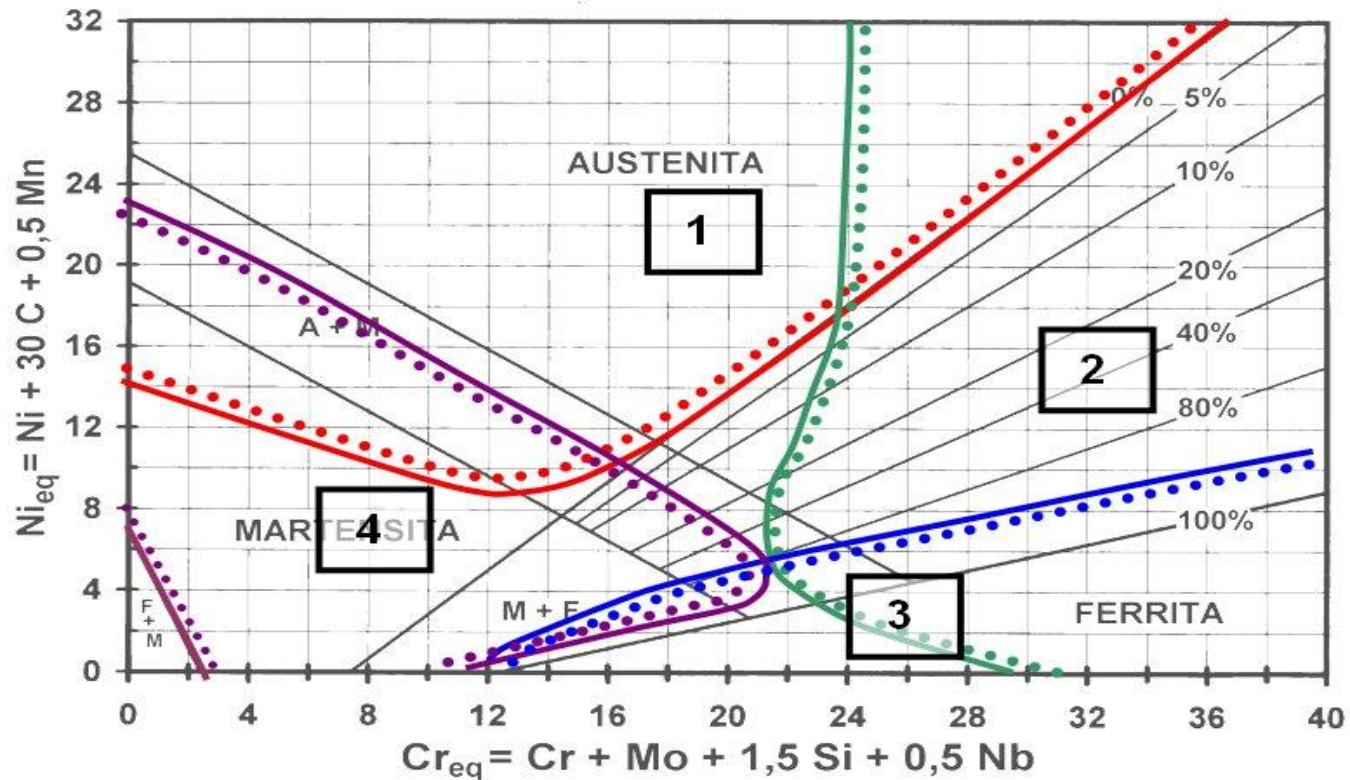


SOLDABILIDADE DOS AÇOS INOXIDÁVEIS

**RESUMO DA
SOLDABILIDADE DOS
AÇOS INOXIDÁVEIS**

**Ramón S. Cortés Paredes, Dr. Eng.
LABATS DEMEC UFPR**

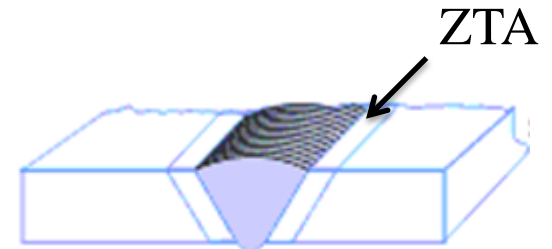
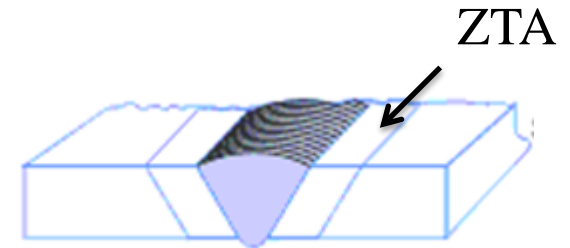
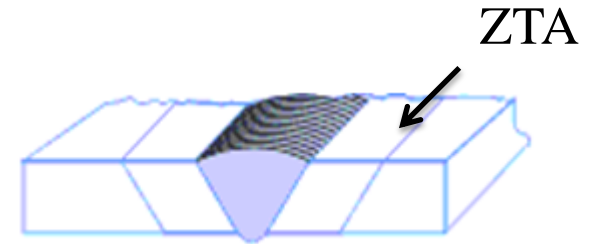
Diagrama de Schaeffler



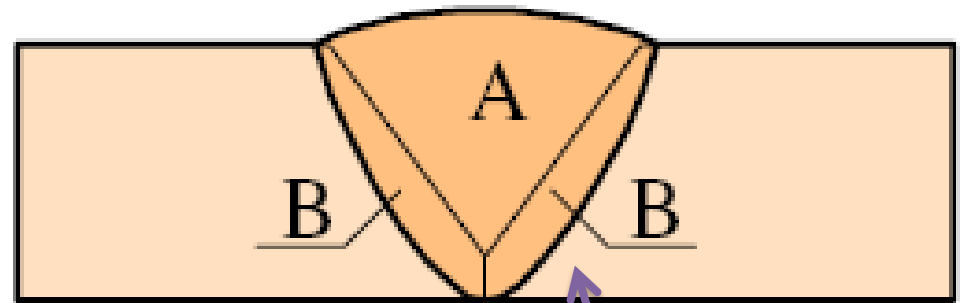
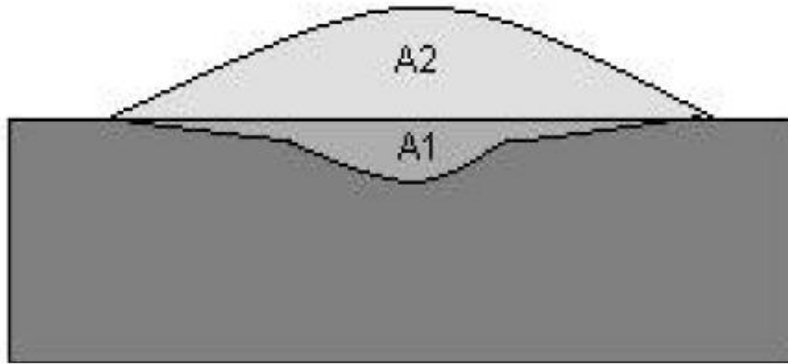
- (1) Formação de trincas de solidificação ou por perda de ductilidade acima de $1250^{\circ}C$;
- (2) Fragilização por formação de fases intermetálicas após aquecimento entre cerca de 450 e $900^{\circ}C$;
- (3) Fragilização por crescimento de grão; e
- (4) Fragilização e fissuração por formação de martensita.

Processos de Soldagem

- Soldagem com Eletrodo Revestido;
- Soldagem TIG;
- Soldagem Plasma;
- Soldagem MIG/MAG;
- Soldagem a Arco Submerso;
- Soldagem sob Escória Eletrocondutora;
- Soldagem com Eletrodo Tubular;
- Soldagem Laser.



