

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.

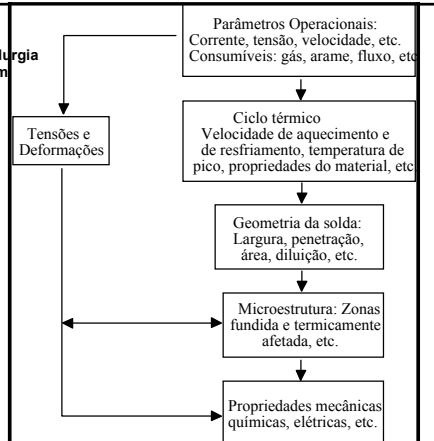
5.1 Escopo da Metalurgia da Soldagem.

- ✓ A soldagem causa **alterações localizadas** e bruscas de temperatura no material sendo soldado.
- ✓ Estas alterações, podem provocar mudanças estruturais e, consequentemente, 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

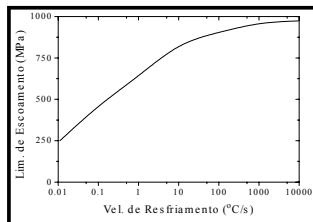


5.2 Revisão de Metalurgia Física dos Aços.

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:

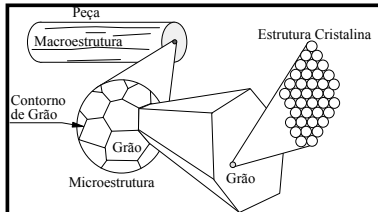
- ✓ Adequação do processo de soldagem ao material a ser soldado.
- ✓ Escolha de um material (metal base e/ou consumíveis) pouco sensível a alterações estruturais pelo processo de soldagem.

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:

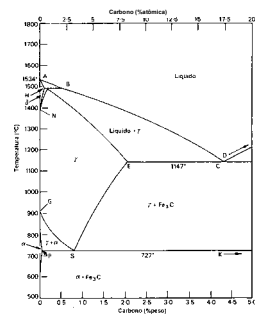
- ✓ Austenita: solução sólida de C, Fe e outros elementos.
- ✓ Estrutura tipo FCC.

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.



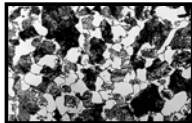
Ferrita:

- ✓ 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)

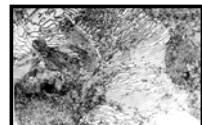
Perlita:

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

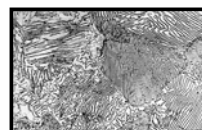
Microestruturas de aços carbono resfriados lentamente. Ataque: Nital 2%.



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



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



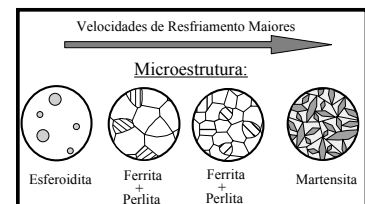
(c) Aço Hipereutetóide, com 0,95%C. 1000X.
Cementita mais perlita.

b) Fases Metaestáveis e Diagramas de Transformação:

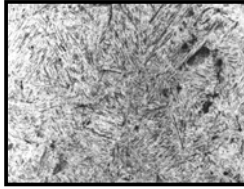
Item anterior: transformações ocorrem em condições de equilíbrio (resfriamento lento).

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:

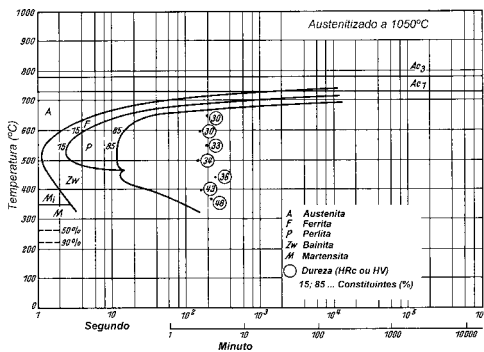
- ✓ Da energia usada por unidade de comprimento (aporte de calor).
- ✓ Da temperatura inicial da peça.
- ✓ Da espessura e geometria da chapa.

- 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 hipoeutetóide (0,44%C, 0,22%Si, 0,66%Mn, 0,15%Cr)



Diagramas TRC (Transformação em Resfriamento Contínuo):

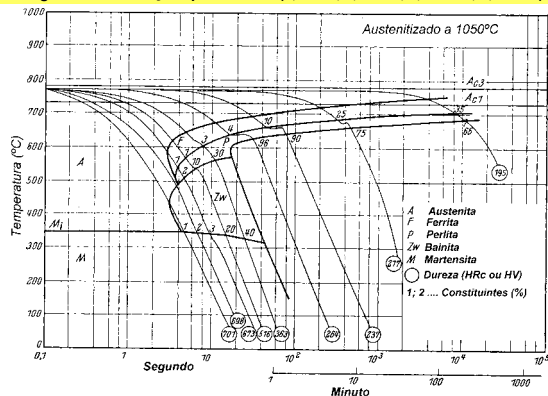
✓ **Uso dos diagramas TTT limitado:** prevê fases formadas a uma temperatura constante.

✓ **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 Hipoeutetóide (0,44%C, 0,22%Si, 0,66%Mn, 0,15%Cr)

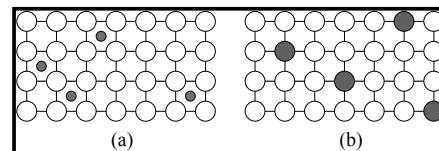


c) Efeito dos Elementos de Liga

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	5×10^{-2}	1400
B	0,98	0,02	915	?	?

C e N: apresentam as maiores solubilidades.

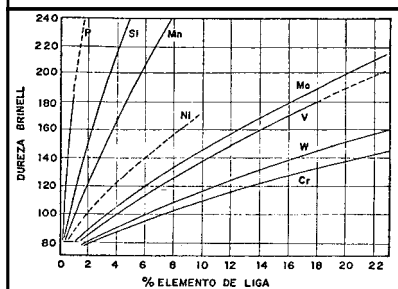
O: baixa solubilidade devido tendência de formar óxidos mais estáveis.

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.