



Tema: Soldagem

INFLUÊNCIA DA FREQUENCIA DE PULSO DA CORRENTE NA SOLDAGEM TIG AUTÓGENA SOBRE A MICROESTRUTURA E PROPRIEDADES DO AÇO INOXIDÁVEL AUSTENÍTICO AISI 316L*

*Isabel Ferreira de Barros¹
Nívea Rodrigues Leite²
Cleiton Carvalho Silva³*

Resumo

O objetivo deste trabalho é avaliar o efeito da frequência de pulsação da corrente de soldagem sobre a microestrutura e propriedades resultantes de solda de chapas finas do aço inoxidável austenítico AISI 316L. Chapas do aço inoxidável AISI 316L foram submetidas à soldagem variando a frequência de pulsação de 2 a 8 Hz, mantendo-se constante a energia de soldagem. Os parâmetros de soldagem foram selecionados de forma a se obter penetração total. Foram realizadas análises das características superficiais. A microestrutura da seção transversal foi avaliada por microscopia óptica e microscopia eletrônica de varredura. A avaliação da resistência mecânica foi realizada por meio de ensaios de tração uniaxial, dureza e dobramento. Os resultados têm mostrado que variações na frequência de pulsação não atuaram de forma a conferir melhores propriedades mecânicas à junta soldada.

Palavras-chave: Soldagem TIG; corrente pulsada; Aço inoxidável AISI 316L.

INFLUENCE OF PULSE FREQUENCY OF CURRENT IN AUTOGENOUS TIG WELDING ON THE MICROSTRUCTURE AND PROPERTIES OF THE AISI 316L AUSTENITIC STAINLESS STEEL

Abstract

The aim of this study is to evaluate the effect of pulse frequency of the current on the microstructure and properties of AISI 316L stainless steel thin plates. Thin plates of the steel were welded by the TIG autogenous welding process with pulsed current. The welds were made varying the pulse frequency from 2 to 8 Hz, maintaining constant the welding energy. The welding parameters were selected to obtain complete penetration. Analyses of surface features were made. The microstructure of the cross section was evaluated by optical microscopy and scanning electron microscopy. The mechanical properties evaluation was done by uniaxial tensile testing, hardness and bending. The results have shown that variations in pulse frequency did not act in order to confer improvement on mechanical properties of the welded joints.

Keywords: TIG welding process; Pulsed current; AISI 316L stainless steel.

¹ *Mestre em Engenharia e Ciência dos Materiais, Universidade Federal do Ceará, Fortaleza, CE, Brasil.*

² *Graduanda em Engenharia Metalúrgica, Universidade Federal do Ceará, Fortaleza, CE, Brasil.*

³ *Doutor em Engenharia e Ciência dos Materiais, Professor, Departamento de Engenharia Metalúrgica e de Materiais, Universidade Federal do Ceará, Fortaleza, CE, Brasil.*

* *Contribuição técnica ao 69º Congresso Anual da ABM – Internacional e ao 14º ENEMET - Encontro Nacional de Estudantes de Engenharia Metalúrgica, de Materiais e de Minas, 21 a 25 de julho de 2014, São Paulo, SP, Brasil.*



1 INTRODUÇÃO

Os aços inoxidáveis vêm conquistando espaço nos mais variados setores da indústria nos últimos anos devido às suas boas propriedades, podendo ser utilizado, por exemplo, na indústria petroquímica, farmacêutica, nuclear, etc. Entre os aços inoxidáveis mais utilizados, pode-se citar o aço inoxidável austenítico, que pertencem ao sistema Fe-Cr-Ni e contém em sua composição química elementos formadores de austenita, como o níquel, com uma porcentagem mínima de aproximadamente 8%, manganês e nitrogênio. Possuem ainda uma microestrutura basicamente austenítica com estrutura cristalina cúbica de face centrada (CFC) [1].

Os aços inoxidáveis austeníticos apresentam como características, elevadas tenacidade e ductilidade, mesmo quando submetidos a baixas temperaturas, e ainda boa soldabilidade [2,3]. Em comparação com os demais aços inoxidáveis, são geralmente o mais resistente à corrosão [4]. Oferecem ainda excelente resistência à corrosão nos mais variados ambientes, como por exemplo, meios ácidos, industriais e marinhos [5]. São aços suscetíveis à corrosão intergranular, quando submetidos à soldagem ou a altas temperaturas, que por sua vez ocasiona a sensitização [6].

