

Avaliação das Tensões Residuais em Tubos de Pequeno Diâmetro Soldados pelo Processo TIG Orbital

(Residual Stress Evaluation in Small Diameter Pipes Welded Using Orbital TIG Process)

George Luiz Gomes de Oliveira¹, Hélio Cordeiro de Miranda¹, Jesualdo Pereira Farias¹

¹ Universidade Federal do Ceará, Departamento de Engenharia Metalúrgica e de Materiais, Fortaleza, Ceará, Brasil, gl.oliveira@metalmat.ufc.br, hmiranda@ufc.br, jpf@secrel.com.br

Resumo

O objetivo desse trabalho é avaliar o efeito da soldagem TIG orbital sobre o nível de tensões residuais da junta, sobre a microestrutura resultante e sobre o aspecto superficial do cordão de solda, considerando os efeitos da energia de soldagem, do número de passes e do tipo de pulsação (corrente e rotação) em tubos de pequeno diâmetro e contribuir para a análise de decisões de se aplicar ou não testes hidrostáticos ou TTPS. Os corpos de prova soldados com diferentes níveis de energia, pulsação e número de passes foram submetidos à medição de tensões residuais em um difratômetro de Raios-X. As amostras também foram submetidas a análises metalográficas. Conclui-se que as tensões residuais na superfície externa dos tubos são de caráter compressivo. O nível de tensões residuais nos tubos cai com o aumento da energia de soldagem e é menor para tubos soldados utilizando pulsação do que com os soldados sem pulsação e, para esse trabalho, não foi influenciado substancialmente pelo número de passes. As amostras analisadas apresentaram microestruturas convencionais para o aço empregado.

Palavras-chave: Tensões residuais; TIG Orbital; Difração de Raios-X.

Abstract: This work aims in evaluate the effect of orbital TIG welding on the joint's residual stress level, the final microstructure and the superficial aspect of the weld file, observing the welding energy, number of passes and the type of pulsation effects in small diameter pipes. The test specimens were welded with different energy, pulsation and number of passes levels and after that it were submitted to residual stress measurement in a X-Ray diffractometer, samples were extracted from the test specimens and it were submitted to metallographic analysis. The ending of this work is that: residual stress in the pipes outer surface are compressive, residual stress level in pipes goes down with increasing welding energy, it is smaller for pipes welded with pulsation and in this work it were not effectively influenced by number of passes. Metallographic analyses have shown expected microstructures for the employed material.

Key-words: Residual Stress; Orbital TIG Welding; X-Ray Diffraction.

1. Introdução

Na indústria petrolífera, reparos, serviços de manutenção e ampliações sempre envolvem o manuseio de milhares de toneladas de tubulações de aço carbono e inoxidável. A união de conexões nestas tubulações gera tensões residuais que podem comprometer a segurança operacional da unidade, sendo algumas vezes necessária a realização de testes hidrostáticos ou tratamentos térmicos pós soldagem (TTPS) para alívio das mesmas.

A intensidade e as direções de atuação das tensões residuais em tubulações soldadas estão diretamente relacionadas com o

procedimento de soldagem. Os aspectos mais importantes são: o gradiente térmico, que depende da energia de soldagem, e a seqüência da execução da solda. Desta forma, através de um ajuste correto do processo, com o adequado controle do ciclo térmico de soldagem e da seqüência de execução da solda, acredita-se que seja possível obter níveis aceitáveis de tensões residuais para as tubulações soldadas sem a necessidade de realização de teste hidrostático ou TTPS, o que reduziria consideravelmente o tempo e os custos envolvidos nas suas operações de fabricação e manutenção.

Neste contexto, este trabalho almeja avaliar o nível de tensões residuais em função das variáveis de soldagem, bem como a microestrutura e o aspecto visual do cordão de solda TIG orbital em amostras de tubos de pequeno diâmetro e contribuir para a análise de decisões sobre a aplicação ou não de testes hidrostáticos ou TTPS.

(Recebido em 03/04/2008; Texto Final em 11/02/2009).

Tabela 1. Composição química e propriedades mecânicas do aço AISI 1020.

Composição, peso %				Propriedades Mecânicas	
C	Mn	P	S	Resistência à tração (MPa)	400
0,19	0,4	0,04	0,05	Resistência ao escoamento (MPa)	255
				Alongamento (%)	36

2. Materiais e Métodos

2.1. Material

Neste trabalho foram utilizados tubos de aço AISI 1020 “Schedule 40”, com 33,4 mm de diâmetro, 3,4 mm de espessura. A composição química e principais propriedades mecânicas desse material são mostradas na Tabela 1.

2.2. Procedimento Experimental

O desenvolvimento do trabalho foi dividido em três etapas principais: soldagem dos corpos de prova, medição das tensões residuais e caracterização microestrutural das juntas soldadas.

2.2.1. Soldagem dos corpos de prova

Foram confeccionados corpos de prova de 60 mm de comprimento, soldados com junta de topo e chanfro reto.

A soldagem foi feita utilizando o processo TIG Orbital sem deposição de material (soldagem autógena) e 13 litros/min de argônio comercialmente puro como gás de proteção. O planejamento inicial foi feito visando analisar três níveis de energia de soldagem mantendo o valor de corrente média (90 A) e tensão média (13 V) constante para todos os níveis. De forma a explorar as possibilidades de utilização do equipamento e ainda o possível efeito da pulsação de corrente e/ou velocidade de soldagem sobre as tensões residuais geradas, optou-se ainda por utilizar três condições de pulsação: sem pulsação, com pulsação na corrente e com pulsação na corrente e na velocidade de soldagem (através da rotação aplicada ao eletrodo durante a soldagem orbital). Foram feitas soldagens com um e dois passes. A Tabela 2 apresenta o planejamento inicial do trabalho. Para todas as soldagens com pulsação foi utilizado 0,4s tanto para o tempo de base (t_b) quanto para o tempo de pico (t_p).

