Unisanta Science and Technology, **2018, 3, July**
Published Online 2018 Vol.7 N°1 http://periodicos.unisanta.br/index.php/sat)

UNISANTA
Science and Technology
ISSN 2317-1316

Estudo sobre a Fragilização por Hidrogênio de Trincas em Cordões de Solda a Frio

Marcelo Yamaguti, Dorotea Vilanova Garcia e Emmanuelle Sá Freitas Feitosa

UNISANTA – Universidade Santa Cecília – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica - PPGEMec
Rua Oswaldo Cruz, 266 - Santos-SP, Brasil - CEP: 11045-100

Received May, 2018
E-mail*:* m_yamaguti@hotmail.com

Resumo: Trincas por fragilização por hidrogênio vem sendo estudadas a vários anos devido as suas consequências maléficas em cordões de soldas e juntas soldadas realizadas em aços de alta tensão, como o ASTM A 131, devido a tendência (se os parâmetros de soldagem não forem adequados) destes aços gerarem estrutura frágil (martensita), fato este que em conjunto com a presença de hidrogênio, propiciam as condições ideais para o surgimento de trincas retardadas, segundo o mecanismo de Granjon. Medidas adequadas para o controle dos parâmetros de soldagem são essenciais para diminuir ou mesmo eliminar a possibilidade de formação destes tipos de trinca. Dentre os parâmetros a serem controlados, um dos mais importantes é o controle da taxa de resfriamento da área de solda. O modelamento matemático para a visualização da distribuição de calor a partir da poça de fusão é um recurso que poderia facilitar a tomada de decisões sobre a melhor estratégia a ser empregada para o controle dos parâmetros de soldagem, que é o escopo deste trabalho.

Palavras-chave: Fragilização por hidrogênio, trinca a frio, aço alta tensão ASTM A 131 AH 36.

Study about Hydrogen embrittlement cracking on Weld Seams

Abstract: Hydrogen embrittlement cracking has been studied for several years due to its harmful consequences on weld seams and welded joints made in high tensile steels, such as ASTM A 131, due to the tendency (if welding parameters are not adequate) of these high tensile steels to generate embrittlement structure (martensite), which together with the presence of hydrogen, provide the ideal conditions for the arising of cold cracks, according to the Granjon mechanism. Appropriate measures for the control of welding parameters are essential to reduce or even eliminate the possibility of forming these types of cracks. Among the parameters to be controlled, one of the most important is the control of the cooling rate of the weld area. The mathematical modeling for the visualization of the heat distribution from the fusing puddle is a resource that could facilitate the decision making on the best strategy to be used to control the welding parameters, which is the scope of this work.

Keywords: Hydrogen embrittlement, cold crack, high tensile steel ASTM A131 A 36

1. Introdução

O presente trabalho teve por objetivo estabelecer e gerar um modelamento matemático a partir da equação fundamental da transferência de calor, descrita por Wainer et al. (1992), através de um sólido em função do tempo e em relação a um sistema cartesiano triortogonal (x,y,z), com o finalidade de analisar o comportamento da distribuição de calor ao longo de um cordão de solda em chapa ASTM A 131 AH 36. Esta análise visa verificar como a condução de calor afetava a taxa de resfriamento

Copyright © 2018 ISESC.

nas regiões vizinhas (zona termicamente afetada) ao longo do cordão de solda, taxa de resfriamento esta que afeta diretamente o volume de hidrogênio que pode ficar retido na austenita (Wainer et al. 1992), gerando o aumento de pressão na rede cristalina onde este hidrogênio fica acumulado, quando a solda é executada sob determinadas condições que propiciem a presença deste hidrogênio na solda. Segundo Okumura et al. (1982), o hidrogênio absorvido pelo metal pode ser proveniente de substancias orgânicas contidas nos fluxos e da umidade atmosférica, além de outros.

A trinca a frio por hidrogênio é uma das mais sérias consequências do não cumprimento dos procedimentos de solda estabelecidos para a garantia da qualidade destas, podendo provocar sérios danos e consequentemente grandes prejuízos materiais.

