

Avaliação do campo de tensões residuais por difração de raios – X utilizando o método do $\text{sen}^2\psi$ em revestimentos metálicos do aço inoxidável E308-L

(Evaluation of residual stress field by x-ray diffraction using the $\text{sen}^2\psi$ method on E308-L stainless steel weld overlays)

Raphael. H. F. Melo¹, Marco Antonio dos Santos¹, Theophilo Moura Maciel¹,

¹Universidade Federal de Campina Grande - UFCG, Departamento de Engenharia Mecânica, Campina Grande, PB
raphael.engmec@gmail.com, santos@dem.ufcg.edu.br, theo@dem.ufcg.edu.br

Resumo

A aplicação por soldagem de revestimentos metálicos de aços e ligas nobres resistentes à corrosão é uma alternativa bastante razoável economicamente frente à fabricação de componentes maciços nestas ligas. Entretanto há uma carência de informações sobre as alterações mecânico/metalúrgicas causadas pelos ciclos térmicos de soldagem quando da aplicação destes revestimentos, principalmente sobre a influência sobre o nível de tensões residuais, que é mister no entendimento do fenômeno da corrosão assistida por tensão. O objetivo deste trabalho foi avaliar o nível de tensões residuais superficiais em revestimentos do aço inoxidável AWS E308-L T-1 aplicados pelo processo de soldagem ao Arco Elétrico com Arame Tubular sobre chapas do aço ASTM A36. As medições das tensões residuais foram realizadas por um difratômetro portátil de raios – X na superfície dos revestimentos e os principais resultados obtidos foram que a natureza das tensões residuais na superfície dos revestimentos sempre se apresentou compressivas e não observou-se uma linearidade da magnitude das tensões residuais em função da energia de soldagem.

Palavras chaves: Soldagem, aço inoxidável, tensões residuais, difração de raios – X.

Abstract: The application of metal coatings by welding of steels and alloys resistant to corrosion is an alternative quite reasonable economically facing the manufacturing of solid components in these alloys. However there is a lack of information about the mechanical / metallurgical changes caused by thermal cycles of welding due to the application of these coatings, especially on the influence on the level of residual stresses, that it is essential to understand the phenomenon of stress-assisted corrosion. The aim of this study was to evaluate the level of the superficial residual stresses in coatings of AWS E308L T-1 stainless steel applied by the FCAW process on steel plates of ASTM A36. The measurements of residual stresses were performed by a portable X - ray diffractometer on the surface of the coatings and the main results obtained were that the nature of residual stresses on the surface of the coatings always showed compressive and no linearity of the magnitude of the residual stresses as a function of the welding energy.

Keywords: Welding, stainless steel, residual stress, x-ray diffraction.

1. Introdução

As pressões econômicas globais e as características das bacias produtoras nacionais têm levado cada vez mais as refinarias utilizarem petróleo pesado em ácido em seus processos. Isto requer dos materiais empregados em plantas de exploração e beneficiamento do petróleo e seus derivados excelente resistência à corrosão e boas propriedades mecânicas à quente [1]. Dentre os materiais metálicos podem-se destacar com estas características os aços inoxidáveis e as superligas de níquel [2, 3, 4]. No entanto, a fabricação de componentes maciços nestas ligas torna os equipamentos economicamente inviáveis. Logo, uma alternativa viável para tal problema é a

aplicação por soldagem de revestimentos metálicos destas ligas em aços para tubulações e estruturais [5].

Entretanto, a soldagem de materiais dissimilares leva ao surgimento de tensões residuais de magnitude significativa devido à diferença entre os coeficientes de dilatação e contração térmica [6, 7]. É bem sabido que as tensões residuais de soldagem têm influencia bastante significativa na vida em fadiga, surgimento de trincas, aceleração (ou retardamento) dos processos de corrosão assistida por tensão, entre outros [8, 9, 10].

Neste contexto, este trabalho buscou avaliar o nível de tensões residuais superficiais em revestimentos de aço inoxidável E308-L T-1 aplicados por processo de soldagem ao Arco Elétrico com Arame Tubular (*Flux Cored Arc Welding - FCAW*) em chapas do aço ASTM A36.

2. Materiais e Métodos

2.1. Consumíveis

(Recebido em 05/06/2012; Texto final em 07/11/2012).

Tabela 1. Composição química (% em peso) dos consumíveis empregados.

	C	Cr	Ni	Mo	Mn	Si	Cu	P	S	Fe
AWS E-308-L	0,03	19,5 - 22,0	9,0 - 11,0	0,75	1,0 - 2,5	0,30 - 0,65	0,75	-	-	Balanço
ASTM A 36	0,18-0,23	-	-	-	0,30-0,60	-	-	0,03 máx.	0,05 máx.	Balanço

Neste trabalho utilizou-se como substrato chapas do aço ASTM A36 e como metal de adição o arame de aço inoxidável AWS E308-L T-1 com diâmetro de 1,2 mm. A Tabela 1 apresenta a composição química dos materiais empregados, segundo o fabricante.

