

INFLUÊNCIA DO APORTE TÉRMICO E DO TEMPO DE ENVELHECIMENTO SOBRE A MICROESTRUTURA DE JUNTAS SOLDADAS DO AÇO INOXIDÁVEL AUSTENÍTICO AISI 317L

Pedro Duarte Antunes, antunes.pd@gmail.com¹

Edmilson Otoni Corrêa, ecotoni@unifei.edu.br²

Cleiton Carvalho Silva, cleitonufc@yahoo.com.br³

¹Departamento de Formação Geral, Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais – CEFET/MG, Varginha, Minas Gerais, Brasil

²Departamento de Engenharia Mecânica, Universidade Federal de Itajubá- UNIFEI, Itajubá, MG, Brasil

³Laboratório de Pesquisa e Tecnologia de Soldagem (LPTS), Universidade Federal do Ceará- UFC, Fortaleza, CE, Brasil

Resumo: Uma das grandes dificuldades enfrentadas na aplicação de aços inoxidáveis em elementos da indústria de petróleo e gás é desenvolver processos de soldagem que ofereçam uma produtividade significativa, estabilidade na microestrutura da região da solda e consequentemente boas propriedades mecânicas e de resistência à corrosão. Neste sentido, é de suma importância conhecer os aspectos metalúrgicos do processo de soldagem tal como a relação entre a microestrutura, as propriedades químicas/mecânicas e a resistência à corrosão para que se possa realizar a escolha correta dos parâmetros e materiais a serem usados no processo. Neste trabalho foi investigado a influência dos parâmetros de soldagem e do tempo de tratamento térmico de envelhecimento sobre as características microestruturais de juntas soldadas do aço inoxidável austenítico AISI 317L usado na indústria de petróleo. Como metal de adição foi usado o eletrodo AWS ER317L e dois diferentes níveis de energia (4 e 8 kJ/cm) foram testados para verificar a influência deste parâmetro na precipitação de fases deletérias indesejáveis. As amostras foram tratadas termicamente à 700°C por dois tempos: 50 e 100 horas. Para a análise microestrutural utilizou-se um Microscópio Ótico e um Microscópio Eletrônico de Varredura. Foram realizadas a quantificação e mapeamento microquímico das fases precipitadas após a soldagem e o tratamento térmico de envelhecimento (TTE). Observou-se que o envelhecimento promoveu um refinamento da região do metal base e toda ferrita delta foi transformada em fase sigma. A ferrita delta presente na zona fundida se transformou completamente em fase sigma e fase chi. Nas amostras tratadas termicamente por 100 horas identificou-se uma menor ocorrência da fase autenita secundária (α') o que indica que com o aumento do tempo de TTE ocorreu uma dissolução da mesma na fase sigma já precipitada.

Palavras-chave: Aço Inoxidável AISI 317L, Soldagem Similar, Caracterização Microestrutural.

1. INTRODUÇÃO

O aço inoxidável austenítico AISI 317L tem como principal característica a adição superior de molibdênio em sua composição química, o que garante o aumento da resistência ao ataque químico quando comparado aos aços austeníticos cromo-níquel-molibdênio do tipo AISI 316L. Este aço possui aproximadamente 1% a mais de cromo, níquel e molibdênio, quando comparado ao aço austenítico AISI 316L (Carbó, 2011).

O aço inoxidável AISI 317L oferece ainda melhores características de fluência e resistência mecânica a elevadas temperaturas quando comparados aos aços inoxidáveis convencionais, além de garantir uma significativa resistência à sensibilidade durante soldagem ou quando aplicados a processos térmicos devido ao baixo carbono em sua composição química. A combinação de molibdênio e nitrogênio da composição química deste aço é particularmente efetiva em aumentar a resistência à corrosão por pites e por frestas, especialmente em meios ácidos contendo cloretos e compostos de enxofre a elevadas temperaturas. Além disso, o nitrogênio também contribui para o aumento da resistência mecânica da liga.

De acordo com Abdala (2005), o aço inoxidável AISI 317L é um dos aços apontados como os de melhor desempenho em aplicações nas unidades de refino de petróleo por apresentar uma excelente resistência à corrosão, além de boas propriedades mecânicas. Diversos equipamentos e linhas de transmissão de fluido, as quais são compostas por vasos de pressão, tubos, flanges, e outras conexões fabricadas com o aço inoxidável AISI 317L, são encontradas em unidades de processamento de petróleo. Para a montagem destes sistemas é necessário a soldagem dos referidos componentes. Devido aos altos teores de ácidos naftênicos existentes no petróleo brasileiro e a ação corrosiva destes

nos equipamentos, tornou-se necessário a aplicação, por meio de soldagem, de um revestimento anticorrosivo com chapas de aço inoxidável AISI 317L nas torres de processamento de óleo pesado, de modo a torná-las resistentes à ação destes ácidos.

