

Efeito da energia de soldagem sobre a microestrutura de revestimentos AISI 317L depositados em aço ASTM A516 Gr 60 para aplicação no setor de petróleo e gás

M. M. Silva¹, T. M. Maciel^{1*}, M. A. Santos¹, M. F. Motta², M. S. S. Lima¹

¹Departamento de Engenharia de Materiais – Universidade Federal de Campina Grande – UFCG

Av. Aprígio Veloso, 882, CEP 58429-900, Campina Grande-PB

²Departamento de Engenharia Mecânica – Universidade Federal do Ceará

Campus do Pici, 60455-760, Fortaleza-CE

(Recebido em 15/04/2010; revisado em 23/07/2010; aceito em 29/07/2010)

(Todas as informações contidas neste artigo são de responsabilidade dos autores)

Resumo:

Neste trabalho avaliou-se a influência da energia de soldagem sobre revestimentos de aço AISI 317L depositados por soldagem em substrato de aço ASTM A 516 Gr 60. Os revestimentos foram aplicados por utilizando-se o processo MIG com duplo arame e o arame AWS E317L como metal de adição. Durante as soldagens foram empregados dois níveis de energia de soldagem (1170kJ/m e 1530kJ/m) e um gás de proteção correspondendo a uma mistura de argônio e oxigênio (95% Ar e 5% O₂). Em seguida, as amostras foram caracterizadas utilizando-se ensaios de microscopia ótica e microdureza, ao longo de seções longitudinais e transversais à direção de soldagem. Os resultados obtidos indicaram um incremento na extensão da zona termicamente afetada (ZTA) e na formação de zonas parcialmente diluídas (ZPD) – ao longo da linha de fusão com valores de dureza acima de 300HV, para maiores valores de energias de soldagem.

Palavras-chave: Soldagem MIG com duplo arame; revestimento AISI 317L; energia de soldagem; zonas parcialmente diluídas.

Abstract:

The objective of this study was to evaluate the effect of heat input on AISI 317L steel weld overlay deposited on ASTM A 516 Gr 60 steel substrates. The weld overlays were carried out by the Twin Wire GMAW process, using the AWS E317L wire as filler metal. During welding two heat input levels (1170kJ/m e 1530kJ/m) and a mixture of argon and oxygen (95% Ar and 5% O₂) as shielding gas were used. Then, specimens were characterized by optical microscopy and microhardness tests, along the parallel and cross sections to the welding direction. The results showed an increase in the heat affect zone (HAZ) extension and the formation of PDZ along the fusion line (inside weld metal), presenting values above 300HV mainly for higher heat input levels.

Keywords: Twin wire GMAW; AISI 317L weld overlay; heat input; partially diluted zones.

* E-mail: theo@dem.ufcg.edu.br (T. M. Maciel)

1. Introdução

Os revestimentos internos aplicados nos equipamentos do setor de petróleo e gás podem ser de vários tipos, tais como os anticorrosivos, antiabrasivos, antiincrustantes e refratários. Os revestimentos anticorrosivos são os mais utilizados devido, principalmente, ao elevado grau de corrosividade dos fluidos empregados nas atividades deste setor. Por sua vez, estes revestimentos podem ser classificados em metálicos e não metálicos, ou ainda, permanentes e temporários. Quanto aos metálicos existem vários tipos com diferentes graus de qualidade e de aderência ao substrato, desde uma verdadeira ligação metalúrgica na interface entre os dois materiais, até uma simples justaposição. Como exemplos dos revestimentos metálicos mais importantes têm-se o cladeamento, galvanização, revestimentos não-integrais diversos (*lining*) e os revestimentos por deposição de solda (RDS) [1].

