

INFLUÊNCIA DA ENERGIA DE SOLDAGEM NOS RESULTADOS DO TESTE G-BOP PARA ANÁLISE DA INCIDÊNCIA DE TRINCA A FRIO¹

Francisco Edson Nogueira Fraga²
Roseana da Exaltação Trevisan³

Resumo

O teste G-BOP (*Gapped Bead-on-Plate*) destaca-se dentre vários testes auto-restritivos pela grande aplicação em avaliar especificamente o cordão de solda quanto à susceptibilidade de ocorrência de trincas a frio. O objetivo deste trabalho é avaliar a influência da energia nominal de soldagem (ES) sobre o resultados do teste G-BOP. No desenvolvimento experimental foram feitos cordões de solda com o arame tubular AWS E71T-1 com proteção gasosa. Utilizou-se duas energias nominais de soldagem (ES) com oito réplicas para cada condição. Corpos de prova com o aço ASTM A-285 grau C foram usados como metal de base. Identificou-se que a ES atuou sobre os resultados do teste através da taxa de resfriamento imposta pelo corpo de prova. A variação da energia de soldagem de 1,0kJ/mm para 1,6kJ/mm causa diferença nos resultados do ensaio, o que demonstra que este parâmetro deve ser mantido constante durante a utilização do teste G-BOP, de modo a garantir confiabilidade aos resultados do mesmo.

Palavras-chave: Teste G-BOP; Trincas de hidrogênio; Energia de soldagem.

INFLUENCI OF THE WELDING HEAT ON THE OUTPUT RESULTS OF THE G-BOP TEST TO HYDROGEN CRACKING EVALUATION

Abstract

The Gapped bead-on-plate test (G-BOP) stands out from several other self-restraint tests for its great application to evaluate HIC only on the weld metal. The objective of this study is to evaluate the influence of the welding heat on the output variable (HIC %) of the G-BOP test. On the experimental development the ASTM A-285 grade C steel was used as base metal as well as AWS E71T-1 flux core and CO₂ shielding. It was adopted two welding heat (1,0 and 1,6kJ/mm) and carried out eight sample for each on. It was concluded that the welding heat have significant influence in the test result due to cooling rate on the bead.

Key words: G-BOP test; Hydrogen cracking; Welding heat.

¹ Contribuição técnica apresentada na 61º Congresso Anual da ABM, de 24 a 27 de julho de 2006, Rio de Janeiro – RJ

² CSc. Doutorando em Eng. Mecânica, UNICAMP. Campinas, SP – Brasil.
Faculdade de Eng. Mecânica, Dep. de Eng. de Fabricação. C. P.: 6122.
E-mail: nfraga@fem.unicamp.br Fone: (19) 3788 3307

³ PhD. Professora titular da Faculdade de Eng. Mecânica, UNICAMP. Campinas, SP – Brasil.
Faculdade de Eng. Mecânica, Dep. de Eng. de Fabricação. C. P.: 6122.
E-mail: roseana@fem.unicamp.br Fone: (19) 3788 3302

INTRODUÇÃO

Com o desenvolvimento de novos materiais, a partir de melhoramentos na composição química e no processamento, o risco da ocorrência de trincas a frio na zona afetada pelo calor (ZAC) vem sendo reduzido cada vez mais, com isso, a incidência desse tipo de falha mecânica passou a ocorrer com mais frequência no cordão de solda (CS) (1, 2). O teste denominado *Gapped Bead-on-Plate*, G-BOP, surgiu como uma proposta para avaliar a ocorrência de trinca induzida por hidrogênio (TIH) especificamente no CS.⁽¹⁾

O fenômeno de TIH depende basicamente de três fatores de influência inter-relacionados: quantidade de hidrogênio na solda; nível de tensão na junta e microestrutura susceptível.⁽²⁻⁵⁾ O teste G-BOP atua na ocorrência das trincas a frio por meio do grau de restrição que o mesmo promove no cordão de solda durante o resfriamento. No teste G-BOP não há uma tensão aplicada externamente, sendo conhecido como um teste auto-restritivo. O nível de tensões internas na solda é devido à redução de volume no CS, contrações térmicas e à tensões de transformação microestrutural.^(6,7)

Atkins et al.⁽⁸⁾ explica que as principais vantagens deste teste são: baixo custo, quando comparado a outros testes; simplicidade na execução e confiabilidade ao determinar a susceptibilidade ao trincamento por hidrogênio no cordão de solda.

