



**PROCESSOS DE FABRICAÇÃO III  
SOLDAGEM**

**METALURGIA DA SOLDAGEM**

*Professor: Moisés Luiz Lagares Júnior*

# METALURGIA DA SOLDAGEM

*Processos de Fabricação III - SOLDAGEM*

## A JUNTA SOLDADA

- Consiste: **Metal de Solda**, **Zona Afetada pelo Calor (ZAC)**, **Metal de Base**
- A microestrutura de cada área é função da composição do metal de base, do metal de adição, processo de soldagem e procedimentos utilizados
- Tipicamente o metal de solda solidifica-se rapidamente, possuindo microestrutura de granulação fina
- O metal de solda é a mistura do metal de base fundido e o metal de adição depositado
- Algumas soldas são compostas somente pela fusão do metal de base, conhecidas como soldas autógenas (solda a ponto e TIG)
- O metal de solda geralmente possui composição química similar ao metal de base de modo a conferir propriedades físicas e mecânicas condizentes entre ambos

## METALURGIA DA SOLDAGEM: O METAL DE SOLDA

*Processos de Fabricação III - SOLDAGEM*

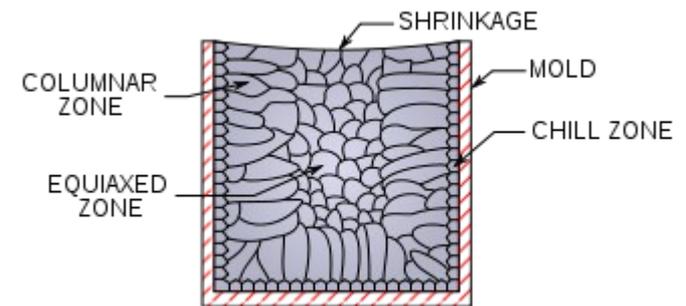
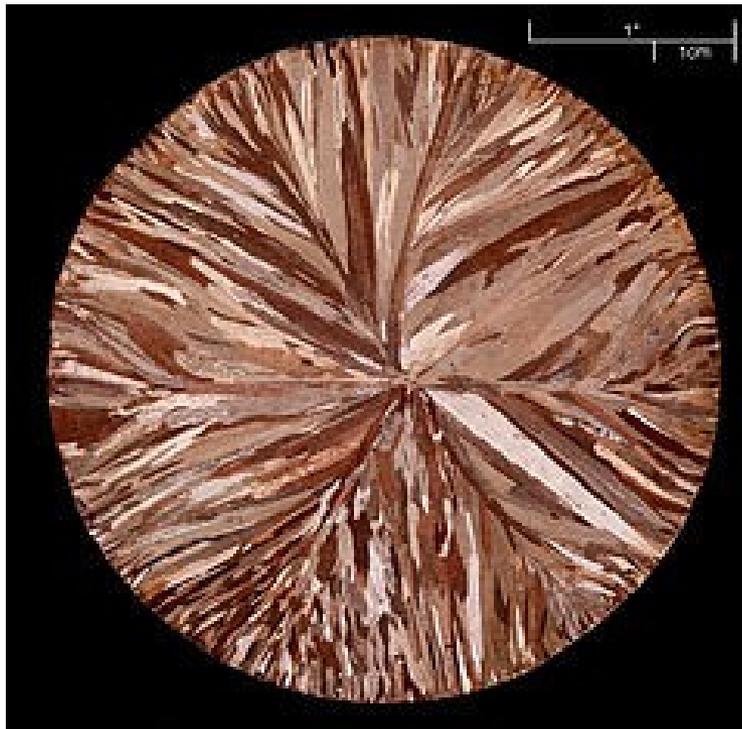
---

- A microestrutura do metal de solda é diferente da do metal de base de composição similar: não pela composição química mas pelas diferentes histórias térmicas e mecânicas do metal de base e de solda
- Metal de base: resultado de operações de laminação a quente (recristalização) ou a frio (encruamento)
- Metal de solda: resultado direto da sequência de eventos que ocorre durante a **solidificação** e após a **solidificação**

# METALURGIA DA SOLDAGEM: O METAL DE SOLDA

Processos de Fabricação III - SOLDAGEM

## Solidificação



(a)



(b)



(c)

# METALURGIA DA SOLDAGEM: O METAL DE SOLDA

Processos de Fabricação III - SOLDAGEM

## Solidificação

- A porção não fundida dos grãos da ZAC é um substrato ideal para a solidificação do metal de solda
- Microestrutura colunar

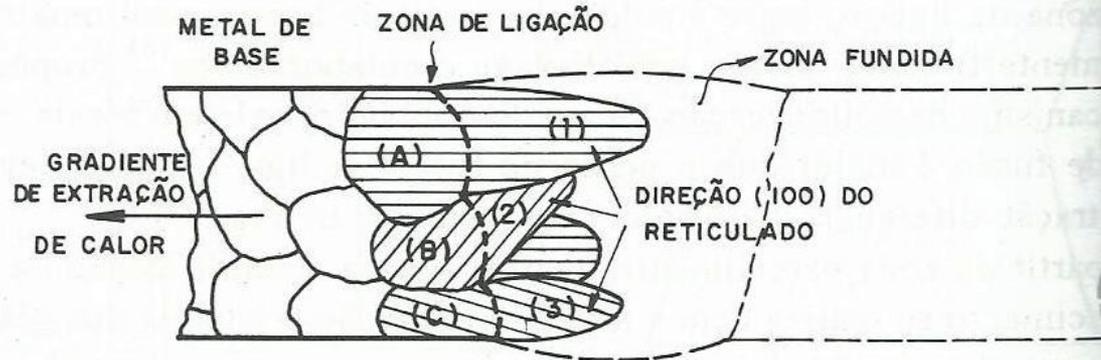


Figura 8.18 — Representação esquemática do crescimento epitaxial (entre A e 1; B e 2 e C e 3) e do crescimento competitivo (entre 1, 2 e 3).

# METALURGIA DA SOLDAGEM: O METAL DE SOLDA

*Processos de Fabricação III - SOLDAGEM*

## Solidificação

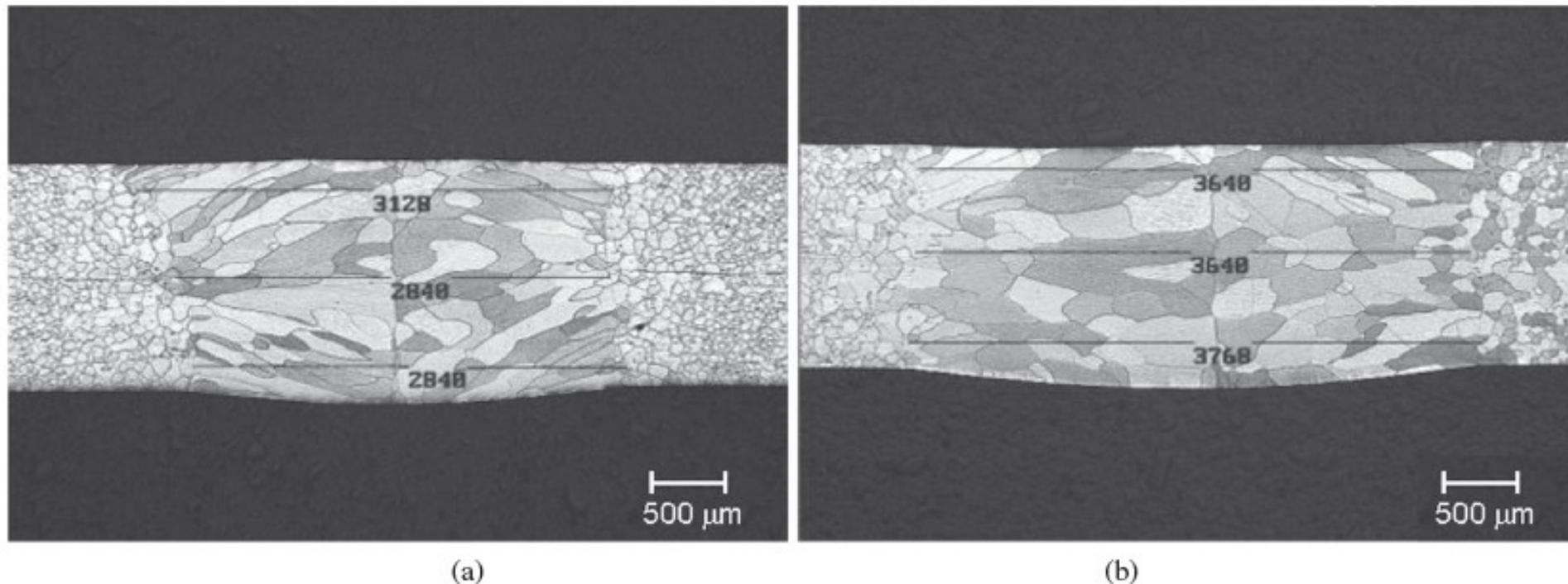


Figura 3. Seções transversais dos cordões de solda GTAW com (a) baixa e (b) alta energia. As linhas horizontais com números mostram medidas da largura dos cordões em diferentes profundidades destes.