2.2. Procedimento experimental

As soldagens foram realizadas pelo processo FCAW. Utilizou-se uma fonte eletrônica de soldagem e um sistema de aquisição de dados para controle dos parâmetros de soldagem. O procedimento de soldagem foi executado sem restrição e sem tecimento sendo os corpos de prova constituídos de três cordões de solda depositados, na posição plana variando-se a tensão (U), a velocidade de alimentação do arame (V_a) e a velocidade de deslocamento (V_s) gerando diferentes valores de aporte térmico (H). Os valores dos parâmetros de soldagem utilizados nos experimentos estão apresentados na Tabela 2. Foram mantidos fixos: inclinação da tocha de soldagem ($\theta=15^\circ$ com a vertical), sentido de soldagem “empurrando”, modo de corrente com polaridade reversa CC+ e distância do bico de contato a peça (DBCP) de 15 mm. Utilizou-se também uma sobreposição de L/3 em relação à largura do primeiro cordão, conforme a Figura 1. Além disso, a temperatura de interpasse foi mantida menor ou igual a 100 °C.

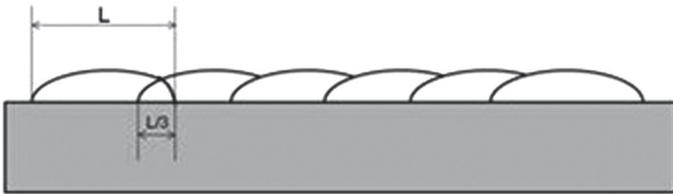


Figura 1. Ilustração da sobreposição entre os cordões.

Tabela 2. Parâmetros de soldagem

	U (volts)	Va (m/min)	Vs (cm/min)	H (kJ/cm)
1	30,0	6,0	20,0	19,65
2	40,0	6,0	20,0	26,19
3	30,0	7,0	20,0	21,20
4	40,0	7,0	20,0	28,19
5	30,0	6,0	26,0	10,97
6	40,0	6,0	26,0	14,51
7	30,0	7,0	26,0	11,82
8	40,0	7,0	26,0	15,99
9	35,0	6,5	23,0	16,94
10	35,0	6,5	23,0	17,52
11	35,0	6,5	23,0	17,44

A análise de tensões foi realizada na superfície dos revestimentos utilizando um difratômetro portátil de raios – X (Figura 2).

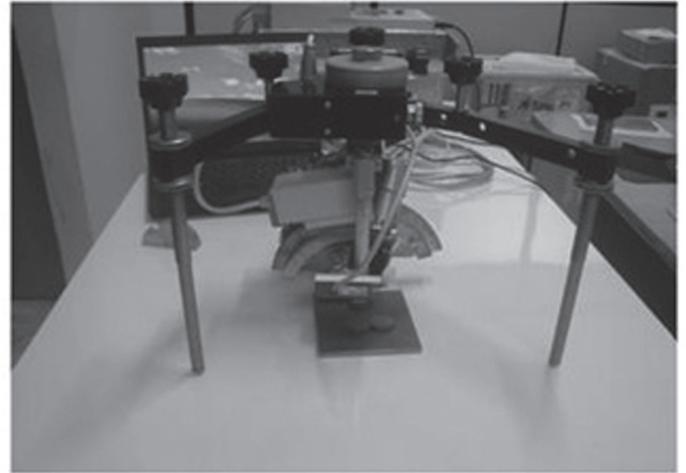


Figura 2. Difratômetro portátil utilizado na análise de tensões residuais.

Na análise de aços austeníticos pode-se avaliar os planos {220} com um comprimento de onda de $\lambda = 2,2896 \text{ \AA}$ e ângulo de pico (2θ) = 128,84°. Este comprimento de onda é produzido por um tubo anódico de cromo[11].

O método empregado foi o $\text{sen}^2\psi$, com medidas realizadas para $\psi = 0^\circ, 30^\circ, 33^\circ, 35^\circ, 37^\circ, 40^\circ, 42^\circ, 43^\circ, 44^\circ$ e 45° . Foram realizadas análises em três regiões distintas de todos os revestimentos. A Figura 3 ilustra a disposição dos pontos que foram analisados, onde I, M e F significam o início, meio e fim do revestimento.

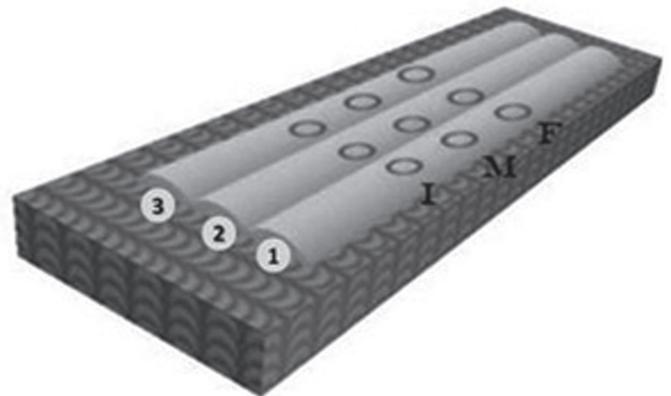


Figura 3. Regiões analisadas sobre os revestimentos.

