

EFEITO DA ENERGIA DE SOLDAGEM NA ZONA AFETADA PELO CALOR DO AÇO INOXIDÁVEL FERRÍTICO AISI 444

Rodrigo Freitas Guimarães
Instituto Federal de Educação Ciência e Tecnologia do
Ceará
rodrigofg@ifce.edu.br

Nathália Cândido Figueiredo
Graduanda do Curso de Engenharia Metalúrgica da
Universidade Federal do Ceará.
nc.figueiredo@metalmat.ufc.br

Hélio Cordeiro de Miranda
Universidade Federal do Ceará.
hmiranda@ufc.br

Jesualdo Pereira Farias
Universidade Federal do Ceará.
jpf@secrel.com.br

RESUMO

Na soldagem de aços inoxidáveis ferríticos, o ciclo térmico pode causar alterações na zona afetada pelo calor (ZAC) tornando-a fragilizada. Para tornar possível a soldagem desses materiais, é importante que se conheçam os problemas que poderão surgir na ZAC os mesmos. O presente trabalho tem por objetivo caracterizar a ZAC do aço inoxidável ferrítico AISI 444. Chapas de aço AISI 444 foram soldadas em três níveis de energia, utilizando eletrodos austeníticos AWS E316L-17 e AWS E309MoL-16. Foi realizada microscopia óptica e eletrônica, além do levantamento dos perfis de dureza Vickers, ao longo da ZAC. Os resultados indicaram que a ZAC do aço AISI 444 apresentou significativo crescimento de grão e diminuição dos valores de dureza em relação ao metal de base na região mais próxima da linha de fusão. Nesta mesma região, encontrou-se uma distribuição de finíssimas precipitações que possivelmente sejam fase de Laves.

Palavras-Chave: soldagem, aço AISI 444, ZAC

ABSTRACT

Ferritic stainless steel is susceptible to weld embrittlement when heated during a certain time in 400°C - 550°C temperature interval. This phenomenon increases

the material hardness and decreases ductility and corrosion resistance. To weld those kind of materials, it is important to know the problems that might come along in the zone affected by the heat (HAZ). This work intends to characterize the AISI 444 HAZ, welded with three energy levels using AWS E316L-17 and AWS E309MoL-16 austenitic electrodes. Optical and electron microscopy was performed, and also an assessment of Vickers microhardness through the HAZ. The saw that the AISI 444 HAZ presents significant grain growth and hardness reduction related to the base metal in the region nearer the fusion line. In the same region, it was found a very fine precipitation distribution which could be Laves' phase.

Keywords: welding, AISI 444 ferritic stainless steel, HAZ steel.

1 INTRODUÇÃO

A utilização crescente dos aços inoxidáveis no campo industrial impulsionou o desenvolvimento tecnológico dessas ligas e de seus processos de fabricação, visando a melhoria de suas propriedades mecânicas e da resistência à corrosão.

Embora tais ligas possuam consideráveis propriedades mecânicas e excelente resistência à corrosão, a união das mesmas por meio de processos que utilizam fontes de calor, como a soldagem a arco elétrico, pode gerar alguns problemas metalúrgicos que comprometem suas propriedades mecânicas e sua resistência à corrosão. Aços inoxidáveis ferríticos são suscetíveis à fragilização quando aquecidos por um determinado período de tempo na faixa de 400 a 550 °C. Segundo Kah e Dickinson [1] e Van Zwieten e Bulloch [2] esse fenômeno, conhecido como Fragilização a 475 °C, aumenta o limite de ruptura e a dureza do material, diminui a ductilidade, a resistência ao impacto e a resistência à corrosão [3 – 6].

Na soldagem de aços inoxidáveis ferríticos, determinadas regiões da zona afetada pelo calor (ZAC) experimentam os efeitos dessa faixa de temperatura de fragilização e, dependendo da composição do aço e do nível da energia de soldagem empregada, essas regiões poderão ser fragilizadas.