## METALURGIA DA SOLDAGEM: A ZTA

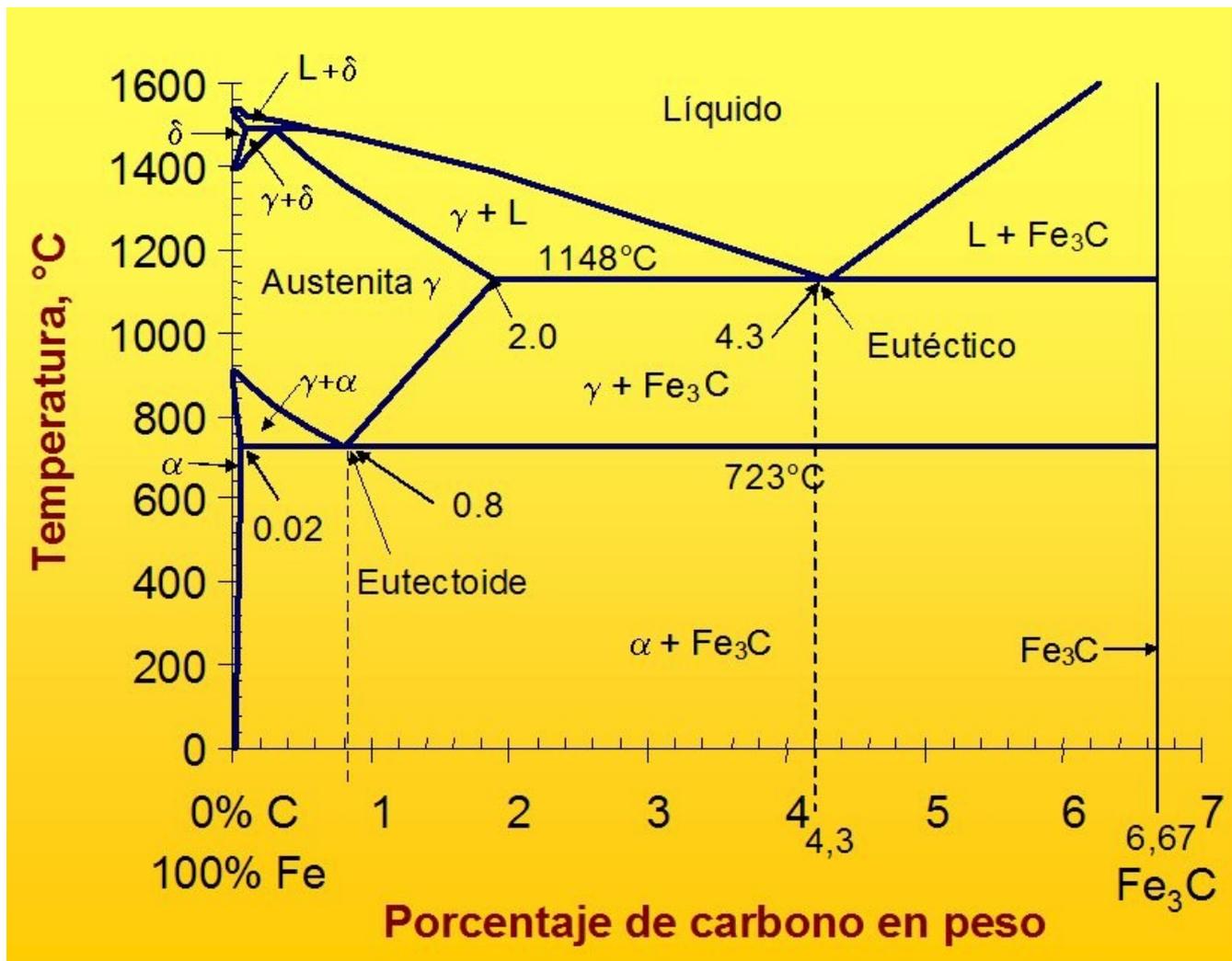
*Processos de Fabricação III - SOLDAGEM*

---

- Em tese, a ZTA inclui todas as regiões aquecidas a qualquer temperatura acima da ambiente
- A ZTA abrange somente aquelas regiões influenciadas, de forma mensurável, pelo calor do processo de soldagem (Calor Imposto)
- É frequentemente definida pela variação de dureza ou mudanças na microestrutura nas regiões periféricas da junta soldada
- Para o aço carbono comum laminado a quente, a ZTA não inclui regiões que o metal de base foi aquecido a menos de, aproximadamente, 700°C

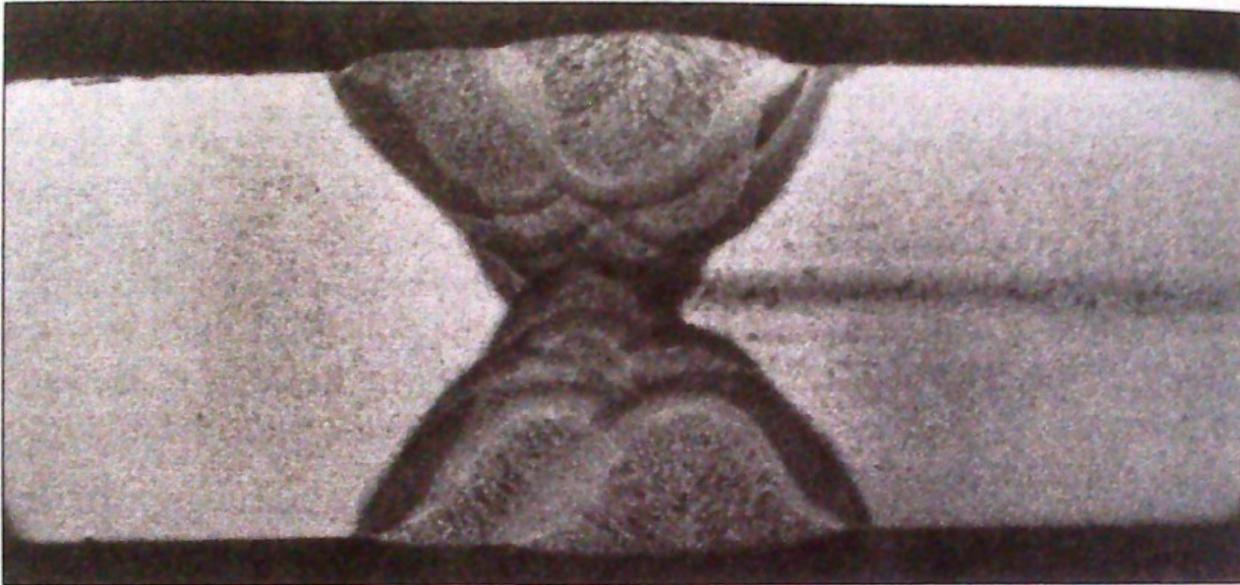
## METALURGIA DA SOLDAGEM: A ZTA

Processos de Fabricação III - SOLDAGEM



## METALURGIA DA SOLDAGEM: A ZTA

Processos de Fabricação III - SOLDAGEM



Source: Linnert, G. E., 1994, *Welding Metallurgy*, 4th ed., Miami: American Welding Society, Figure 9.46.

