



CICLOS TÉRMICOS ENVOLVIDOS NA SOLDAGEM

É bastante sabido que na soldagem de aços estruturais de baixa resistência, tanto o metal depositado como a zona afetada pelo calor possuem quase as mesmas características de resistência que o metal de base, mesmo utilizando-se uma larga faixa de condições de soldagem. Entretanto, no caso de aços de alta resistência, o metal depositado e/ou a zona afetada pelo calor, poderão não ser tão resistentes quanto o metal base se a taxa de resfriamento após a soldagem é muito lenta. Por outro lado, em ambas as regiões (MD o zac) poderão surgir trincas se a taxa de resfriamento é muito rápida. Por estas razões, quando da soldagem de aços de alta resistência, devem ser especificadas as condições de soldagem que resultem numa faixa de resfriamento aceitável e coerente com as propriedades mecânicas de junta soldada.

A fim de se controlar as alterações metalúrgicas na soldagem, as condições térmicas no metal depositado e próximo à ele devem ser estabelecidas. De modo particular devem ser considerados:

1. A distribuição da temperatura máxima (ou temperatura de pico = T_p) na zona afetada pelo calor.
2. As taxas de resfriamento no metal depositado e na zona afetada pelo calor.
3. A taxa de solidificação do metal depositado.

Equação da Temperatura Máxima

A previsão ou interpretação das transformações metalúrgicas em um ponto de metal sólido perto da solda requer algum conhecimento da temperatura máxima atingida em um ponto específico.

Esta temperatura pode ser definida pela fórmula a seguir:

$$\frac{1}{T_p - T_0} = \frac{4,13\rho C y}{H_{net}} + \frac{1}{T_m - T_0}$$

Sendo:

T_p = Temperatura máxima (°C) a uma distância Y(mm) a partir LIF.

T_0 = Temperatura inicial da chapa (°C)

T_m = Temperatura de fusão (°C) – especificamente a temperatura LÍQUIDUS de metal a ser soldado.

H_{net} = Energia líquida adicionada

$$H_{net} = \frac{fEI}{v} \left\{ \begin{array}{l} f = \text{eficiência na transferência de calor} \\ E = \text{tensão de soldagem (volts)} \\ I = \text{corrente de soldagem (ampére)} \\ v = \text{velocidade de soldagem (mm/seg)} \end{array} \right\}$$

ρ = Densidade do material (g / mm^3)
 C = Calor específico do metal ($J/g \cdot ^\circ C$)
 ρC = Calor específico volumétrico ($J / mm^3 \cdot ^\circ C$)
 t = espessura da chapa em (mm)

A equação (1) pode ser usada para:

1. Determinação da temperatura máxima em pontos específicos da ZAT.
2. Estimar a largura da ZAT.
3. Estimar o efeito pré-aquecimento na largura da ZAT.
4. Estimar o efeito energia adicionada sobre a largura da ZAT.

EXEMPLOS

Determinação da Temperatura Máxima

$$\text{Suponhamos que } \left\{ \begin{array}{l} E = 20v \quad I = 200A \quad V = 5mm/seg \quad T_0 = 25^\circ C \\ T_m = 1510^\circ C \quad \rho C = 0,0044J/mm^3 \cdot ^\circ C \quad t = 5mm \\ f_1 = 0,9 \quad H_{net} = 720J/mm \end{array} \right\}$$

$$\text{Se } y = 1,5mm \quad \frac{1}{T_p - 25} = \frac{4,13 \times 0,0044 \times 5 \times 1,5}{720} + \frac{1}{1510 - 25}$$

$$T_p = 1184^\circ C$$

$$\text{Se } y = 3,0mm \quad \text{_____} \quad T_p = 976^\circ C$$

Como era de se esperar, a temperatura diminui com o aumento da distância da linha de fusão.

Se $y=0 \Rightarrow T_p = T_m \Rightarrow$ A temperatura máxima na linha de fusão é igual a temperatura de fusão.