O corpo de prova (CP) para o teste G-BOP é constituído por dois blocos fixados um ao outro, sendo que um destes tem um entalhe usinado compreendido entre os dois blocos. A fixação deve prevenir movimentos relativos de um bloco em relação ao outro durante o andamento do ensaio. Na execução do teste, um cordão de solda de 100mm de comprimento é depositado sobre os blocos transversalmente à região do entalhe, conforme é mostrado na Figura 1. Após a soldagem, os blocos são mantidos fixos por no mínimo 48 horas.

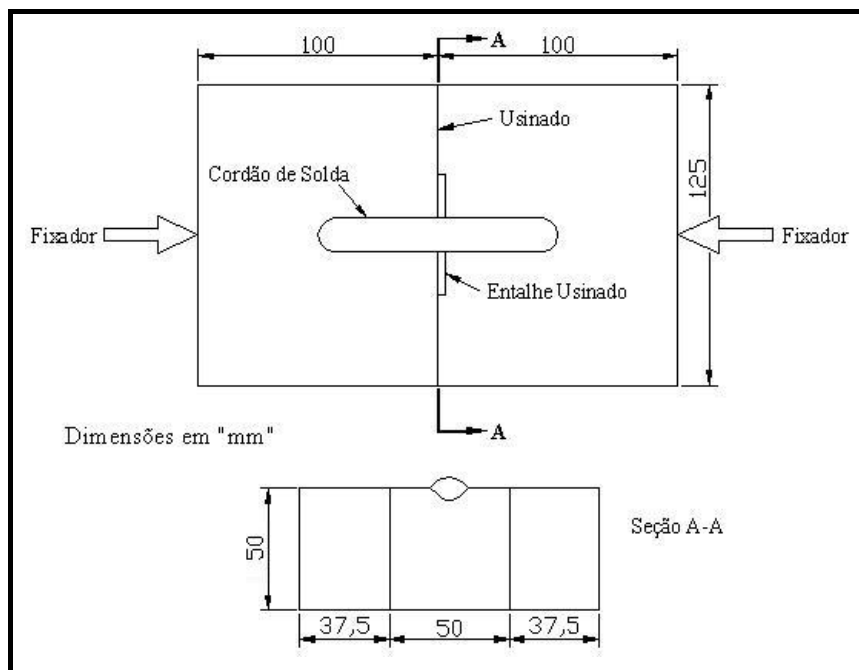


Figura 1. Desenho do corpo de prova.⁽¹⁾

Para revelar as trincas, a área da solda é aquecida por uma fonte de calor oxiacetilênica até o rubro, oxidando eventuais trincas que possam ter ocorrido na seção transversal do cordão de solda. O CP é deixado resfriando até a temperatura ambiente e então é aberto, rompendo o cordão de solda caso este não tenha trincado totalmente. Quando a seção transversal do CS apresentar uma superfície oxidada e outra fosca (resultante do rompimento), significa que a trinca de hidrogênio estava presente no cordão de solda antes do aquecimento.^(1,6,8-10)

A Figura 2 ilustra a seção rompida de um cordão de solda, apresentando uma região fraturada e uma região oxidada caracterizando a presença da trinca de hidrogênio no cordão de solda.

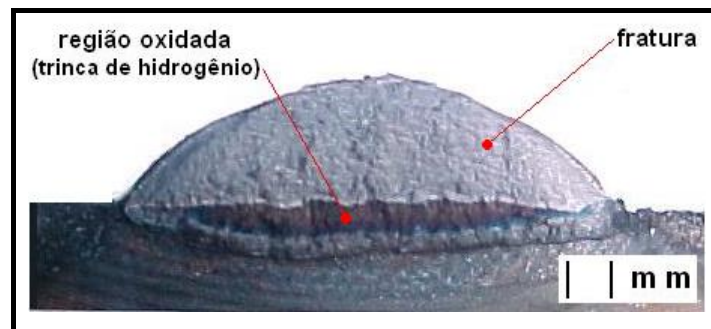


Figura 2. Região fraturada e região oxidada caracterizando a TIH na seção transversal do CS.