**Figure 4.28—Macrosection  
of a Carbon-Manganese Steel Weld  
Approximately 1-1/2 in. (40 mm) Thick,  
Showing Positions of Individual  
Weld Beads and Their Overlapping  
Heat-Affected Areas**

## METALURGIA DA SOLDAGEM: A ZTA

*Processos de Fabricação III - SOLDAGEM*

---

- A resistência na ZTA depende: do tipo de metal de base, do processo de soldagem e do procedimento de soldagem
- O metal de base mais suscetível aos efeitos da soldagem são aqueles que sofreram processos de aumento de resistência por tratamentos térmicos
- Os efeitos do calor imposto na ZTA podem ser melhor entendidos considerando três tipos de ligas que podem ser soldadas e sofreram aumento de resistência via:
  - 1) Solução sólida
  - 2) Têmpera (transformação de fase)
  - 3) Trabalho a frio (encruamento)

## METALURGIA DA SOLDAGEM: A ZTA

*Processos de Fabricação III - SOLDAGEM*

---

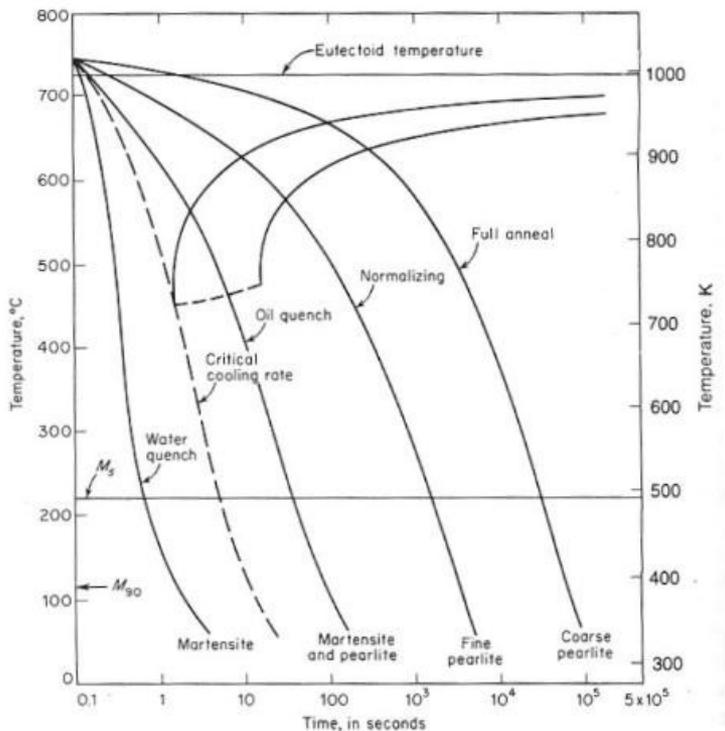
### **Aumento de Resistência via Solução Sólida**

- Exibe os menores problemas relativos à ZTA
- Caso não haja transformação de fase, os efeitos térmicos são muito pequenos
- Pode ocorrer crescimento de grão próximo à interface da solda como resultado do pico de temperatura mas sem grandes consequências às propriedades mecânicas se a área de grãos grosseiras for pequena
- Exemplo: Aço baixo carbono laminado a quente

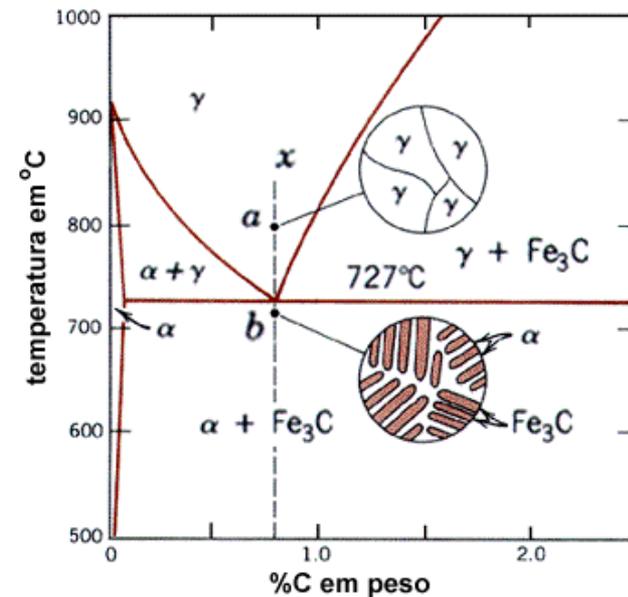
# METALURGIA DA SOLDAGEM: A ZTA

Processos de Fabricação III - SOLDAGEM

## Aumento de Resistência via Transformação de Fase



Definição dos tratamentos térmicos de recozimento (*full anneal*), normalização (*normalizing*) e têmpera (*quench*) num diagrama TRC de aço eutetóide.



## METALURGIA DA SOLDAGEM: A ZTA

Processos de Fabricação III - SOLDAGEM

### Aumento de Resistência via Transformação de Fase

Aços que foram temperados antes da soldagem ou que podem sofrer transformação durante soldagem

1 – Rápido crescimento de grão austenítico, aumentando a endurecibilidade

2 – Sem crescimento de grão austenítico mas com capacidade de transformação para martensita se a taxa de resfriamento for suficiente