Determine a largura da ZAT.

Para calcular a largura da ZAT com precisão deverá ser relacionado com uma temperatura máxima específica, a qual por sua vez é associada com alguma mudança característica na estrutura ou propriedade do material. No caso de aços ao carbono e baixa liga este contorno corresponde a $T_p = 730^\circ C$. Assumindo este valor e considerando os valores anteriores:

$$\frac{1}{730 - 25} = \frac{4,13 \times 0,0044 \times 5 \times y}{720} + \frac{1}{1510 - 25}$$

$$y = 5,9mm$$

Efeito do Pré Aquecimento na Largura da ZAT

Se entretanto o aço for temperado e revenido, revenido a 430°C, qualquer região aquecida acima de 430°C estará na teoria super-revenida e poderá apresentar propriedades modificadas. Assim, é razoável considerar o limite da ZAT onde $T_p = 420$ °C. Assim:

$$\frac{1}{430 - 25} = \frac{4,13 \times 0,0044 \times 5 \times y}{720} + \frac{1}{1510 - 25}$$

$$y = 14,2\text{mm}$$

Os aços que foram temperados e revenidos, freqüentemente são pré-aquecidos antes da soldagem. Este pré-aquecimento aumenta a ZAT. Suponhamos que no exemplo anterior $T_0 = 1184$ °C. Então:

$$\frac{1}{430 - 200} = \frac{4,13 \times 0,0044 \times 5 \times y}{720} + \frac{1}{1510 - 200}$$

$$y = 28,4\text{mm} \text{ (O pré-aquecimento aumenta a ZAT)}$$

Efeito de Energia Adicionada sobre a Largura da ZAT

O segundo aspecto importante a ser considerado na transferência de calor é a taxa de resfriamento da solda. Após um ponto na solda ou próximo à ela ter atingido a temperatura máxima, a taxa na qual ele resfria poderá ter efeito significativo na estrutura metalúrgica, propriedades e até mesmo na ausência de defeitos da solda.

Para um melhor entendimento do que será exposto a seguir, exemplifiquemos as definições de Rosenthal (1941) e outros investigadores: - foi definido que existem 4 tipos de escoamento de calor durante o resfriamento de uma solda, dependendo da “espessura relativa da chapa”. Os tipos de escoamento são esquematizados a definidos a seguir:

- a) Chapa Grossas- O calor conduz-se radialmente em todas as direções dentro da chapa. Este modelo é referido como 3D.
(Tridimensional)

(Figura)

- b) Chapas de Espessura Intermediária- Transmitindo o efeito da superfície inferior da chapa, o escoamento de calor se reproduz em modelos que se situam entre os de chapas grossas e chapas finas. Este modelo transicional é referido como 2,5D.

(Figura)

- c) Chapas Finas – O calor escoar-se em planos paralelos às superfícies das chapas. À este modelo nos referimos como 2D. (Bidimensional)

(Figura)

- d) Chapas Muito Finas – Quando as chapas são muito finas, a transferência de calor por radiação ou convecção pode estar presente. À este modelo chamamos 2D+R, isto é, 2D+ Radiação.

(Figura)

O cálculo e a comparação de taxas de resfriamento requerem uma cuidadosa especificações das condições. Referir-se simplesmente à “taxa de resfriamento” de uma solda é inadequado, devido ao fato de que as taxas de resfriamento variam com a posição e o tempo. O método mais utilizado é determinar a taxa de resfriamento na linha central de uma solda no momento em que o metal está se solidificando passa por uma determinada temperatura de interesse, T_c . Nas temperaturas bem abaixo do ponto de fusão, as taxas de resfriamento na solda e nas suas imediações na ZAT são substancialmente independentes da posição.

Nos aços ao carbono e de baixa liga, esta temperatura de interesse é quase sempre tomada próximo à temperatura do “nariz” perlítico do diagrama TTT. A temperatura exata não é a crítica porém, deverá ser sempre a mesma para todos os cálculos e comparações. Um valor bastante satisfatório, para este tipo de consideração, é considerado como $T_c=550^\circ\text{C}$ ou $T_c=540^\circ\text{C}$.