Diluição na Soldagem

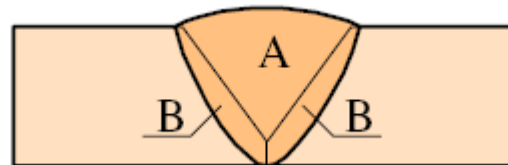
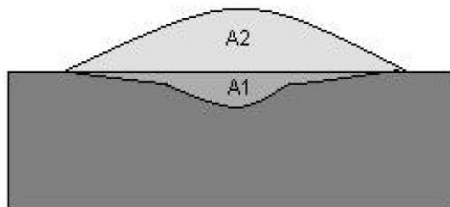


$$D(\%) = \frac{A1}{A1 + A2}$$

A = A2
B = A1

Diluição na Soldagem

Processo	Diluição [%]	Observações
Brasagem	0	Neste processo não funde o metal de base
Oxigas	1-5	Com material de aporte
Eletroescória	5	
Eletrodo revestido	30	Primeira passada em junta a topo com chanfro
Eletrodo revestido	10-20	Passadas seguintes
Arco submerso	60	
Resistência	100	Não tem material de aporte
MIG	20-40	
TIG	20-30	

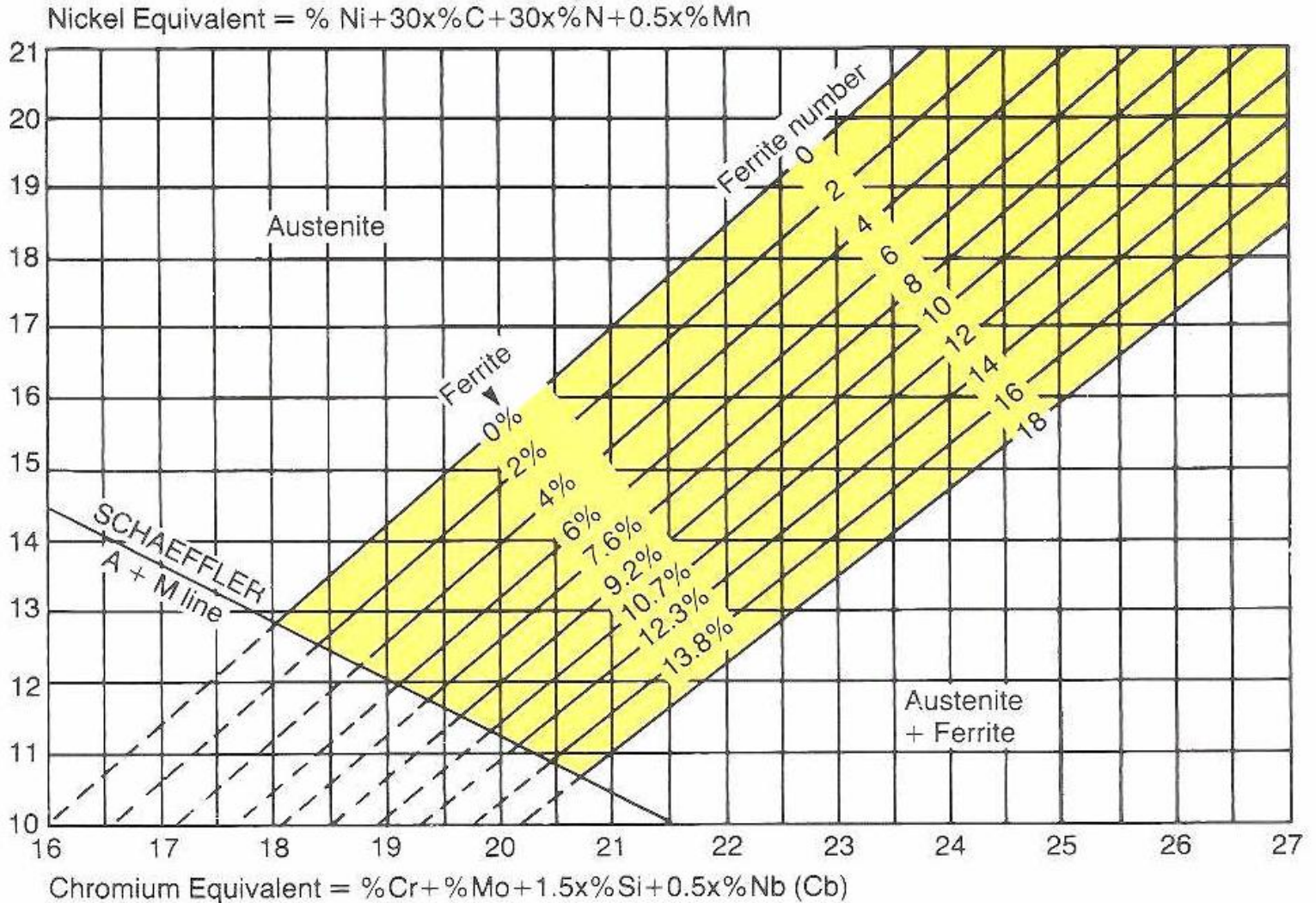


$$D(\%) = \frac{A1}{A1 + A2}$$

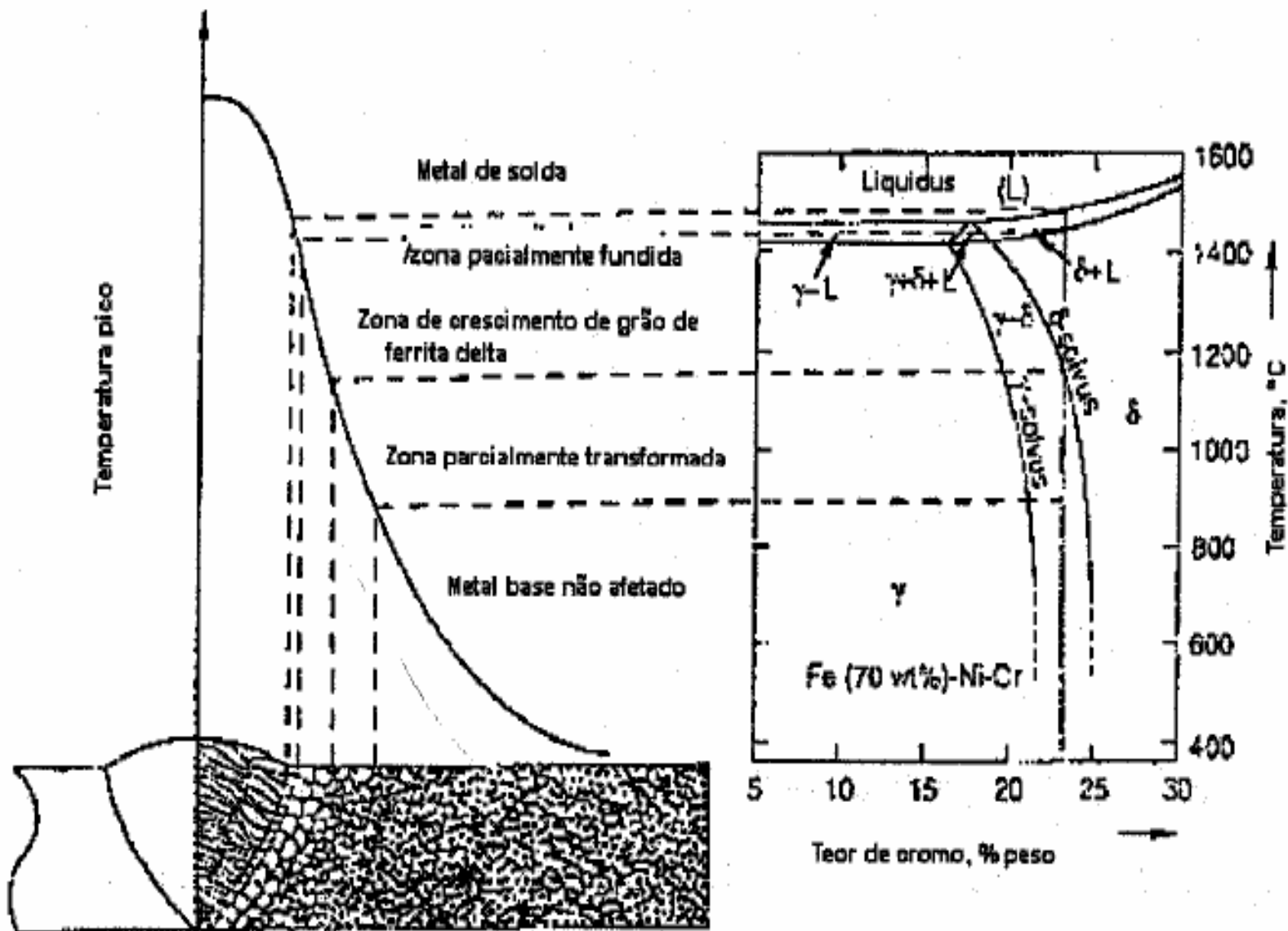
SOLDABILIDADE DOS AÇOS INOXIDÁVEIS

Autor	Ano	Cromo equivalente [%]	Níquel Equivalente [%]
Schaeffler	1949	$\text{Cr} + \text{Mo} + 1,5\text{Si} + 0,5 \text{ Nb}$	$\text{Ni} + 0,5\text{Mn} +$
DeLong <i>et al.</i>	1956	$\text{Cr} + \text{Mo} + 1,5\text{Si} + 0,5 \text{ Nb}$	$\text{Ni} + 0,5\text{Mn} + + 30\text{N}$
Hull	1973	$\text{Cr} + 1,21\text{Mo} + 0,48\text{Si} + 0,14\text{Nb} + 2,27\text{V} + 0,72\text{W} + 2,20\text{Ti} + 0,21\text{Ta} + 2,48\text{Al}$	$\text{Ni} + (0,11\text{Mn} - 0,0086\text{Mn}^2) + 14,2\text{N} + 0,41\text{Co} + 0,44\text{Cu}$