Os RDS são obtidos através de uma soldagem dita dissimilar, já que o consumível, além de ser mais nobre, em geral possui uma composição química significativamente diferente em relação ao substrato. Neste caso, os metais de adição geralmente utilizados são os aços inoxidáveis austeníticos ou ligas de níquel, aplicados em substratos de aço carbono. Na indústria de petróleo e gás estes RDS podem ser aplicados em tubulações, vasos de pressão, reatores, tanques de armazenamento ou qualquer equipamento, ou parte dele, que requer proteção contra corrosão [2,3]. Entretanto, devido à grande diferença de composição

química entre o substrato (aço carbono) e o revestimento (aço inoxidável ou liga de Ni) e às condições de soldagem, zonas parcialmente diluídas (ZPD) – com dureza acima de 300HV – podem se formar ao longo da linha de fusão. Estas zonas podem apresentar dezenas de microns de largura, diversas morfologias e composição química de baixa liga, ou seja, uma composição intermediária entre o metal de base (substrato) e o metal de solda (MS) [4-6]. Devido a estas características, as ZPD tornam-se susceptíveis a ataques corrosivos por *pitting*, fragilização por hidrogênio e corrosão sob tensão [4]. Portanto, torna-se necessário buscar condições de soldagem que minimizem ou até eliminem estas ZPD. Assim, o objetivo deste trabalho foi avaliar o efeito da energia de soldagem sobre o revestimento de aço AISI 317L depositados por soldagem em aço ASTM A 516 Gr. 60.

2. Metodologia

Neste trabalho a deposição dos revestimentos de aço AISI 317L em substratos de aço ASTM A516 Gr 60 foi realizada através do processo de soldagem MIG com duplo arame com um gás de proteção correspondendo à mistura de argônio e oxigênio (95%Ar e 5%O₂). As composições químicas destes materiais estão dispostas nas Tabelas 1 e 2.

Tabela 1: Especificação de Composição química do aço ASTM A516 Gr 60.

Materiais	Composição (% em peso)					
	C*	Mn	P*	S*	Si	Fe
ASTM A516 Gr 60	0,21	0,60- 0,90	0,035	0,035	0,15- 0,40	bal.

* Teores máximos aceitáveis. Fonte: ASTM (2004) [7].

Tabela 2: Composição química do metal de adição AWS E317L.

Materiais	Composição (% em peso)						
	C	Mn	Cr	Ni	Mo	Si	Fe
AWS E317L ⁽²⁾	0,03	1,00	18,50	13,00	3,80	0,70	bal.

Fonte: Böhler (2008) [8].

Já na Tabela 3 têm-se os principais parâmetros de soldagem adotados durante a aplicação dos revestimentos, executados no Laboratório de Engenharia de Soldagem (ENGESOLDA) na Universidade Federal do Ceará, através de um robô industrial. Todas as soldagens foram realizadas com uma temperatura de interpasso de 423K (150°C).

Após o revestimento dos substratos, foram realizadas análises por microscopia ótica e microdureza – no Laboratório de Metalografia do Departamento de Engenharia Mecânica da Universidade Federal de Campina Grande (DEM/UFPG) – ao longo de seções transversais e longitudinais à direção de soldagem (Figura 1a)

Para a realização do ensaio de microdureza utilizou-se uma carga de 100gf e um tempo de 15s para cada impressão. Este ensaio foi executado, tanto na seção transversal quanto na longitudinal, segundo a metodologia apresentada na Figura 1b, isto é, as impressões foram localizadas adjacentes à linha de fusão (LF), no lado do metal de solda (MS), com

espaçamento entre elas de 250 μ m. Já a extensão da zona termicamente afetada (E_{ZTA}) foi obtida – conforme o detalhe da Figura 1b – tomando-se 4 medidas ao longo das seções, resultando assim numa média

Tabela 3: Parâmetros de Soldagem utilizados.

