

### 5.3 Fluxo de Calor em Soldagem.

#### Processos de Soldagem por Fusão:

Fonte de calor intensa e localizada.

#### Soldagem a arco elétrico:

- ✓ **Intensidade:**  $\sim 5 \times 10^9$  W/m<sup>2</sup>.
- ✓ **Regiões localizadas:** temperaturas acima da  $T_{\text{fusão}}$  do aço.
- ✓ **Altos gradientes térmicos:**  $10^2$  a  $10^3$  °C/mm.
- ✓ **Variações bruscas de temperatura:** até  $10^3$  °C/s.

- Extensas variações de microestrutura e propriedades.
- Pequeno volume de material.

#### Fluxo de Calor pode ser dividido em duas etapas básicas:

- ✓ Fornecimento de calor à junta.
- ✓ Dissipação deste calor pela peça.

### Energia de Soldagem:

- ✓ É uma medida da quantidade de calor cedida à peça.
- ✓ Definida como razão entre energia fornecida pela velocidade de soldagem.

$$ES = \eta \times \frac{V \times I}{v}$$

ES = Energia de soldagem (J/mm).  
 $\eta$  = eficiência de transmissão de calor.  
 V = Tensão no arco (V).  
 I = corrente de soldagem (A).  
 v = velocidade de soldagem (mm/s)

$$ES = \eta \times \frac{P}{v}$$

Valores típicos de  $\eta$ :

Processo	Rendimento Térmico ( $\eta$ )
Arco Submerso (SAW)	0,85 - 0,98
MIG/MAG (GMAW)	0,75 - 0,95
Eletrodo Revestido (SMAW)	0,70 - 0,90
TIG (CC-) (GTAW)	0,50 - 0,80
TIG (CC+) (GTAW)	0,20 - 0,50
Laser (LBW)	0,005 - 0,70

### Energia de Soldagem:

- ✓ Característica do processo de soldagem:

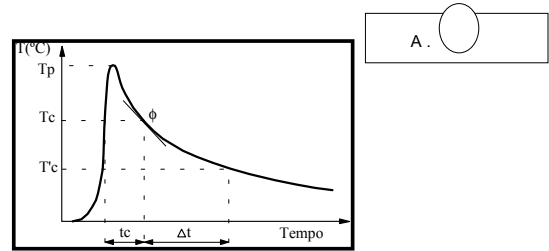
**Processos de baixa Energia de Soldagem:**  
 Eletrodo Revestido, Mig-Mag, Tig.

**Processos de alta Energia de Soldagem:**  
 Arco submerso. Eletro-escória.

- ✓ Parâmetro cuja medida é simples.
- ✓ Utilizada em normas e trabalhos técnicos para especificar condições de soldagem.

### Ciclo Térmico de Soldagem:

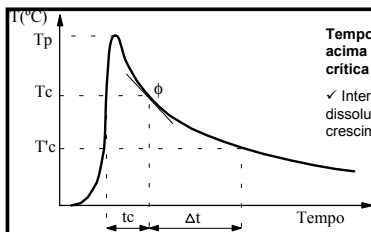
- ✓ Considere um ponto "A" na junta soldada
- ✓ O calor da operação de soldagem provoca variações de temperatura como abaixo:



### Características Importantes do Ciclo Térmico de Soldagem:

#### Temperatura de Pico (Tp)

- ✓ Temperatura máxima atingida no ponto.
- ✓ Tp diminui com a distância ao centro da solda.
- ✓ Indica a extensão da região afetada pelo calor.
- ✓ Indica transformações microestruturais que podem ocorrer.



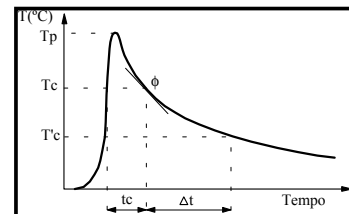
**Tempo de permanência (tc) acima de uma temperatura crítica (Tc):**

- ✓ Interesse em materiais onde a dissolução de precipitados e/ou crescimento de grãos pode ocorrer.