Uma das grandes dificuldades enfrentadas nesta aplicação é desenvolver um processo de soldagem que ofereça a produtividade esperada e garanta na região soldada uma microestrutura estável onde prevaleçam as mesmas propriedades químicas e mecânicas do material básico. É importante considerar que apesar de sua ampla utilização, os processos de soldagem afetam mecânica, térmica e metalurgicamente, resultando em duas importantes zonas: zona fundida (ZF) e zona termicamente afetada (ZTA). Conhecer os aspectos metalúrgicos decorrentes da aplicação do processo de soldagem, tais como transformações de fases, precipitação, microsegregação, dentre outros, e a sua relação com as propriedades químicas e mecânicas, é de grande interesse para que se possa realizar a escolha correta dos parâmetros e materiais a serem usados no processo.

Um estudo nesta área de atuação é de indiscutível importância para o setor de petróleo e gás, mais especificamente para instalações “offshore”, dada a grande agressividade do meio marinho e a exposição de equipamentos a petróleos com alta acidez. Neste contexto, o presente trabalho tem como objetivo estudar o efeito da energia de soldagem e do tempo de Tratamento Térmico de Envelhecimento (TTE) nas sobre as características microestruturais de juntas soldadas do aço inoxidável austenítico AISI 317L.

2. PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL

Para avaliar o efeito do aporte térmico e do tratamento térmico de envelhecimento sobre a microestrutura das juntas foi realizada a soldagem das chapas finas do aço AISI 317L com espessura de 3,0 mm, por meio do processo MIG/MAG com corrente pulsada, no qual utilizou-se como metal de adição o arame-eletrodo AWS ER317L em dois níveis de energias: 4 e 8 kJ/cm.

Na Tabela 1 apresenta-se a composição química nominal (% em peso) das chapas do aço inoxidável AISI 317L e do eletrodo AWS ER317L usado da soldagem.

Tabela 1: Composição química do aço inoxidável austenítico AISI 317L e do eletrodo AWS ER317L.

Materiais	Composição (% em peso)					
	C	Si	Mn	Cr	Ni	Mo
AISI 317L	0,011	0,4	1,6	19	13,1	3,1
AWS ER317L	0,011	0,42	1,63	20,31	12,43	3,71

Todo procedimento de soldagem foi realizado no Laboratório de Pesquisa e Tecnologia em Soldagem - LPTS da Universidade Federal do Ceará - UFC. Os valores dos principais parâmetros de soldagem são apresentados na Tabela 2.

Com o objetivo de se verificar a influência do tempo de envelhecimento sobre a microestrutura das juntas soldadas, foram realizados tratamentos térmicos de envelhecimento em forno mufla à temperatura de 700 °C por 50 e 100 horas.

Tabela 2: Parâmetros de soldagem adotados.

Parâmetros de Soldagem		
Aporte Térmico (kJ/cm)	4	8
Corrente de Pico (A)	250	240
Corrente de Base (A)	65	100
Tempo de pico (s)	3	4,5
Tempo de Base (s)	10	8
Corrente de Média (A)	121,4	153,9
Corrente de Eficaz (A)	138,8	164,6
Voltagem (V)	19,2	26
Veloc. Sold. (cm/min)	45	35
Veloc. Alim. (m/min)	4,5	4,5
Gás Proteção (vazão)	Ar (99,99%) 25L/min	Ar (99,99%) 25 L/min

Para avaliar os aspectos microestruturais da região da solda e zonas adjacentes foram realizadas análises metalográfica usando um microscópio ótico e um Microscópio Eletrônico de Varredura (MEV).

3. RESULTADOS E DISCUSSÃO

3.1. Caracterização Microestrutural do Metal Base - AISI 317L

A Figura 1 apresenta a microestrutura do metal base (AISI 317L) como recebido, obtidas por microscopia ótica (Figura 1a) e por MEV (Figura 1b), nas quais se pode observar uma fase predominante, com grãos poligonais de austenita e possivelmente algumas bandas de ferrita dispostas paralelamente à direção da laminação. Não foi possível identificar nenhum tipo de precipitado intermetálico. Segundo a ASTM (1993) estes tipos de microestruturas são típicas de um material livre de carbonetos, ou seja, os materiais não estão sensibilizados, sendo caracterizadas como estruturas “STEP”.