Hammar e Svensson	1979	$\text{Cr} + 1,37\text{Mo} + 1,5\text{Si} + 2\text{Nb} + 3\text{Ti}$	$\text{Ni} + 0,31\text{Mn} + + 14,2\text{N} + \text{Cu}$
Siewert <i>et al.</i> WRC	1992	$\text{Cr} + \text{Mo} + 0,7\text{Nb}$	$\text{Ni} + + 20\text{N} + 0,25\text{Cu}$

Diagrama de DeLong

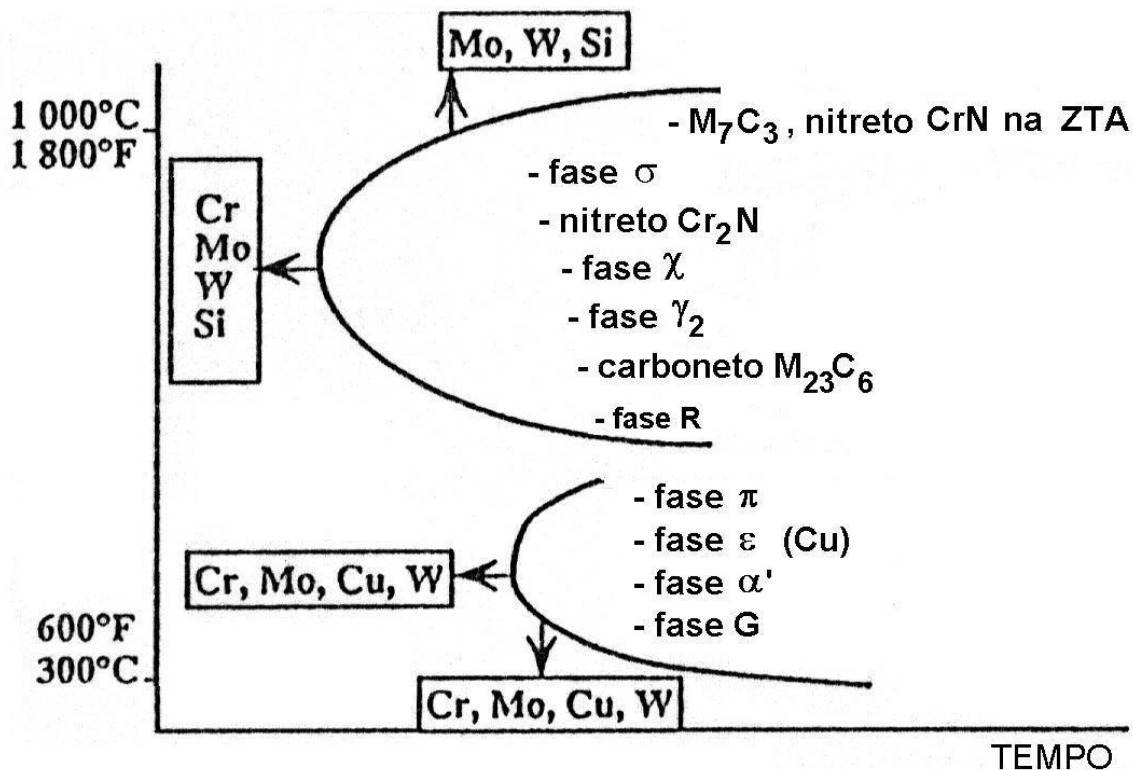


Soldagem: ZF + ZTA ► **SOLIDIFICAÇÃO**



Fenômenos de Fragilização

- Fragilização por fase σ (600°C – 1000°C)
- Precipitação de carbonetos de cromo
- Fragilização a 475°C (350-550°C)
- Precipitação de nitretos de Cromo na ferrita
- Formação de martensita
- (Precipitação de austenita secundária)

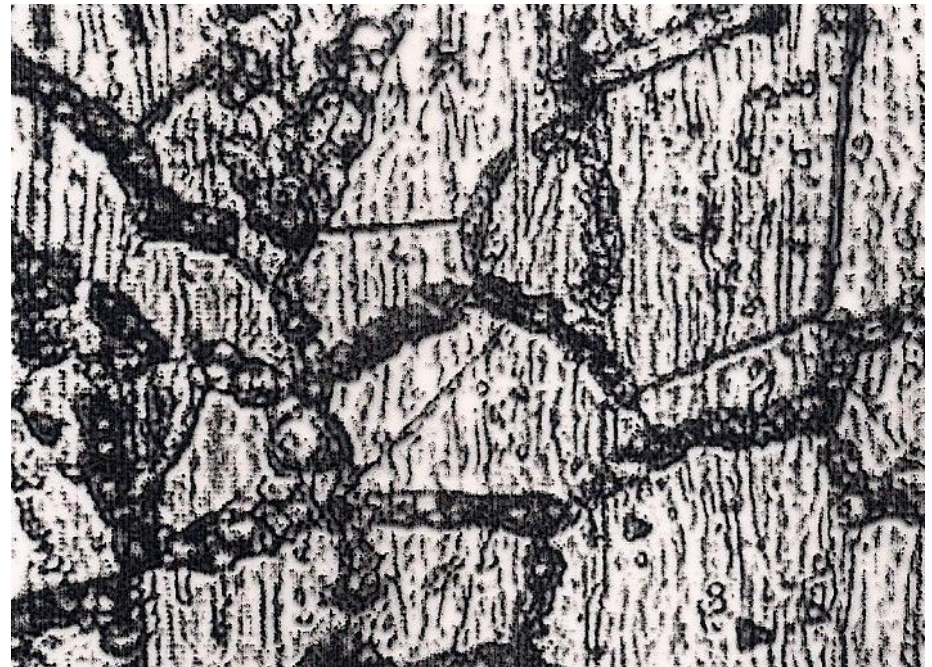


Eliminar a precipitação de carbonetos de cromo

- **Utilizando aços com baixo teor de carbono (“L”):**
 - 304L, 316L, 317L (%C < 0,03%)
 - Reduzindo o teor de carbono retarda-se a cinética de precipitação dos carbonetos

- **Utilizando aços estabilizados ao Ti (AISI 321) ou Nb (AISI 347):**
 - O Nb e o Ti formam carbonetos (NbC e TiC) evitando a formação dos carbonetos de cromo (Cr_{23}C_6).
 - Estes aços devem passar por um tratamento de **estabilização** após a soldagem ou antes da utilização na faixa de 600°C a 700°C.