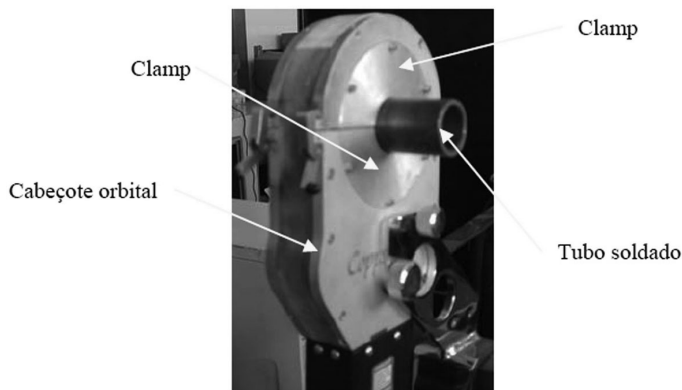


Figura 1. Cabeçote orbital utilizado na soldagem dos corpos de prova.

De forma a se garantir o grau de restrição necessária à junta, os *clamps* (fixadores) (Figura 1) utilizados para fixação e alinhamento do corpo de prova no cabeçote foram feitos com diâmetro de furo ligeiramente menor que o dos tubos. Assim o conjunto (*clamp* + tubo) foi acoplado com interferência.

Após a soldagem dos corpos de prova as amostras foram submetidas a uma análise visual, de forma a avaliar a influência da energia de soldagem, do tipo de pulsação e do número de passes sobre o aspecto superficial do cordão de solda.

Tabela 2. Planejamento experimental para execução das soldagens.

Energia de Soldagem (kJ/cm)	Tipo de Pulsação*	Número de Passes
2,3	1	1
3,9	2	2
6,5	3	

* 1- sem pulsação, 2- pulsação na corrente, 3- pulsação na corrente e na velocidade de soldagem (rotação).

2.2.2. Medição das tensões residuais

Após serem feitas as soldagens, os corpos de prova foram submetidos a uma remoção de camada superficial por meio de um ataque eletrolítico, de forma a garantir que as tensões residuais medidas fossem resultado apenas do ciclo térmico de soldagem e não de deformações plásticas localizadas pré-existentes no material, o que poderia comprometer os resultados medidos.

Após feita a remoção da camada superficial as amostras soldadas foram levadas ao difratômetro de Raios-X *X'Pert Pro X-Ray* da Philips onde foram feitas as medições de tensões residuais superficiais utilizando o método-sen² ψ para determinação da deformação da rede cristalina e, conseqüentemente, das tensões residuais no material. Neste método a bissetriz do ângulo entre o feixe incidente e o difratado é inclinada de um ângulo ψ em relação a normal à superfície da peça (Figura 2). Em cada ponto foram determinados os picos de difração para sete valores de ângulo ψ (0°, 20.7°, 30°, 37.76°, 45°, 52.24°, 60°). Esta variação no ângulo ψ é essencial para materiais policristalinos, uma vez que este apresenta, geralmente, muitos grãos orientados de forma aleatória. Foi utilizado tubo de cromo (comprimento de onda de 2,2897 Å), tensão de 35 kV e corrente de 50 mA. Após a coleta dos dados o programa *X'Pert Organizer* era utilizado para recolher os dados dos sete scans e organizá-los de forma que os mesmos fossem interpretados através do programa *X'Pert Stress Measurement* que transformava os dados obtidos em valores de tensão.

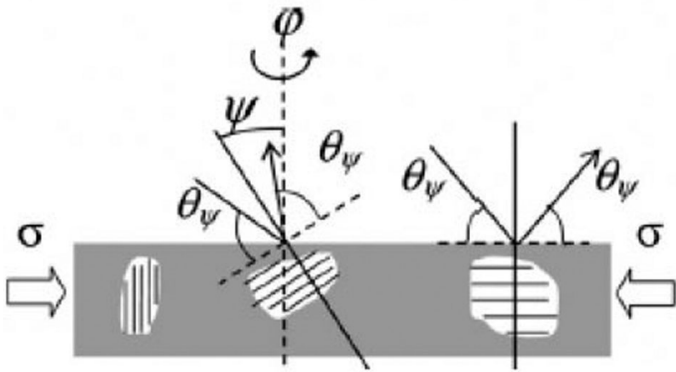


Figura 2. Conceito da análise de difração em materiais policristalinos [1].

As medições de tensão residual foram feitas na região correspondente a posição de soldagem plana para todos os tubos analisados. Para cada amostra foram medidos cinco pontos que se distribuíam ao longo da região atacada, sendo colocado um ponto no centro do metal de solda, outros dois a dois milímetros à direita e à esquerda do final do cordão de solda (região da ZAC) e outros dois a seis milímetros à direita e à esquerda do final do cordão de solda (MB), possibilitando assim o levantamento do perfil de tensões residuais nesta região. A disposição dos pontos analisados pode ser vista na Figura 3.