Com o exame da microestrutura também é observada a ausência de deformações nos grãos devido ao processo de laminação sofrido pelo material como recebido, podendo o ataque com água régia ter sido suficiente para destacar as longas placas de ferrita delta, as quais são comumente observadas em aços contendo elevados teores de Cr e Mo como o AISI 317L.

Conforme verificado nos trabalhos de Avelino et. al. (2011) sobre a suscetibilidade à corrosão intergranular dos aços AISI 317 e AISI 317L, após análises por energia dispersiva de raios-X (EDX) da matriz do aço AISI 317L em comparação com as mesmas bandas de ferrita apresentadas, observou-se a presença dos mesmos picos dos principais elementos de liga em ambas as regiões.

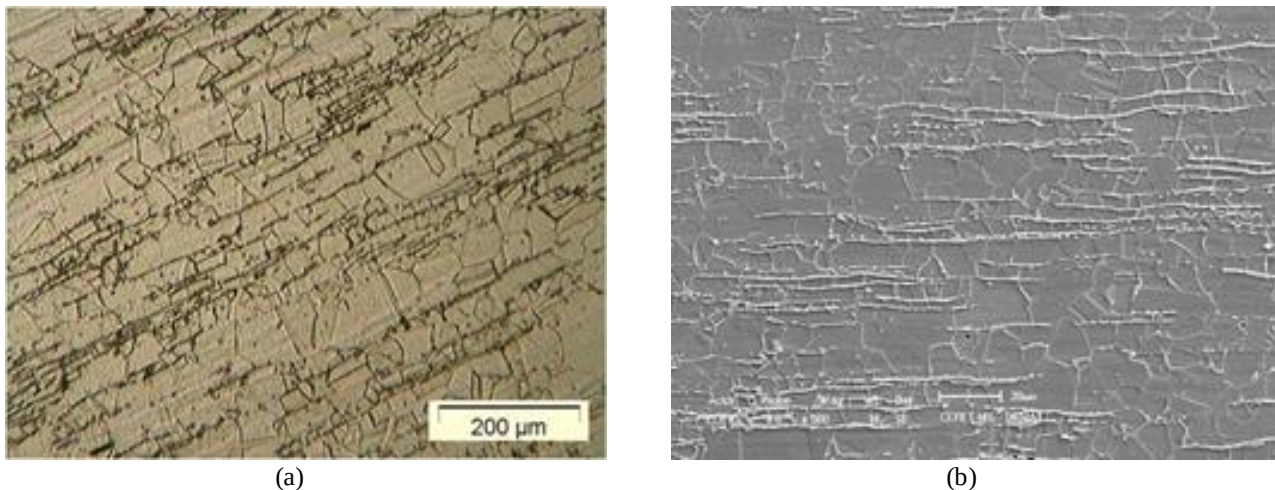
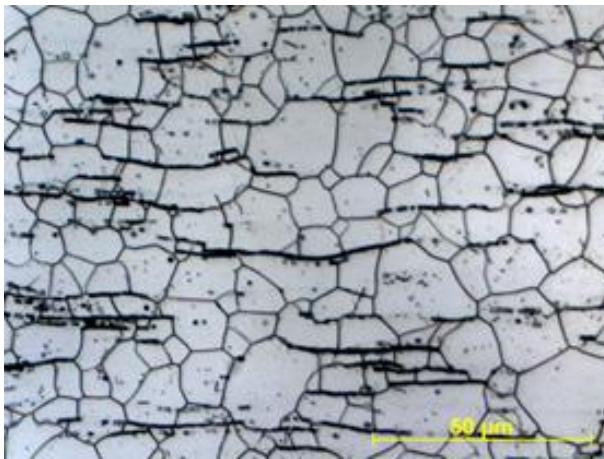


Figura 1: Microestrutura do metal base de aço AISI 317L obtida no (a) Microscópio Ótico e (b) no MEV (500x). Ataque: Água Régia.