Corrente (A)	Velocidade de soldagem (m/s)	Energia de soldagem (kJ/m)
170	$6,67 \times 10^{-3}$	1530
130	$6,67 \times 10^{-3}$	1170

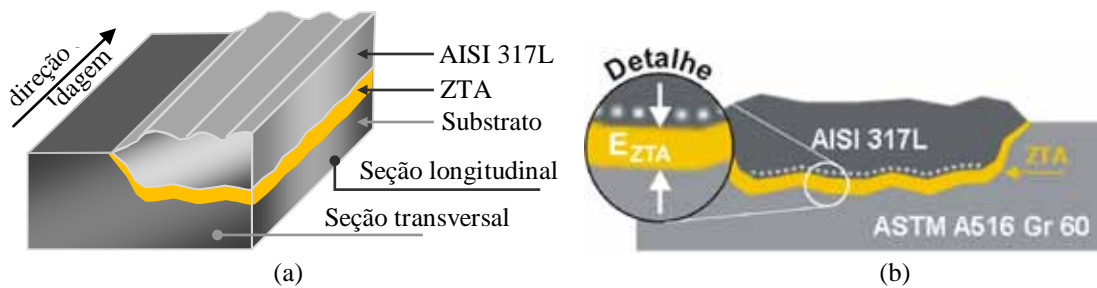
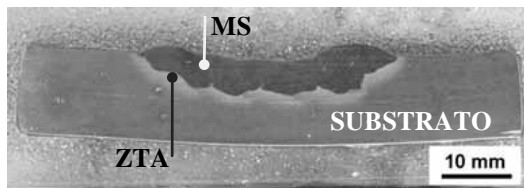


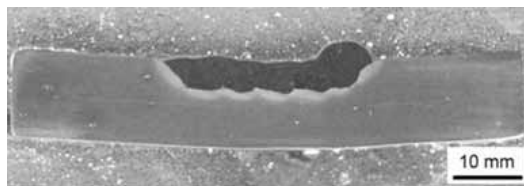
Figura 1: (a) Seções transversal e longitudinal em relação à direção de soldagem. (b) Metodologias para a realização da ensaio de microdureza e para a quantificação da E_{ZTA} .

3. Resultados e Discussão

As Figuras 2a e 2b mostram as seções transversais para $H=1530\text{kJ/m}$ e $H=1170\text{kJ/m}$, respectivamente.

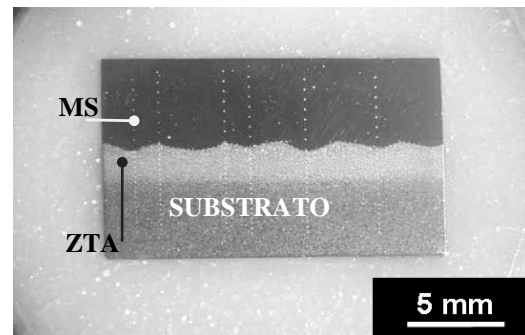


(a)

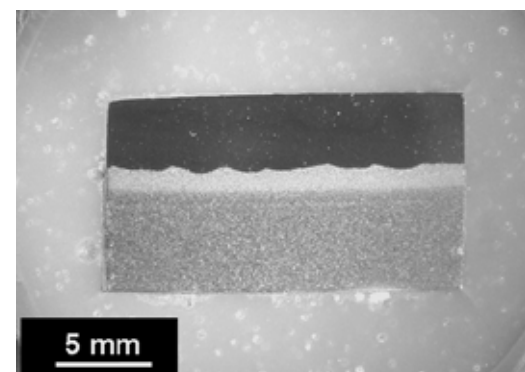


(b)

Figura 2: Macrografias de seções transversais para (a) $H=1530\text{ kJ/m}$ e (b) 1170kJ/m .



(a)



(b)

Figura 3: Seções longitudinais. (a) $H=1530\text{kJ/m}$ e (b) 1170kJ/m .

Analogamente, as Figuras 3a e 3b apresentam as macrografias das seções longitudinais para os dois níveis de energia de soldagem empregados.

Através das Figuras 2 e 3 verifica-se com clareza que a extensão da ZTA foi maior para nível de energia de soldagem mais elevado (1530kJ/m). A Tabela 4 apresenta os valores quantitativos deste aumento em função da energia de soldagem.

