

AVALIAÇÃO DO EFEITO DO CICLO TÉRMICO SOBRE AS CARACTERÍSTICAS DE JUNTAS SOLDADAS ATRAVÉS DA VARIAÇÃO DO APORTE TÉRMICO EM JUNTAS SOLDADAS DOS AÇOS AUTENÍSTICOS AISI 316L PELO PROCESSO GMAW

Rudinei Demarque ¹
Ellem Patrícia dos Santos ¹
Leonardo Martins da Silva ¹
Anderson Vergílio de Queiroz ¹
José Adilson de Castro ¹
Rafaela dos Santos Silva ¹

Resumo

Os processos de soldagem são utilizados em quase todo segmento industrial, porém existem algumas aplicações que demandam uma atenção especial ao produto obtido, devido à segurança que o mesmo deve oferecer contra possíveis falhas. No presente estudo foi avaliada a influência da variação do aporte térmico sobre a geometria do cordão de solda, o tamanho de grão austenítico na zona termicamente afetada (ZTA), a microdureza na ZTA, e a fração volumétrica de ferrita δ utilizando o processo GMAW (Gas Metal Arc Welding) realizado com transferência por spray, em chapas de aços AISI 316L. O aumento do aporte ocasionou uma variação de quase 300% no tamanho de grão austenítico, aproximadamente 100% na fração volumétrica de ferrita δ , e cerca de 240% na área do metal de solda (MS). A temperatura das chapas foi registrada através de uma câmera térmica com o objetivo de monitorar as temperaturas máximas em cada região da junta soldada, as microestruturas resultantes do processo foram posteriormente comparadas com os resultados dos ciclos térmicos obtidos por meio de simulação numérica.

Palavras-chave: Soldagem GMAW; Aço inox; Zona termicamente afetada; Metal de solda.

EVALUATION OF THE EFFECT OF THE THERMAL CYCLE ON THE CHARACTERISTICS OF WELDED JOINTS THROUGH THE VARIATION OF THE THERMAL INPUT IN WELDED JOINTS OF THE AUTHENTIC AISI 316L STEELS BY THE GMAW PROCESS

Abstract

Welding processes are generally used in almost every industrial segment, but there are some applications that demand special attention to the product obtained, due to the security it must offer against possible failures. In the present study, the influence of the thermal input variation on the weld bead geometry, the austenitic grain size in the HTA, the microhardness in the HTA, and the δ ferrite volumetric fraction using the Gas Metal Arc Welding (GMAW) Performed with spray transfer, on AISI 316L steel plates. The increase of the contribution caused a variation of almost 300% in the austenitic grain size, approximately 100% in the ferrite δ volumetric fraction, and about 240% in the area of the molten zone. The temperature of the plates was recorded through a thermal camera in order to monitor the maximum temperatures in each region of the welded joint, the microstructures resulting from the process were later compared with the results of the thermal cycles obtained through numerical simulation.

Keywords: GMAW welding; Stainless steel; Heat affected zone; Melt zone.

¹Programa de Pós-graduação em Engenharia Metalúrgica – PPGEM, Universidade Federal Fluminense – UFF, Volta Redonda, RJ, Brasil.
E-mail: rudnei.demarque@hotmail.com



I INTRODUÇÃO

Segundo Ramírez [1] os aços inoxidáveis podem ser definidos como ligas ferrosas que contém o Fe como elemento base, o cromo como elemento de liga principal, adições de níquel e em alguns casos, outros elementos de liga. Mondenesi [2] afirma que designação aço inoxidável corresponde apenas às ligas Fe-Cr ou Fe-Cr-Ni contendo mais de 10 - 12% de cromo.

A composição química apresentada por estes aços, aliada ao processamento termomecânico submetido resulta em diferentes microestruturas à temperatura ambiente, os aços podem ser classificados de acordo com a microestrutura em inoxidáveis ferríticos (alguns da série 400), martensíticos (balanço da série 400), austeníticos (da série 200 e 300, incluindo-se os superausteníticos) e outros, como por exemplo, os aços inoxidáveis duplex e os aços inoxidáveis endurecíveis por precipitação segundo Campbell [3].

Os aços inoxidáveis austeníticos contém entre cerca de 6 e 26% de Ni, 16 e 30% de Cr e menos de 0,30% de carbono, com um teor total de elementos de liga de pelo menos, 26% de acordo com Mondenesi [2]. Têm como características baixo limite de escoamento, elevada ductilidade, coeficiente de expansão térmica e resistência mecânica elevados, baixa difusividade térmica e são entre os inoxidáveis, os que possuem melhor soldabilidade e resistência geral à corrosão. Entretanto, podem sofrer corrosão puntiforme ou sobtensão em ambientes contendo cloretos.

Porém quando submetidos a um ciclo térmico severo estas propriedades podem ser alteradas e até mesmo perdidas, comprometendo a aplicação do aço. Estes motivos fundamentam a constante necessidade da realização de pesquisas e estudos nesta área, e assim estar colaborando continuamente para o aumento de conhecimentos teóricos e experimentais do tema abordado no presente estudo.

Este estudo tem como objetivo geral analisar o comportamento metalúrgico do AISI 316L quanto submetido a diferentes ciclos térmicos, e indicar o melhor aporte para realizar o procedimento de soldagem pelo processo GMAW. Os objetivos específicos são estabelecer comparações entre ciclos térmicos de soldagem, taxas de resfriamento, microestruturas obtidas, perfis de microdureza Vickers, dimensões do MS, quantificação da ferrita delta na ZTA e MS, e tamanho de grão na ZTA.

Considerando o objetivo do presente trabalho, abordam-se os aços inoxidáveis autênticos, por apresentarem tenacidade e ductilidade superiores à da maioria dos outros aços, e que são mantidas até temperaturas muito baixas. Sendo assim, estes aços são considerados na utilização em estruturas soldadas a serem utilizadas na temperatura de condensação do hélio (4K ou -269 °C), como, por exemplo, a estrutura de magnetos em reatores experimentais de fusão nuclear.

2 MATERIAIS E MÉTODOS

2.1 Materiais e Métodos

Os materiais utilizados no processo de soldagem experimental do presente trabalho foram três chapas do aço inoxidável austenítico AISI 316L. Nas Tabelas 1 e 2 são apresentadas, respectivamente, as dimensões das chapas analisadas e a composição química do aço.

