

## 5. Fundamentos da Metalurgia da Soldagem

- 5.1 Escopo da Metalurgia da Soldagem.
- 5.2 Revisão de Metalurgia Física dos Aços.
- 5.3 Fluxo de Calor em Soldagem.
- 5.4 Macroestrutura de Soldas por Fusão.
- 5.5 Características da Zona Fundida.
- 5.6 Características da Zona Termicamente Afetada.
- 5.7 Tensões e Deformações em Soldagem.
- 5.8 Trincas a Quente e Trincas a Frio.
- 5.9 Outros Tipos de Defeitos em Soldas.

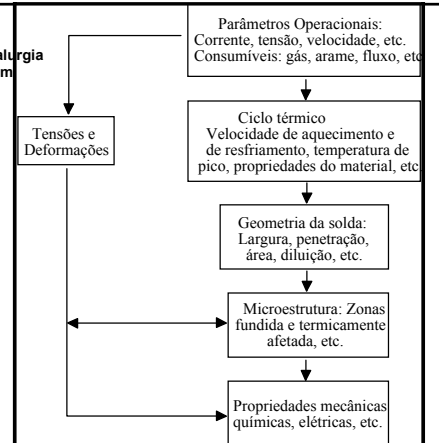
### 5.1 Escopo da Metalurgia da Soldagem.

- ✓ A soldagem causa **alterações localizadas** e bruscas de temperatura no material sendo soldado.
- ✓ Estas alterações, podem provocar mudanças estruturais e, conseqüentemente, nas propriedades do material.
- ✓ Degradação nas propriedades, com implicações na futura utilização da peça soldada.
- ✓ Duas maneiras de se enfrentar este problema.
  1. Desenvolver materiais que sejam menos sensíveis à soldagem, isto é, melhorar a "soldabilidade" dos materiais.
  2. Controlar a operação de soldagem (e, possivelmente, executar operações complementares) de modo a minimizar ou remover a degradação de propriedades da peça.

### A Metalurgia da Soldagem

- ✓ Consiste em estudar o efeito da operação de soldagem sobre a **estrutura e propriedades** dos materiais para:
- ✓ Obter informações que auxiliem no desenvolvimento de novos materiais menos sensíveis à soldagem.
- ✓ Determinar os parâmetros operacionais de soldagem de maior influência nas alterações da estrutura e propriedades do material.
- ✓ Desenvolver operações complementares, para minimizar a degradação de propriedades, ou para reverter esta degradação.

### Escopo da Metalurgia da Soldagem

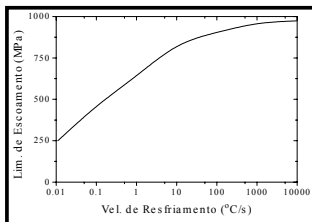


### 5.2 Revisão de Metalurgia Física dos Aços.

#### 5.2.1 Relação Estrutura-Propriedades

- ✓ Característica dos metais: grande influência de sua estrutura em várias de suas propriedades.
- ✓ A estrutura é determinada pelos "processamentos" sofridos pelo metal durante sua fabricação – sua história.

Exemplo:  
Variação do LE com a velocidade de resfriamento para um aço SAE 1080. (pré-aquecido a 900°C por uma hora.)



### A soldagem, sob certos aspectos:

- ✓ Considerada como um violento tratamento térmico e mecânico.
- ✓ Pode causar alterações localizadas na estrutura da junta soldada.
- ✓ Capaz de afetar localmente as propriedades do material.

### “Comprometimento do desempenho em serviço da peça soldada.”

Deve ser minimizado por:

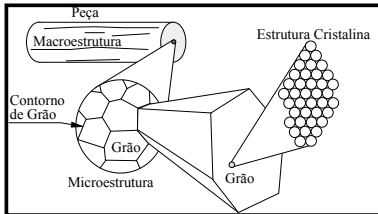
- ✓ Adequação do processo de soldagem ao material a ser soldado.
- ✓ Escolha de um material (metal base e/ou consumíveis) pouco sensível a alterações estruturais pelo processo de soldagem.

### 5.2.2 Níveis Estruturais

Estrutura compreende detalhes grosseiros (macroestrutura) até a organização interna dos átomos (estrutura eletrônica).

**Metalurgia física:** interessa-se

- ✓ Pelo arranjo dos átomos que compõem as diversas fases de um metal (estrutura cristalina)
- ✓ Pelo arranjo dessas fases (microestrutura).