Visando contribuir com informações que possam colaborar para a normalização do teste G-BOP, este trabalho tem como objetivo avaliar a influência da energia nominal de soldagem (ES) sobre o teste G-BOP, quantificando o resultado do teste que é o percentual de trinca à frio no cordão de solda.

MATERIAL E MÉTODOS

Para o desenvolvimento experimental deste trabalho o metal de base foram blocos de aço ASTM A-285 grau C. Os corpos de prova foram usinados segundo uma mesma direção de laminação, com dimensões de 115mm x 110mm x 54mm e um rebaixo de 50mm de largura em uma das faces, perpendicular ao sentido de laminação. A profundidade do rebaixo foi de 1,0mm. A Figura 3 ilustra as dimensões do CP para o teste G-BOP e a respectiva direção de laminação do material.

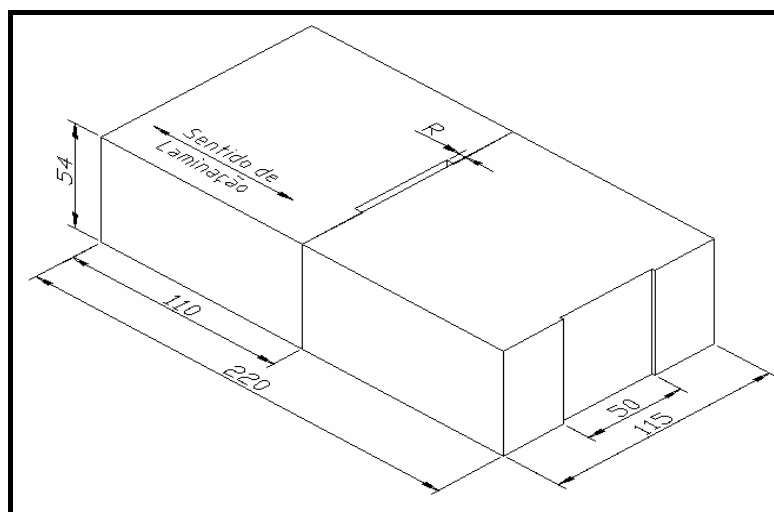


Figura 3. Dimensões em mm do corpo de prova G-BOP. Adaptado de McParlan e Graville (1).

Foram utilizados grampos de fixação para prender os blocos e, assim, prevenir movimentos relativos de um bloco em relação ao outro durante o ensaio. O torque de aperto foi controlado e medido com um torquímetro em 6kg.m.

Os cordões de solda foram feitos usando o processo de soldagem a arco com arame tubular (*flux cored arc welding – FCAW*). O metal de adição selecionado foi o AWS E71T-1, diâmetro de 1,6mm e hidrogênio difusível de 5,6ml/100g, indicado pelo fabricante.

As trincas de hidrogênio avaliadas pelo teste G-BOP foram quantificadas a partir da equação 1, que é a relação entre a área trincada (região oxidada) e área total (região oxidada + região fraturada) da seção transversal do cordão de solda. As respectivas áreas foram medidas usando o *software* AutoCAD 2000i.

$$T_H = \frac{A_T}{A_{CS}} \cdot 100 \quad \text{Eq. (1)}$$

Onde: T_H = Trincas de hidrogênio (%)
 A_T = Área da trinca
 A_{CS} = Área total do cordão de solda

No desenvolvimento dos ensaios e avaliação estatística dos resultados utilizou-se um planejamento aleatorizado por níveis (PAN) com um modelo de efeitos fixos. No planejamento experimental, a energia de soldagem (ES) foi considerada a variável de influência e o percentual de trincas a variável de resposta (VR).

Foram realizadas inicialmente 4 réplicas para cada condição de soldagem, onde observou-se um alto desvio padrão nos resultados. Realizou-se então mais 4 réplicas, o que somou 8 ensaios para cada condição. A metodologia adotada para avaliar os resultados obtidos consistiu de uma análise de variância com nível de significância de 10%, o que indica uma confiabilidade de 90%.⁽¹¹⁾

Realizou-se ainda a aquisição e monitoramento dos ciclos térmicos. As medições foram feitas durante o processo de soldagem através de um sistema composto por um microcomputador, um programa de aquisição de dados, AqDados da Lynx Technology, com uma placa de conversão A/D, e um termopar mineral “Tipo K” com diâmetro de 1,6 mm. Os registros de temperatura foram obtidos diretamente durante a soldagem.