É importante lembrar que os materiais, após o processo de fabricação, foram submetidos a tratamento térmico adequado de solubilização com o objetivo de dissolver precipitados formados durante a solidificação. Porém, não se tem informações dos fornecedores a respeito das temperaturas e tempos de solubilização.

2.2 Consumíveis de Soldagem

O arame de adição utilizado foi o ER316L, que é um eletrodo de extra baixo teor de carbono, para não favorecer o fenômeno de sensitização, tipo CrNiMo 19/12/3 para soldagem de aços inoxidáveis austeníticos tipo AISI 316L. Na Tabela 3 é apresentada a composição química do arame.

A soldagem de todas as chapas foi realizada em um único passe e com deposição do material de adição, formando um cordão com extensão média de 160 mm para o AISI 316L ao longo do comprimento das chapas, conforme é mostrado na Figura 1.

2.3 Soldagem

A soldagem dos materiais foi realizada em três faixas de aportes distintos, seguindo a subdivisão apresentada na Tabela 4.

As faixas de aportes térmicos apresentadas na Tabela 4 foram escolhidas visando estudar um limite inferior ao recomendado para a soldagem destes materiais (0,4 a 0,7 kJ/mm),

Tabela 1. Dimensões das chapas dos aços inoxidáveis austeníticos AISI 316L

AISI	Comprimento (mm)	Largura (mm)	Espessura (mm)
316L	215	60	10

Tabela 2. Composição química (% em peso) dos aços inoxidáveis AISI 316L

AISI	C	Mn	Si	P	S
316L	0,0126	1,37	0,443	0,0343	0,0016
	Cr	Ni	Mo	Cu	N
	16,67	9,91	1,96	0,0931	0,0467

Tabela 3. Faixa de composição química do arame de adição ER316L de acordo com a ESAB (2005) (% em peso)

C	Cr	Ni	Mo	Mn	Si	P e S
<0,03	18,0–20,0	11,0–14,0	2,0–3,0	1,0–2,5	0,25–0,6	≤0,03

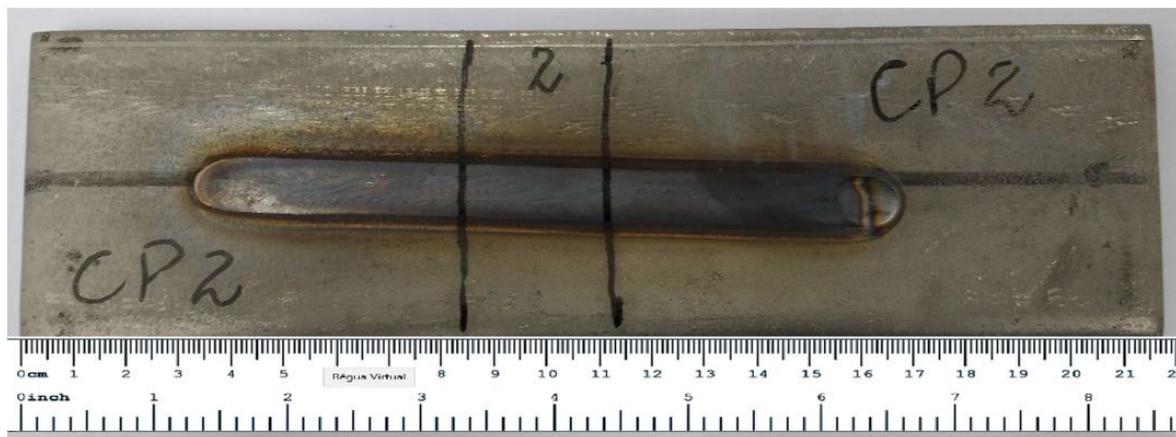


Figura 1. Exemplo da deposição de cordão de solda sobre a chapa.

um limite superior ao recomendado (1,3 a 1,7 kJ/mm) e um valor muito acima da faixa recomendada (2,4 a 2,7 kJ/mm). Além disso, os parâmetros utilizados na soldagem das três chapas do AISI 316L foram iguais, exceto a velocidade de soldagem que foi variada para alterar o aporte térmico. Três amostras foram soldadas com processo GMAW com transferência metálica spray pulsado, sendo do aço AISI316L uma com aporte baixo, uma com aporte intermediário e uma com aporte alto.

Além dos parâmetros iniciais relacionados à máquina, citados no parágrafo acima, existem outros parâmetros estabelecidos inicialmente:

Consideram-se fixos os seguintes parâmetros na realização de todas as soldas: Stick-out igual à 17mm, a vazão do gás igual à 17 l/min, gás de proteção composto de 98% de argônio e 2% de oxigênio e arame de adição ER316L com diâmetro de 1,2mm. Na Tabela 5 é apresentada uma síntese dos demais parâmetros de soldagem utilizados na soldagem das 3 chapas, referente ao AISI 316L. A nomenclatura utilizada está de acordo com a faixa do aporte térmico praticado, o tipo de material. Desta forma, os primeiros 2 números indicam a faixa do aporte térmico praticado, e os 2 segundos números definem o tipo de material. Sendo assim, para a chapa nomeada 2516 tem-se a faixa do aporte térmico entre 2,4 a 2,7 kJ/mm.

Após soldagem, corte e preparação metalográfica, as regiões da seção transversal da junta soldada (ZTA e MS) foram dimensionadas com o auxílio de um perfilômetro, e a área da MS com o software Geogebra.

2.4 Caracterização Microestrutural

Após corte e embutimento da amostra como recebida, para fins comparativos a mesma foi lixada e lixadeira manual utilizando lixas de carbetto de silício das seguintes granulometrias: 100, 220, 320, 400, 600, 800, 1200, 2500 e 4000 mesh. Posteriormente, foi realizado o polimento mecânico das amostras em politrizes manuais utilizando como abrasivo pasta de diamante de granulometria de 1 μ m e, então, a amostra foi atacada por imersão com o reagente beraha, com composição conforme Tabela 6.