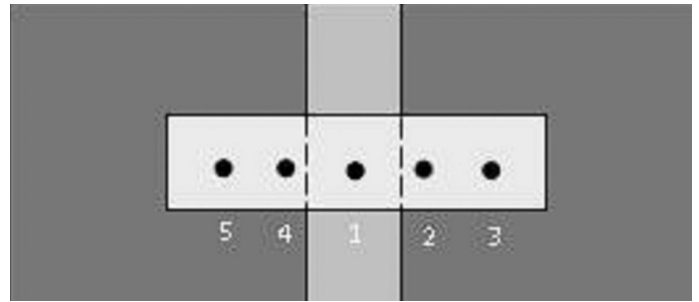


Figura 3. Disposição dos pontos medidos ao longo da região atacada.

2.2.3. Caracterização Microestrutural das juntas soldadas

Uma vez feita a medição de tensões residuais, os tubos foram cortados em sua seção transversal, lixados, polidos e atacados quimicamente para possibilitar uma avaliação do efeito do ciclo térmico de soldagem sobre a microestrutura resultante dos tubos soldados.

3. Resultados e Discussão

3.1. Análise visual da qualidade do cordão de solda

As Figuras 4 e 5 mostram alguns resultados de aspecto superficial das amostras soldadas.

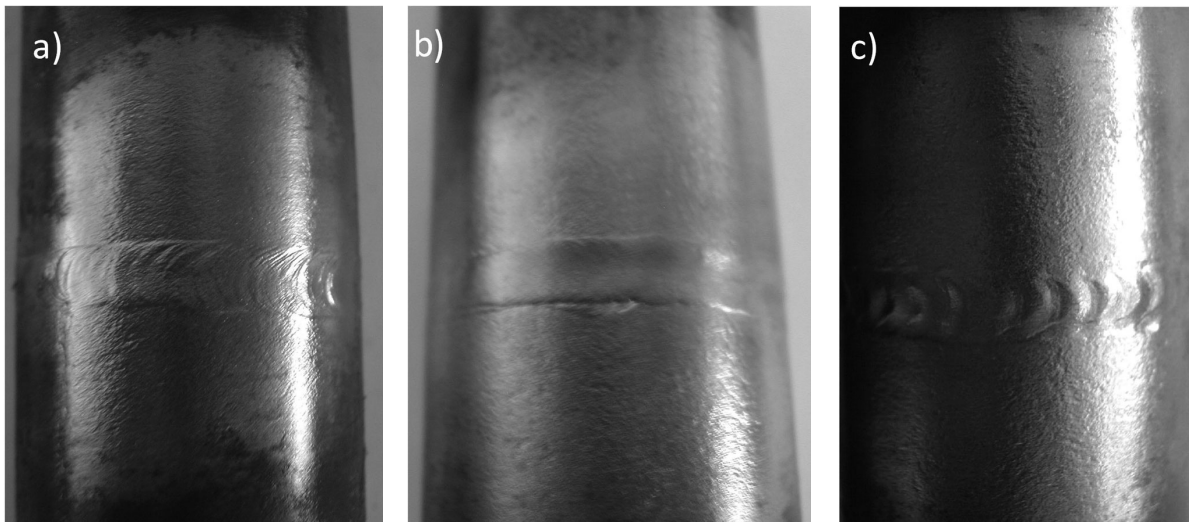


Figura 4. Aspecto visual do cordão de solda. (a) Energia de 3,9 kJ/cm, 1 passe e sem pulsação. (b) Energia de 3,9 kJ/cm, 2 passes e sem pulsação. (c) Energia de 2,3 kJ/cm, 2 passes e com pulsação Tipo 3.

Para as energias de 2,3 e 3,9 kJ/cm o aspecto superficial mostrou-se de boa qualidade (Figura 4), independente do tipo de pulsação e do número de passes utilizados, assim para esse trabalho apenas a energia de soldagem teve influência no aspecto superficial do cordão de solda.

As amostras soldadas com energia de 6,5 kJ/cm (Figura 5) foram submetidas a uma elevada energia que fez com que o metal de solda escoasse, em função do peso do metal líquido, antes que pudesse ser solidificado (maiores energias geram menores velocidades de resfriamento e, conseqüentemente, menores taxas de solidificação) independente do tipo de pulsação e do número de passes utilizados durante a soldagem, acarretando em

um cordão defeituoso e com aspecto superficial ruim.

3.2. Medição de tensões residuais

A Tabela 3 mostra os resultados obtidos com a soldagem dos corpos de prova seguindo o planejamento apresentado na Tabela 2.

Os resultados das medições de tensões residuais estão mostrados da Figura 6 a 9. A Figura 6 apresenta alguns perfis de tensões residuais que representam os perfis de distribuição obtidos nas demais amostras. Pode ser observado que, para a grande maioria dos corpos de prova analisados as tensões