Como pode ser observado nesta tabela, a E_{ZTA} foi medida tanto nas seções transversais quanto nas longitudinais, para ambos os níveis de H. A partir destes resultados calculou-se,

para cada valor de H, uma média entre a E_{ZTA} na seção transversal e a E_{ZTA} na seção longitudinal, obtendo-se desta forma E_{ZTA} global média em função da energia de soldagem (Figura 4).

Assim, verifica-se que para um aumento de 360kJ/m em H a E_{ZTA} global média aumentou de 0,43mm. Em geral, maiores E_{ZTA} estão associadas a grãos mais grosseiros, e estes estão associados a menores valores de tenacidades ao impacto [9,10]. Entretanto, ensaios de propriedade mecânica precisam ser realizados a fim de quantificar esta perda de tenacidade.

Tabela 4: Influência da energia de soldagem (H) na extensão da ZTA.

	Seção Transversal		Seção Longitudinal	
	H=1530kJ/m	H=1170kJ/m	H=1530kJ/m	H=1170kJ/m
E_{ZTA} (mm)	2,00	1,46	1,99	1,66
Desvio Padrão (mm)	0,27	0,16	0,03	0,11
	H=1530kJ/m		H=1170kJ/m	
E_{ZTA} Média Global (mm)	1,99		1,56	
Desvio Padrão (mm)	0,30		0,27	

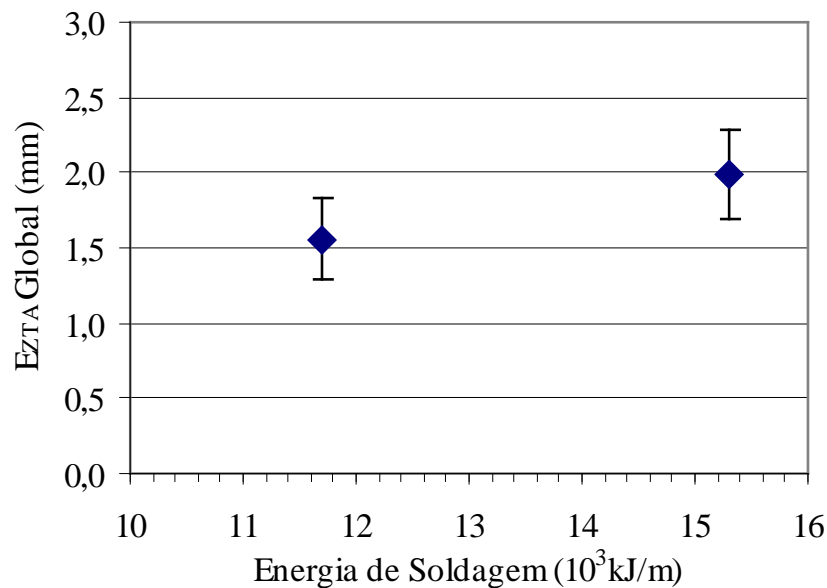


Figura 4: Influência da energia de soldagem sobre a E_{ZTA} global.

As Figuras 5 a 8 apresentam regiões na interface MS/substrato com diferentes morfologias.

A Figura 5 apresenta uma região denominada “praia”, pois se constitui numa estreita faixa – ao longo da interface MS/substrato – apresentando níveis de dureza elevados. Na Figura 6 pode ser notada uma “península”, isto é, uma porção do MS parcialmente cercada pelo metal de base (MB). Já na Figura 7 tem-se uma “ilha”, ou seja, uma porção do MB totalmente cercada pelo MS. Estas regiões, também

verificadas por Doody [5] em soldagens dissimilares, foram destacadas aqui porque são nos contornos delas (dentro do MS) que as ZPD podem estar localizadas. As microestruturas das Figuras 5 a 7 foram obtidas a partir de seções transversais. No entanto, as seções longitudinais também apresentaram estas regiões. A Figura 7 mostra uma “península” e “ilhas” na interface MS/substrato de uma seção longitudinal.