### Características Importantes do Ciclo Térmico de Soldagem:

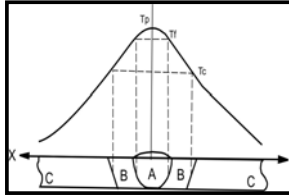
#### Velocidade de Resfriamento ( $\phi$ ):

- ✓ Parâmetro importante na determinação da microestrutura em materiais que podem sofrer transformações de fase durante o resfriamento.
- ✓ Exemplo: aços estruturais comuns.
- ✓ É igual à inclinação da curva de ciclo térmico nesta temperatura.



### Repartição Térmica de Soldagem:

✓ Variação da  $T_p$  com a distância ao centro do cordão de solda (direção perpendicular à solda).



Aumentando a distância do centro da solda:

- ✓ ↓ a  $T_p$  atingida.
- ✓ ↑ o tempo para atingir uma certa temperatura (atraso).
- ✓ ↓ tempo de permanência acima de uma certa temperatura.
- ✓ ↓ a velocidade de resfriamento.

### Ciclos Térmicos:

✓ Permite avaliar a **previsão** de transformações.

### Repartição Térmica:

✓ Permite avaliar a **extensão** das zonas onde ocorrem transformação.

O **Ciclo Térmico** e a **Repartição Térmica** dependem de diversas variáveis:

#### □ Tipo de Metal Base:

↑ condutividade térmica do material ⇒ ↑ velocidade de resfriamento.

#### □ Geometria da Junta:

##### Junta de topo em chapa fina:

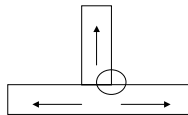
Duas direções de escoamento de calor.



##### Juntas em T:

Três direções de escoamento de calor.

Tendem a esfriar mais rapidamente.



#### □ Espessura da Chapa:

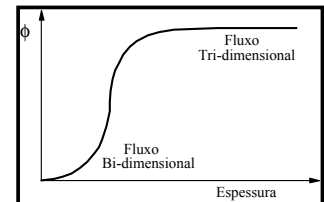
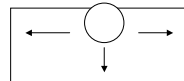
↑ Espessura da Chapa ⇒ ↑ velocidade de resfriamento.

Acima de um limite ⇒ velocidade resfriamento independe da espessura.

**Junta de topo em chapa fina:** Duas direções de escoamento de calor.



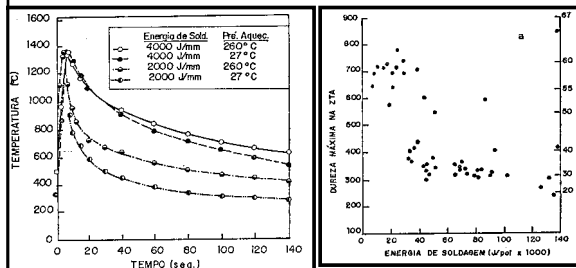
**Chapas grossas:** três direções de escoamento de calor.



Variação da velocidade de resfriamento ( $\phi$ ) a uma dada temperatura com a espessura da chapa.

#### □ Energia de Soldagem e Temperatura Pré-Aquecimento:

↑ ES e TPA ⇒ ↓ velocidade de resfriamento.  
Repartição Térmica torna-se mais larga.  
↑ Extensão da ZTA.  
↓ Dureza máxima na ZTA.



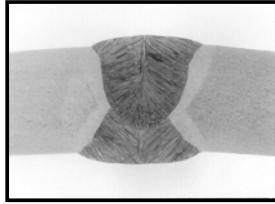
#### □ Outras Constatações:

✓ Procedimento de Soldagem define a energia de soldagem. Logo, influencia a  $T_p$  e Velocidade de Resfriamento.

✓ ↓ Energia de soldagem ⇒ ↑ Velocidade resfriamento ⇒ ↑ possibilidade tempera.

✓ ↑ ↑ Energia de soldagem ⇒ ↓ ↓ Velocidade resfriamento ⇒ Microestrutura grosseira e pouco tenaz.