Atualmente, nas unidades de refino da Petrobras, a recuperação das torres de destilação que sofreram corrosão naftênica é realizada por meio da aplicação de um *lining* de aço inoxidável austenítico. Uma técnica alternativa para a recuperação dessas torres seria a aplicação de um *lining* de aço inoxidável ferrítico AISI 444, que apresenta resistência à corrosão comparável com a dos austeníticos, possui resistência à corrosão sob tensão

superior, coeficiente de expansão térmica mais próximo do coeficiente do próprio material das torres de destilação, o que proporcionará uma expansão térmica razoavelmente uniforme na união entre os dois materiais, além de ter seu custo reduzido quando comparado aos austeníticos; entretanto, para essa alternativa tornar-se viável, é de extrema importância que se conheçam os problemas que poderão surgir na ZAC desses aços, quando soldados em diferentes níveis de energia. Além do mais, a Petrobras utiliza os eletrodos inoxidáveis austeníticos AWS E316L-17 e E309MoL-16 para a soldagem de recuperação de aços inoxidáveis ferríticos, daí a importância na realização de estudos que caracterizem o comportamento da ZAC de aços inoxidáveis ferríticos, soldados com eletrodos austeníticos.

2 OBJETIVOS

Caracterizar a ZAC do aço inoxidável ferrítico AISI 444, soldado em três níveis de energia, utilizando os eletrodos austeníticos AWS E316L-17 e AWS E309MoL-16. Para isto, foram realizadas microscopias ópticas e eletrônicas, além do levantamento dos perfis de microdureza Vickers, ao longo da ZAC.

3 METODOLOGIA

O material utilizado foi o aço inoxidável ferrítico AISI 444, cuja composição química encontra-se na Tabela 1. Observa-se o baixíssimo teor de carbono, típico dessa geração de aços ferríticos e o alto teor de cromo, ambos são responsáveis pela estabilidade da fase ferrítica e presença de titânio e nióbio, adicionados a esta liga, para evitar a formação de carbonetos de cromo [7].

Tabela 1: Composição química do aço AISI 444 (% em massa).

C	Mn	Si	Ni	Mo	Cr
0,015	0,12	0,54	0,20	1,85	17,55
Al	Cu	Co	V	Nb	Ti
0,01	0,03	0,02	0,045	0,16	0,13

Foram utilizados dois tipos de eletrodos revestidos inoxidáveis austeníticos de 2 mm de diâmetro cujas composições químicas dos metais depositados, fornecidas pelo fabricante, encontram-se na Tabela 2.

Tabela 2: Composição química dos eletrodos segundo fabricante (% em massa).

Eletrodos	C	Cr	Ni	Mo	Mn	Si
AWS E316L-17	<0,03	18,3	11,8	2,5	0,7	0,9
AWS E309MoL-16	<0,03	23	13	2,5	-	

Para caracterizar o aço no estado em que foi recebido, foram realizadas microscopias ópticas, eletrônicas e medição de microdureza Vickers. Os ataques químicos foram realizados com o reagente de Vilella (100 ml de álcool etílico + 1 g de ácido pícrico + 5 ml de ácido clorídrico) [8].

Foram realizadas simples deposições de metal de solda em chapas de aço AISI 444 de 150 mm x 50 mm x 3 mm com dois eletrodos austeníticos (Tabela 2). As deposições foram em corrente contínua, eletrodo no positivo. Os valores de corrente utilizados são os fornecidos pelo Catálogo do Fabricante. Neste catálogo, o fabricante fornece uma faixa de corrente de aplicação dos eletrodos. Adotaram-se os valores extremos e a média dessa faixa de corrente. As energias de soldagem obtidas foram aproximadamente iguais para os dois tipos de eletrodos para fins de comparação. Na Tabela 3, são apresentados os valores dos parâmetros de soldagem utilizados: velocidade de soldagem (V_s), corrente eficaz (I_{ef}), tensão eficaz (U_{ef}) e energia de soldagem (E_s).

Após a realização da soldagem, a ZAC foi caracterizada por meio de microscopia óptica e eletrônica, além do levantamento dos perfis de microdureza Vickers. Todos os ataques químicos foram realizados com o reagente de Vilella.