2. Materiais e Métodos

O modelo matemático objeto deste trabalho, foi desenvolvido a partir da plataforma Matlab, usando como base a equação fundamental da transferência de calor conforme abaixo (Wainer et al 1992):

$$\frac{\partial}{\partial x}[\lambda_T \frac{\partial T}{\partial x}] + \frac{\partial}{\partial y}[\lambda_T \frac{\partial T}{\partial y}] + \frac{\partial}{\partial z}[\lambda_T \frac{\partial T}{\partial z}] + q_0 = \rho.c\frac{\partial T}{\partial t} \quad (1)$$

Onde:
T= variável representando a temperatura (°C)
x,y,z= coordenadas cartesianas ortogonais (em *mm*)
t= tempo (*s*)
λ_T= condutibilidade térmica do material, dependente da temperatura (em J/s mm °C)
ρ= densidade do material (em g/mm^3)
c= calor específico do material no estado sólido (em j/g °C)
q_0= fonte ou sorvedouro de calor (em J/s *mm*^{3}).

Segundo Wainer et al. (1992), para o caso específico do estudo em processos de soldagem, pode-se considerar, para efeitos práticos, a inexistência de fontes ou sorvedouros de calor no interior do material, com o objetivo de simplificar o estudo da transferência de calor, devido a complexidade dos modelos analíticos. No processo de soldagem, as transformações ocorrem em um curto espaço de tempo, devidas ao fornecimento de calor e posterior resfriamento da junta, em volume pequeno de metal (a poça de fusão). Também pode ser considerada a condutibilidade térmica como constante (λ_T=λ). Aplicando-se estas simplificações a equação (1) toma a seguinte forma:

$$\lambda[\frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial z^2}] = \rho.c\frac{\partial T}{\partial t}$$

ou

$$\nabla^2 T = \frac{1}{k}\frac{\partial T}{\partial t} \quad (2)$$

Onde:
$k = \frac{\lambda}{\rho}$ é a difusividade térmica do material (em mm^2/s)
λ= condutibilidade térmica do material, dependente da temperatura (em J/s mm °C)
c= calor específico do material no estado sólido (em j/g °C)

Wainer et al. 1992, mostram que a equação de Fourier (2) pode ser empregada para o estudo de fenômenos térmicos durante a soldagem de metais ferrosos.

Este trabalho foi escrito levando-se em consideração o estudo dos fenômenos térmicos de distribuição de calor em chapas grossas, com espessura de ½" a 1", normalmente utilizadas em cascos de navios de grande porte.

Para chapas grossas, a equação de Fourier deve ser resolvida com base em 3 coordenadas (sistema tridimensional), com a fonte de calor se movendo em regime quase estático, representando o movimento do eletrodo sobre a chapa durante o processo de soldagem, processo no qual poderá ser estudado as linhas isotermas de distribuição de calor a partir da poça de fusão (Wainer et al.1992). Desta forma, a coordenada x pode ser substituída pela coordenada móvel w através da relação abaixo:

$$W = x - vt \quad (3)$$

Utilizando-se a coordenada w para regime quase estacionário temos a seguinte equação:

$$\frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} = -\frac{v}{k}\frac{\partial T}{\partial w} \quad (4)$$

De acordo com Wainer et al. (1992), a equação pode ser expressa da seguinte forma:

$$T = T_0 + \frac{Q}{2\pi\lambda} e^{-\alpha w}\{\frac{e^{-\alpha}}{R} + \sum_{n=1}^{\infty}[\frac{e^{-\alpha Rn}}{R_n} + \frac{e^{-\alpha R'n}}{R'_n}]\} \quad (5)$$

Onde:

$$\alpha = \frac{v}{2k}$$

T_0= temperatura inicial da chapa (em °C)
T= temperatura final da chapa (em°C)
λ= condutibilidade térmica do material, dependente da temperatura (em J/s mm °C)
Q = quantidade de energia fornecida pelo arco elétrico.

Quantidade (Q) total de energia fornecida pelo arco elétrico,dada pela seguinte equação:
Q = V.I (W), onde V é a tensão do arco em volts, e I é corrente de soldagem em amperes.

