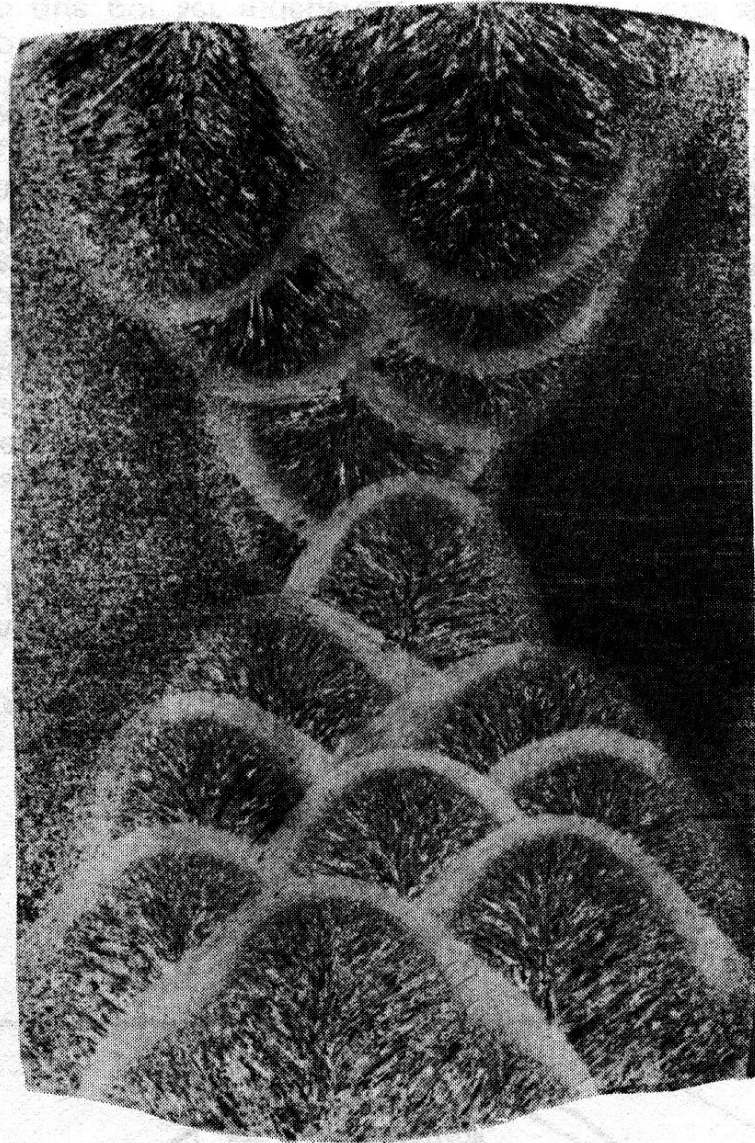


Introdução à Metalurgia da Soldagem



Ramón S. C. Paredes, Dr. Eng^o.

Conteúdos abordados

- **Importância do estudo da Metalurgia da Soldagem .**
- **Fundamentos da transferência de calor aplicados à soldagem.**
- **Fundamentos da formação e solidificação da Zona Fundida.**
- **Fundamentos da formação da Zona Termicamente Afetada.**

✓ **Ementa:** Importância do estudo da metalurgia da soldagem; Fundamentos de transferência de calor; Fundamento da formação da Zona Termicamente Afetada; Fundamentos da formação da Zona Fundida.

✓ **Referências:**

KOU, Sindo. Welding Metallurgy; WAINER, Emilio. Soldagem: Processos e Metalurgia;

MACHADO, Ivan. Soldagem e Técnicas Conexas: Processos.....;

AWS. Welding Handbook: Welding Science and Technology

Revista Soldagem & Inspeção; Revista Welding Journal.

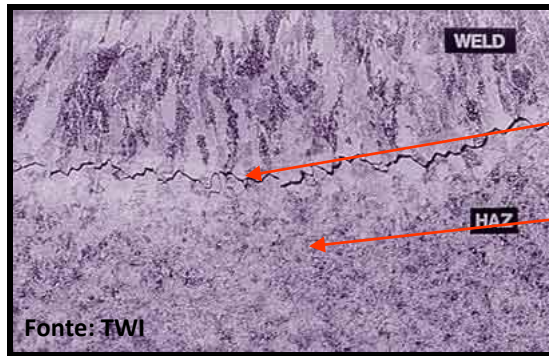
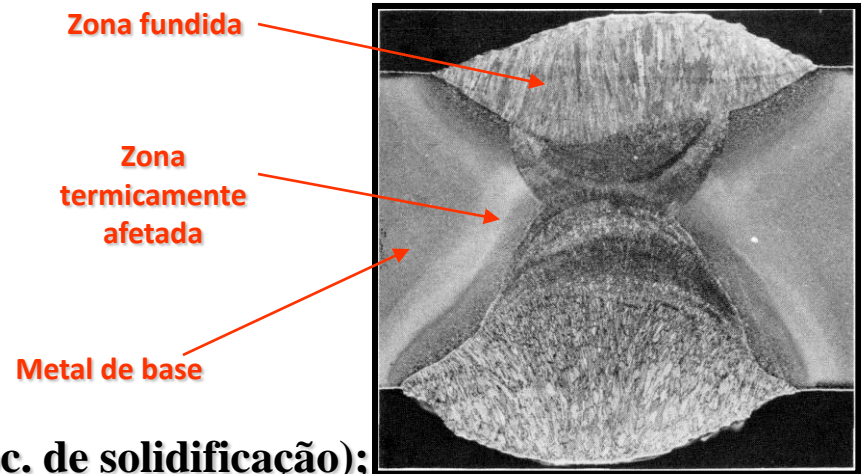
Fundamentos de transferência de calor aplicados à soldagem

- Na soldagem por fusão o movimento físico da fonte de calor provoca as seguintes alterações:

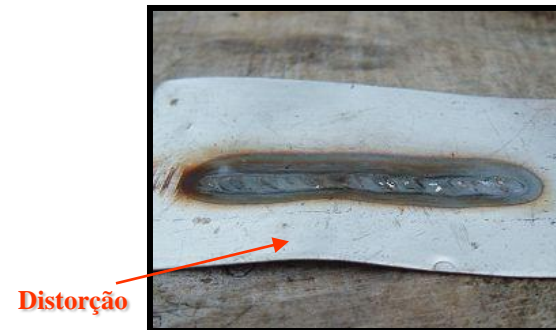
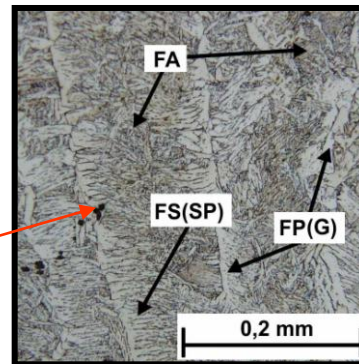
- a) Mudança física de estado ($S \rightarrow L \rightarrow S$);
- b) Transformações metalúrgicas;
- c) Gradiente térmico (tensões residuais);
- d) Movimentação e agitação metálica.

Como consequência, a soldagem apresentará:

- a) Descontinuidades físicas (severidade na veloc. de solidificação);
- b) Indesejadas fases (inapropriado resfriamento);
- c) Concentração de tensão e distorções (esforço acima da região elástica).

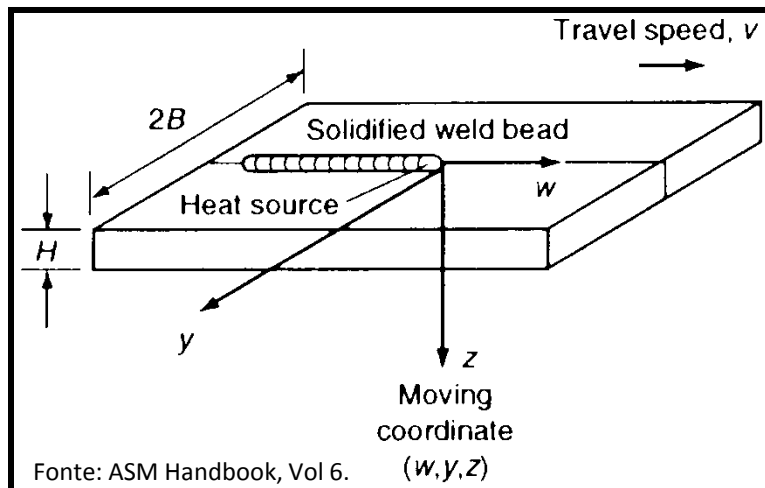
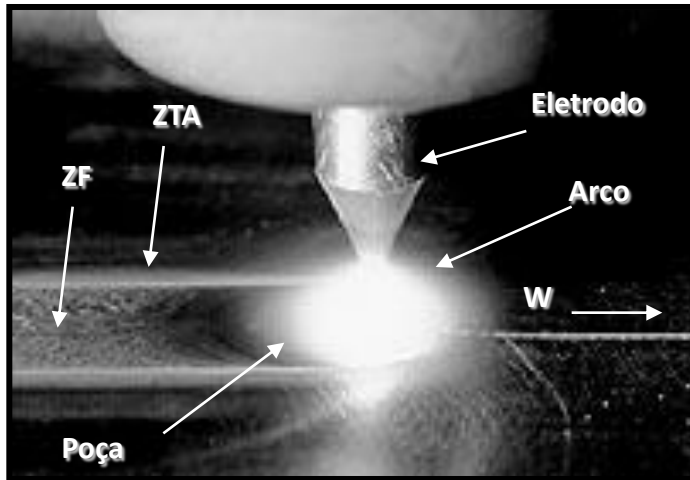


Trinca na ZTA (região grãos grosseiros)
Zona termicamente afetada
Inclusão, ferrita de contorno de grão, outras (Fonte: Barra, 2003).



O processo físico atuante na soldagem a arco

- Modelo físico proposto:



Fonte: ASM Handbook, Vol 6.

Considerações

- Fonte de calor (arco) com movimento constante ao longo de uma trajetória linear;
- Existência de gradiente térmico (aquecimento antes de atingir o a condição de regime – quase-estacionário);
- Distribuição de temperatura estacionária na região de regime;
- O centro da fonte de calor é considerado como ponto de origem.

Observações

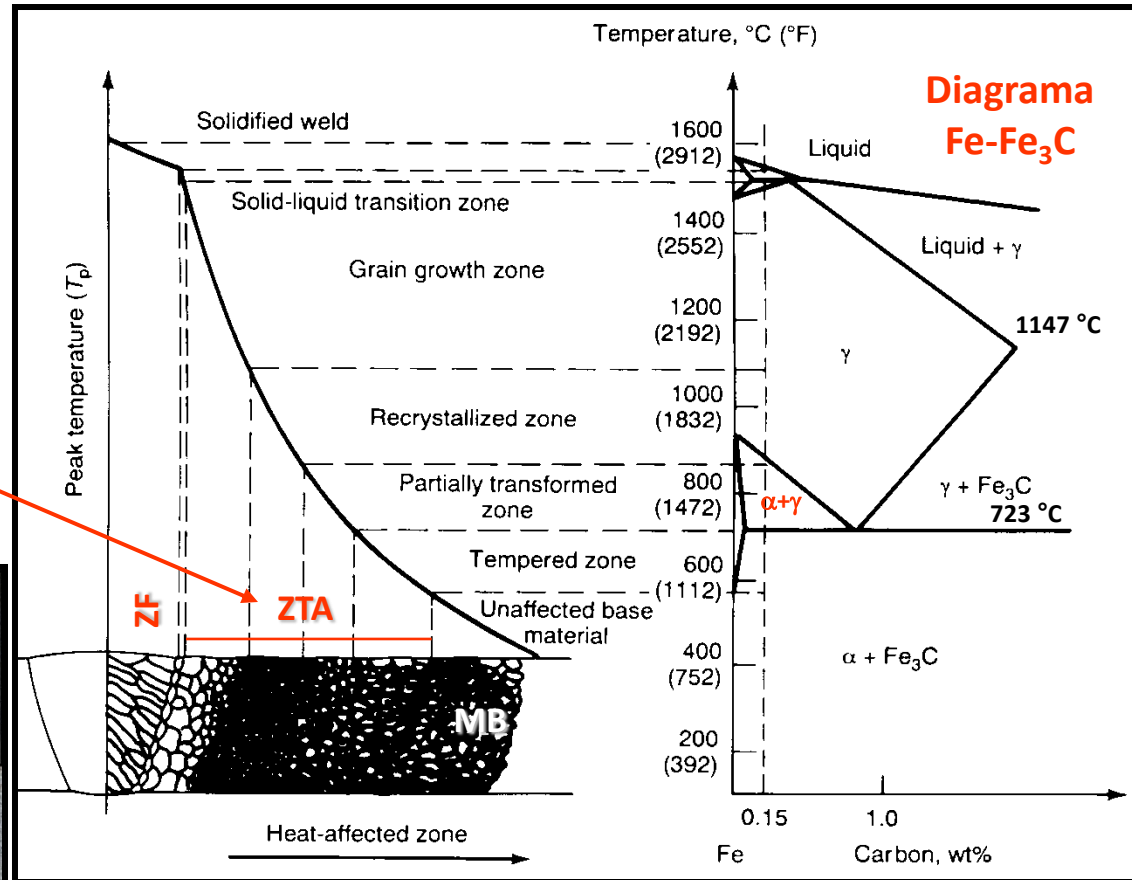
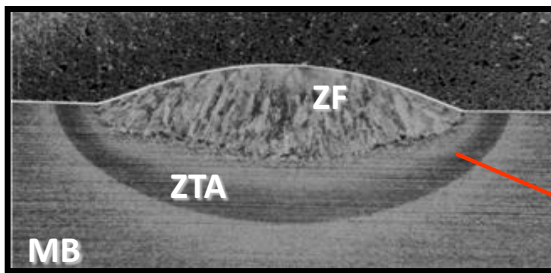
- O arco provoca fusão localizada;
- Existência de perda de calor por convecção, radiação e condução (impacto sobre o valor do rendimento térmico “ η ”);
- Formação de três regiões metalúrgicas distintas (ZF, ZTA e MB).