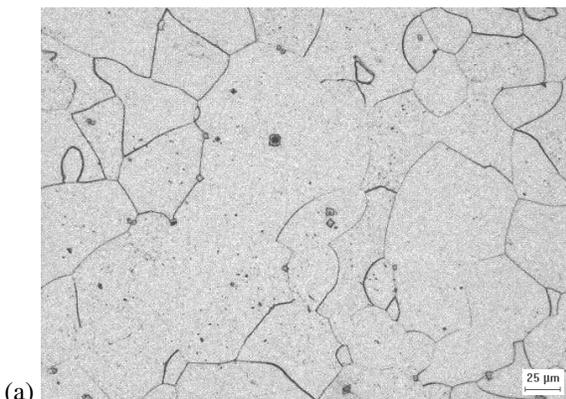
Tabela 3: Parâmetros de soldagem utilizados para os dois eletrodos.

Eletrodo	Ensaio	V_s (cm/min)	I_{ef} (A)	U_{ef} (V)	E_s (kJ/cm)
AWS E316L-17	1	80	63	26,3	12,4
	2	92	53	24,6	8,5
	3	130	43	25,5	5,2
AWS E309MoL-16	4	90	72	26,8	12,8
	5	120	64	26,2	8,4
	6	170	57	27,2	5,4

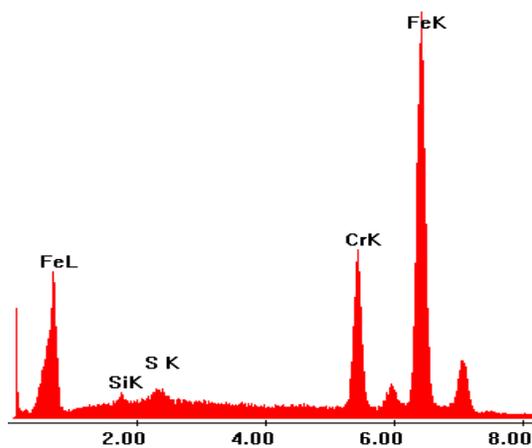
4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

A microestrutura do aço inoxidável ferrítico AISI 444 como foi recebido e sua análise dispersiva de raio-X estão mostrados nas Figuras 1a e 1b. Este aço apresentou nesta condição uma dureza em torno de 199 HV. Ao longo da matriz ferrítica e de alguns contornos de grão, é possível observar a presença de precipitações que, após a análise por EDX, constatou-se que são carbonetos de titânio, conforme relatado por Modenesi *et al.* [9]. Essas precipitações estão diretamente relacionadas com os teores de carbono, titânio e nitrogênio, presentes na solução sólida. O elemento, titânio, funciona como

um estabilizador, combinando-se com o nitrogênio e o carbono, evitando a formação de carbonetos de cromo [10,11]. Essas precipitações são comuns em aços inoxidáveis ferríticos devido à baixa solubilidade de nitrogênio e carbono na fase ferrítica, ao contrário dos aços inoxidáveis austeníticos. A Figura 2a mostra uma microscopia eletrônica dos carbonetos de titânio e a Figura 2b mostra seu respectivo EDX.

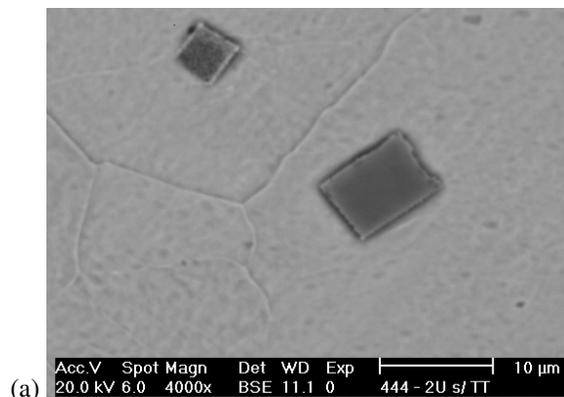


(a)

