

## 5 Trincas

As trincas são um dos tipos mais graves de descontinuidade em uma junta soldada, por serem fortes concentradores de tensões. Formam-se quando tensões de tração (tensões transientes, residuais ou externas) se desenvolvem em um material fragilizado, incapaz de se deformar plasticamente para absorver estas tensões. Tensões de tração elevadas se desenvolvem na região da solda como resultado das expansões e contrações térmicas localizadas (associadas com o ciclo térmico de soldagem), das variações de volume devido a transformações de fase e como resultado das ligações entre as peças sendo soldadas e o restante da estrutura.<sup>(12)</sup>

A fragilização na região da solda pode resultar de tratamentos térmicos, da presença de elementos nocivos (como o hidrogênio) e de mudanças microestruturais.

As trincas em soldas podem ocorrer na zona de fusão, na zona termicamente afetada e no metal de base e podem ser macroscópicas ou microscópicas.

Diferentes tipos de trincas podem ser associados com a soldagem. São elas:

- Trincas a quente;
- Decoção lamelar;
- Trincas por liquação na ZTA;
- Trincas a frio (ou induzidas por hidrogênio).<sup>(12)</sup>

Neste trabalho serão analisadas as trincas a frio por meio dos testes de soldabilidade Tekken e Implante, portanto apenas os tipos de trincas relacionados a estes testes serão estudados.

## 5.1 Trincas a frio ou induzidas por hidrogênio

São chamadas trincas a frio, ou trincas induzidas por hidrogênio, as descontinuidades que ocorrem algum tempo após a soldagem. Este fenômeno de trincamento ocorre depois que a solda já está solidificada e pode levar minutos, horas ou até mais tempo para surgirem, depois da solidificação do metal de solda. Às vezes o aparecimento destas trincas pode chegar a dezenas de horas após a soldagem e pode possuir tamanhos abaixo do limite de detecção dos ensaios não destrutivos adequados, o que as torna muito perigosas. O tempo para a formação da trinca após o resfriamento dependerá da taxa de difusão do hidrogênio naquela microestrutura sob a influência de tensão, num dado ponto. <sup>(13)</sup>

### 5.1.1 Condições necessárias para o aparecimento das trincas a frio

As trincas a frio estão geralmente associadas com a presença de hidrogênio em aços. As condições necessárias para que as trincas a frio ocorram são:

- 1) Tensões (carga externa ou tensão residual da soldagem);
- 2) Microestrutura suscetível a trincas;
- 3) Presença de hidrogênio;
- 4) Temperatura. <sup>(10, 26)</sup>

As condições acima apresentam a mesma importância, mas dependendo da situação, uma delas pode ser predominante. <sup>(9)</sup>

#### 1) Tensões:

As tensões podem ser externas ou podem ocorrer a partir de contrações térmicas durante o aquecimento e o resfriamento da solda, que são as tensões residuais. As tensões internas (ou residuais) são causadas por contrações locais na solda. Tensões locais também podem ser geradas pela transformação austenita-

ferrita. As tensões residuais podem resultar em tensões da ordem do ponto de escoamento na zona de fusão ou da ZTA. <sup>(14)</sup>

A presença de hidrogênio pode abaixar o nível de tensão para o qual a trinca pode ocorrer. Quanto mais duro é o material, maior é a intensificação de tensões de contração, por causa da restrição, ou seja, a falta de liberdade para acomodação das tensões impostas na solda pelas diferentes partes da junta. <sup>(26)</sup>

As tensões promovem a deformação plástica do material, que por sua vez, aumenta o número de discordâncias, que são responsáveis pelo transporte do hidrogênio para as extremidades dos entalhes. <sup>(27)</sup>

Deve-se ainda levar em conta a ação dos esforços, como por exemplo, concentração de outras soldas. <sup>(27)</sup> A nucleação das trincas induzidas por hidrogênio também está associada a pontos concentradores de tensões, como por exemplo, cantos vivos da raiz da solda, ou heterogeneidades microestruturais, que exibem mudanças bruscas na dureza, tal como inclusões de escória, interface ferrita-martensita, ou ainda contornos de grãos. Além disso, o grau de concentração de tensões depende da forma das inclusões. Inclusões mais circulares geram menores tensões que inclusões alongadas. <sup>(9, 14)</sup>