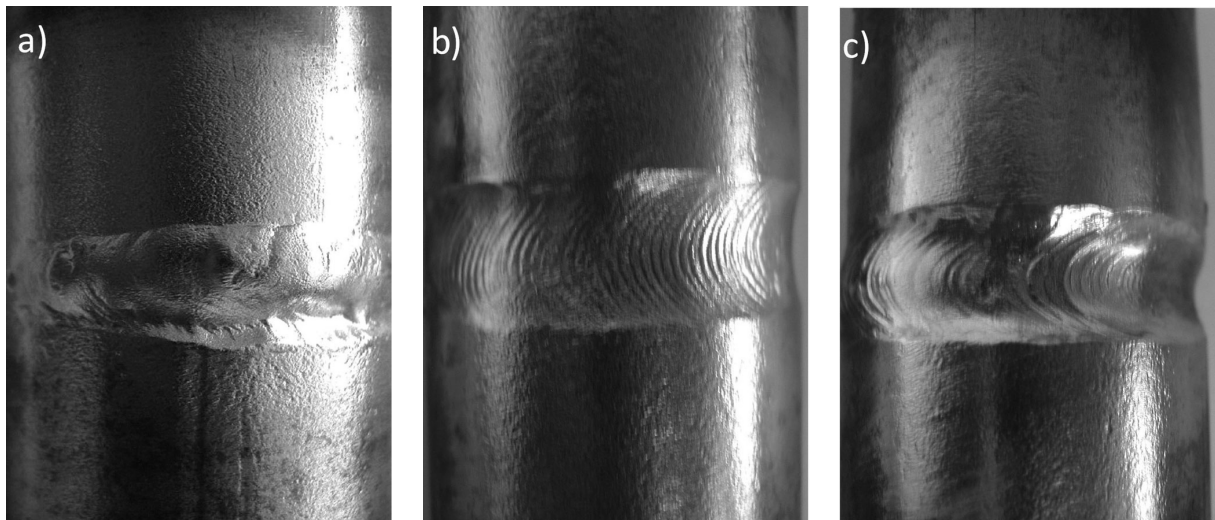


Figura 5. Aspecto visual do cordão de solda para as amostras soldadas com 6,5 kJ/cm de energia. a) sem pulsação e 1 passe. b) com pulsação Tipo 2 e 2 passes. c) com pulsação Tipo 3 e 2 passes.

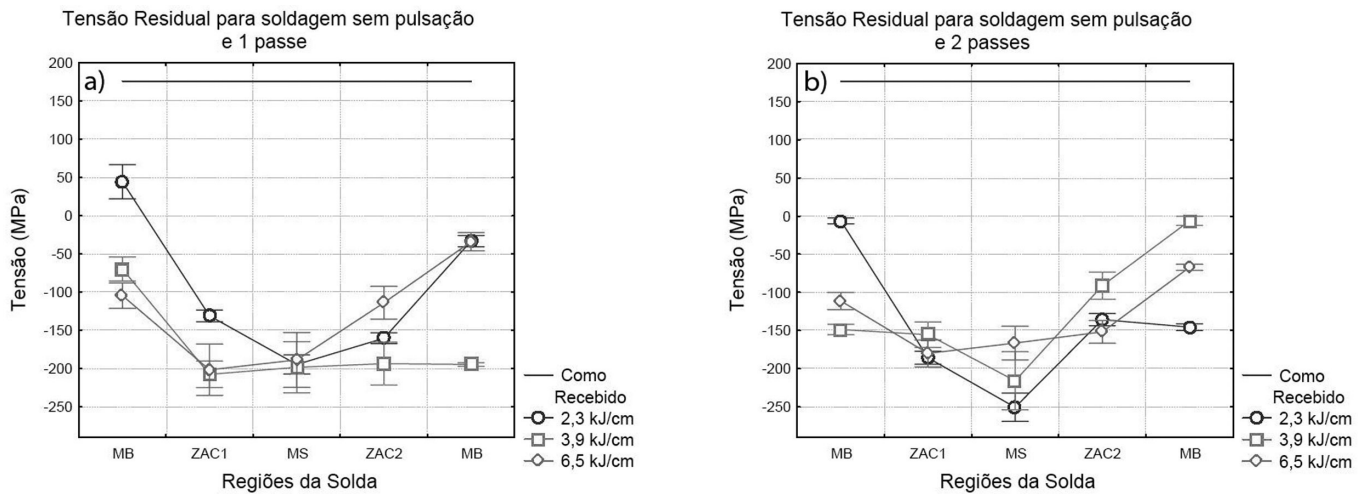


Figura 6. Perfis de tensões residuais mostrando a influência da energia de soldagem em amostras soldadas sem pulsação. a) 1 passe. b) 2 passes.

Tabela 3. Resultados obtidos com a soldagem dos corpos de prova seguindo o planejamento inicial.

Corpo de prova	Energia Teórica (kJ/cm)	Energia Eficaz (kJ/cm)	Corrente Eficaz (A)	Rotação base (rpm)	Rotação pico (rpm)	Nº de Passes	Condição de pulsação	Tensão Residual MS* (MPa)	Tensão Residual ZAC* (MPa)
01	2,3	2,3	90	1,91	1,91	1	1	196,7	145,7
02	2,3	2,6	100,4	1,91	1,91	1	2	141,1	40,7
03	2,3	2,6	100,4	0,47	3,39	1	3	133,8	97,75
04	3,9	3,9	90	1,11	1,11	1	1	198,5	200,7
05	3,9	4,5	100,4	1,11	1,11	1	2	104,0	147,8
06	3,9	4,5	100,4	0,27	1,96	1	3	197,1	153,9
07	6,5	6,5	90	0,67	0,67	1	1	188,8	157,9
08	6,5	7,1	100,4	0,67	0,67	1	2	57,4	77,0
09	6,5	7,1	100,4	0,16	1,18	1	3	11,5	72,5
10	2,3	2,3	90	1,91	1,91	2	1	250,5	160,7
11	2,3	2,6	100,4	1,91	1,91	2	2	190,0	128,7
12	2,3	2,6	100,4	0,47	3,39	2	3	214,4	106,4
13	3,9	3,9	90	1,11	1,11	2	1	215,9	123,4
14	3,9	4,5	100,4	1,11	1,11	2	2	130,5	131,6
15	3,9	4,5	100,4	0,27	1,96	2	3	135,9	119,7
16	6,5	6,5	90	0,67	0,67	2	1	166,4	165,9
17	6,5	7,1	100,4	0,67	0,67	2	2	102,7	38,5
18	6,5	7,1	100,4	0,16	1,18	2	3	48,0	56,4

* Valores médios em módulo de Tensão Residual para cada região.

residuais superficiais no metal de solda e na zona afetada pelo calor (ZAC) são compressivas e bem abaixo do valor tomado como referência de 176,3 MPa (tubo como recebido). Esse tipo de distribuição negativa (tensões compressivas) já havia sido previsto por Dike, Ortega e Cadden, 1998 [1]. Segundo estes autores tal resultado pode ser explicado pelo chamado efeito

torniquete que consiste no fato de que durante o resfriamento da poça de fusão toda a circunferência do metal de solda contrai de forma a flexionar o tubo, o que comprime a parede externa e traciona a parede interna do mesmo, como pode ser visto na Figura 10.