Tabela 4. Subdivisão das chapas a serem soldadas no processo GMAW com transferência metálica pulsada para diferentes faixas de aporte térmico

Material	Processo de soldagem GMAW	Faixa de aportes térmicos (kJ/mm)
AISI 316L	Transferência metálica	0,4 a 0,7
	spray	1,3 a 1,7
	3 Chapas	2,4 a 2,7

Tabela 5. Parâmetros de soldagem

Amostra	Chapa	Corrente (A)	Tensão (V)	Velocidade (mm/s)	Aporte Térmico (KJ/mm)
1	0516	239	26,6	6,69	0,5
2	1516	239	26,6	2,30	1,5
3	2516	239	26,6	1,52	2,5

Tabela 6. Solução utilizada para ataque dos materiais como recebido, Beraha

AISI 316L- Reagente	
Água destilada	80ml
Ácido Clorídrico (HCl) 37%	25ml
Metabissufito de Potássio	0,5g

Após o processo de soldagem, foi retirada uma amostra de cada chapa para realização de caracterização microestrutural (análise de fases, medição de tamanho de grão austenítico, quantificação de ferrita δ na ZTA E MS), dimensionamento do metal de solda e zona termicamente afetada e medição da Microdureza Vickers nas diferentes zonas (MB, ZTA, E MS).

2.5 Metodologia Numérica

A modelagem computacional aplicada nesta avaliação objetiva simular os efeitos da variação do aporte térmico de soldagem sobre o ciclo térmico de temperatura no material

soldado (AISI 316L). No processo de modelagem computacional são considerados os fenômenos de transferência de calor (radiação, convecção e condução) acoplados aos fenômenos de transferência de massa (aquecimento, fusão, resfriamento e solidificação). A fim de simplificar e tornar viável a elaboração do modelo para simulação computacional, algumas considerações foram feitas de acordo com Xavier [4,5]:

- ✓ A velocidade de soldagem é constante;
- ✓ A perda de calor na superfície da chapa ocorre por convecção e radiação;
- ✓ Deposição de somente um cordão de solda;
- ✓ Eletrodo de soldagem percorrendo a chapa;
- ✓ A distância entre eletrodo e chapa é constante.

Este modelo se baseia na resolução da equação diferencial da conservação de energia (Equação 1), sendo a temperatura (T) a variável dependente, conforme Equação 1:

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho c_p T) + \text{div}[\rho c_p (\vec{u})T] = \text{div}[k[(\text{grad}(T))]] + S \quad \text{Equação 1}$$

Onde:

ρ : Densidade do aço

c_p : Calor específico

k : Condutividade térmica

\vec{u} : tor velocidade

T: Campo de temperatura

S: Termo fonte, que corresponde a todas as fontes de entrada ou perda de calor no processo (energia/calor adicionado na soldagem, transformação de fase, fusão e solidificação) que neste trabalho será dado pelo modelo duplo-elipsóide proposto por Goldak [6].

O modelo de Goldak [6] (Equação 1) é também conhecido como duplo-elipsóide, pois a distribuição de calor é modelada (em volume) como duas elipses, uma à frente da fonte de calor e outra atrás, conforme mostrado na Figura 2. Para modelar o processo de soldagem e fazer a previsão de temperatura na chapa foram considerados os mesmos parâmetros do processo experimental, e foram feitas algumas considerações adicionais a fim de tornar viável a simulação computacional. O modelo numérico de

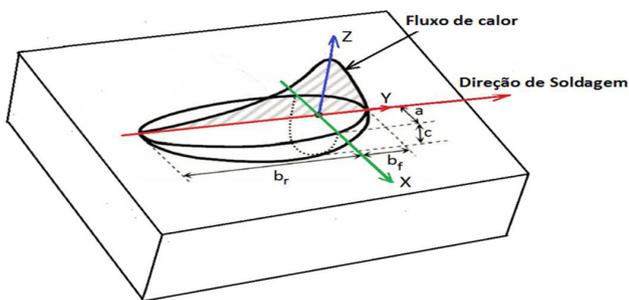


Figura 2. Modelo da fonte de calor duplo elipsóide de Goldak e Akhlaghi [7].

previsão de temperatura consiste na resolução da equação de conservação de energia (Equação 1) aplicada sobre o volume da chapa como domínio de estudo.

Neste trabalho, o calor do arco de soldagem em movimento é aplicado como uma fonte de calor volumétrica com uma distribuição em duplo elipsóide proposto por Goldak [6].

3 RESULTADOS E DISCUSSÃO

3.1 Microestrutura do Material no Estado como Recebido

Na Figura 3 é apresentado a micrografia do metal base (MB) deste estudo, o aço AISI 316L. A microestrutura deste aço é constituída por grãos recristalizados de austenita, com a presença de maclas de recozimento que são características deste material. Porém, observou-se heterogeneidade da matriz, evidenciada pelos diferentes tamanhos de grãos. Além disso, pode-se perceber a presença de pequenas bandas de ferrita δ de acordo com Tiedra e Martín [8].

O valor médio da microdureza Vickers do aço AISI 316L no estado como recebido com um intervalo de confiança de 95% é $170 \pm 3,0$ HV.

3.2 Dimensões do MS e da ZTA

Com a finalidade de avaliar a influência do aumento do aporte térmico utilizado na geometria e dimensões dos cordões de solda, na Figura 4 é apresentado como foi realizado o dimensionamento da MS, e Como citado no tópico 2.3, na Tabela 7 é apresentado a largura e altura da MS assim como as dimensões da ZTA, medidas através de um perfilômetro.

