

# Avaliação do Efeito da Energia de Soldagem sobre as Tensões Residuais Resultantes em Juntas Soldadas com Multipasse

(Welding energy input evaluation on the final residual stresses in multipass welded joints)

George Luiz Gomes de Oliveira, Thiago Ferreira da Silva, Hélio Cordeiro de Miranda, Marcelo Ferreira Motta  
Universidade Federal do Ceará, Departamento de Engenharia Metalúrgica e de Materiais, Fortaleza, Ceará, Brasil, george\_ufc@  
yahoo.com.br, thiagolam@hotmail.com, hmiranda@ufc.br, marcelof@ufc.br

## Resumo

A energia de soldagem pode ser ajustada tanto por meio do controle da potência (tensão e corrente de soldagem) quanto por meio da velocidade de soldagem. Tais formas de ajustes modificam os efeitos da energia de soldagem sobre a junta, o que pode influenciar de forma distinta as tensões residuais resultantes na mesma. Desta forma, o objetivo deste trabalho é avaliar o efeito da energia de soldagem, considerando seu ajuste através da alteração individual e independente da corrente e da velocidade de soldagem, sobre as tensões residuais resultantes em juntas soldadas com multipasse. Foram empregadas amostras de aço estrutural chanfradas em meio-v e soldadas utilizando eletrodo revestido. Aplicaram-se três energias de soldagem obtidas por meio de três níveis distintos de corrente e de velocidade de soldagem. As amostras foram levadas a um difratômetro de raios-x portátil onde foram levantados os perfis de tensões residuais na superfície das mesmas. Uma verificação importante foi que diferentes parâmetros de soldagem que resultam em aportes térmicos “iguais”, geram níveis diferentes de tensões residuais, ou seja, a energia de soldagem não pode ser considerada de forma isolada em análises de níveis de tensões residuais resultantes da soldagem multipasse.

**Palavras-chave:** energia, corrente, velocidade, tensões residuais.

**Abstract:** The energy input in welding can be adjusted by either control of welding power (voltage and welding current) or welding speed. These different ways of changing can result in different residual stress profiles in the welded joint. Then, the aim of this work is to evaluate, in an independent way, the welding energy input, current and speed effect on the final residual stresses of a multipass joint. Semi-v chamfered samples of structural steel and SMAW process was used. Three different levels of welding current and speed was employed in order to get three levels of energy input. The residual stress measurement was accomplished through X-ray diffraction, using a minidiffractometer for measurement in field. The energy input showed a non-linear relationship with the residual stresses and it was observed that the most influential parameter was the welding speed, what can be a trouble, since this parameter is the less controlled in manual welding.

**Key-words:** energy input; current; speed; residual stresses.

## 1. Introdução

Vários são os fatores que influenciam o nível de tensões residuais em soldagem, entre eles, pode-se destacar: o processo de soldagem, o tipo de chanfro, o material a ser soldado, a energia de soldagem e a técnica de soldagem empregada [1].

O tipo de chanfro empregado, por exemplo, pode influenciar consideravelmente na restrição imposta à junta, além da possibilidade de alterar o fluxo de calor durante o resfriamento de cada cordão de solda, afetando de forma relevante o nível e a distribuição das tensões residuais em um componente soldado. Amostras chanfradas em X, por exemplo, são indicadas para minimizar as distorções geradas na junta durante a soldagem,

enquanto que amostras chanfradas em V não possuem essa característica [2], deve-se lembrar, no entanto, que a presença de distorções pode, em alguns casos, significar um menor nível de tensões residuais para as situações em que o controle das distorções esteja associado à restrição da junta.

Uma alternativa para redução dos níveis finais das tensões residuais de soldagem, sem a necessidade de tratamento térmico pós-soldagem (TTPS), seria a utilização de estratégias de controle destas tensões através do procedimento de soldagem empregado [3]. Dentre estas estratégias, destaca-se o emprego adequado da energia de soldagem.

A energia de soldagem possui grande importância porque afeta o fluxo de calor na junta e, por consequência, modifica variáveis diretamente ligadas ao estado final de tensões residuais da mesma, por exemplo, o gradiente térmico na junta. Todavia, a energia de soldagem pode ser ajustada tanto por meio do controle da potência (tensão e, principalmente, corrente de soldagem) quanto por meio da velocidade de soldagem. Alguns autores já mostraram que estas diferentes formas de ajuste podem

---

(Recebido em 08/04/2010; Texto final em 12/08/2010).  
Artigo originalmente publicado no CONSOLDA 2009  
Piracicaba, SP, Outubro de 2009.

Tabela 1. Composição química\* do metal de base utilizado.

ASTM A516 Gr. 70	Composição, massa %							
	C	Si	Mn	P	S	Al	Cu	Nb
	0,23	0,24	1,11	0,016	0,01	0,043	0,01	0,002
	V	Ti	Cr	Ni	Mo	Sn	N	As
0,002	0,003	0,02	0,02	0,01	0,001	0,0056	0,002	

Tabela 2. Composição química\* do metal de adição utilizado.