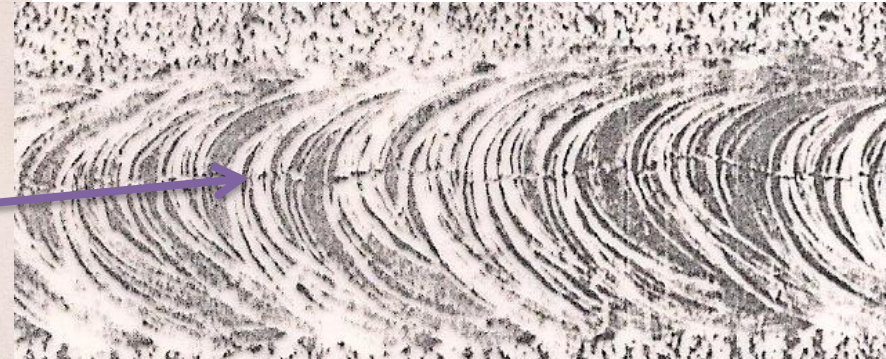
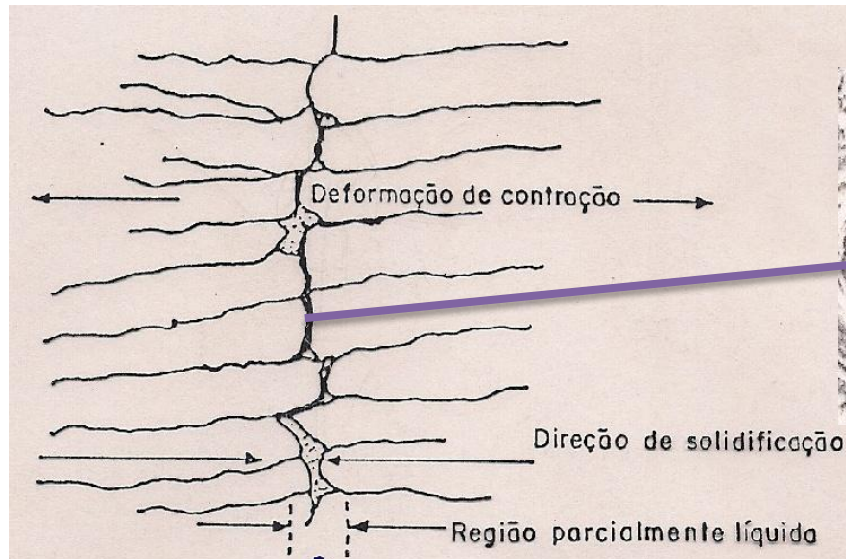
Sensitização



Trinca de Solidificação

+ Trinca a quente

- × Ocorre no metal de solda devido à segregação de impurezas (S,P,C,...). Se agrava com o aumento do aporte de calor.
- × Para evitá-la o metal de solda deve conter de **3 a 8% de ferrita delta**. Consumíveis com alto Mn também são recomendados.



Processo e procedimento de soldagem

Processo de soldagem → processos com proteção gasosa são os mais adequados.

Posição de soldagem → influencia a penetração e s deve-se adotar a posição plana.

T° de preaquecimento e de interpasse → influenciam diretamente nas características de troca de calor e devem ser bem controlados.

Aporte de calor → o controle de aporte de calor somente é requerido para revestimentos ou quando se requer tenacidade, mas deve ser controlado quando se requer obter resistência à corrosão.

Consumíveis → em termos de resistência à corrosão deve-se dar especial atenção às características dos consumíveis e a soldagem similar é sempre preferida. [segundo a agressividade do meio corrosivo → ligas de níquel].

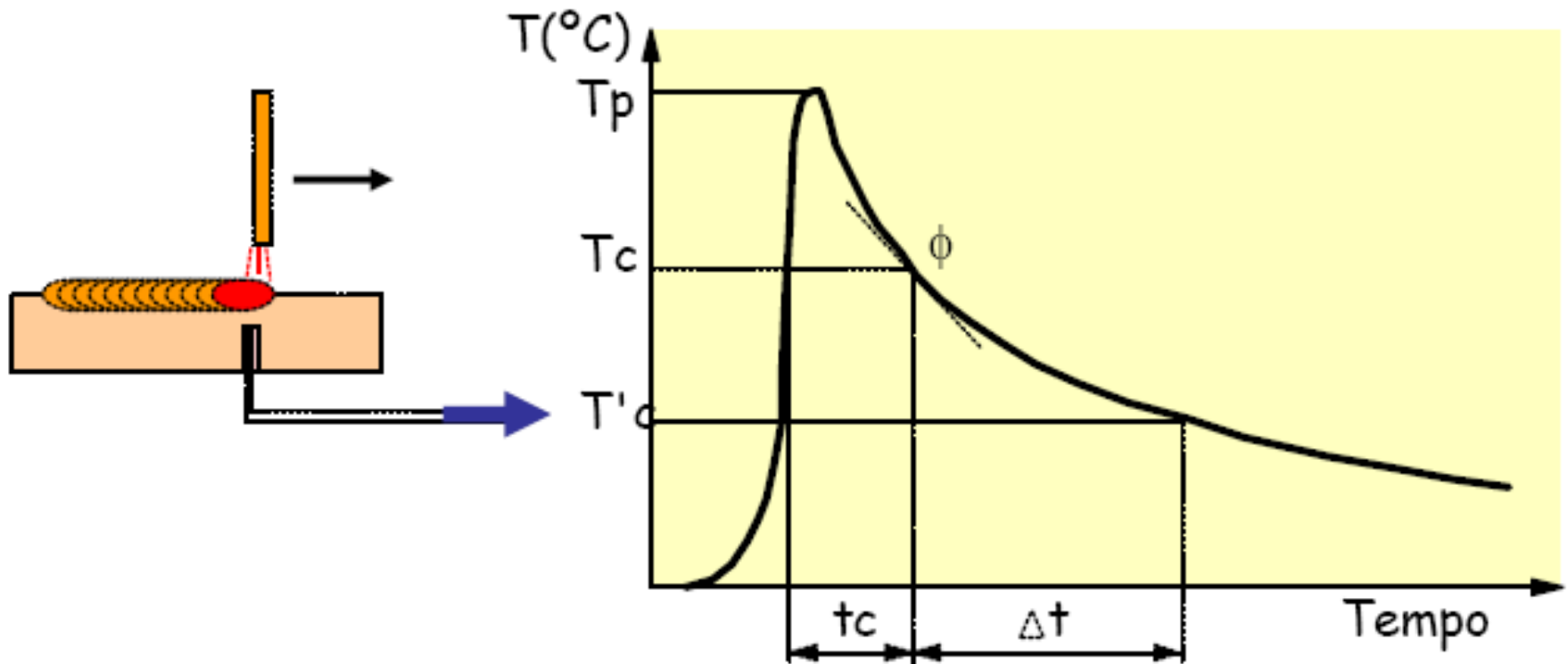
Técnica de soldagem → alguns processos variam muito as características metalúrgicas em função da forma de soldagem.