Dentre os diversos tipos de aços da classe austenítica, o aço AISI 316L se destaca por apresentar boa resistência à corrosão e propriedades mecânicas interessantes tanto em baixa quanto em alta temperatura, sendo geralmente soldados para a fabricação de componentes [7].

Objetivando estudar o efeito da pulsação da corrente de soldagem sobre as características de soldas de chapas finas do aço inoxidável austenítico AISI 316L, foi utilizado o processo TIG autógeno com corrente pulsada, pois alguns estudos sugerem que é possível obter um refino de grão da microestrutura das soldas e um aumento da estabilidade do arco [8].

2 MATERIAL E MÉTODOS

Para a realização da soldagem foram utilizadas chapas do aço inoxidável austenítico AISI 316L com 2,0 mm de espessura e dimensões de 210 x 70 mm. A composição química do aço, obtida por meio de análise química, é apresentada na Tabela 1.

Tabela 1. Composição química dos aços AISI 444 e AISI 316L (% em peso)

Composição Química	C	Mn	Si	Cr	Ni	Mo	Nb	Ti
	0,013	1,314	0,578	16,52	10,448	2,148	0,059	0,0001

Utilizou-se uma fonte de soldagem multiprocesso, contando com um sistema de aquisição dos dados de tensão e corrente de soldagem, um eletrodo de tungstênio do tipo toriado com diâmetro de 2,4 mm, ajustado na polaridade negativa, e argônio puro como gás de proteção e também como gás de purga.

Inicialmente foi necessário realizar um estudo exploratório dos principais parâmetros a serem ajustados com base no trabalho realizado por Mendes [9], para posteriormente aplica-los durante as soldagens definitivas. Dentre os parâmetros definidos, pode-se citar a velocidade de soldagem (15 cm/min), a vazão do gás de proteção (20 l/min) e a distância do eletrodo à peça (2 mm). A Tabela 2 apresenta os parâmetros utilizados durante as soldagens definitivas.

* Contribuição técnica ao 69º Congresso Anual da ABM – Internacional e ao 14º ENEMET - Encontro Nacional de Estudantes de Engenharia Metalúrgica, de Materiais e de Minas, 21 a 25 de julho de 2014, São Paulo, SP, Brasil.

Tabela 2. Parâmetros de soldagem TIG com pulsação da corrente

Parâmetros/ Amostra	F0	F2	F4	F6	F8
Corrente de base (I _b) (A)	-	30	30	30	30
Corrente de pico (I _p) (A)	72	197	196	196	196
% Tempo de pico	100%	20%	20%	20%	20%
Tempo de base (t _b) (s)	-	0,4	0,2	0,1333	0,1
Tempo de pico (t _p) (s)	-	0,1	0,05	0,0333	0,025
Frequência de pulso (Hz)	0	2	4	6	8
Corrente Eficaz (A)	72	92,10	91,67	91,67	91,67
Corrente Média (A)	72	63,40	63,20	63,20	63,20
Tensão (V)	14	12	12	12	12
Energia (KJ/cm)	4,03	4,42	4,40	4,40	4,40

Após as soldagens, realizou-se a caracterização microestrutural. Para isto, as amostras foram submetidas ao corte e à preparação metalográfica, seguindo as etapas de lixamento e polimento mecânico em pasta de diamante (3 μm e 1 μm). Para revelar a microestrutura, foi necessário submeter as amostras à ataques químicos. Entretanto, não foi possível obter inicialmente a melhor condição de revelação, sendo testados diversos tipos de ataques químicos. Então, o ataque que se mostrou com maior eficiência para revelar a microestrutura do material foi o HNO₃, formado por 40% de ácido nítrico diluído em 60% de água destilada.

Para a análise dos resultados obtidos nas soldagens e identificação das microestruturas, utilizou-se a técnica de microscopia óptica, a partir da qual foi possível obter imagens das diversas regiões do cordão de solda, bem como obter os resultados quantitativos em termos de teores de austenita e ferrita presentes nas zonas fundidas.