E8018G	Composição, massa %			
	C	Si	Mn	Ni
	0,06	0,4	1,10	1,65

\* composição química fornecida pelo fabricante

modificar algumas características geométricas e metalúrgicas da junta soldada, tais como: diluição, balanceamento entre fases, microdureza, microestrutura, entre outros [4-6]. Sendo assim, é razoável considerar que tais formas de ajuste (técnica da energia utilizada) podem modificar também as tensões residuais na junta, o que resultaria na existência de uma relação direta e independente da corrente e/ou da velocidade de soldagem com as tensões residuais resultantes.

Desta forma, o objetivo deste trabalho é avaliar o efeito da energia de soldagem, considerando seu ajuste através da alteração individual e independente da corrente e da velocidade de soldagem, sobre as tensões residuais resultantes em juntas soldadas com multipasse.

## 2. Materiais e Métodos

### 2.1. Material

Foi utilizado o aço ASTM A516 Gr. 70 como metal de base e o eletrodo AWS E8018G como metal de adição. A composição química dos materiais utilizados é mostrada na Tabela 1 e na Tabela 2.

### 2.2. Procedimento Experimental

Foram confeccionadas juntas chanfradas em meio-v, com comprimento de 110 mm, seguindo as especificações mostradas na Figura 1.

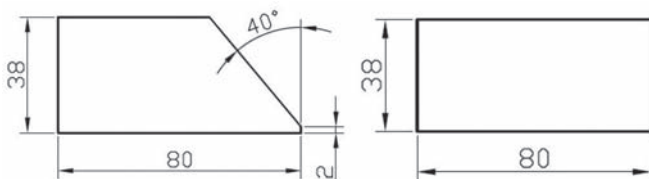


Figura 1. Desenho técnico dos chanfros confeccionados.

As amostras foram soldadas utilizando o processo eletrodo revestido. Em todos os ensaios, os dados de corrente e de tensão de soldagem foram adquiridos e as temperaturas de preaquecimento e de interpassagem foram monitoradas em 150°C.

As energias de soldagem foram aplicadas em três níveis:

8, 10 e 12 kJ/cm. A partir da energia de 10 kJ/cm (energia de referência – R), o valor de corrente de soldagem foi variado, enquanto o valor da velocidade de soldagem foi mantido constante (20 cm/min) através de um dispositivo de referência de velocidade (Figura 2). Deste modo, foram obtidos os níveis de energia de soldagem de 8 e 12 kJ/cm com variação de corrente e velocidade de soldagem constante (Técnica da Energia Tipo I). Da mesma forma, a partir da energia de soldagem de 10 kJ/cm, o valor da velocidade de soldagem foi variado enquanto a corrente de soldagem permaneceu constante (165 A), sendo conseguidos assim os níveis de energia de soldagem de 8 e 12 kJ/cm com variação da velocidade de soldagem e corrente constante (Técnica da Energia Tipo V). A Tabela 3 mostra os parâmetros de soldagem utilizados, onde para todas as condições a tensão de soldagem foi de 25 V e a eficiência térmica estimada em 0,8.

Tabela 3. Parâmetros de soldagem utilizados no trabalho.

Amostra	Técnica da Energia	Energia (kJ/cm)	Corrente (A)	Velocidade (cm/min)
1	I	8	130	20
2	R	10	165	20
3	I	12	200	20
4	V	8	165	25
5	V	12	165	17

Todas as juntas foram soldadas com restrição, por meio da mesa de restrição mostrada na Figura 2. Assim, foi garantida uma maior aproximação da condição real de soldagens em campo, onde a junta faz parte de uma estrutura bem maior e pesada, que promove um alto grau de restrição à solda.

Após a soldagem dos corpos de prova, os mesmos foram submetidos a um processo de remoção eletrolítica, onde foi removida uma fina camada superficial da região a ser analisada, de modo que efeitos de usinagem fossem minimizados e desta forma permitir a medição de tensões residuais oriundas apenas do processo de soldagem o qual as amostras tinham sido submetidas.

Cada amostra foi levada a um difratômetro de raios-x portátil, onde foi levantado o perfil de tensões residuais na superfície de todas as amostras soldadas. A disposição dos pontos analisados pode ser vista na Figura 3.



Figura 2. Mesa para restrição das juntas meio-v e sistema de referência de velocidade.

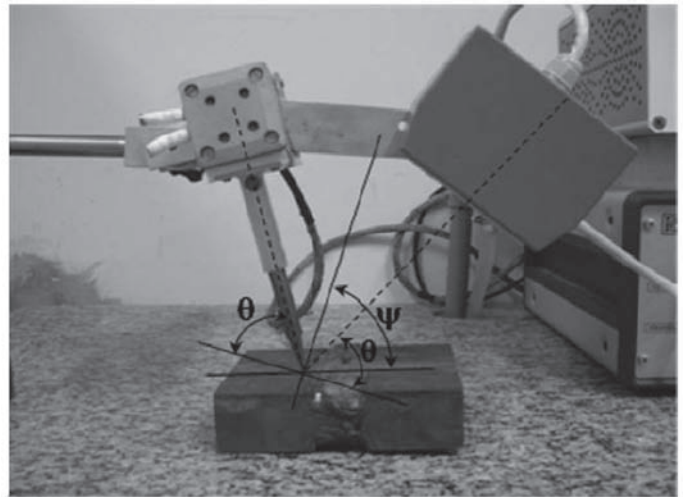


Figura 4. Montagem do difratômetro na amostra analisada.