Copyright © 2018 ISESC

$R = \sqrt{w^2 + y^2 + z^2}$ (mm)

$R_n = \sqrt{w^2 + y^2 + (2nh - z)^2}$ (mm)

$R'_n = \sqrt{w^2 + y^2 + (2nh + z)^2}$ (mm)

II= espessura da chapa (mm)

De acordo com Grong (1997), a equação simplificada pode ser escrita da seguinte forma:

$$T = T_0 + \frac{H}{2\pi\lambda}\left[\frac{1}{R}\right] \exp\left\{-\frac{v}{2a}[R+x]\right\} \quad (6)$$

Onde:

$R = \sqrt{x^2 + y^2 + z^2}$

H= aporte térmico induzido na poça de fusão
λ= condutividade térmica
v= velocidade de soldagem

A equação acima é conhecida como a solução de Rosenthal, que leva em consideração o aporte térmico, velocidade de soldagem e distância da isoterma em relação à poça de fusão, e é a solução da equação diferencial parcial de Fourier para chapas de aço grossas.

O material escolhido para realizar este estudo foi o aço ASTM (2008) A131 AH 36 de alta tensão, largamente utilizado na construção naval.
Algumas propriedades mecânicas e térmicas relevantes do material estudado encontram-se na Tabela 1.

O modelamento matemático para a visualização da distribuição de calor a partir da poça de fusão foi feito com o *Software* MatLab.

3. Resultados e discussão

As trincas a frio ou trincas retardadas são, trincas que ocorrem em períodos que variam de 12 a 48 horas a partir do término dos trabalhos de soldagem. Desta forma, caso sejam realizados ensaios visuais ou não destrutivos no cordão de solda imediatamente após o término dos trabalhos, não será detectada estas trincas (Okumura et al., 1982).

O modelo de fragilização de Granjon (1972) leva em consideração a perda de solubilidade do hidrogênio no metal liquido com a redução da temperatura, o conceito da fragilização pelo modelo proposto segue no estado solidificado, na decomposição da austenita em ferrita e cementita. Neste momento há uma queda na solubilidade do hidrogênio, que tenderá a se difundir para a região austenitizada do metal base. Durante o resfriamento, quando esta região atinge temperaturas abaixo de 150°C (Junior Soeiro, 2013), esta estrutura com maior concentração de hidrogênio pode temperar, devido a velocidade de resfriamento, resultando em estrutura fragilizada martensitica, conforme representado na Figura 1.

Durante o processo de soldagem, vários fatores podem acarretar a contaminação do cordão por hidrogênio, como a falta de tratamento de secagem adequado dos eletrodos por exemplo. Okumura et al (1982) em seu trabalho, relata que a poça de fusão, ao iniciar o processo de solidificação, transforma-se em austenita.

Tabela 1. Características do aço ASTM 131 AH 36.

Especificação de grau	CE (%)	LE (MPA)	LR(MPA)	λ (W/ mm °C)	α (mm2/s)
AH 36	0,38 máx.	355 min	490 - 620	0,04	8

Fonte: adaptado de ASTM

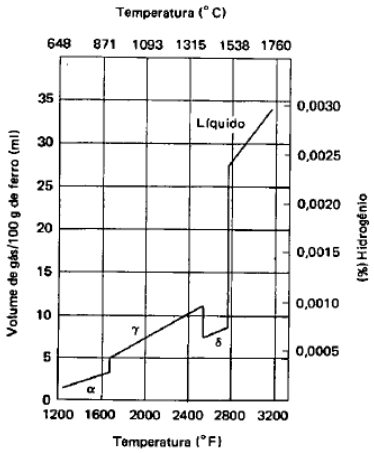

Figura 1. Solubilidade do hidrogênio no ferro.
Fonte: Adaptado de Okumura et al. (1982)

Copyright © 2018 ISESC

A área do metal base possui regiões imediatamente próximas ao cordão de solda que também estão austenitizadas. Quando ocorre a decomposição da austenita em ferrita e cementita, há uma queda acentuada da solubilidade do hidrogênio, que passará a ter a tendência de se difundir para a região austenitizada do metal base. Esta decomposição varia em função da taxa de resfriamento do cordão de solda (Junior Soeiro, 2013), propiciando a formação de fase frágil.

A figura 2 mostra de forma esquemática o mecanismo de fragilização por hidrogênio.