O processo físico atuante na soldagem a arco

As características apresentadas pela zona termicamente afetada (ZTA) dependerá das seguintes condições:

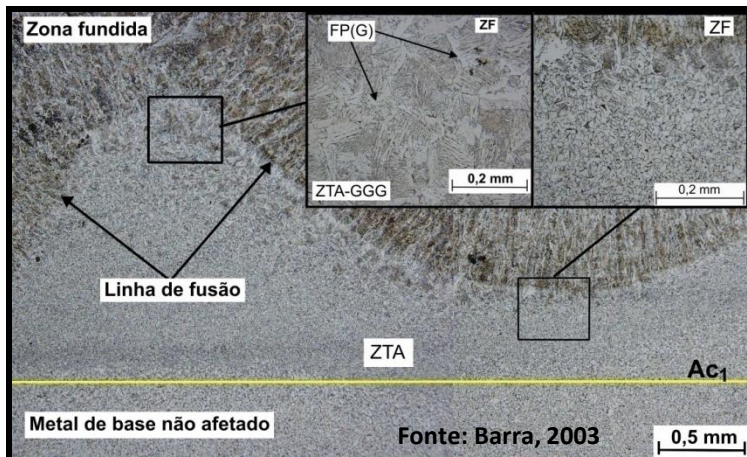
- a) Temperatura de pico;
- b) Taxa de resfriamento.

Exemplo: (a) ZTA decorrente de CC em simples deposição



Fonte: Easterling, 1992.

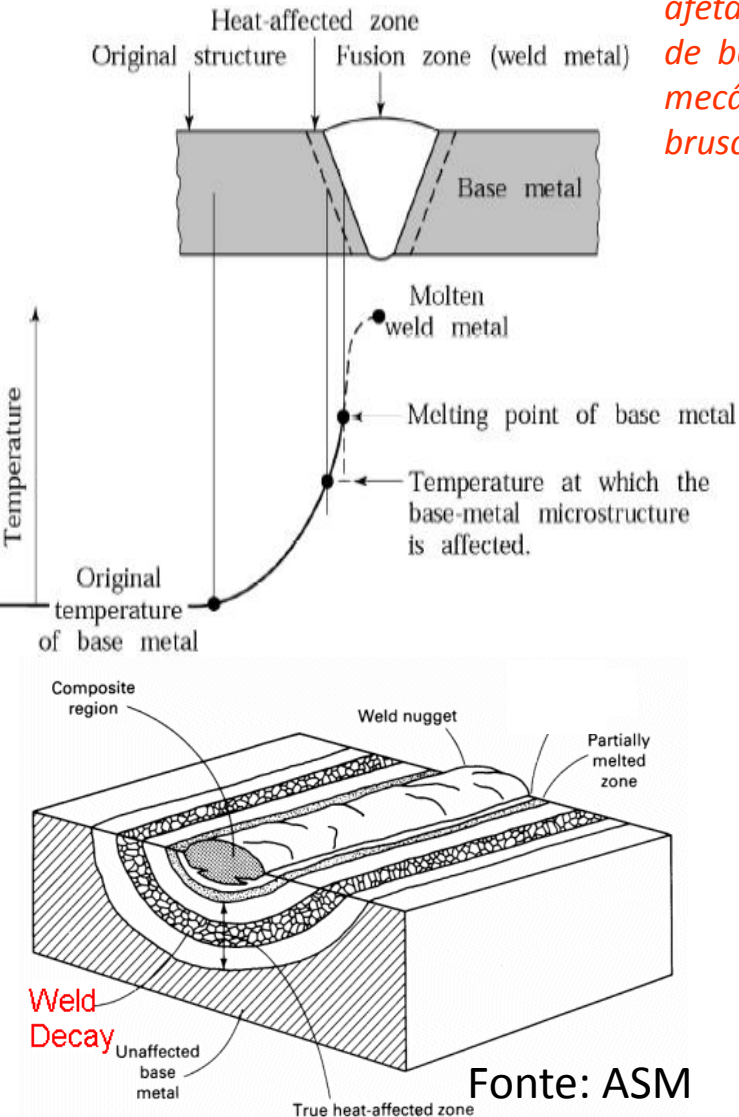
(b) ZTA decorrente de dupla pulsação de corrente



Fonte: Barra, 2003

Considerações iniciais sobre a formação da ZTA

Conceito: A zona termicamente afetada (ZTA), também denominada de zona afetada pelo calor (ZAC) é a região, compreendida entre a zona fundida e o metal de base não afetado termicamente, que sofreu modificação das propriedades mecânicas e/ou metalúrgicas, devido a imposição do aquecimento (mudança brusca de temperatura) decorrente da operação de soldagem e/ou corte.



As características da Zona Termicamente Afetada (ZTA) dependerá:

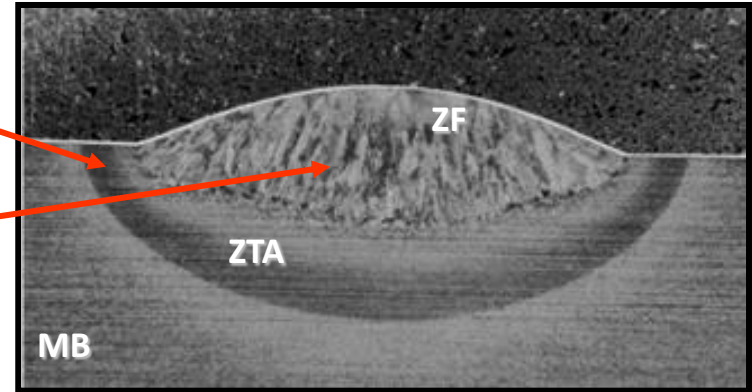
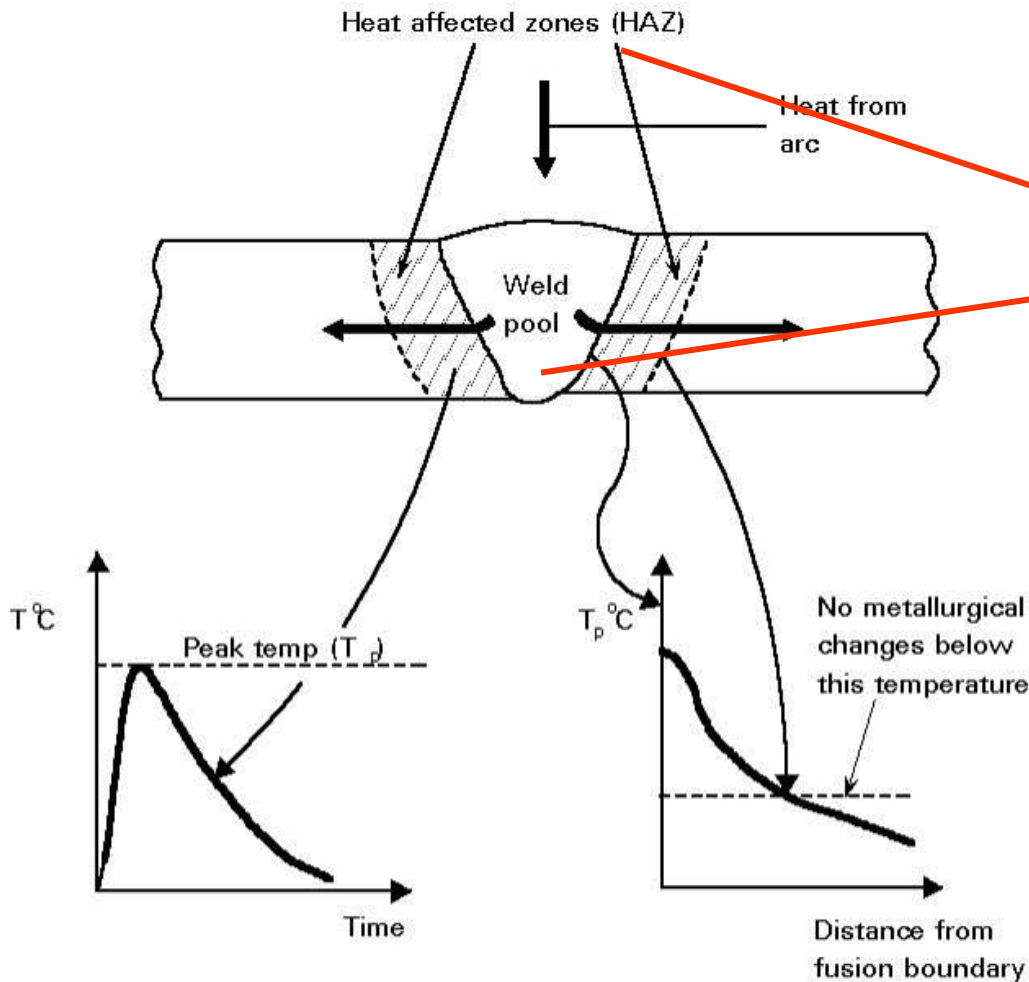
- Taxa de aquecimento (calor aportado);
- Taxa de resfriamento $\times \Delta t_{8/5}$;
- Tamanho e orientação inicial do grão metal de base/ZF;
- Grau de deformação mecânica;
- Composição química do metal de base;
- Tipo de da junta, espessura.

Conseqüências da formação da ZTA:

- Mudança no valor da dureza;
- Mudança no tamanho do grão;
- Mudança de fases (formação de fases metaestáveis – por exemplo, martensita);
- Mudança no valor da resistência mecânica;
- Perda de resistência à corrosão (por exemplo, sensitização).

Fonte: ASM
International

Efeito da ciclo térmico e da partição térmica sobre a ZTA

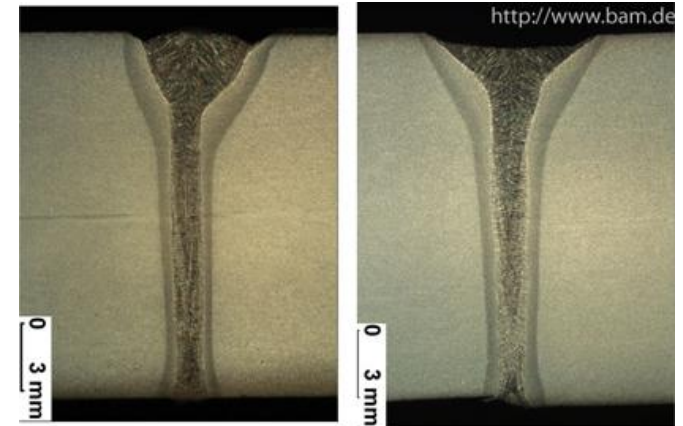
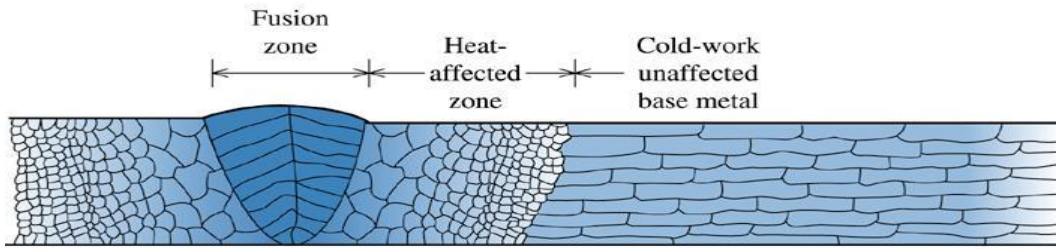


- Partição térmica influenciando na largura da ZTA;
- Ciclo térmico influenciando na transformação no interior da ZTA (fases, intermetálicos, outros).

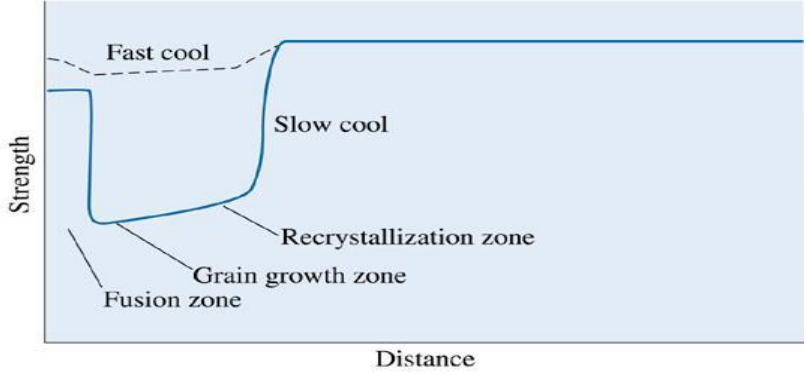
Typical heating and cooling curve in HAZ

Variation of T across HAZ

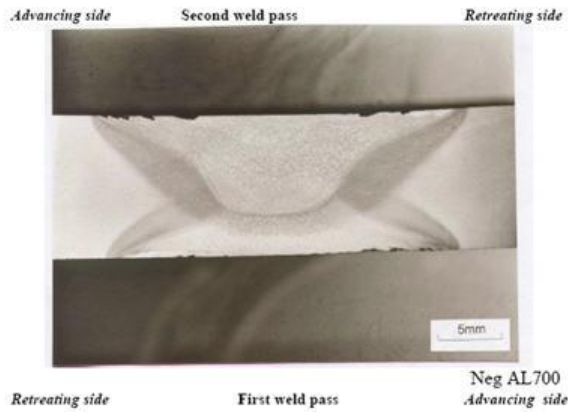
Formação da ZTA em função da partição térmica e do ciclo térmico. Fonte: ESDEP WG 3



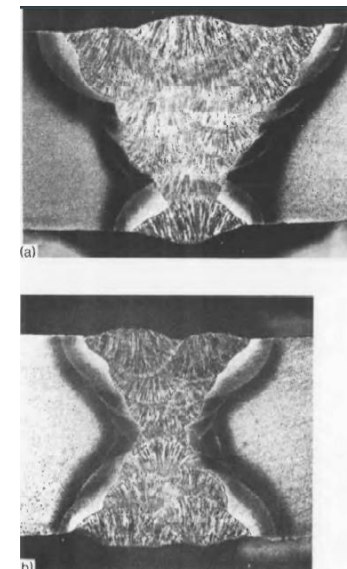
Estrutura da ZTA para um material conformado a frio.



