

---

## TRINCA A FRIO NA SOLDAGEM

Alexandre Araújo Bezerra  
Doutor em Engenharia Mecânica pela USP  
Professor do CEFET-SP — Unidade Sertãozinho

*Este trabalho tem o intuito de apresentar uma revisão bibliográfica a respeito da trinca a frio na soldagem, analisando os fatores responsáveis pela sua formação, bem como os meios de evitar, ou minimizar, a sua ocorrência. Para isso, resultados de alguns trabalhos práticos são também analisados, de modo a confrontá-los com a teoria estudada.*

**Palavras-chave:** trinca a frio; soldabilidade; hidrogênio.

*This work has the intention of presenting a bibliographical revision regarding the cold cracking in welding, analyzing the responsible factors for your formation as well as the means of avoiding, or to minimize, your occurrence. For that, results of some practical works are also analyzed, in way to confront them with the studied theory.*

**Key-words:** cold cracking; weldability; hydrogen.

### INTRODUÇÃO

O desenvolvimento tecnológico tem possibilitado uma evolução na área de materiais, levando à comercialização de aços com novas composições químicas, maiores limites de resistência e melhor tenacidade (MACIEL et al., 1995).

A utilização adequada destes novos aços passa inevitavelmente por sua soldabilidade, ou seja, a capacidade de o metal ser soldado em condições de fabricação e ter como resultado uma junta com qualidade exigida e para aplicação específica. Esta soldabilidade deve atender aos requisitos mecânicos e químicos, mas sem nunca esquecer os outros grandes problemas da junta soldada, ou seja, a deformação e os defeitos. Um defeito típico relativo à soldabilidade destes novos aços de alta resistência é a indesejável trinca induzida pelo hidrogênio, ou trinca a frio (MARTINS et al., 1988).

De todos os tipos de trincas, é esta uma das mais críticas. Seu aparecimento pode ocorrer alguns dias após o término da

soldagem, razão pela qual se recomenda a inspeção com ensaio não-destrutivo 48 horas após a execução da soldagem (WAINER et al., 2004). A trinca a frio induzida pelo hidrogênio é consequência da ação simultânea de quatro fatores: presença de hidrogênio; tensões residuais; microestrutura susceptível; e baixa temperatura, entre 100°C e 200°C. Nenhum desses fatores, isoladamente, provoca a trinca a frio. A ação conjunta desses quatro fatores é responsável pelo aparecimento de trincas que se manifestam segundo os tipos apresentados na Figura 1 (PETROBRÁS, 1983).

As trincas induzidas pelo hidrogênio têm sido um dos problemas mais estudados mundialmente, sendo que inúmeras soluções podem ser encontradas na literatura especializada para eliminá-las, tanto na zona termicamente afetada (ZTA) como na zona fundida (ZF) da junta soldada (GARCIA et al., 1995). Essa localização dependerá, dentre outros fatores, da temperabilidade de uma região com relação à outra (MACIEL et al., 1995).

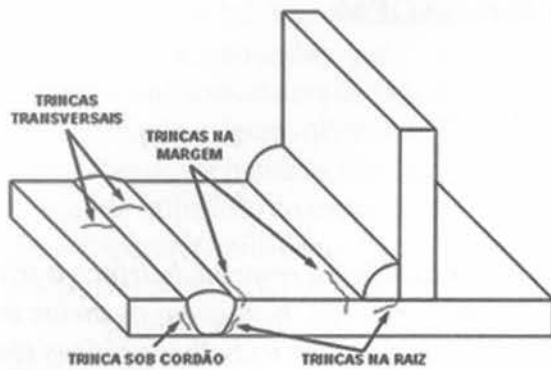


Figura 1 - Tipos de trincas provocadas pelo hidrogênio.

Porém, cada vez que um novo aço, com alto valor de limite de resistência, é produzido, o problema ressurge e novos estudos são necessários. Isso porque a susceptibilidade à formação das trincas a frio aumenta com o aumento da resistência dos aços. Desta forma, são exigidos maiores cuidados na soldagem e maior rigor na utilização de processos e consumíveis que depositem cordões com hidrogênio superior a 5 ml/100g (GARCIA et al., 1995).

A susceptibilidade às trincas induzidas pelo hidrogênio em aços de alta resistência pode ser avaliada através de diversos ensaios de soldabilidade. A finalidade desses ensaios é avaliar esse fenômeno e como o teor de hidrogênio, a tensão, a taxa de resfriamento e a temperatura influenciam na formação e propagação dessas indesejáveis trincas (MARTINS et al., 1988).

