

Fissuração pelo Hidrogênio

“Trincas a Frio”

- ✓ Ocorre devido a ação **simultânea** de 4 fatores:
 - ✓ H₂ dissolvido no metal fundido.
 - ✓ Tensões associadas à soldagem.
 - ✓ Microestrutura frágil.
 - ✓ Baixa temperatura (<150°C).
- ✓ Nenhum desses 4 fatores **isolados** provoca a trinca a frio.

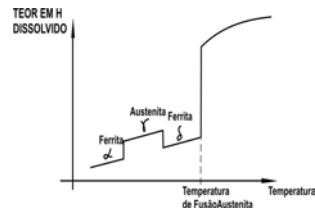
“Trincas a Frio”

Mecanismo de Formação

- ✓ Compostos que contêm H₂ (vapor d'água) se decompõem no arco elétrico.
- ✓ Liberam H₂ atômico H⁺.
 - ✓ Revestimento orgânico dos eletrodos.
 - ✓ Umidade absorvida ou adsorvida pelo revestimento de eletrodos revestidos ou fluxos de soldagem.
 - ✓ Compostos hidratados na peça (ferrugem).
 - ✓ Compostos orgânicos na peça (graxa, óleo, tintas)

Mecanismo de Formação – Trincas a Frio

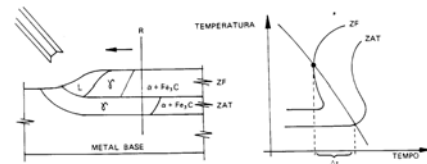
- ✓ Solda no estado líquido $\Rightarrow$ $\uparrow$ Qde H₂ dissolvido.



- ✓ Final do resfriamento: $\Rightarrow$ supersaturação H₂ na solda.

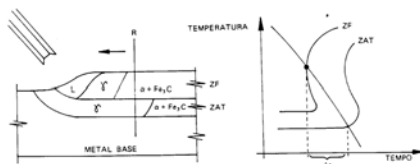
Mecanismo de Formação – Trincas a Frio

- ✓ Quando temperabilidade: $\uparrow$ na ZTA que na ZF



- ✓ H₂ migra para a ZTA.
- ✓ Comum, pois no metal de solda sempre $< \%C$ que na ZTA.
- ✓ ΔT entre transformações propicia difusão do H₂.
- ✓ ZTA (ainda em γ) recebe H₂ do MS supersaturado.

- ✓ H₂ fica retido na ZF quando:



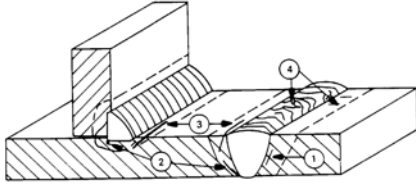
- ✓ ZF com $\uparrow$ temperabilidade que a ZTA.
- ✓ ZF com estrutura austenítica.

Mecanismo de Formação – Trincas a Frio

- ✓ Microestruturas de baixa tenacidade (martensita)
- ✓ Quando saturada em H₂ torna-se mais frágil ainda.
- ✓ Toda solda submetida a tensões residuais.
 - ✓ Podem chegar ao LE do material.

Mecanismo de Formação – Trincas a Frio

- ✓ Ação conjunta destes 4 fatores:



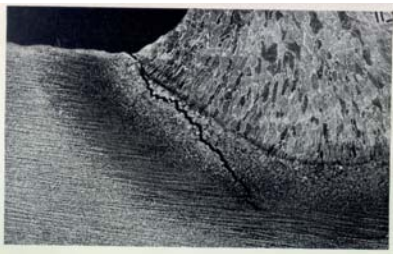
1. trinca sob cordão (underbead crack)
2. trincas na raiz (root cracks)
3. trincas na margem (toe cracks)
4. trincas transversais (transverse cracks)

Mecanismo de Formação – Trincas a Frio

- ✓ Entalhes:

- ✓ Mordeduras, falta de penetração, inclusões...
- ✓ $\uparrow$ concentração tensões $\Rightarrow$ Deformações plásticas na ponta desses entalhes.
- ✓ Favorece a fissuração a frio junto a esses entalhes.