Pós-aquecimento, alívio de tensões → quando a união soldada seja submetido à CST.

Ciclos Térmicos na Soldagem

Parâmetros:

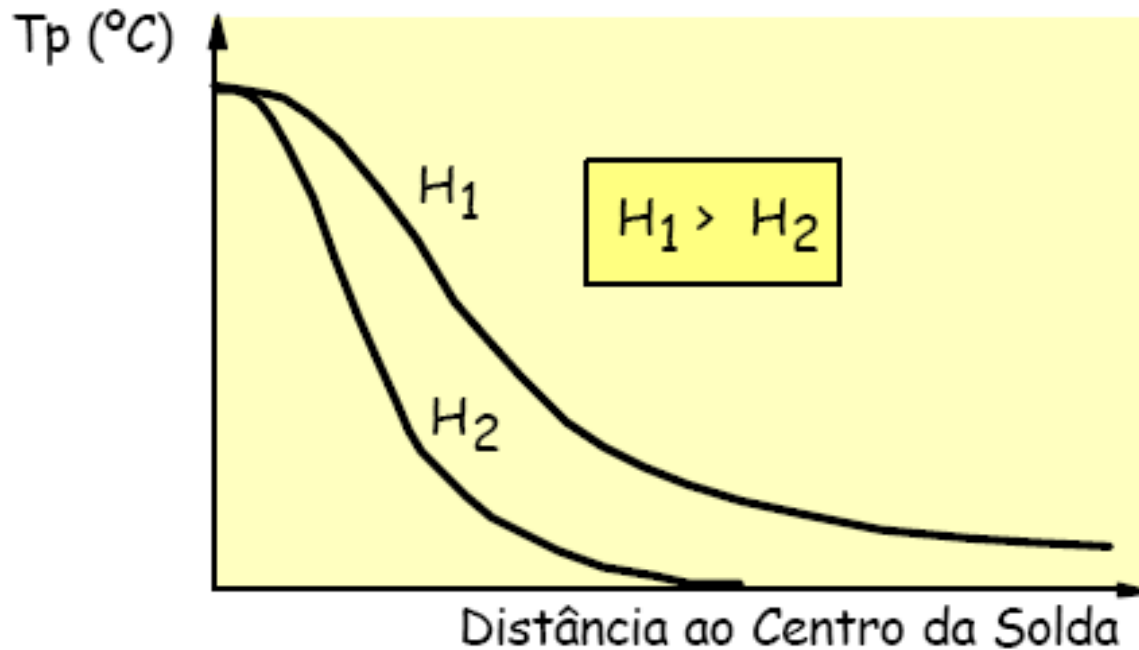
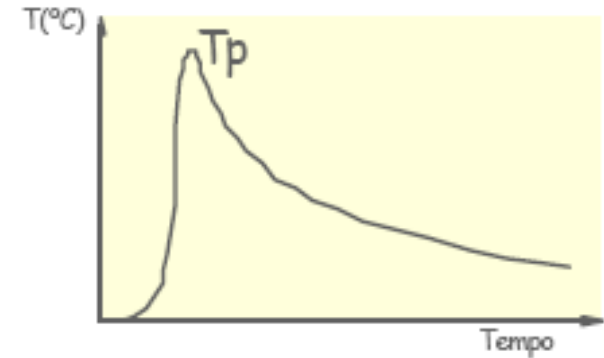
- Temperatura de Pico
- Tempo de Permanência acima de uma Temperatura Crítica
- Velocidade de Resfriamento



Ciclos Térmicos na Soldagem

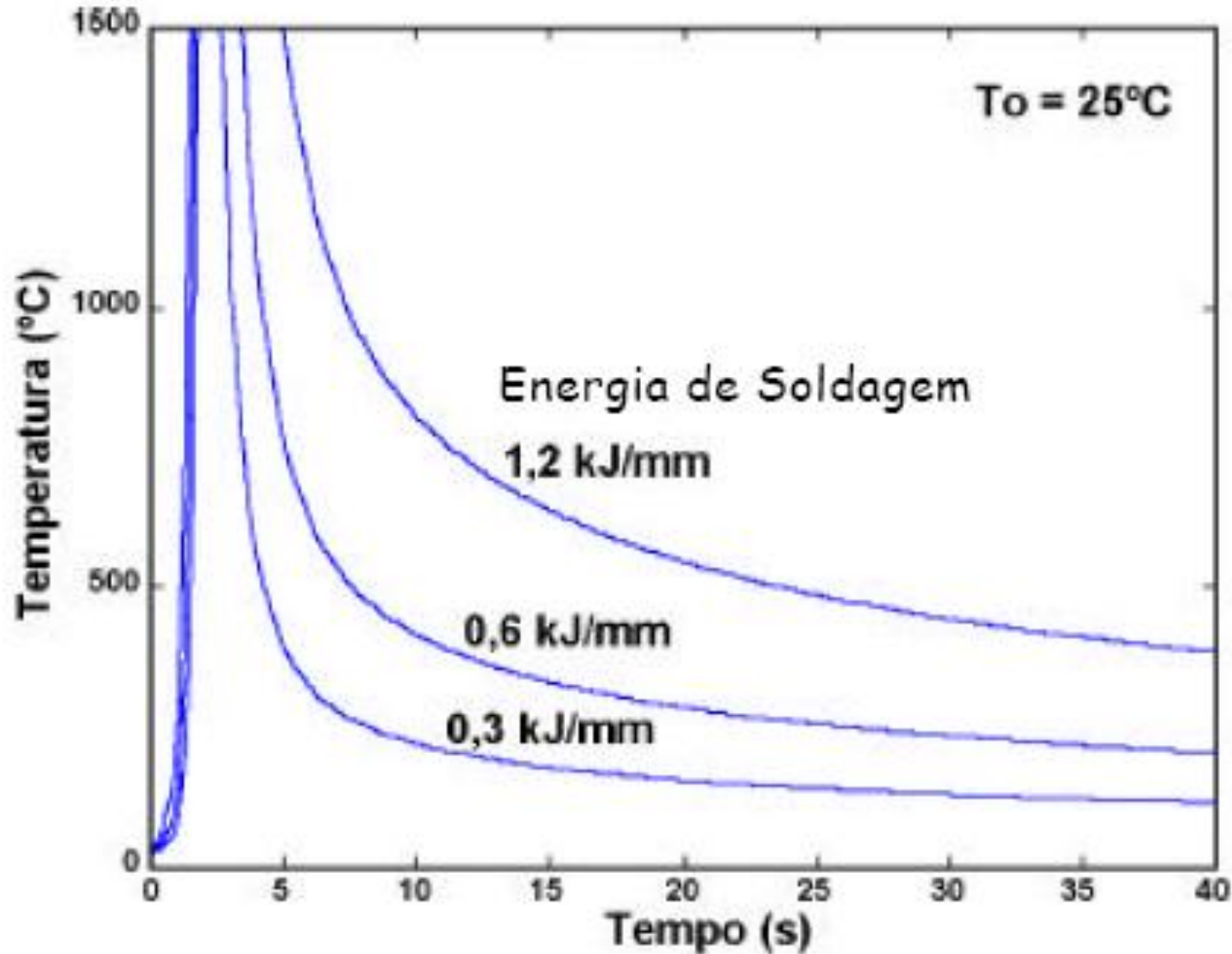
Temperatura de Pico (T_p):

Curva de Repartição Térmica: $T_p \times y$



Ciclos Térmicos na Soldagem

Energia de Soldagem e Temperatura de Pré-aquecimento:



Ciclos Térmicos na Soldagem

Energia de Soldagem e Temperatura de Pré-aquecimento:

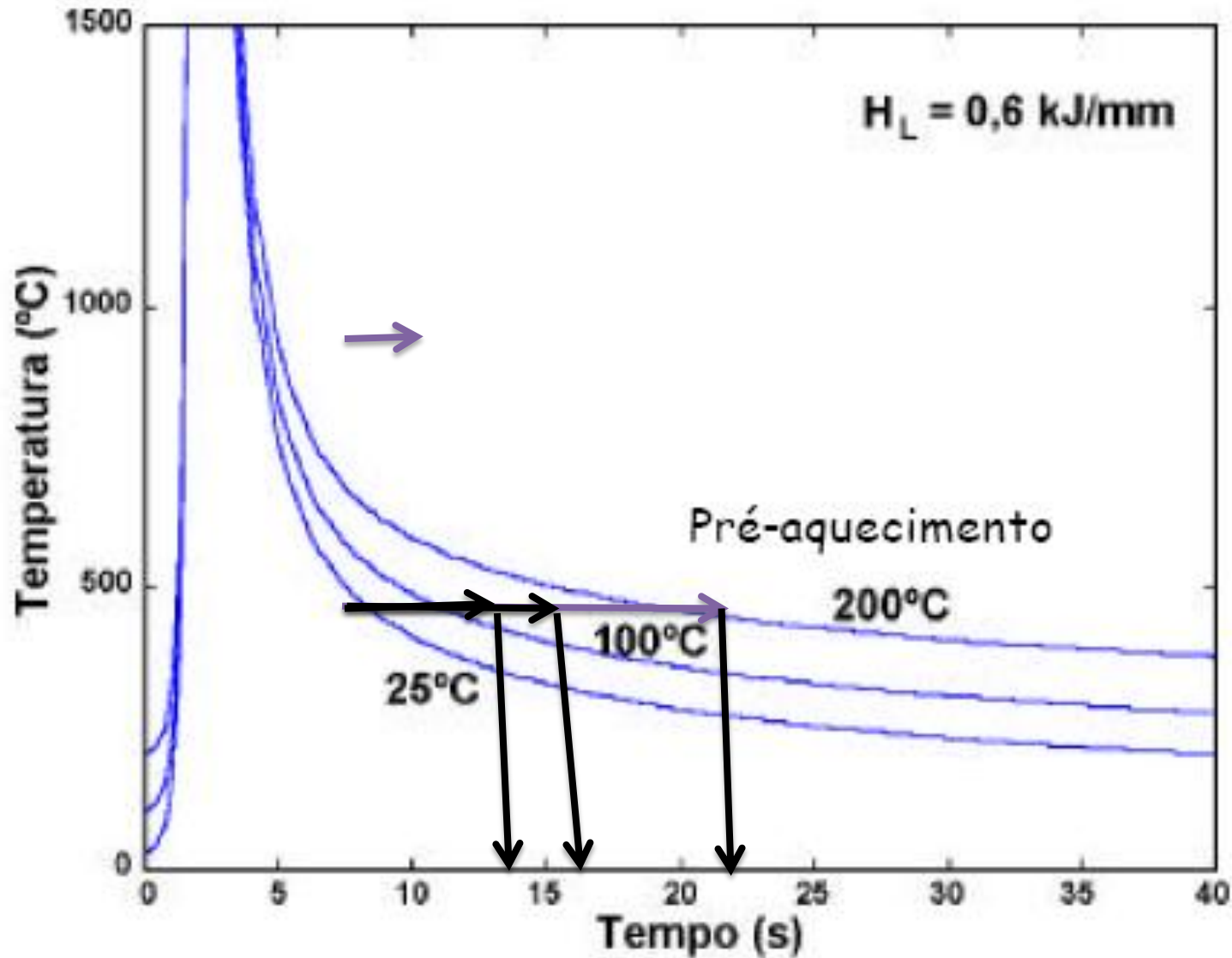


Diagrama TTT x Pre-Aquecimento

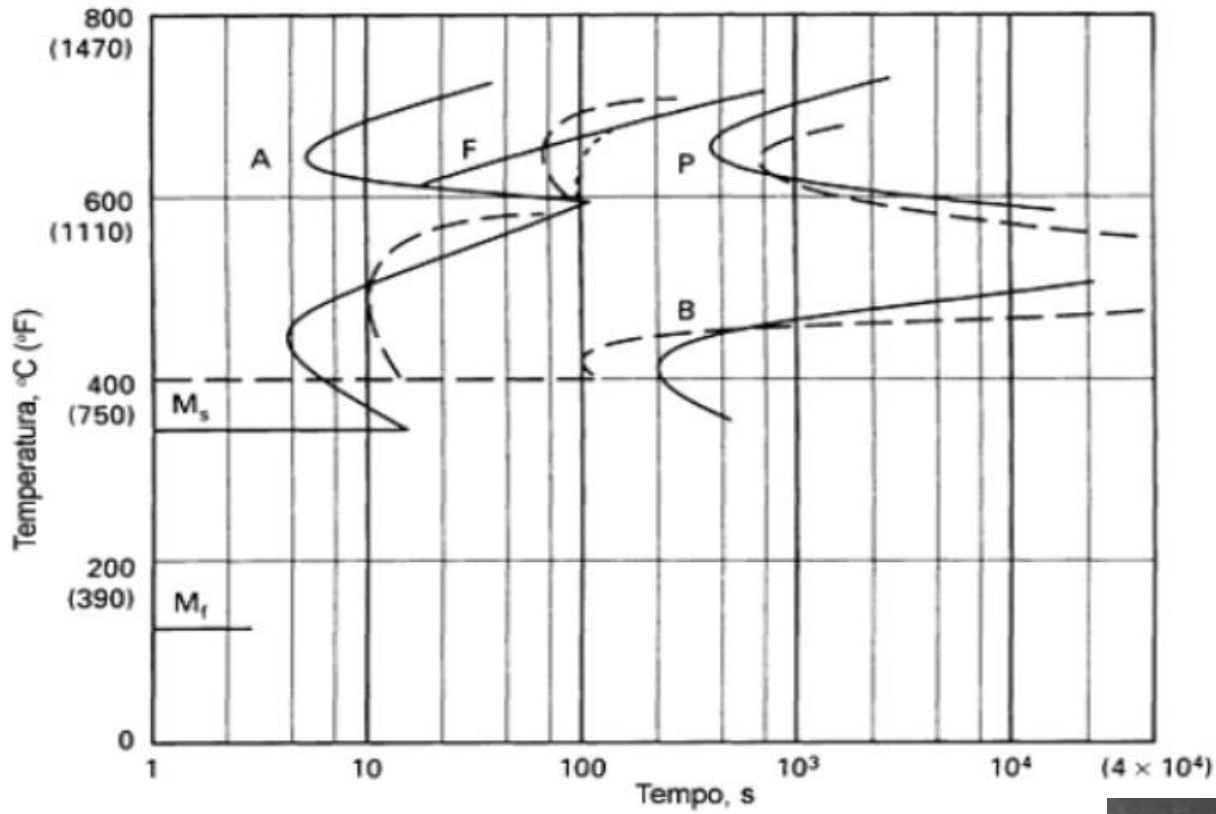
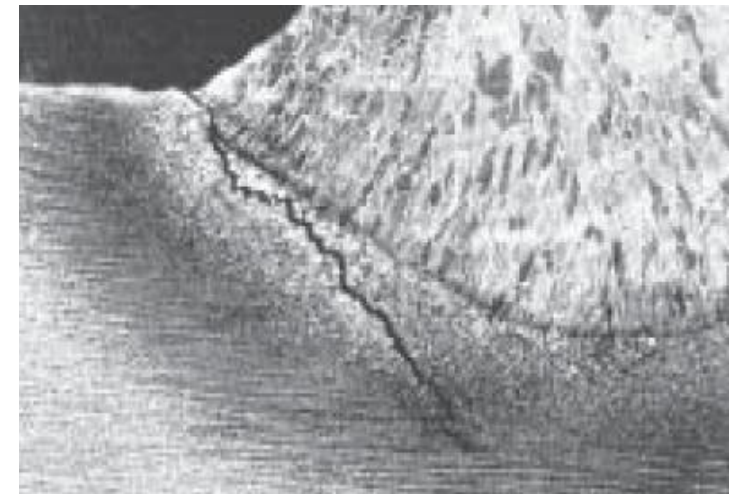
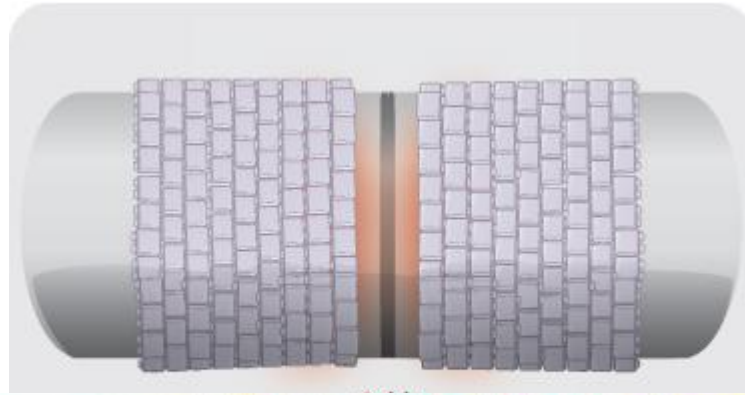