## 2) Microestrutura suscetível a trincas:

Uma microestrutura de elevada dureza na região da solda aumenta a chance de fissuração pelo hidrogênio. Além de sua menor ductilidade e tenacidade, esta microestrutura reduz a capacidade de acomodação das tensões na região da solda. Desta maneira uma microestrutura macia é capaz de tolerar, sem trincar, uma maior quantidade de hidrogênio que as mais duras. As microestruturas finais da junta soldada dependem diretamente da temperabilidade e da taxa de resfriamento. <sup>(26, 28)</sup>

A temperabilidade do aço, e também a sua dureza, são governadas pela composição química, ou seja, pela contribuição total dos elementos presentes no aço. A temperabilidade pode ser calculada pelo carbono equivalente, que será explicado no capítulo seguinte. <sup>(26)</sup>

A taxa de resfriamento é função do aporte de calor, da temperatura de preaquecimento, da espessura e da geometria da junta. De um modo geral, as microestruturas formadas em baixas temperaturas de transformação no estado sólido e as resultantes de altas taxas de resfriamento ou baixa energia de soldagem são as mais sensíveis a trincas a frio, que é o caso da martensita. <sup>(9, 26)</sup>

A martensita, que é uma microestrutura de baixa tenacidade e a mais suscetível a trincas por hidrogênio, quando saturada em hidrogênio é consideravelmente frágil. O metal de solda, em virtude de sua composição química e das condições térmicas da soldagem, pode gerar tais microestruturas. Nessas condições e na fase final do resfriamento, o metal de solda apresentará regiões frágeis a baixas temperaturas, saturadas em hidrogênio, submetidas a um sistema de tensões residuais, cuja intensidade é próxima do limite de escoamento da zona de fusão. O mesmo pode ocorrer na zona termicamente afetada. <sup>(27)</sup>

### 3) Presença de hidrogênio:

O hidrogênio pode ser oriundo do revestimento orgânico dos eletrodos, da umidade do fluxo, da umidade do ar, gordura, graxa, óleos, compostos orgânicos, tintas e contaminações da superfície. O hidrogênio é absorvido pela poça de fusão e pode ser transferido, por difusão, para a ZTA. <sup>(26)</sup> Assim, é importante manter os eletrodos armazenados em lugares adequados e secos, promovendo a secagem em estufa dos mesmos antes de utilizá-los. <sup>(9)</sup>

### 4) Temperatura:

O maior risco de ocorrer trincas induzidas por hidrogênio é quando a temperatura está próxima da temperatura ambiente, já que estas ocorrem algumas horas após o término da soldagem. É possível, assim, evitar trincas a frio em uma microestrutura suscetível tomando medidas que reduzam a taxa de resfriamento e aumentam a difusão do hidrogênio, como o preaquecimento ou mantendo a

temperatura suficientemente elevada pelo pós-aquecimento até que uma quantidade suficiente de hidrogênio já tenha difundido para fora da solda. <sup>(26)</sup>

Com o pré ou pós-aquecimento é possível fazer um controle da taxa de resfriamento propiciando microestruturas de baixa dureza, diminuindo a suscetibilidade de ocorrência de trincas a frio. <sup>(9)</sup>

Kasuya <sup>(18)</sup> afirma que a temperatura ambiente pode afetar bastante a suscetibilidade a formação de trincas induzidas por hidrogênio. Quanto menor a temperatura ambiente maior o preaquecimento mínimo para se evitar trincas a frio. Assim, em locais frios o preaquecimento deve ser maior do que em locais quentes. <sup>(18)</sup>

### **5.1.2 Hidrogênio na solda**

Durante a soldagem, o hidrogênio é absorvido da atmosfera e das outras fontes, pela poça de fusão. O hidrogênio que pode ser fornecido pelas diferentes fontes, se decompõe na atmosfera do arco liberando hidrogênio atômico ou iônico. Durante o resfriamento, uma parte desse hidrogênio escapa por difusão do metal de solda solidificado para a atmosfera, mas outra parte difunde para a zona termicamente afetada ou permanece no metal de solda. O hidrogênio formado que não escapa para a atmosfera, fica retido na estrutura solidificada. <sup>(9, 26, 27)</sup>