Macrografia – Trinca a Frio



- ✓ Note que iniciou na linha de fusão e se propagou para a ZTA.

Como Evitar as Trincas a Frio

- ✓ H_2 , por ter $\downarrow$ Diâmetro Atômico:

- ✓ Difunde-se no Fe e abandona a solda.

- ✓ $\uparrow T_{PREA}$ e $\uparrow T_{POS A} \Rightarrow \uparrow$ Difusão do H_2 .

Processo	Evolução do hidrogênio das soldas			
	Concentração de hidrogênio em ml/100 g			
	Solda líquida	Liberado nas primeiras 24 horas	Liberado nos 20 dias subsequentes	Residual
Eletrodo revestido E 6010 *	28	10	3	15
Eletrodo revestido E 6012	15	6	2	7
Eletrodo revestido E 6015	8	2	1	5
TIG (argônio)	4	1	0	3

Como Evitar as Trincas a Frio

- ✓ Logo, o Risco de Fissuração pelo Hidrogênio é temporário...:
- ✓ Apenas enquanto H_2 se difunde da solda.
- ✓ Vantagem de usar $\uparrow T_{POS A}$ (Ex: 250°C por 2h)
- ✓ H_2 é totalmente eliminado.

Como Evitar as Trincas a Frio

- ✓ Inspeção R-X não detecta alguns tipos de Trincas a frio.
- ✓ Necessário U-S para detectar trincas a frio.
- ✓ Trincas podem aparecer horas ou dias após a soldagem.
- ✓ END apenas após 48h após a soldagem.

Medidas Preventivas de Trincas a Frio

- ✓ Eliminar a possibilidade de ao menos um dos 4 fatores.

Medidas Preventivas de Trincas a Frio

- ✓ Menor teor de H₂ possível.
- ✓ Usar eletrodos e fluxos de ↓ H₂ (básicos).
- ✓ São higroscópicos ⇒ Secagem adequada antes da soldagem.

Medidas Preventivas de Trincas a Frio

- ✓ Evitar microestrutura frágil..
- ✓ Usar T_{PREA} adequada.
- ✓ Metal de solda com ↓ Resistência possível.
- ✓ Cuidado com as soldas de ponteamto (Baixa energia, sem T_{PREA})

Medidas Preventivas de Trincas a Frio

- ✓ Temperatura adequada antes, durante e após a soldagem..
- ✓ Usar T_{PREA} , temperatura entre passes e T_{POSA} adequada.
- ✓ Manter a solda em temperatura suficiente para difusão rápida do H₂.

Carbono Equivalente

- ✓ Adição elementos de liga ao aço ⇒ ↑ Resistência Mecânica.
- ✓ Deslocam curvas TTT para a direita ⇒ favorece formação da martensita.
- ✓ Favorece fissuração pelo H₂.
- ✓
$$CE = \%C + \frac{\%Mn}{4} + \frac{\%Ni}{20} + \frac{\%Cr}{10} + \frac{\%Cu}{40} - \frac{\%Mo}{50} - \frac{\%V}{10}$$
- ✓ CE :usado para avaliar soldabilidade relativa dos aços quanto risco fissuração H₂.
- ✓ CE>0,40 Necessitam cuidados especiais durante a soldagem.

Fissuração a Quente

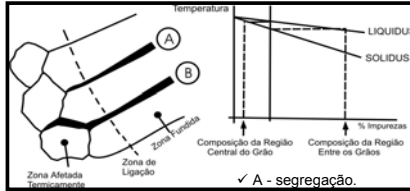
“Trincas a Quente”

- ✓ Resulta da segregação de fases ponto fusão + baixo que a ZF ou ZTA.
- ✓ Fatores que influenciam as Trincas a Quente:
- ✓ Composição da ZF ou ZTA: Existência de fases com ↓ ponto fusão.
- ✓ Restrição da junta: Esforços de contração.
- ✓ Parâmetros e Procedimento de soldagem.

