

ANÁLISE DO CICLO TÉRMICO DE UM AÇO DE ALTA RESISTÊNCIA BAIXA LIGA UTILIZANDO MÉTODO DIRETO E EQUAÇÕES DE SOLDAGEM

Mousinho, T.C.M.¹; Garcez, T.S.¹; Reis Sobrinho, J.F.¹; Alcantara, N.G.²
thyalitacmm@gmail.com

¹Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Piauí - IFPI

²Universidade Federal de São Carlos – UFSCAR

RESUMO

Um dos mais sérios defeitos relativos à soldabilidade de aços de alta resistência é a ocorrência de trincas induzidas pelo hidrogênio ou trincas a frio, que podem ocorrer tanto no Metal de Solda - MS quanto na Zona Afetada Termicamente - ZAT da junta soldada, à temperaturas abaixo de 200 °C. O controle do ciclo térmico durante a soldagem é importante para a obtenção de uma junta soldada isenta desse tipo de defeito. Os ciclos térmicos em juntas soldadas podem ser avaliados por métodos diretos, realizando medidas feitas diretamente na junta soldada ou aplicando equações disponíveis na literatura, que foram obtidas empiricamente ou por regressão linear múltipla. O presente trabalho utiliza duas metodologias para a avaliação da susceptibilidade à formação de trincas a frio, o método direto, realizando medições, e o método da aplicação das equações de soldagem. Em seguida, uma análise comparativa dos dois métodos.

Palavras-chave: Aços de alta resistência, Método direto, Equações de soldagem

INTRODUÇÃO

Atualmente, os processos de soldagem constituem técnicas fundamentais na fabricação e manutenção de estruturas e equipamentos em escala industrial. As melhorias no controle e portabilidade do maquinário de execução agregaram rapidez e flexibilidade na união de peças por soldagem, representando economia e produtividade e consolidando este processo globalmente em diversos segmentos industriais.

Com o avanço tecnológico das últimas décadas houve a necessidade da fabricação de estruturas com alta resistência e diminuição do peso. As chapas feitas com aços avançados de alta resistência, por exemplo, são uma das principais respostas da siderurgia aos desafios impostos por seus clientes em sua busca por

uma maior competitividade e atendimento às restrições ao consumo de energia e aos danos ao meio ambiente.

Um dos mais sérios defeitos relativos à soldabilidade de aços de alta resistência é a ocorrência de trincas induzidas pelo hidrogênio ou trincas a frio, que representam um dos maiores problemas na soldagem de aços de alta resistência. Estas trincas a frio podem ocorrer tanto no Metal de Solda - MS quanto na Zona Afetada Termicamente - ZAT da junta soldada, a temperaturas abaixo de 200°C, com faixa crítica de ocorrência em torno da temperatura ambiente. A ocorrência de trinca a frio também pode ser causada pela interação dos seguintes fatores: níveis de tensão, susceptibilidade da microestrutura, teor de hidrogênio difusível e a temperatura. E, todos esses fatores são influenciados pela taxa de resfriamento que ocorre na junta soldada. Manter o controle do ciclo térmico é essencial para a obtenção de uma junta soldada livre desse tipo de defeito.

Existem diferentes métodos para a avaliação da soldabilidade de aços de alta resistência e avaliação da susceptibilidade à formação de trincas a frio, neste trabalho utilizamos o método experimental e o método de aplicação das equações de soldagem, avaliando os resultados obtidos em cada método e fazendo uma análise comparativa entre eles.

A tecnologia da soldagem se caracteriza por um grande número de variáveis e parâmetros operacionais inter-relacionados de maneira quase sempre complexa, o que torna difícil o desenvolvimento de modelos matemáticos teóricos ou empíricos para processos ou produtos⁽¹⁾. Muitas tentativas de modelamento têm sido feitas, mas com êxito limitado. Pode se encontrar na literatura um número bastante elevado de equações e ábacos bastante úteis na solução de problemas complexos ou mesmo no trabalho rotineiro dos profissionais da área de soldagem, que minimizam a necessidade de testes e ensaios, com economia de tempo e materiais⁽¹⁾. Neste trabalho foi realizado o levantamento e a aplicação de algumas equações aplicáveis na avaliação da velocidade de resfriamento e do tempo de resfriamento em amostras variando sua tensão, corrente e espessura da chapa e a temperatura de pré-aquecimento, avaliando sua confiabilidade e viabilidade na aplicação prática. E a comparação dos resultados obtidos através desse método com os resultados obtidos experimentalmente junta soldada pelo processo MAG em um aço de alta resistência.