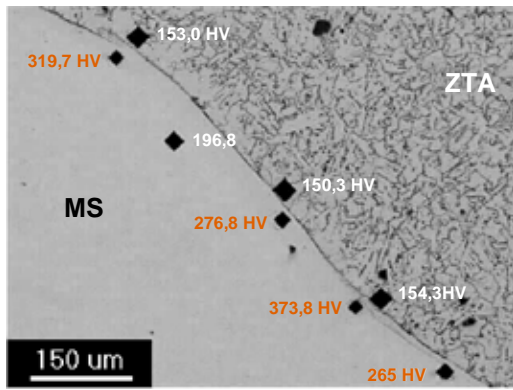


Figura 5: Região denominada “praia”.

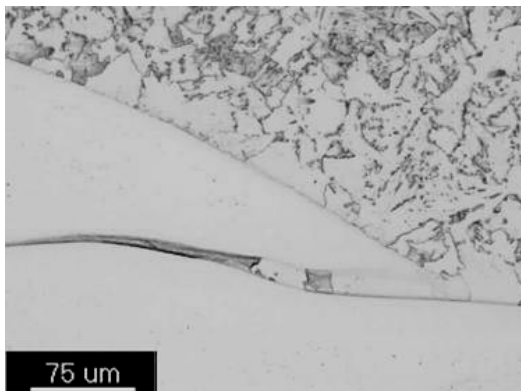


Figura 6: Região denominada “península”.

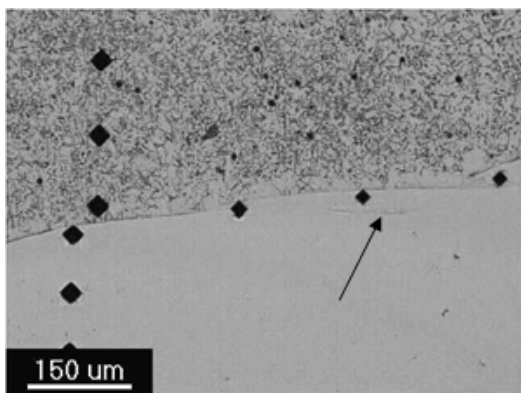


Figura 7: “Ilha” de pequenas dimensões.

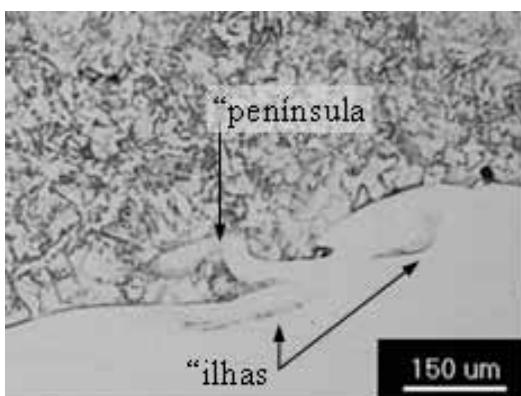


Figura 8: “Penínsulas” e “ilhas”.

As regiões apresentadas nas Figuras 5 a 8 foram observadas em amostras, obtidas de corpos de prova soldados, tanto para a energia de soldagem (H) de 1530kJ/m quanto para 1170kJ/m, embora para H=1530kJ/m estas regiões tenham ocorrido com mais frequência.

Uma das características das ZPD é que elas não são contínuas ao longo da interface MS/substrato, ou seja, são fenômenos metalúrgicos localizados. Devido a esta característica, adotou-se a metodologia de realizar impressões de dureza ao longo da interface da solda, e os valores destas impressões foram comparados com o limite de dureza – 250HV – estabelecido pela NACE (*National Association of Corrosion Engineers*) para metais de base de aço carbono, inoxidável e metais de solda, quando estes são empregados em meios úmidos sulfurosos. Apesar da NACE não fazer nenhuma referência às durezas de ZPD de soldagens dissimilares, este limite de 250HV pode ser utilizado como parâmetro comparativo.

As Figuras 9a e 9b apresentam os valores das impressões de dureza realizadas na interface MS/substrato, em seções transversais, para H=1530kJ/m e H=1170kJ/m, respectivamente.