Vale ressaltar que o hidrogênio total contido na junta soldada é a soma do hidrogênio difusível, ou seja, aquele que mesmo na temperatura ambiente difunde para a superfície escapando do metal sólido e do hidrogênio residual, aquele que difunde somente a temperaturas elevadas. O hidrogênio mais perigoso para a formação de trincas é o hidrogênio difusível, pois pode escapar do metal de solda para a ZTA, induzindo a formação de trincas na ZTA. Já o hidrogênio residual não difunde pelo metal de solda, permanecendo preso no material por longos períodos de tempo.

Se o teor de carbono do metal de solda (MS) for menor que o do metal de base (MB), e conseqüentemente o MS for mais macio que a ZTA, a temperabilidade do MS se torna inferior à da ZTA e será mais difícil a formação de trincas induzidas

por hidrogênio no metal de solda, o que permite que o hidrogênio migre para a ZTA. Isto é o que acontece no caso de aços C-Mn, que são formados por ferrita-perlita e apresentam grande quantidade de carbono, geralmente maior que no MS. Caso a temperabilidade do MS seja superior ou quando a estrutura for austenítica, o hidrogênio fica retido no MS, isso ocorre para o caso de aços baixo carbono, microligados e baixa liga e também os aços temperados e revenidos, que são aços de maior resistência. <sup>(22)</sup>

Por ser um elemento químico de diâmetro muito pequeno, o hidrogênio pode ser encontrado em solução sólida na estrutura cristalina dos metais e suas ligas e mover-se por difusão no estado sólido com relativa facilidade. A mobilidade do hidrogênio na rede cristalina dos metais é alta quando comparada à de outros átomos e pode causar vários problemas à junta soldada. <sup>(9, 29)</sup>

A difusividade do hidrogênio varia com a temperatura, com a composição e a condição do material. Quanto mais alta a temperatura, maior a difusividade do hidrogênio. A difusividade do hidrogênio nos aços ferríticos pode ser estimada a partir das equações 3, sendo que a primeira deve ser utilizada para temperaturas abaixo de 200°C e a segunda para temperaturas acima de 200°C: <sup>(9, 26)</sup>

$$D = 0,14 \cdot \exp\left(\frac{-13400}{R \cdot T}\right) mm^2 / s$$

$$D = 12 \cdot \exp\left(\frac{-32700}{R \cdot T}\right) mm^2 / s \quad (3)$$

O MS no estado líquido dissolve quantidades apreciáveis de hidrogênio e a solubilidade decresce com a temperatura de forma contínua na solidificação e com a transformação austenita-ferrita. Conseqüentemente, na fase final do resfriamento, o MS estará super saturado em hidrogênio, conforme a figura 15. Isso ocorre quando o MS é menos temperável que o MB. Neste caso, o hidrogênio difunde do MS para o MB, formando trincas na ZTA. <sup>(22, 27)</sup>

Já se o MS for mais temperável que o MB, o hidrogênio irá difundir no sentido inverso, ou seja, do MB para o MS. Assim, as trincas por hidrogênio se tornam mais suscetíveis no MS.

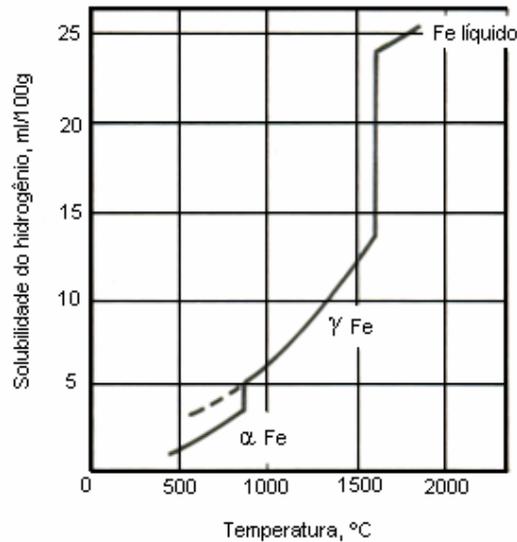


Figura 15: Variação do teor de hidrogênio com a temperatura – Curva de Sieverts. <sup>(9)</sup>