3 – Austenitização parcial com grãos austeníticos muito finos

4 – Não há transformação alotrópica

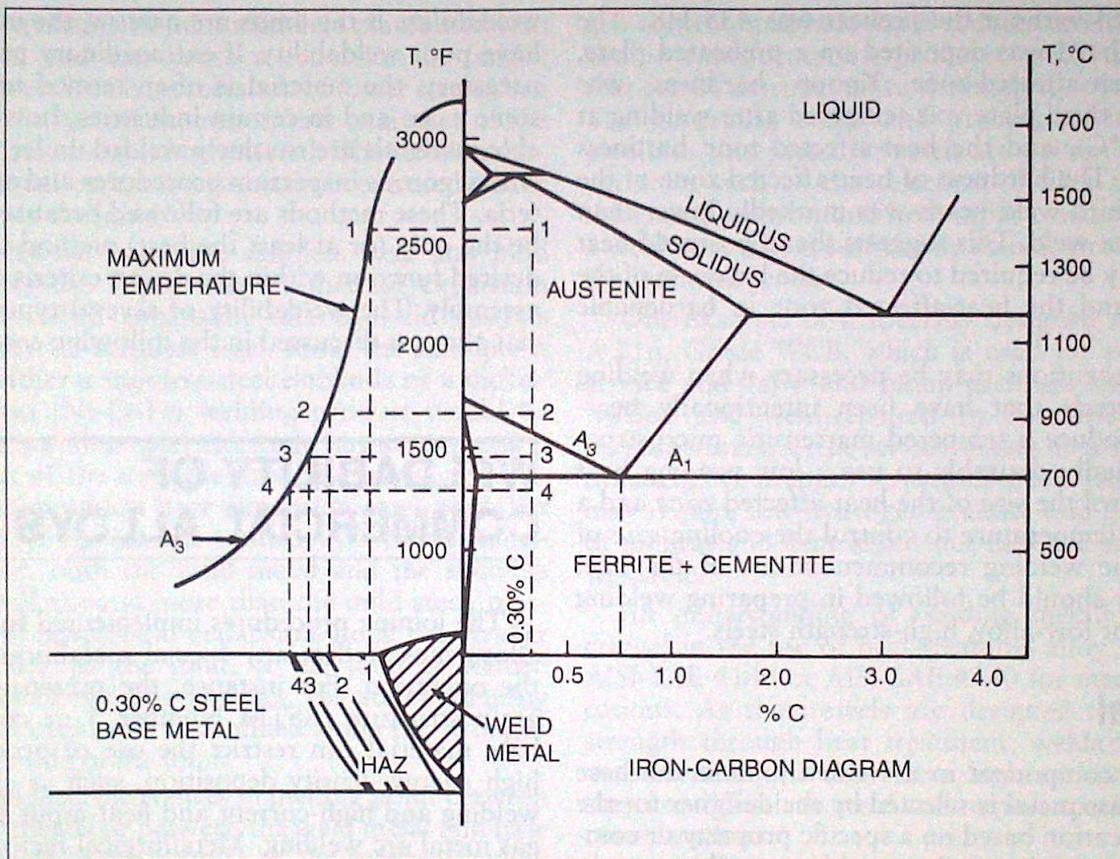


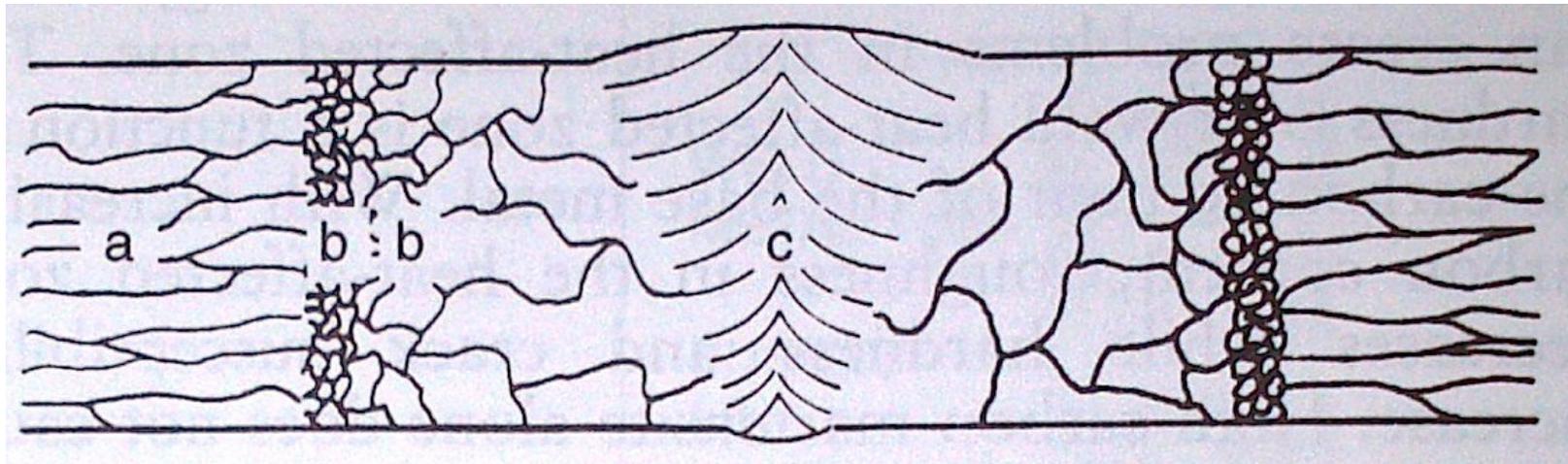
Figure 4.31—Approximate Relationships Between the Peak Temperature, the Distance from Weld Interface, and the Iron-Carbon Phase Diagram

## METALURGIA DA SOLDAGEM: A ZTA

*Processos de Fabricação III - SOLDAGEM*

### **Aumento de Resistência via Trabalho a Frio**

- Metais de base deformados plasticamente recristalizam quando a temperatura supera a temperatura de recristalização
- A ZTA sofre perda de dureza e resistência mecânica



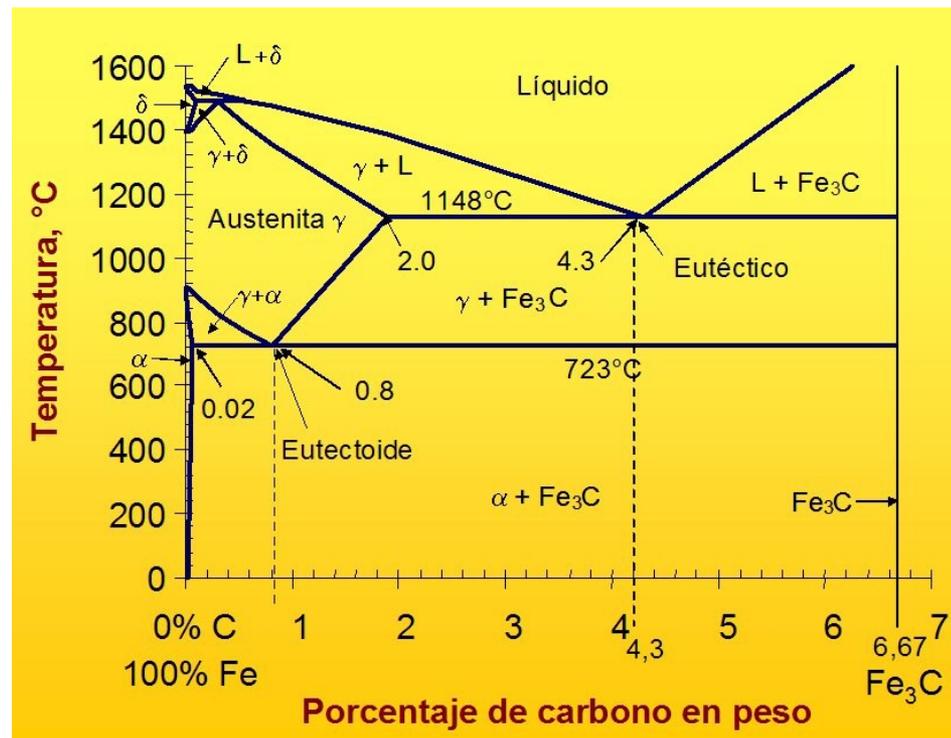
# METALURGIA DA SOLDAGEM: A ZTA

Processos de Fabricação III - SOLDAGEM

## Aumento de Resistência via Trabalho a Frio

Temperaturas de Recristalização para alguns metais e ligas de uso comum

MATERIAL	Temperatura de Recristalização
Cobre Eletrolítico (99,999%)	121
Cu – 5% Zn	315
Cu – 5% Al	288
Cu – 2% Be	371
Alumínio Eletrolítico (99,999%)	279
Alumínio (99,0%)	288
Ligas de Alumínio	315
Níquel (99,99%)	571
Monel (Ni – Cu)	593
Ligas de Magnésio	252
Ferro Eletrolítico	398
Aço de Baixo Carbono	538
Zinco	10
Chumbo	-4
Estanho	-44



# TRANSFERÊNCIA DE CALOR NA SOLDAGEM

Processos de Fabricação III - SOLDAGEM

## Ciclos Térmicos na Soldagem e a Distribuição de Temperaturas

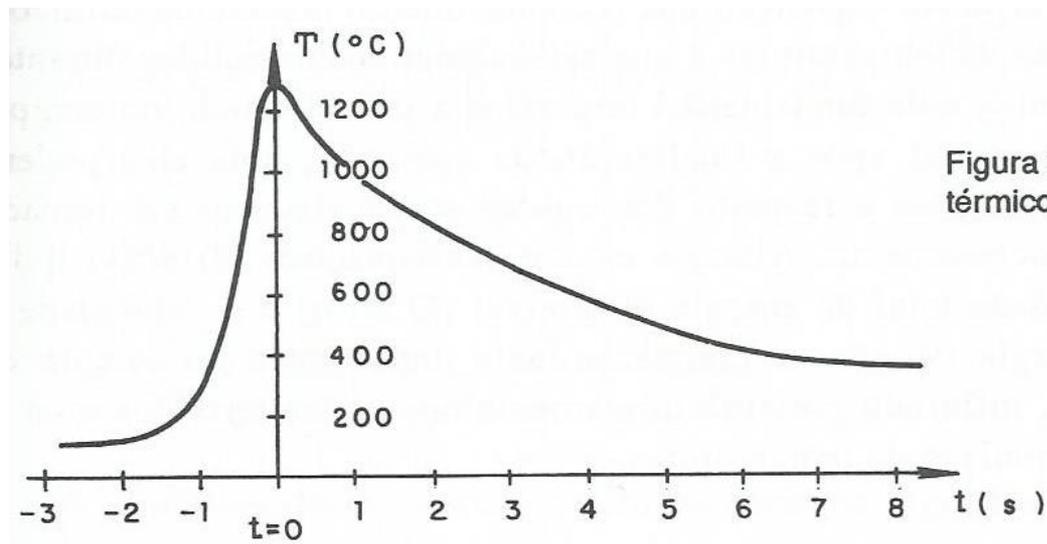


Figura 8.4 — Ciclo térmico de soldagem

- $t = 0$  representa o exato momento em que a fonte de calor atinge o ponto em estudo no sólido
- Três fases: Aquecimento vigoroso; Temperatura máxima atingida; Resfriamento gradual

# TRANSFERÊNCIA DE CALOR NA SOLDAGEM

Processos de Fabricação III - SOLDAGEM

## Ciclos Térmicos na Soldagem e a Distribuição de Temperaturas

Figura 8.5 — Linhas isotérmicas obtidas na soldagem de alumínio (1)