ZTA na seção transversal de depósitos realizados com o processo híbrido (Laser/GMAW). A esquerda, posição plana e, a direita, vertical descendente.



ZTA produzida durante o processo FSW (Friction Stir Welding). Material: aço carbono.

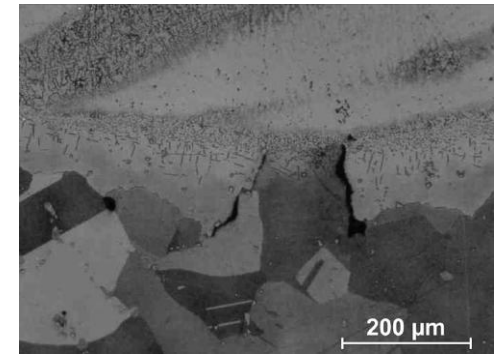
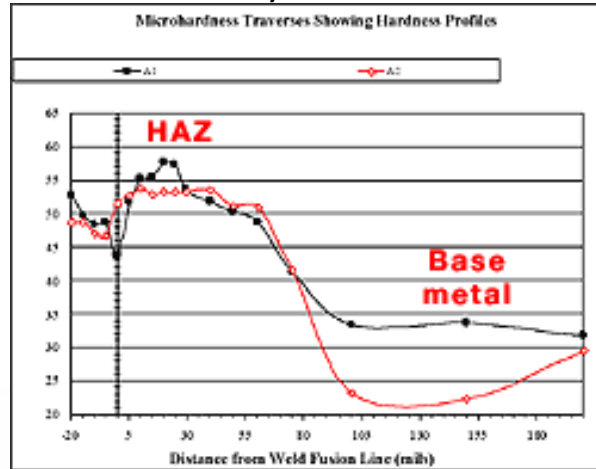


ZTA na soldagem multipasse. Em (a) soldagem simples V e (b) soldagem duplo V.

Exemplos de Zonas Termicamente Afetadas

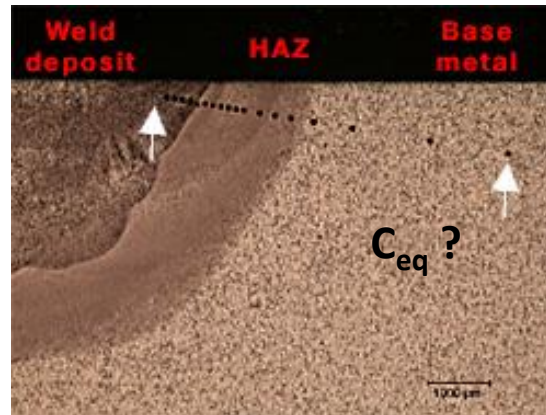
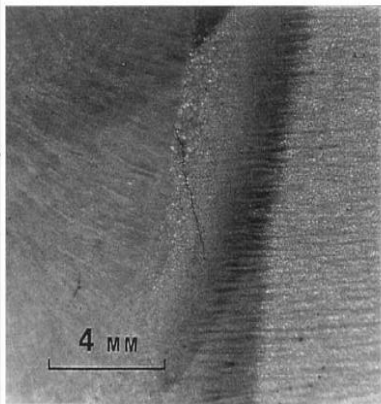
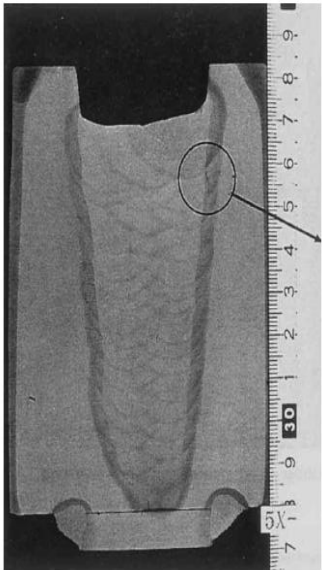


Perfil de dureza no aço 4140 indicando fragilização na ZTA (acima de 50 HRC).

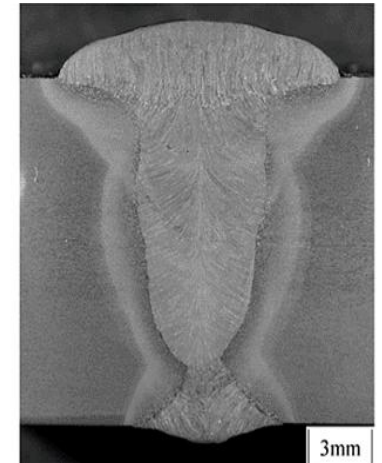


ZTA decorrente da soldagem de materiais dissimilares

ZTA apresentando trinca ao longo do contorno de grão decorrente da presença de γ' (aquecimento e resfriamento próximo a 700 °C) – liga de níquel .



Qual a informação repassada pelo carbono equivalente (C_{eq}) que ajudará a definir suscetibilidade a fragilização da ZTA (perfil de dureza)?



ZTA decorrente da soldagem de um tubo X100 com 15 mm de espessura de parede.

ZTA decorrente da soldagem multipasse. A direita, presença de trinca na região de grão grosseiro.

Formação da ZTA

Fatores importantes na formação da ZTA (ciclo térmico imposto)

a) Temperatura de recristalização

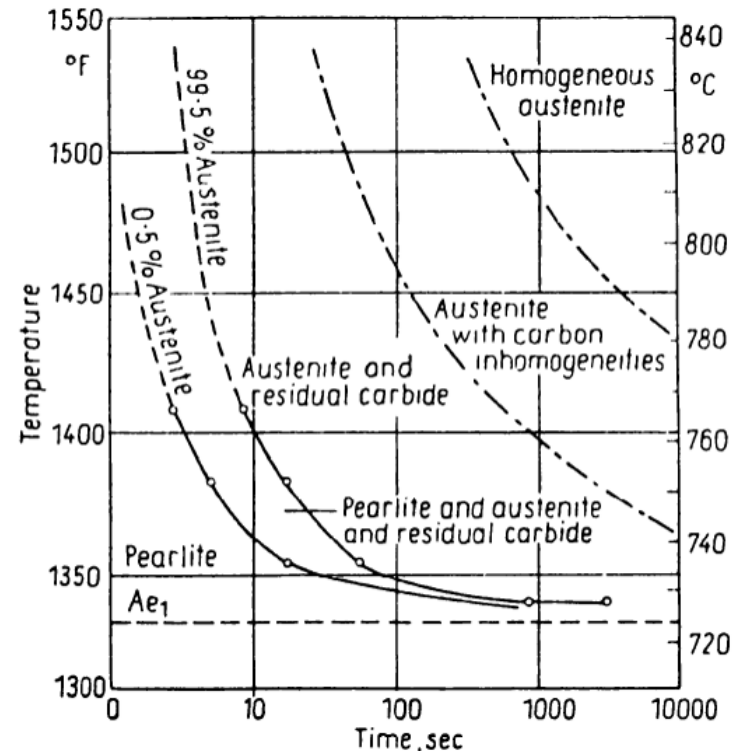
Variáveis influentes – temperatura atuante, pureza do material e grau de deformação

b) Grau de superaquecimento na transformação $\alpha \rightarrow \gamma$ (em soldagem ocorre aquecimento na ordem de 200 a 300 °C/s);

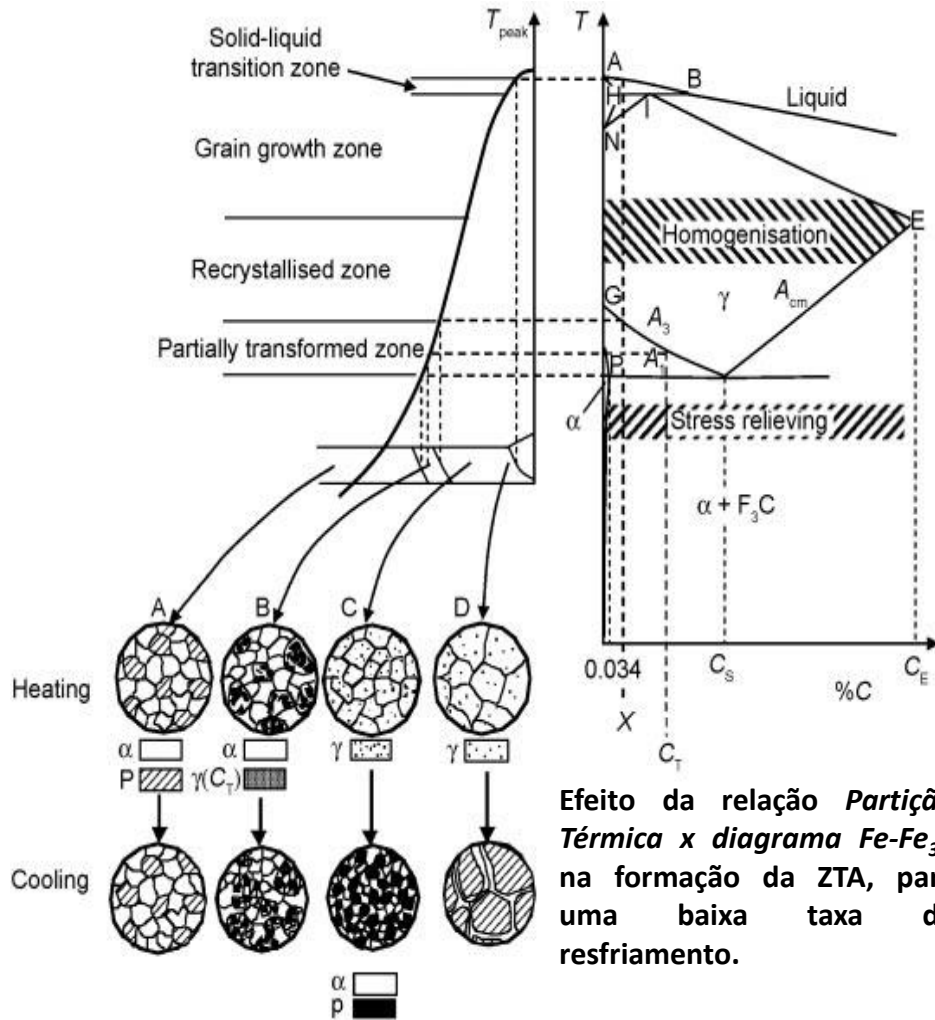
c) Temperatura de formação e taxa de crescimento de carbeto (M_aC_b) e nitreto (M_aN_b);

d) Proporção de grãos grosseiros.

Dependência da austenitização em função do tempo e da temperatura. Para elevada taxa de aquecimento (menor tempo), observa-se elevado aquecimento da ferrita antes da transformação.



Formação da ZTA (diagrama de fase x CCT)



Efeito da relação *Partição Térmica x diagrama Fe-Fe₃C* na formação da ZTA, para uma baixa taxa de resfriamento.