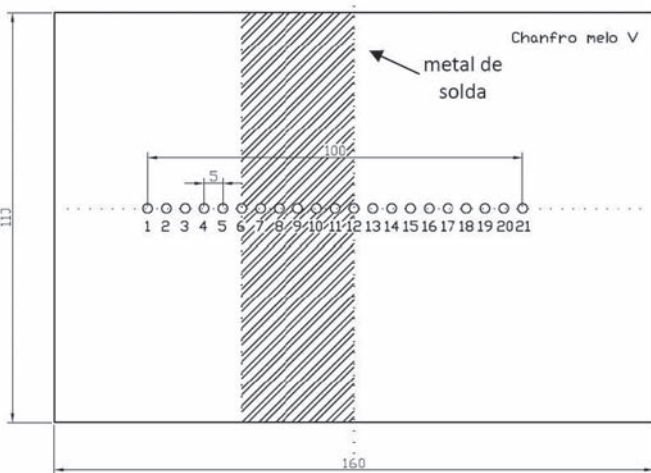


Figura 3. Disposição dos pontos onde foi feita a medição de tensões residuais.

As medições de tensões residuais foram realizadas utilizando-se o método do  $\sin^2\psi$ , com medidas realizadas para  $\psi = 0^\circ, 20^\circ, 35^\circ$ , e  $50^\circ$ . De forma a obter uma melhor sensibilidade do método, ou seja, a maior variação possível de pico  $\Delta q$  para uma dada deformação no reticulado cristalino  $\Delta d/d$ , foi escolhido o pico de difração em um ângulo  $q$  maior possível [7].

Uma vez que o material utilizado neste trabalho possui uma estrutura ferrítica, a análise foi feita nos planos  $\{211\}$ , utilizando um feixe monocromático com comprimento de onda  $\lambda = 2,2911 \text{ \AA}$ , obtido através de um tubo de raios-x com anodo de cromo. A tensão e a corrente utilizada foi de 20 kV e 50 mA, respectivamente. Todos os pontos foram medidos transversalmente ao cordão de solda. A Figura 4 mostra o conjunto (corpo de prova + difratômetro) onde podem ser vistos os ângulos ajustados para execução da análise de tensões residuais.

Foi utilizado um programa comercial para construção dos difratogramas, interpolação dos mesmos e a consequente localização dos picos de difração. Foi usado o software Phillips

Xpert Stress para calcular as tensões residuais e para elaboração dos perfis de tensões residuais foi utilizado programa gráfico comercial.

### 3. Resultados e Discussão

O efeito da energia de soldagem sobre o nível de tensões residuais nas juntas analisadas pode ser visto nas Figuras 5 e 6.

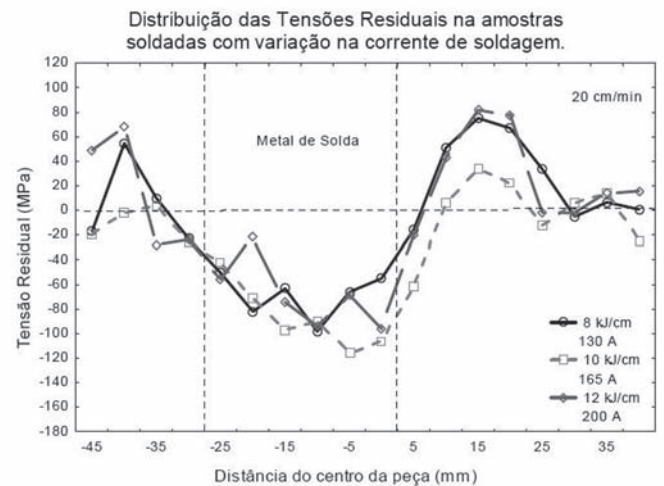


Figura 5. Perfis de Tensões Residuais em amostras soldadas com diferentes energias e mesmo valor de velocidade de soldagem.

Como é mostrado, os perfis de tensão residual apresentaram um comportamento similar para todas as amostras, onde a amostra soldada com a energia de 10 kJ/cm apresentou uma tendência de tensões residuais trativas menores nas regiões da ZAC e tensões residuais compressivas maiores no metal de solda, quando comparada as amostras soldadas com as demais energias. Este comportamento foi observado para as amostras soldadas com ambas as técnicas da energia utilizadas. Pode ser visto ainda que, as amostras soldadas com as energias extremas (8 kJ/cm e 12 kJ/cm) apresentaram perfis de tensões residuais bem parecidos, o que gera indícios da existência de uma relação

não linear entre a energia de soldagem aplicada a junta e as tensões residuais geradas na mesma.