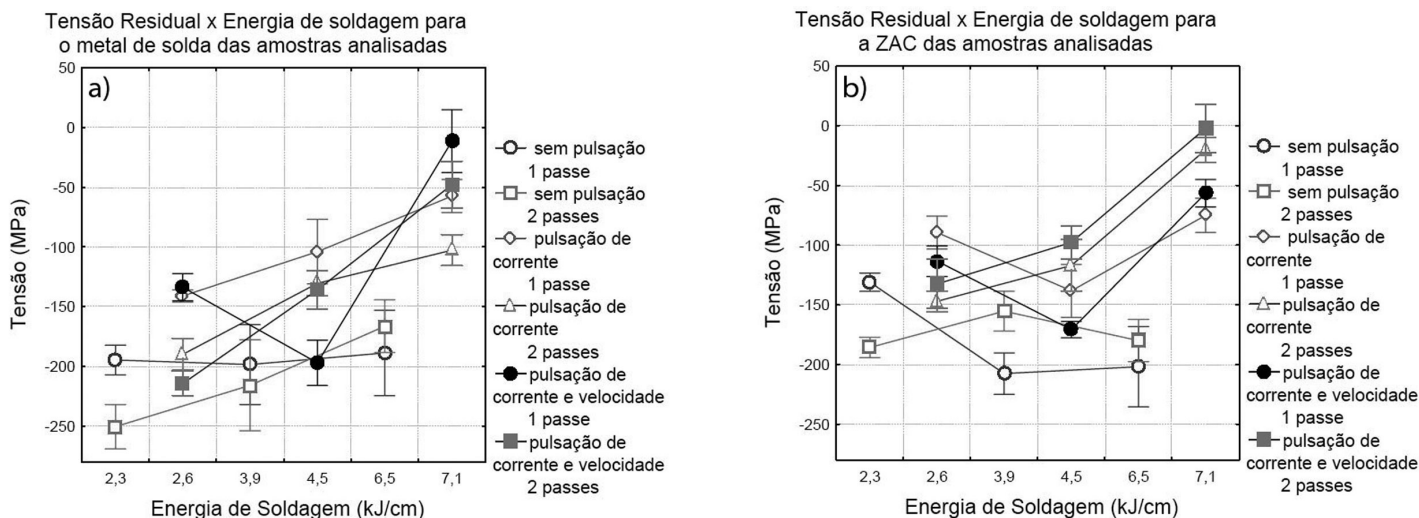


Figura 7. Comportamento do nível das tensões residuais versus energias de soldagem. a) no metal de solda. b) na ZAC das amostras utilizadas.

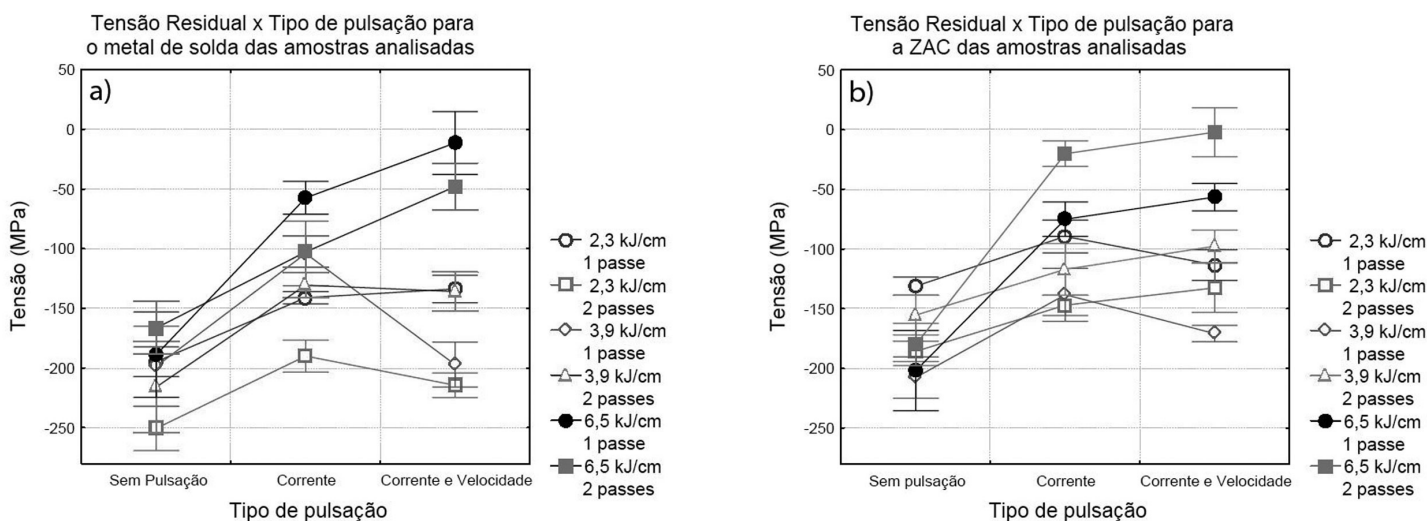


Figura 8. Comportamento do nível das tensões residuais versus tipo de pulsação. a) no metal de solda. b) na ZAC das amostras utilizadas.