## 5.4 Macroestrutura de Soldas por Fusão



### ☐ Zona Fundida (ZF)

- ✓ Metal fundiu-se e solidificou-se durante a soldagem.
- ✓ Tp superiores à  $T_{\text{fusão}}$  do metal.

### ☐ Zona Termicamente Afetada (ZTA)

- ✓ Região não fundida do metal base com microestrutura e/ou propriedades mecânicas alteradas pelo ciclo térmico.
- ✓ Tp superior a  $T_{\text{crítica}}$  para o material em questão.

### ☐ Metal Base (MB)

- ✓ Região mais afastada do cordão que não foi afetada pelo processo de soldagem.
- ✓ Tp inferiores a  $T_{\text{crítica}}$  para o material em questão.

## 5.5 Características da Zona Fundida

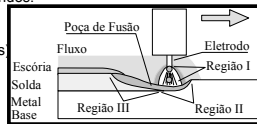
### 5.5.1 Características da Poça de Fusão (Zona Fundida)

### 5.5.2 Solidificação da Poça de Fusão

### 5.5.1 Características da Poça de Fusão (Zona Fundida)

#### Comparação entre Forno Elétrico e Poça de Fusão:

- ✓ Permanência no estado líquido: poucos segundos.
- ✓ Temperaturas atingidas:
  - ✓ Até 20.000°C no arco elétrico.
  - ✓ Acima de 2000°C na poça de fusão (aços)



Característica	Valores típicos		
	na gota	na poça	em forno elétrico
Temperatura média do metal fundido/aço (°C)	2.100 - 2.350	1.700 - 2.000	aprox. 1.600
Tempo de interação com a vizinhança (s)	0,1 - 0,2	3 - 40	10 <sup>3</sup>
Massa de metal fundido (g)	0,08 - 0,25	0,5 - 50	toneladas
Área específica de interação (cm <sup>2</sup> /g)	2,1 - 4,1	0,4 - 1,0	0,001

### ☐ Volatilização:

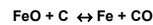
- ✓ Perda de metal quando pressão de vapor do metal é elevada na  $T_{\text{soldagem}}$ .
- ✓  $T_{\text{soldagem}}$  próxima  $T_{\text{fusão}} \Rightarrow$  perdas são desprezíveis.
- ✓ Metais considerados voláteis: chumbo e magnésio.

- ✓ Soldagem a gás e TIG: pouco sensíveis à volatilização de metal.
- ✓ Soldagem Mig, arame tubular e eletrodo revestido: perdas podem ser apreciáveis.

- ✓ Depende também do tempo permanência em alta temperatura.

### ☐ Reações Químicas:

- ✓ Prejudiciais no metal líquido quando provocam desprendimento de gases.
- ✓ Reação do óxido de Fe e o carbono do aço: grande influência na qualidade das soldas.



- ✓ **Aços efervescentes:** tendência a reiniciar a reação do FeO acima.
- ✓ **Agentes desoxidantes:** possuem maior afinidade com o O<sub>2</sub> que o Fe.
  - ✓ Atmosfera redutora (CO, H<sub>2</sub>) na soldagem a gás.
  - ✓ Elementos de adição Mn, Si, Al na soldagem com escória.

- ✓ Na solidificação rápida, os gases provocam **porosidade**.

### ☐ Absorção de Gases:

"O metal líquido pode dissolver gases".

#### Fontes de H<sub>2</sub>: vapor de água:

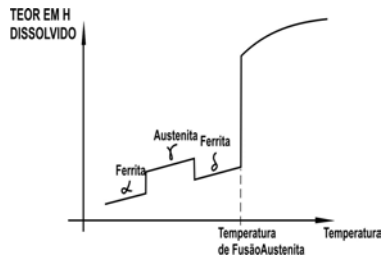
- ✓ Umidade absorvida pelo revestimento do eletrodo e fluxos.
- ✓ Umidade adsorvida nos componentes do revestimento de eletrodos e fluxos.
- ✓ Umidade nos gases de proteção.
- ✓ Umidade no metal de base.
- ✓ Contaminação com óleo, graxa (compostos orgânicos).