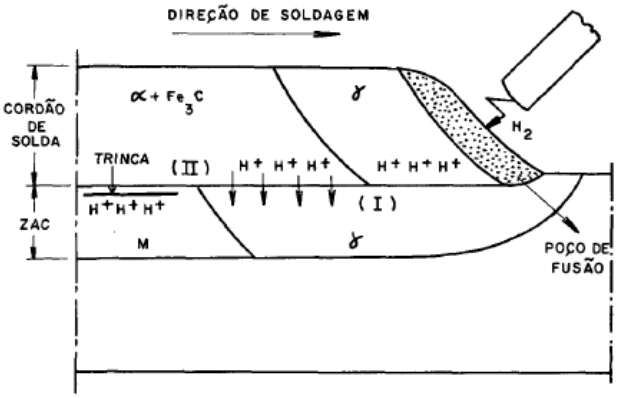

Figura 2. Mecanismo de fragilização por hidrogênio.
Fonte: Wainer et al (1992).

A seguir é possível ver o modelo (Figura 3) de isotermas em um cordão de solda típico, bem como a curva que mostra a taxa de queda da temperatura a partir da poça de fusão. É possível observar na Figura 4 o mapa de isotermas produzido utilizando Matlab (Matlab for Student Use, 2015).

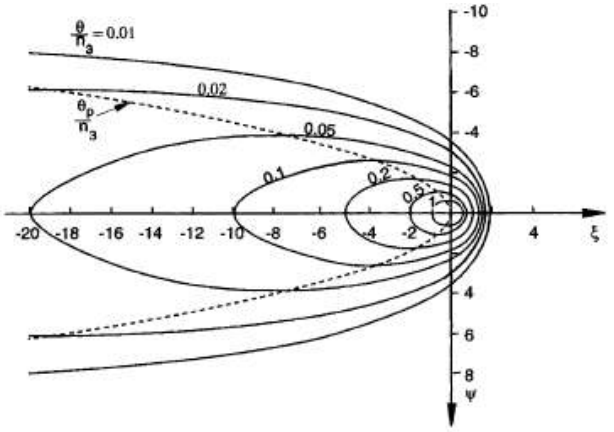

Figura 3. Mapa de temperaturas-contorno das isotermas.
Fonte: Adaptado de Grong (1997).

Foram considerados os dados de característica de material pertinente ao AH 36 descritos na Tabela 1, e foi utilizada a solução da equação 6 de Rosenthal para chapas grossas.

O mapa de isotermas com codificação de cores favorece facilitar a visualização do comportamento de isotermas a partir da poça de fusão, compreender como estas isotermas variam em função dos parâmetros estabelecidos (velocidade de soldagem, aporte térmico introduzido, etc.), com o objetivo de tomar as medidas necessárias para se evitar a fragilização e consequentemente a indução e formação de trinca frágil por hidrogênio.

Na figura 4 é possível notar que as cores mais claras denotam as temperaturas elevadas da poça de fusão, e a medida que se distancia deste ponto, há uma queda acentuada de temperatura, denotada pelas cores mais vermelhadas.

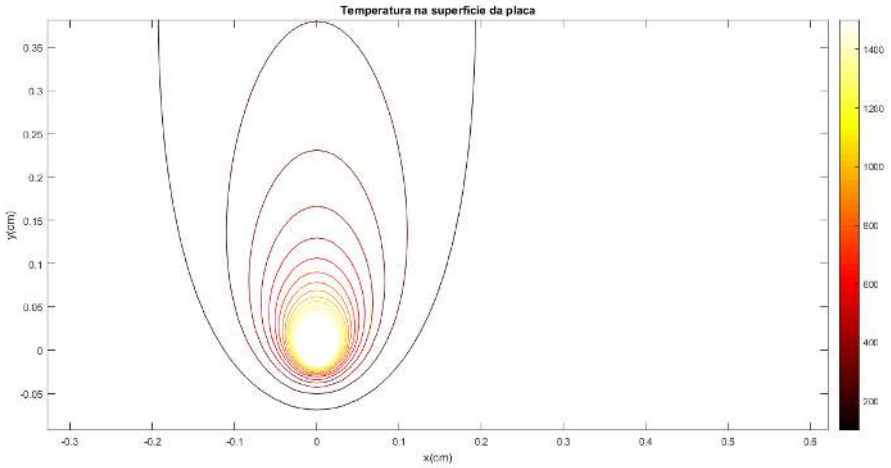

Figura 4. Mapa de temperaturas- contorno de isotermas- velocidade de 5 mm/s.