O efeito da energia de soldagem sobre o nível de tensões residuais resultantes pode ser visto na Figura 7.

Deve ser observado nas Figuras 7a e 7b a existência de dois níveis de energia diferentes dos apresentados na Tabela 2, tais níveis são referentes a soldagem das amostras utilizando pulsação. Estas amostras foram soldadas com correntes eficazes maiores que as das amostras soldadas sem pulsação o que levou a pequena diferença entre a energia teórica e a eficaz apresentada na Tabela 3.

Os resultados indicam que o nível de tensões residuais se comportou de forma decrescente, em valor absoluto, com o aumento da energia de soldagem. Esse efeito da energia de soldagem está relacionado ao fato de que um maior aporte

térmico eleva o tamanho da região que deforma plasticamente devido à redução do limite de escoamento com o aumento da temperatura. Além disso, acredita-se que tal resultado também pode ser explicado pelo fato de que uma maior restrição é imposta as juntas soldadas com menor energia (2,3 e 3,9 kJ/mm) já que as mesmas não apresentavam penetração total, o que resulta em um volume circunferencial da junta que permanece sólido durante a soldagem aumentando assim a restrição imposta e, conseqüentemente, elevando o nível de tensões residuais resultante nas mesmas, o que não acontece com os corpos de prova soldadas com energia superior (6,5 kJ/mm) já que os mesmos apresentam penetração total na junta.

Os maiores níveis de energia geraram os menores valores de

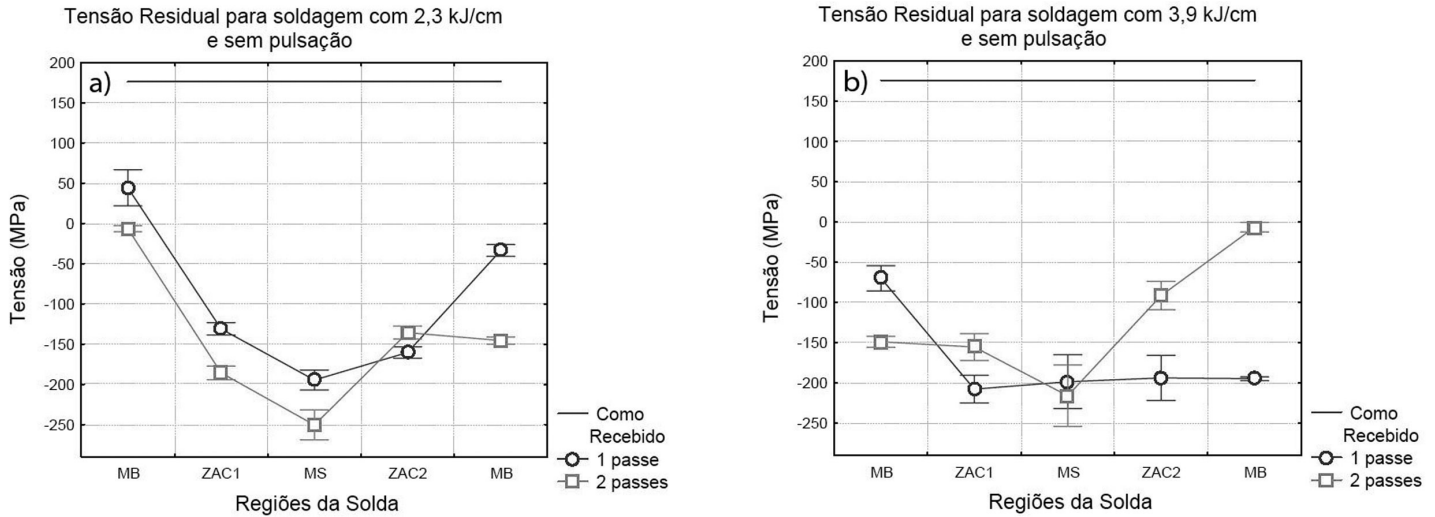


Figura 9. Perfis de tensões residuais mostrando a influência do número de passes em amostras soldadas sem pulsação. a) 2,3 kJ/cm. b) 3,9 kJ/cm.

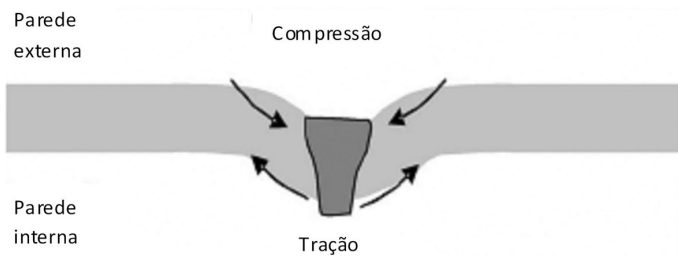


Figura 10. Efeito torniquete em tubos soldados [2].

tensão residual, no entanto, os mesmos resultaram nos cordões de solda com pior acabamento superficial. Desta forma, deve-se procurar um balanço entre estas duas características, conseguindo assim obter cordões de solda com boas propriedades.

O efeito do Tipo de pulsação sobre o nível de tensões residuais resultantes pode ser visto na Figura 8.