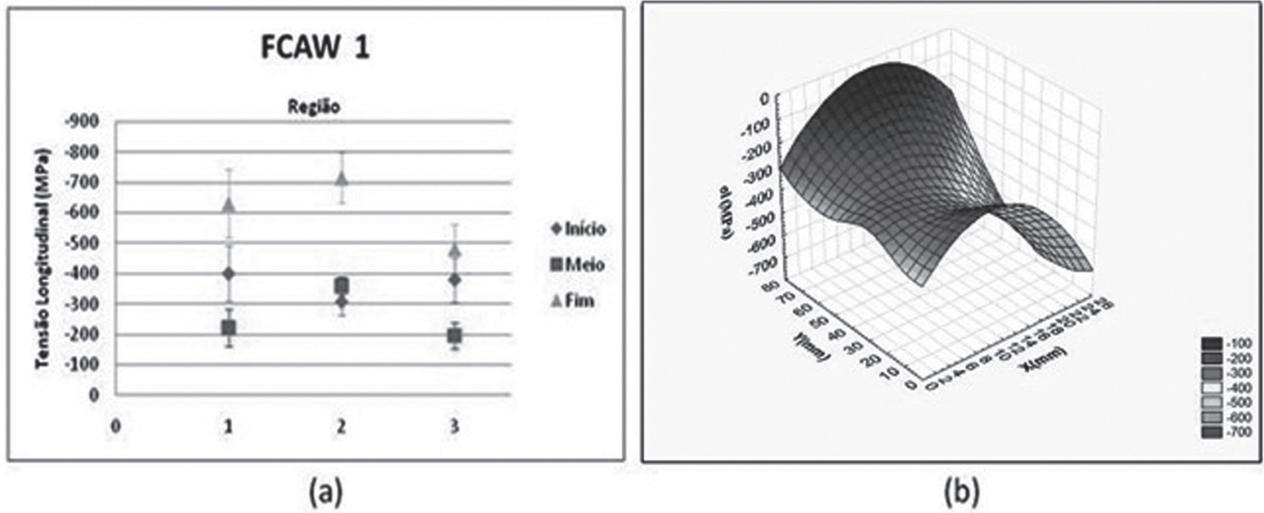


Figura 4. Valores médios de tensões residuais longitudinais e suas respectivas incertezas (a); Campo de tensões residuais longitudinais para o revestimento FCAW – 1 (b).

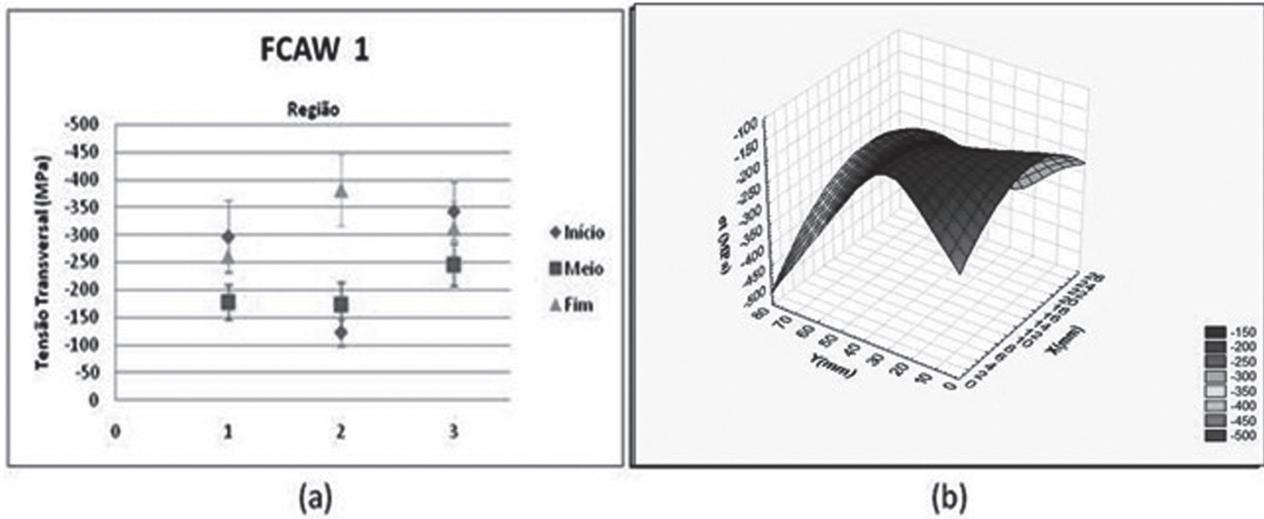


Figura 5. Valores médios de tensões residuais transversais e suas respectivas incertezas (a); Campo de tensões residuais transversais para o revestimento FCAW -1 (b).

