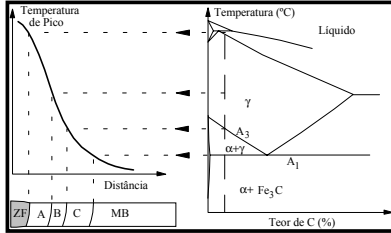


5.6 Características da Zona Termicamente Afetada

Características da ZTA dependem:

- ✓ Tipo de metal base.
- ✓ Processo e procedimento de soldagem.

- ✓ **Ciclo Térmico.**
- ✓ **Repartição Térmica.**



- A – Região de crescimento de grão.
- B – Região de refino de grão.
- C – Região Intercrítica.

ZTA - Região de Crescimento de Grão

- ✓ Região do MB mais próxima à solda.
- ✓ Submetida a temperaturas próximas a $T_{fusão}$.
- ✓ Austenita sofre grande crescimento de grão.
- ✓ Crescimento de grão: depende tipo de aço e da energia de soldagem.
- ✓ ↑ Energia de soldagem ⇒ ↑ Tamanho de grão.

Microestrutura final desta região normalmente grosseira.

- ✓ Depende do teor de C e elementos de liga.
- ✓ Tamanho de grão austenítico.
- ✓ Velocidade de resfriamento.

↑ Qualquer um desses 3 fatores ⇒ ↑ Temperabilidade desta região.

Considerada a região mais problemática da ZTA:

- ✓ Elevada dureza.
- ✓ Baixa tenacidade.
- ✓ Sujeita a trincas.

ZTA - Região de Refino de Grão

- ✓ Região do MB aquecida entre 900 - 1000°C (normalização do aço)
- ✓ Ocorre a recristalização da estrutura.
- ✓ Caracterizada por estrutura fina de ferrita e perlita.
- ✓ Normalmente não é problemática.

Microestrutura final desta região normalmente grosseira.

- ✓ Depende do teor de C e elementos de liga.
- ✓ Tamanho de grão austenítico.
- ✓ Velocidade de resfriamento.

ZTA – Região Intercrítica:

- ✓ Região do MB aquecida entre 727°C e a linha A3.
- ✓ Caracterizada por transformação parcial da estrutura original do MB.
- ✓ Normalmente não é problemática.

Após a Região Intercrítica:

- ✓ Temperatura de pico inferior a 727 °C.
- ✓ Mudanças microestruturais cada vez menos perceptíveis.

Influência do Procedimento de Soldagem

- ✓ Energia de Soldagem
- ✓ Temperatura de Pré-Aquecimento.

Na Prática:

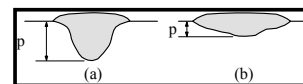
- ✓ Variáveis mais fáceis de serem alteradas para controlar o fluxo de calor em soldagem

Como Controlar a Energia de Soldagem?

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

- ✓ Função dos **parâmetros de Soldagem**.
- ✓ **Parâmetros de Soldagem** ⇒ Controlam a geometria do cordão de solda.
- ✓ Regular a **I**, **V** e **v** para se obter um bom formato de cordão.

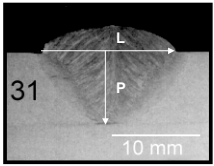
✓ Cordões de solda com mesma ES.



- (a) 800A, 26V e 12mm/s
- (b) 125A, 26V e 1,7mm/s
- ES = 1,8 kJ/mm.

- ✓ Nenhum dos dois recomendável.
- ✓ Sujeito a trincas e outros defeitos.

Cordão de Solda Correto



- ✓ relação profundidade (P) entre 1 e 2 largura (L)
- ✓ Ligeiramente convexa (reforço de solda).
- ✓ Quando tudo isso ocorre, o aporte de calor está correto....

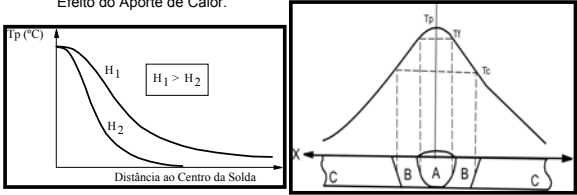
Influência do Procedimento de Soldagem

↑ Energia de Soldagem (Aporte de Calor):

↑ extensão da ZTA, pois a curva de repartição térmica torna-se mais aberta.

Curva de Repartição Térmica original.

Efeito do Aporte de Calor.



Influência do Procedimento de Soldagem

↑ Aporte de Calor:

↑ tempo de permanência ⇒ ↑ extensão da região de crescimento grão da ZTA.

Por outro lado, na soldagem dos aços:

↓ velocidade de resfriamento ⇒ importância fundamental na estrutura final.

↑ velocidade de resfriamento na ZTA (↓ energia de soldagem):

⇒ Suficiente para causar a têmpera da ZTA (formação de martensita).

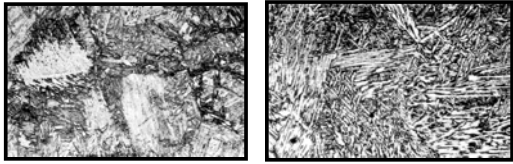
↑ Energia de soldagem ⇒ ↓ velocidade de resfriamento.

⇒ Formação na ZTA de produtos mais macios.