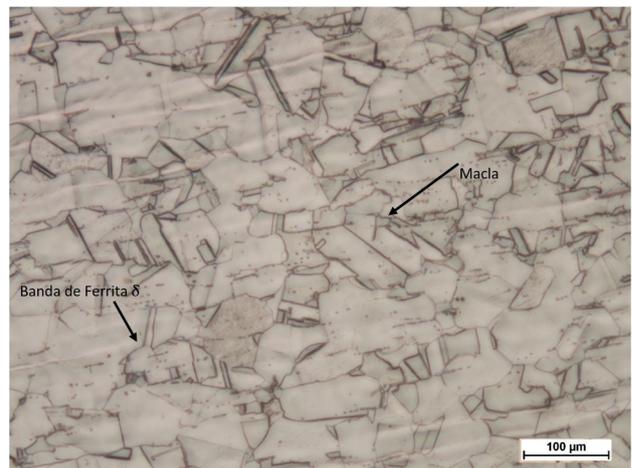
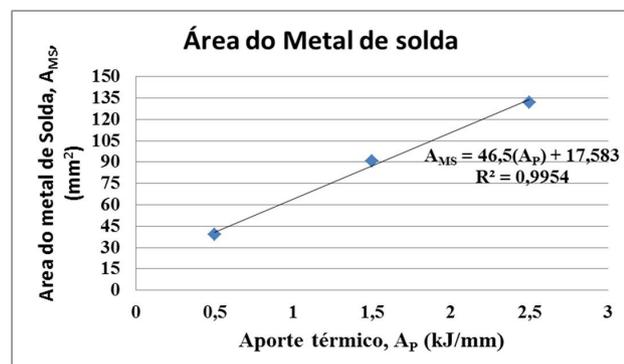


Figura 3. Microestrutura do aço inoxidável austenítico AISI 316L. Matriz constituída por grãos poligonais de austenita, presença de maclas e bandas de ferrita δ . Ataque Beraha, aumento 200x.

Tabela 7. Dimensões dos cordões de solda e ZTA para os diferentes aportes

Aporte kJ/mm	Amostra	Largura MS (mm)	Altura MS (mm)	Dimensões ZTA (mm)	Área MS mm ²
0,4 a 0,7	0516 P	13,46	6,38	0,05	39
1,3 a 1,7	1516 P	19,53	8,9	0,18	91
2,4 a 2,7	2216 P	23,86	9,85	0,29	132

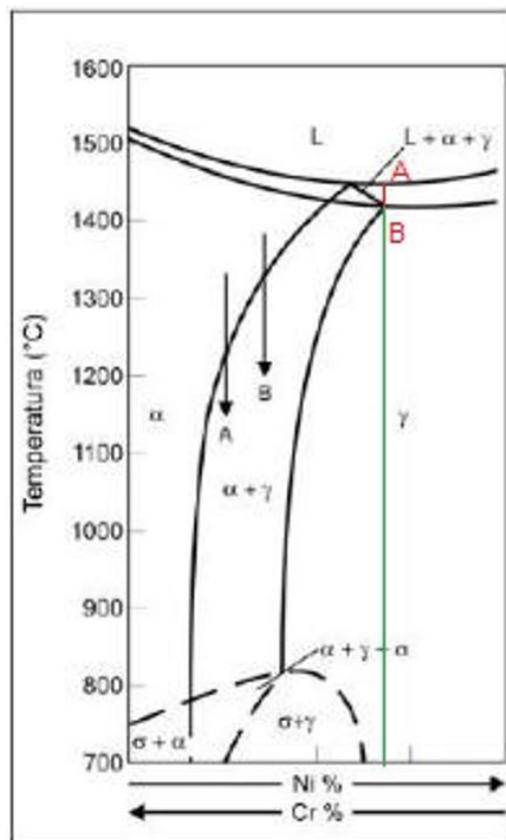
**Figura 4.** Metodologia utilizada para dimensionar o MS na Macrografia do cordão de solda do AISI 316L.**Figura 5.** Gráfico área do metal de solda versus aporte térmico para os três aportes utilizados.

Na Figura 5 é apresentado um gráfico com o comportamento da área do metal de solda em função do aporte térmico.

Como pode ser notado na Tabela 7 e no gráfico da Figura 5, quando o aporte térmico sofre um acréscimo a área do metal de solda tende a aumentar. Isso se dá devido ao aumento do calor fornecido à junta soldada, com isso a quantidade de material fundido na junta é maior resultando em um aumento da área do metal de solda.

3.3 Microestrutura da ZTA das Juntas Soldadas

Na Figura 6 é apresentado o diagrama binário de transformação de fases do aço 316L, observa-se o segmento de reta AB destacado. Nesta região o aço se solidifica como ferrita δ (Figura 6), após a solidificação total existe uma ferrita δ residual na matriz austenítica.

**Figura 6.** Diagrama pseudo-binário do sistema Fe[Cr-Ni]eq apresentando a linha, em verde, referente ao valor de [Cr/Ni]eq para o AISI 316L. Adaptado de Lippold et al. [9].

Segundo Ronqueti [10], as zonas termicamente afetadas (ZTA) dos aços inoxidáveis austeníticos AISI 316L são formadas por certa quantidade de ferrita δ e por grãos austeníticos crescidos. Além disso, a zona de transição (ZT), entre o metal de solda (MS) e ZTA, é diferenciada, principalmente, pela morfologia da ferrita δ que se apresentou de forma laminar e vermicular assim como constatou Yan et al. [11].

As curvas representam o ciclo térmico simulado na região indicada pelo número em cada curva. Na Figura 7, são apresentados respectivamente a microestrutura das interfaces MB/ZTA/MS, o ciclo térmico calculado pelo modelo numérico, e a imagem térmica obtida logo após o processo de soldagem, para a junta solda com aporte térmico de 0,5 kJ/mm.

Na Figura 8 são apresentados respectivamente a microestrutura das interfaces MB/ZTA/MS, o ciclo térmico