Os ensaios de soldabilidade mais utilizados são o Tekken e o Lehigh, que são de auto-restrição, e, portanto, não avaliam a influência da variação do nível de tensão; e o TRC, RRC e implante, que são de restrição externa (MARTINS et al., 1988).

O ensaio Tekken é o mais utilizado devido ao seu baixo custo, versatilidade, boa reprodutividade e facilidade de se quantificar a porcentagem de trincas, permitindo assim avaliar a formação de trincas tanto na ZF como na ZTA (GARCIA et al., 1995).

Através dos ensaios TRC e RRC podem-se avaliar todos os fatores que influem na formação das trincas a frio na ZF, sendo aqui o problema do fabricante de consumível.

Já o ensaio de implante avalia a trinca a frio na ZTA, e aqui o problema é do fabricante do aço (MARTINS et al., 1988).

Para se verificar o efeito da variação do nível de tensão imposta pela solda, além da influência do teor de hidrogênio, taxa de resfriamento e temperatura, pode ser utilizado o versátil Ensaio de Restrição Controlada, que é baseado no ensaio japonês LB-TRC, e derivado do ensaio TRC (MATSUDA et al., 1979).

## ANÁLISE DOS MECANISMOS DE FORMAÇÃO DAS TRINCAS A FRIO

### Presença do hidrogênio

Comparado com outros intersticiais, o hidrogênio se difunde muito mais facilmente através do ferro-a. A 20°C, estima-se que os átomos de hidrogênio sejam capazes de pular a velocidades muito mais rápidas que a do carbono e do nitrogênio. Na verdade, isso tem conduzido Fast (1976) a sugerir que o hidrogênio se comporta mais como um próton que como um átomo. Por outro lado, a máxima solubilidade do hidrogênio no ferro a temperatura de fusão é apenas 30 ppm. Isso sugere que a difusão dos átomos de hidrogênio no ferro deve ocorrer praticamente independente de tensão (EASTERLING, 1992).

Uma interessante característica das medidas da difusividade do hidrogênio nos aços ferríticos é a larga dispersão de resultados a temperaturas abaixo de 200°C. É usual assumir dois coeficientes de difusividade para o hidrogênio no Fe-a, baseado nas medidas experimentais: um para valores de temperaturas acima de 200°C, dado pela equação  $D = 0,14 \exp(-1300/RT)$  mm<sup>2</sup>/s; outro para valores abaixo de 200°C, dado pela equação  $D = 12 \exp(-32700/RT)$  mm<sup>2</sup>/s (EASTERLING, 1992).

As razões para a redução da difusividade e a dispersão aumentada abaixo de 200°C não são completamente entendidas,

mas há boa evidência de que o hidrogênio é retido em vários defeitos, nos quais se transforma em hidrogênio molecular (EASTERLING, 1992).

Os mecanismos de fragilização por hidrogênio são basicamente três: de Zappfe, ou de pressão; de Petch; e de Troiano-Oriani. O mecanismo de Zappfe foi desenvolvido para explicar a formação de *blister* carregada com hidrogênio. A idéia é que o hidrogênio atômico se combinaria formando um gás em microtrincas ou microcavidades no interior do material. Esse gás aumentaria a pressão interna na microtrinca ou microcavidade, causando a expansão delas, ou por deformação ou por clivagem, levando-as ao coalescimento e à falha do material. O mecanismo de Petch leva em conta que o hidrogênio absorvido abaixa a energia livre superficial do metal, resultando na diminuição da tensão de fratura dada pelo critério de Griffith. O mecanismo de Troiano-Oriani propõe que o hidrogênio diminui a energia de coesão entre os átomos do reticulado nos contornos ou interfaces (WAINER et al., 2004).

Na soldagem dos aços, a solubilidade do hidrogênio no metal de solda diminui com a queda da temperatura, como pode ser visto na Figura 2; observa-se nela que existe um acréscimo da solubilidade do hidrogênio na austenita (WAINER et al., 2004).

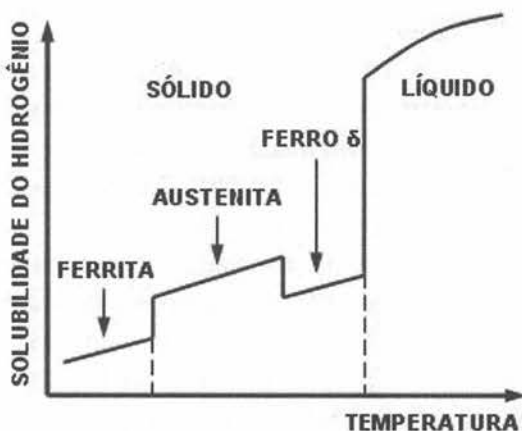


Figura 2 - Esquema da solubilidade do hidrogênio no metal de solda.