Após a caracterização microestrutural, foram realizados ensaios mecânicos para determinação de algumas propriedades mecânicas das juntas soldadas, como o ensaio de microdureza (ASTM E384 – 10), o ensaio de tração (ASTM E8/E8M – 11) e o ensaio de dobramento (ASTM E190 – 92).

3 RESULTADOS

A microestrutura do metal de base do aço inoxidável austenítico AISI 316L é constituída por grãos de austenita equiaxiais juntamente com a presença de grãos de ferrita δ alongados no sentido de laminação da chapa, podendo ainda conter algum carboneto precipitado, conforme apresentado na Figura 1. Os resultados das propriedades mecânicas do metal de base são apresentados na Tabela 3.

* Contribuição técnica ao 69º Congresso Anual da ABM – Internacional e ao 14º ENEMET - Encontro Nacional de Estudantes de Engenharia Metalúrgica, de Materiais e de Minas, 21 a 25 de julho de 2014, São Paulo, SP, Brasil.

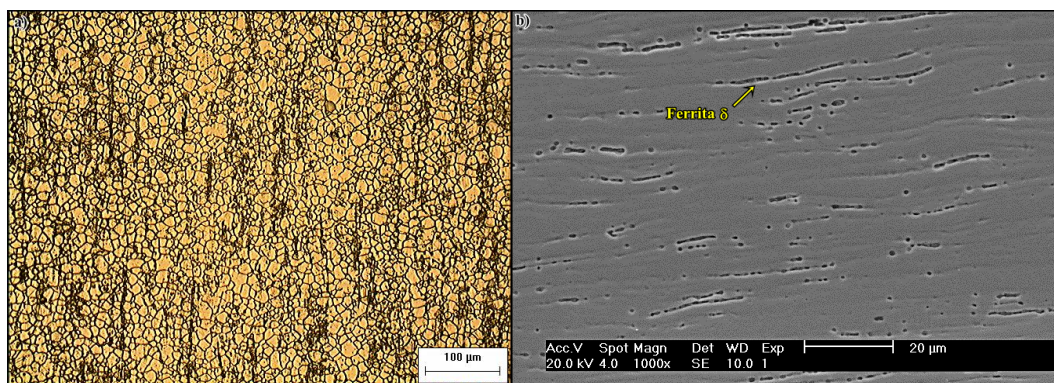


Figura 1. Metal de base do aço inoxidável austenítico AISI 316L. a) Microestrutura do metal de base obtida por MO (Reagente HNO₃, aumento 200x). b) Microestrutura do metal de base apresentando ferrita δ obtida por MEV.

Tabela 3. Propriedades mecânicas do metal de base do aço inoxidável austenítico AISI 316L

Metal de Base	Propriedades Mecânicas			
	Limite de Resistência à Tração (MPa)	Limite de Escoamento (MPa)	Alongamento (após a ruptura) (%)	Dureza Vickers (HV 0,1)
	482	469,46	28,13	160
ASTM A240	485	170	40	--

Após a soldagem do aço inoxidável austenítico AISI 316L, observou-se que os cordões de solda apresentaram bom acabamento superficial e que a realização da soldagem utilizando maiores frequências de pulsação provocou o aparecimento de mordeduras. Verificou-se ainda que a utilização de corrente pulsada no procedimento de soldagem pouco atuou de forma a reduzir o tamanho dos grãos da zona afetada pelo calor (ZAC), originados pelo súbito aquecimento devido ao ciclo térmico. Verificou-se ainda a formação de uma rede de ferrita δ ao longo dos contornos de grão da austenita na alta ZAC. A Figura 3 apresenta a ZAC do aço AISI 316L.