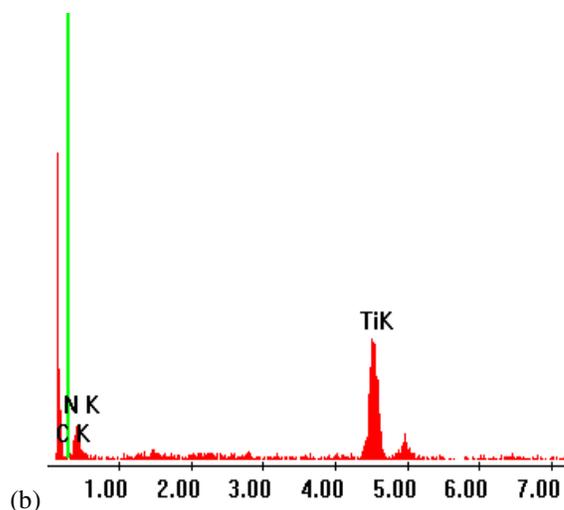


(b)

Figura 1. (a) microestrutura do aço AISI 444 como recebido. Aumento 200x. (b) Análise da composição química obtida por EDX.



(a)



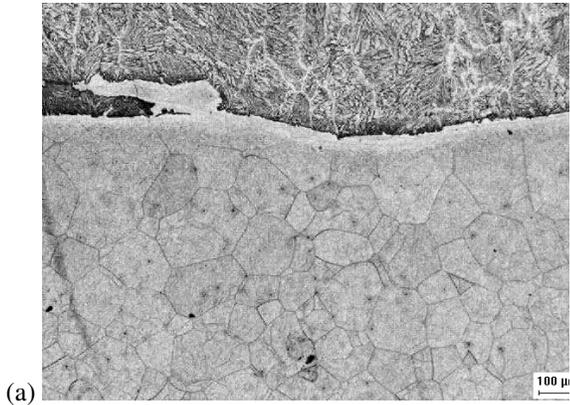
(b)

Figura 2. (a) Carbonitreto de titânio em imagem de elétrons retro espalhados. Aumento: 4000x. (b) Análise dispersiva de Raios-X (EDX) do carbonitreto de titânio apresentado na Figura 2a.

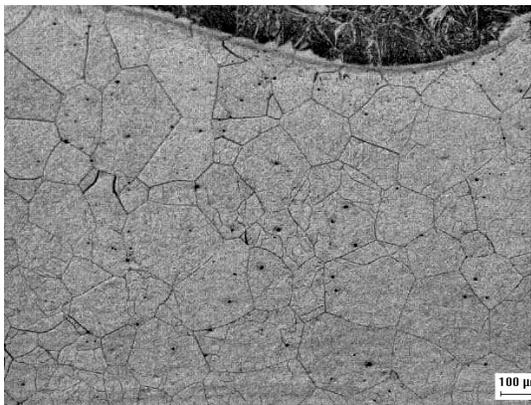
Conforme relatado por Modenesi *et al.* [9] e também comprovado neste trabalho, a ZAC do aço inoxidável ferrítico AISI 444 é marcada por intenso crescimento de grão nas proximidades da linha de fusão e também pela existência de algumas precipitações muito finas tanto nos contornos, como nos grãos. Foi constatado também que o tamanho dos grãos são diferentes para as energias de soldagem utilizadas. As Figuras 3, 4 e 5 mostram as microscopias ópticas na região próxima à linha de fusão, para os dois tipos de eletrodos utilizados e para os três níveis de energia empregados, conforme Tabela 3.

Pode-se observar claramente, nas Figuras 3 a 5 que quanto maior for a energia de soldagem, maiores serão os grãos na ZAC. Este crescimento de grão exagerado é um dos principais problemas na soldagem de aços inoxidáveis ferríticos. Na ZAC, nas proximidades da linha

de fusão, existem em alguns contornos de grão e na matriz ferrítica, algumas precipitações muito finas, que podem ser carbonetos ou carbonitreto, finamente precipitados. Este comportamento foi constatado em todos os níveis de energia de soldagem e para os dois tipos de eletrodos.