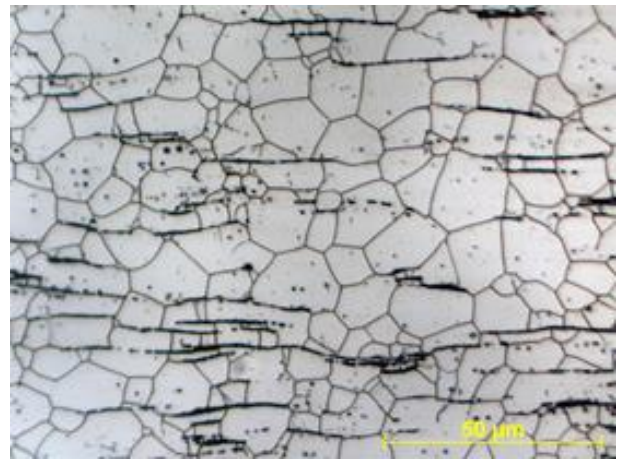
No presente trabalho foi realizada análise química por meio da EDS nas regiões da matriz austenítica e das possíveis bandas de ferrita. Pelo espectro obtido das duas regiões, pôde-se notar uma semelhança entre os principais picos (Fe, Cr e Ni) e composições químicas, corroborando as mesmas conclusões obtidas por Avelino et. al. (2011) evidenciando a ausência de precipitados de carbonetos de cromo.

É importante salientar que ao quantificar os teores de Cr, Mo e Ni das bandas de ferrita, observou-se teores ligeiramente mais elevados de Cr e Mo, além de menores teores de Ni quando comparados à austenita, corroborando o fato de se tratar de lamelas ou bandas de ferrita.

A Figura 2 (a e b) mostra as micrografias da região do MB dos CPs envelhecidos por 50 e 100 horas respectivamente. Observa-se que os grãos austeníticos tomaram uma forma mais arredondada e mais refinada com relação aos CPs sem TTE. Foram observadas mudanças significativas na microestrutura das amostras tratadas por 50 e 100 horas, cujas placas de ferrita δ observadas nos CPs sem TTE foram completamente transformadas em fase σ .



(a)



(b)

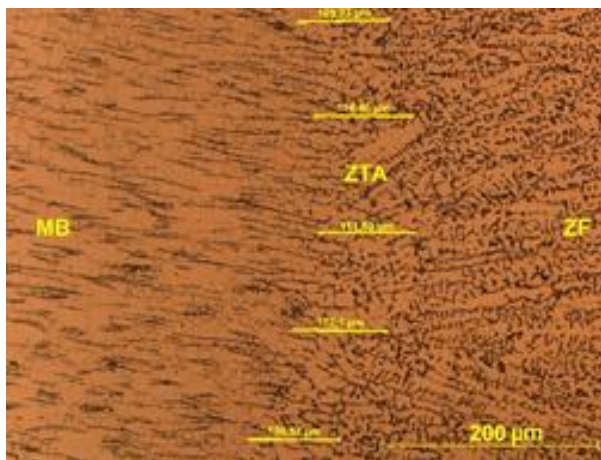
Figura 2: Microestrutura do metal base de aço AISI 317L com (a) 50 horas de TTE e (b) com 100 horas de TTE. Ataque: Eletrolítico, solução aquosa com 20% de HNO_3 .

3.2. Caracterização Microestrutural das Juntas Soldadas sem TTE

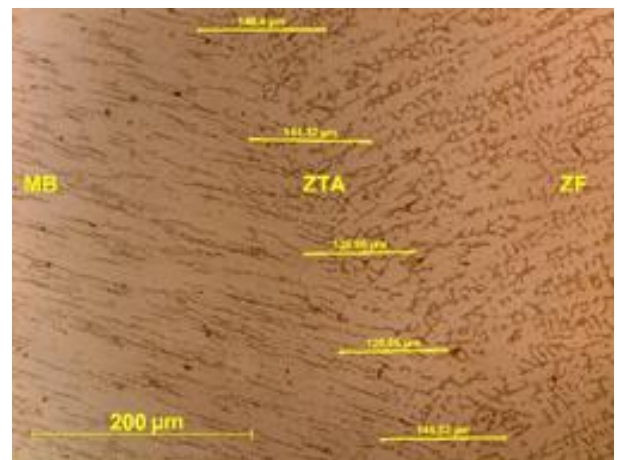
A Figura 3 (a e b) apresenta as microestruturas da ZTA das juntas soldadas com energias de 4 e 8 kJ/cm, respectivamente. Nestas Figuras pode-se notar a presença de medidas que foram realizadas na região da ZTA de alta temperatura, com objetivo de estimar o tamanho médio desta região.

Em ambas as Figuras são identificadas as regiões da ZF, ZTA e MB, nas quais se observa a formação da fase ferrita- δ na ZTA. Não foi possível identificar a presença de outras fases deletérias usando o microscópio ótico e o MEV nesta região.