Nos corpos de prova soldados utilizando pulsação, tanto do

Tipo 2 quanto do Tipo 3, o nível de tensões residuais foi em sua maioria menor que para os corpos de prova soldados sem pulsação. Em trabalho que estudou a influência da soldagem TIG pulsada em aço inoxidável, Tseng e Chou [6] mostraram que amostras soldadas com pulsação apresentavam menores níveis de tensões residuais uma vez que a diferença de temperatura entre a linha de fusão e o metal base da junta soldada diminuiria com a pulsação da corrente, esse efeito diminuiria a magnitude das tensões de contração, diminuindo assim também as tensões residuais resultantes na junta. Acredita-se que outra possível explicação para esse resultado é o fato de que as amostras soldadas com pulsação apresentam uma corrente eficaz maior que a amostras soldadas sem pulsação, embora possuam a mesma corrente média. Desta forma, de acordo com os resultados que descrevem a relação entre energia de soldagem e nível de tensões residuais, as amostras soldadas com pulsação tenderiam a possuir menores níveis de tensões residuais uma vez que as mesmas teriam sido

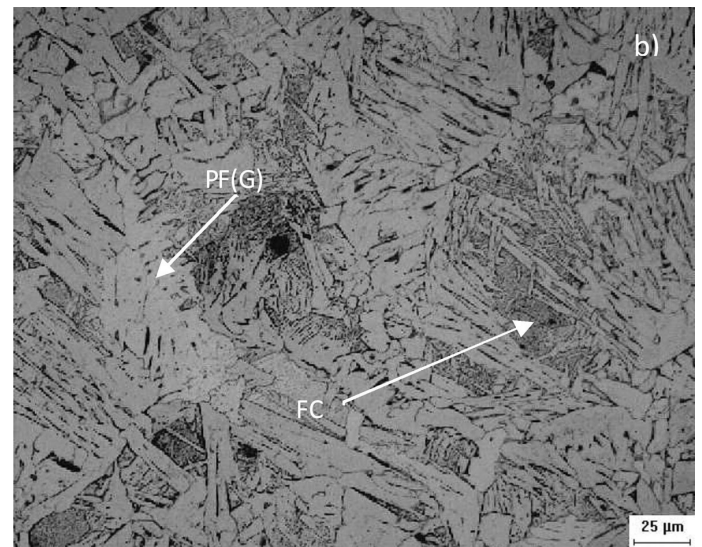
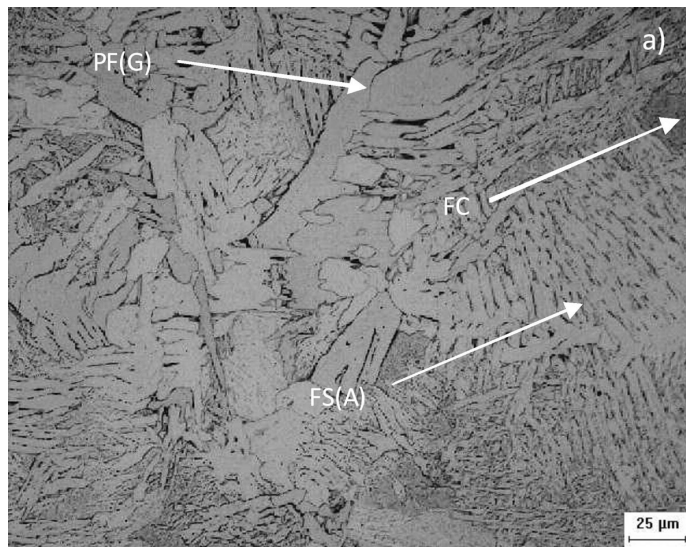


Figura 11. Caracterização microestrutural para o corpo de prova 04 após soldada. (a) ZF; (b) ZAC-GG. Energia: 3,9 kJ/cm. Sem pulsação. 1 passe. Ataque: Nital 2%. Aumento: 500X.

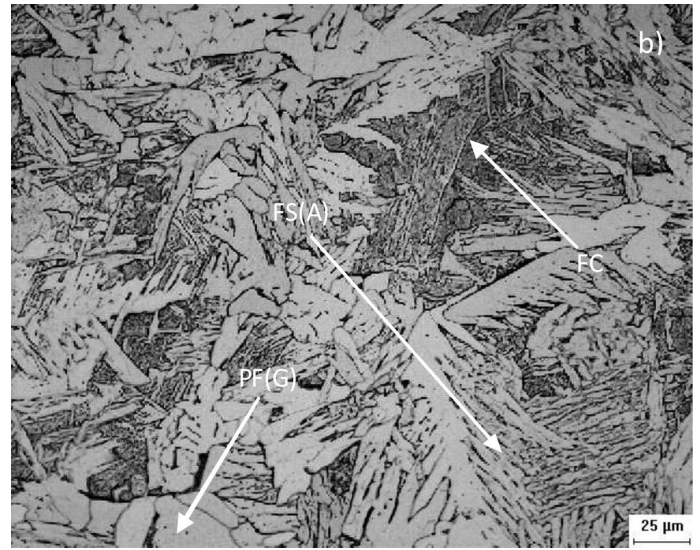
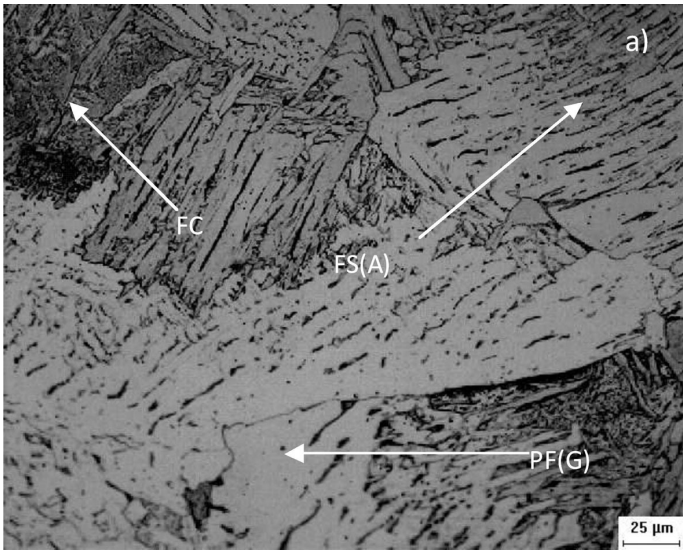