Segregação na ZF:

“Trincas a Quente”

- ✓ À medida que a solidificação progride, o líquido se enriquece de impurezas.
- ✓ Segregação: baixo ponto de fusão.
- ✓ ZF envolvida por filme líquido, não apresenta resistência mecânica para suportar as tensões de contração da solda. (trincas a quente).



- ✓ A - segregação.
- ✓ B - propagação de segregação pré existente.

“Trincas a Quente”

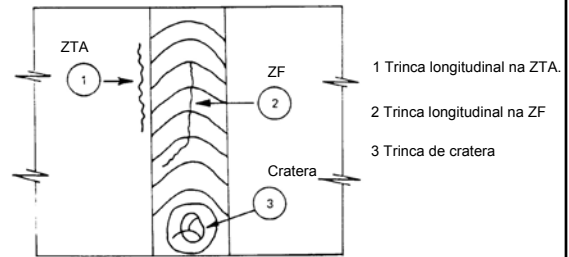
- ✓ S e P principais causadores de Trincas a Quente.
- ✓ Formam filmes eutéticos de ↓ ponto fusão.
- ✓ **Trincas a quente:** surge da incapacidade do metal se deformar sob ação dos esforços inerentes à soldagem.
- ✓ **Durante o resfriamento:** tensões de contração atuam e abrem filmes ↓ ponto fusão.
 - ✓ Não há mais metal líquido para preencher este vazios.
- ✓ Formam-se em altas temperaturas (= 900 – 1100°C para os aços.
- ✓ Quando a solda atinge a Temp. amb. Já está formada.

“Mecanismo de Formação”

- ✓ **Segregação** de fases com ↓ ponto fusão (ZF ou ZTA).
- ✓ **Resfriamento:** grãos envolvidos por filmes líquidos não dispõem de resistência e ductilidade para suportar esforços de contração.
- ✓ Formam trincas do tipo intergranular e macroscópicas.

“Trincas a Quente”

- ✓ **Tipos de Trincas a Quente, e onde ocorrem:**



“Trincas a Quente”

- ✓ **Trincas a Quente** no centro do cordão de solda.



- ✓ Note que não atingiu a superfície do cordão ⇒ Não é visível

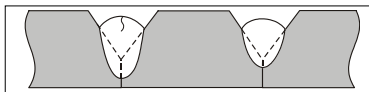
“Fatores que causam Trincas a Quente”

- ✓ **Índice de Susceptibilidade a Trincas (UCS)**
- Serve para avaliar a tendência do metal base a fissuração a quente
- $$UCS = 230C + 190S + 75P + 45Nb - 12,3Si - 5,4Mn - 1$$
- ✓ Metal base com $UCS > 30$ indica baixa resistência a trincas.
- ✓ soldas de filete (elevada restrição) usar $ECS < 20$

“Fatores que causam Trincas a Quente”

✓ Diluição em Passe de Raiz

- ✓ Pode atingir até 80% no passe de raiz.
- ✓ Metal base tem predominância na composição da solda.
- ✓ Chapa com $C > 0,20$ gera no passe de raiz $C > 0,16$, sujeito a trinca quente.
- ✓ Minimizar diluição no passe de raiz é fundamental para evitar trincas.
- ✓ Risco aumenta com chapas espessas e aços de alta resistência.



Elevada diluição passe raiz:
Sensível a trincas.

Baixa diluição passe raiz:
Sensível a trincas.

“Fatores que causam Trincas a Quente”

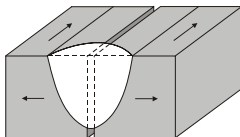
✓ Distorção durante a Soldagem

- ✓ Chapas finas deformam-se mais facilmente durante a soldagem.
- ✓ Susceptíveis a trincas a quente.
- ✓ Restringir a junta: passe de selagem, chapa de entrada e de saída.
- ✓ Objetivo: restringir a junta, impedindo sua movimentação durante a soldagem.