### 5.2.3 Fases Presentes nos Aços

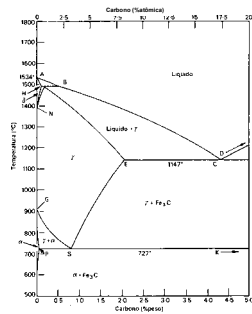
- ✓ Aços: ligas de Fe e C (até 2%) contendo outros elementos.
- ✓ Impurezas: Resultantes do processo de fabricação.
- ✓ Elementos de liga: intencionalmente adicionados.
- ✓ De acordo com o teor de elementos de liga, os aços são subdivididos:
  - ✓ Aços carbono.
  - ✓ Aços baixa-liga (teor de elementos de liga inferior a 5%).
  - ✓ Aços média-liga (entre 5 e 10%).
  - ✓ Aços alta-liga (acima de 10%).

### a) Fases Presentes no Aço Resfriado Lentamente.

**Altas temperaturas:**  
 ✓ Austenita: solução sólida de C, Fe e outros elementos.  
 ✓ Estrutura tipo FCC.

**Durante o resfriamento:** (aços < 0,8%C):  
 ✓ Austenita transforma-se em ferrita.  
 ✓ Ferrita: solução sólida C, Fe, estrutura CCC.

**Abaixo de 727 Célsius:**  
 ✓ Austenita transforma-se em perlita.  
 ✓ Perlita: mistura de ferrita e cementita.



### Ferrita:

- ✓ Constituinte macio, dútil, e em geral, tenaz.
- ✓ Tenacidade depende da temperatura.
- ✓ Frágil a baixas temperaturas.
- ✓ Transição dútil-frágil depende da composição e morfologia (tamanho de grão)

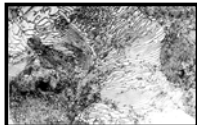
### Perlita:

- ✓ Constituinte mais duro e de menor tenacidade.
- ✓ Quantidade aumenta com o teor de carbono.
- ✓ Aço com 0,8%C, resfriado lentamente, é 100% perlítico.

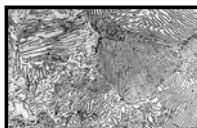


**Microestruturas de aços carbono resfriados lentamente. Ataque: Nital 2%.**

(a) Aço Hipoeutetóide, com 0,45%C. 500X. Ferrita mais perlita.



(b) Aço Eutetóide, com 0,8%C. 500X. Perlita.



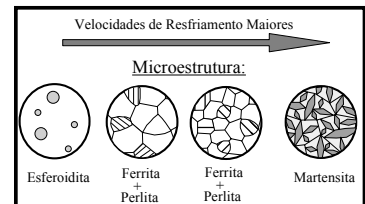
(c) Aço Hipereutetóide, com 0,95%C. 1000X. Cementita mais perlita.

### b) Fases Metaestáveis e Diagramas de Transformação:

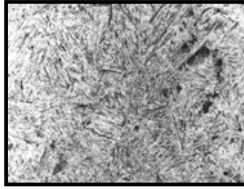
Ítem anterior: transformações ocorrem em condições de equilíbrio (resfriamento lento).

**Quando se aumenta a velocidade de resfriamento:**

- ✓ Transformações se afastam do equilíbrio e a granulação se torna mais fina.
- ✓ Reduz a temperatura de transformação da austenita.
- ✓ Menor mobilidade atômica e maior dificuldade para formação da perlita.
- ✓ Fases não previstas no diagrama de equilíbrio serão formadas.



Microestrutura de um aço hipoeutetóide em função de sua velocidade de resfriamento a partir do campo austenítico.



Microestrutura de um aço baixo carbono **resfriado rapidamente**, constituída de martensita.

Ataque: Nital.  
Aumento: 200x.

**Martensita:**

- ✓ Fase metaestável, não prevista no diagrama Fe-C.
- ✓ Estrutura cristalina tetragonal de corpo centrado.
- ✓ Morfologia de lâminas ou agulhas.
- ✓ Maior dureza e mais frágil que os aços comuns.

**Na Soldagem por Fusão:**

**A velocidade de resfriamento será função:**

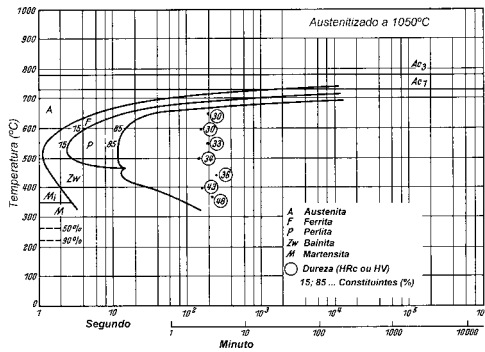
- ✓ Da energia usada por unidade de comprimento (aporte de calor).
- ✓ Da temperatura inicial da peça.
- ✓ Da espessura e geometria da chapa.