Visto que na prática é difícil obter-se esta determinação, o que se procura muitas vezes fazer é determinar a taxa de resfriamento entre duas dadas temperaturas, geralmente entre 800°C e 500°C .

São definidas duas equações para o cálculo das taxas de resfriamento, dependendo do escoamento de calor ser tridimensional (chapas grossas) ou bidimensional (chapas finas):

$$R = 2\pi K \rho C \left(\frac{t}{H_{net}}\right)^2 (T_c - T_0)^2 \quad \text{EQUAÇÃO PARA CHAPAS FINAS (2D)} \quad (2)$$

$$R = \frac{2\pi K (T_c - T_0)^2}{H_{net}} \quad \text{EQUAÇÃO PARA CHAPAS GROSSAS (3D)} \quad (3)$$

Sendo: R = taxa de resfriamento de um ponto na linha central da solda ($^\circ\text{C}/\text{seg}$) no exato momento em que o ponto passa na temperatura de interesse, T_c
 K = condutividade térmica do metal ($\text{J}/\text{mm seg } ^\circ\text{C}$)

Para se definir a utilização das equações (2) ou (3), é definida uma quantidade adimensional chamada “espessura relativa da chapa” $\rightarrow T$

$$T = t \sqrt{\frac{\rho C (T_c - T_0)}{H_{net}}} \quad (4)$$

A equação (2) para chapas grossas é aplicada quando $T > 0,9$ e a equação (3) para chapas finas é aplicado quando $T < 0,6$. Quando $0,6 < T < 0,9$ a equação (2) para chapas grossas, dá , quando aplicada , uma taxa de resfriamento muito alta, e a equação(3) para chapas finas dá muito baixa. Entretanto, se fazemos $T=0,75$ e consideramos que para valores superiores devemos aplicar a equação (2) e para valores inferiores a equação (3), o erro máximo no cálculo da taxa de resfriamento não excederá 15% e , como será visto, o erro na aplicação das equações para o cálculo das temperaturas de pré-aquecimento será menor.

Conforme pode ser visto das equações (2) e (3) um pré-aquecimento conduz à uma redução da taxa de resfriamento. Por esta razão o pré-aquecimento é freqüentemente utilizado na soldagem de aços temperáveis. Para cada aço de composição específica, existe uma taxa de resfriamento crítica. Se a taxa de resfriamento no metal depositado excede o

valor crítico, poderão se desenvolver estruturas martensíticas de dureza alta na ZAC e haverá o grande risco de trincas sob a influência de tensões térmicas na presença de hidrogênio. A equação da taxa de resfriamento poderá ser utilizada para determinar a taxa de resfriamento crítica (sob condições de soldagem) e para estimar as temperaturas de pré-aquecimento.

Cálculo da Temperatura de pré-aquecimento e da Taxa de Resfriamento

Quando da soldagem de aços temperáveis, o primeiro problema é determinar a taxa de resfriamento crítica. A maneira mais simples e direta de fazer isto é fazer uma série de cordões de solda sobre chapas (besd-on-plate weld passes) na qual todos os parâmetros são mantidos constantes, exceto a velocidade de solda. Suponhamos por exemplo:

$$E=25V \quad I=300A \quad t=6mm \quad f1=0,9 \quad T_0 = 25^\circ C \quad T_c = 550^\circ C$$

Os passes foram executados a 6,7,8,9 e 10mm/Seg. Testes de dureza foram levados a cabo em seções transversais da solda e determinou-se estruturas de elevada dureza nas ZAC's das soldas depositadas a 9 e 10mm/Seg, porém não nas outras.