Fonte de N<sub>2</sub>: contaminação atmosférica.

#### Queda da solubilidade com a temperatura:

- ✓ No resfriamento, o metal torna-se supersaturado de gases em solução.

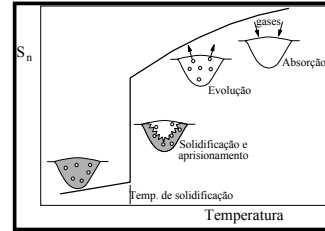
□ Absorção de Gases:



Super saturação da solda em H<sub>2</sub> → Risco de Fissuração a Frio  
 Super saturação de outros gases → Risco de porosidade.

□ Absorção de Gases:

Formação de porosidade devido à absorção de gases:



Solubilidade de um gás com a temperatura e mecanismo de formação de porosidade na solda pela evolução de gás.

Exemplos de gases que podem causar problemas de porosidade em soldas.

Gás	ORIGEM	Materiais
H <sub>2</sub>	Umidade atmosférica, água absorvida em fluxos ou revestimentos, oxidação na superfície da peça, substâncias orgânicas no revestimento do eletrodo, contaminação de óleo, graxa, etc.	Aço, Al
N <sub>2</sub>	Contaminação atmosférica	Aço, Ni, Cu
CO	da reação C + O → CO	Aço, Ni
H <sub>2</sub> O	da reação Cu <sub>2</sub> O + 2H → 2Cu + H <sub>2</sub> O	Cu
H <sub>2</sub> S	da reação S + 2H → H <sub>2</sub> S	Aço

□ Diluição:

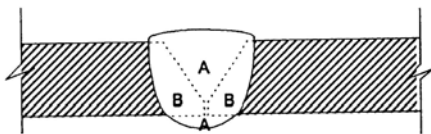
Composição química da solda ⇒ # do metal base e # do metal de adição.

*Diluição: "Participação do metal base na constituição da zona fundida".*

$$D = \frac{\text{massa do metal base fundido}}{\text{massa total da solda}} \times 100$$

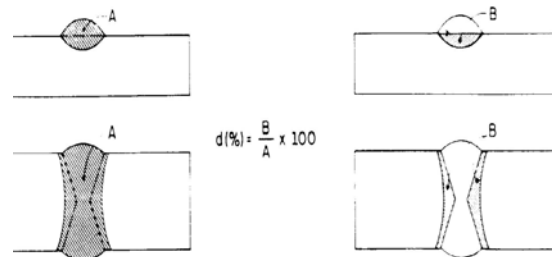
"O conceito de diluição permite estimar a composição final da zona fundida."

□ Diluição:



$$D = \frac{B}{A + B} \times 100\%$$

□ Diluição:



$$d(\%) = \frac{B}{A} \times 100$$

**□ Diluição:**

Pode ser medida em macrografias da seção transversal da solda, conhecendo-se o chanfro usado.

D = 100% (soldas sem metal de adição: TIG autógeno)

D = 0% (brasagem, onde não há fusão do metal base).

Soldagem com Eletrodo Revestido: D ~ 10 a 30%.

Soldagem a Arco Submerso: D ~ 50 a 80%.

**□ Controle da Diluição:**

Pode ajudar a resolver muitos problemas de soldagem.

**Exemplo:** Soldando aço 1045 com processo arco submerso, diluição estimada em 60%. Metal de adição puro: 0,10%C.

Qual o teor de C da zona fundida ? (metal de solda)

**□ Controle da Diluição:**

**Resposta:**

Participação do metal base:  $0,45 \times 0,6 = 0,27\%C$ .

Participação do metal de adição:  $0,10 \times 0,4 = 0,04\%C$ .

Teor de C do metal de solda: 0,31%C.

**? Que tipo de problema isto pode causar na solda?**

**□ Controle da Diluição:**

Constatação:

✓ Apesar do metal de adição ter 0,10%C, o metal de solda produzido contém 0,31%C.