RESULTADOS E DISCUSSÃO

Considerando que o objetivo do trabalho é verificar como a variável de influência Energia de Soldagem interfere nos resultado do teste G-BOP, considerou-se como critério que as trincas de hidrogênio ocorressem durante o ensaio e que esta ocorrência não fosse de 100%. Se a seção do cordão de solda não trincasse ou trincasse em 100%, não seria possível quantificar o quanto cada nível da variável influenciou no teste.

Para a aplicação do teste G-BOP, os parâmetros de soldagem foram otimizados seguindo a equação 2 e de modo que as trincas pudessem ser quantificadas. Foram otimizados os seguintes parâmetros de soldagem: tensão do arco voltaico, corrente de soldagem, velocidade de soldagem, DBCP (distância entre bico de contato e peça) e vazão do gás.

$$ES = \frac{U \cdot I \cdot 60}{V_s \cdot 1000} \quad (2)$$

Onde: ES é a Energia Nominal de Soldagem [kJ/mm]

I é a Corrente de soldagem [A]

V_s é a Velocidade de Soldagem [mm/min]

Estes parâmetros foram definidos também de forma a se obter cordões com arco estável, bom acabamento superficial, sem respingos e com penetração da ordem de 30%. Foram definidos experimentalmente os seguintes valores de ES : 1,0kJ/mm e 1,6kJ/mm. A Figura 4 ilustra um corpo de prova do teste G-BOP logo após a soldagem.

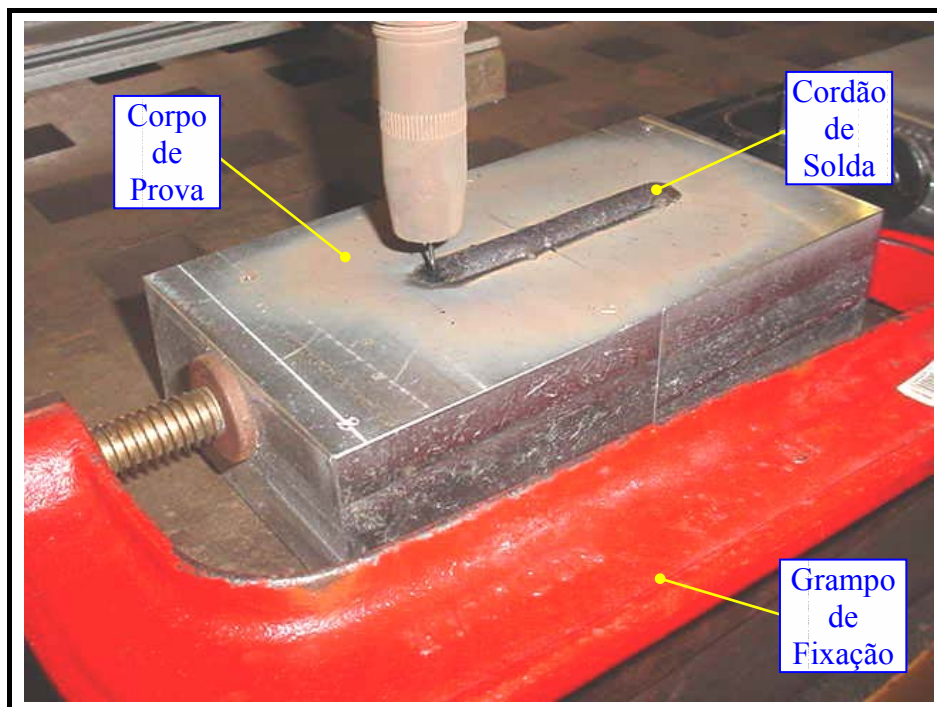


Figura 4. Corpo de prova do teste G-BOP logo após a soldagem.

Os parâmetros de soldagem estão apresentados na Tabela 1, onde observa-se que houve variação apenas na velocidade de soldagem para obtenção dos dois níveis da ES , mantendo-se constante os demais parâmetros.

Tabela 1. Parâmetros de soldagem para as duas energias de soldagem.