A conclusão a que se chega é que a taxa crítica de resfriamento seria encontrada numa velocidade de soldagem acima de 8mm/Seg. Ainda mais, fica definido a uma velocidade de 8mm/Seg resultou numa taxa de resfriamento que é o valor máximo de "segurança". Neste caso:

$$H_{net} = \frac{fEI}{v} = \frac{0,9 \times 25 \times 300}{8} = 843,75 \text{ J/mm}$$

$$T = t \sqrt{\frac{\rho C (T_c - T_0)}{H_{net}}} = 6 \sqrt{\frac{0,0044(550 - 25)}{843,75}} = 0,31$$

Como $T < 0,6$ deve-se aplicar a equação (3) para chapas finas:

$$R = 2\pi K \rho C \left(\frac{t}{H_{net}}\right)^2 (T_c - T_0)^3 = 2 \times 3,14 \times 0,028 \times 0,0044 \left(\frac{6}{843,75}\right)^2 (550 - 25)^3 = 5,7^\circ C / seg$$

O resultado significa que aproximadamente $6^\circ C/seg$ é a máxima taxa de resfriamento "segura" para este aço, nas condições de soldagem enunciada, e que a taxa de resfriamento não deverá exceder este valor. O pré-aquecimento poderá ser utilizado na soldagem para reduzir a taxa de resfriamento a $6^\circ C$ ou menos.

Por exemplo, suponhamos as seguintes condições:

$$E=25V \quad I=250A \quad V=7mm/Seg \quad t=9mm \quad f1=0,9$$

Assumindo a aplicação da equação (3) para chapas finas, teríamos:

$$H_{net} = \frac{0,9 \times 25 \times 250}{7} = 204 \text{ J / mm}$$

$$\left(\frac{R}{2\pi K} \right)_{m\acute{a}x} = \rho C \left(\frac{t}{H_{net}} \right)^2 (T_c - T_0)^3 = 0,0044 \times \left(\frac{6}{843,75} \right)^2 (550 - 25)^3 = 32,2$$

$$32,2 = 0,0044 \left(\frac{9}{804} \right)^2 (550 - T_0)^3 \therefore T_0 = 162^\circ\text{C}$$

$$T = 9 \sqrt{\frac{0,0044(550 - 162)}{804}} \therefore T = 0,41$$

Sendo $T < 0,60$ indica o uso certo da equação (3) para chapas finas. Assim, se a temperatura inicial da chapa é de 162°C a taxa de resfriamento não irá exceder a 6°C/seg e não haverá a formação de material frágil na ZAT.

Suponhamos agora a mesma H_{net} e a soldagem numa chapa de 25mm de espessura

a) Usando a equação (3) para chapas finas;

$$32,2 = 0,0044 \left(\frac{25}{804} \right)^2 (550 - T_0)^3 \therefore T_0 = 354^\circ\text{C}$$

$$T = 25 \sqrt{\frac{0,0044(550 - 354)}{804}} \therefore T = 0,82$$

b) Usando a equação (2) para chapas grossas:

$$32,2 = \frac{(550 - T_0)^2}{804} \therefore T_0 = 389^\circ\text{C}$$

$$T = 25 \sqrt{\frac{0,0044(550 - 389)}{804}} = 0,74$$

Nenhum dos dois valores de pré-aquecimento calculados é exato (um é muito baixo e o outro muito alto). Entretanto, a diferença não é de importância na prática. Neste caso, é prudente selecionar a temperatura de pré-aquecimento mais elevada.

O resfriamento de uma solda depende dos caminhos disponíveis para a condução (ou escoamento) do calor no metal de base circunvizinhos. Algumas vezes é necessário modificar as equações da taxa de resfriamento para soldas de topo ou soldas sobre a chapa (“bead-on-plate”). O exemplo que se segue é da soldagem em filete de uma junta em T, com chapas de 9mm, usando o mesmo $H_{net}=804 \text{ J/mm}$. Neste caso existem 3 “pernas” escoando o calor ao invés de 2. A equação da taxa de resfriamento, deste modo, é modificada para reduzir a energia efetiva adicionada por um fator de $2/3$:

$$H_{net} = \frac{2}{3} \times 840 = 536 J / mm$$

$$32,2 = 0,0044 \left(\frac{9}{536} \right)^2 (550 - T_0)^3 \therefore T_0 = 254^\circ C$$

$$T = 9 \sqrt{\frac{0,0044(550 - 254)}{536}} = 0,44$$

Como $T < 0,6$ foi usada corretamente a equação (3) para chapas finas.