Possíveis Problemas:

- ✓ Microestrutura martensítica no metal de solda.
- ✓ Elevada dureza.
- ✓ Fragilização do metal de solda.

**□ Controle da Diluição:**

**Exemplo:** Soldagem de metais dissimilares: revestimento de aço inox 304 (0,06%C, 18%Cr, 9%Ni) sobre aço C 1020. Diluição estimada em 40%.

? Qual a composição do metal de solda – C, Cr e Ni - do revestimento ?

**Resposta:**

**□ Controle da Diluição:**

**Teor de C:**

Participação do metal base:  $0,20 \times 0,4 = 0,08\%C$ .

Participação do metal de adição:  $0,06 \times 0,6 = 0,04\%C$ .

Teor de C do metal de solda: 0,12%C.

**Teor de Cr:**

Participação do metal base: 0

Participação do metal de adição:  $18 \times 0,6 = 10,8\%Cr$ .

Teor de Cr do metal de solda: 10,8%Cr.

**Teor de Ni:**

Participação do metal base: 0.

Participação do metal de adição:  $8 \times 0,6 = 4,8\%Ni$ .

Teor de Ni do metal de solda: 4,8%Ni.

**? Que tipo de problema isto pode causar na solda?**

☐ Controle da Diluição:

Constatação:

✓ Apesar do metal de adição ter 0,06%C, 18%Cr e 8%Ni, o metal de solda produzido contém 0,12%C, 10,8%Cr e 4,8%Ni.

Possíveis Problemas:

- ✓ Microestrutura martensítica ou ferrítica no metal de solda.
- ✓ Elevada dureza.
- ✓ Fragilização do metal de solda.
- ✓ Problemas de corrosão.

? Como resolver o problema?:

☐ Controle da Diluição:

✓ Usar metal de adição com maior teor de Cr e Ni.

✓ Qual teor de Cr e Ni mínimo teria de ter o metal de adição para garantir 18%Cr e 8%Ni no metal de solda?

☐ Controle da Diluição:

**Teor de Cr:**

Participação do metal de adição:  $X \times 0,6 = 18\%Cr$ .

Teor de Cr do metal de adição: 30%Cr.

**Teor de Ni:**

Participação do metal de adição:  $Y \times 0,6 = 8\%Ni$ .

Teor de Ni do metal de adição: 13,3%Ni.

### 5.5.2 Solidificação da Poça de Fusão

☐ Revisão da Metalurgia Física: Solidificação do Aço

- ✓ Processo complexo.
- ✓ Suas características afetam a estrutura e propriedades de uma peça de aço fundido.
- ✓ Seus efeitos persistem, inclusive, numa peça conformada e tratada termicamente.

✓ A solubilidade dos gases no aço líquido diminui acentuadamente à medida que o metal é resfriado até o intervalo de temperatura onde começa a transição líquido-sólido.

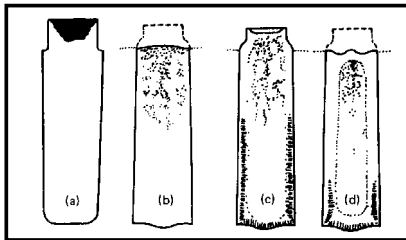
✓ Durante a solidificação de lingotes, os gases são liberados em quantidades dependentes das originalmente presentes no aço líquido.

✓ O principal componente gasoso é o oxigênio, na forma de FeO, reage com o C, produzindo CO.

✓ Os gases, que evoluem nas porções ainda líquidas do lingote, podem ser aprisionados nas interfaces sólido-líquido, produzindo bolhas gasosas (blowholes).

Adição de desoxidantes ao aço líquido diminui a quantidade de oxigênio dissolvido. Grau de desoxidação determina quatro tipos de aços:

- (a) acalmado.
- (b) semi-acalmado.
- (c) capeado.
- (d) efervescente.



A linha pontilhada indica a altura original do aço líquido.