MATERIAIS E MÉTODOS

Para a obtenção dos resultados experimentais, segundo o trabalho de Reis Sobrinho e Alcântara ⁽²⁾, o processo de soldagem utilizado foi SAMG com energias de soldagem de 0,8 kJ/cm² e 1,3 kJ/cm² obtidas conforme tabela I, um sistema de análise térmica constituído de termopar, interface analógico/digital e um microcomputador, chapas de aço ASTM 514 com composição química e propriedades mecânicas ligeiramente variadas, nas espessuras de 0,83 e 1,6 mm.

Tabela I. Parâmetros de Soldagem

Parâmetros de Soldagem					
H J/cm	e cm	T °C	Tensão V	Corrente A	Velocidade de Soldagem mm/s
8645	0,83	30	19,0 ± 0,7	182 ± 2,0	4,0
		100			
	1,6	30			
		100			
12187,5	0,83	30	26,0 ± 2,0	187,5 ± 12,0	4,0
		100			
	1,6	30			
		100			

As equações utilizadas para a obtenção dos resultados referentes ao segundo método foram retiradas de um trabalho que faz um levantamento de todas as equações disponíveis na literatura⁽¹⁾, sendo algumas destas utilizadas neste trabalho:

$$H = \frac{(V \cdot I)}{v} \quad (A)$$

Onde H é a energia de soldagem, em J/cm; V é a tensão de soldagem, em V; I é a corrente de soldagem, em A.

$$HI = H \cdot \eta \quad (B)$$

Onde H_L é a energia líquida de soldagem, em J/cm; H é a energia de soldagem, em J/cm, e η é um fator adimensional de rendimento, que depende do processo, dos parâmetros de soldagem e de diversos outros aspectos, incluindo as propriedades físicas dos materiais e a geometria das peças ⁽³⁾. A Tabela II apresenta alguns valores para rendimento térmico.

Tabela II. Valores típicos para η ⁽⁴⁾

Processo	η
Eletrodo Revestido	0,65 – 0,85
GMAW	0,65 – 0,85
GTAW (CC+)	0,50 – 0,80
GTAW (CA)	0,20 – 0,50
SAW	0,80 – 0,99
Oxi-gás	0,25 – 0,80

De modo geral, η varia com diversos parâmetros operacionais. Infelizmente, essas influências são difíceis de serem consideradas usualmente. Adicionalmente, os efeitos térmicos de um processo de soldagem também dependem das características do metal de base, da junta e da própria fonte de calor (densidade de energia). Assim, H ou H_L devem ser utilizados com cautela na comparação de processos de soldagem ou na avaliação de seus efeitos, uma vez que os valores reais podem ser significativamente diferentes dos valores estimados em uma dada situação, levando a erro nas previsões das consequências da soldagem na estrutura e/ou propriedades do material ⁽¹⁾. No presente trabalho utilizamos o valor intermediário de 0,75 para η , referente ao valor mediano para um processo GMAW, segundo a Tabela II.

A velocidade de resfriamento (R) da junta soldada a uma dada temperatura ou o tempo de resfriamento (Δt) entre duas temperaturas, geralmente 800 e 500 °C ($\Delta t_{8/5}$) para aços, são características importantes do ciclo térmico de soldagem, pois influenciam fortemente a microestrutura, e podem ser estimados por:

$$R_g = \frac{2\pi k(T-T_0)^2}{H_L} \quad (C)$$

$$R_f = 2\pi k \rho C \left(\frac{h}{H_L}\right)^2 (T-T_0)^3 \quad (D)$$

$$(\Delta t_{8/5})_f = \frac{(H_L)^2}{2\pi k \rho C h^2} \left(\frac{1}{(500-T_0)^2} - \frac{1}{(800-T_0)^2} \right) \quad (E)$$