Copyright © 2018 ISESC

Esta queda acentuada é devida à pequena área que esta recebendo o aporte térmico proveniente do arco em relação à área da superfície total que está sendo soldada. Esta variação de temperatura em tão pequena área dará origem às tensões residuais. Também é possível notar o formato elíptico alongado quando a velocidade de avanço da poça é de 5 mm/s.

Quando a velocidade é aumentada para 20 mm/s (Figura 5), percebesse que a forma das isotermas se torna mais alongadas, denotando redução da amplitude de distribuição de calor no eixo X.

Quando a velocidade é diminuída para 2 mm/s (figura 6), pode ser observada a redução do comprimento do eixo Y, denotando a distribuição de calor ao redor da poça de fusão mais homogênea devido a velocidade reduzida da poça de fusão.

Como pode ser verificado através da codificação de cores nas figuras acima, a taxa de queda de temperatura é acentuada a partir da poça de fusão, gerando as condições propicias para a queda da solubilidade de hidrogênio na região martensitica e formação de estrutura frágil (cementita).

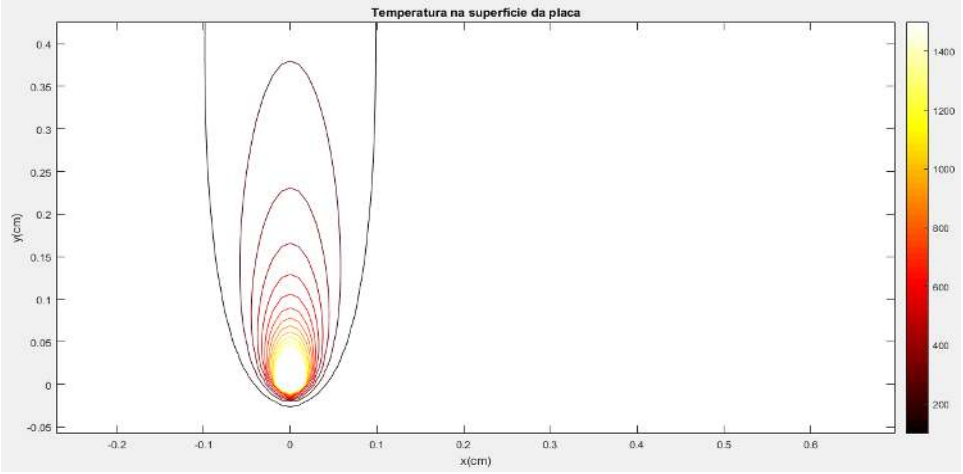

Figura 5: Mapa de temperaturas- contorno de isotermas- velocidade de 20 mm/s.

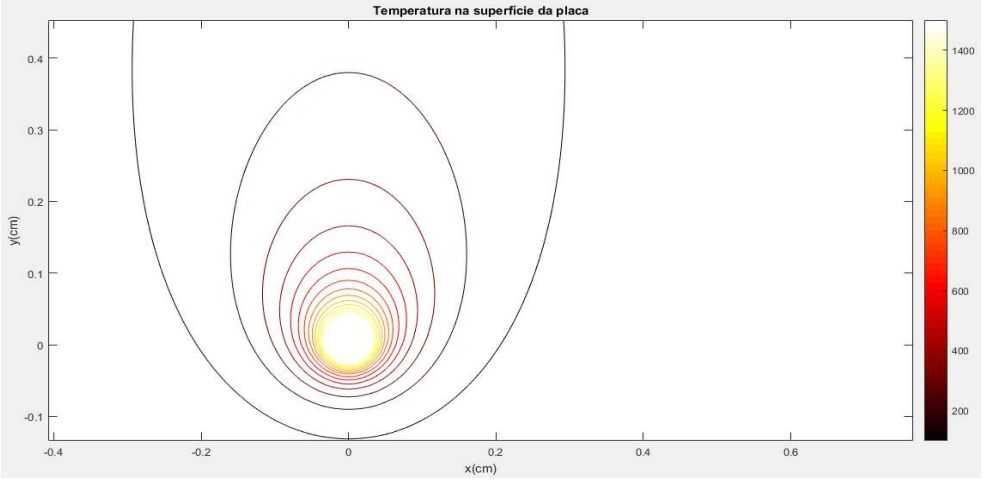

Figura 6: Mapa de temperaturas- contorno de isotermas- velocidade de 2 mm/s.