Figura 12. Caracterização microestrutural para o corpo de prova 07 após soldada. (a) ZF; (b) ZAC-GG. Energia: 6,5 kJ/cm. Sem pulsação. 1 passe. Ataque: Nital 2%. Aumento: 500X.

soldadas com valores de energia eficaz superiores as soldadas sem pulsação.

O número de passes não mostrou um resultado constante em relação o nível de tensões residuais da junta (Figura 9), sendo em muitos casos o nível de tensão menor para as amostras soldadas com dois passes do que para as amostras com apenas um passe, exceto para as amostras soldadas com 2,3 kJ/cm de energia, onde o nível de tensões residuais foi sempre menor (em valores absolutos) para a situação com apenas um passe. Pesquisas complementares deverão ser realizadas para melhor entendimento do fenômeno.

3.3. Caracterização microestrutural das juntas soldadas

A seguir são mostrados os resultados das análises microestruturais feitas em amostras retiradas dos tubos utilizados no trabalho após serem soldados, utilizando-se a classificação do IIW [3]. As Figuras 11 e 12 mostram as microestruturas da zona fundida (ZF) e da zona afetada pelo calor com granulação grosseira (ZAC-GG) para algumas amostras utilizadas.

A microestrutura da zona fundida para o corpo de prova 04 (Figura 11a) foi composta principalmente por ferrita de contorno de grão – PF(G), agregados ferrita-carbonetos - FC e ferrita com segunda fase alinhada FS(A).

A microestrutura da ZAC-GG (Figura 11b) foi constituída principalmente por agregados ferrita-carbonetos – FC e ferrita de contorno de grão.

As microestruturas obtidas com energia de 6,5 kJ/cm, sem pulsação e 1 passe (Figura 12), assim como as das demais amostras, apresentaram comportamento semelhante ao obtido para a amostra soldada com energia de 3,9 kJ/cm, sem pulsação e 1 passe (Figura 11), apresentando ferrita de contorno de grão – PF(G), agregados ferrita-carbonetos - FC e ferrita com segunda fase alinhada FS(A) tanto na zona fundida quanto na ZAC-GG.

4. Conclusões

Com base nos resultados obtidos nesse trabalho destacam-se as seguintes conclusões:

- somente a energia de soldagem afetou consideravelmente a qualidade dos cordões de solda analisados;
- as tensões residuais na superfície externa de tubos de pequeno diâmetro soldados são de caráter compressivo;
- o nível de tensões residuais em tubos de pequeno diâmetro se comporta de forma decrescente com o aumento da energia de soldagem;
- o nível de tensões residuais em tubos de pequeno diâmetro com pulsação (corrente ou corrente e velocidade) é, em sua maioria, menor que para os corpos de prova soldados sem pulsação;
- a influência do número de passes sobre o nível de tensões residuais não ficou bem caracterizada, sendo necessário trabalhos mais aprofundados para identificar corretamente essa relação;
- as microestruturas da zona fundida, ZAC-GG e ZAC-GF mostraram-se semelhantes para todas as amostras analisadas, com microestruturas já esperadas para o aço utilizado.

5. Agradecimentos

Os autores deste trabalho agradecem ao Engesolda – UFC e ao Lacam – UFC por toda infra-estrutura para a realização deste trabalho. À ANP-PRH31e CNPq pelo suporte financeiro.

6. Referências Bibliográficas

- [1] EIGENMANN, B. & MACHERAUCH, E., 1996a, Histoire et etat actuel de l'analyse des contraintes par rayons X. In: Rayons X et Matiere, Journal de Physique IV, v. 6, pp. 151-185.
- [2] DIKE J. J., ORTEGA A. R., CADDEN C. H., Finite Element

- Modeling and Validation of Residual Stresses in 304L Girth Welds, 5th International Conference on Trends in Welding Research, June 1-5, 1998, Pine Mountain, GA.[2] IIW Sub-Commission IXJ “Guide to the light microscope examination of ferritic steel weld metals”. IIW Doc. IX-1533-88, 1988.
- [3] IIW Sub-Commission IXJ “Guide to the light microscope examination of ferritic steel weld metals”. IIW Doc. IX-1533-88, 1988.
- [4] WITHERS, P. J., BHADSHIA, H. K. D. H., “Residual stress. Part 1 – Measurement techniques”. Materials Science and Technology. v. 17, pp. 355-365, 2001a.
- [5] WELDING HANDBOOK, Vol. 1, 8th ed., American Welding Society, Miami, FL, 1987, pp. 2–32.
- [6] TSENG, K. H., CHOU, C.P., “ The effect of Pulsed GTA welding on the Residual Stress of a stainless steel weldment”. Journal of Materials Processing Technology 123 (2002) 346-353.