Energia de Soldagem	Vel. de soldagem (mm/min)	Tensão (V)	Corrente (A)	Vel. do arame (m/min)	DBCP (mm)	Gás (CO ₂) Vazão (l/min)
1,6 kJ/mm	200	26,5	206	4,0	20	17
1,0 kJ/mm	326					

As condições apresentadas na Tabela 1 foram aplicadas para a execução dos ensaios com o teste G-BOP. Durante a medição do percentual de trincas observou-se uma grande dispersão nos resultados do teste (quatro réplicas) e, devido a esta dispersão, considerou-se necessário a realização de um maior numero de replicas.

Desta forma o percentual médio de trincas no CS foi obtido a partir de 8 ensaios com o teste G-BOP para cada ES. Os resultados estão dispostos na Tabela 2. Pode-se observar nesta Tabela que com ES de 1kJ/mm a média dos valores das réplicas foi maior que a média obtida com ES de 1,6kJ/mm.

Tabela 2. Resultados percentuais de TIH na seção transversal dos cordões de solda ensaiados com o teste G-BOP para as duas energias de soldagem.

Energia de Soldagem	Quantidade de TIH no CS (%)							
	1,0 kJ/mm				1,6kJ/mm			
Resultado dos Ensaios – TIH (%)	35,6	33,8	40,6	48,8	33,4	33,0	34,3	31,5
	30,2	48,8	49,8	34,6	39,7	48,6	28,4	27,7
Média (%)	40,3				34,6			

Foram observados desvios padrões da ordem de 6 para os resultados apresentados na Tabela 2. Vale ressaltar que esta dispersão nos resultados não se modificou mesmo com o aumento do número de réplicas de quatro para oito.

Para poder afirmar, com confiabilidade, que houve diferença significativa no percentual de trincas para as duas energias de soldagem aplicou-se o teste de hipótese, equações 3 e 4, no planejamento aleatorizado por níveis.⁽¹¹⁾

$$H_0: \mu_1 = \mu_2 \quad (3)$$

$$H_1: \mu_1 \neq \mu_2 \quad (4)$$

Onde: μ_1 e μ_2 são as médias dos resultados dos ensaios
 H_0 e H_1 são as hipóteses possíveis.

No teste de hipóteses, caso a hipótese H_0 seja verdadeira, as médias são estatisticamente iguais e caso H_0 seja rejeitada, as médias são diferentes.

A partir do teste de hipóteses, para um nível de confiabilidade de 90%, foi identificado que as médias são estatisticamente diferentes, ou seja, $\mu_1 \neq \mu_2$. Desta forma pode-se afirmar que o aumento da energia de soldagem de fato influenciou nos resultados do teste G-BOP, ou seja uma maior ES gerou um percentual menor de trinca na seção transversal do metal de solda.

De acordo com a literatura,^(8,12,13) ensaios executados com o teste G-BOP devem ser capazes de impor e reproduzir no cordão de solda taxas de resfriamento que sejam suficientes para induzir trincas de hidrogênio no cordão de solda.

Considerando-se que a única variável entre os ensaios foi a energia de soldagem, optou-se por fazer uma avaliação no comportamento da velocidade de resfriamento para as diferentes ES, visando justificar como a ES influenciou nos resultados do teste G-BOP.

Para avaliar o comportamento e a reprodutibilidade da taxa de resfriamento dos cordões de solda durante os ensaios, realizou-se a aquisição e monitoramento dos ciclos térmicos. Na Figura 5 são apresentados os ciclos térmicos obtidos para os cordões de solda executados com energias de soldagem de 1,6kJ/mm e 1,0kJ/mm.