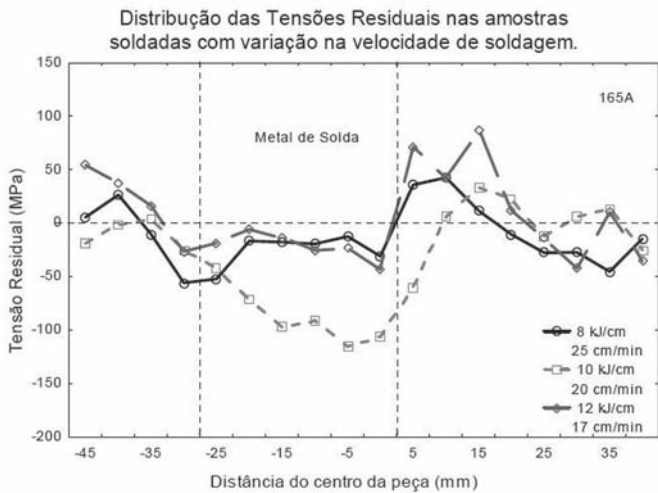


Figura 6. Perfis de Tensões Residuais em amostras soldadas com diferentes energias e mesmo valor de corrente de soldagem.

A Figura 7 mostra o efeito da energia de soldagem, desconsiderando a técnica da energia empregada para obtenção da mesma, sobre o nível de tensões residuais máximas no metal de solda e na ZAC. Para elaboração desse e dos demais gráficos de análise estatística foram escolhidos os nove valores máximos de tensão residual tanto tratativas (ZAC), quanto compressivas (Metal de Solda) para cada condição analisada. Deve-se salientar que os nove valores selecionados foram obtidos a partir dos valores medidos e das incertezas de medição associadas aos mesmos. A partir destes dados foi utilizada a técnica estatística ANOVA (Analysis of Variance) e então os gráficos com os valores médios e dispersão para cada condição foram elaborados.

Como pode ser visto, a Figura 7 confirma estatisticamente o que foi observado nos perfis de tensões residuais apresentados nas Figuras 5 e 6, onde as tensões residuais máximas existentes

tanto no metal de solda quanto na ZAC, apresentaram um comportamento não linear com a energia de soldagem empregada, e ainda, a amostra soldada com energia de 10 kJ/cm, apresentou tensões residuais máximas menores que as das amostras soldadas com os demais níveis de energia, tanto no metal de solda, quanto na ZAC. Pode ser visto também na Figura 7 que, do ponto de vista estatístico, os níveis de energia de 8 kJ/cm e 12 kJ/cm apresentaram níveis de tensões residuais máximas iguais, como já era esperado, de acordo com as Figuras 5 e 6.

Uma possível explicação para o comportamento não linear mostrado na Figura 7 consiste na hipótese de um efeito de compensação entre os extremos de energia.

Para as amostras soldadas com a energia de 12 kJ/cm, por exemplo, a maior quantidade de calor aplicada a junta resultou em poças de fusão maiores e, conseqüentemente, maiores níveis de contração térmica dos cordões de solda devido a um maior volume dos mesmos, o que resultaria em níveis maiores (em módulo) de tensões residuais nestas amostras quando comparadas as soldadas com menor energia (8 kJ/cm).

Por outro lado, a energia de soldagem de 12 kJ/cm, é responsável também por um gradiente térmico menor que o gerado nas amostras soldadas com a energia de 8 kJ/cm, o que resultou em menores níveis de dureza no metal de solda e na ZAC das amostras soldadas com maior energia (Figura 8) e, uma vez que uma microestrutura com menor dureza e, provavelmente, menor limite de escoamento permite maior deformação plástica, um possível alívio de tensões pode ter ocorrido neste grupo de amostras (12 kJ/cm) o que compensaria o maior nível de tensões residuais geradas durante a contração térmica citada anteriormente.

A Figura 9 mostra a influência da energia de soldagem sobre as tensões máximas nas amostras analisadas, agora de forma dependente da técnica da energia empregada para obtenção da mesma. Como pode ser visto o padrão dos gráficos obtidos é o mesmo do mostrado na Figura 7, com um comportamento não