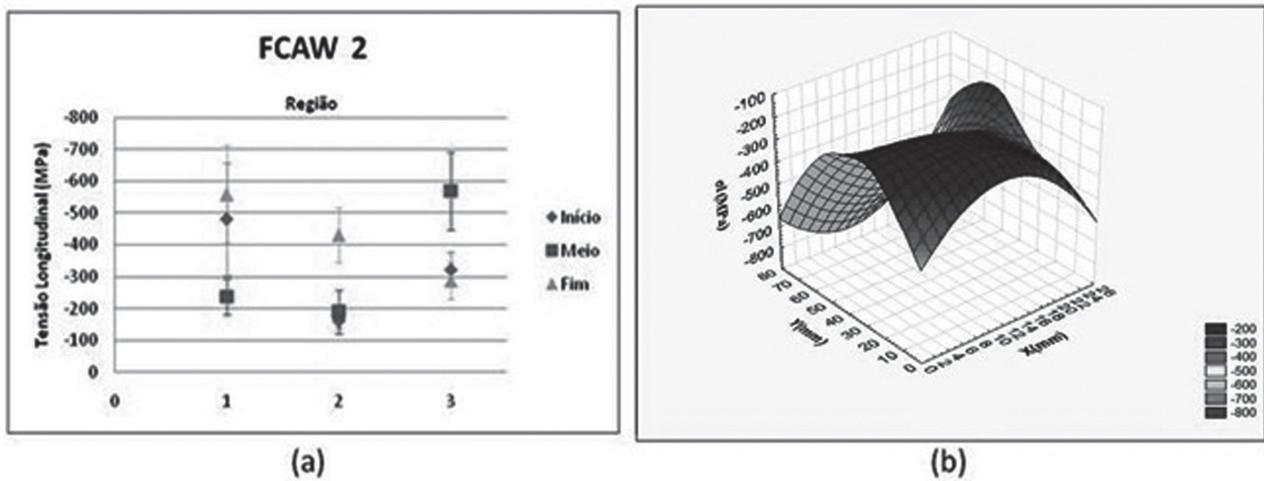


Figura 6. Valores médios de tensões residuais longitudinais e suas respectivas incertezas (a); Campo de tensões residuais longitudinais para o revestimento FCAW – 2 (b).

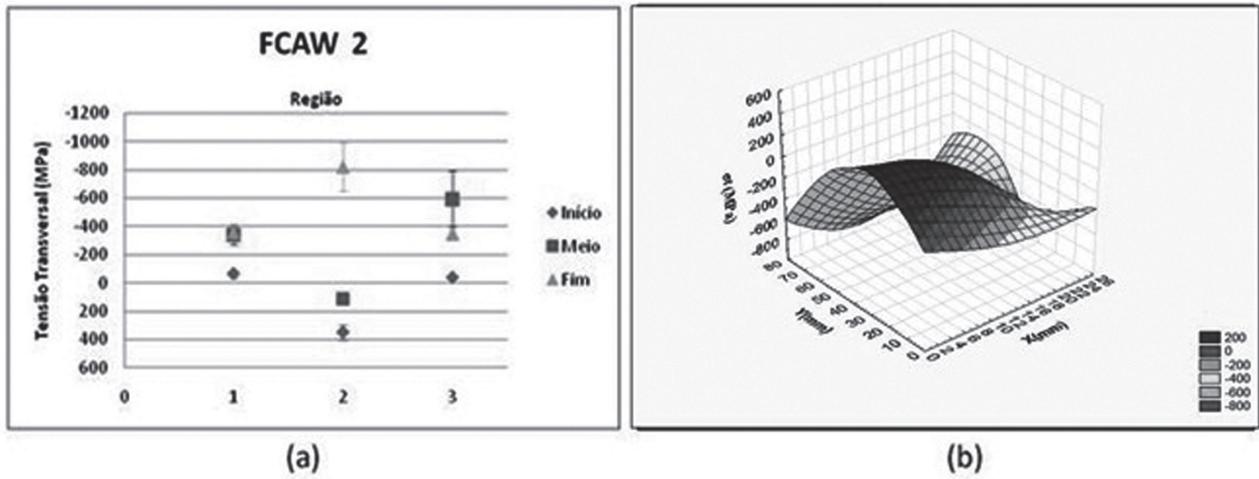


Figura 7. Valores médios de tensões residuais transversais e suas respectivas incertezas (a); Campo de tensões residuais transversais para o revestimento FCAW – 2 (b).