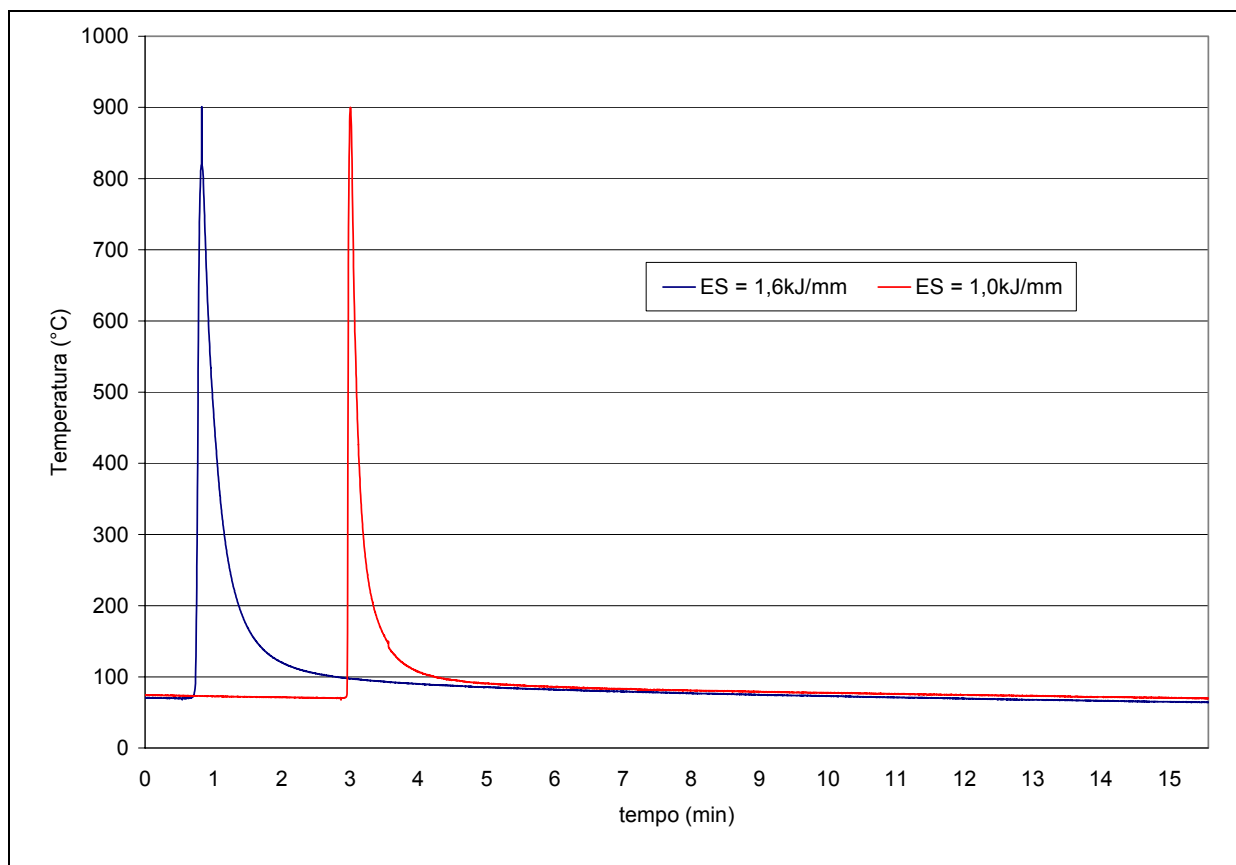


Figura 5. Velocidade de resfriamento dos corpos de prova para as diferentes energias de soldagem.

Na Figura 5 verifica-se que o cordão de solda executado com ES de 1,0kJ/mm resultou um resfriamento mais drástico quando comparado com o cordão feito com ES de 1,6kJ/mm. Pode-se observar que houve um intervalo de tempo de resfriamento maior para a energia de soldagem de 1,6kJ/mm (curva em azul) em relação a ES de 1,0 kJ/mm (curva em vermelho), indicando que a primeira curva (azul) apresentou uma taxa de resfriamento menor que a segunda.

Na Tabela 6 estão quantificadas as reduções das taxas de resfriamento entre as temperaturas de 800°C e 500°C ($\Delta T_{8-5}/\Delta t$) e de 300°C e 100°C ($\Delta T_{3-1}/\Delta t$) em detrimento do aumento da energia de soldagem. São destacados também os percentuais médios de TIH em função da ES.

Tabela 6. Redução das taxas de resfriamento e do percentual de TIH em função do aumento da ES.

ES	TAXA DE RESFRIAMENTO		Percentual de TIH
	$(\Delta T_{8-5}/\Delta t)$	$\Delta T_{3-1}/\Delta t$	
1,0kJ/mm	77,2 °C/s	3,1 °C/s	40,3 %
1,6kJ/mm	36,9 °C/s	2,0 °C/s	34,6%
Redução na taxa de resfriamento	52%	35%	

A taxa de resfriamento entre as temperaturas de 800°C e 500°C ($\Delta T_{8-5}/\Delta t$) para a energia de soldagem de 1,0kJ/mm, foi de 77,2°C/s e de 36,9°C/s para a ES de 1,6kJ/mm, o que representa uma redução na taxa de resfriamento de 52%. Entre as temperaturas de 300°C e 100°C a taxa de resfriamento ($\Delta T_{3-1}/\Delta t$) foi de 3,1°C/s para a ES de 1,0kJ/mm, e de 2,0°C/s para a ES de 1,6kJ/mm, correspondendo a uma redução de 35%.