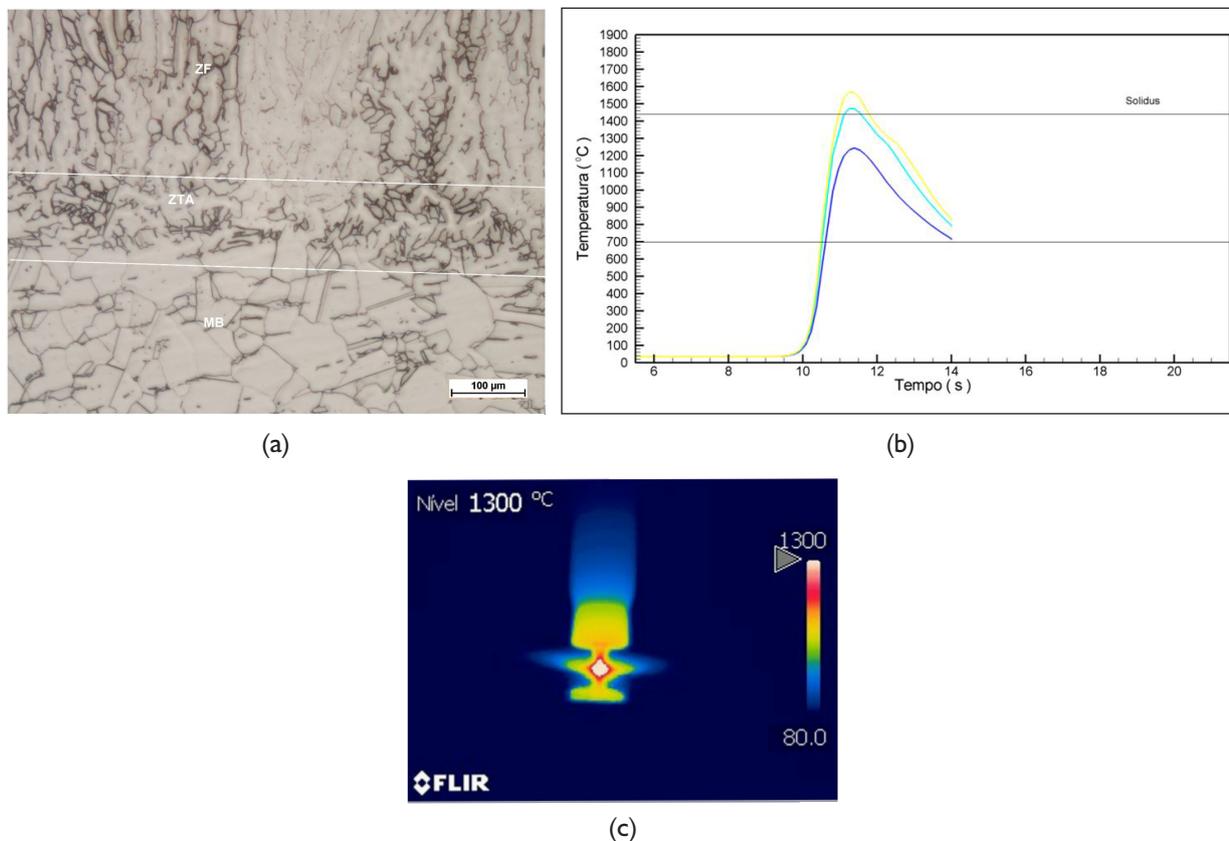


Figura 7. (a) ZTA, aporte térmico de 0,5 kJ/mm. Ataque Beraha, aumento 200X, (b) Ciclos térmicos calculados pelo modelo numérico para o aporte de 0,5 kJ/mm, (c) Fotografia câmera térmica a 1m da junta soldada ao fim do processo com o aporte de 0,5 kJ/mm.

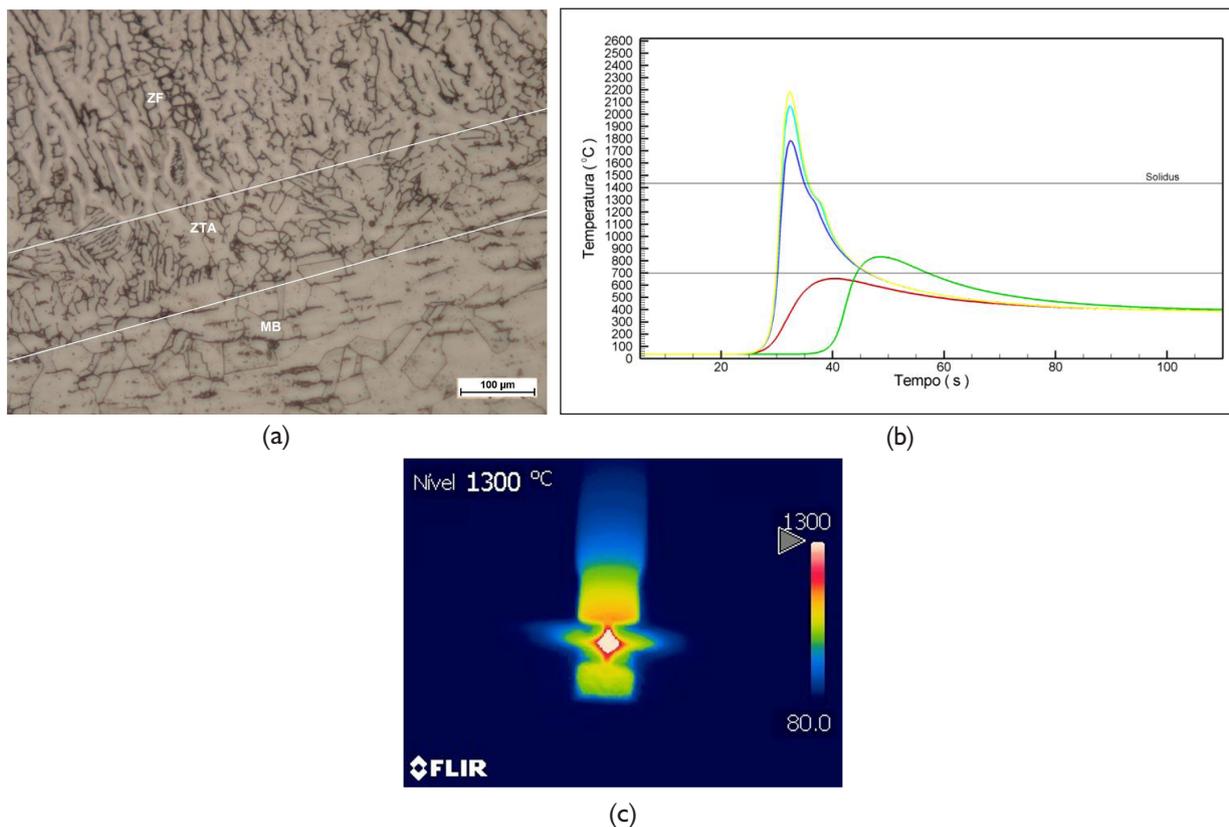


Figura 8. (a) ZTA, aporte térmico de 1,5 kJ/mm. Ataque Beraha, aumento 200X, (b) Ciclos térmicos calculados pelo modelo numérico para o aporte de 1,5 kJ/mm, (c) Fotografia câmera térmica a 1m da junta soldada ao fim do processo com o aporte de 1,5 kJ/mm.

calculado pelo modelo numérico, e a imagem térmica obtida logo após o processo de soldagem, para a junta solda com aporte térmico de 1,5KJ/mm.