Alguns fatores contribuem para aumentar ou diminuir a facilidade com que o hidrogênio se solubiliza e/ou se difunde em materiais metálicos sólidos à temperatura ambiente: composição química, estrutura cristalina, microestrutura, subestrutura, taxa de deformação, presença de óxidos na superfície dos metais e temperatura. <sup>(29)</sup>

A acumulação do hidrogênio em sítios da rede pode enfraquecer as ligações metálicas e nuclear uma trinca, a qual, sob condições apropriadas, se propagará e levará à fratura dos componentes metálicos contaminados. O resultado disto é a fragilização pelo hidrogênio. <sup>(29)</sup>

Também influenciam a facilidade do hidrogênio de se acumular em sítios defeituosos da rede cristalina, núcleos das discordâncias, vazios, lacunas e interfaces. <sup>(29)</sup>

É importante lembrar que o mecanismo de difusão depende da temperatura e faz com que a maior parte do hidrogênio em super saturação se difunda e abandone o MS após um determinado tempo. Portanto, o risco de fissuração é temporário,

existindo enquanto o hidrogênio estiver se desprendendo da solda. Portanto, um tratamento de pós-aquecimento de juntas soldadas sensíveis à fissuração a frio pode ser útil para acelerar o processo de eliminação do hidrogênio. <sup>(27)</sup>

### 5.1.3 Fontes de hidrogênio

O hidrogênio provém de componentes químicos hidrogenados que se dissociam na coluna do arco. Estes componentes são em sua maioria hidrocarbonetos ou água. Em ambos os casos, eles podem ser introduzidos no arco pela contaminação de gases, eletrodos, fluxos na amostra, enquanto o vapor de água pode ser oriundo do próprio ar em ambientes úmidos. Entretanto, a fonte mais importante de hidrogênio é o revestimento dos eletrodos ou o fluxo. <sup>(14)</sup>

O revestimento dos eletrodos consiste em minerais, substâncias orgânicas, ligas ferrosas e pós de ferro colados com, por exemplo, bentonita e silicato de sódio. O revestimento celulósico é o que gera maior quantidade de hidrogênio, pois possui elevada quantidade de substância orgânica, cuja decomposição pelo arco gera grandes quantidades de gases que protegem o metal líquido. Já os revestimentos básicos não possuem substâncias orgânicas em sua formulação e, se armazenados e manuseados corretamente, produzem soldas com baixo teor de hidrogênio, minimizando os problemas de fissuração e de fragilização induzidas por este elemento. Além disso, os eletrodos celulósicos e rutilícos não podem ser aquecidos a temperaturas muito altas, por conterem substância orgânica, ao contrário dos eletrodos básicos, que podem ser aquecidos a temperaturas de 400-450°C. <sup>(14)</sup> Assim, no caso dos eletrodos celulósicos e rutilícos, o hidrogênio é gerado tanto pela água residual quanto pela celulose. Os eletrodos e os fluxos também não devem ser expostos a atmosfera depois de aquecidos de modo a não absorverem água.

A quantidade de hidrogênio presente no metal de solda estabelecida pelo IIW é: <sup>(9, 14)</sup>

1. 0-5ml/100g de metal depositado -> quantidade muito baixa de hidrogênio;
2. 5-10ml/100g de metal depositado -> quantidade baixa de hidrogênio;
3. 10-15ml/100g de metal depositado -> quantidade média de hidrogênio;

4. Acima de 15ml/100g de metal depositado -> quantidade alta de hidrogênio.

A literatura recomenda que a quantidade de hidrogênio na solda deve ser baixa ou muito baixa, a fim de se evitar as trincas por hidrogênio.