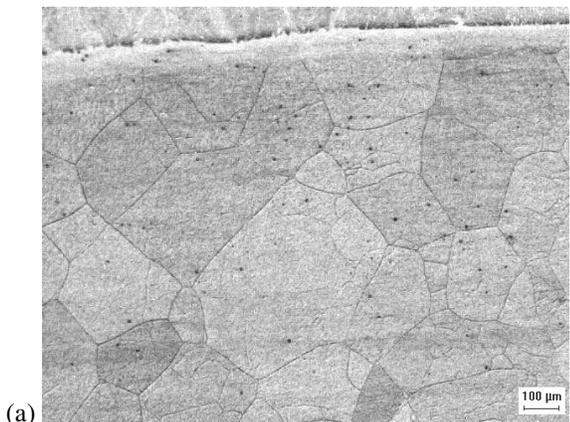


(a)

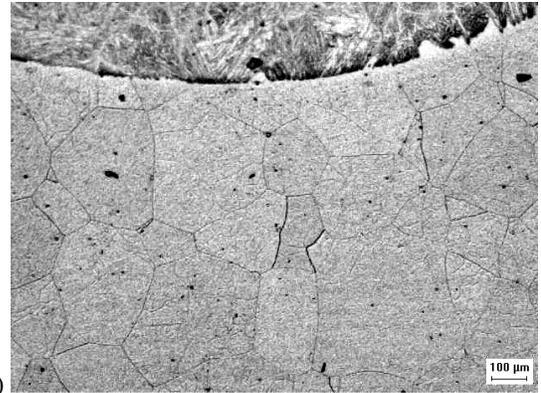


(b)

Figura 3. ZAC do aço AISI 444. (a) Ensaio 3. (b) Ensaio 6. Aumento de 50x. Energia ~ 5,4 kJ/cm.



(a)

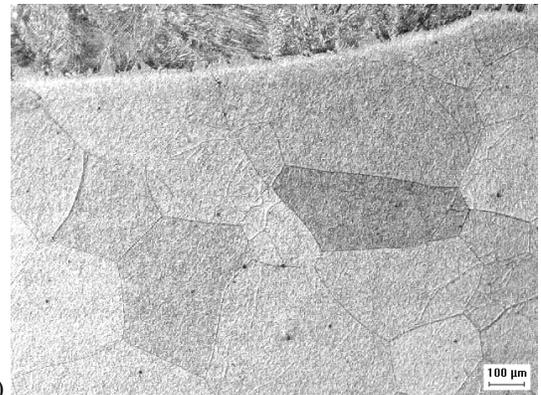


(b)

Figura 4. ZAC do aço AISI 444. (a) Ensaio 2. (b) Ensaio 5. Aumento de 50x. Energia ~ 8,5 kJ/cm.



(a)



(b)

Figura 5. ZAC do aço AISI 444. (a) Ensaio 1. (b) Ensaio 4. Aumento de 50x. Energia ~ 12,6 kJ/cm.

A princípio, esses precipitados poderiam caracterizar o fenômeno de sensitização, uma vez que, para os aços ferríticos, é esta a região que atinge temperaturas

acima de 925°C, onde ocorre este fenômeno; mas, em alguns contornos bem mais afastados dessa região, ou seja, regiões que, possivelmente, atingem temperaturas abaixo de 925°C, este fenômeno também é observado. Na Figura 6, é possível visualizar essas finas precipitações tanto na matriz ferrítica, quanto nos contornos de grão.



Figura 6. Precipitação de possíveis carbonetos e/ou carbonitretos logo abaixo da linha de fusão. Aumento de 500x.