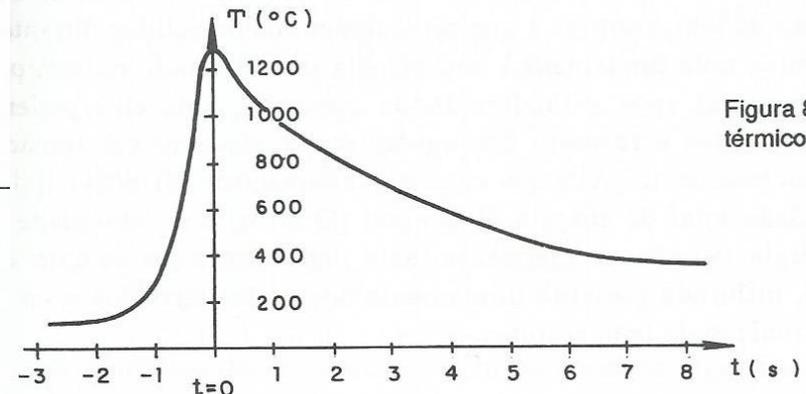
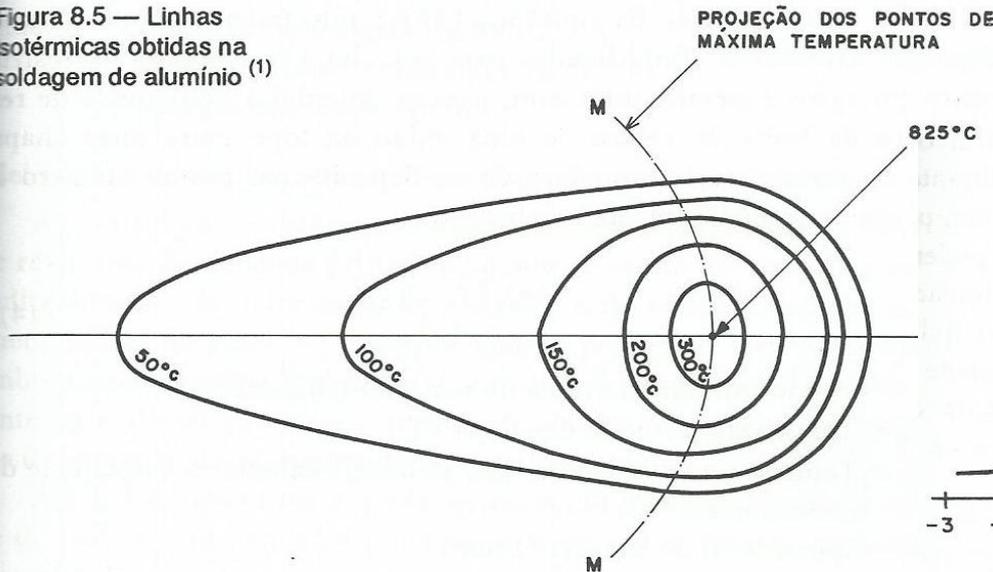


Figura 8.4 — Ciclo térmico de soldagem

- O cômputo de vários ciclos térmicos e cálculos complementares permite a obtenção das isothermas (distribuição de temperaturas)
- Tal conhecimento fornece informações a respeito dos cuidados que deverão ser tomados
- O **Calor Imposto** e a **Velocidade de Soldagem** são as grandezas que mais influem no ciclo térmico

# TRANSFERÊNCIA DE CALOR NA SOLDAGEM

Processos de Fabricação III - SOLDAGEM

## Temperaturas Máximas e Velocidade de Resfriamento

- Do ponto de vista metalúrgico, é importante conhecer os **picos de temperatura** e as **velocidades de resfriamento** pois dessas variáveis dependerão as propriedades finais da região soldada. Calculados a partir da curva de Ciclos Térmicos

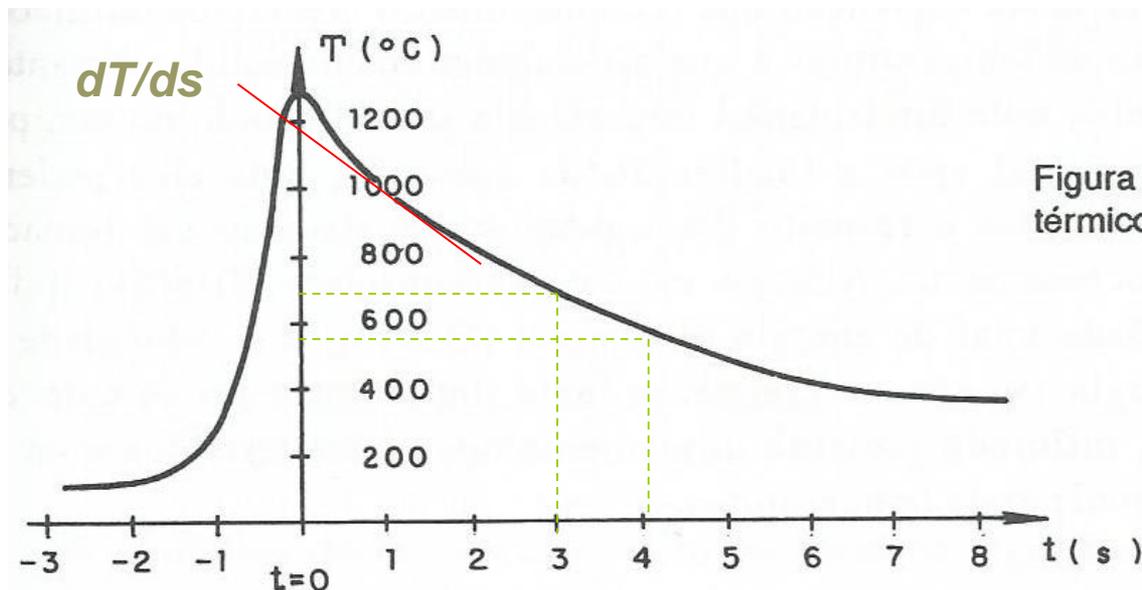
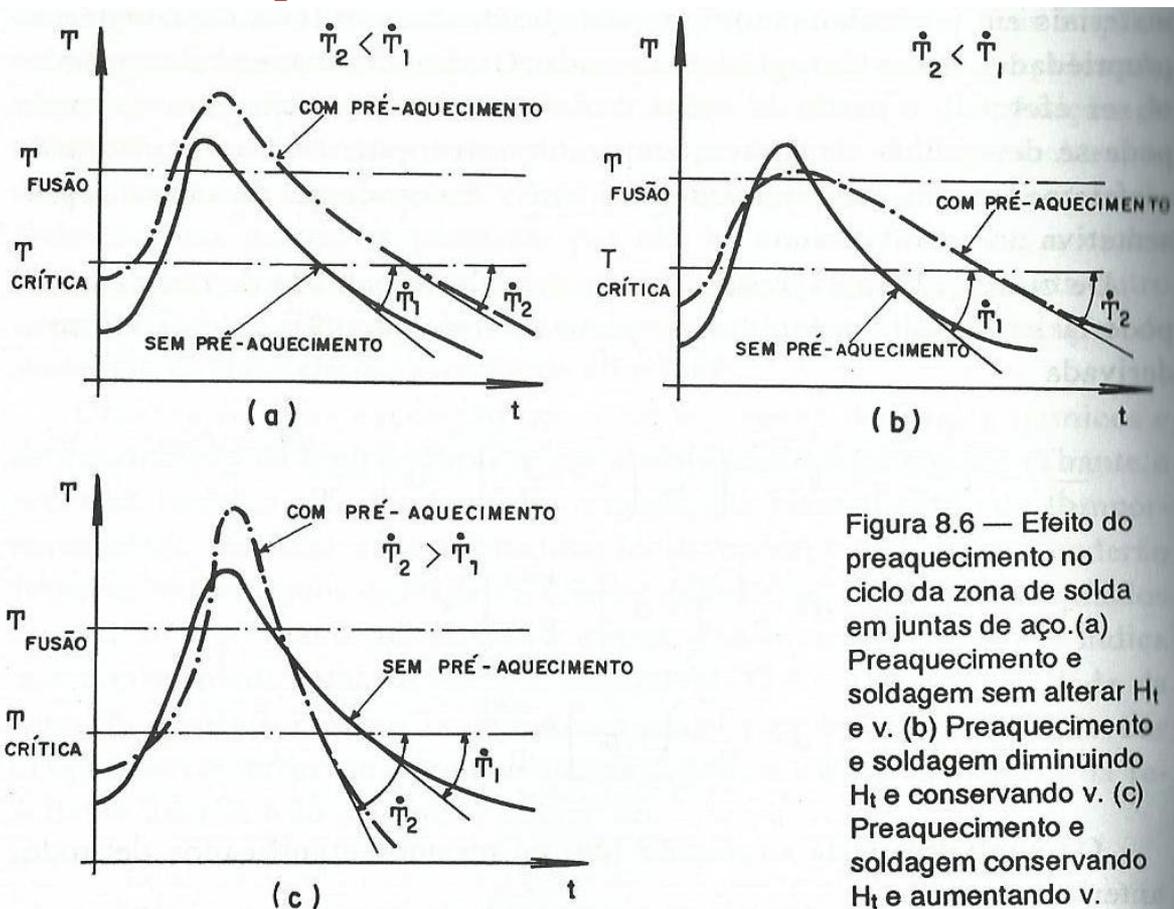