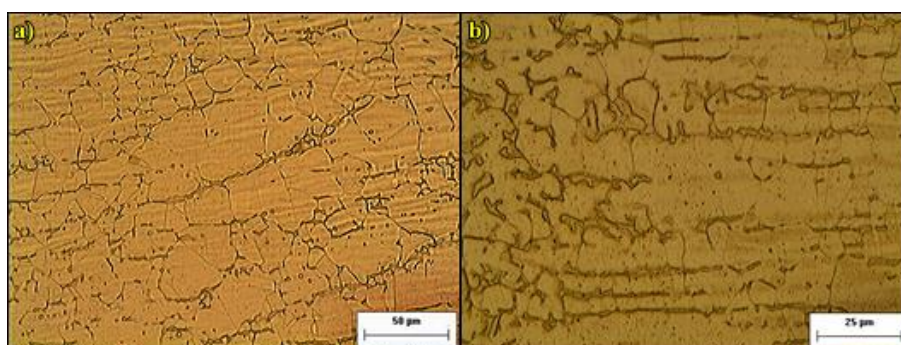


Figura 3. Microestrutura da típica da alta ZAC do aço inoxidável austenítico AISI 316L. a) Amostra soldada com frequência de 6 Hz (Reagente: HNO₃; aumento 500x), b) Amostra soldada com frequência de 0 Hz (Reagente: HNO₃; aumento 1000x).

A microestrutura da zona fundida de todas as condições de soldagem avaliadas foi constituída por uma matriz austenítica e ferrita δ . Na zona fundida desses aços foram identificadas microestruturas típicas do modo de solidificação ferrítico austenítico (FA), semelhante ao obtido por DAVID [10], conforme apresentado na Figura 4.

* Contribuição técnica ao 69º Congresso Anual da ABM – Internacional e ao 14º ENEMET - Encontro Nacional de Estudantes de Engenharia Metalúrgica, de Materiais e de Minas, 21 a 25 de julho de 2014, São Paulo, SP, Brasil.

Observou-se que mesmo variando a frequência de pulsação durante a soldagem, houve a formação preferencial de três morfologias diferentes para a ferrita δ na zona fundida: vermicular, *lathy* e acicular, sendo esta última localizada preferencialmente no centro da zona fundida. Para uma melhor visualização e compreensão das diferentes regiões obtidas, foram realizadas montagens das seções transversais das amostras, como pode ser observado na Figura 5.

Com base nos resultados da análise quantitativa de fases, verificou-se que a variação da frequência de pulsação não resultou em alterações significativas em termos de teor de ferrita, como ser observado na Figura 6.

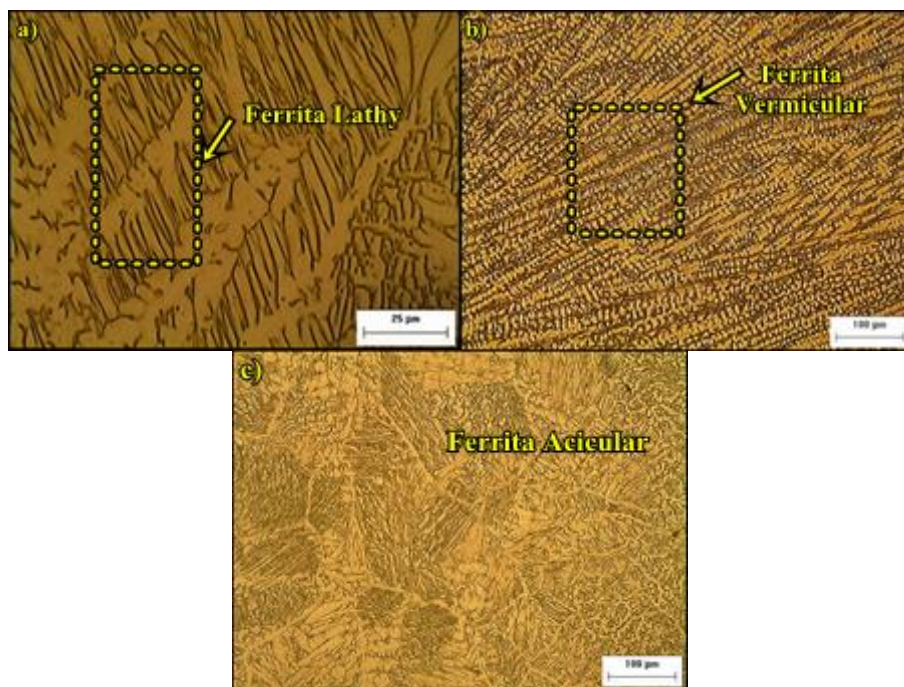


Figura 4. Microestruturas típicas do modo de solidificação FA presentes na zona fundida das amostras similares do aço inoxidável austenítico AISI 316L. a) Ferrita tipo lathy (Aumento 1000 X). b) Ferrita vermicular (Aumento 1000 X); c) Ferrita acicular (Aumento 200 X).