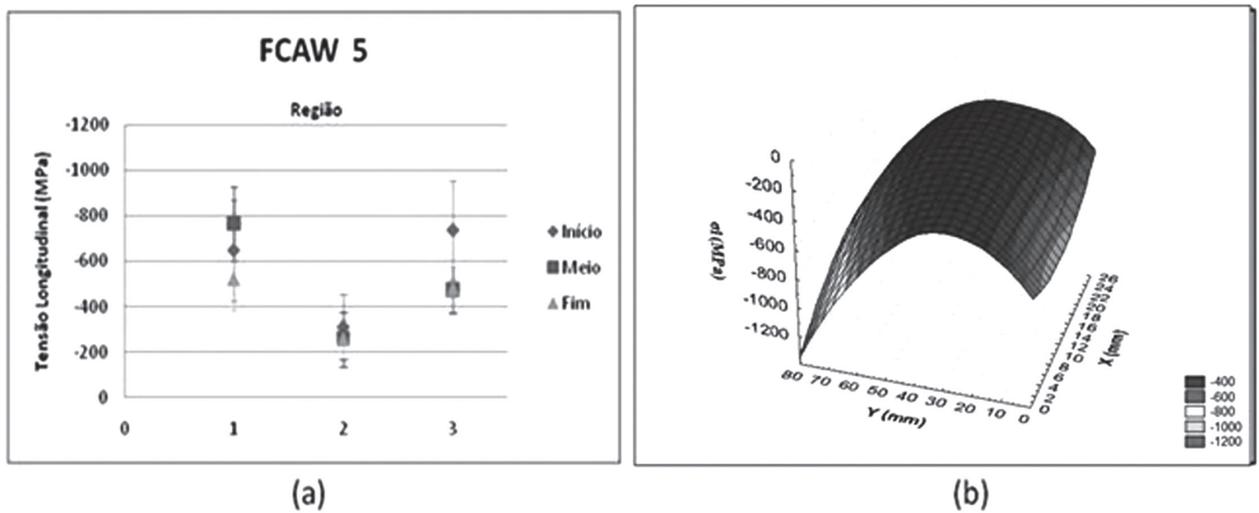


Figura 8. Valores médios de tensões residuais longitudinais e suas respectivas incertezas (a); Campo de tensões residuais longitudinais para o revestimento FCAW – 5 (b).

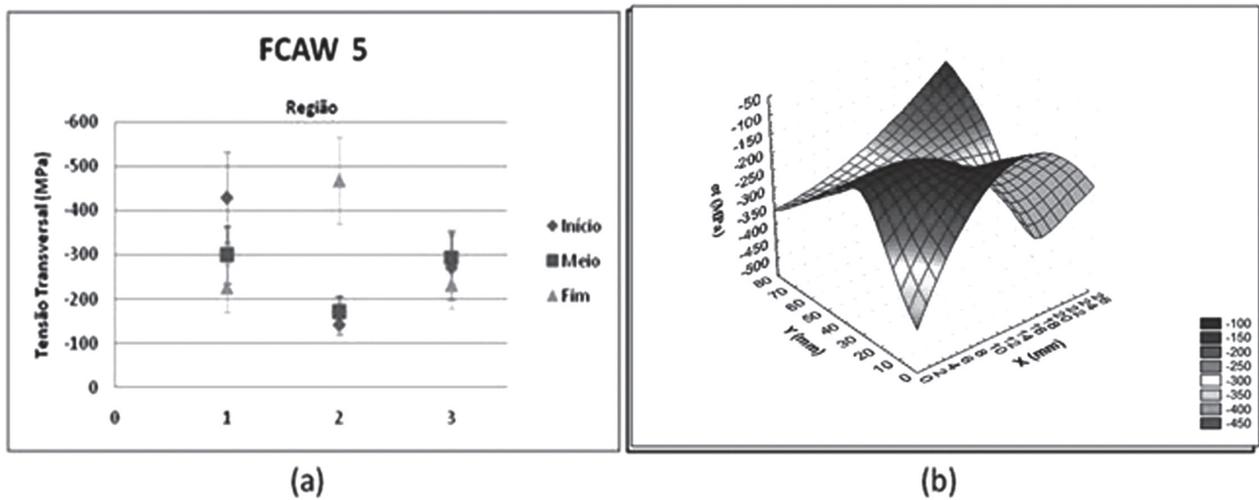


Figura 9. Valores médios de tensões residuais transversais e suas respectivas incertezas (a); Campo de tensões residuais transversais para o revestimento FCAW – 5 (b).

3. Resultados

Nas Figuras 4 a 9 estão plotados os campos de tensões residuais longitudinais e transversais para os revestimentos FCAW – 1, 2 e 5, estes revestimentos foram escolhidos, pois apresentam energias de soldagem desde muito baixas ($H_5=10,97$ kJ/cm) até energias muito altas ($H_2=26,19$ kJ/cm), passando por um nível de energia de soldagem intermediário ($H_1=19,65$ kJ/cm). As regiões 1, 2 e 3, bem como o início, meio e fim do revestimento estão ilustrados na Figura 3.

A partir destes gráficos nota-se que a região central dos revestimentos é mais compressiva que a periferia e que o campo de tensões residuais evolui de tensões compressivas, no início do revestimento, para tensões compressivas de menor magnitude e novamente volta a tornar-se bastante compressivo, no final do revestimento. Resultados da literatura [12, 13] indicam que as ligas 18-8 (%Cr-%Ni) apresentam maior variação das tensões residuais ao longo da largura do cordão de solda. Tais flutuações indicam que as tensões residuais não são constantes nas áreas irradiadas.

A Figura 4 (a) mostra que o máximo valor de tensão residual longitudinal foi da ordem de 700 MPa, em módulo, na região 2 no final do revestimento. O mínimo valor, em módulo, foi de 200 MPa, nos cordões 1 e 3 do meio do revestimento. Já a Figura 5 (a) mostra que as tensões residuais transversais são menores, em módulo, do que as longitudinais. O máximo valor de tensão residual transversal foi de 380 MPa, contra 700 MPa (tensão residual longitudinal) na mesma região.

Verifica-se na Figura 7 (a) a presença de tensões residuais trativas no início e meio do revestimento no cordão do centro, evoluindo posteriormente para um estado de tensões compressivas no fim do revestimento. Bezerra et al. [14] levantou a hipótese de que defeitos de soldagem, como descontinuidades e falta de fusão do metal de solda podem contribuir para justificar a presença destas tensões trativas nestas regiões.