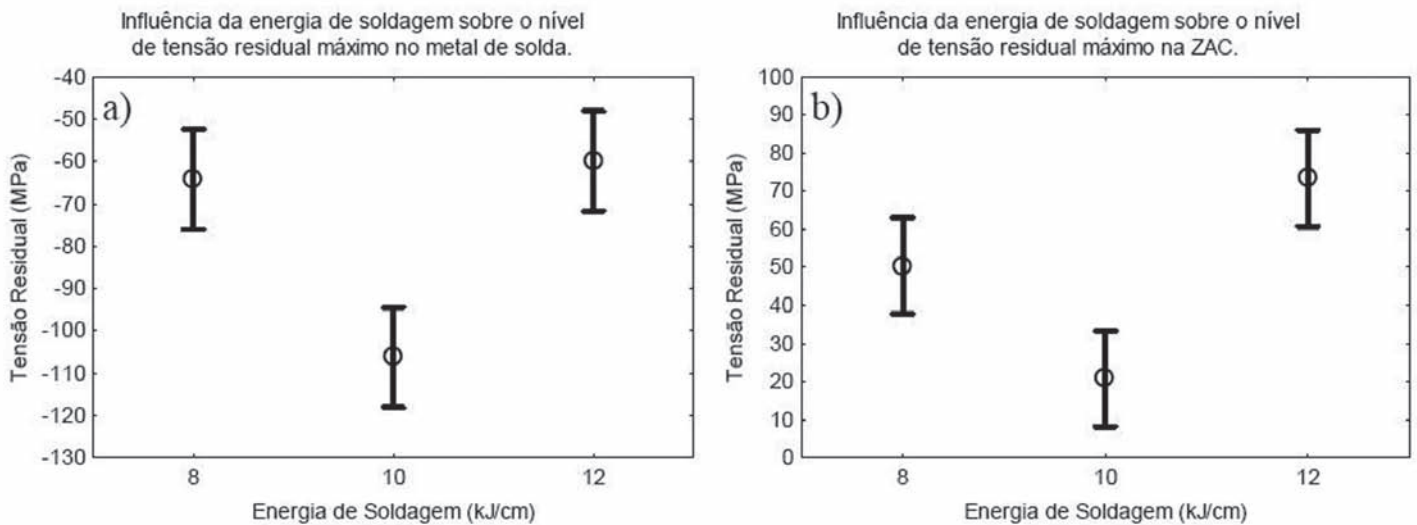


Figura 7. Influência da energia de soldagem de forma isolada sobre o nível de tensão residual máximo a) no metal de solda e b) na ZAC das amostras analisadas.

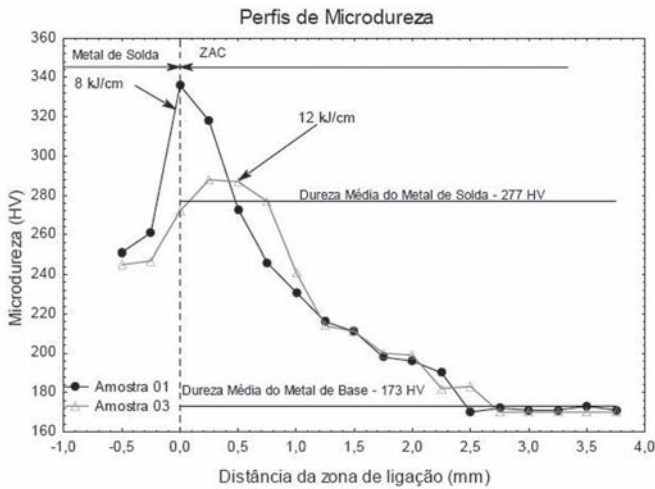


Figura 8. Perfis de microdureza encontrados nas amostras 1 e 3.

linear da energia, com o nível de tensões residuais presentes, apresentando menor nível de tensão trativa e maior tensão compressiva para a energia de 10 kJ/cm. Sendo que, do ponto de vista estatístico, os resultados encontrados mostraram-se significativos somente para as tensões residuais medidas no metal de solda.

As variações nas regiões da ZAC são atribuídas à diferença de aporte térmico dada pelos diferentes níveis de energia e pelo efeito de auto-equilíbrio das tensões residuais, e não pela variação da corrente ou da velocidade de soldagem. Como pode ser visto na Figura 9, não houve variação significativa entre os valores de tensão residual máximos em amostras com mesma energia e técnica da energia diferentes (Tipo I ou Tipo V), mostrando que independente de se variar corrente ou velocidade de soldagem os níveis máximos de tensão residual na ZAC são, do ponto de vista estatístico, os mesmos.

Pode ser visto ainda na Figura 9 que a curva de tensão máxima no metal de solda com variação Tipo I possui comportamento distinto da curva com variação Tipo V. Do ponto de vista estatístico, a curva com variação Tipo I (velocidade de soldagem

constante) não apresenta variação significativa no valor de tensão residual máxima, independente do valor de energia empregado, o que já era esperado devido ao comportamento, mostrado na Figura 5, das curvas de distribuição de tensões residuais para este grupo de amostras.