Um modelo de fragilização por hidrogênio durante a soldagem foi proposto por Granjon (1972) e pode ser visto *Sinergia*, São Paulo, v. 6, n. 1, p. 71-76, jan./jun. 2005

esquemáticamente na Figura 3. O hidrogênio é introduzido pela atmosfera do arco para a poça de fusão que, ao solidificar, transforma-se em austenita e perde um pouco de hidrogênio para a atmosfera. No metal de base existe uma faixa que também está austenitizada. A partir do momento em que ocorre a decomposição da austenita em ferrita mais cementita (ponto 1), cai a solubilidade do hidrogênio e este se difunde para a região austenitizada do metal de base. No resfriamento, essa região com maior teor de hidrogênio pode temperar, o que resulta na martensita (ponto 2). Conseguem-se, assim, ter hidrogênio associado a uma microestrutura frágil (WAINER et al., 2004).

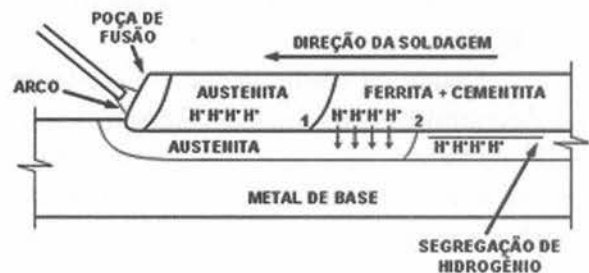


Figura 3 - A propagação do hidrogênio relativa ao movimento do arco.

As principais fontes de hidrogênio são: umidade nos revestimentos dos eletrodos, no fluxo para o arco submerso e no fluxo do eletrodo tubular; qualquer outro produto hidrogenado no fluxo ou no revestimento; contaminação de vapor d'água nos gases de proteção para os processos MIG/MAG ou TIG; contaminação com óleo, tinta, sujeira ou graxa nas superfícies dos eletrodos e do metal de base; líquidos desengraxantes que deixam resíduos; óxidos hidratados, ferrugem, por exemplo, nas superfícies dos arames e do metal de base; hidrogênio proveniente do processo de fabricação do aço; umidade do ar (PETROBRÁS, 1983; WAINER et al., 2004).

### Tensões residuais

A tensão residual na ZTA depende, entre outros fatores, do grau de restrição da junta soldada, ou seja, da resistência que ela oferece para deformar ou distorcer de tal

maneira que alivie as tensões geradas durante o processo de soldagem. A restrição cresce com o aumento da espessura da chapa. O tipo de junta também influi na restrição: uma junta de topo é menos restrita que uma junta em ângulo, que, por sua vez, é menos restrita que uma junta cruciforme, mantendo-se as outras variáveis constantes (WAINER et al., 2004).

Outro importante fator é a concentração de tensões. A falta de fusão ou a falta de penetração são defeitos que concentram muita tensão nas extremidades e podem favorecer a trinca induzida pelo hidrogênio. O erro na montagem de uma solda em ângulo, com uma abertura de raiz, causa também uma concentração de tensão, favorecendo o aparecimento da trinca (WAINER et al., 2004).

Dentre os vários métodos para testar a susceptibilidade da trinca de hidrogênio nos aços, podemos destacar o teste de implante e o teste de restrição Lehigh. A Figura 4 mostra o esboço esquemático do teste de implante. Nesse teste, uma amostra é entalhada e inserida num furo, numa chapa de mesmo material. Um passe de solda é feito sobre a amostra, o qual é localizado de tal forma que seu topo torna-se parte da ZF e o entalhe posiciona-se na ZTA. Após a soldagem e antes do resfriamento da solda, uma carga é aplicada na amostra, e o tempo de falha é determinado (KOU, 2002).

Soldas realizadas com eletrodos de baixo hidrogênio (E7018; revestimento do tipo calcário básico) são menos susceptíveis à trinca de hidrogênio do que soldas feitas com eletrodos com alto teor de hidrogênio (E7010; revestimento do tipo celulósico) (KOU, 2002).



Figura 4 - Esboço esquemático do teste de implante para trinca de hidrogênio.