Figura 8.4 — Ciclo térmico de soldagem

# TRANSFERÊNCIA DE CALOR NA SOLDAGEM

Processos de Fabricação III - SOLDAGEM

## Meios para Controlar a Velocidade de Resfriamento na Soldagem



$$CI = \left( \sum \frac{u_i}{V_S} \right) \eta_{termico}$$

- a) Somente pré-aquecimento: ligeira diminuição da taxa de resfriamento
- b) Diminuição do Calor Imposto: maior diminuição da taxa de resfriamento
- c) Maior Velocidade de Soldagem: aumento da taxa de resfriamento

Figura 8.6 — Efeito do preaquecimento no ciclo da zona de solda em juntas de aço. (a) Preaquecimento e soldagem sem alterar  $H_t$  e  $v$ . (b) Preaquecimento e soldagem diminuindo  $H_t$  e conservando  $v$ . (c) Preaquecimento e soldagem conservando  $H_t$  e aumentando  $v$ .

## METALURGIA DA SOLDAGEM: A ZTA

*Processos de Fabricação III - SOLDAGEM*

---

### **Pré-aquecimento e Velocidade de Resfriamento**

- Do ponto de vista metalúrgico, é importante conhecer os picos de temperatura e as velocidades de resfriamento pois dessas variáveis dependerão as propriedades finais da região soldada
- O pré-aquecimento é frequentemente utilizado para reduzir a taxa de resfriamento (importante na soldagem de aços temperáveis)

## METALURGIA DA SOLDAGEM: METAL DE BASE

*Processos de Fabricação III - SOLDAGEM*

---

- Selecionado pelo projetista (limite de escoamento ou LRT, resistência à corrosão, densidade etc)
- A soldabilidade (definida pela AWS) é afetada pela: forma da seção a ser soldada e espessura, limpeza da superfície e propriedades mecânicas
- Fator principal que afeta a soldabilidade: Composição Química
- Para cada tipo de metal, existem limites os quais a soldagem pode ser adequadamente aplicada: Se os limites são amplos → boa soldabilidade  
Se os limites são estreitos → baixa soldabilidade
- Se se requer controle crítico do processo e rigorosos procedimentos de inspeção indica que o processo de soldagem pode ser o único meio disponível de união que atinja os requisitos necessários

## TRINCA A QUENTE

*Processos de Fabricação III - SOLDAGEM*

### Existem diferentes conceitos empregados

Tabela 3: Classificação de trincas propostas pelas normas DIN 8524 e AWS B 1.0. Extraída de [12].

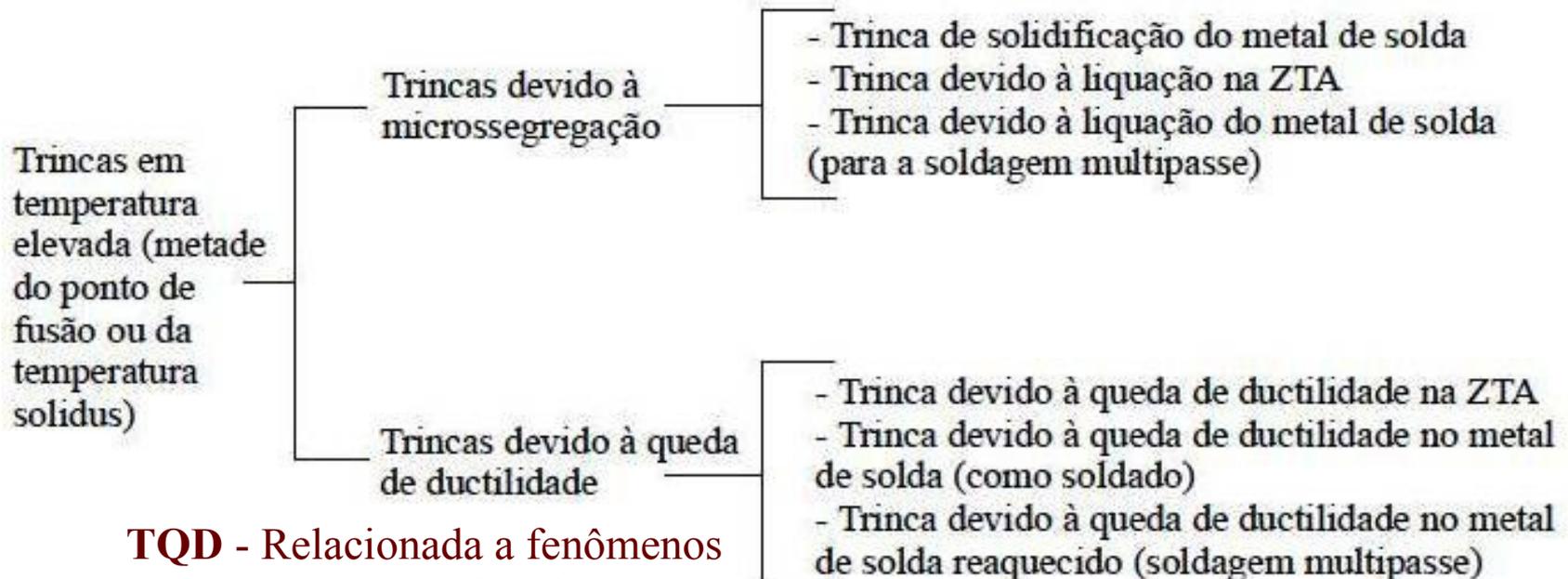
Norma DIN 8524	Norma AWS B 1.0
<b>Trinca a quente</b> (associada com a presença de um filme líquido) <ul style="list-style-type: none"> <li>- Trinca de solidificação (cratera)</li> <li>- Trinca de liquação</li> </ul> <b>Trinca a frio</b> (ocorre com o material totalmente no estado sólido) <ul style="list-style-type: none"> <li>- Trinca devido à queda de ductilidade</li> <li>- Trinca devido à contração de solidificação</li> <li>- Trinca induzida por hidrogênio</li> <li>- Trinca lamelar</li> </ul>	<b>Trinca a quente</b> (ocorre em temperatura elevada, próximo ao ponto de fusão e durante a solidificação da solda) <b>Trinca a frio</b> (ocorre após a solidificação da solda e é geralmente associada à presença de hidrogênio)
#####	<b>Trinca lamelar</b>

## TRINCA A QUENTE

Processos de Fabricação III - SOLDAGEM

### Proposta de classificação dada por Hemsworth

Tabela 2: Classificação das trincas intergranulares e em temperatura elevada segundo Hemsworth e colaboradores. Extraída de [12].