Copyright © 2018 ISESC

Existem outros mecanismos de fragilização por hidrogênio. Este trabalho se concentrou no mecanismo de Granjon (1972). Para contornar o problema que ocorre devido a queda de solubilidade de hidrogênio, sobretudo na zona termicamente afetada. Existem medidas de controle que podem ser adotadas para atenuar ou extinguir este tipo de trinca.

A mais comumente utilizada é o tratamento de pré-aquecimento, realizado com temperaturas que podem variar entre 50° e 200°C (Okumura et al. 1982), e após o processo de soldagem concluído, realizar tratamento de pós-aquecimento com temperaturas que variam entre 200° e 300°C (Okumura et al. 1982). Com o pré-aquecimento, diminui-se a quantidade de martensita e desta forma a redução da área fragilizada.

O tratamento de pós-aquecimento visa permitir que o hidrogênio tenha tempo hábil para conseguir se difundir através da cementita até alcançar a atmosfera. Outra forma efetiva de se evitar a fragilização e formação de trincas retardadas é cortar as fontes prováveis de hidrogênio durante o processo de soldagem, normalmente especificados no procedimento de soldagem, como citado por Okumura et al. 1982.

4. Conclusão

Através desse artigo pode-se concluir que o adequado controle dos parâmetros de soldagem, particularmente o monitoramento e controle da taxa de resfriamento da zona termicamente afetada, tem o objetivo de se reduzir ao máximo a formação de estrutura frágil e permitir o controle da taxa de decomposição da austenita em ferrita e cementita, e consequentemente da solubilidade do hidrogênio que tenderá a ter sua difusão para a região austenitizada. O controle da taxa de resfriamento, que pode ser feito através do tratamento de pós aquecimento, visa permitir a difusão para a atmosfera do hidrogênio que eventualmente tenha se difundido para a cementita.

Referências

WAINER E., BRANDI S., MELLO F. Décourt Homem de: **Soldagem- Processos e Metalurgia.** São Paulo. Editora Blucher (1992).

GRONG O. **MetallurgicalModellingofWelding.** NorwegianUniversityofScienceand Technology. DepartmentofMetallurgy. Norway.(1997).

ASTM **Standard specification for structural steel for ship**. URL: https://www.astm.org/Standards/A131.htm Acessado em maio/2008.

OKUMURA T., TANIGUCHI C. **Engenharia de Soldagem e Aplicações.** LTC Livros Técnicos e Científicos.Rio de Janeiro. (1982).

GILAT, A. **MATLAB com aplicações em engenharia** - Editora Bookman, (2012).
THE MATHWORKS, Inc., **Matlab for Student Use**, (2015).

GRANJON, H. **La fissuration à froid em soudage d'aciers.** Soud. Tecn. Conn. (1972).

JUNIOR SOEIRO J. C.. Uma breve revisão histórica do desenvolvimento da soldagem dos aços API para tubulações. Departamento de Engenharia Metalurgica e de Materiais- EPUSP, 2013.

Anexo *Script* em Matlab

```
T0=45;
H=148;
Lambda=0.40;
Alfa=8;
vs=5;
%Cálculo da temperatura para o plano xy
[x,y]=meshgrid(-3:0.01:6);
z=0;
R=sqrt((x).^2+(y).^2+(z).^2);
TS=(H/2/pi/Lambda./R).*exp((-vs/2*Alfa)*(R-y))+T0;
figure(1)
contour(x,y,TS,0:100:1539)
title('Temperatura na superfície da placa')
axis([-1 3 -1 1])
xlabel('x(cm)')
ylabel('y(cm)')
colorbar
colormap(hot)
```


Copyright © 2018 ISESC