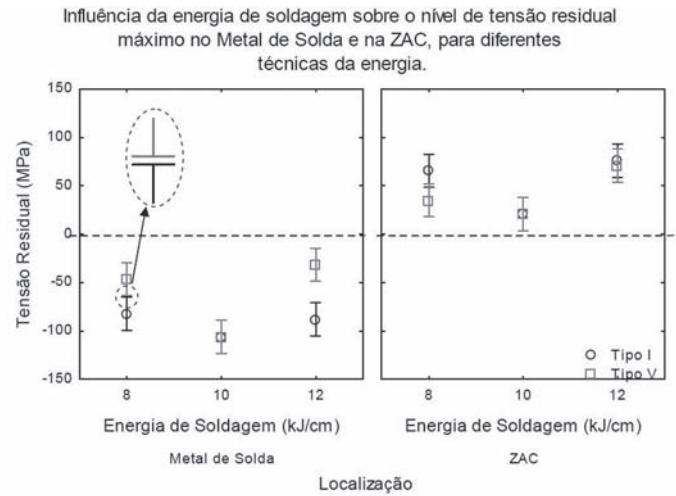


Figura 9. Influência da energia de soldagem dependente do tipo de variação empregado sobre o nível de tensão residual máximo nas amostras analisadas.

Na Figura 10 pode ser observado que, desconsiderando o efeito da diferença dos aportes térmicos causada pelas diferentes energias utilizadas, a técnica da energia empregada (Tipo I ou Tipo V) apresentou certa relação com o nível máximo das tensões residuais encontradas, onde a técnica Tipo I (variação da corrente de soldagem), quando comparado a técnica Tipo V (variação da velocidade de soldagem), mostrou uma tendência estatisticamente significativa de aumento das tensões residuais máximas (em módulo) no Metal de solda.

Um possível caminho para a análise da influência dos parâmetros corrente e velocidade de soldagem seria a relação entre os mesmos e a geometria final, a quantidade de metal

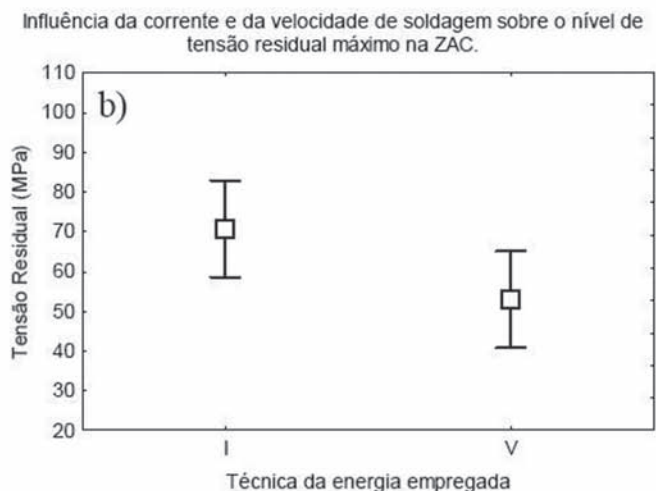
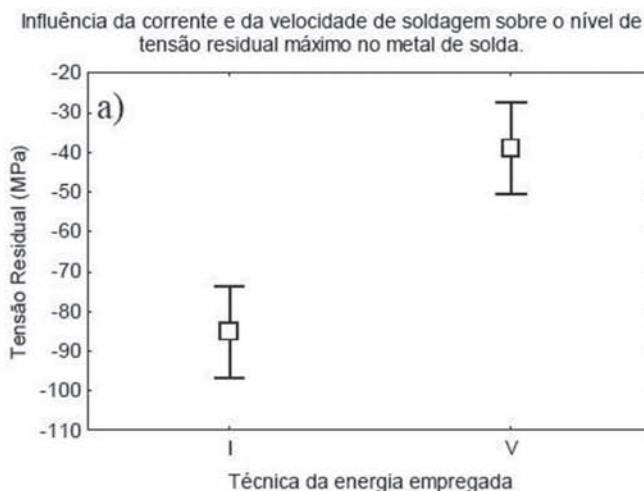


Figura 10. Influência do tipo de variação da energia sobre o nível de tensão residual máximo, a) no metal de solda e b) na ZAC, das amostras analisadas.

depositado e os parâmetros de solidificação dos cordões de solda produzidos.

A corrente de soldagem, por exemplo, está fortemente ligada aos parâmetros geométricos da poça de fusão [8]. Desta forma, ao se variar a corrente de soldagem empregada, mantendo fixos os demais parâmetros, a variação resultante no formato da poça de soldagem poderá afetar outras características, como, por exemplo, o gradiente térmico do cordão de solda durante o resfriamento, o que está diretamente ligado ao nível de tensão residual gerado. Além disso, ao variar a corrente de forma isolada, uma variação na taxa de fusão do eletrodo também ocorre [9], o que influencia na taxa de deposição e, conseqüentemente, no nível de contração imposto a junta.

A corrente de soldagem está relacionada também com a estrutura de solidificação do metal de solda [10], podendo influenciar na formação da microestrutura encontrada no mesmo (ferrita acicular), que possui mecanismo de geração muito próximo ao da bainita [11, 12], microestrutura que é apontada como uma possível fonte de tensões residuais compressivas, devido à componente de deformação cisalhante de sua transformação [13-16]. A Figura 11 mostra a microestrutura predominante das amostras analisadas neste trabalho.

A velocidade de soldagem, por outro lado, está mais relacionada com a granulometria do metal de solda [10] e, além disso, possui um efeito menor sobre a geometria do cordão de solda resultante, influenciando de forma mais importante na quantidade de material depositada na junta.