Na Figura 9 são apresentados respectivamente a microestrutura das interfaces MB/ZTA/MS, o ciclo térmico calculado pelo modelo numérico, e a imagem térmica obtida logo após o processo de soldagem, para a junta solda com aporte térmico de 2,5KJ/mm.

Pode ser observado nas Figuras 7(c), 8(c) e 9(c) que são apresentadas fotografias térmicas a 1 metro da junta soldada que o aumento do aporte térmico ocasionou um aumento na intensidade do campo de temperatura exibido pelas figuras. Fato este que já era esperado pois o aumento do aporte térmico significa aumento da energia adicionada na junta soldada pelo processo de soldagem.

3.4 Tamanho de Grão Austenítico na ZTA

A Tabela 8 exibe os valores do tamanho de grão austenítico que a ZTA das amostras das juntas soldadas do AISI 316L. Ao comparar o tamanho de grão austenítico apresentado pelo MB ($22,0 \pm 4,1 \mu\text{m}$) e o tamanho de grão austenítico apresentado na ZTA, percebe-se que todas as amostras evidenciaram o crescimento de grão austenítico

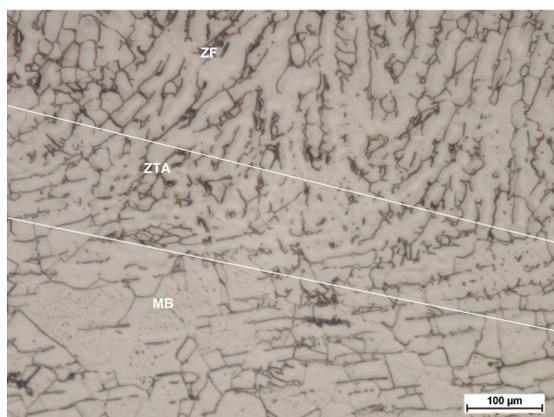
na ZTA, conforme também afirmou Silva [12]. As medidas do tamanho de grão austenítico na ZTA das juntas soldadas foram realizadas seguindo a metodologia baseada na norma ASTM E112, “traçando” linhas horizontais paralelas à linha tangente à parte inferior da zona de fusão. Em seguida, contados os interceptos dos contornos de grão, e calculando o tamanho de grão médio foi obtido.

Na Figura 10 é apresentado um gráfico com o comportamento do tamanho de grão na ZTA em função do aporte térmico.

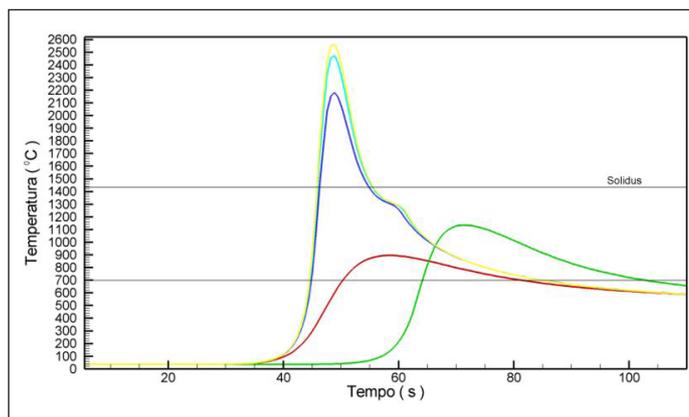
Conforme era esperado devido ao ciclo térmico sofrido pela região os grãos austeníticos sofreram um aumento quando comparado com os do material como recebido. Devido a maior quantidade de energia fornecida sobre forma de calor, o aumento da temperatura favorece o processo de crescimento de grãos na região da ZTA.

Tabela 8. Tamanho de grão austenítico na ZTA do AISI 316L

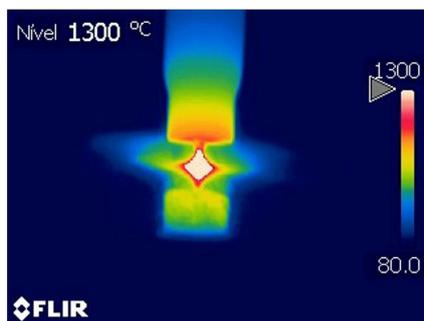
Amostras	Tamanho de grão (μm)
0516	32
1516	48
2516	63



(a)



(b)



(c)

Figura 9. (a) ZTA, aporte térmico de 2,5 kJ/mm. Ataque Beraha, aumento 200X, (b) Ciclos térmicos calculados pelo modelo numérico para o aporte de 2,5 kJ/mm, (c) Fotografia câmera térmica a 1m da junta soldada ao fim do processo com o aporte de 2,5 kJ/mm.

3.5 Quantificação da Ferrita Delta na ZTA

Na Tabela 9 é apresentada uma análise quantitativa da presença de ferrita delta na região da ZTA, para que posteriormente possa se identificar a ligação entre o aumento do aporte térmico e a presença desta fase na região da ZTA.

Na Figura 11 é apresentado um gráfico com o comportamento da quantificação da ferrita delta na ZTA em função do aporte térmico.

Conforme já era esperado ocorreu um aumento na quantidade de ferrita δ devido ao aumento do aporte térmico, a velocidade de resfriamento diminuiu, fazendo com que o material passe mais lentamente pela região monofásica de ferrita δ , logo a fração volumétrica sofreu um aumento quando comparado com a do material como recebido.

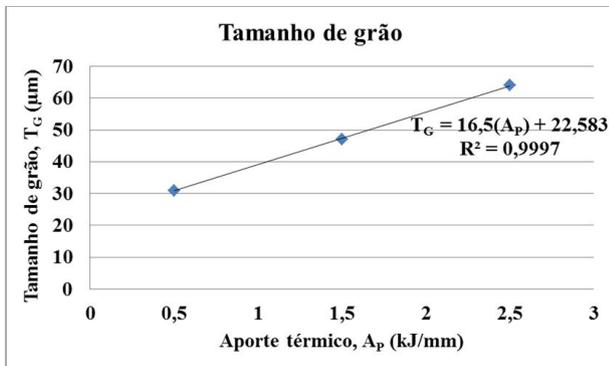


Figura 10. Gráfico tamanho de grão versus aporte térmico na região da ZTA.