- Muito maior que as consideradas em diagramas de equilíbrio.
- Muito provável a formação de fases frágeis.

**Diagramas TTT (Tempo, Temperatura e Transformação):**

- ✓ Obtidos experimentalmente para transformações a temperaturas constantes.
- ✓ Material resfriado rapidamente do campo austenítico até a temperatura de interesse.
- ✓ Muito úteis para previsão de tratamentos térmicos.

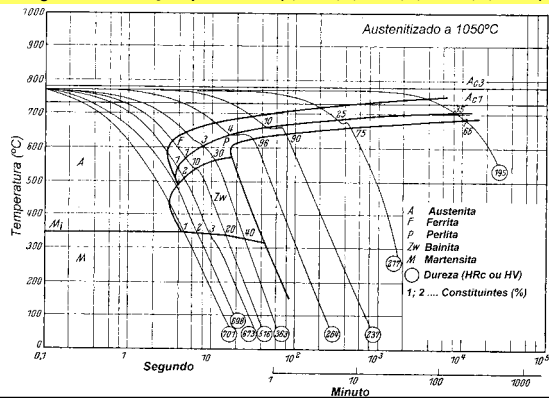
**Diagrama TTT de aço hipoeutóide (0,44%C, 0,22%Si, 0,66%Mn, 0,15%Cr)**



**Diagramas TRC (Transformação em Resfriamento Contínuo):**

- ✓ **Uso dos diagramas TTT limitado:** prevê fases formadas a uma temperatura constante.
- ✓ **Tratamentos térmicos:** feitos através de resfriamento contínuo.
- ✓ **A soldagem idem.** Principalmente o que ocorre na ZTA.
- ✓ Registram o desenvolvimento de transformações à medida que a temperatura decresce, para diferentes taxas de resfriamento.

**Diagrama TRC de Aço Hipoeutóide (0,44%C, 0,22%Si, 0,66%Mn, 0,15%Cr)**

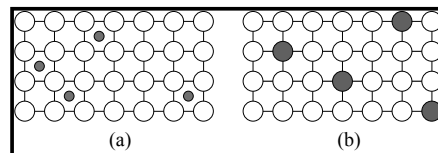


**c) Efeito dos Elementos de Liga**

Adição balanceada de elementos de liga permite obter aços com distintas propriedades: químicas, magnéticas, elétricas e térmicas.

Quando em solução sólida no aço:

- (a) Intersticial.
- (b) Substitucional.



**C, N, O, H e B:**

- ✓ Pequeno raio atômico em relação Fe: formam **solução sólida intersticial**.
- ✓ Solubilidade desses elementos no aço:
  - Limitada pela grande distorção que provocam na rede cristalina.
  - Afinidade química com o Fe ou outro elemento de liga.

Elemento	Raio atômico (Å)	Fe - α		Fe - γ	
		Solub. máxima (%)	Temperatura (°C)	Solub. máxima (%)	Temperatura (°C)
C	0,77	0,095	727	8,7	1148
N	0,72	0,40	590	10,3	650
O	0,60	$0,7-1,3 \times 10^{-4}$	906	?	?
H	0,46	$1-2 \times 10^{-2}$	905	$5 \times 10^{-2}$	1400
B	0,98	0,02	915	?	?

**C e N:** apresentam as maiores solubilidades.

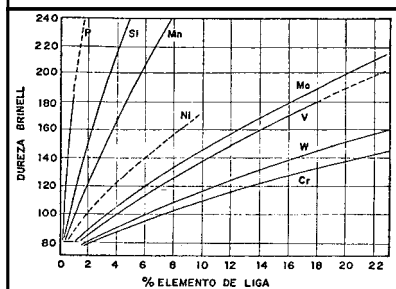
**O:** baixa solubilidade devido tendência de formar óxidos mais estáveis.

**H:** forte tendência a permanecer na forma molecular ( $H_2$ ), com baixa solubilidade no Fe.

**B:** raio atômico grande para se posicionar em um interstício e pequeno para ocupar uma posição substitucional. Solubilidade no ferro muito baixa.

**Cr, Ni, Mn, Si, Mo e outros:**

- ✓ Raios atômicos próximos do raio do ferro.
- ✓ Podem substituir átomos deste na sua rede cristalina.
- ✓ Formam soluções sólidas substitucionais.



Endurecimento por solução sólida devido a vários elementos na ferrita

**Nb, V, Ti:**

- ✓ Reagem fortemente com o C, formando finos carbonetos.