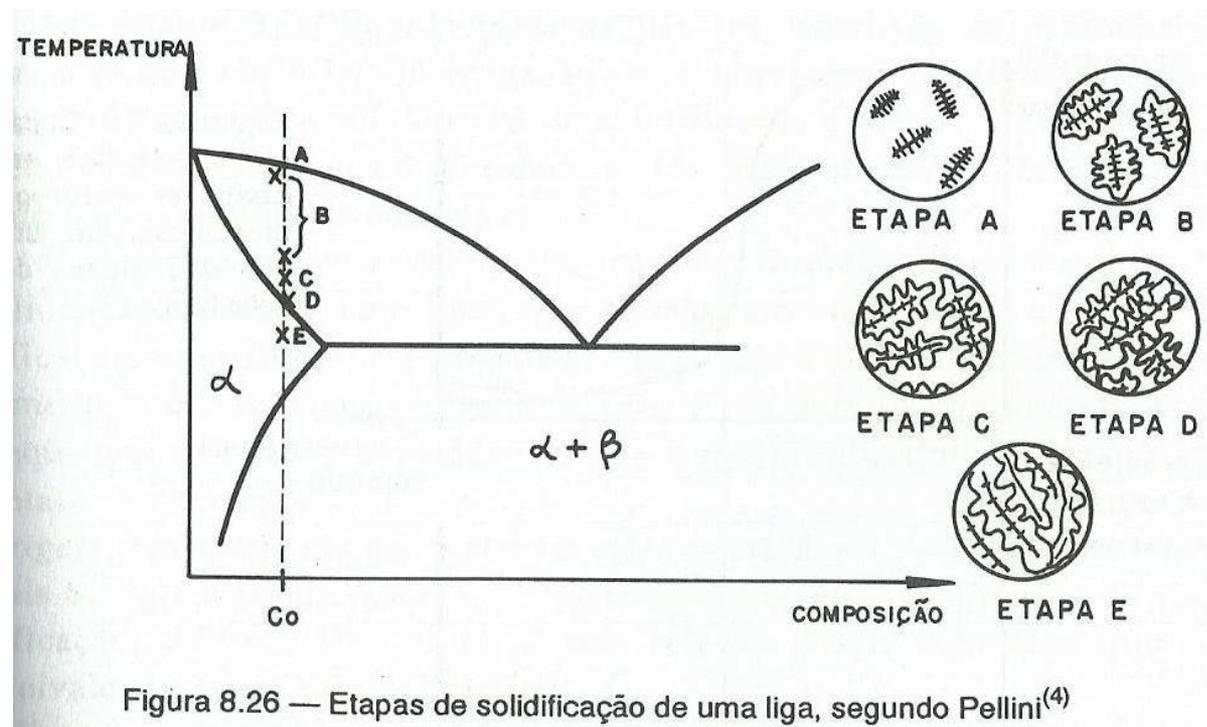


**TQD** - Relacionada a fenômenos que ocorrem na região de temperatura de recristalização

# TRINCA A QUENTE

Processos de Fabricação III - SOLDAGEM

## Trinca devido à Microsegregação

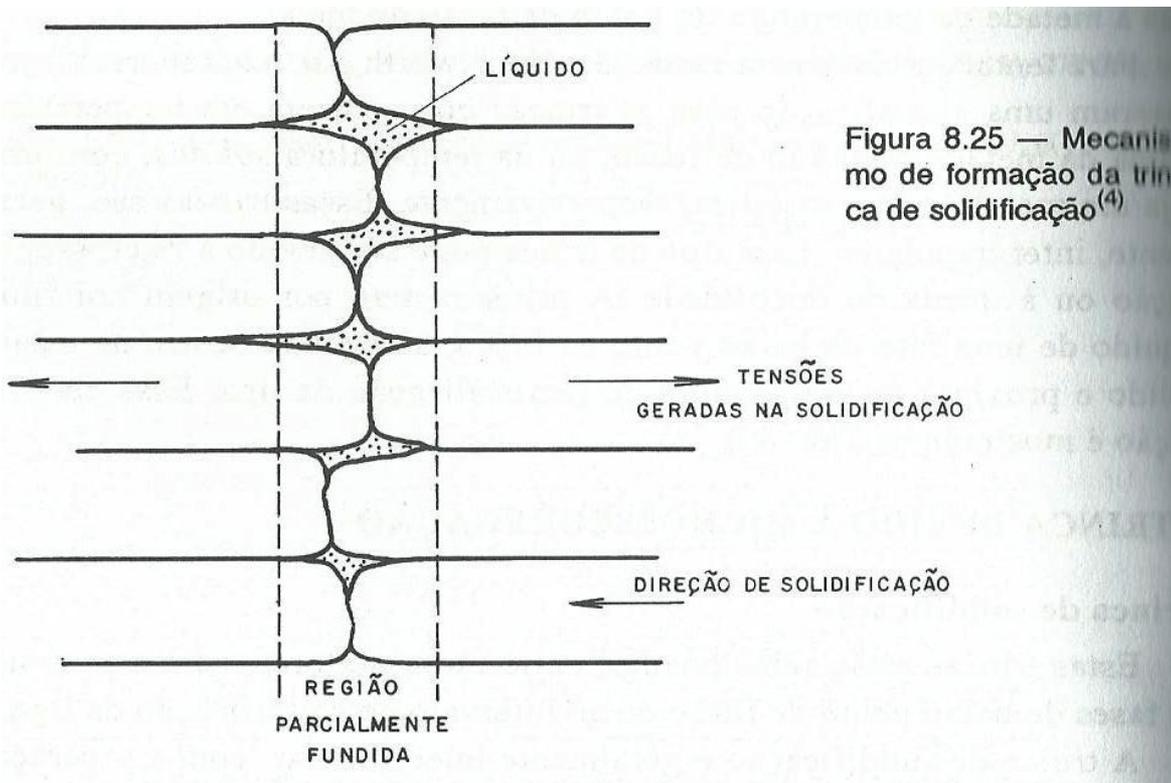


- Relacionada com a presença de fases de baixo ponto de fusão ou ao intervalo de solidificação da liga
- Geralmente intergranular, com a separação do material ocorrendo na região interdendrítica a qual está preenchida com líquido de baixo ponto de fusão

## TRINCA A QUENTE

Processos de Fabricação III - SOLDAGEM

### Trinca devido à Microsegregação



- Relacionada com a presença de fases de baixo ponto de fusão ou ao intervalo de solidificação da liga
- Geralmente intergranular, com a separação do material ocorrendo na região interdendrítica a qual está preenchida com líquido de baixo ponto de fusão

## TRINCA A FRIO (induzida por hidrogênio)

*Processos de Fabricação III - SOLDAGEM*

### **Trinca a frio induzida por hidrogênio**

- Pode ocorrer alguns dias após a soldagem (recomendação de END 48 h após a soldagem)
- Um mecanismo (Zappfe) propõe que o hidrogênio combina-se formando gases em microtrincas ou microcavidades do metal. Existem outras propostas
- Ocorre quando existe:

**Presença de hidrogênio**

**Microestrutura suscetível (especialmente martensita)**

**Tensão residual de tração**

**Baixa temperatura**

# TRINCA A FRIO (induzida por hidrogênio)

Processos de Fabricação III - SOLDAGEM

## Presença de Hidrogênio

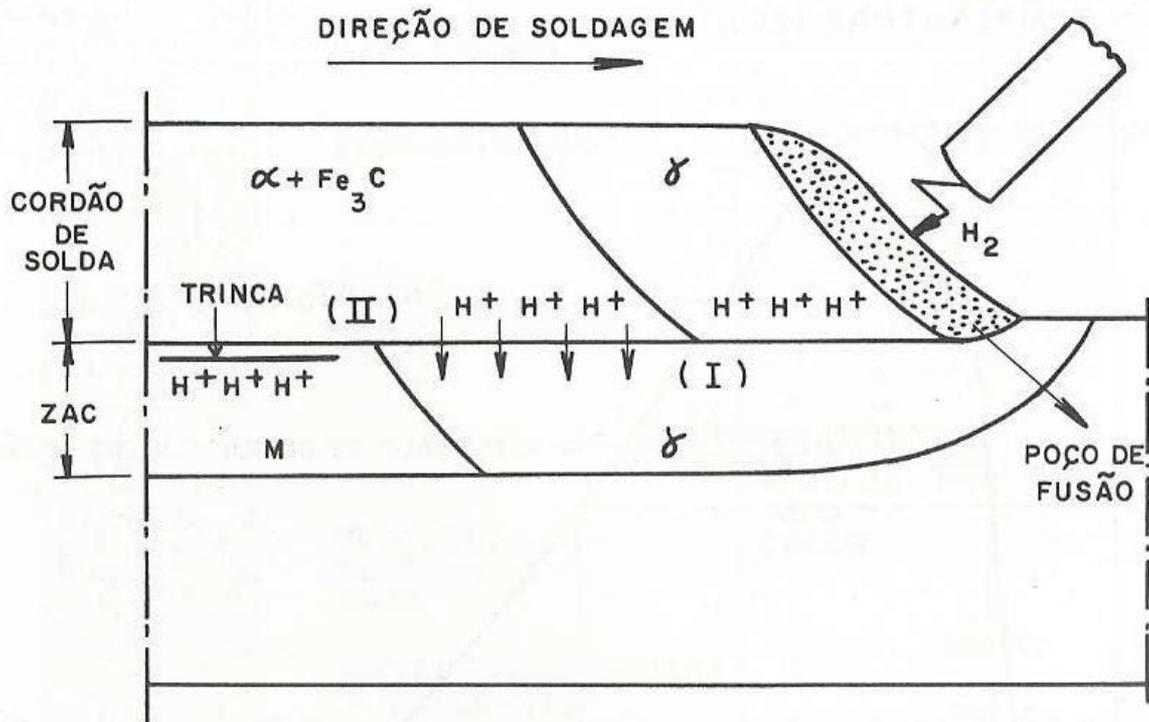
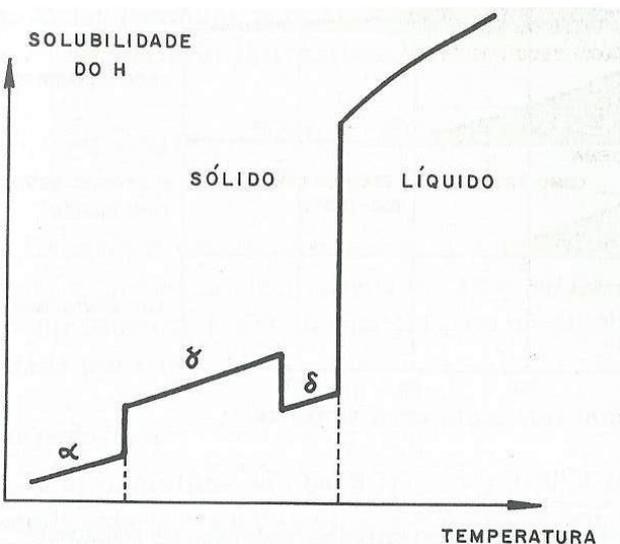


Figura 8.55 — Mecanismo de fragilização por hidrogênio durante a soldagem<sup>(28)</sup>

## TRINCA A FRIO (induzida por hidrogênio)

*Processos de Fabricação III - SOLDAGEM*

### **Presença de Hidrogênio**

Fontes de Hidrogênio nos consumíveis:

- Umidade no revestimento 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 MIG/MAG ou TIG
- Contaminação com óleo, sujeiras ou graxa na superfície do eletrodo ou óxidos hidratados (ferrugem) na superfície dos arames

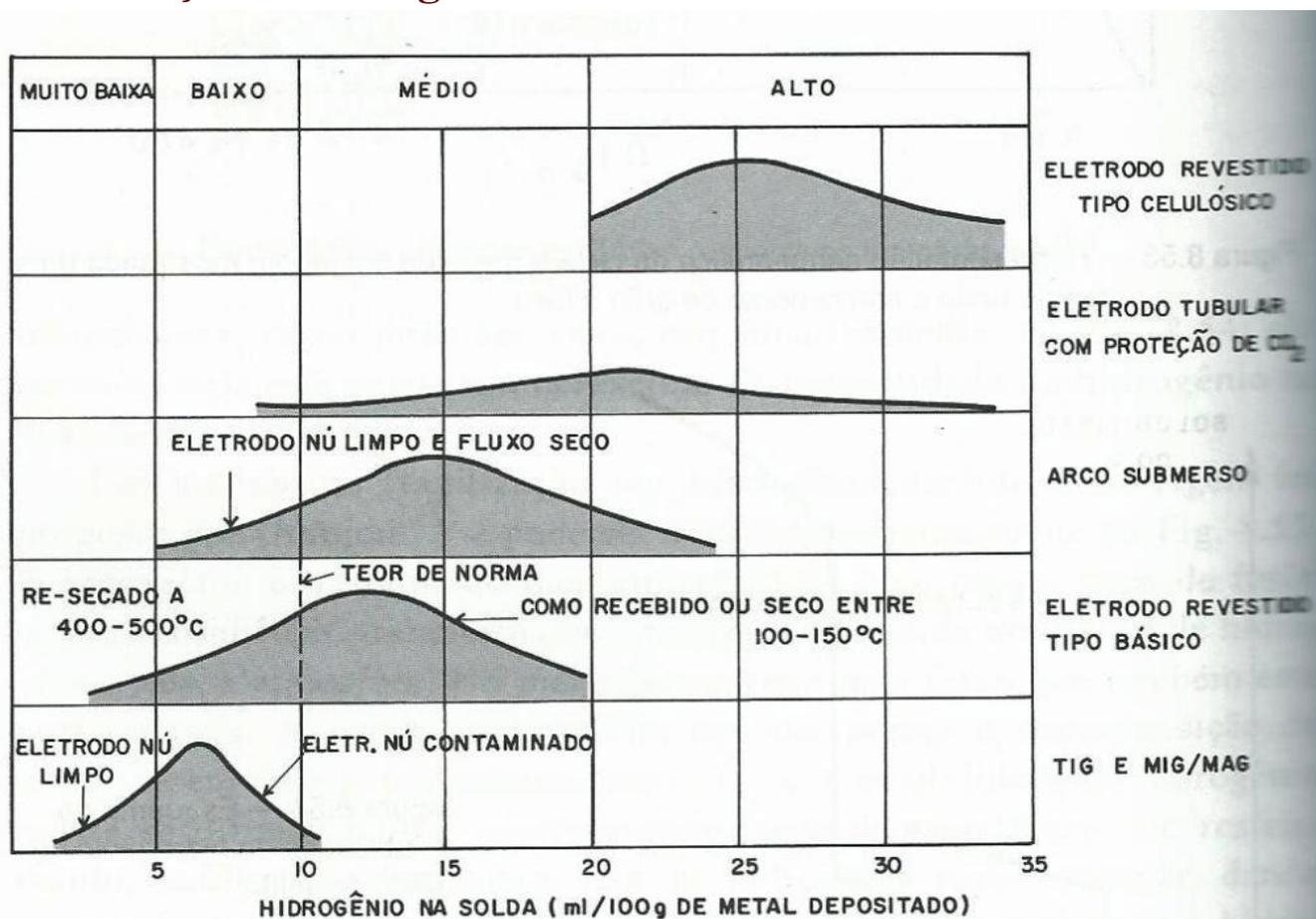
Fontes de Hidrogênio no metal de base:

- H proveniente do processo de fabricação do aço
- Óleo, graxa, tinta e sujeira na superfície do MB
- Líquidos desengraxantes que deixam resíduos
- Óxidos hidratados na superfície do MB

## TRINCA A FRIO (induzida por hidrogênio)

Processos de Fabricação III - SOLDAGEM

### Presença de Hidrogênio



Os processos de soldagem também têm seu teor típico de Hidrogênio dissolvido:

## TRINCA A FRIO (induzida por hidrogênio)

*Processos de Fabricação III - SOLDAGEM*

---

### **Microestrutura Favorável**

- De maneira geral, a suscetibilidade aumenta com o aumento da resistência do aço
- A martensita é o microconstituente mais sensível a este tipo de trinca
- Ocorrência ligada à temperabilidade dos aços
- O pré-aquecimento é eficaz na prevenção

## TRINCA A FRIO (induzida por hidrogênio)

*Processos de Fabricação III - SOLDAGEM*

---

### **Tensões Residuais**

- Depende do grau de restrição da junta soldada
- A restrição cresce com o aumento da espessura da chapa
- Junta de topo é menos restrita que junta em ângulo
- Concentração de tensão: Falta de fusão e falta de penetração são fortes concentradores de tensão

## TRINCA A FRIO (induzida por hidrogênio)

*Processos de Fabricação III - SOLDAGEM*

---

### **Temperatura**

- Pré-aquecimento reduz a velocidade de resfriamento (diminuindo a martensita na ZTA)
- No caso de aços temperáveis ao ar, não se consegue evitar a presença da martensita; com pré-aquecimento consegue-se diminuir o teor de H na junta soldada, modificar a microestrutura e diminuir as tensões residuais