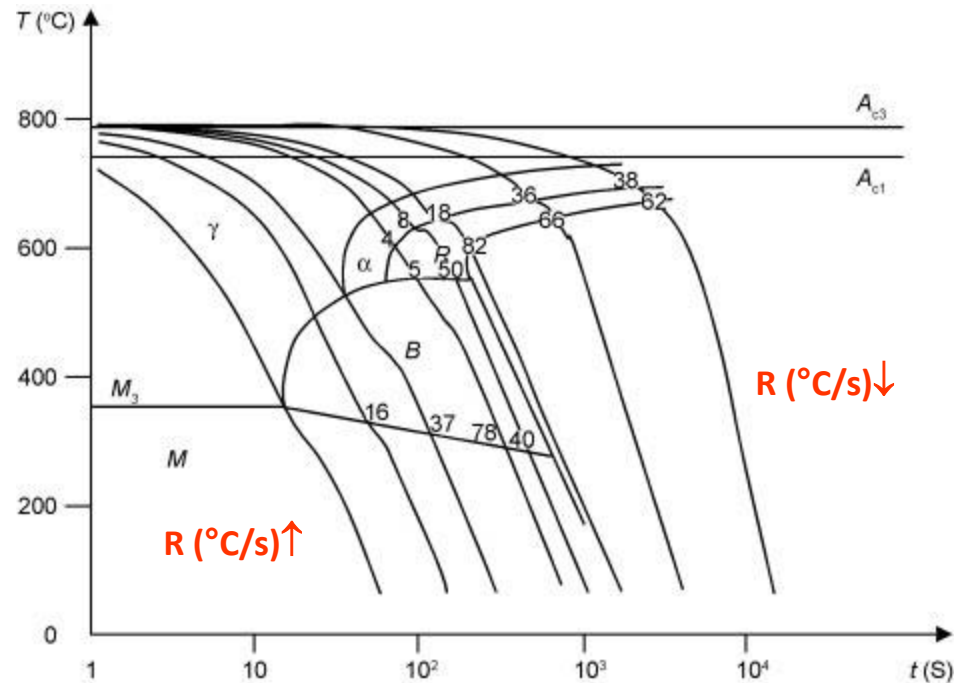
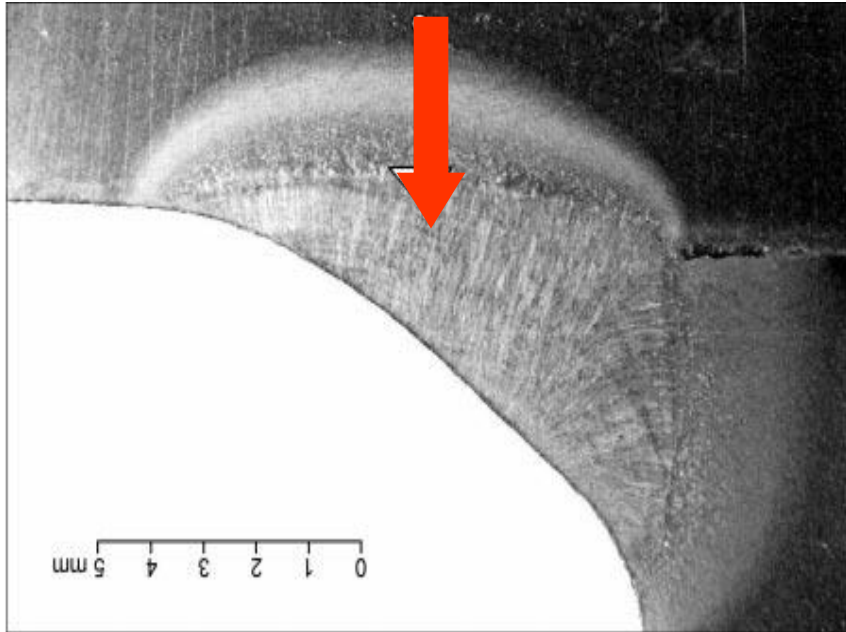


Diagrama de resfriamento contínuo (CCT) para o aço contendo 0.44% C, 0.22% Si, 0.80% Mn, 1.04% Cr, 0.17% Cu e 0.26% Ni. Fonte: Lindgren, 2007.

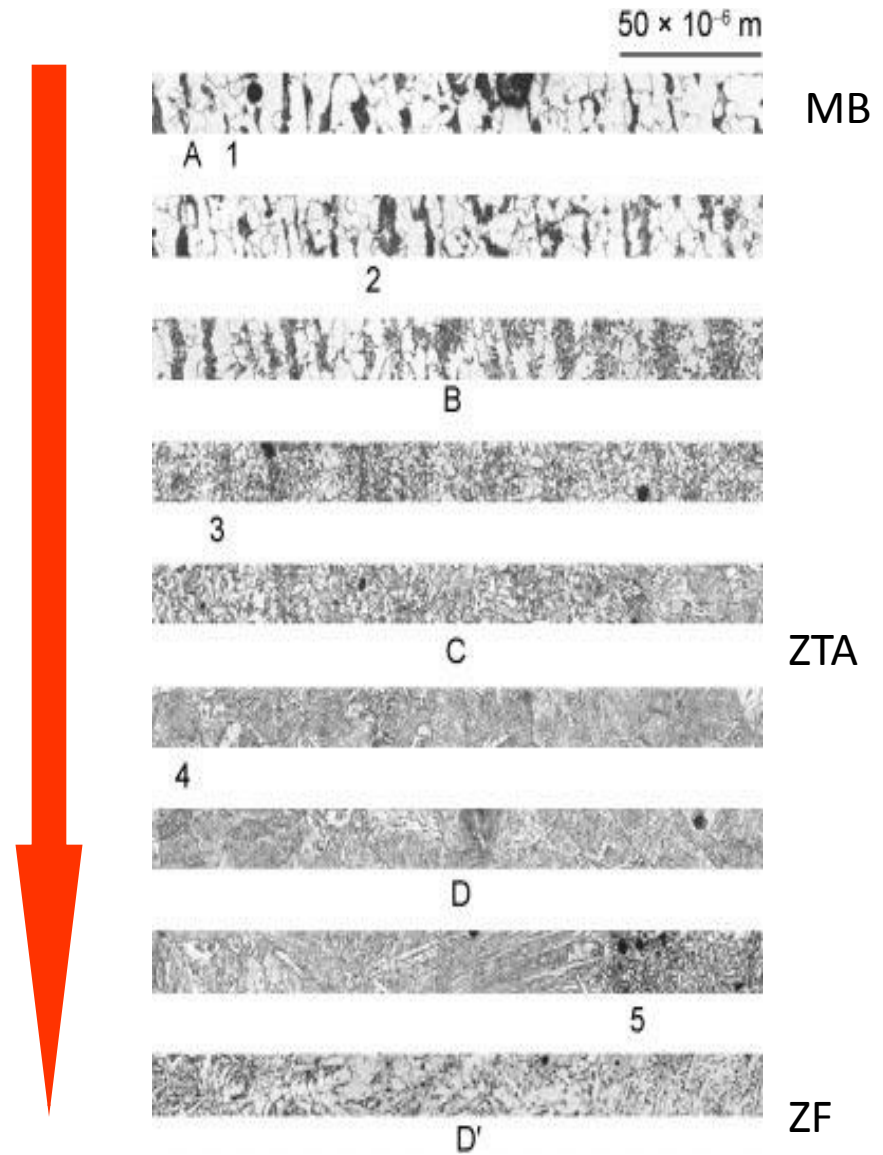
Observação: Ligas complexas e de alta resistência mecânica tendem a elevar a suscetibilidade à formação de trinca na ZF e na ZTA, até mesmo em chapas finas, como, por exemplo, nas ligas de níquel resistentes ao calor.

Pergunta: Quais os fatores (parâmetros/procedimentos) relacionado a operação de soldagem que influenciam a taxa de resfriamento?

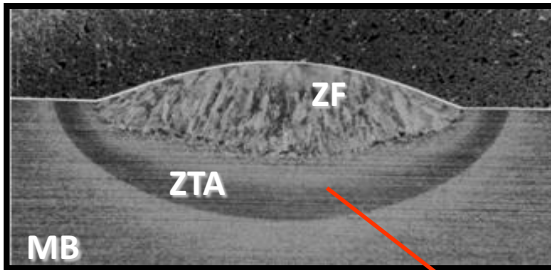
Microestrutura da ZTA



Aspecto macrográfico de uma junta em "T" com as respectivas microestruturas na região da Zona Termicamente Afetada. Fonte: Lindgren, 2007.

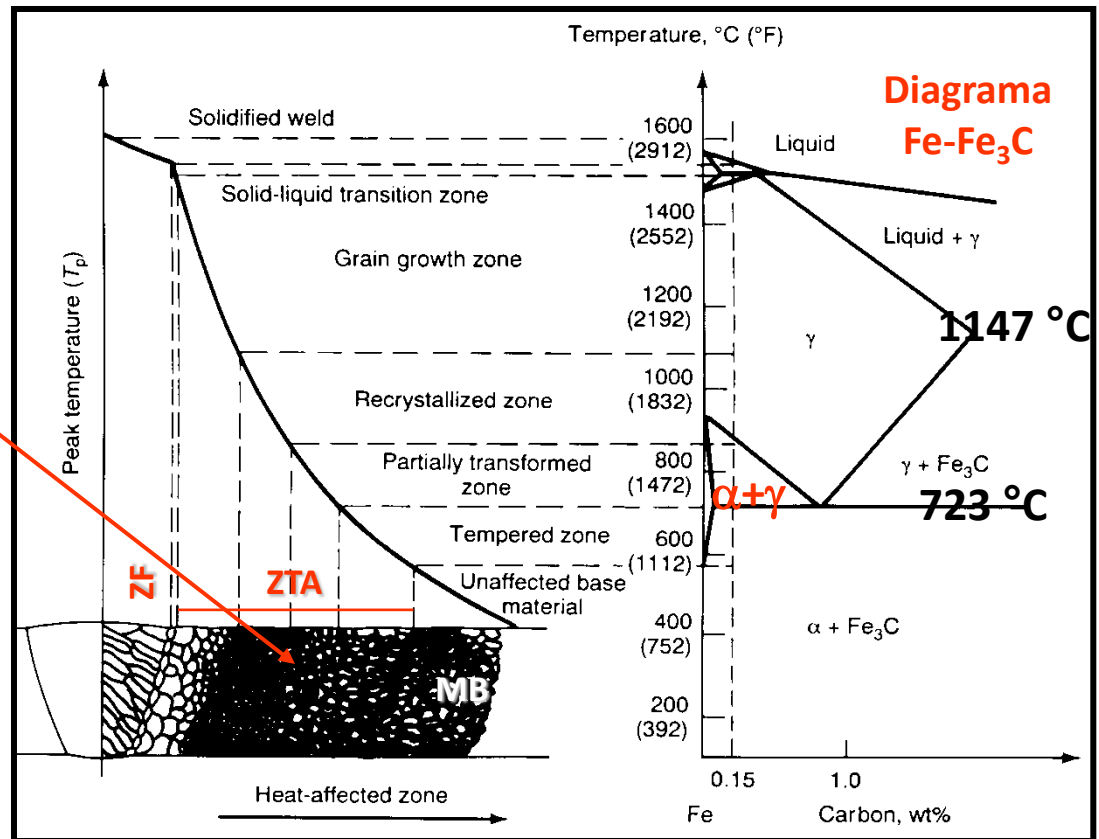


Regiões que compõem a ZTA de um aço carbono

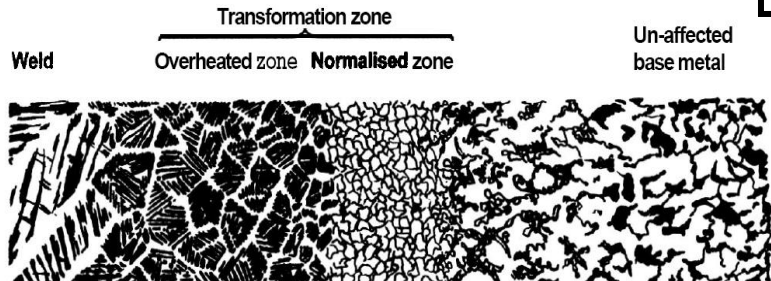


Sub-zonas:

- a) Zona de grãos grosseiros (ZGG);
- b) Zona de recristalização (ZR);
- c) Zona parcialmente transformada (ZPT);
- d) Zona temperada (ZT).

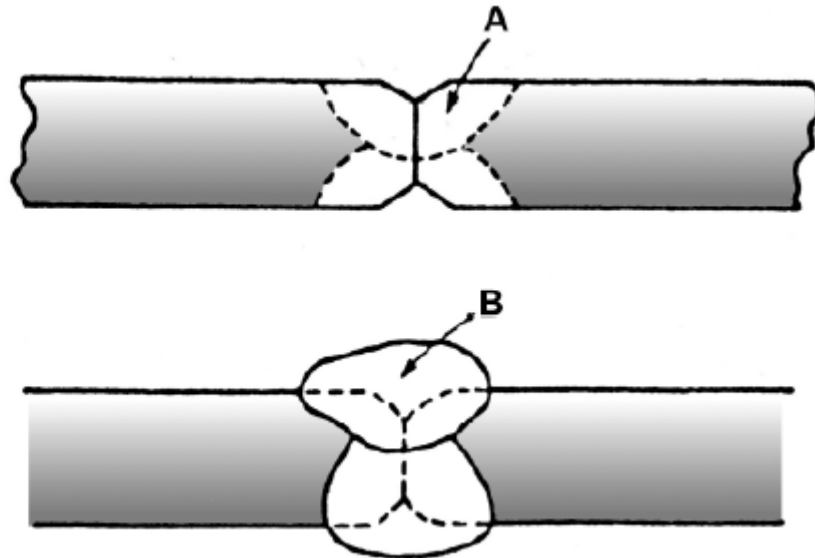


Fonte: Easterling, 1992.



$$\text{Aporte Térmico} = \frac{0,06 V A}{v \text{ (mm/min)}} \text{ (kJ/mm)}$$

$$\% \text{ DILUIÇÃO} = \frac{\text{ÁREA A}}{\text{ÁREA B}}$$



CARBONO EQUIVALENTE – C_{eq} PREAQUECIMENTO

$$C_{eq} = \%C + \frac{\%Mn}{6} + \frac{\%Cr + \%Mo + \%V}{5} + \frac{\%Ni + \%Cu}{15}$$

Carbono equivalente (%)	Pré-aquecimento recomendado (°C)
até 0,30	opcional
0,30 – 0,45	100 – 200
acima de 0,45	200 – 375

Pré-Aquecimento

- Alguns aços, particularmente aqueles possuindo carbono equivalente maior que 0,45%, podem requerer, além de pré-aquecimento, pós-aquecimento.
- Esses tratamentos são especialmente recomendados para a soldagem de seções espessas. Entretanto, para a maioria dos aços carbono e de baixa liga, apenas o pré-aquecimento é necessário de um modo geral.
- O pré-aquecimento a 120 - 150°C é geralmente empregado na soldagem multipasse em seções de espessura maior que 25 mm para reduzir a susceptibilidade da solda à fissuração.