**Aço acalmado:**

Não se forma nenhuma quantidade de gás. Superfície superior é levemente côncava. Abaixo do topo, existe uma cavidade de rechupe.

**Aço semi acalmado:**

Evolui uma quantidade reduzida de gases. Suficiente para compensar totalmente a contração de volume devida à solidificação. A pressão ferrostática exercida pelo aço líquido impediu a formação de bolhas na parte inferior do lingote.

**Aço capeado:**

Evolução de gás no início da solidificação é muito intensa. Intensidade foi reduzida tapando-se a lingoteira e aumentando-se assim a pressão ferrostática.

**Aço efervescente:**

Reação de efervescência ocorreu intensa e livremente. Contração de volume devida à solidificação foi compensada pela formação de bolhas. Superficialmente o lingote apresenta uma camada muito pura. Centro do lingote caracterizado por segregação intensa de elementos como o C, P e S.

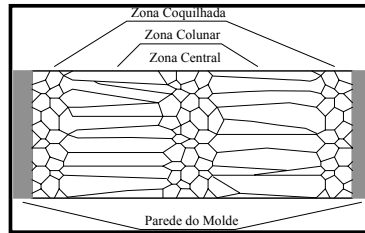
### Macroestrutura de Lingotes de Aços Acalmados:

Apresenta três zonas distintas com diferentes morfologias de grão

▫ **zona coquilhada:** forma-se junto da parede da lingoteira ou molde e é constituída por pequenos grãos equiaxiais orientados ao acaso.

**zona colunar:** forma-se após a anterior e apresenta grãos alongados e dispostos paralelamente à direção do fluxo de calor durante a solidificação.

**zona equiaxial central:** é formada por grãos uniformes e normalmente maiores que o da zona coquilhada.



### 5.5.2 Solidificação da Poça de Fusão

#### Crescimento Epitaxial:

- ✓ Estrutura de solidificação se desenvolve como um prolongamento da zona de ligação.
- ✓ Grãos solidificam com mesma orientação cristalina e tamanho de grão não fundido.
- ✓ Contornos de grãos ultrapassam a zona de ligação.
- ✓ Assegura continuidade metálica na estrutura cristalina.



- A Metal fundido.
- B Zona de ligação.
- C Zona termicamente afetada.

**Tamanho de grão da ZF:** proporcional ao tamanho grão ZTA Grosseiro, em virtude do superaquecimento a que é submetido.

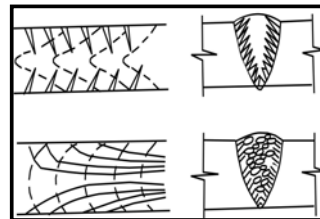
#### Crescimento Competitivo de Grãos:

- ✓ Grãos que dispõem de orientação principal perpendicular às isoterma crescem com maior facilidade que os demais.



#### Crescimento Competitivo de Grãos:

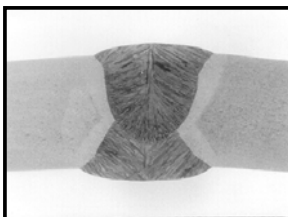
- ✓ Zona fundida: além de granulação grosseira, tem estrutura fortemente orientada.
- ✓ Orientação: conforme a curvatura das isoterma e velocidade da fonte de calor.
- ✓ Relação entre velocidade de soldagem e velocidade de resfriamento.



✓ Soldagem rápida.

✓ Soldagem lenta.

- ✓ Macrografia de solda em dois passes mostrando estrutura de solidificação fortemente orientada.

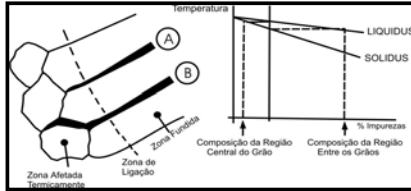


#### Estrutura Primária de Solidificação da ZF:

- ✓ Estrutura Solidificação grosseira e orientada
- ✓ Influência marcante sobre as propriedades mecânicas da ZF.
- ✓ Fácil propagação de fratura frágil (transgranular)
- ✓ Segregações na ZF: podem ocupar posições desfavoráveis em relação às tensões de contração da solda.

