada aporte, nota-se que o aporte de 2,5 kJ/mm possui maior espaçamento entre bandas de ferrita e maior fração de ferrita δ , assim como maiores dimensões do cordão de solda, características que podem prejudicar a obtenção de uma solda de qualidade. Assim, os aportes mais indicados para o processo de soldagem são os aportes de 0,5 kJ/mm e 1,5 kJ/mm. A escolha entre um destes dependerá da espessura da amostra. Sendo que, para espessuras mais finas, recomenda-se o aporte de 0,5 kJ/mm de forma a evitar furos.

Agradecimentos

À Universidade Federal Fluminense, ao PPGEM e à CAPES pelo financiamento dos materiais e dos equipamentos para análises.

REFERÊNCIAS

- 1 CHIAVERINI, Vicente. Aços e Ferros Fundidos. São Paulo: Associação Brasileira de Metalurgia, Materiais e Mineração, 7ª Ed, Cap 23 p.394, 2008.
- 2 COLPAERT, Hubertus. Metalografia dos Produtos Siderúrgicos Comuns. São Paulo: Villares Metals, 4ª Ed. Cap 16 p. 521, 2008.
- 3 PADILHA, Angelo Fernando, SICILIANO, Fulvio. Encruamento, recristalização, crescimento de grão e textura. São Paulo: Associação Brasileira de Metalurgia e Materiais, Cap2 p. 12 – 15, 2005.
- 4 CALLISTER, W. D. Ciência e engenharia de materiais uma introdução. Rio de Janeiro: LTC, 7ª Ed. Cap5 p. 88 – 92, 2008.
- 5 VILCHEZ, Carlos Alexandre Zárate. Influência de ciclos térmicos na microestrutura e propriedades mecânicas da junta soldada do aço civil 300, Ilha Solteira, 2005. Tese de Mestrado – Universidade Estadual Paulista. Faculdade de Engenharia de Ilha Solteira, Ilha Solteira, 2005.
- 6 SOUZA, Lívia Henriques de, XAVIER, Carlos Roberto, MEDEIROS, Neil de, MARCELO, Célio de Jesus, MOREIRA, Luciano Pessanha. Avaliação da soldagem TIG autógena sobre as características dimensionais da solda do aço AISI 304L, Volta Redonda, 2016. In: CONEM Congresso Nacional de Engenharia Mecânica, Fortaleza, 2016.
- 7 CAI, Yangchuan, LUOA, Zhen, FENGA, Mengnan, LIUA, Zuming, HUANGA, Zunyue, ZENGA, Yida. Effect of activator on mechanical properties and intercrystalline corrosion resistance of austenitic stainless steel weld, China, 2016. Journal of Materials Processing Technology, Elsevier, Tianjin University, China, 2016.
- 8 DAS, Shilajit, MUKHERJEE, Manidipto, PA, Tapan Kumar. Effect of grain boundary precipitation and δ -ferrite formation on surface defect of low nickel austenitic stainless steels, India, 2015. Engineering Failure Analysis, Elsevier, Jadavpur University, India, 2015.

- 9 KIM, S. K., SHIN Y. K., KIM N. J. Distribution of Delta ferrite content in continuously cast type 304 stainless steel slabs. *Ironmaking and Steelmaking*, vol.22, n.4, p.316-325, 1995.
- 10 MARQUES, Paulo Villani, MODENESI, Paulo José, BRACARENSE, Alexandre Queiroz. *Soldagem: Fundamentos e Tecnologia*. Rio de Janeiro: Elsevier, 4ª Ed, 2017.
- 11 WAINER, Emílio, BRANDI, Sérgio Duarte, MELLO, Fábio Décourt Homem de. *Soldagem: Processos e Metalurgia*. São Paulo: Blucher, 1992.