As amostras soldadas, após serem observadas no microscópio eletrônico, revelaram um comportamento interessante: bem abaixo da linha de fusão existem precipitações finíssimas em formato de agulha que medem entre 0,5 e 0,7 μm de espessura. Esse comportamento foi verificado em todas as níveis de energia de soldagem empregados para os dois eletrodos. Essas precipitações, por estarem no limite da resolução do microscópio eletrônico utilizado (0,5 μm) não foram analisadas pelo EDX. As Figuras 7a e 7b mostram as precipitações resultantes para os dois tipos de eletrodo. Constatou-se nessas figuras que praticamente não existem carbonitretos de titânio na região onde finas precipitações ocorrem. Isto pode indicar que esses carbonitretos se solubilizaram com a alta temperatura e, a seguir, no resfriamento, se reprecipitaram finamente. A Figura 8 mostra essas finas precipitações com maiores detalhes. Após consultas a literaturas especializadas em aços inoxidáveis, observaram-se algumas semelhanças geométricas entre essa fase precipitada no aço inoxidável ferrítico soldado e algumas precipitações de fases intermetálicas que ocorrem em aços inoxidáveis austeníticos. Dentre as fases intermetálicas, a que mais se assemelhou com a fase precipitada na ZAC do aço inoxidável ferrítico foi a fase de Laves.

Esta hipótese é reforçada quando se considera a pesquisa de Faria [12] que, em seu trabalho encontrou fases de aspecto semelhante às Figuras 5 e 6, na soldagem de aço inoxidável ferrítico (AISI 409) e comprovou

por meio de microscopia eletrônica que se tratava de fase de Laves.

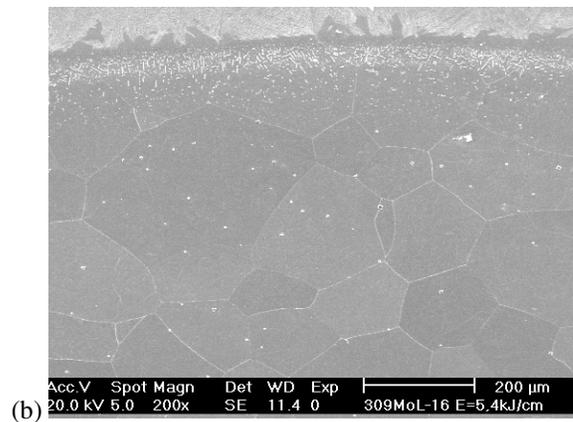
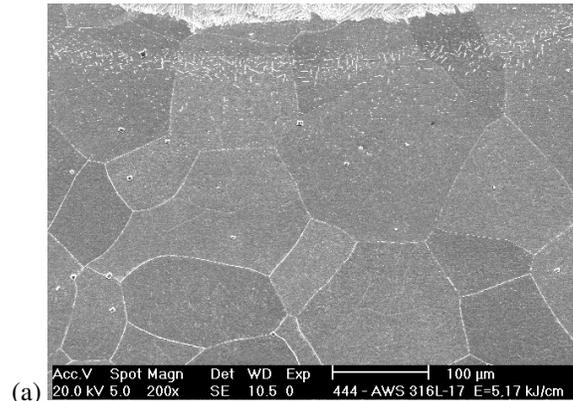


Figura 7. (a) Microscopia eletrônica ZAC. 200x. Ensaio 3. (b) Microscopia eletrônica da ZAC. 200x. Ensaio 6.

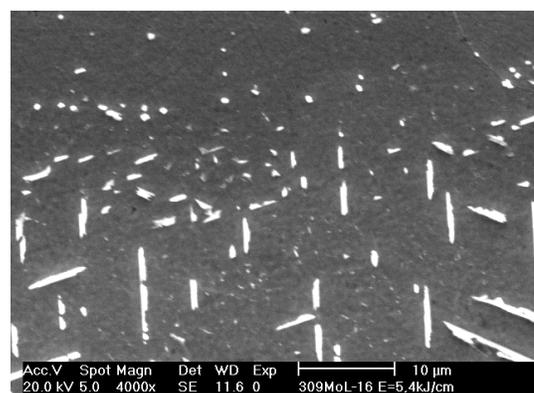


Figura 8. Precipitações logo abaixo da linha de fusão. 4000x. Ensaio 6.