#### 5.1.4 Tipos de trincas provocadas pelo hidrogênio

Do ponto de vista morfológico, trincas a frio podem ser classificadas com base na sua posição (zona termicamente afetada, metal de solda ou zona de fusão) e na sua orientação (longitudinal ou transversal).<sup>(13)</sup> As trincas a frio normalmente aparecem na ZTA, podendo também ocorrer, porém mais raramente, no MS de aços de maior resistência mecânica.<sup>(26, 27)</sup>

A seguir estão exemplificados alguns tipos de trincas induzidas por hidrogênio:

1- Trincas na zona termicamente afetada: trincas na zona termicamente afetada são, quanto a posição, na maioria das vezes longitudinais. É na ZTA que encontramos “trincas sob cordão” (figura 16), que em geral aparecem paralelas à linha de fusão e têm a peculiaridade de não emergir na superfície. Elas aparecem com um alto grau de endurecimento e grande quantidade de hidrogênio, que torna a trinca possível, mesmo com baixas tensões.<sup>(13)</sup>

Dois outros tipos de trincas longitudinais, “trincas na margem” e “trincas de raiz” (figura 16) ocorrem com uma pequena quantidade de hidrogênio porque elas resultam do entalhe, no qual as tensões são concentradas e reúne a quantidade de hidrogênio necessário para a formação da trinca.<sup>(13)</sup> Estas trincas resultam de entalhes como: mordedura, falta de penetração e inclusões, que promovem, através da concentração de tensões, deformações plásticas locais que põem em movimento as discordâncias, que conduzem o hidrogênio, aumentando a sua concentração no local, favorecendo a fissuração junto aos entalhes.<sup>(27)</sup>

“Trincas transversais” (figura 16) ocorrem mais raramente na ZTA, na presença de martensita de alto carbono, e quando a configuração da junta permite a predominância de tensões longitudinais.<sup>(13)</sup>

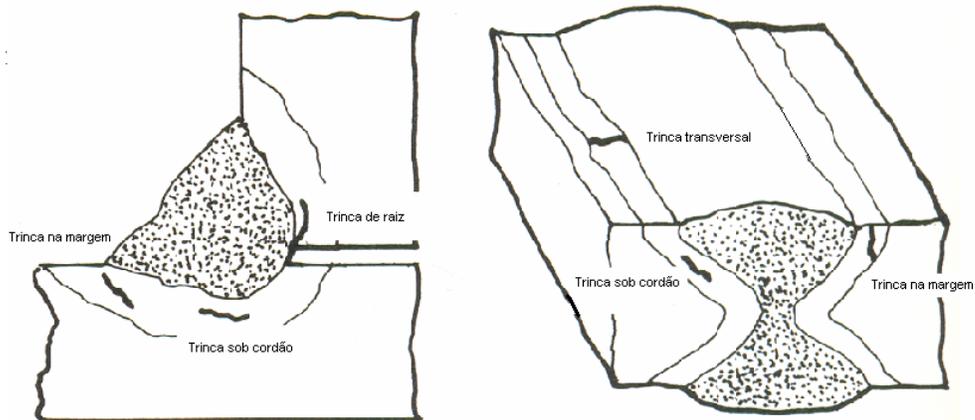


Figura 16: Tipos de trincas induzidas por hidrogênio na ZTA.

2- Trincas no metal de solda: trincas a frio surgem no metal de solda quando este apresenta dureza igual ou maior que o metal base, sendo, portanto mais difíceis de ocorrerem. Podem ser tanto longitudinais, devido ao efeito do entalhe na raiz, como transversais, com orientações perpendiculares ou inclinadas com relação à superfície da solda. As trincas no metal de solda podem emergir ou não na superfície. Elas iniciam a partir de inclusões ou porosidades que reúnem o hidrogênio necessário para fragilização, com a ajuda de tensões longitudinais. <sup>(13, 26)</sup>

As trincas no metal de solda podem ser intergranulares, transgranulares ou uma mistura das duas. As trincas no metal de solda são geralmente transgranulares, apesar de que em soldas com maior quantidade de elementos de liga, podem também ser intergranulares. As trincas intergranulares são mais comuns em aços de alta dureza, alto teor de carbono e alta liga. <sup>(26)</sup>

3- Soldas multi-passes: em soldas multi-passes, as condições que governam as trincas a frio podem ocorrer ou não com cada passe. Múltiplos passes podem ser completados sem uma nova trinca, por exemplo, uma trinca pode ser formada entre o primeiro e segundo passe, mas a nova fusão causada pelo segundo passe pode modificar parcialmente a aparência dessa trinca inicial sem removê-la, enquanto o ciclo térmico correspondente transforma a estrutura em volta. Também podemos ver

trincas a frio aparecerem em um passe de solda, por causa de tensões de outros passes. <sup>(13)</sup>