Pós-Aquecimento

- Aquecimento da junta soldada **imediatamente** após a solda ter sido realizada
 - diferente de outros tratamentos executados após o resfriamento da solda, tais como alívio de tensões, revenimento e recozimento.
- Tem a mesma função do pré-aquecimento:
 - mantém a temperatura da peça em um nível suficientemente elevado de tal maneira que a junta soldada esfrie lentamente
 - assim como no pré-aquecimento, o resultado é uma ductilidade maior na região da solda
 - raramente é aplicado de forma isolada; é quase sempre conjugado com o pré-aquecimento
- É mais freqüentemente empregado em aços altamente temperáveis, mas algumas vezes é utilizado em aços menos temperáveis se for difícil a aplicação de um pré-aquecimento adequado devido à dimensão das peças sendo soldadas.

ALÍVIO DE TENSÕES

- Reduz as tensões na solda e regiões adjacentes resultantes do resfriamento e da contração do metal de solda
 - aumenta sobremaneira a ductilidade
 - reduz ligeiramente a resistência mecânica

Temperatura (°C)	Tempo (h/25mm)
595	1
565	2
535	3
510	5
480	10
Resfriamento em ar calmo até 300°C	

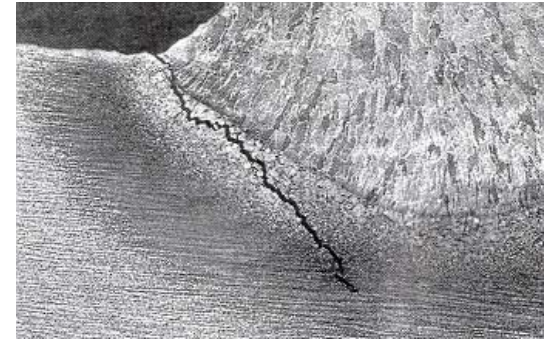
Fragilização da ZTA x Carbono Equivalente - C_{eq}

Os principais fatores que influenciam no surgimento de trinca na ZTA são:

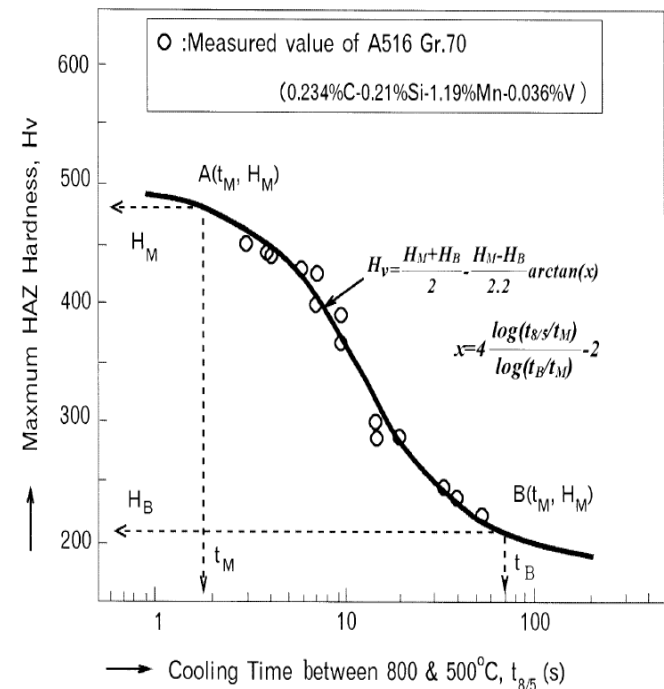
- hidrogênio no metal de adição;
- composição química do metal de base;
- espessura do metal de base / geometria da junta;
- tensão residual e/ou;
- presença de concentrador de tensão (entalhe, inclusão, outros).

Em aço ferrítico, ocorre a completa austenitização de determinada região da ZTA durante a soldagem (Zona de Grãos Grosseiros). No resfriamento ($\Delta t_{8/5} \times R - ^\circ\text{C/s}$), a região austenitizada pode transformar-se em ferrita (diferentes tipos), perlita, bainita, martensita ou mistura destas (Yurioka, 2001).

**Efeito do $\Delta t_{8/5}$ sobre a dureza máxima na ZTA.
Fonte: Yurioka, 2001.**



Trinca na ZTA induzida por hidrogênio – região de grãos



Fragilização da ZTA x Carbono Equivalente - C_{eq}

Determinadas condições “regulamentadas” definem o nível máximo de dureza presente na ZTA para reduzir o risco de trinca induzida por hidrogênio. No entanto, nem sempre é possível atingir o nível desejável pela simples combinação de pré-aquecimento e condições de soldagem (heat input) e, portanto, usa-se pós-aquecimento como ferramenta adicional.

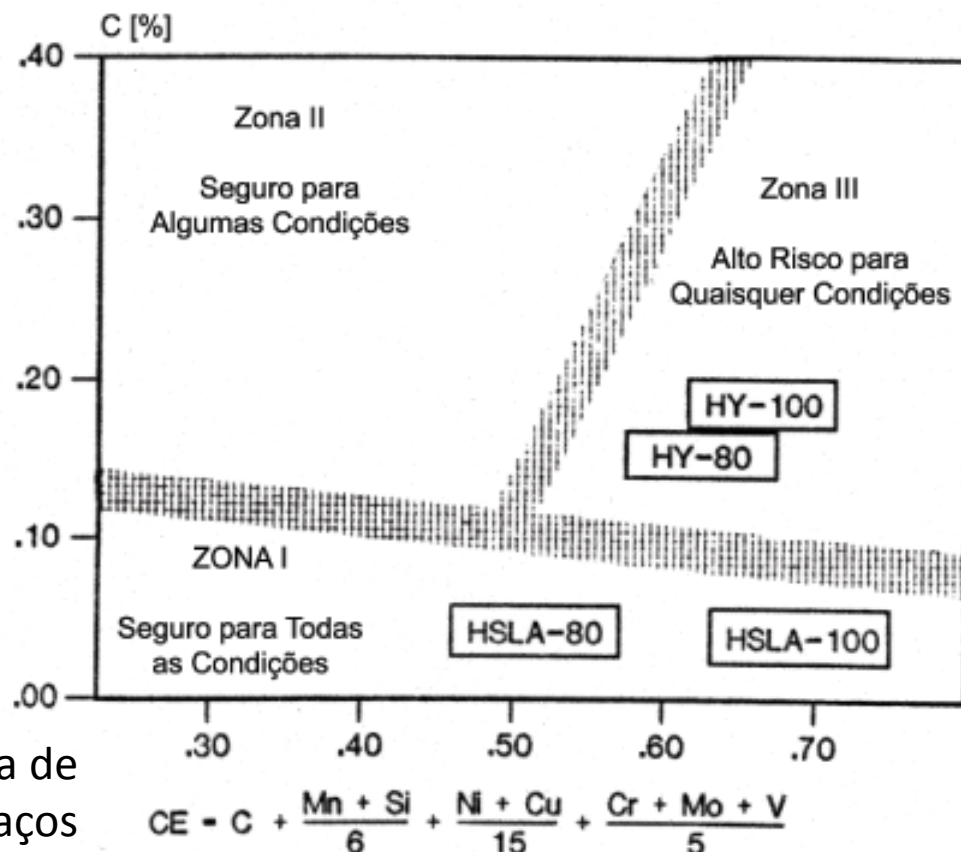
A dureza e a resistência mecânica na ZTA são informações de importância prática, uma vez que estas influenciam, ao mesmo tempo, a tenacidade e a resistência à trinca.

Limite de dureza recomendado para evitar a formação de trinca induzida por hidrogênio:

350 HV (\approx 36 HC)

Fontes: API 1104, Apendice B; Código Canadense CSA Z662 e Padrão Australiano AS 2885.2

Susceptibilidade à ocorrência de trinca na ZTA para diferentes aços
(Fonte: Wilson, 1988)



Carbono Equivalente - C_{eq}

- Para os aços com teor considerável de carbono, o nível de resistência (indiretamente a dureza) é controlado pela presença de martensita. No entanto, essa relação é geralmente complicada para gerar predições (predição semi-empírica).

- O pico de resistência (dureza) da ZTA é controlado por duas variáveis, ou seja, **composição química** e **taxa de resfriamento**.
- O efeito da composição química é representado pelo uso do empírico “carbono equivalente”, que classifica a influência, sobre a dureza, de diferentes elementos químicos presentes na liga.

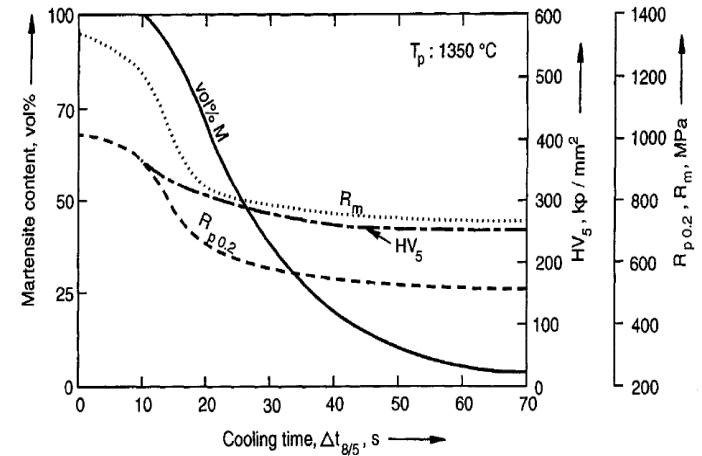


Fig. 7.19. Structure–property relationships in the grain coarsened HAZ of low-carbon microalloyed steel (vol% M: martensite content, $R_{p0.2}$: 0.2% proof stress, R_m : ultimate tensile strength, HV₅: Vickers hardness, $\Delta t_{8/5}$: cooling time from 800 to 500°C). Data from Akselsen *et al.*²⁶

Exemplos de C_{eq} propostos - (% em peso):

$$C_{eq} = \%C + \%Si/30 + (\%Mn + \%Cu + \%Cr)/20 + \%Ni/60 + \%Mo/15 + \%V/10 + \%5B$$

$$CE_{II} = \%C + \frac{\%Si}{24} + \frac{\%Mn}{5} + \frac{\%Cu}{10} + \frac{\%Ni}{18} + \frac{\%Cr}{5} + \frac{\%Mo}{2.5} + \frac{\%V}{5} + \frac{\%Nb}{3}$$

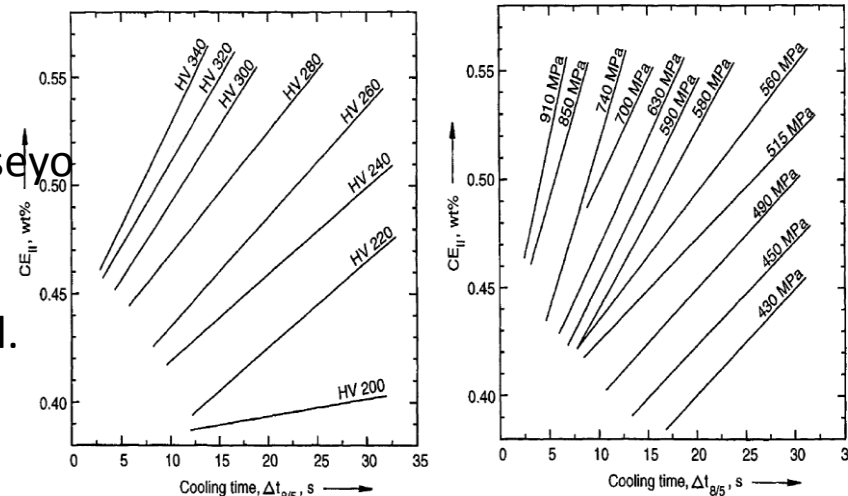
$$CE_{IIW} = \%C + \%Mn/6 + (\%Cr + \%Mo + \%V)/5 + (\%Ni + \%Cu)/15$$

$$C_{eq-ferro fundido} = C + (Si + P)/3$$

Ito and Besseyo

Yurioka et al.

IIW



Diagramas de iso-propriedades da ZTA para HSLA (high-strength low-alloy) steels.

Fonte: Grong, 1994.

Observação: Os valores dos demais elementos químicos referem-se a um efeito na dureza equivalente a 1% de C na liga.

Carbono Equivalente - C_{eq}

Quanto maior o valor do C_{eq} maior será possibilidade do surgimento de trinca (maior valor de dureza). Na prática, $C_{eq} < 0,4$ (0,3 para elevada restrição) indica que o aço é pouco susceptível ao surgimento de trinca induzida por hidrogênio na ZTA (“tem boa soldabilidade!”).