Os resultados obtidos estão de acordo com o estudo de Chakravarti & Bala⁽⁶⁾ que, estudando preaquecimento usando o teste G-BOP, observaram que aumentando o intervalo de tempo de resfriamento entre as temperaturas de 300°C e 100°C (Δt_{3-1}), ou seja, reduzindo a taxa de resfriamento, ocasionava uma diminuição da porcentagem de trincas ocorridas no cordão de solda.

Baseado nos resultados obtidos, pode-se afirmar que a redução do percentual de trincas em função do aumento da ES no teste G-BOP foi resultado da alteração significativa na taxa de resfriamento.

CONCLUSÃO

- A energia de soldagem tem influência nos resultados do teste G-BOP, uma vez que a variação da ES de 1,0kJ/mm para 1,6kJ/mm causou uma redução de 40,3 % para 34,6% no percentual médio de trinca.
- Para que diferentes resultados obtidos com o teste G-BOP possam ser comparativos é necessário utilizar a mesma energia nominal de soldagem.
- A influência da energia nominal de soldagem na variação dos resultados do teste G-BOP é devido à variação da taxa de resfriamento promovida pelo ensaio.
- É importante utilizar um número mínimo de 4 replicas na realização dos ensaios com o teste G-BOP devido à alta dispersão observada nos resultados com este teste.

Agradecimentos

Os autores agradecem à CAPES e ao CNPq pelo apoio financeiro à pesquisa.

REFERÊNCIAS

- 1 McPARLAN, M., GRAVILLE, B. A. Development of the G-BOP test for weld metal cracking. **IIW Doc. n. IX-922**, 1975. 12p.
- 2 SAWHILL JR., J. M.; DIX, A. W.; SAVAGE, W. F. Modified implant test for studying delayed cracking. **Welding Journal**, p.554s-559s, December 1974.
- 3 SAVAGE, W. F.; NIPPES, E. F.; TOKUNAGA, Y. Hydrogen induced cracking in HY-130 steel weldments. **Welding Journal**, p. 118s-126s, April 1978.
- 4 EASTERLING, K. E. Introduction to the physical metallurgy of welding. 1st ed. Butter Worths & Co Ltd, 1983. Cap 3 and 4.
- 5 LINNERT, G. E. Welding Metallurgy – Carbon and Alloy Steels. 4th ed. Miami: American Welding Society, 1994. Vol. 1. Cap 7 and 9.
- 6 CHAKRAVARTI, A. P.; BALA, S. R. Evaluation of weld metal cold cracking using G-BOP test. **Welding Journal**, 68 (1), p. 1s-8s, January 1989.
- 7 VUIK, J. An update of the state-of-arte of weld metal hydrogen cracking. **Welding in the Word** (Le Soudage Dans Le Monde), v. 31, n. 5, p. 308-321, 1993.
- 8 ATKINS, G. et al. Welding process effects in weldability testing of steel. **Welding Journal**, 81 (4), p. 61s-68s, April 2002.
- 9 ADONYI, Y. Weldability of High Performance Steels. In: CONFERENCE OF HIGH PERFORMANCE STEEL, 2000, Baltimore, Maryland. p. 1-15, 2000.
- 10 DAVIDSON, J. L. Hydrogen–induced cracking of low carbon – low alloy steel weldments. **Materials Forum**, v. 19, pp. 35-51, 1995.
- 11 MONTGOMERY, D. C., RUNGER, G. C. **Applied statistics and probability for engineers**. New Yory, John Wiley e Sons, 1996.
- 12 ADONYI, Y. Espessura dos blocos para o teste G-BOP. [mensagem pessoal] <jhilton@fem.unicamp.br> em 08/04/2003.
- 13 SILVA, J. H. F. Proposta de um novo ensaio para avaliar a susceptibilidade de metais de solda ao fenômeno de trincas induzidas pelo hidrogênio em diferentes ambientes. Campinas: Faculdade de Engenharia Mecânica, Universidade Estadual de Campinas, 2005. 160 p. Tese (Doutorado).