A amostra de restrição Lehigh é

projetada com rasgos passantes. Variando os comprimentos dos rasgos, o grau de restrição da chapa na solda pode modificar-se de uma amostra para outra. Um passe de solda é realizado na raiz da junta, e o comprimento dos rasgos requeridos para prevenir trinca a frio é determinado. A trinca é detectada visualmente ou pelo exame da área de seção transversal tomada do ponto médio da solda (KOU, 2002).

### Microestrutura susceptível

De maneira geral, a susceptibilidade à trinca induzida por hidrogênio aumenta com o crescimento da resistência do aço. Em termos de microconstituente, a martensita após a têmpera é a mais sensível à fragilização pelo hidrogênio, característica que aumenta com o teor de carbono do aço e com sua dureza. Sua ocorrência está ligada à temperabilidade dos aços, propriedade que é, basicamente, função da composição química e do tamanho de grão do aço (WAINER et al., 2004).

A adição de elementos de liga no aço é geralmente utilizada para melhorar as propriedades mecânicas e as propriedades de resistência à corrosão dos aços. Entretanto, isso é acompanhado pelo deslocamento das curvas TTT dos aços para a direita, ou seja, com menores velocidades de resfriamento pode-se obter a estrutura martensítica (PETROBRÁS, 1983).

Os elementos que afetam de modo mais significativo o deslocamento das curvas TTT são carbono, manganês, níquel, cromo, cobre, molibidênio e vanádio. O efeito desses elementos é muito importante na previsibilidade da formação da estrutura martensítica na ZTA e, portanto, na tendência à trinca pelo hidrogênio. Essa tendência é chamada de carbono equivalente (CE), o qual é empregado para relacionar a temperabilidade do aço e sua soldabilidade e, quanto maior for seu valor, mais temperável será o aço e pior sua soldabilidade. Por exemplo, aços com  $CE > 0,4$  necessitam de cuidados especiais para evitar a trinca a frio (Petrobrás, 1983).

Existem várias fórmulas para calcular o valor de CE, sendo a adotada pelo International Institute of Welding a mais utilizada:  $CE = \%C + (\%Mn/6) + [(\%Cr + \%Mo + \%V)/5] + [(\%Ni + \%Cu)/15]$ .

Existem vários critérios para, com o CE, tentar evitar ou minimizar, a presença de martensita, através do cálculo da temperatura de pré-aquecimento (WAINER et al., 2004).

Foi verificado experimentalmente por Garcia et al. (1995), através do ensaio Tekken, que a utilização de energias de soldagem mais baixas implicam maiores taxas de resfriamento, que, além de proporcionarem microestruturas de maior dureza, conduzem a prejuízos na difusão de hidrogênio e assim favorecem a formação das trincas a frio.

### Baixa temperatura

Visto que a temperatura de formação da martensita (Ms) é relativamente baixa, a trinca de hidrogênio tende a ocorrer a temperaturas relativamente baixas. Por essa razão, é chamada de trinca a frio (KOU, 2002).

## CRITÉRIOS PARA PREVENÇÃO DAS TRINCAS A FRIO

### Quanto à presença do hidrogênio

A atmosfera do arco deve ter o menor teor possível de hidrogênio. Eletrodos de baixo hidrogênio foram desenvolvidos com esse propósito. Porém, tais revestimentos são altamente higroscópicos. Assim, a secagem e o manuseio desses eletrodos são de importância fundamental na prevenção do problema. As exigências nesse sentido são tanto mais necessárias quanto maior é a umidade relativa do ambiente, e mais críticos são os outros três fatores. A secagem do fluxo, na soldagem a arco submerso, embora menos necessária face à maior energia de soldagem, é uma medida a ser considerada no caso dos fluxos básicos, de acordo com a Petrobrás (1983).

### Quanto às tensões residuais

A soldagem com o menor grau de restrição possível é uma medida útil. O tensionamento das juntas soldadas contribui para a trinca, especialmente se for levado em conta que a deformação plástica - através da movimentação das discordâncias - eleva a concentração de hidrogênio na extremidade dos entalhes. Assim, deve-se considerar a ação de esforços como exemplo: peso próprio, contração de outras soldas, testes de pressão, dispositivos para correção de deformações, etc. (PETROBRÁS, 1983).

### Quanto à microestrutura susceptível

O pré-aquecimento, o aumento da energia de soldagem, a escolha do metal de adição de menor resistência possível, contribuem para a redução do risco de trinca a frio. A alta severidade térmica das soldas provisórias - fixação de dispositivos de montagem - é, freqüentemente, a origem de trincas (PETROBRÁS, 1983).