Thickness, t, inches	IIW Carbon Equivalent, %				
	<0.35	0.35-0.45	0.45-0.55	0.55-0.65	>0.65
Non-Low Hydrogen Processes					
$t \leq 1/2$ ambient	ambient	ambient	ambient-200°F	200-350°F	350-450°F
$1/2 < t \leq 1$	ambient	ambient-200°F	200-350°F	350-450°F	450-650°F
$1 < t$	ambient-200°F	200-350°F	350-450°F	450-650°F	450-650°F
Low Hydrogen Processes					
$t \leq 1/2$	ambient	ambient	ambient	ambient-200°F	200-350°F
$1/2 < t \leq 1$	ambient	ambient	ambient-200°F	200-350°F	350-450°F
$1 < t$	ambient	ambient-200°F	200-350°F	350-450°F	450-650°F

Temperatura de pré-aquecimento recomendadas em função do valor do C_{eq} e da espessura do metal de base (Fonte: IIW). Onde: espessura em polegada e temperatura em Fahrenheit. **Conversão $^{\circ}C = (^{\circ}F - 32) / 1,8$**

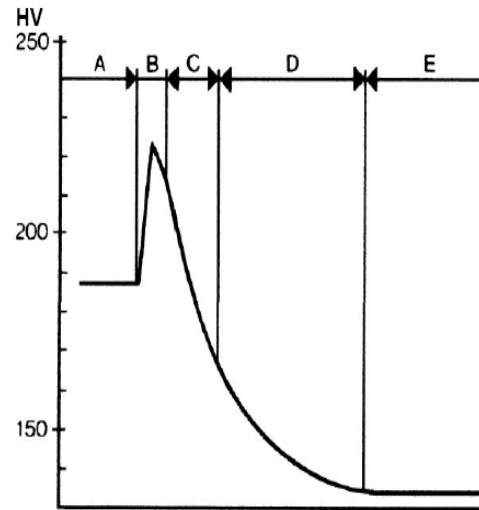
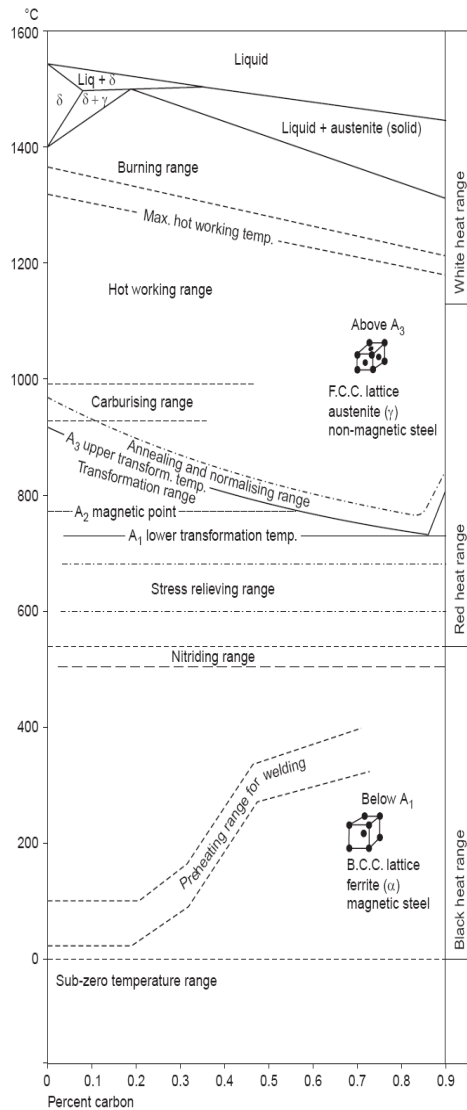
Uma maneira prática para definição do valor da temperatura de pré-aquecimento (T_o) adequada é pelo uso da formulação empírica descrita abaixo (ESAB, 2004).

$$T_o = 350 \times (C_{eq-total} - 0,25)^{1/2} \text{ e } C_{eq-total} = 0,005 \times C_{eq} \times \text{espessura} \text{ ???????? valores}$$

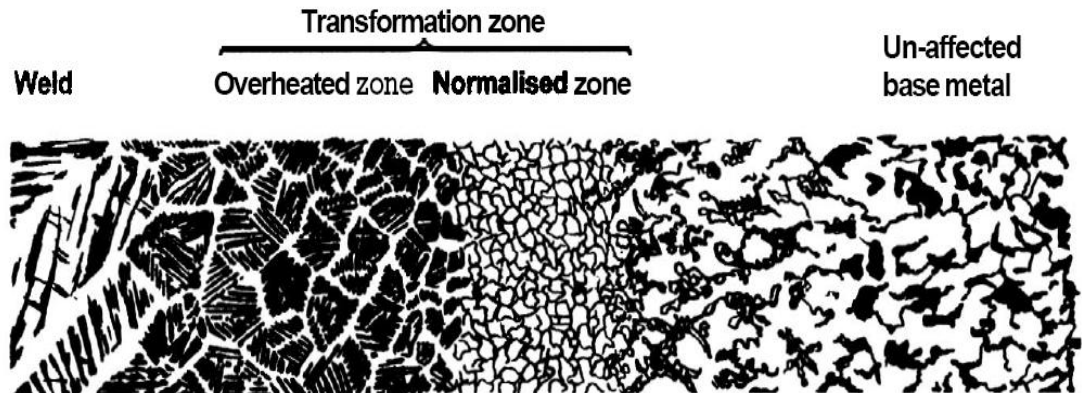
Onde: T_o ($^{\circ}C$), espessura (mm) e C_{eq} (IIW)

Valores adequados de pré e pós-aquecimento na região do depósito permitirão o controle adequado da presença de fases indesejáveis (martensita x dureza) na ZTA – controle sobre a ocorrência de trinca induzida por hidrogênio.

Faixa de pré-aquecimento para diferentes teores de carbono

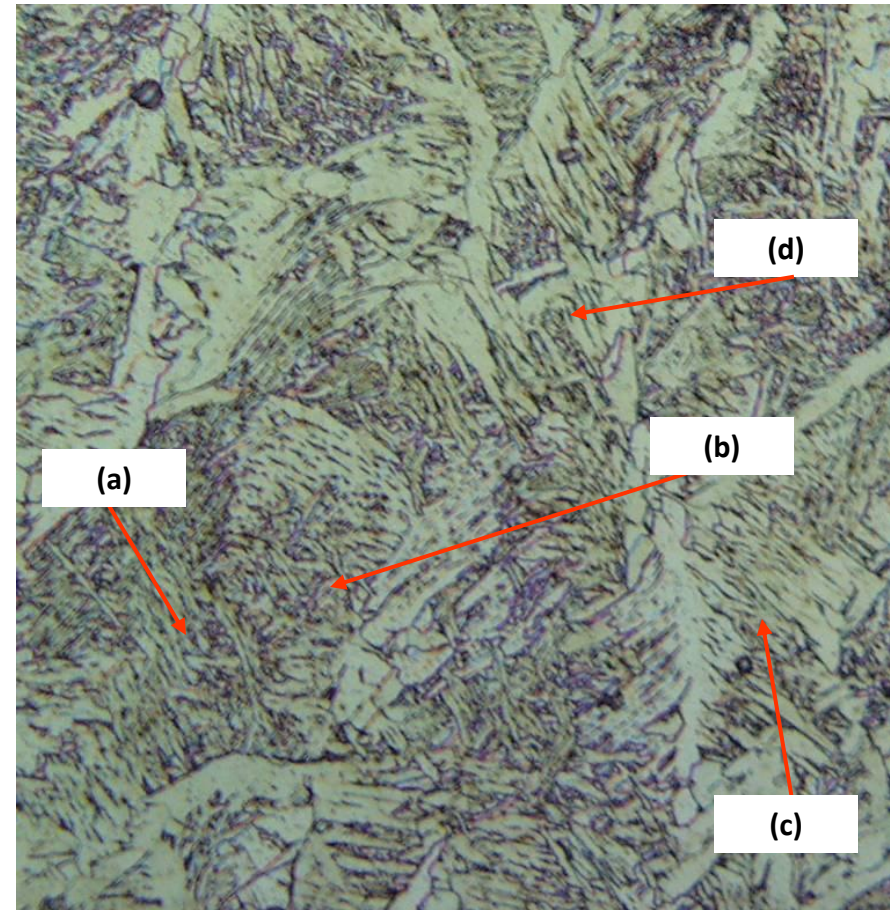
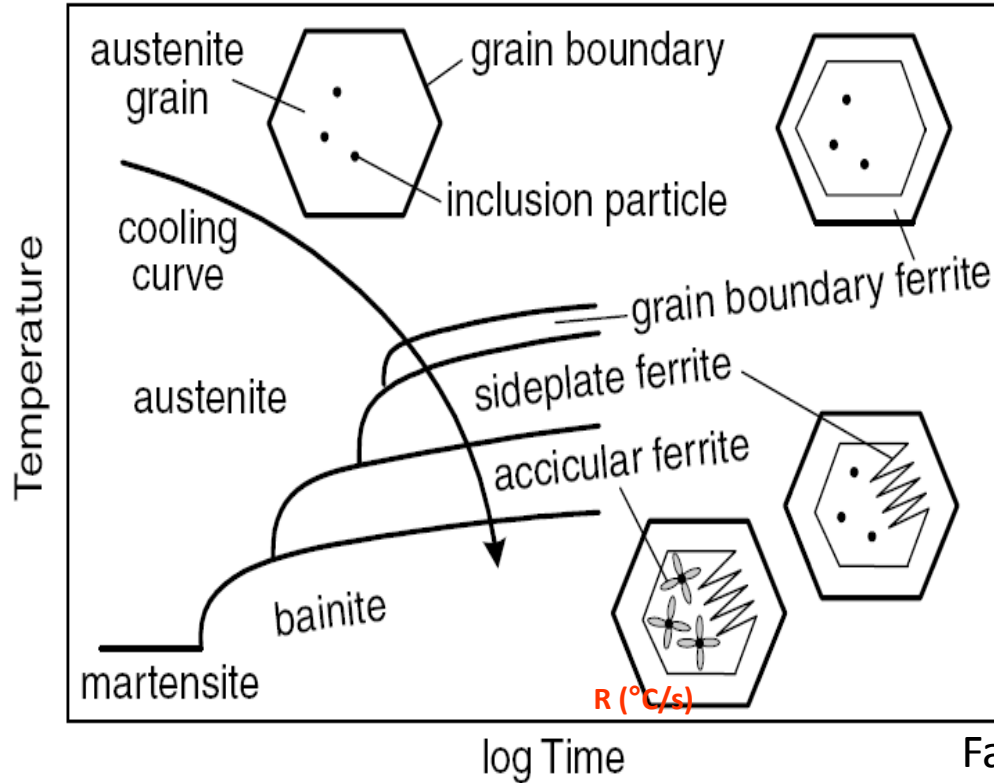


- A = Weld*
- B = Overheated zone*
- C = Normalised zone*
- D = Coarse grained zone*
- E = Base metal*



Representação da faixa de pré-aquecimento em função do teor de carbono e o do perfil esperado de dureza na ZTA do aço carbono. Fonte: Khan, 2007.

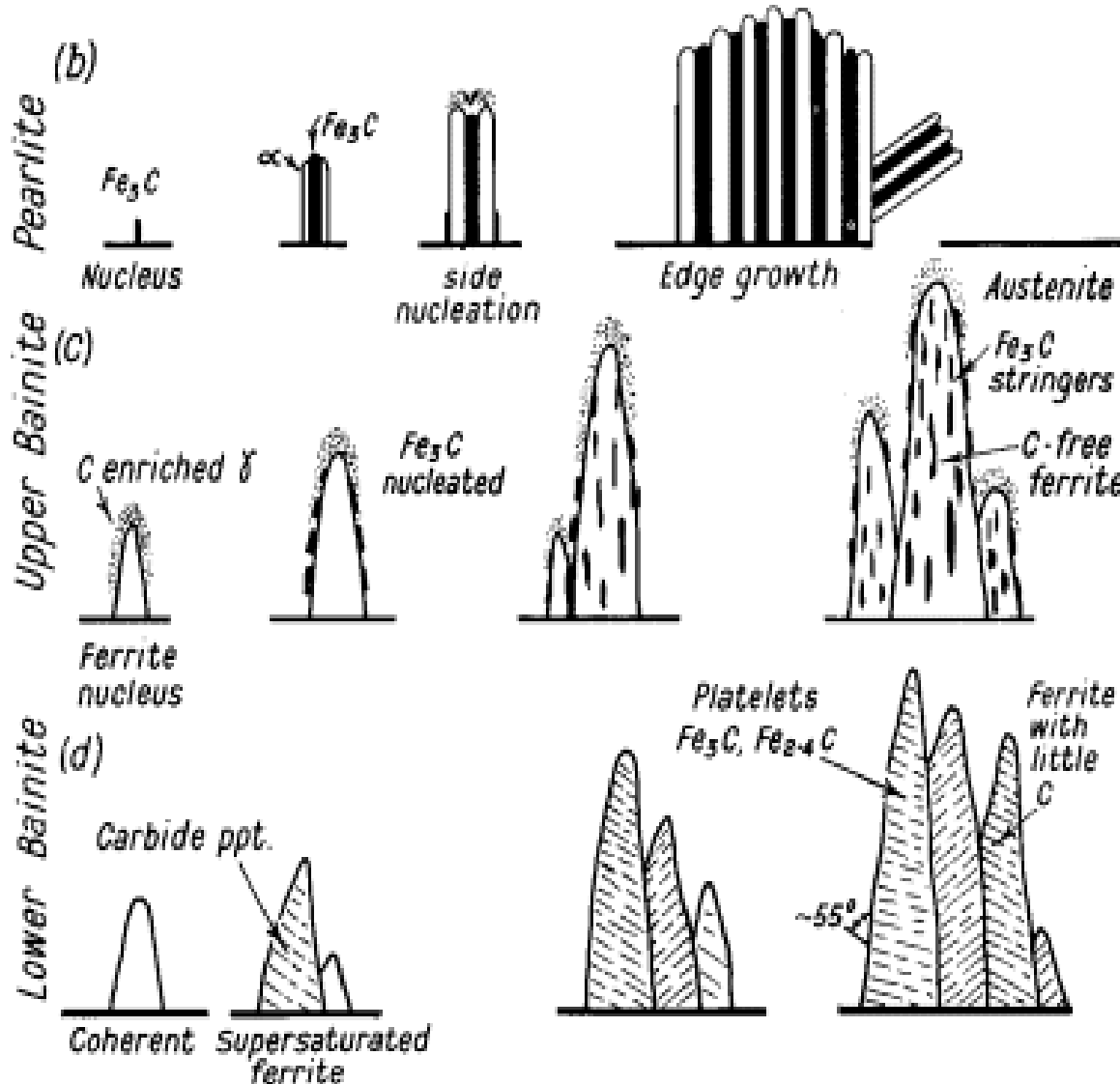
Transformação $\gamma \rightarrow \alpha$ na ZTA e na ZF



Fases presentes no metal de solda. Processo de soldagem MIG, Aço carbono, simples deposição. Em (a) ferrita acicular, (b) bainita “ferrita de segunda fase alinhada”, (c) ferrita de contorno de grão e (d) ferrita de placa laterla “Widmanstatten” (Fonte: Barra, 2003).