Sabendo-se que após o procedimento de soldagem o material pode sofrer alterações em suas propriedades mecânicas, foram realizados ensaios de microdureza nas amostras soldadas. O ensaio foi realizado sobre a seção transversal em toda extensão das amostras e após este foi possível observar que não houve uma variação significativa de dureza ao longo da zona fundida e da ZAC. Os valores referentes à dureza média da zona fundida das amostras pode ser observado na Figura 7.

* Contribuição técnica ao 69º Congresso Anual da ABM – Internacional e ao 14º ENEMET - Encontro Nacional de Estudantes de Engenharia Metalúrgica, de Materiais e de Minas, 21 a 25 de julho de 2014, São Paulo, SP, Brasil.

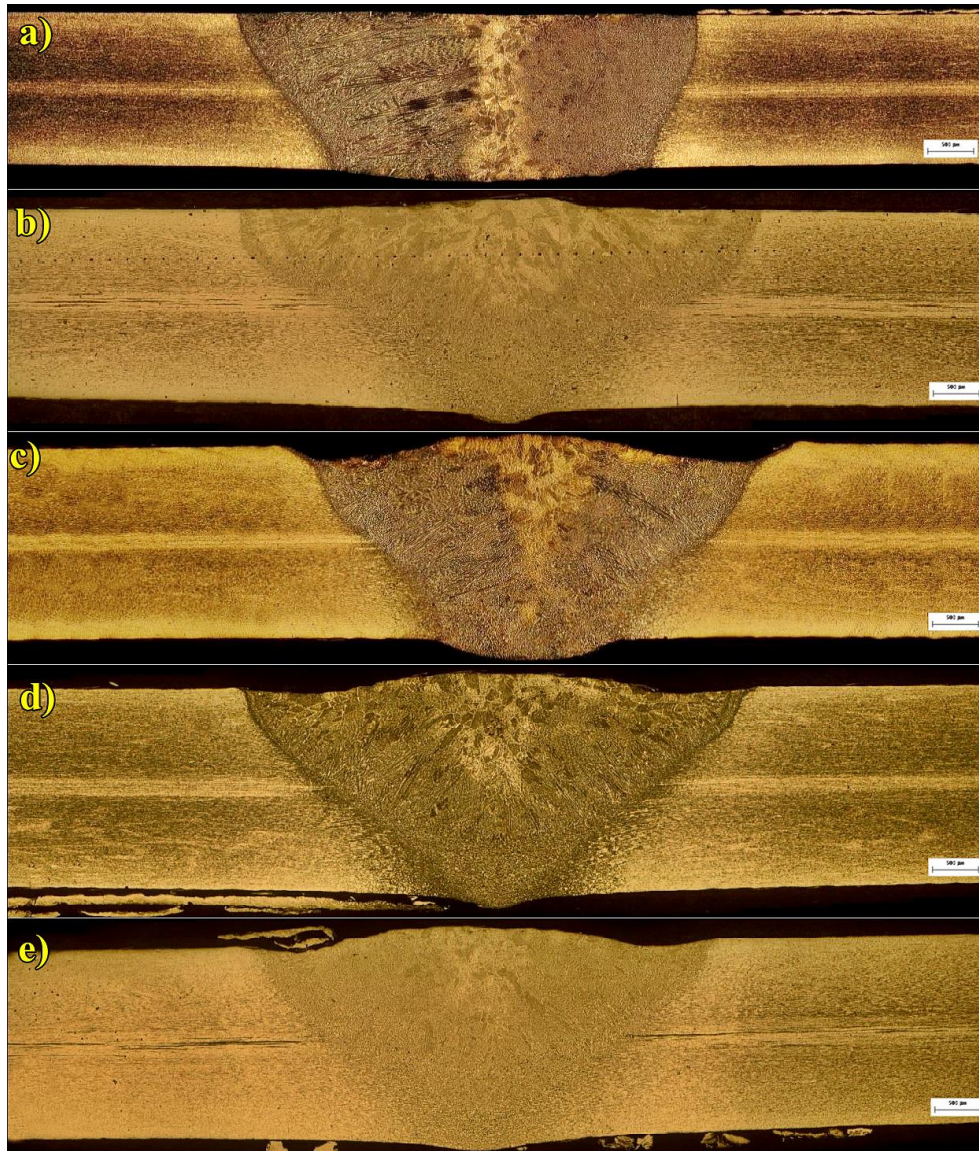


Figura 5. Montagem das seções transversais das amostras similares do aço inoxidável austenítico AISI 316L soldadas com frequência a) F0, b) F2, c) F4, d) F6 e e) F8. (Ataque: HNO₃).

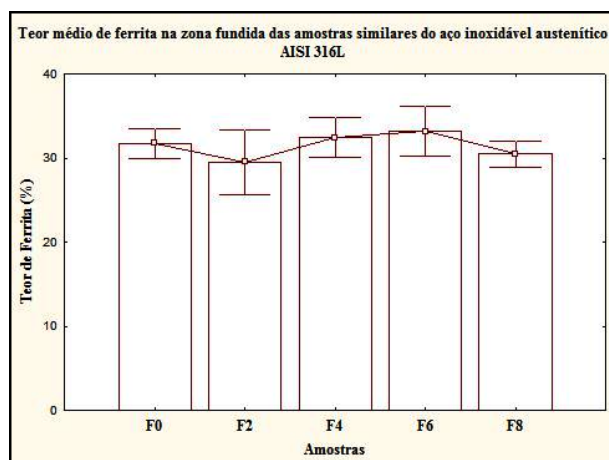


Figura 6. Teor médio de ferrita na zona fundida das amostras similares soldadas.

* Contribuição técnica ao 69^o Congresso Anual da ABM – Internacional e ao 14^o ENEMET - Encontro Nacional de Estudantes de Engenharia Metalúrgica, de Materiais e de Minas, 21 a 25 de julho de 2014, São Paulo, SP, Brasil.

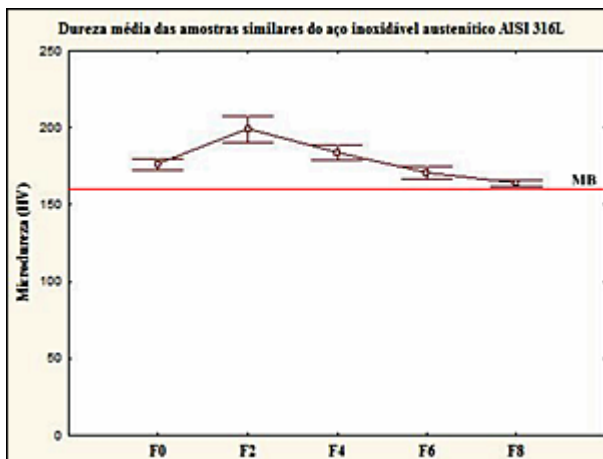