Comparando-se as Figuras. 9a e 9b nota-se que o número de impressões, cujo valor de dureza foi acima de 250HV, foi maior para H=1530kJ/m. Em termos de média, verifica-se que para a energia de soldagem maior a dureza na interface MS/substrato foi de $287,57 \pm 49,81 \text{HV}$, enquanto que para H=1170kJ/cm a dureza média foi de $261,67 \pm 53,35 \text{HV}$, como indicado nas Figuras 9a e 9b. Na Tabela 5 tem-se um comparativo – para vários níveis de dureza – entre as interfaces MS/substrato associadas a ambos os níveis de energia de soldagem.

De maneira análoga, também foram analisadas as seções longitudinais (Figuras 10a e 10b, e Tabela 6). E, em termos de médias, para H=1530kJ/m e H=1170kJ/m as durezas obtidas foram $280,75 \pm 58,36 \text{HV}$ e $237,67 \pm 40,56 \text{HV}$, respectivamente.

Novamente verifica-se que o nível de dureza na interface MS/substrato foi menor para H=1170kJ/m.

Analisando-se as Tabelas 5 e 6, verifica-se que um aumento de 360kJ/m na energia de soldagem proporcionou um maior nível de dureza na interface MS/substrato, tanto para seções transversais quanto para as longitudinais. No entanto, esta constatação foi mais notável nas seções longitudinais. Por exemplo, analisando através das seções transversais (Tabela 5), quando H foi incrementada de

360kJ/m o percentual de impressões de dureza acima de 300HV aumentou de 24,10 para 39,81%, isto é, um aumento de 1,65 (ou 65%). Analisando-se as seções longitudinais (Tabela 6), para o mesmo nível de 300HV, este percentual aumentou de 9,21 para 31,33%, ou seja, um aumento de 3,40 (ou 240%).

Este aumento no nível de dureza (principalmente acima de 300HV) é um indicativo que houve um aumento na formação de ZPD ao longo da interface MS/interface,

quando a energia de soldagem foi incrementada de 360kJ/cm. Embora nenhum método quantitativo tenha sido apresentado, Kejelin *et al* [6] também concluíram que para uma energia de soldagem mais elevada, maior será a formação de ZPD. Assim, a metodologia adotada neste trabalho torna-se uma alternativa para quantificar indiretamente – através de microdureza – a formação de ZPD em interfaces MS/substrato.

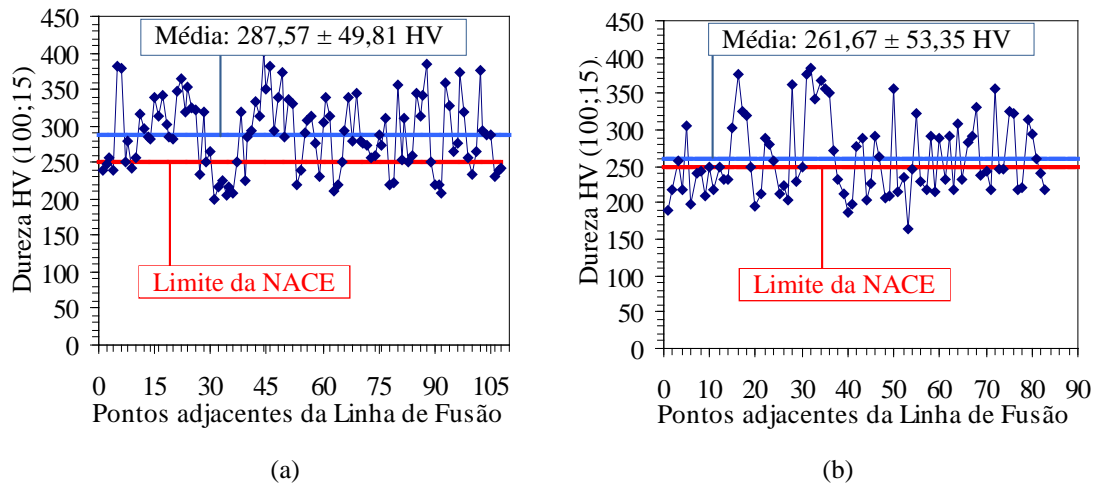


Figura 9: Dureza ao longo da interface MB/substrato (seção transversal) para (a) H=1530kJ/m e (b) H=1170kJ/m.