A seleção da temperatura de pré-aquecimento deverá ser feita através de testes de soldabilidade específicos. A temperatura de pré-aquecimento ideal é aquela que mantém a taxa de resfriamento abaixo da temperatura crítica. Um pré-aquecimento excessivo não só transmite um desconforto desnecessário ao soldador como também, como foi salientado anteriormente, aumenta a largura da zona afetada pelo calor.

Infelizmente, é comum considerar-se a temperatura de pré-aquecimento como uma propriedade fixa do aço a ser soldado, fixando-se esta temperatura em função do aço e independente de outras variáveis envolvidas (condições de soldagem, espessura do material, etc.). Isto é extremamente perigoso pois esta temperatura deste modo pré-fixada poderá ser excessiva ou insuficiente para prevenir os problemas na soldagem de um dado aço.

Deve ser finalmente entendido que, não é a temperatura de pré-aquecimento uma propriedade do aço, e sim a taxa de resfriamento crítica que deve ser considerada.

2.3 Taxas de Solidificação

A taxa na qual o MD solidifica pode ter um profundo efeito na sua estrutura metalúrgica, propriedades, resposta a um tratamento térmico e ausência de defeitos. O tempo de solidificação, em segundos, do MD é dado por:

$$S_t = \frac{L \cdot H_{net}}{2\pi K \rho C (T_m - T_0)^2}$$

onde: S_t = tempo de solidificação \rightarrow é o tempo decorrido desde o início até o final da solidificação em um dado ponto no metal depositado (segundos).

L = calor de fusão (J / mm^3).

Se, por exemplo: $H_{net} = 800 J / mm$ e $T_0 = 25^\circ C$

$$S_t = \frac{2 \cdot 800}{2\pi \cdot 0,028 \cdot (0,0044) \cdot (1510 - 25)^2} = 0,94s$$

Como se pode ver, a solidificação do material depositado é extremamente rápida, sendo um erro descrever-se sua estrutura como sendo de fundição, pois seu processo de solidificação é único.

2.4 Exemplo de Ciclos Térmicos Reais e Uso de Nomogramas

Para o desenvolvimento do estudo de soldabilidade de um aço da alta resistência devemos conhecer o ciclo térmico que se efetua durante e após a soldagem.

Na figura 1 apresentamos um exemplo de ciclos térmicos reais, resultado de medições efetuadas pelo professor Kihara.

Conforme mostrado na figura, o aquecimento atinge a temperatura próxima àquela de fusão em alguns segundos e a velocidade de resfriamento até cerca de $200^\circ C$ é de cerca de um

minuto. Em outras palavras, a velocidade de resfriamento é idêntica à têmpera de aço em óleo ou água.

Para estimar a velocidade de resfriamento a 540°C a partir de condições de soldagem (I/v, espessura da chapa e temperatura inicial da chapa), o mesmo autor estabeleceu um nomograma para os casos de soldagem “bead on plate”, primeiro cordão de um chanfro em X e solda em ângulo. Este nomograma é apresentado na figura 2.

Quando se deseja estimar o tempo de resfriamento entre 800°C e 500°C, pode-se utilizar o nomograma estabelecido pelo professor Inagaki, apresentado na figura 3.

Ramón S. Cortés Paredes, Dr. Eng°.

Coordenador do Laboratório de Aspersão Térmica e Soldagem Especiais - LABATS
Departamento de Engenharia Mecânica - DEMEC
Universidade Federal do Paraná - UFPR
Fone/Fax: 55 (41) 3361-3429
E-mail: ramon@ufpr.br