Efeito da ES na microestrutura (200x) da ZTA (Região de Crescimento de Grão) de um aço estrutural de baixo carbono.

(a) ES = 10 kJ/mm, microestrutura: martensita e bainita

(b) ES = 25 kJ/mm, microestrutura: bainita.



Influência do Procedimento de Soldagem

Pré-Aquecimento:

- ✓ Consiste no aquecimento da junta soldada antes da soldagem.
- ✓ Normalmente é localizado na região da junta.

Tem efeito semelhante a energia de soldagem.

↑ Temperatura Pré-Aquecimento ⇒ ↓ velocidade de resfriamento

↑ extensão da ZTA

↓ Tensões de contração da junta.

Pode ser bom, pode ser ruim. Tem que entender.

5.7 Tensões Residuais e Deformação em Soldagem

- ✓ A soldagem, devido ao aquecimento localizado, provoca tensões residuais e deformações na peça.
- ✓ Devem ser levadas em conta no projeto e fabricação das peças.

Analogia da Barra Aquecida

Suponha três barras engastadas entre 2 paredes.
A barra B é aquecida continuamente.
O resfriamento simula o que ocorre na soldagem.

Resfriamento da Barra B

Aquecimento

Início: surgem tensões de compressão. Atinge o LE.

A dilatação térmica é acompanhada de deformação plástica da barra (aumenta de tamanho).

O LE cai com o aumento da temperatura.

σ = TENSÃO
 σ_s = LIMITE DE ESCOAMENTO

Aquecimento

Início: surgem tensões de compressão. Atinge o LE.

A dilatação térmica é acompanhada de deformação plástica da barra (aumenta de tamanho).

O LE cai com o aumento da temperatura.

Analogia da Barra Aquecida

Resfriamento da Barra B

Resfriamento

Início: as tensões se alteram para o regime de tração

A contração térmica é acompanhada de deformação plástica da barra (diminui de tamanho).

A tensão de tração aumenta com a queda da temperatura.

σ = TENSÃO
 σ_s = LIMITE DE ESCOAMENTO

Resfriamento

Início: as tensões se alteram para o regime de tração

A contração térmica é acompanhada de deformação plástica da barra (diminui de tamanho).

A tensão de tração aumenta com a queda da temperatura.

No final, A barra B está submetida a tensão de tração da ordem do LE.

Estado de Tensões Residuais na Peça Soldada:

Repartição Térmica.

Região aquecida acima de θ_1 sofre deformação plástica, como a barra B

Sob tração no metal de solda e ZTA

compressão em parte do metal base.

Tensões Residuais.

Longitudinal à solda.

Transversal à solda.

Região aquecida acima de θ_1 sofre deformação plástica, como a barra B

Sob tração no metal de solda e ZTA

compressão em parte do metal base.

Tensões Residuais causam Deformações Permanentes à Peça:

A soldagem produz empenamento e distorção na peça.

Processo natural de "aliviar as tensões" com a distorção.

Deve ser evitada, ou controlada, pois altera a geometria da peça.

Peça antes de soldar.

Peça após soldagem.

Algumas soluções para evitar Distorção da Peça:

- ✓ Distribuir a solda por ambos os lados da peça.
Usar chanfros simétricos (tipo X, Y ou K).
Anula o efeito do calor.
- ✓ Usar baixa repartição térmica (baixa energia de soldagem).
Reduz as deformações térmicas na peça (distorção).
- ✓ Usar baixa repartição térmica (baixa energia de soldagem).
Menor plastificação, menor distorção.

Algumas soluções para evitar Distorção da Peça:

- ✓ Posicionar soldas junto da linha neutra da peça ou em posições simétricas em relação à linha neutra.
- ✓ Utilizar dispositivos de fixação e técnicas para minimizar a distorção (ponteamto antes da soldagem, gabaritos, etc)
Eliminam o empenamento mas não reduzem as tensões residuais.

Após a soldagem (correção da distorção)

- ✓ Remoção a quente: aquecimento localizado.

Peça antes de soldar.

Peça após soldagem.

Aquecimento com maçarico nesta superfície, seguido de resfriamento rápido.

Resultado final.

Tratamento Térmico de Alívio de Tensões (TTAT):

Eliminar ou reduzir as tensões residuais na peça após soldagem.

O LE do material é reduzido a valores inferiores às tensões residuais.

A eliminação das tensões residuais podem causar deformações plásticas localizadas (empenamentos).

Não recomendado para chapas finas.

Tratamento Térmico de Alívio de Tensões (TTAT):

Aquecimento lento da peça até temperatura apropriada (580 - 650°C para os aços).

Abaixo da Temperatura crítica. Evitar mudanças microestruturais.

Permanência nesta temperatura por um tempo determinado (função da espessura da chapa)

Função da espessura da chapa. 1h para cada 25mm espessura.

Resfriamento lento e uniforme para impedir a introdução de novas tensões.

Não superior a 150 °C/h.

Tratamento Térmico de Alívio de Tensões (TTAT):

TTAT não altera a microestrutura original da solda e do metal base.

TTAT pode causar alterações nas propriedades da solda e do metal base.

- ✓ Redução do LE do metal de solda.
- ✓ Precipitação de carbeto, nitreto, etc.
- ✓ Queda na tenacidade.