Diagrama TTT para o aço AISI 4140

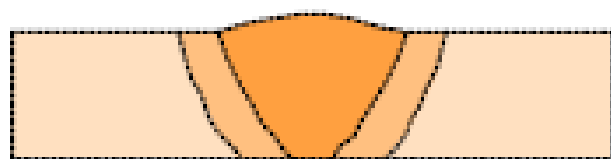
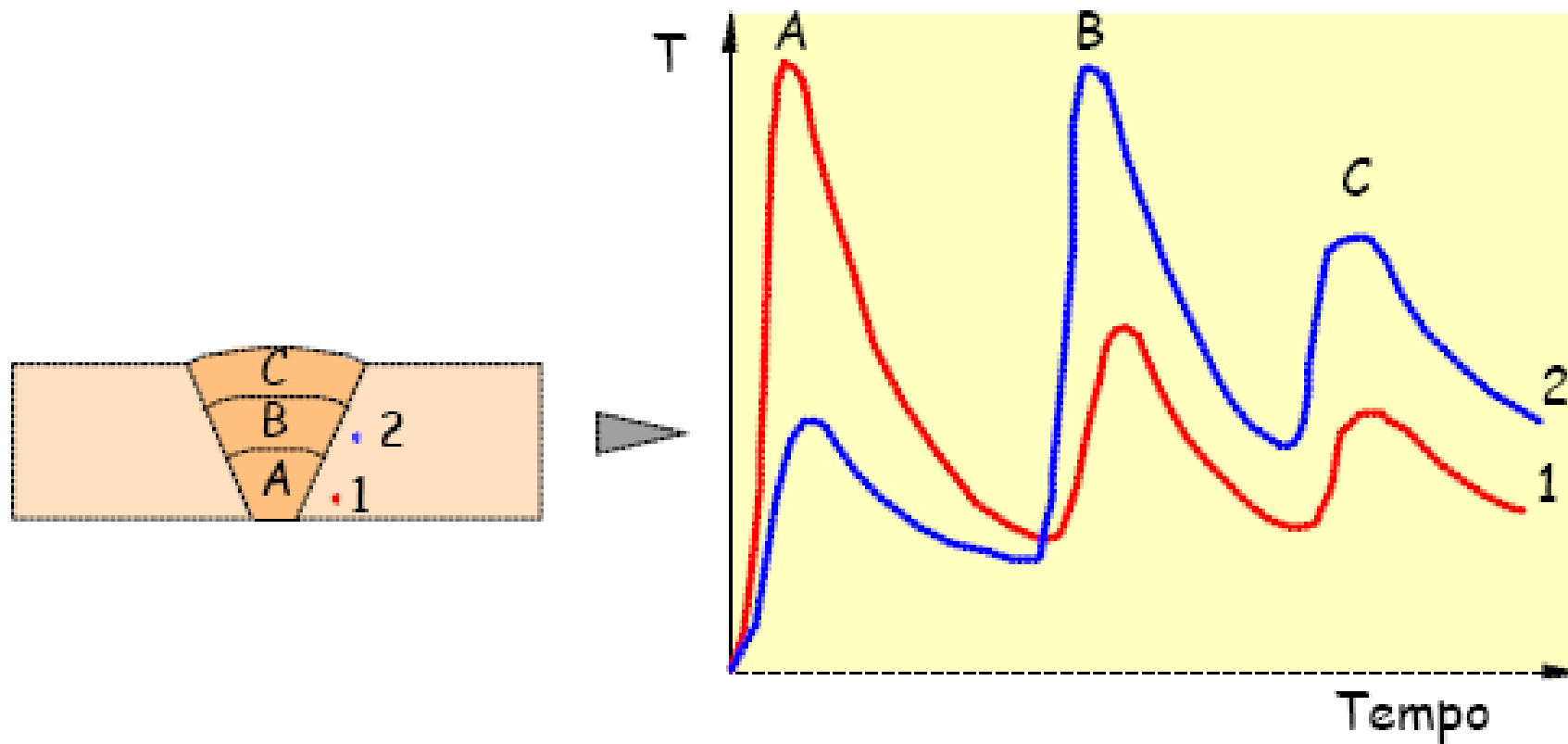


PreAquecimento com resistência elétrica

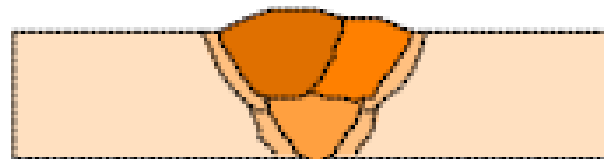


Ciclos Térmicos na Soldagem

Soldas de Vários Passes:



1 passe



3 passes

Diagrama WRC-1992

Permite prever a estrutura da poça de solidificação que utiliza os cálculos de Cr_{eq} e Ni_{eq} .

Ainda neste diagrama observa-se 4 formas de solidificação:

A = austenita como fase primária e monofásica,

F = ferrita como fase primária e monofásica,

AF = austenita primária e um eutético de austenita e ferrita no espaço interdendrítico,

FA = ferrita primária e um eutético de austenita e ferrita no espaço interdendrítico.