### Segregação na ZF:

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

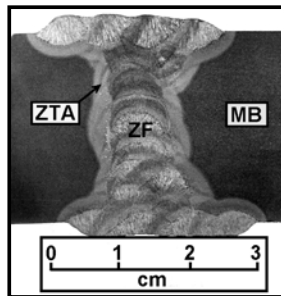


- ✓ A - segregação.
- ✓ B - propagação de segregação pré existente.

### Formação da Estrutura Secundária na ZF:

- ✓ Após solidificação: ZF sofre alterações até o resfriamento à Temp. ambiente.
- ✓ Caso dos Aços C-Mn e Baixa Liga:
  - ✓ Solidifica como ferrita delta, logo se transformando em austenita.
  - ✓ Austenita se transforma em ferrita com diversas morfologias.
  - ✓ Composição química.
  - ✓ Velocidade de resfriamento.
  - ✓ Tamanho e tipo de inclusões.
- ✓ Estrutura secundária (final) da solda: pode ser fina, pode ser grosseira.

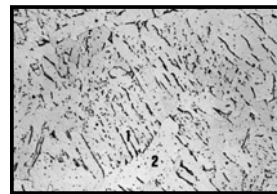
### Soldagem em Passes Múltiplos:



- ✓ Normalmente benéfica às propriedades do metal de solda.
- ✓ Ocorre uma regeneração de propriedades.
- ✓ Recristalização de parte da ZF.
- ✓ Alívio de tensões na ZF.

### Microestrutura do Cordão de Solda (Aços C-Mn e Baixa Liga):

Nital 2%, 500X

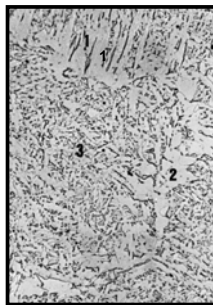


- ✓ Baixa Temperabilidade
- ✓ ↓ C, sem elementos de liga.
- ✓ ↑ energia de soldagem.
- ✓ ↓ Velocidade de resfriamento.

- ✓ Ferrita com segunda fase alinhada. (Ferrita de Widmanstätten)
- ✓ Note ausência de contornos de grão (grosseira).
- ✓ Baixa tenacidade.

### Microestrutura do Cordão de Solda (Aços C-Mn e Baixa Liga):

Nital 2%, 500X

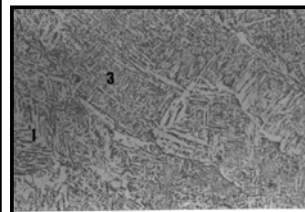


- ✓ Baixa Temperabilidade
- ✓ ↓ C, com algum elemento de liga.
- ✓ Média ou baixa energia de soldagem.

- 1 Ferrita com segunda fase alinhada.
- 2 Ferrita poligonal (normalmente nos contornos de grão austeníticos).
- 3 Ferrita acicular (microestrutura fina e de boa tenacidade).

### Microestrutura do Cordão de Solda (Aços C-Mn e Baixa Liga):

Nital 2%, 500X



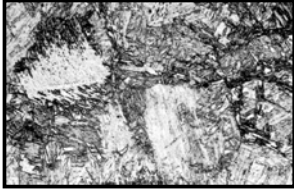
- ✓ Baixa Temperabilidade
- ✓ ↓ C, com adequado teor de elementos de liga.
- ✓ Média ou baixa energia de soldagem.

- Pouca ferrita com segunda fase alinhada e ferrita poligonal.
- Predominância de ferrita acicular.
- Boas propriedades, particularmente tenacidade da solda.



**Microestrutura do Cordão de Solda (Aços C-Mn e Baixa Liga):**

Nital 2%, 200X



✓ Média e Alta Temperabilidade

- ✓ ↑ C, devido a diluição do MB ou no consumível de soldagem.
- ✓ Baixa energia de soldagem.

Martensita e bainita.

Dureza elevada e baixa tenacidade.