Figura 7. Dureza média da zona fundida das amostras similares do aço inoxidável austenítico AISI 316L.

Após o ensaio de tração uniaxial das soldas do aço inoxidável austenítico AISI 316L, verificou-se que os resultados obtidos apresentaram propriedades como tensão limite de escoamento, tensão limite de resistência e alongamento percentual superiores ao estabelecido pela norma ASTM A240-13. Os resultados do ensaio de tração realizado para os corpos de prova soldados são apresentados na Tabela 4.

No entanto, os resultados do ensaio de tração também mostraram que todos os corpos de prova apresentaram comportamento similar, na qual todas as rupturas ocorreram na zona fundida e, portanto, sendo considerados reprovados.

Este fato pode ter sido atribuído tanto à mudança de morfologia ocorrida nessa região, que resultaram na formação preferencial de ferrita acicular no centro da zona fundida, quanto pelo direcionamento dos grãos na solidificação na direção paralela à superfície da chapa. RODRIGUES e colaboradores [11] estudaram as propriedades de metais de solda austeníticos e verificaram que microestruturas com morfologia acicular, de uma forma geral, apresentaram menores valores de alongamento e tenacidade. Além disso, observou-se que encontro dos grãos de solidificação resultou num contorno central que está perpendicular à direção de aplicação dos esforços, como pode ser observado na Figura 8.