## 5.1.5 Variáveis essenciais

### 5.1.5.1 Preaquecimento

É possível evitar trincas a frio em uma microestrutura suscetível tomando medidas que reduzam a taxa de resfriamento e aumentam a difusão do hidrogênio, como por exemplo, com o tratamento de preaquecimento. <sup>(5)</sup>

Com o aumento da temperatura no metal, ocorre uma expansão térmica. Em seguida ocorre uma mesma quantidade de contração térmica até o resfriamento, na mesma faixa de temperatura. Assim, se o material não é aquecido uniformemente, como no caso da soldagem, deformações inelásticas podem acontecer resultando em distorções até alcançar o resfriamento. <sup>(1,5)</sup>

Com o preaquecimento, o metal de base é expandido e como o metal de solda está se solidificando, a diferença de temperatura entre o metal de solda e o metal de base é menor, o que reduz a quantidade de deformações e esforços residuais que surgem na junta soldada. <sup>(1)</sup>

Entretanto, esse tratamento afeta a microestrutura resultante da junta soldada e conseqüentemente suas propriedades mecânicas. A estrutura do material pode ser afetada pela taxa de resfriamento entre as temperaturas de 800 e 500°C ( $\Delta t_{8-5}$ ) influenciando o tempo disponível para difusão do hidrogênio da junta soldada, na faixa de temperatura de 300 até 100°C ( $\Delta t_{3-1}$ ). <sup>(1)</sup>

O preaquecimento aumenta a temperatura do metal próximo ao metal de solda, de forma que o gradiente de temperatura (isto é, a diferença de temperatura) entre o metal de solda e sua vizinhança fique reduzido. Assim, a zona termicamente aquecida resfria mais lentamente, visto que a taxa de resfriamento é diretamente proporcional ao gradiente de temperatura entre as massas quente e fria. <sup>(1,5)</sup>

### 5.1.5.2 Pós-aquecimento

Pós-aquecimento significa o aquecimento da junta soldada imediatamente após a soldagem ter sido realizada. É possível evitar trincas induzidas por hidrogênio mantendo a temperatura da junta soldada suficientemente elevada pelo pós-aquecimento até que uma quantidade suficiente de hidrogênio já tenha difundido para fora da junta.

O pós-aquecimento tem a mesma função do pré-aquecimento: mantém a temperatura da peça em um nível suficientemente elevado de tal maneira que a junta soldada resfrie lentamente e uma maior quantidade de hidrogênio tenha tempo de difundir para fora da solda. Assim como no preaquecimento, o resultado é uma ductilidade maior na região do metal de base. O pós-aquecimento raramente é aplicado de forma isolada, é quase sempre conjugado com o preaquecimento. <sup>(12)</sup>

### 5.1.5.3 Tempo de resfriamento entre 800 e 500°C

No intervalo de resfriamento entre 800°C e 500°C podem ocorrer transformações de fases importantes nos aços. Um maior período para este resfriamento pode intensificar estas transformações, e, neste caso, a microestrutura e as propriedades mecânicas do aço dependem da  $\Delta t_{8-5}$ .

Segundo Piza <sup>(22)</sup>, o valor de  $\Delta t_{8-5}$  é responsável pela temperatura de início de transformação da austenita, e quanto maior for a taxa de resfriamento neste intervalo de temperatura, menor será a temperatura de início da transformação e maior será a suscetibilidade à formação de trincas a frio. Isto ocorre devido a alguns fatores:

- 1- microestrutura mais tensionada e dura devido a maior taxa de resfriamento;
- 2- menor tempo disponível para difusão do hidrogênio na estrutura ferrítica, já que, conforme a figura 15, o hidrogênio difunde mais rápido na ferrita do que na austenita, assim, uma redução na temperatura de início de transformação da austenita, diminui o tempo para que o hidrogênio se difunda na estrutura em que ele se difunde mais facilmente;

- 3- menor intervalo para a difusão do hidrogênio entre a temperatura de fusão e a temperatura ambiente, com um resfriamento mais rápido.