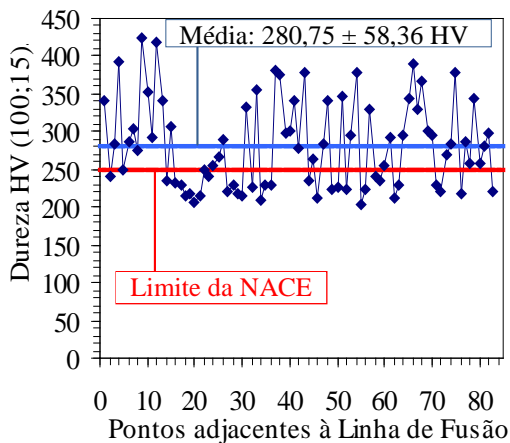
Tabela 5: Comparativos entre os níveis de dureza ao longo da LF para H=1530kJ/m e H=1170kJ/m, na seção transversal à direção de soldagem.

Impressões adjacentes à linha de fusão – LF (seção transversal)				
Nível de dureza	H = 1530 kJ/m		H = 1170 kJ/m	
	Nº de impressões	Percentual	Nº de impressões	Percentual
Dureza acima de 200HV	107	99,07%	77	92,77%
Dureza acima de 250HV	80	74,07%	27	43,37%
Dureza acima de 300HV	43	39,81%	20	24,10%
Dureza acima de 350HV	13	12,04%	8	9,64%
Dureza acima de 400HV	1	0,93%	0	0,00%
Total de impressões	108		83	

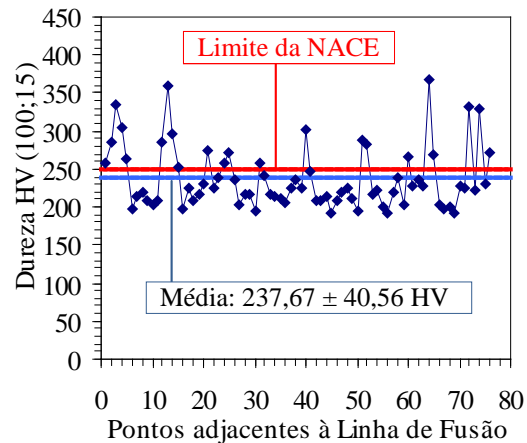
Tabela 6. Comparativos entre os níveis de dureza ao longo da LF para H=1530kJ/m e H=1170kJ/m, na seção longitudinal (paralela) à direção de soldagem.

Impressões adjacentes à linha de fusão (seção longitudinal)				
Nível de dureza	H = 1530 kJ/m		H = 1170 kJ/m	
	Nº de impressões	Percentual	Nº de impressões	Percentual
Dureza acima de 200HV	83	100,00%	68	89,47%
Dureza acima de 250HV	49	59,04%	22	28,95%
Dureza acima de 300HV	26	31,33%	7	9,21%
Dureza acima de 350HV	12	14,46%	2	2,63%
Dureza acima de 400HV	2	2,41%	0	0,00%
Total de impressões	83		76	

Em revestimentos aplicados por soldagem, torna-se interessante investigar uma seção longitudinal, já que se analisa uma parte mais representativa de um cordão de solda e não apenas uma seção pontual (transversal) deste cordão. No entanto, também é importante avaliar uma seção transversal de um revestimento já que se analisa seções transversais pontuais de vários cordões de solda, lado a lado.



(a)



(b)

Figura 10. Dureza ao longo da interface MB/substrato (seção longitudinal) para (a) $H=1530\text{kJ/m}$ e (b) $H=1170\text{kJ/m}$.