Foram levantados os perfis de microdureza da ZAC para todas as níveis de energia e os dois tipos de eletrodo. As Figuras 9 a 12 mostram esses perfis de microdureza para o menor e maior nível de energia de

soldagem. Pode-se observar que nos grãos mais grosseiros, juntos à linha de fusão, a dureza é inferior à dureza do metal de base que foi aproximadamente de 199 HV. Para a ZAC das amostras soldadas com eletrodo AWS E316L-17, esses valores de dureza tendem a cair ao longo da ZAC. Para a ZAC das amostras soldadas com eletrodo AWS E309MoL-16, esses valores de dureza tendem a cair até certa altura da ZAC e depois crescem significativamente para valores próximos à do metal de base. Isto pode ser atribuído à distribuição dos tamanhos de grão ao longo da ZAC ou a presença de precipitados ou fases fragilizantes. Uma vez que, nas proximidades da linha de fusão, os grãos foram demasiadamente grandes, de uma maneira geral, para os perfis de microdureza levantados, essa região apresentou dureza considerável, provavelmente, devido à precipitação da fase de Laves, que provoca endurecimento.

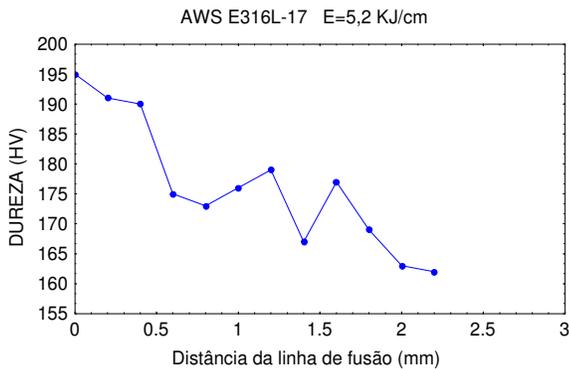


Figura 9. Perfil de microdureza ao longo da ZAC para amostra soldada com o eletrodo AWS E316L-17 e energia de soldagem de 5,2 kJ/cm

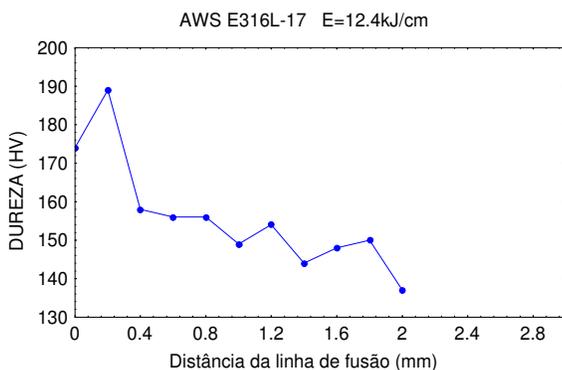


Figura 10. Perfil de microdureza ao longo da ZAC para amostra soldada com o eletrodo AWS E316L-17 e energia de soldagem de 12,4 kJ/cm.

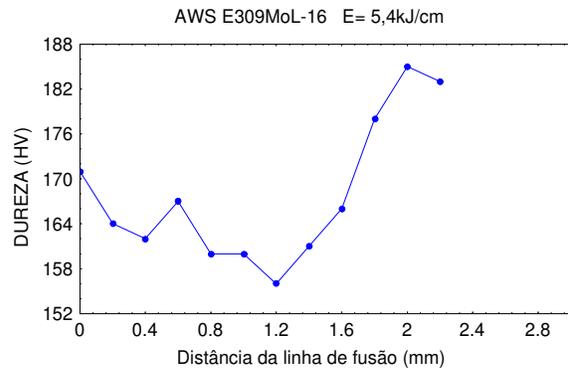


Figura 11. Perfil de microdureza ao longo da ZAC para amostra soldada com o eletrodo AWS E309MoL-16 e energia de soldagem de 5,4 kJ/cm

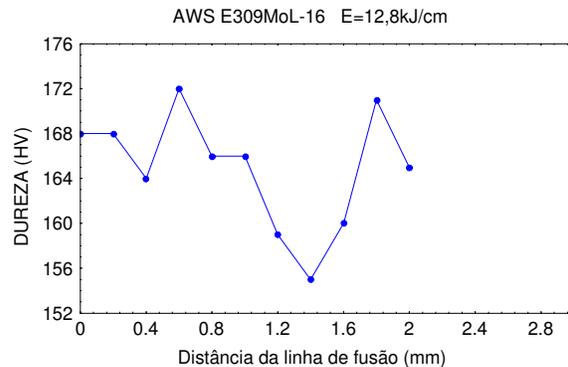


Figura 12. Perfil de microdureza ao longo da ZAC para amostra soldada com o eletrodo AWS E309MoL-16 e energia de soldagem de 12,8 kJ/cm