Onde k é a condutividade térmica do material, em J/(cm·s·°C), T e T₀ são, respectivamente, a temperatura (°C) na qual se quer estimar a velocidade de resfriamento e a temperatura inicial da chapa, ρ é a densidade do material, em g/cm³; C é o calor específico do material, em J/(g·°C) e h é a espessura da peça, em mm. O subscrito “f” se aplica à soldagem de chapas “finas”, isto é, com passe de penetração total e fonte de calor linear, fluxo de calor bidimensional^(5,6). As equações (C) e (D) foram obtidas estritamente para o eixo central da solda, embora, segundo o trabalho do prof. Sérgio do Carvalho Perdigão⁽⁷⁾, possam ser consideradas, para aços estruturais, em regiões da solda em que a temperatura de pico do ciclo térmico é superior a 1000°C.

A Tabela III mostra valores típicos de k, ρ e C para um aço carbono e esses valores foram os utilizados na aplicação das equações de soldagem.

Tabela III. Valores típicos para k, ρ, C

Material	k (J/cm.s.°C)	ρ (g/cm ³)	C (J/(g °C))
Aço Carbono	0,54	7,83	0,46

A espessura crítica, que distingue entre as condições de resfriamento de “chapa fina” e chapa grossa, pode ser estimada, para a velocidade de resfriamento, por⁽³⁾:

$$h_c = \sqrt{\frac{H_L}{\rho C (T-T_0)}} \quad (F)$$

Para o tempo de resfriamento, a espessura crítica é dada por⁽⁹⁾:

$$(h_c)_{T_1/T_2} = \sqrt{\frac{H_L}{2\rho C} \left(\frac{1}{T_2 - T_0} + \frac{1}{T_1 - T_0} \right)} \quad (G)$$

A American Welding Society, AWS⁽³⁾ recomenda que a equação para velocidade de resfriamento em chapa fina, equação (D), seja aplicada para $h/h_c < 0,6$ e a equação para chapa grossa, equação (C), com $h/h_c > 0,9$. Para valores de h/h_c entre 0,6 e 0,9, a AWS recomenda considerar que a velocidade de resfriamento tenha um valor intermediário entre obtidos pelas equações dos dois regimes de escoamento de calor. Para o tempo de resfriamento entre 800 e 500°C, a equação (E) é aplicável para valores $h/(h_c)_{T_1/T_2} < 1$ ⁽⁸⁾.

Outra temperatura importante é a temperatura máxima (temperatura de pico) atingida em um ponto da junta durante a deposição de um cordão de solda, que pode ser útil, por exemplo, para estimar a extensão da zona termicamente afetada (ZTA). Para a condição de resfriamento de chapa fina (f), essa temperatura pode ser calculada por ⁽⁹⁾:

$$\frac{1}{T_p - T_0} = \frac{0,0413\rho C h y}{H_L} + \frac{1}{T_f - T_0} \quad (H)$$

Onde TP é a temperatura máxima ou de pico, em °C, que se deseja estimar; y é a distância da região de interesse à linha de fusão, em mm. Nos resultados experimentais a linha de fusão teve uma espessura de 0,038 cm, sendo 0,019 cm o centro da linha de fusão. Para a medida “y” foi utilizado 0,05 cm até o centro da linha de fusão, resultando em 0,069 cm; Tf é a temperatura de fusão do material, em °C, que corresponde a 1410 °C. E os demais termos têm os mesmos significado e unidades já descritos.

Para todos os resultados utilizamos arredondamento em duas casas decimais.

RESULTADOS E DISCUSSÃO

Velocidade de Resfriamento (°C/s)

Esse parâmetro é importante na determinação da microestrutura dos aços estruturais comuns, que podem sofrer transformações de fase durante o resfriamento.

Para a escolha da equação adequada para calcular a velocidade de resfriamento, é necessário calcular a razão entre a espessura da chapa (h) e a sua espessura crítica (h_c), de modo que (h_c) seja definida pela equação (F). Após a classificação, foi utilizada a equação (C) para as chapas grossa e (D) para chapas fina.