4. Conclusões

- Constatou-se que a extensão da ZTA diminuiu com a redução da energia de soldagem. Esta redução foi 0,43mm quando H reduziu de 360kJ/m.

- Foi identificada a formação de ZPDs com valores acima de 300 HV para ambas as energias de soldagem utilizadas. Entretanto estas regiões foram mais frequentes em soldagem depositadas com maior energia de soldagem.

- Devido apresentarem uma maior quantidade de ZPDs, as soldagens realizadas com a energia de soldagem mais alta apresentaram um valor médio de dureza na interface MS/substrato mais elevado.

- A energia de soldagem mais baixa (1170kJ/m) gerou os melhores resultados, pois proporcionou uma menor extensão de ZTA e um menor nível de dureza na interface MS/substrato.

Agradecimentos

Os autores agradecem a Agência Nacional de Petróleo, Gás Natural e Biocombustíveis (ANP),

Apesar de ocorrer uma diminuição na formação de ZPD com a redução de H , outros parâmetros podem ser alterados a fim de se otimizar ainda mais esta redução, ou até eliminar estas zonas. Segundo a literatura, os fatores que mais influenciam na formação de ZPD são a composição química (substrato e metal de adição) e a taxa de resfriamento, que por sua vez é influenciada pela energia de soldagem, espessura do substrato e temperatura de pré-aquecimento [4, 11].

a Rede Multitarefa de Materiais Avançados do Norte e Nordeste (REMULT) através do Núcleo de União e Revestimentos de Materiais (UNIREV), e ao CNPq.

Referências

- [1] Telles, P. C. S. *Materiais para Equipamentos de Processo*. Rio de Janeiro: Interciência, 2003. 269p.
- [2] Lippold, J. C.; Kotecki, D. J.. *Welding Metallurgy and Weldability of Stainless Steels*. Hoboken: Wiley Intercience, 2005. 357 p.
- [3] Paranhos, R.. *Revestimento de Aço Carbono com Aço Inoxidável Austenítico*. Disponível em: <<http://www.infosolda.com.br/download/12ddc.pdf>>. Acesso em: 26 maio 2008.
- [4] Omar, A. A.. Effects of Welding Parameters on Hard Zones Formation at Dissimilar Metal Welds. *Welding Journal*, Miami, v. 77, n. 2, p.86-93, 1998.
- [5] Doody, T.. Intermediate Mixed Zones in Dissimilar Metal Welds for Sour Service.

- Welding Journal*, v. 71, n. 3, p. 55-60, 1992.
- [6] Kejelin, N. Z., Buschinelli, A. J. A. E Pope, A. M. Influence of Welding Parameters on the Formation of Partially Diluted Zones of Dissimilar Metal Welds. *Soldagem & Inspeção*, v.12, n.3, p.195-203, 2007.
- [7] American Society for Testing and Materials (ASTM). A516/516M: Standard Specification for Pressure Vessel Plates, Carbon Steel, for Moderate – and Lower-Temperature Service. United States, 2004.
- [8] Böhler Welding Group. *Aceros Inoxidables*. Disponível em: <http://www.bohlerweldinggroup.com.ar/spanish/50_ESN_HTML.htm>. Acesso em: 27 out. 2008.
- [9] Barnhouse, E. J.; Lippold, J. C. Microstructure/Property Relationship in Dissimilar Welds Between Duplex Stainless Steels and Carbon Steels, *Welding Journal*, v. 77, n. 12, p. 477-487, 1998.
- [10] Taban, E.; Deleu, A.; Dhooze, A.; Kaluc, E. Evaluation of Dissimilar Welds between Ferritic Stainless Steel Modified 12% Cr and Carbon Steel S335. *Welding Journal*, v. 87, n. 12, p. 291-297, 2008.
- [11] Lundin, C. D. Dissimilar Metal Welds: Transition Joints Literature Review. *Welding Journal*, Miami, v. 61, n. 2, p.58-63, 1982.