

## Fontes de calor

- \* Arco eléctrico
- \* Resistência
- \* Fricção
- \* Laser
- \* Etc...

**Potência Transferida** – Energia fornecida pela fonte às peças, por unidade de tempo (watt)

**Intensidade** – Potência transferido por unidade de área (watt/min)

## Transferência de calor

1. **Fonte** → superfície da peça
2. **Superfície da peça** → zonas vizinhas

1

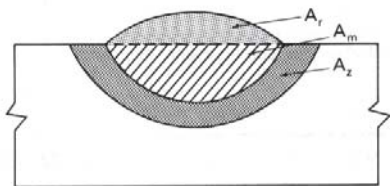
**Transferência de calor ( $E_T$ ):**  $E_T = \frac{P}{v}$   $P$  – Potência da fonte de calor (w)  
 $v$  – velocidade da fonte (mm/s)

**Para um arco eléctrico**  $E_T = \frac{VI}{v}$   $V$  – tensão (v)  
 $I$  – intensidade de corrente (I)

**Eficiência de transferência ( $\eta_1$ )**  $E_{Tef} = \eta_1 \frac{P}{v} = \eta_1 \frac{VI}{v}$  (J/mm)

**Eficiência de fusão ( $\eta_2$ )**  $\eta_2 = \frac{E_T \text{ necessário p/ fundir o material}}{E_{Tef}}$

2



$$A_w = A_m + A_R$$

$A_w \cdot e \rightarrow$  volume de metal que atingiu o estado líquido

$e$  – comprimento da junta

$$Q = \frac{(T_f + 273)^2}{300.000} \text{ (J/mm}^3\text{)}$$

$Q$  – quantidade de calor necessária para fundir a unidade de volume do metal

$T_f$  – temperatura de fusão (°C)

$$\eta_2 = \frac{Q \cdot A_w}{E_{Tef}}$$

$$A_w = \frac{\eta_1 \eta_2 E_T}{Q}$$

## Distribuição de temperaturas

Num ponto a uma distância  $Y$  (mm) da linha de fusão a temperatura máxima ( $T_p$ ) atingida é dada por:

$$\frac{1}{T_p - T_o} = \frac{4,13 \rho c t y}{E_{Tef}} + \frac{1}{T_f - T_o}$$

$T_p$  – temperatura do arco (°C)

$T_o$  – temperatura inicial da peça (°C)

$T_f$  – temperatura fusão do metal a soldar (°C)

$E_{Tef}$  – entrega térmica do processo de soldadura (J/mm)

$\rho$  – densidade do metal (g/dm<sup>3</sup>)

$c$  – calor específico do metal (J/g°C)

$t$  – espessura da peça (mm)

Expressão aplicável a soldaduras de 1 só passe com penetração total (escoamento de calor paralelo à superfície da chapa) – aplicável até 4 passes

**ZTA** – Zona termicamente afectada

**ZAC** – Zona afectada pelo calor

## Taxas de arrefecimento

Espessuras fortes }  
 Espessuras fracas } Espessura relativa (2)

$$\delta = t \sqrt{\frac{\rho \cdot c \cdot (T_c - T_o)}{E_{Tef}}}$$

$\delta \geq 0,9$  espessura forte  
 $\delta \leq 0,6$  espessura fraca  
 $\delta = 0,75$  separação

$$\delta \geq 0,75 \quad R = \frac{2\pi k(T_c - T_o)}{E_{Tef}}$$

$$\delta \leq 0,75 \quad R = 2\pi k\rho c \left( \frac{t}{E_{Tef}} \right)^2 \cdot (T_c - T_o)^3$$

**k** – condutibilidade térmica (J/mms°C)

**R** – velocidade de arrefecimento (°C/c)

**T<sub>c</sub>** – temperatura crítica (°C)

## MÉTODO DOS IMPLANTES

### Solidificação

Espaçamento entre dendrites é proporcional à entrega térmica

	<i>Soldadura A</i>	<i>Soldadura B</i>
$V$ (v)	25	25
$I$ (A)	250	500
$v$ (mm/s)	7	14
$\eta_l$	0,9	0,9
$t$ (mm)	9	9
$T_o$ (°C)	162	162
$E_{Tef}$ (J/mm)	804	804

7

### Elaboração da zona de fusão

Durante a soldadura a composição química da zona de fusão evolui – f (técnicas de soldadura) – 3 fenómenos:

- i) Comportamento físico e químico dos elementos da junta
- ii) Reacção metal líquido e meio
- iii) Reacção metal adição – metal base

8

## i) Volatilização

Que influi significativamente na evolução da composição química

Tensão do vapor sobe  $\Rightarrow$  volatilização sobe  
 Fonte de calor sobe  $\Rightarrow$  volatilização sobe

### Consequências:

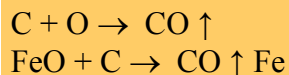
- + Problemas de higiene (fumos)
- + Problemas de carácter metalúrgico devido ao desaparecimento de certos elementos