Tabela 9. Quantificação de ferrita δ na ZTA das juntas soldadas do AISI 316L com diferentes faixas de aporte térmico e transferência metálica por spray pulsado (P)

Amostras	Fração volumétrica de ferrita δ
0516	10,8
1516	11,5
2516	12,2

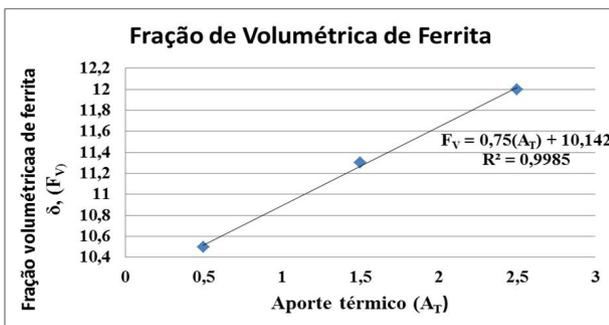


Figura 11. Gráfico fração de ferrita δ versus aporte térmico na ZTA.

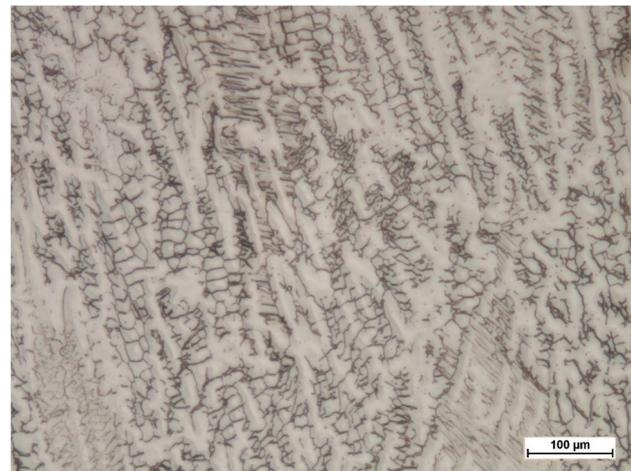
3.6 Microestrutura do MS das Juntas Soldada

Na Figura 12 é apresentada a microestrutura do metal de solda da junta soldada com aporte térmico de 0,5KJ/mm e o ciclo térmico calculado que a mesma foi submetida respectivamente. A reta tangente a curva de resfriamento indica a taxa de resfriamento calculada da microestrutura após o processo de soldagem.

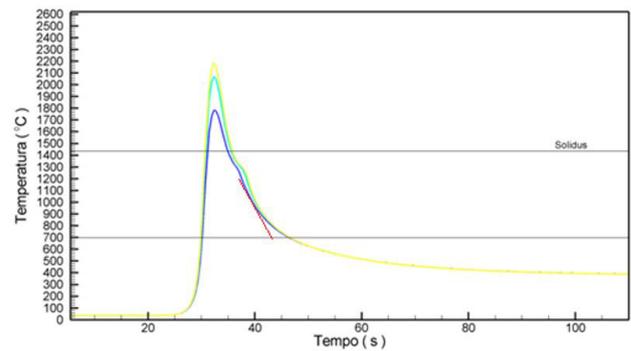
Na Figura 13 é apresentada a microestrutura do metal de solda da junta soldada com aporte térmico de 2,5KJ/mm e o ciclo térmico calculado que a mesma foi submetida respectivamente. A reta tangente à curva de resfriamento indica a taxa de resfriamento calculada da microestrutura após o processo de soldagem.

Pode-se observar que a reta da taxa de resfriamento indicada na Figura 11(b), apresenta inclinação mais acentuada que a reta indicada na Figura 12(b). Isso ocorre devido ao aporte térmico mais elevado na Figura 13, que fornece mais energia para junta soldada resultando em uma temperatura final mais elevada, assim sua taxa de resfriamento é menor.

À luz da caracterização microestrutural a taxa de resfriamento maior resulta em dendritas mais finas com

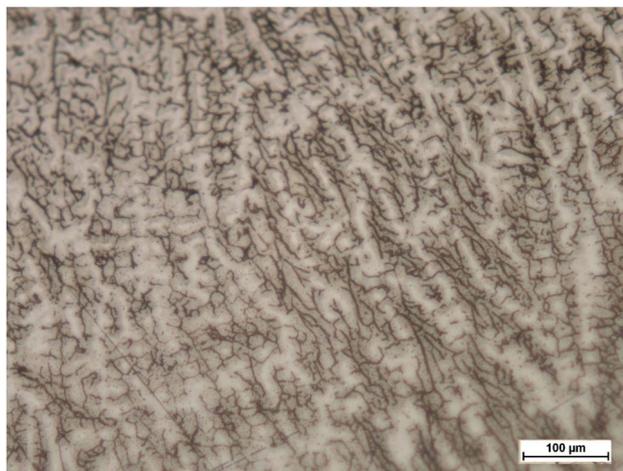


(a)

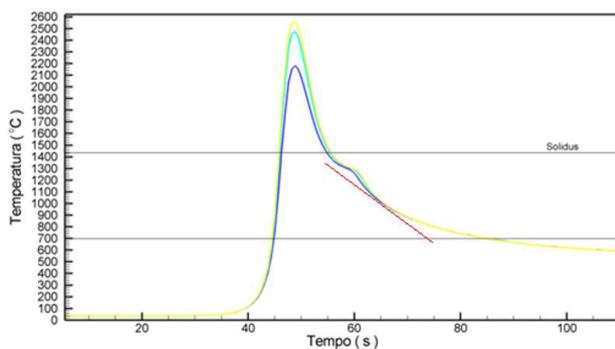


(b)

Figura 12. (a) MS do AISI 316L, aporte térmico de 0,5 kJ/mm. Ataque Beraha, aumento 200X. (b) Ciclos térmicos calculados pelo modelo numérico para o AISI 316L aporte de 0,5 kJ/mm.