As Figuras 8 e 9 apresentam uma distribuição do campo de tensões residuais semelhante aos revestimentos anteriores, apesar de a magnitude dos valores de tensão residual mudar significativamente em função do maior valor de energia de soldagem com que estes revestimentos foram aplicados. Cardoso [15] identificou que juntas submetidas a diferentes energias de soldagem têm distribuições similares de tensão residual na superfície, no entanto podem apresentar magnitudes diferentes de tensões.

Neste trabalho pôde-se notar, portanto que há uma tendência na distribuição das tensões residuais sejam elas longitudinais ou transversais. A natureza da distribuição das tensões residuais está intimamente ligada à natureza do arco elétrico de soldagem característico de cada processo [16].

A Tabela 3 apresenta os valores de tensões residuais longitudinais e transversais médias e seus respectivos desvios, bem como os coeficientes de variação.

Tabela 3. Tensões residuais médias para todas as condições de soldagem com processo FCAW.

	Longitudinais (MPa)			Transversais (MPa)		
	Média	Desvio	CV	Média	Desvio	CV
1	-410	68	0,1658	-257	44	0,1712
2	-344	88	0,2558	-233	70	0,3004
3	-373	74	0,1984	-260	54	0,2077
4	-591	143	0,2420	-278	54	0,1942
5	-494	144	0,2915	-167	63	0,3772
6	-498	110	0,2209	-286	53	0,1853
7	-393	119	0,3028	-250	57	0,2280
8	-470	111	0,2362	-361	75	0,1847
9	-506	142	0,2806	-195	65	0,3333
10	-456	109	0,2390	-251	110	0,4382
11	-390	107	0,2744	-241	65	0,2697

A Tabela 3 nos dá uma ideia da magnitude das tensões residuais longitudinais e transversais médias nos revestimentos. Vale ressaltar que as tensões residuais transversais são de menor magnitude do que as tensões residuais longitudinais, corroborando com os resultados de KOU [7]. Todos os coeficientes de variação (CV) observados são próximos a 0,3; como critério de aceitação neste trabalho foi estabelecido que valores de CV menores que 0,5 são necessários para expressar a média de forma representativa, e que valores de CV próximos de 0,3 são considerados ótimos.

A natureza das tensões residuais médias nos revestimentos foi compressiva, no entanto, observou-se durante as análises pontuais tensões residuais trativas, indicando a provável presença de defeitos de soldagem. A natureza compressiva das tensões nestes revestimentos pode ser explicada devido a uma característica física do metal de adição envolvido, o aço inoxidável austenítico. Durante o processo de solidificação do aço inoxidável austenítico ele passa por duas transformações de fase, a primeira de metal líquido para a ferrita δ , estrutura cúbica de corpo centrado, a segunda transformação é da ferrita δ para a austenita, que tem estrutura cúbica de face centrada. Nesta última transformação há uma expansão das células unitárias, uma vez que o parâmetro de rede da estrutura c.f.c é maior que o da c.c.c [17]. Esta expansão frente ao substrato de natureza ferrítica que tende a contrair durante o processo de solidificação localizada na zona fundida, aliado à discrepância entre o coeficiente de expansão térmica do aço inoxidável ($17 - 19 \text{ mm m}^{-1} \text{ K}^{-1}$) e o substrato estrutural gera tensões residuais compressivas na superfície do revestimento [12, 13 e 18].

A Figura 10 ilustra a influência da energia de soldagem sobre o nível de tensões residuais.

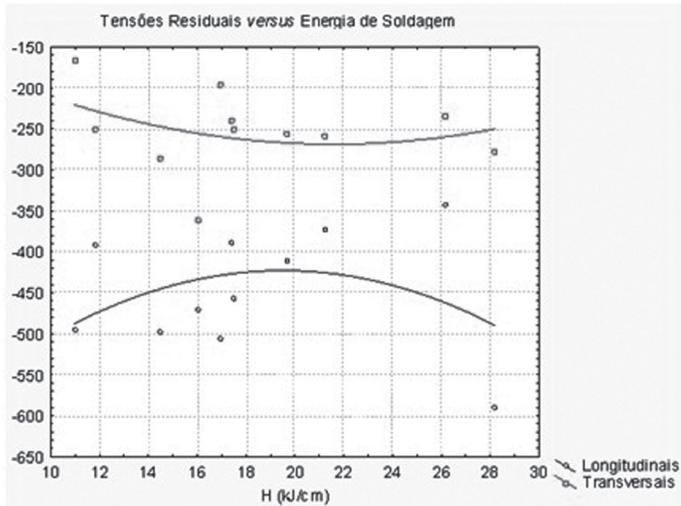


Figura 10. Influência da energia de soldagem sobre o nível de tensões residuais longitudinais e transversais, e a interação entre os níveis de tensões no processo FCAW.