Representação do diagrama CCT e as possíveis fases presentes no depósito, como função da condições de soldagem - aço baixo carbono (Fonte: Kou, 2003)

Transformação $\gamma \rightarrow \alpha$



Formação da das fases:

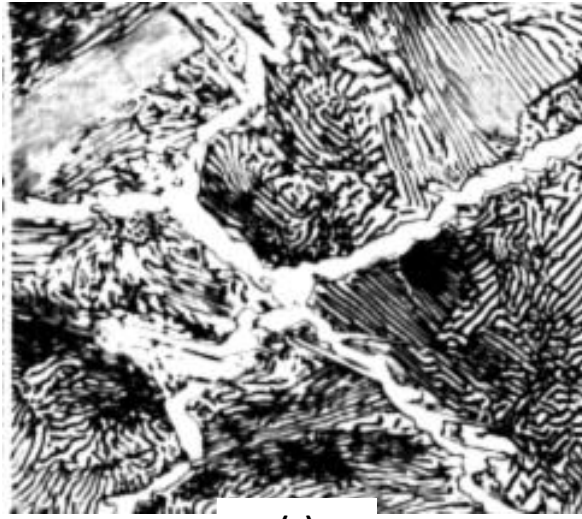
Perlita – durante o resfriamento, na faixa de 730 e 550 °C inicia a mudança da matriz austenítica (γ) para agregados de ferrita (α) mais Fe_3C .

Bainita superior – entre 500 e 350 °C os núcleos iniciais de ferrita são coerentes com a matriz austenítica. Então, da camada enriquecida de carbono em γ precipita Fe_3C alinhados com o eixo de crescimento do nódulo, seguido do futuro crescimento da α .

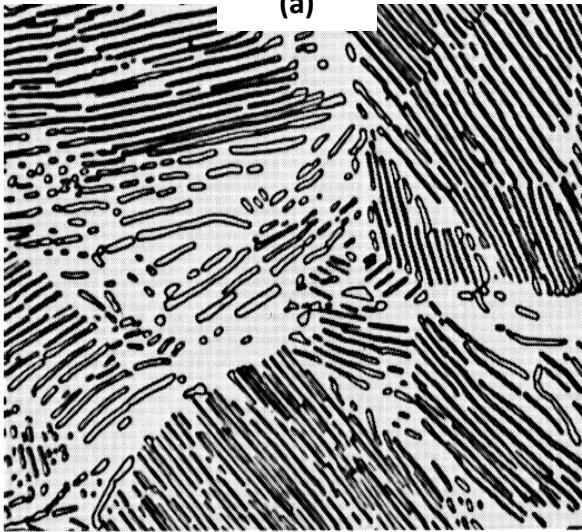
Bainita inferior – abaixo de 350 °C a matriz ferrítica, super-saturada de carbono, se forma primeiro e depois há a precipitação de carbeto num ângulo de 55° em relação ao nódulo de ferrita.

Representação da formação da perlita (b), bainita superior (c) e bainita inferior (d). Fonte: Key to Steel.

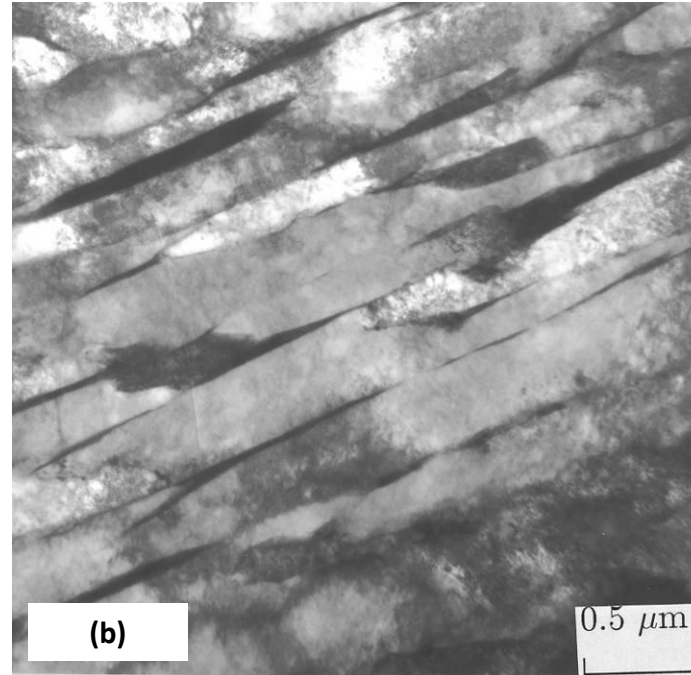
Exemplo das possíveis fases presentes na ZTA / ZF



(a)



20 μm



(b)

0.5 μm



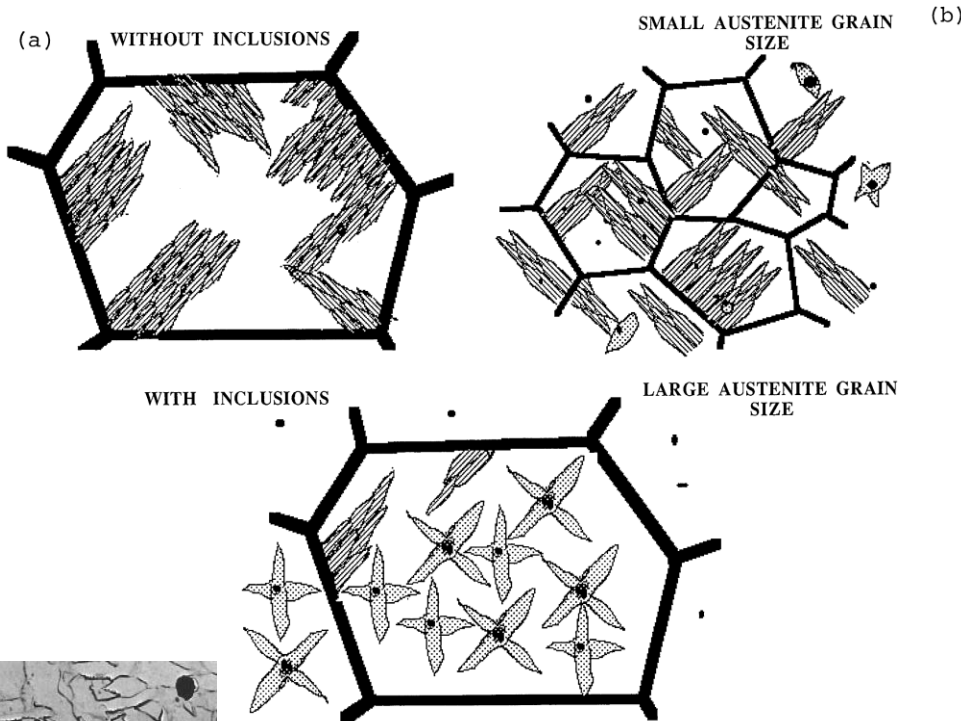
(c)

0.5 μm

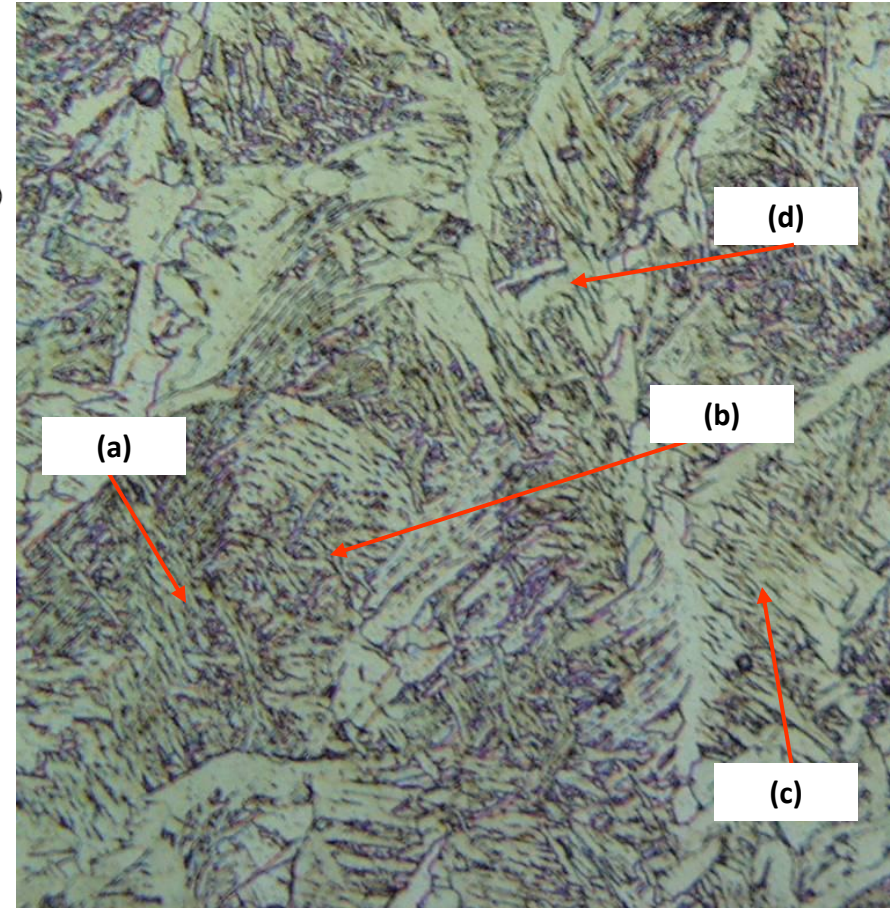
Micrografia mostrando em (a) perlita, (b) bainita superior e (c) bainita inferior
(Fonte: Bhadeshia, 1996; Callister, 2001).

Fatores influenciando a formação da bainita e da ferrita acicular

Efeito do tamanho do grão primário e da presença de inclusão sobre a formação da bainita e ferrita acicular (Fonte: Badeshia).

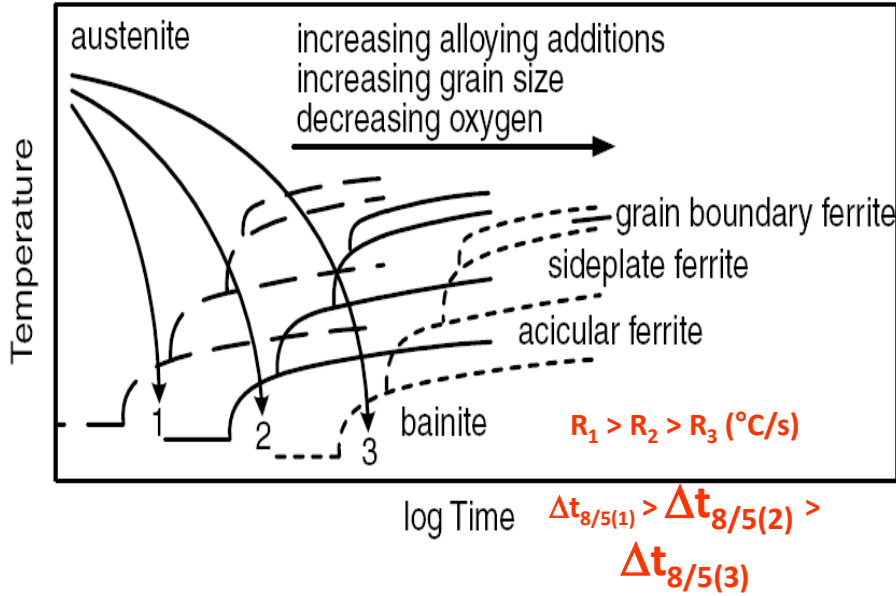


Inclusão como sítio preferencial à formação de ferrita acicular (Fonte: Kou, 2003).



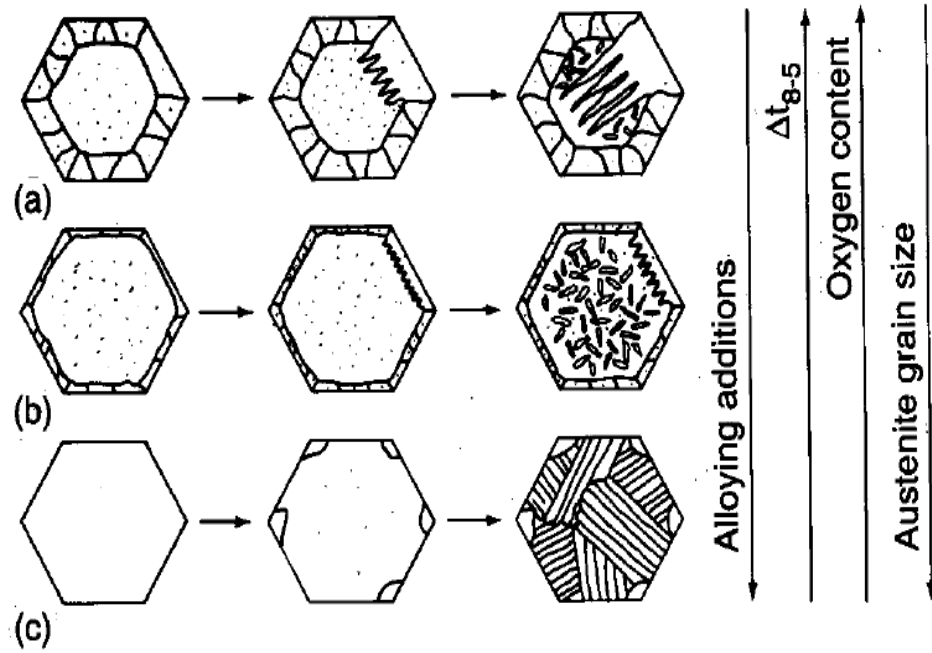
Fases presentes no metal de solda. Processo de soldagem MIG, Aço carbono, simples deposição. Em (a) ferrita acicular, (b) bainita “ferrita de segunda fase alinhada”, (c) ferrita de contorno de grão e (d) ferrita de placa lateral “Widmanstätten” (Fonte: Barra, 2003).