Para a medição do tamanho médio da ZTA de alta temperatura foram realizadas 50 medições em cada condição de soldagem, obtendo assim os valores médios e seus respectivos desvios, conforme apresentados na Tabela 4.



(a)



(b)

Figura 3: Microestrutura da ZTA da junta soldada com energia de (a) 4 kJ/cm e (b) 8 kJ/cm. Medida do tamanho da ZTA de alta temperatura. Ataque: Água Régia.

Tabela 3: Tamanho médio da ZTA de alta temperatura das juntas soldadas.

Aporte Térmico	Extensão (μm)	Desvio (μm)
4 kJ/cm	108,28	9,37
8 kJ/cm	160,97	18,1

Observa-se que nas juntas soldadas com maior energia, a ZTA de alta temperatura apresentou-se mais extensa, o que pode ser atribuído à exposição a temperaturas mais altas durante a soldagem, afetando termicamente uma área maior do metal base.

Estudos de Nage et al. (2004) e Eckstein et. al. (2011) mostraram que o uso do aço AISI 317L na indústria de processo esbarra em problemas metalúrgicos, por mudanças na microestrutura, provocadas por elevadas temperaturas, decorrentes de um aumento significativo da ferrita- δ . Tal comportamento, por sua vez, aumenta a suscetibilidade à corrosão intergranular, aliado à decomposição de ferrita em fases intermetálicas, tais como as fases χ e σ , o que acarreta em degradação das propriedades deste material, principalmente em juntas soldadas expostas a elevadas temperaturas.

A Figura 4 (a e b) apresentam microestruturas obtidas no microscópio ótico da zona fundida (ZF) das juntas soldadas usando 4 e 8 kJ/cm, respectivamente.

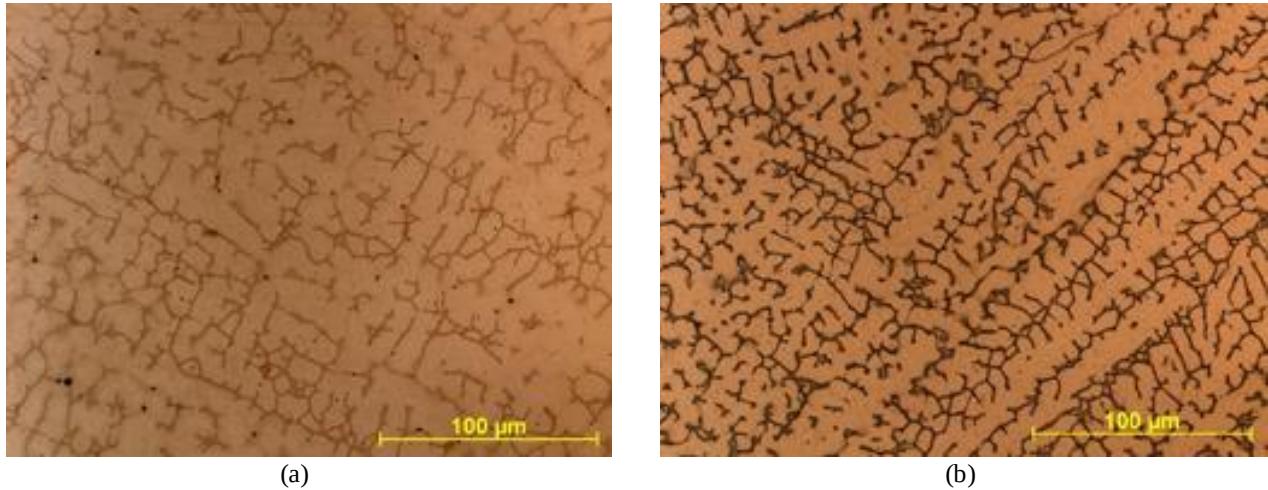


Figura 4: Microestrutura da zona fundida da junta soldada usando energia de (a) 4 kJ/cm e (b) 8 kJ/cm. Ataque: Água Régia.

Observa-se a formação de ferrita delta (fase escura) em ambas as juntas soldadas, apresentando uma certa semelhança tanto na quantidade quanto na morfologia da mesma, em função do aporte térmico. Esta morfologia vermicular e laminar, parcialmente como uma rede de ferrita delta, é provavelmente devido ao fato de que esta liga solidifica no Modo FA (Ferrítico-Austenítico).