Para complementar a avaliação do comportamento mecânico do aço inoxidável austenítico AISI 316L soldado através do processo TIG autógeno utilizando corrente pulsada, foram realizados ensaios de dobramento. Este ensaio permitiu analisar a possibilidade de formação de trincas na zona fundida e na zona afetada pelo calor das amostras similares e dissimilares. Após o ensaio foi possível observar que nenhum dos corpos de prova apresentaram trincas e, portanto, todos os corpos de prova foram considerados aprovados.

* Contribuição técnica ao 69º Congresso Anual da ABM – Internacional e ao 14º ENEMET - Encontro Nacional de Estudantes de Engenharia Metalúrgica, de Materiais e de Minas, 21 a 25 de julho de 2014, São Paulo, SP, Brasil.



Figura 8. Orientação do crescimento epitaxial de grãos na zona fundida das amostras similares do aço inoxidável austenítico AISI 316L. Amostra soldada com frequência F0. (Reagente HNO₃; aumento de 50 X).

Tabela 4. Propriedades mecânicas dos corpos de prova soldados do aço inoxidável austenítico AISI 316L.

Frequência	Limite de Resistência à Tração (MPa)	Limite de escoamento (MPa)	Alongamento (após a ruptura) (%)
0 Hz	603,02	293,98	43,69
2 Hz	614,21	281,14	55,41
4 Hz	640,72	313,86	47,64
6 Hz	638,22	308,48	51,82
8 Hz	611,62	280,21	51,07

4 DISCUSSÃO

Segundo Rodrigues *et al* [11] apud Bilmes *et al* [12], a presença das microestruturas típicas do modo de solidificação FA pode ser atribuída tanto à pequenas variações localizadas na composição química do metal de base, que por sua vez favorecem a formação de uma microestrutura com morfologia mista, quanto pela velocidade de resfriamento após a soldagem.

Essa morfologia mista encontrada na zona fundida do referido material aparentemente também influenciou nos resultados obtidos após o ensaio de tração, pois devido ao crescimento colunar dos grãos de solidificação partindo da linha de fusão em direção ao centro da poça e as diferenças de velocidade de resfriamento, todos os corpos de prova apresentaram na parte central da zona fundida uma microestrutura com morfologia acicular.

Essa morfologia acicular também foi reportado por Rodrigues e colaboradores [11], os quais estudaram as propriedades de metais de solda austeníticos, verificando que estas microestruturas com morfologia acicular, de uma forma geral, estiveram associadas à menores valores de alongamento e tenacidade. Do mesmo modo, a

* Contribuição técnica ao 69^o Congresso Anual da ABM – Internacional e ao 14^o ENEMET - Encontro Nacional de Estudantes de Engenharia Metalúrgica, de Materiais e de Minas, 21 a 25 de julho de 2014, São Paulo, SP, Brasil.



presença de contornos de grão perpendiculares à direção de aplicação dos esforços também pode ter reduzido a resistência do material, apesar das propriedades encontradas estarem acima do encontrado para o metal de base.

Em geral, este tipo de configuração é indesejado. Além disso, por se tratar do encontro de duas frentes de solidificação, existe uma grande possibilidade de aumento da concentração de impurezas nestes contornos provocado pelo acúmulo devido à microsegregação à frente da interface S/L. Contudo, este fato não foi investigado no presente trabalho.

Portanto, para prevenir que a falha não ocorra na região da solda, devido à formação de contornos perpendiculares à aplicação de possíveis esforços mecânicos, aconselha-se que as soldagens sejam realizadas utilizando tecimento.