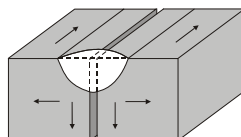
“Fatores que causam Trincas a Quente”

✓ Espessura da Chapa

- ✓ Chapas grossas mais propensas a trincas a quente.
- ✓ Oferecem maior restrição ao metal de solda.
- ✓ Principalmente em soldas de filete e passe de raiz em chanfro.
- ✓ Reduzir a diluição e produzir pequenos cordões evitam trincas.



Extração calor bidimensional:
Sensível a trincas.



Extração calor tridimensional:
Pouco sensível a trincas.

“Fatores que causam Trincas a Quente”

✓ Resistência Mecânica do Metal Base

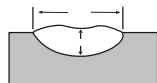
- ✓ $\uparrow$ Resistência Metal Base $\Rightarrow \uparrow$ Risco ocorrerem trincas.

Efeito da Restrição.

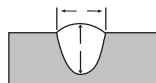
Metal é menos capaz de escoar para acomodar deformações plásticas.

“Fatores que causam Trincas a Quente”

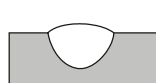
✓ Relação Profundidade/Largura do Cordão de Solda



✓ Cordões largos e pouco profundos e em forma de chapéu sujeitos a trincas.



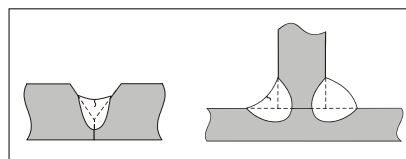
Cordões Profundos e Estreitos ($P/L > 3$) sujeitos a trincas.



Cordões ligeiramente convexos e com $1 < P/L < 2$ menos sensíveis a trincas.

“Fatores que causam Trincas a Quente”

✓ Relação Profundidade/Largura do Cordão de Solda

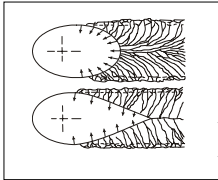


- ✓ Cordões muito côncavos sujeitos a trincas

- ✓ Cordões ligeiramente convexos e com $1 < P/L < 2$ menos sensíveis a trincas.

“Fatores que causam Trincas a Quente”

✓ Formato da Poça de Fusão:



- ✓ Elíptica: pouco propensa a trincas
- ✓ Forma de Lágrima: propensa a trincas
- ✓ Promove segregações no centro da solda.
- ✓ Característica de $\uparrow$ velocidade soldagem.

Pré-Aquecimento em Soldagem

✓ Consiste em aquecer a junta antes da soldagem.

✓ $\uparrow$ TP_{RE}A – Principais Efeitos:

- ↓ Velocidade de Resfriamento.
- Evita tempera (formação de martensita).
- ↓ Velocidade de difusão do H₂
- Ao mesmo tempo. Logo, ↓ possibilidade de trinca a frio.
- $\uparrow$ T_p e $\uparrow$ t_c (aspectos do ciclo térmico)
- ↓ Tensões de contração $\Rightarrow$ ↓ Trincas a quente.

Desvantagem do Pré-Aquecimento:

✓ $\uparrow$ extensão da ZTA.

✓ Aços 16%Cr :

✓ $\uparrow$ TP_{RE}A $\Rightarrow$ propicia formação fases de baixa tenacidade.

✓ Aços-liga , Aços com C>0,30% :

✓ $\uparrow$ temperabilidade.

✓ $\uparrow$ TP_{RE}A $\Rightarrow$ Comum e benéfico à soldagem.

Pós-Aquecimento em Soldagem

✓ Consiste em **MANTER** a junta aquecida após a soldagem.

✓ Exemplo típico: 2h a 250°C.

✓ $\uparrow$ TP_{OS}A – Principais Efeitos:

- ✓ $\uparrow$ difusão do H₂ na solda.
- ✓ Deve ser realizado logo após a soldagem.
- ✓ Resfriamento da junta permite formação H₂ molecular.