(a)



(b)

Figura 13. (a)MS do AISI 316L, aporte térmico de 2,5 kJ/mm. Ataque Beraha, aumento 200X, (b) Ciclos térmicos calculados pelo modelo numérico para o AISI 316L aporte de 2,5 kJ/mm.

espaçamentos dendríticos menores (Figura 12a), já a taxa de resfriamento menor fornece dendritas mais grosseiras com espaçamentos maiores (Figura 13a).

3.7 Microdureza Vickers

A Tabela 10 exibe os valores médios de Microdureza Vickers da MS, ZTA e MB de todas as chapas do AISI 316L.

Considerando-se que o valor de microdureza Vickers média do aço AISI 316L no estado como recebido é de $170 \pm 3,0$ HV, percebe-se que os valores de microdureza Vickers para as diferentes zonas (MS e ZTA) e metal base (MB) não apresentaram variações significativas após o processo de soldagem, porém o menor aporte que ocasionou a maior variação entre eles chegando até a 16HV a mais, na região da MS. Podendo ser explicado pela maior taxa de resfriamento, que não favorece o crescimento dendrítico, assim como a difusão dos elementos de liga em solução

REFERÊNCIAS

- 1 Ramírez AH. Influência dos íons de brometo e cloreto sobre a resistência à corrosão por pite de diferentes aços inoxidáveis austeníticos e ferríticos [dissertação]. São Paulo: Escola Politécnica da Universidade de São Paulo; 2011.

Tabela 10. Valores médios de Microdureza Vickers (HV) das juntas soldadas do aço AISI 316L

Amostras	Região	Microdureza Vickers (HV)
0516	MS	191 ± 10
	ZTA	186 ± 3
	MB	175 ± 3
1516	MS	178 ± 4
	ZTA	185 ± 4
	MB	174 ± 4
2516	MS	174 ± 3
	ZTA	173 ± 3
	MB	169 ± 3

sólida na matriz austenítica. Os aportes superiores favorecem esses fenômenos, reduzindo a dureza na ZTA e na matriz austenítica da MS. Ainda sobre essa baixa variação para os três aportes, este resultado também pode ser explicado em função das medições terem sido realizadas na matriz austenítica, onde a espessura das dendritas de ferrita δ se apresentam muito finas, dificultando assim a medição da microdureza Vickers somente nesta fase. Resultado semelhante foi obtido para o aço inoxidável austenítico 347 soldado, assim como Pessanha [13] constatou.

4 CONCLUSÕES

O aumento do aporte térmico ocasionou um aumento nas dimensões do metal de solda, na fração volumétrica de ferrita δ e no tamanho de grão austenítico na ZTA. A morfologia de ferrita δ evidenciada na ZTA é vermicular, não foi observada na junta soldada a presença de precipitados ou fases intermetálicas indesejadas, os valores de microdureza Vickers medidos nas diferentes zonas não exibiram variações significativas.

O aporte de 2,5 kJ/mm apresentou elevada fração volumétrica de ferrita δ fato também observado por Silva [12], devido a menor taxa e resfriamento [9] que juntamente com o crescimento excessivo do tamanho de grão austenítico na ZTA pode caracterizar uma fragilização da região. Os aportes de 0,5 e 1,5 kJ/mm fornecem os melhores resultados, com menores teores de ferrita δ na ZTA, assim como dimensões da mesma e do MS mais favoráveis para a obtenção de uma junta soldada mais eficiente, com melhores propriedades mecânicas e metalúrgicas.

Agradecimentos

Os autores agradecem à Universidade Federal Fluminense, CAPES, CNPq e Faperj pelo financiamento dos materiais e equipamentos de análises.

- 2 Modenesi PJ. Soldabilidade dos aços inoxidáveis. São Paulo: Senai; 2001.
- 3 Campbell RD. Avoiding defects of stainless steels welds. *Welding Journal*. 2007;86(5):53-63.
- 4 Xavier CR. Simulação numérica da soldabilidade dos aços ferríticos T/P23 e T/P24 [dissertação]. Porto Alegre: Universidade Federal do Rio Grande do Sul; 2009.
- 5 Kumar S, Shahi AS. Effect of heat input on the microstructure and mechanical properties of gas tungsten arc welded AISI 304 stainless steel joints. *Materials & Design*. 2011:3617-3623.
- 6 Goldak J, Chakravarti A, Bibby M. A new finite element model for welding heat sources. *Metallurgical Transactions B*. 1984;15:299-305.
- 7 Goldak JA, Akhlaghi M. *Computational welding mechanics*. New York: Springer; 2005.
- 8 Tiedra P, Martín O. Effect of welding on the stress corrosion cracking behaviour of prior cold worked AISI 316L stainless steel studied by using the slow strain rate test. *Materials & Design*. 2013:103-109.
- 9 Lippold JC, Varol I, Baeslack WA. Microstructural evolution in duplex stainless steel weldments. In: *Proceedings of The Conference Duplex Stainless Steels' 91*; 1991 Outubro 28-30; Beaune, Bourgogne. França: Les Éditions de Physique; 1991. p. 383-391.
- 10 Ronqueti LA. Efeito do modo de transferência metálica sobre o comportamento térmico e as transformações metalúrgica na soldagem GMAW dos aços austeníticos AISI 304 e 316 utilizados em projetos de instalações nucleares [dissertação]. Volta Redonda: Escola Engenharia Industrial Metalúrgica de Volta Redonda, Universidade Federal Fluminense; 2014.
- 11 Yan J, Gao M, Zeng X. Study on microstructure and mechanical proprieties of 304 stainless steel joints by TIG, laser and laser-TIG hybrid welding. *Optics and Lasers in Engineering*. 2010:512-517.
- 12 Silva CC, Farias JP, de Sant'ana HB. Evaluation of AISI 316L stainless steel welded plates in heavy petroleum environment. *Materials & Design*. 2009:1581-1587.
- 13 Pessanha, CE. Quantificação da ferrita delta e avaliação da relação microestrutura/ propriedades de um aço inoxidável austenítico 347 soldado [dissertação]. Campos dos Goytacazes: Universidade Estadual do Norte Fluminense; 2011.

Recebido em: 6 Abr. 2017

Aceito em: 25 Set. 2017