5 CONCLUSÕES

Com base nos resultados experimentais obtidos para a soldagem do aço inoxidável austenítico AISI 316L pelo processo TIG autógeno com diferentes frequências de pulsação, foi possível concluir que a microestrutura obtida na zona fundida de todas as amostras foi constituída por ferrita e austenita, apresentando ferrita com morfologias vermicular, acicular e *lathy*. A utilização de corrente pulsada, independente da frequência de pulsação, apesar de conferir propriedades mecânicas superiores ao especificado pela norma ASTM A240, não atuou positivamente durante nas propriedades de resistência à tração, devido a ruptura na zona fundida. A soldagem com corrente contínua pulsada não resultou em perda de ductilidade dos corpos de prova avaliados por meio de ensaios de dobramento. Microestruturas com morfologia acicular e contornos de grão com orientação perpendicular à aplicação dos esforços aparentemente influenciaram de forma negativa os resultados dos ensaios de tração.

Agradecimentos

Aos Laboratórios de Engenharia de Soldagem, de Caracterização de Materiais e de Ensaios Mecânicos (LEM) da Universidade Federal do Ceará. Aos órgãos de fomento: CNPq, CAPES, FINEP, FUNCAP e ANP pelo suporte financeiro.

REFERÊNCIAS

- 1 Lippold JC, Kotecki DJ. *Welding metallurgy of stainless steel*. Hoboken: Wiley Interscience Publications; 2005.
- 2 Silva CC, Miranda HC, Sant'ana HB, Farias JP. Microstructure, hardness and petroleum corrosion evaluation of the AISI 316L/AWS E309MoL-16 austenitic stainless steel dissimilar weld metal. *Materials Characterization*. 2009;60:346-352.
- 3 Silva CC, Sant'ana HB, Farias JP. Evaluation of AISI 316L stainless steel welded plates in heavy petroleum environment. *Materials and Design*. 2009;30:1581-1587.
- 4 Joseph GB, Murugesan G, Prabhakaran R. Combined welding of austenitic and ferritic stainless steel. *Journal of Mechanical and Civil Engineering*. 2013;5(4):44-47.
- 5 Afolabi A, Peleowo N. Effect of heat treatment on corrosion behaviour of austenitic stainless steel in mild acid medium. *International Conference on Chemical, Ecology and Environmental Science, Pattaya, 2011*.
- 6 Aydogdu GH, Aydinol MK. Determination of susceptibility to corrosion intergranular corrosion and electrochemical reactivation behaviour of AISI 316L type stainless steel. *Corrosion Science*. 2006;48(11):3565-3583.

* *Contribuição técnica ao 69º Congresso Anual da ABM – Internacional e ao 14º ENEMET - Encontro Nacional de Estudantes de Engenharia Metalúrgica, de Materiais e de Minas, 21 a 25 de julho de 2014, São Paulo, SP, Brasil.*



- 7 Samanta SK, Mitra SK, Pal TK. Effect of rare earth elements on microstructure and oxidation behaviour in TIG weldments of AISI 316L stainless steel. *Materials Science and Engineering*. 2006;430(1-2):242-247.
- 8 Raveendra A, Kumar BVRR. Experimental study on pulsed and non – pulsed current TIG welding of stainless steel sheet (SS304). *International Journal of Innovate Research in Science, Engineering and Technology*. 2013;2(6):2337-2344.
- 9 Mendes EP. Estudo exploratório da soldagem de juntas dissimilares dos aços inoxidáveis AISI 316L e AISI 444 utilizando o processo TIG autógeno com corrente pulsada [Monografia]. Fortaleza: UFC; 2012.
- 10 David SA. Ferrite morphology and variations in ferrite content in austenitic stainless steel welds. *Welding Journal*. 1981;60:63-71.
- 11 Rodrigues CEAL, Azevedo AGL, Silva CC, Farias JP. Evaluation of the mechanical and metallurgical characteristics of weld metals deposited by class ANSI/AWS class A5.4-06 E309 covered electrodes. *Welding International*. 2009;23(4):237-250.
- 12 Bilmes P, Gonzalez A, Liorente C, Solari M. Influencia de la morfologia de solidificación de la ferrita δ del metal de soldadura de aceros inoxidables austeníticos sobre las propiedades de la unión. *Welding Research Abroad*. 1996;43(2):18-29.

* *Contribuição técnica ao 69º Congresso Anual da ABM – Internacional e ao 14º ENEMET - Encontro Nacional de Estudantes de Engenharia Metalúrgica, de Materiais e de Minas, 21 a 25 de julho de 2014, São Paulo, SP, Brasil.*