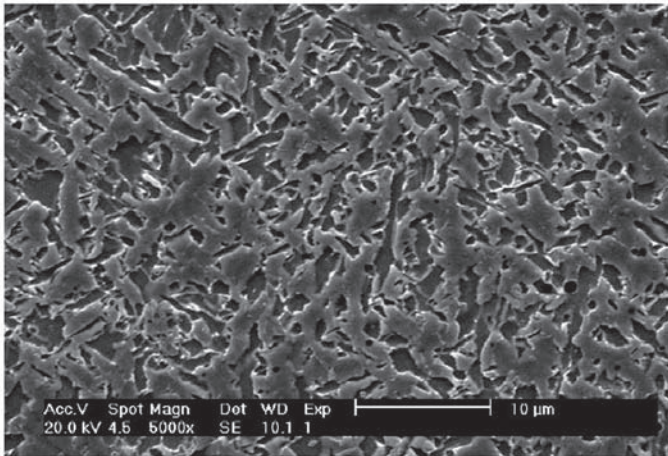


Figura 11. Micrografias obtidas em MEV, mostrando a microestrutura (ferrita acicular) predominante no metal de solda das amostras analisadas neste trabalho. 5000x. Ataque Nital 2%.

Deve-se lembrar que, ao se variar os níveis de corrente ou velocidade de soldagem, a energia de soldagem aplicada à junta é modificada, o que pode levar ao suposto efeito de compensação levantado anteriormente. Todos os efeitos aqui citados não agem de forma isolada, o que torna bastante complexa a avaliação dos mesmos, sendo necessários estudos mais aprofundados de forma a se validar suas possíveis influências e estudar seus mecanismos.

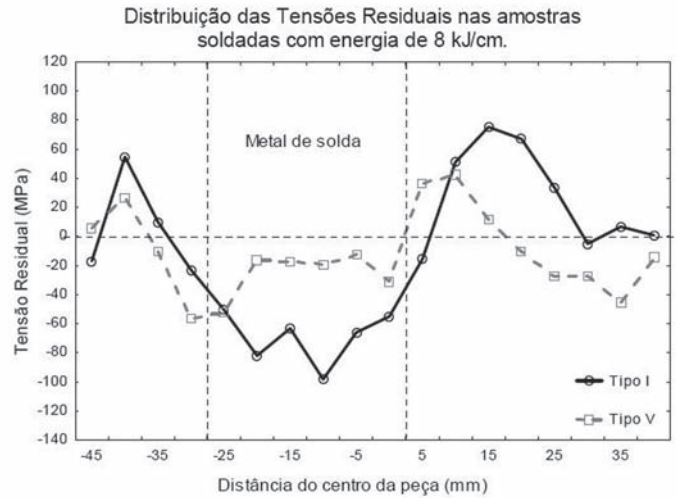


Figura 12. Perfis de tensões residuais para amostras soldadas com energia de 8 kJ/cm para diferentes técnicas da energia empregadas.

Pode ser visto na Figura 12 que, como já era esperado pelos resultados que foram apresentados, um mesmo valor de energia de soldagem (8 kJ/cm), com valores de corrente e de velocidade de soldagem diferentes, resulta em perfis de tensões residuais distintos. Onde, principalmente no metal de solda, níveis de tensão residual diferentes são encontrados, sendo essa diferença oriunda da variação dos valores de corrente e de velocidade de soldagem, já que o aporte térmico gerado é o mesmo.

A Figura 13 confirma este resultado, onde para outra energia de soldagem (12 kJ/cm), valores de corrente e velocidade distintos, mas com mesmo aporte térmico, geraram perfis com valores de tensão residual diferentes principalmente no metal de solda. Tal resultado mostra a importância da escolha correta dos parâmetros de energia (corrente e velocidade de soldagem), e o erro que se comete ao considerar que o aporte térmico gerado pela energia de soldagem é o único fator a influenciar o estado final de tensões residuais em determinada junta soldada.

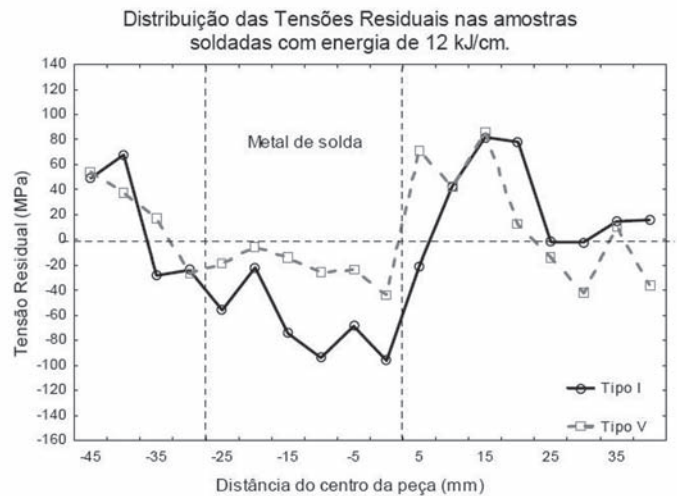


Figura 13. Perfis de tensões residuais para amostras soldadas com energia de 12 kJ/cm para diferentes técnicas da energia empregadas.