Neste trabalho, os resultados não indicam uma relação linear entre os níveis de tensões residuais e os valores de energia de soldagem. Esta não linearidade pode ser atribuída aos fenômenos competitivos regidos pela energia de soldagem e que influenciam diretamente a magnitude e a natureza das tensões residuais, como:

- A fração volumétrica de ferrita δ presente no metal de solda, cuja quantidade é proporcional a energia de soldagem [19]. A partir daí pode-se levantar a hipótese de que a presença de ferrita δ pode induzir tensões residuais compressivas presentes no metal de solda;
- O tamanho da poça de fusão, onde uma maior restrição é

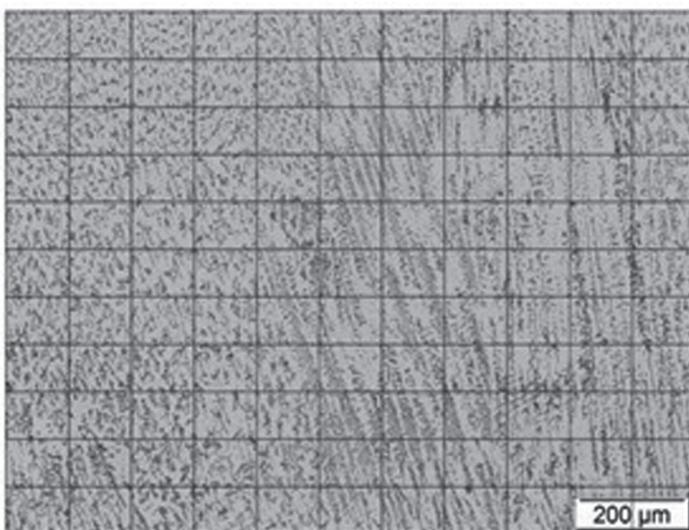
imposta aos conjuntos soldados com menor energia, já que os mesmos não apresentam grandes penetrações, o que resulta em um grande volume do conjunto que permanece sólido durante a soldagem aumentando assim a restrição imposta e, conseqüentemente, elevando o nível de tensões residuais;

- Corpos de prova soldados com maiores energias apresentam um grande volume de material depositado o que resulta em maiores níveis de tensões residuais.

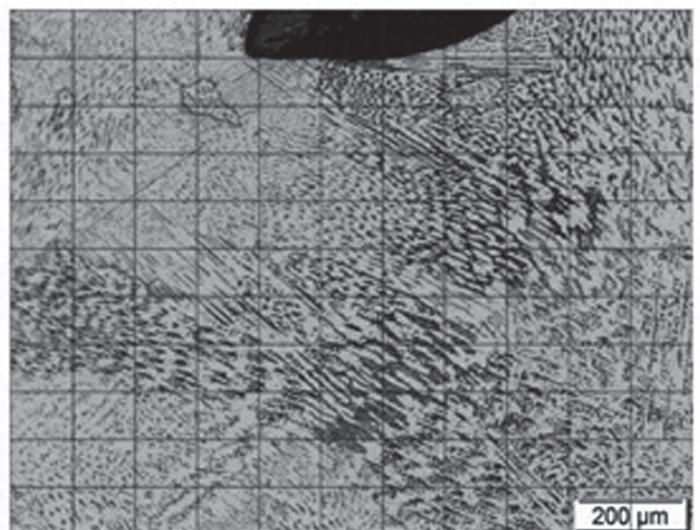
A Figura 11 apresenta a fração volumétrica de ferrita δ , avaliada de forma qualitativa pelo método das malhas [20]. O revestimento CP 5 foi aplicado com energia de soldagem $H=10,97$ kJ/cm, esta condição de soldagem apresentou 23 nós da malha sobre a ferrita δ . Já o CP 8 foi aplicado com energia de soldagem $H=15,99$ kJ/cm apresentando 45 nós da malha sobre a ferrita δ . De uma forma geral, pode-se notar que com o aumento da energia de soldagem ocorre um aumento da fração volumétrica de ferrita δ presente no metal de solda. Cruzando as informações da Tabela 3 com as da Figura 11 nota-se que este aumento resulta em uma ligeira redução das tensões residuais longitudinais e há um aumento acentuado das tensões residuais transversais.

Sendo assim, para o intervalo de baixas a médias energias de soldagem a magnitude das tensões residuais longitudinais diminui com o aumento da energia de soldagem devido ao aumento da fração volumétrica de ferrita δ presente no metal de solda. No entanto, ocorre um aumento acentuado das tensões residuais transversais.

Ainda pode-se inferir que quando as tensões residuais longitudinais tornam-se menos compressivas as tensões residuais transversais tendem a tornarem-se mais compressivas, a fim de manter um equilíbrio entre as tensões.



(a)



(b)

Figura 11. Fração volumétrica de ferrita δ no metal de solda dos corpos de prova CP 5 (a) e CP 8 (b).

4. Conclusões

- As tensões residuais superficiais nos revestimentos aplicados foram predominantemente compressivas. A região central dos revestimentos sempre se apresentou menos compressiva que a periferia;
- Não foi observada uma relação linear entre a magnitude das tensões residuais e a energia de soldagem devido aos fenômenos competitivos como a precipitação de ferrita δ no metal de solda e o volume de material depositado quando da aplicação dos revestimentos utilizando grandes energias de soldagem;
- De uma forma geral a microestrutura observada no metal de solda foi austenítica com ferrita δ , e a fração volumétrica de ferrita δ pode possivelmente ter uma influência significativa sobre a magnitude das tensões residuais.