Fatores influenciando a formação transformação de fases na ZTA e ZF

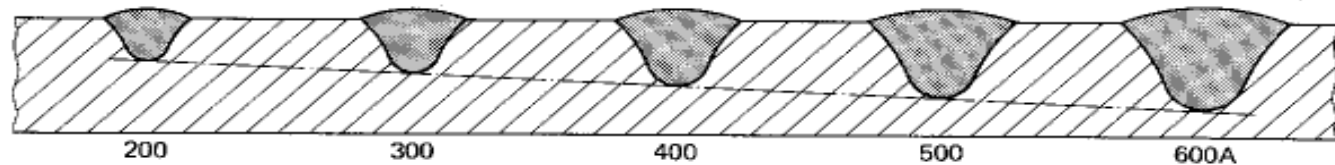


Efeito da adição de elemento de liga, $\Delta t_{8/5}$, teor de oxigênio e tamanho do grão austenítico primário sobre a transformação de fases (Fonte: Kou, 2003)

Em (a) predominância de ferrita de contorno de grão e ferrita de placa lateral (ferrita de Widmanstatten), (b) predominância de ferrita acicular e (c) predominância de bainita (segunda fase alinhada)



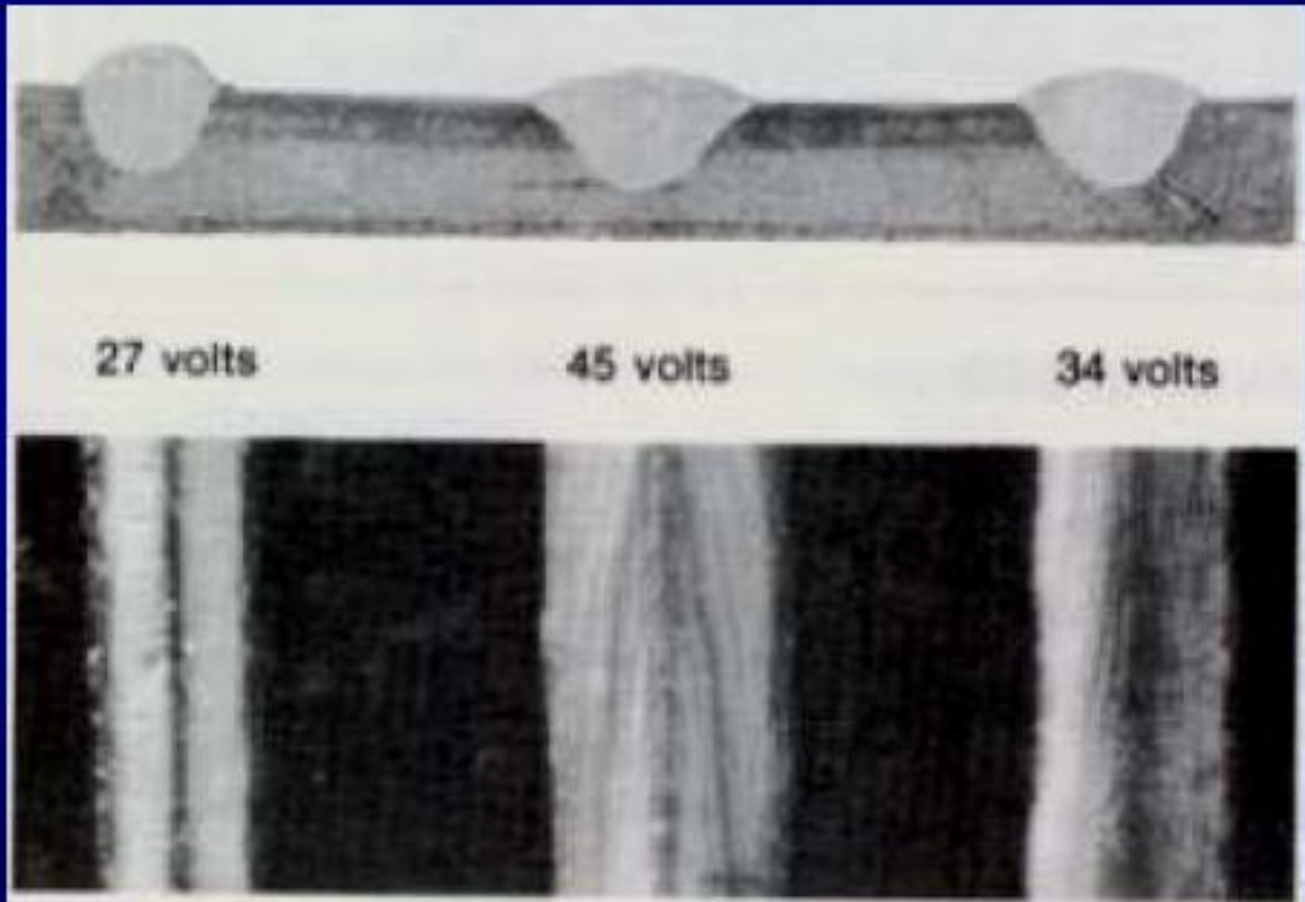
Efeito da corrente na ZF e ZTA



CORRENTE DE SOLDAGEM	BAIXA	CORRETA	ALTA
CHANFRO RETO JUNTA DE TOPO CHAPA 12,5 mm	 350 AMPERES 29 Volts 75 cm/min	 500 AMPERES 29 Volts 75 cm/min	 650 AMPERES 29 Volts 75 cm/min
CHANFRO EM "V" 45° JUNTA DE TOPO CHAPA 12,5 mm	 840 AMPERES 40 Volts 32 cm/min Resultado: penetração e reforço insuficientes	 1200 AMPERES 40 Volts 32 cm/min Resultado: as soldas são satisfatórias em todos os aspectos	 1560 AMPERES 40 Volts 32 cm/min Resultado: ambas as soldas têm penetração e reforço excessivos; a parte inferior tem sobreposição de reforço e é mais larga que a parte superior (forma de "pera")

Efeito da variação da tensão na ZF e ZTA

850 A, 75 cm/min, arame \varnothing 5,6 mm



Efeito da Tensão na ZF e ZTA

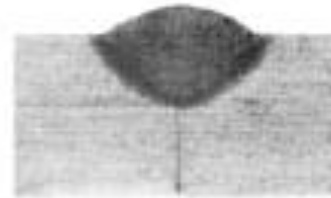
TENSÃO DE SOLDAGEM

BAIXA

CORRETA

ALTA

CHANFRO RETO
JUNTA DE TOPO
CHAPA 12,5 mm



22 VOLTS

29 VOLTS

38 VOLTS

500 Amperes 75 cm/min

500 Amperes 75 cm/min

500 Amperes 75 cm/min

CHANFRO EM "V" 45°
JUNTA DE TOPO
CHAPA 12,5 mm



28 VOLTS

40 VOLTS

52 VOLTS

1200 Amperes

1200 Amperes

1200 Amperes

32 cm/min

32 cm/min

32 cm/min

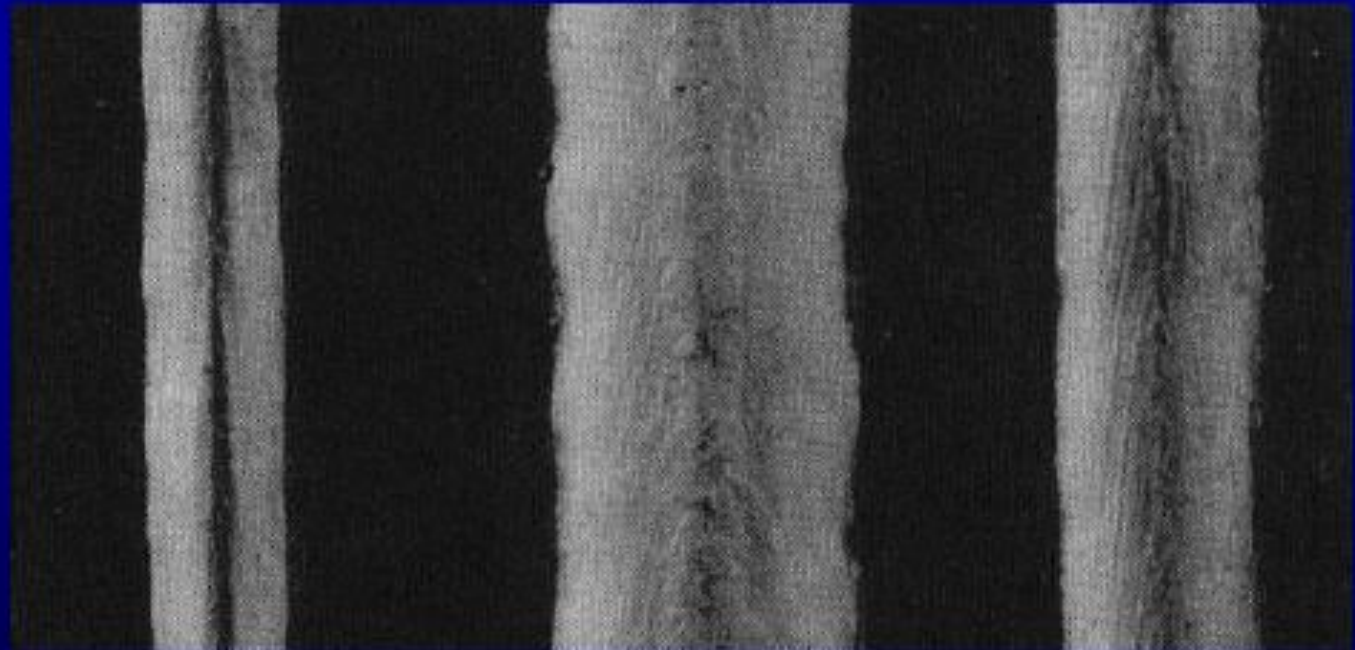
Resultado: reforço excessivo em ambas as soldas; parte inferior muito estreita para a profundidade; trinca interna causada por resfriamento tardio no centro

Resultado: ambas as soldas satisfatórias em todos os aspectos

Resultado: soldas muito largas; reforço muito baixo. Quantidades excessivas de fluxo foram fundidas.

Efeito da velocidade de soldagem na ZF e ZTA

850 A, 34 V, arame \varnothing 5,6 mm



150 cm/min

40 cm/min

75 cm/min

Efeito da velocidade de soldagem na ZF e ZTA

VELOCIDADE DE SOLDAGEM

BAIXA

CORRETA

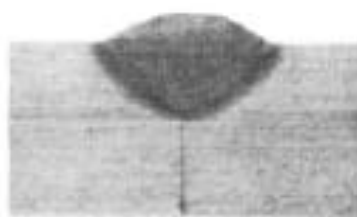
ALTA

CHANFRO RETO
JUNTA DE TOPO
CHAPA 12,5 mm



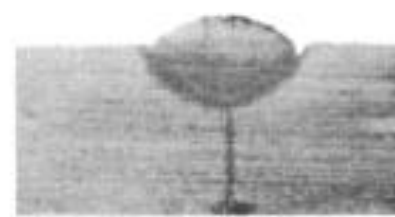
50 cm/min

29 Volts 500 Amperes



75 cm/min

29 Volts 500 Amperes



100 cm/min

29 Volts 500 Amperes

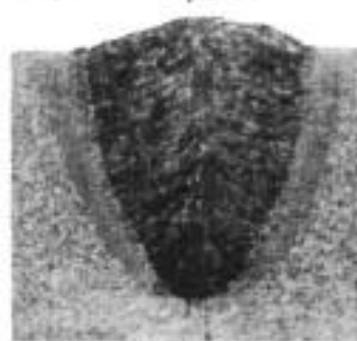
CHANFRO EM "V" 45°
JUNTA DE TOPO
CHAPA 12,5 mm



22 cm/min

40 Volts 1200 Amperes

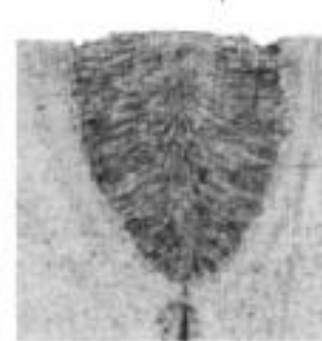
Resultado: muito arame depositado por comprimento de solda. Região fundida muito larga, com geometria desfavorável



32 cm/min

40 Volts 1200 Amperes

Resultado: soldas satisfatória em todos os aspectos



37 cm/min

40 Volts 1200 Amperes

Resultado: muito pouco arame depositado por comprimento de solda. Modedura em ambas as soldas. Parte inferior com reforço insuficiente

- *FPM, suficiente por enquanto.*