#### 4. Conclusões

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

- para a faixa de energia analisada neste trabalho, o nível de energia intermediário (10 kJ/cm) foi o que apresentou os melhores resultados, com maiores níveis de tensão residual compressiva no metal de solda e menores níveis de tensão residual tratativa na ZAC;
- as amostras soldadas com técnica da energia Tipo I (variação na corrente de soldagem), quando comparadas as amostras soldadas com a técnica Tipo V (variação da velocidade de soldagem), apresentaram uma tendência estatisticamente significativa de aumento das tensões residuais máximas no Metal de solda.
- energias de soldagem iguais e com valores de corrente e velocidade de soldagem distintos podem gerar distribuições de tensões residuais diferentes, sendo essa distinção maior no metal de solda.

#### 5. Agradecimentos

Os autores deste trabalho agradecem ao Engesolda – UFC e ao Instituto Politécnico da UERJ, por toda infra-estrutura para a realização deste trabalho, e ao CNPq, CENPES/PETROBRAS e FINEP pelo suporte financeiro.

#### 6. Referências Bibliográficas

- [1] ASM INTERNATIONAL. ASM Handbook. Vol. 6. pp. 2647-2665. 1992.
- [2] AMERICAN WELDING SOCIETY - AWS. Welding handbook. Miami. Vol. 1. 8th ed. pp. 2-32. 1987.
- [3] CRUZ, R. L. S. Avaliação dos efeitos da técnica da dupla camada na soldagem do aço ASTM A516 Gr60. 2006. Dissertação de mestrado. Universidade Federal do Ceará - CE.
- [4] SILVA, Cleiton Carvalho ; MIRANDA, Edvan Cordeiro ; MIRANDA, Hélio Cordeiro de ; MOTTA, M. F. ; FARIAS, Jesualdo Pereira . Um Estudo Sobre a Contribuição da Corrente e da Velocidade de Soldagem Sobre a Diluição e as Características Geométricas de Cordões de Solda Depositados pelo Processo TIG com Alimentação de Arame Frio. In: XXXV CONSOLDA - Congresso Nacional de Soldagem, 2009, Piracicaba - SP.
- [5] NUNES, E. B.; MOTTA, M. F.; ABREU, H. F. G.; MIRANDA, H. C.; FARIAS, J. P.; JÚNIOR, F. N. A.. Influência dos Parâmetros de Soldagem na Microestrutura e na Microdureza na Deposição de Aço Inoxidável Duplex. In: 64º Congresso da ABM, 2009, Belo Horizonte.
- [6] NUNES, E. B.; MOTTA, M. F.; ABREU, H. F. G.; MIRANDA, H. C.; FARIAS, J. P.; JÚNIOR, F. N. A.. Efeito dos parâmetros de soldagem na microestrutura do aço inoxidável duplex UNS S31803 pelo processo eletrodo revestido. In: 5º Congresso Brasileiro de P&D em Petróleo e Gás, 2009, Fortaleza.
- [7] NOYAN I. C.; COHEN, J. B. Residual stress: measurement by diffraction and interpretation. New York: Springer. 1987.
- [8] KOU, S. Welding metallurgy. 2nd Ed. John Wiley & Sons.

2002.

- [9] LESNEWICH, A. Control of Melting Rate and Metal Transfer in Gas Shielded Metal Arc Welding: Part I - Control of Electrode Melting Rate. Welding Journal, 37-8 (1958) 343S - 353S.
- [10] SAVAGE, W. F.; LUNDIN, C. D.; HRUBEC, R. J. Weld. J., 47: 420s. 1968.
- [11] BABU, S. S.; BHADSHIA, H. K. D. H. Stress and the acicular ferrite transformation. Material science and engineering. A156. 1992. 1-9. 1992.
- [12] BHADSHIA, H. K. D. H. Bainite in steels. 2nd ed. Institute of Materials. pp. 1-453. 2001.
- [13] BHADSHIA, H. K. D. H.; FRANCIS, J. A.; STONE, H. J.; KUNDU, S.; ROGGE, R. B.; WITHERS, P. J., KARLSSON, L. Transformation Plasticity in Steel Weld Metals. Proceedings of 10th International Aachen Welding Conference. pp. 22-25. 2007.
- [14] JONES, W. K. C.; ALBERRY, P.J. A model for stress accumulation in steels during welding. Metal Technology. 11: 55.7-566. 1977.
- [15] 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. Proceedings of PVP 2007 - ASME pressure vessels and piping division conference. Paper PVP2007-26544. San Antonio. Texas. pp. 1-8. 2007.
- [16] BHADSHIA, H. K. D. H. Handbook of residual stress and deformation of steel. Materials Factors. ASM International. pp. 3-9. 2002.