4 CONCLUSÕES

Dos conceitos e argumentos emitidos neste trabalho, pode-se concluir:

- A ZAC do aço inoxidável AISI 444 soldado com os eletrodos AWS E316L-17 e AWS E309MoL-16 apresentou significativo crescimento de grão e diminuição dos valores de dureza em relação ao metal de base na região mais próxima da linha de fusão.
- Foi observada a presença de finíssimas precipitações próximo da linha de fusão, semelhante a fase de Laves, independentemente da energia de soldagem e do tipo de eletrodo utilizado.

- O aumento do nível de energia de soldagem resultou no aumento dos grãos na ZAC: grão grosso, em ambos os eletrodos.
- Apesar de os grãos serem demasiadamente grandes, próximo da linha de fusão, de uma maneira geral, esta região apresentou dureza considerável, provavelmente, devido à precipitação da fase de Laves.

REFERÊNCIAS

- [1] KAH, D. H.; DICKINSON, D. W. Weldability of the Ferritic Stainless Steels. *Welding Journal*, v. único, New York, p. 135s-142s, ago 1981.
- [2] VAN ZWIETEN, A. C. T. M.; BULLOCH, J. H.; Some Considerations on the Toughness Properties of Ferritic Stainless Steels – A Brief Review. *International Journal Pressure Vessel & Piping*, England, v. 56, n.1, p. 1-31, 1993.
- [3] CORTIE, M. B.; POLLAK H. Embrittlement and aging at 475°C in an experimental ferritic stainless steel containing 38 wt.% chromium. *Materials Science and Engineering A*, v. 199, n. 2, pp 153-163, Aug. 1995.
- [4] SAHU, J. K.; KRUPP U.; GHOSH R. N.; CHRIST H. J. Effect of 475 °C embrittlement on the mechanical properties of duplex stainless steel. *Materials Science and Engineering A*, v. 508, n. 1 and 2, pp 1-14, May 2009.
- [5] HOAQUAN, W. Influence of annealing and aging treatments on the embrittlement of type 446 ferritic stainless steel, *Journal Material Engineering*, New York, v. 9, n.1, pp 51-61, March 1987.
- [6] TAVARES, S.S.M.; NORONHA, R.F. DE; SILVA, M.R. DA; M. NETO, J.; PAIRIS, S. 475 °C Embrittlement in a Duplex Stainless Steel UNS S31803, *Materials Research*, v. 4, n. 4, pp. 237-240, Oct. 2001.
- [7] VILLAFUERTE, J.C.; KERR, H.W. Phase transformations in stainless steel weld metal and heat-affected zones. *Key Engineering Materials*, Switzerland, v. 69&70, p.129-148, 1992.
- [8] G.F.V. Voort, H. James, M.K. Mills, J.R. Davis, J.D. Destefani, D.A. Dieterich, G.M. Crankovic, M.J. Frissell. *ASM Handbook: “Metallography and Microstructures”*. Vol, 9, USA: ASM International, p. 284, 1992.
- [9] P. J. Modenesi, P. V. Marques, D. B. dos Santos. “Curso de Metalurgia da Soldagem”. Belo Horizonte, UFMG, 1992
- [10] E. Folkard. *Welding Metallurgy of Stainless Steels*, Springer, Vienna, 1988.
- [11] A.J. Sedricks. *Corrosion of Stainless Steels*. Wiley-Interscience Publications, second edition, New York, USA, 1996.
- [12] R. A. Faria. Efeito da Composição Química de Aços Inoxidáveis Ferríticos no Desempenho de Juntas Soldadas pelo Processo a Arco Metálico Gasoso (SAMG). 200 folhas. Dissertação (Mestrado em Engenharia Metalúrgica), Universidade de São Paulo, São Paulo- SP, 2000.