Phillips, et. al. (2016) estudando o aço inoxidável superduplex UNS S32750 soldado com eletrodo austenítico AWS ER317 através do processo TIG, concluiu que na zona fundida a estrutura de solidificação é mais refinada para baixa energia de soldagem.

O teor de ferrita δ na zona fundida com o eletrodo AWS ER317L usando 4 e 8 kJ/cm ficaram entre 10 e 15%, o que segundo estudos de Ferreira et. al. (2009) e Barbosa et. al. (2009), reduz a probabilidade das zonas fundidas serem suscetíveis à fissuração em altas temperaturas devido à presença de ferrita δ .

3.3. Caracterização Microestrutural das Juntas Soldadas e Submetidas ao TTE

Para a análise da ZF dos CPs submetidos ao TTE, foi utilizado o MEV operando no modo de detecção BSE (Backscattered Electrons). As Figuras 5 e 6 apresentam os resultados obtidos para as duas condições de TTE.

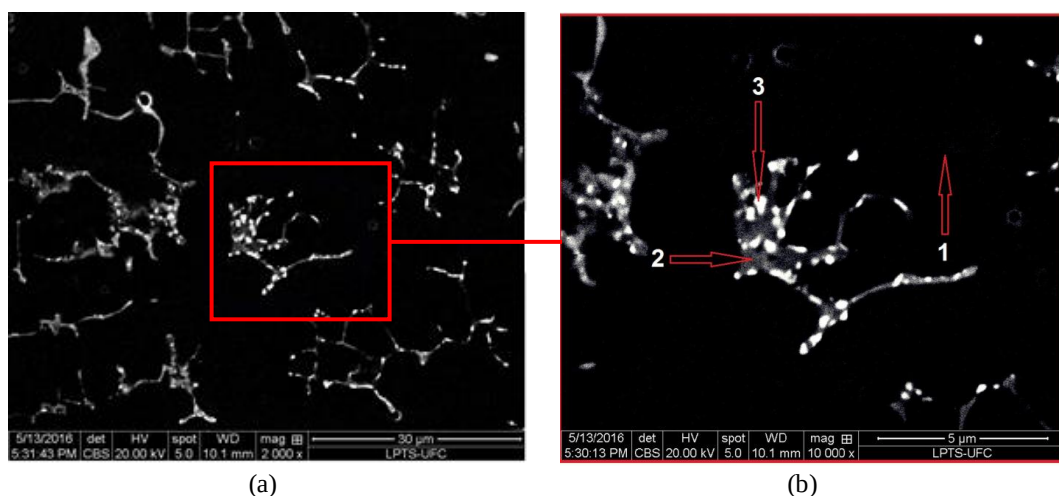


Figura 5: Microestrutura da zona fundida com o eletrodo AWS ER317L usando energia de 8 kJ/cm com 50 horas de TTE. Aumento em (a) 2000x e em (b) 10000x. Destaque para as fases (1) γ , (2) σ e (3) χ . Sem ataque, MEV-BSE.

A Tabela 4 mostra a composição química obtida de forma quantitativa por micro-análise, através de EDS, dos pontos de referência indicados na Figura 5.

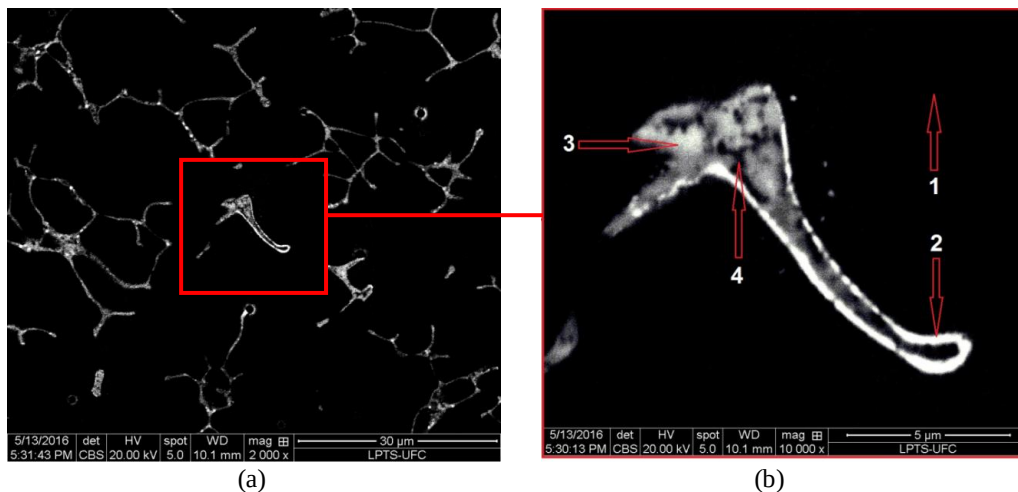


Figura 6: Microestrutura da zona fundida com o eletrodo AWS ER317L usando energia de 8 kJ/cm com 100 horas de TTE. Destaque para as fases (1) γ , (2) χ , (3) σ e (4) γ' . Sem ataque, MEV-BSE.