### Quanto à baixa temperatura

Manter a solda a uma temperatura suficiente para permitir a difusão do hidrogênio, é uma medida que pode ser empregada. Isso pode ser feito por meio de pré-aquecimento, do controle da temperatura interpasse e de pós-aquecimento (PETROBRÁS, 1983).

A temperatura da chapa tem importante papel na prevenção da trinca induzida por hidrogênio. Se a chapa for pré-aquecida, a velocidade de resfriamento diminui e pode-se reduzir a quantidade de martensita na ZTA. Além disso, o tempo de resfriamento em temperaturas baixas (aproximadamente 150°C) aumenta, favorecendo o escape de hidrogênio do metal de base para a atmosfera (WAINER et al., 2004). O efeito da temperatura de pré-aquecimento, ao se utilizar o teste de restrição controlada, foi confirmado

experimentalmente por Martins et al. (1988), que verificaram que a difusibilidade do hidrogênio para fora do metal de solda é alterada quando se faz pré-aquecimento do corpo de prova. Assim, é mais fácil a difusão do hidrogênio, quanto mais alta é a temperatura de pré-aquecimento, o que deve minimizar seu efeito sobre as trincas a frio. Entretanto, essa técnica nem sempre é a mais adequada, já que implica custos para efetivação do pré-aquecimento.

No caso dos aços temperáveis ao ar, não se consegue evitar a presença da martensita; porém, com pré-aquecimento e tratamento térmico pós-soldagem, consegue-se diminuir o teor de hidrogênio na junta soldada, modificar a microestrutura e diminuir as tensões residuais (WAINER et al., 2004).

## CONCLUSÃO

A trinca a frio é um grave problema na soldagem dos aços de alta resistência, tornando-se assim um obstáculo contínuo ao desenvolvimento de aços mais resistentes, visto que a susceptibilidade para tal trinca aumenta com o aumento da resistência dos mesmos.

Porém, a utilização dos ensaios para verificar essa susceptibilidade tem facilitado a otimização de procedimentos de soldagem e consumíveis pela seleção de parâmetros de soldagem, de modo a proporcionar soldas isentas ou com quantidades desprezíveis de trincas a frio.

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

EASTERLING, K. E. *Introduction to the physical metallurgy of welding*. 2. ed. Oxford: Butterworth-Heinemann, 1992.

FAST, J.D. *Gases in metals*. Philips Technical Library, 1976.

GARCIA, W.; KIMINAMI, C.S. Trinca a frio

no metal de solda induzidas pelo hidrogênio na soldagem de aços ARBL temperados e revenidos. In: *Anais do 21º Encontro nacional de tecnologia de soldagem*, 1995. Caxias do Sul – RS, p. 21-36.

GRANJON, H. *Cracking and fracture in welds*. Tóquio: Japan Welding Society, p. IB1.1, 1972.

KOU, S. *Welding metallurgy*. 2. ed. New Jersey: John Wiley & Sons, 2002.

MACIEL, M.T.; ALCÂNTARA, N.G.; KIMINAMI, C.S. Influência da taxa de resfriamento e do nível de tensão sobre trincas a frio em metais de solda de aços ARBL. In: *Anais do 21º Encontro nacional de tecnologia de soldagem*, 1995. Caxias do Sul – RS, p. 37-53.

MARTINS, S.H.; ALCÂNTARA, N.G. Influência do nível de tensão sobre as trincas induzidas pelo hidrogênio em metais de solda. In: *Anais do 14º Encontro nacional de tecnologia de soldagem*, 1988, Gramado – RS, p. 509-528.

MATSUDA, F.; NAKAGAWA, H.; SHINOZAKI, K. The LB-TRC test for cold cracking susceptibility of weld metal for high strength steels. *Transactions of JWRI*, v. 8(1), p. 113-119. Japão, 1979.

PETROBRÁS. Norma n° 1737: inspeção de soldagem – qualificação de pessoal. *Módulo 06: metalurgia da soldagem*. FBTS, 1983, p.17-20.

WAINER, E.; BRANDI, S.D.; MELO, V.O. *Soldagem, processos e metalurgia*. São Paulo: Edgard Blücher, 2004.

### Para contatos com o autor:

Rua Expedicionário Solano, 1420 – CEP 14160 740  
– Centro – Sertãozinho – SP  
Telefone: (16 ) 3942 5544 – (Fax): 16 3947 3798 –  
E-mail: aab@cefetsp.br 