Tabela IV. Classificação da chapa e velocidade de resfriamento

HI	To	H	Hc	h/hc	Classificação	Velocidade de resfriamento(°C/s)
6483,75	30	0,83	1,60	0,52	CHAPA FINA	68,69
		1,6	1,60	1	CHAPA GROSSA	256,42
	100	0,83	1,69	0,49	CHAPA FINA	50,07
		1,6	1,69	0,95	CHAPA GROSSA	207,70
9140,63	30	0,83	1,90	0,44	CHAPA FINA	34,56
		1,6	1,90	0,84	-	155,16
	100	0,83	2,01	0,41	CHAPA FINA	25,20
		1,6	2,01	0,80	-	120,48

Não foi possível classificar como chapa fina ou grossa a junta soldada com $HI=9140,63$ e espessura $h=1,6$ cm, pois a razão entre a espessura e a espessura crítica igual a $h/h_c=0,69$ encontra-se fora do intervalo de classificação. A literatura sugere, para esse caso, calcular a velocidade considerando como chapa fina e como chapa grossa, e utilizar a velocidade média calculada para os dois casos.

Segundo Reis Sobrinho⁽²⁾, a susceptibilidade a formação de trincas induzidas pelo hidrogênio é diretamente proporcional à velocidade de resfriamento, pois durante o resfriamento há a formação de uma microestrutura ferrítica com regiões de martensita, ou uma bainita grosseira. Porém, se o resfriamento for lento, afetará

adversamente a resistência e a tenacidade da região. A junta soldada à $Hl=6483,75$, $To=100^{\circ}C$, $h=1,6$ cm e classificada como chapa grossa, foi a amostra que apresentou maior velocidade de resfriamento.

Tempo de resfriamento (s)

Outra equação é utilizada para a classificação da chapa, quanto a sua espessura, para a escolha da equação adequada para calcular o tempo de resfriamento. A equação (G) aplicada variando a energia líquida de soldagem e a temperatura de aquecimento, mostrou que todas as amostras foram classificadas como chapa fina, pois a razão entre a espessura e a espessura crítica foi menor que 1 para todos os casos.

Tabela V. Classificação da chapa para tempo de resfriamento

H	HI	To	h	hc	h/hc	Classificação
8645	6483,75	30	0,83	1,62	0,51	CHAPA FINA
			1,6	1,62	0,98	CHAPA FINA
		100	0,83	1,74	0,48	CHAPA FINA
			1,6	1,74	0,92	CHAPA FINA
12187,5	9140,63	30	0,83	1,92	0,52	CHAPA FINA
			1,6	1,92	0,83	CHAPA FINA
		100	0,83	2,06	0,40	CHAPA FINA
			1,6	2,06	0,78	CHAPA FINA

Após a classificação da chapa e aplicada a equação (E) para obtenção do tempo de resfriamento, foram encontrados os seguintes resultados:

Tabela VI. Tempo de resfriamento calculado e medido

Tempo de resfriamento calculado($^{\circ}C/s$)	Tempo de resfriamento medido($^{\circ}C/s$)
14,18	9,8
3,82	2,57
21,02	16,1
5,65	4,8
28,19	13,3

7,59	3,91
41,77	22,1
11,24	9

Numa análise comparativa entre os resultados de tempo de resfriamento obtidos experimentalmente, fazendo medições diretas utilizando o termopar, e os resultados obtidos aplicando a equação para tempo de resfriamento de chapas finas (D), verifica-se a presença de aproximações e, em alguns casos, discordâncias mais consideráveis.

Temperatura de pico

A temperatura de pico é a variável que define os efeitos metalúrgicos provocados na junta soldada, principalmente no que diz respeito à granulometria.

Para o cálculo da temperatura de pico, foi utilizada a equação (H), variando a temperatura de pré-aquecimento e a energia líquida de soldagem.