9

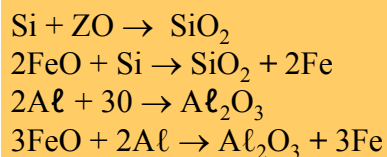
## ii) Reações gás metal - Reações escória-metal

### Exemplos

1. Aparecimento de porosidades por oxidação do carbono e do ferro:



Estas reacções são tratadas com elementos desoxidantes – silício e alumínio



### *Efeito secundário*

- Inclusões não metálicas na ZF
- Sílica, vem à superfície
- Alumina, fica em inclusões
- Resiliência e tenacidade baixam

10

## 2. Introdução de hidrogénio

Olhos de peixe } *Curva de Sieverts*  
 Fissuração }

## 3. Escória

- Absorve produtos de desoxidação do banho
- Remove enxofre e fósforo

11

### *iii) Diluição*

Metal base mais impuro que metal de adição

### *Solidificação da zona de fusão*

- Nucleação e crescimento
  - Crescimento epitaxial
  - Segregação de elementos para a última zona a solidificar
  - Espaçamento entre dendrites
  - Agentes nucleadores
  - Velocidade de arrefecimento
  - Parâmetros de soldadura
  - Factor de forma
- } Tamanho de grão → Estrutura celular  
 → modificação da orientação da estrutura

12

### *Zona afectada pelo calor*

As transformações que ocorrem na área junto à linha de fusão dependem da natureza do material e do processo de soldadura

### *4 tipos de ligas:*

#### *Ligas endurecidas por solução sólida*

Aumento da resistência devido à dissolução no estado sólido de elemento de liga.

São talvez as ligas mais fáceis de soldar porque o efeito do ciclo térmico é pequeno e as propriedades da ZAC não são muito alteradas.

Coalescência de grão na zona vizinha da zona de fusão que não influencia muito as propriedades mecânicas, no entanto se:

Estrutura ccc  $\Rightarrow$  tenacidade desce

Aço inox ferrítico  $\Rightarrow$  tenacidade desce

### *Ligas endurecidas por deformação a frio*

p.ex. – Laminagem a frio – obtenção das propriedades mecânicas à custa da deformação plástica.

Estas ligas recristalizam quando atingem temperaturas perto de  $T_f \Rightarrow$  refinamento de grão  $\Rightarrow$  amaciamento

Junto à zona de fusão – coalescência de grão

Materiais com ponto de transformação apresentam 2 zonas de recristalização na ZAC

1º - Recristalização a T abaixo da fase  $\alpha$

2º - Recristalização a  $723^\circ\text{C} < T < 910^\circ\text{C}$  da ferrite para  $\delta$

## Ligas endurecidas por precipitação

Caso mais complexo porque o ciclo térmico de soldadura produz efeitos diferentes na ZAC consoante a  $T_p$  atingida:

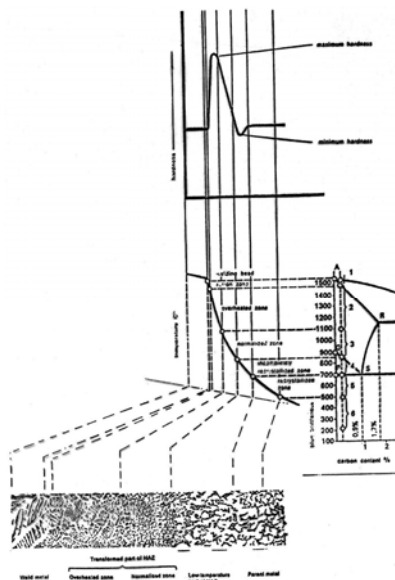
1. Na zona do ZAC onde  $T_p$  foi perto de  $T_f$  há um recozimento e amaciamento da ZAC normalmente acompanhado de grão coalescido mas pode ser endurecida com um t.t. de envelhecimento.
2. A região seguinte sofre um sobre envelhecimento que não pode ser tratado termicamente.
3. As regiões mais afastadas da Z.F. sofrem um ligeiro envelhecimento que não afecta as propriedades de forma significativa

15

## Ligas endurecidas por transformação no estado sólido

Aços com % C sobre ou com elemento de liga suficientes para que por arrefecimento se obtenha estrutura martensítica.

Podem ser aços já com martensite temperada.





**Zona 1** - austenite com coalescência de grão acentuada – tem fortes probabilidades de se transformar em martensite dureza elevada.

**Zona 2** - austenite sem coalescência de grão  $\Rightarrow$  menor temperabilidade.

Zona de dureza moderada caso não seja martensítica após o arrefecimento.

**Zona 3** - austenitização parcial – austenite rica em carbono não homogénea  $\Rightarrow$  transformação de parte da austenite em martensite muito dura e frágil devido ao elevado teor em carbono.

**Zona 4** - metal base não afectado no caso do material estar no estado recozido ou zona sobrerevenida no caso do material estar no estado temperado e revenido.