5. Agradecimentos

À Capes pela concessão da bolsa de mestrado e à Finep e Petrobrás pelo financiamento do projeto.

6. Referências Bibliográficas

[1] TELLES, Pedro Carlos da Silva. *Materiais para Equipamentos de Processo*, 6. ed., Rio de Janeiro: Inteciência, 2003. 276 p.

[2] SILVA, et al., *Caracterização de Solda de Revestimento de AWS 317L Depositados por GMAW Duplo Arame em Aços ASTM A 516 Gr 60 para Uso na Indústria do Petróleo*, *Soldagem & Inspeção*, São Paulo, v.15, n.3, p.225-233, Jul/Set 2010.

[3] NOURI, M.; ABDOLLAH, A.; MALEK, F. Effect of Welding Parameters on Dilution and Weld Bead Geometry in Cladding. *Journal of Materials Sciences & Technology*, v. 23, n. 6, p.817-822, 2007.

[4] PALANI, P. K.; MURUGAN, N.. Optimization of weld bead geometry for stainless steel claddings deposited by FCAW. *Journal of Materials Processing Technology*, v. 190, n. 7, p.291-299, 2007.

[5] MACHADO, Ivan Guerra. *Soldagem & Técnicas Conexas: processos*. Porto Alegre: editado pelo autor, 1996. 477p.

[6] SILVA, C. C.; NETO, A. B. S.; SILVA, F. D. A.; JÚNIOR, F. E. S. F.; FARIAS, J. P. 2008, “Soldagem de Tubos de Aço ASTM A106 Gr. B para serviço em alta temperatura – Parte 1- Análise das Tensões Residuais” *Soldagem & Inspeção*, vol 13, p. 128 – 140.

[7] KOU, S. *Welding Metallurgy*, 2nd Ed., John Wiley & Sons, 2002.

[8] MASUBUCHI, K., 1983, *Residual stress and distorsion*, *Metals Handbook*, 9th ed., vol 6. Metals Park, OH, American Society for Metals – ASM.

[9] ASM. *Welding, Brazing and Soldering*. 11 Ed. Ohio: ASM International, v. 6. 1993b.

[10] FRANCIS, J.A.; STONE, H.J.; KUNDU, S.; ROGGE, R.B.; BHADSHIA, H.K.D.H.; WITHERS, P.J.; KARLSSON, L. Transformation Temperatures and Welding Residual Stresses in Ferritic Steels. In: *Proceedings of PVP2007 2007 ASME Pressure Vessels and Piping Division Conference*. July 22-26,

2007, San Antonio, Texas.

[11] HAUKE, V., *Structural and Residual Stress Analysis by Nondestructive Methods*, Elsevier, Amsterdam, 1997.

[12] KANNENGIESSER, T. KROMM, A. Formation of Welding Residual Stresses in Low Transformation Temperature (LTT) Materials. *Soldagem & Inspeção*. V. 14. N. 01. P 74-81. Jan/Mar. 2009.

[13] DEY, H. C., BHADURI, A. K., MAHADEVAN, S., JAYAKUMAR, T., SHANKAR, V., RAO, B. P. S. Residual Stress Distribution in Hardfaced Austenitic Stainless Steel Sleeves. *Trans. Indian Inst. Met.* V. 57. P 271-276, Jun. 2004.

[14] BEZERRA, A. C., SCOTTI, A., RADE, D. A. Efeito do preaquecimento sobre as tensões residuais de soldagem, *Revista Soldagem & Inspeção*, vol II, nº 1, Jan/Mar, Associação Brasileira de Soldagem, São Paulo, SP, Brasil.

[15] CARDOSO, F. I. B. *Avaliação do Desempenho do Aço AISI 317L como “Lining” para Torres de Destilação*. 2008. 304p. Tese (Doutorado em Engenharia Mecânica), Departamento de Engenharia Mecânica, Centro de Tecnologia, Universidade Federal da Paraíba, João Pessoa.

[16] GUIMARÃES, P. B., PEDROSA, P. M. A., YADAVA, Y. P. BARBOSA, J. M. A., FERREIRA, R. A. S. Determinação das Tensões Residuais a Partir de um Campo de Temperatura Obtido Numericamente. In: *VI Congresso Nacional de Engenharia Mecânica (CONEM)*, 9, 2010. Campina Grande. *Anais do VI CONEM*. Campina Grande, Paraíba. 2010, CD-ROM.

[17] BHADSHIA, H. K. D. H. *Materials Factors*. ASM International, p. 1-10, 2001.

[18] BHADSHIA, H. K. D. H. Developments in Martensitic and Bainitic Steels: Role of the Shape Deformation. *Materials Science and Engineering A*, vol. A378, p. 34-39, 2004.

[19] MELO, R. H. F., COSTA, J., SANTANA, R. A. C., MACIEL, T. M. Microestrutura, microdureza e caracterização da composição química de revestimentos aplicados pelo processo FCAW. In: *XXXVIII CONSOLDA*, 10, 2012. Ouro Preto, Minas Gerais.

[20] COLPAERT, H. *Metalografia dos Produtos Siderúrgicos Comuns*. 6 ed. São Paulo: Blücher, 2010. 600p.