Tabela VII. Temperatura de pico

HI(J/cm)	h(cm)	To(°C)	Tp
6483,75	0,83	30	1407,50
		100	1407,75
	1,6	30	1405,19
		100	1405,67
9140,63	0,83	30	1408,23
		100	1408,40
	1,6	30	1406,92
		100	1406,59

Os valores de temperatura de pico obtidos aplicando a equação (H) variaram de 1405,19 a 1408,40 °C valores aproximados ao encontrado utilizando medição direta durante a soldagem, que foi de 1485 °C. Apesar da pequena diferença entre os resultados, isso não afetará na microestrutura resultante, pois todas temperaturas de pico foram maiores do que a temperatura de fusão e da temperatura de transformação do aço.

CONCLUSÃO

Os resultados obtidos a partir da aplicação das equações de soldagem apresentaram resultados discordantes aos obtidos experimentalmente, principalmente em relação ao tempo de resfriamento. Já para a definição da temperatura de pico, apesar da diferença apresentada entre os resultados experimentais e calculados, não afeta adversamente no tipo da microestrutura resultante, porém afeta quantitativamente os constituintes. A diferença nos resultados pode ser dada, pois as equações não levam em consideração algumas diferenças muitas vezes relevantes, como a geometria do metal de base e algumas propriedades físicas do aço a ser soldado, além dos erros oriundos da própria elaboração das equações, que foram deduzidas analiticamente.

REFERÊNCIAS

- (1) MARQUES, P.V.; MODENESI, P.J. Algumas equações úteis em soldagem. Soldagem e Inspeção (Impresso), Vol. 19 (1), p. 91-102, 2014.
- (2) REIS SOBRINHO, J. F., ALCÂNTARA, N. G.; Influência Dos Parâmetros de Soldagem na Microestrutura da Zona Afetada Termicamente - Zat da Junta Soldada de um Aço de Alta Resistência, João Pessoa, 2007.
- (3) AMERICAN WELDING SOCIETY, Welding Handbook – Welding Technology. Miami: AWS, 2001. v. I. Caps 1 e 7. 9th ed.
- (4) KOU, S. Welding Metallurgy. New York: John Willey & Sons, 2003. 2ed. p.33.
- (5) MODENESI, P. J., MARQUES, P. V., SANTOS, D. B. Introdução à Metalurgia da Soldagem. Belo Horizonte: UFMG, 2012. Capítulo 3. Disponível em: <http://demet.eng.ufmg.br/wp-content/uploads/2012/10/metalurgia.pdf> Acessado em: 20/12/2013
- (6) ARAÚJO, C. L. D. A Study of Coarse Grain Heat Affected Zone of Accelerated Cooled Structural Steels. Cranfield Institute of Technology, PhD Thesis. Cranfield: 1990. pp.19-20.
- (7) PERDIGÃO, S. C., Ciclos térmicos de soldagem, Metalurgia ABM, 38 (295), Jun. 1982, pp.349-353.

(8) MACHADO, I. G., *Condução de Calor na Soldagem: Fundamentos & Aplicações*, Imprensa Livre Editora, Porto Alegre, 200, 119p.

(9) ADAMS Jr, C. M. Cooling Rates and Peak Temperatures in Fusion Welding. *Welding Journal*, May, 1958. pp.210s-215s.

ANALYSIS OF THERMAL CYCLE LOW HIGH STRENGTH STEEL ON USING METHOD DIRECT AND EQUATIONS WELDING

ABSTRACT

One of the most serious defects on the weldability of high strength steels is the occurrence of cracks induced by hydrogen or cracks cold, which may occur in the weld metal - MS as in area affected Thermally - HAZ of the welded joint, at temperatures below 200 ° C. Control of the thermal cycle during welding it is important to obtain a welded joint free of this type of defect. The thermal cycles in welded joints can be assessed by simulation methods, with measures made directly to the welded joint or applying some equations available in the literature, which were obtained empirically or by multiple linear regression. This study utilizes two methods for assessing the susceptibility to the formation of cold cracks, the direct method by conducting measurement, and the method of application of welding equations. Then, comparative analysis of two methods.

Keywords: High strength steels, Direct method, Welding equations