Os resultados revelaram que as regiões correspondentes aos pontos 2 e 3 possuem mais altos teores de Mo em relação a matriz γ . No metal de solda envelhecido por 50h, observa-se um aumento na precipitação de fases intermetálicas no interior da fase σ (ponto 3). As análises do metal de solda envelhecido por 100h (Figura 6) mostram uma grande concentração de fases intermetálicas (pontos 2 e 4) bem como a presença da fase χ na interface σ/γ (ponto 2).

Tabela 4: Composição química das regiões correspondentes às fases γ , σ e χ na ZF com o eletrodo AWS ER317L usando 8 kJ/cm e 50 horas de TTE.

Regiões	Si	Cr	Fe	Ni	Mo
1- Austenita (γ)	0,4	19,14	62,93	14,4	3,13
2- Sigma (σ)	0,42	27,48	57,95	6,12	8,04
3- Chi (χ)	0,71	26,03	53,5	4,02	15,75

A microestrutura observada no metal de solda envelhecido por 100 horas denota um maior crescimento e/ou evolução das fases intermetálicas a partir da ferrita δ , se comparado ao resultado apresentado na amostra envelhecida por 50 horas. Alguns precipitados observados na amostra envelhecida por 100 horas (Figura 6) não foram observados nas amostras envelhecidas por 50h (austenita secundária - γ'), indicando que pode ter havido decomposição dos mesmos.

Devido às pequenas dimensões das fases intermetálicas presentes, considera-se os resultados obtidos por EDS como qualitativos. No entanto, pode ser estabelecido que as imagens com tonalidades mais claras, obtidas por elétrons retroespalhados (BSE), indicam a presença de fases com altos teores de Mo. Sendo que, quanto mais clara estiver a região em análise, maior será a quantidade de Mo contido na mesma, devido ao seu maior número atômico em relação aos outros elementos (Cr, Ni). Portanto, acredita-se que as fases encontradas possam mesmo corresponder tanto a chi (χ) e sigma (σ), podendo até coexistirem na ferrita δ após os tratamentos efetuados (Sahlaoui, et. al., 2013 e Villanueva e. al., 2006).

Nos dois tempos de TTE foi possível estimar que toda ferrita δ tenha se transformado nas fases σ e χ , pois nenhuma amostra que foi submetida ao TTE apresentou alguma propriedade magnética quando sujeitas ao ferritoscópio.

4. CONCLUSÃO

A partir das análises da influência do aporte térmico e do tempo de TTE sobre a microestrutura de juntas soldadas do aço AISI 317L, pode-se concluir que:

As juntas soldadas com maior energia (8 kJ/cm) e sem o TTE pós-soldagem apresentaram uma maior extensão da ZTA de alta temperatura e um aumento significativo no teor de ferrita delta na região da ZF;

Com o TTE, a região do metal base apresentou um refinamento dos grãos austeníticos que tomaram uma forma mais arredondada com relação aos CPs sem TTE, o que provavelmente promoveu um alívio nas tensões residuais provenientes do processo de laminação do aço AISI 317L;

Após o TTE, observou-se que praticamente toda ferrita delta se transformou em fase sigma e fase chi.

Nas amostras tratadas termicamente por 100 horas identificou-se uma menor ocorrência da fase autenita secundária (α') o que indica que com o aumento do tempo de TTE ocorreu uma dissolução da mesma na fase sigma.

5. AGRADECIMENTOS

Ao apoio financeiro do Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais (CEFET-MG) e das agências brasileiras de fomento CNPq e FAPEMIG.

6. REFERÊNCIAS

- Carbó, H. M.; Aço Inoxidável: Aplicações e especificações. Núcleo Inox, Acesita, Belo Horizonte, 2011. Disponível em www.nucleoinox.org.br. Acesso em 26 de dezembro de 2017.
- Abdalla, F. E. S. Aplicação das Variantes MAG Pulsado e MAG Pulsado Térmico com Arame Maciço em Soldas de Revestimento do Tipo “Lining”. 2005. 104 f. Dissertação de Mestrado. Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Materiais, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2005.
- American Society For Testing And Materials. Standard practices for detecting susceptibility to intergranular attack in stainless steels. p. 262-93a, 1993.
- Avelino, A. F. J. Análise da Susceptibilidade à Corrosão Intergranular dos Aços: AISI 317 e AISI 317L. Dissertação de Mestrado. Universidade Federal do Ceará, Fortaleza, 2011.
- Nage, D. et al. Effect of 0.1 wt% on the pitting and SCC behaviour of as-welded and post weld heat treated austenitic stainless steel weld. *Transactions of the Indian Institute Metals*, v. 57, n. 23, p. 123-132, abril 2004.
- Eckstein, C. B. e. a. Envelhecimento de tubos de aço inoxidável 317L em ambiente de temperatura elevada. 11^a Conferência sobre Tecnologia de Equipamentos, Ipojuca, PE, maio 2011.
- Phillips, N. S. L. Phase transformation in cast superaustenitic stainless steel. Dissertação de Mestrado. Iowa State University, Ames, 2006.
- Ferreira, R. Estudo da formação da fase sigma em aços inoxidáveis austeníticos: foco nas ligas AISI 317, 317L e 317LN. 72 p. Dissertação de Mestrado. Escola de Engenharia da Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2009.
- Barbosa, R. P. Tecnologia Mecânica e Metalurgia da Soldagem, Soldabilidade dos Materiais. Coronel Fabriciano, MG, 2007.
- Sahlaoui, H.; Sidhom, H. Experimental investigation and analytical prediction of s-phase precipitation in AISI 316L austenitic stainless steel. *Metallurgical and Materials Transactions*, p. 3077-3083, 2013
- Villanueva, D. et al. Comparative study on sigma phase precipitation of three types of stainless steels: austenitic, superferritic and duplex. *Materials Science and Technology*, v. 22, n. 9, p. 1098-1104, 2006.

6. RESPONSABILIDADE AUTORAL

Os autores são os únicos responsáveis pelo conteúdo deste trabalho.

EFFECT OF HEAT INPUT AND THERMAL TREATMENT OF AGING ON THE MICROSTRUCTURE OF AISI 317L AUSTENIC STAINLESS STEEL WELDMENTS

Pedro Duarte Antunes, antunes.pd@gmail.com¹

Edmilson Otoni Corrêa, ecotoni@unifei.edu.br²

Cleiton Carvalho Silva, cleitonufc@yahoo.com.br³

¹General Training Department, Federal Center for Technological Education of Minas Gerais - CEFET / MG, Varginha, Minas Gerais, Brazil

²Mechanical Engineering Department, Federal University of Itajubá - UNIFEI, Itajubá, MG, Brazil

³Welding Research and Technology Laboratory (LPTS), Federal University of Ceará- UFC, Fortaleza, CE, Brazil.

Abstract: *One of the great difficulties faced in the application of stainless steels to elements of the oil and gas industry is to develop welding processes that offer significant productivity, stability in the microstructure of the weld region and consequently good mechanical properties and resistance to corrosion. In this sense, it is extremely important to know the metallurgical aspects of the welding process such as the relationship between the microstructure, the chemical / mechanical properties and the corrosion resistance so that the correct choice of parameters and materials can be used in the process. This work investigated the influence of the welding parameters and thermal treatment of aging time on the microstructure characteristics of welded joints of the AISI 317L austenitic stainless steel used in the petroleum industry. As filler metal the AWS ER317L electrode was used and two different heat inputs (4 and 8 kJ / cm) were tested to verify the influence of this parameter on the precipitation of undesirable deleterious phases. The samples were heat treated at 700 ° C for two times: 50 and 100 hours. For the microstructural analysis an Optical Microscope and an Scanning Electron Microscope were used. Quantification and microchemical mapping of precipitated phases after welding and thermal treatment were performed. It was observed that aging promoted a refinement of the base metal region and all delta ferrite was transformed into sigma phase. The delta ferrite present in the fusion zone was completely transformed into sigma phase and chi phase. In the thermally treated samples for 100 hours a lower occurrence of the secondary austenite phase (α') was identified, which indicates that with the increase of aging time a dissolution of the same occurred in the precipitated sigma phase.*

Keywords: AISI 317L Stainless Steel, Similar Welding, Mechanical Characterization.