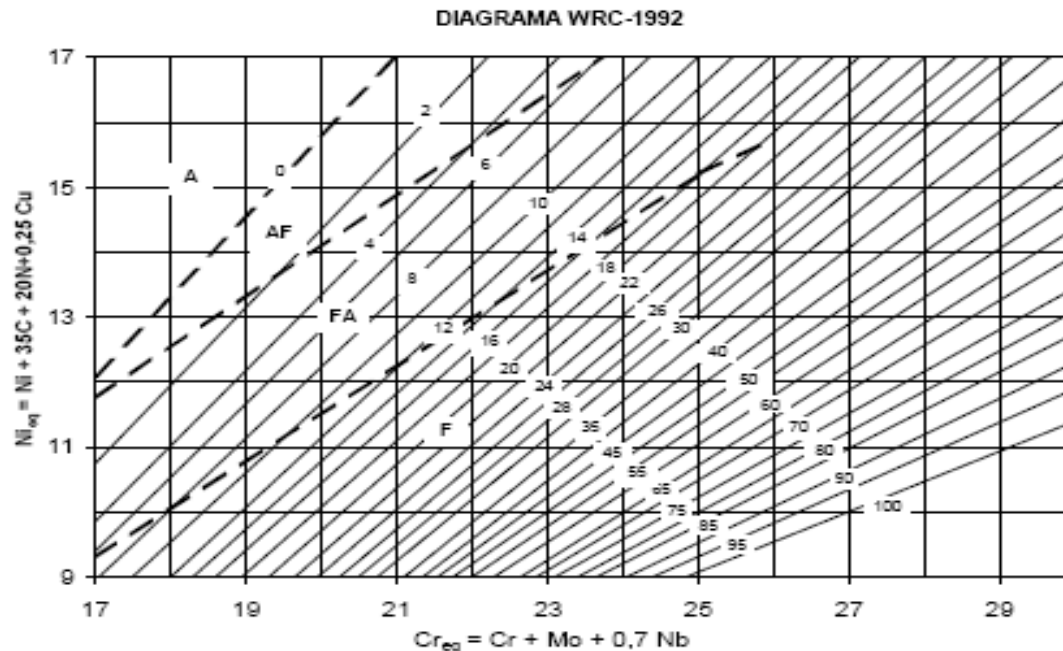


Diagrama WRC-1992

Finalmente, o efeito do cobalto não é considerado pelos diagramas de Schaeffler e WRC.

No entanto o cobalto é um importante elemento para a resistência à cavitação. Assim desenvolveu-se, a partir do diagrama de Schaeffler, o diagrama de Hull que inclui o cobalto e o manganês.

$$\mathbf{Nieq} = \mathbf{Ni} + (0,11\mathbf{Mn} - 0,0086\mathbf{Mn}^2) + + 14,2\mathbf{N} + 0,41\mathbf{Co} + 0,44\mathbf{Cu}$$

$$\mathbf{Creq} = \mathbf{Cr} + 1,21\mathbf{Mo} + 0,48\mathbf{Si} + 0,14\mathbf{Nb} + 2,27\mathbf{V} + 0,72\mathbf{W} + 2,20\mathbf{Ti} + 0,21\mathbf{Ta} + 2,48\mathbf{Al}$$

Previsão da formação de Martensita

Para realizar uma previsão da formação de martensita numa estrutura inox ferrítica é utilizado o diagrama de **KALTENHAUSER** que permite quantificar a martensita possível de ser formada nos aços inoxidáveis ferríticos durante o resfriamento.

Trata-se de um balanço entre elementos alfa-gêneos e gama-gêneos (Lacombe, 2000). Os números distribuídos de 30 a 100 representam a % de ferrita presente na estrutura do aço ferrítico.

Previsão da formação de Martensita

A equação para o aço 409, [segundo A. Mittal Inox Brasil] é dada por :

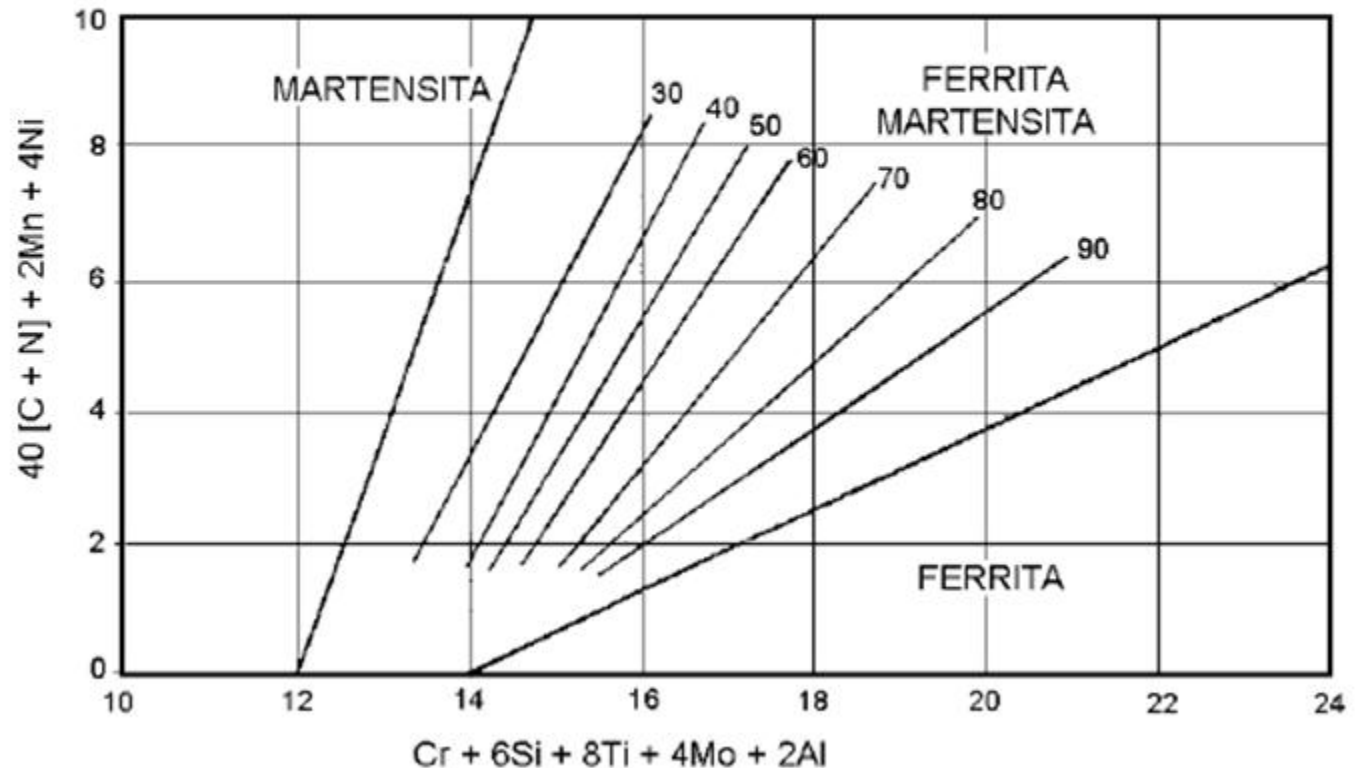
$$FK = (\%Cr + 6\%Si + 8\%Ti + 4\%Mo + 2\%Al) - [40 * (C + N) + 2\%Mn + 4\%Ni]$$

O $FK > 13$ garante estrutura completamente ferrítica.

Previsão da formação de Martensita

Fator Kaltenhauser

- $FK = (Cr + 6Si + 8Ti + 4Mo + 2Al) - [40(C + N) + 2Mn + 4 Ni]$



Curvas características do teor de ferrita/martensita em função da composição química

Soldagem dos aços martensíticos

FISSURAÇÃO DEVIDO À FORMAÇÃO DE MARTENSITA

- A presença de martensita, juntamente com tensões residuais e hidrogênio em solução, pode levar a formação de trincas. As trincas podem se formar tanto na ZF quanto na ZAC.
- O risco de trincamento está relacionado ao teor de carbono do material

Teor de Carbono (%)	0,068	0,133	0,206	0,45	0,6
Dureza Vickers (HV)	364	462	480	580	620

OBS: Aços inoxidáveis martensíticos com teor de carbono superior a 0,30% geralmente não são soldados devido à sua alta dureza.

Soldagem dos aços martensíticos

- **Trincamento a frio pelo hidrogênio**

- ▲ Baixa solubilidade de hidrogênio na martensita.
- ▲ Hidrogênio difunde em temperaturas próximas TA.
- ▲ Trincamento pode ocorrer em um tempo longo com relação ao momento da soldagem.

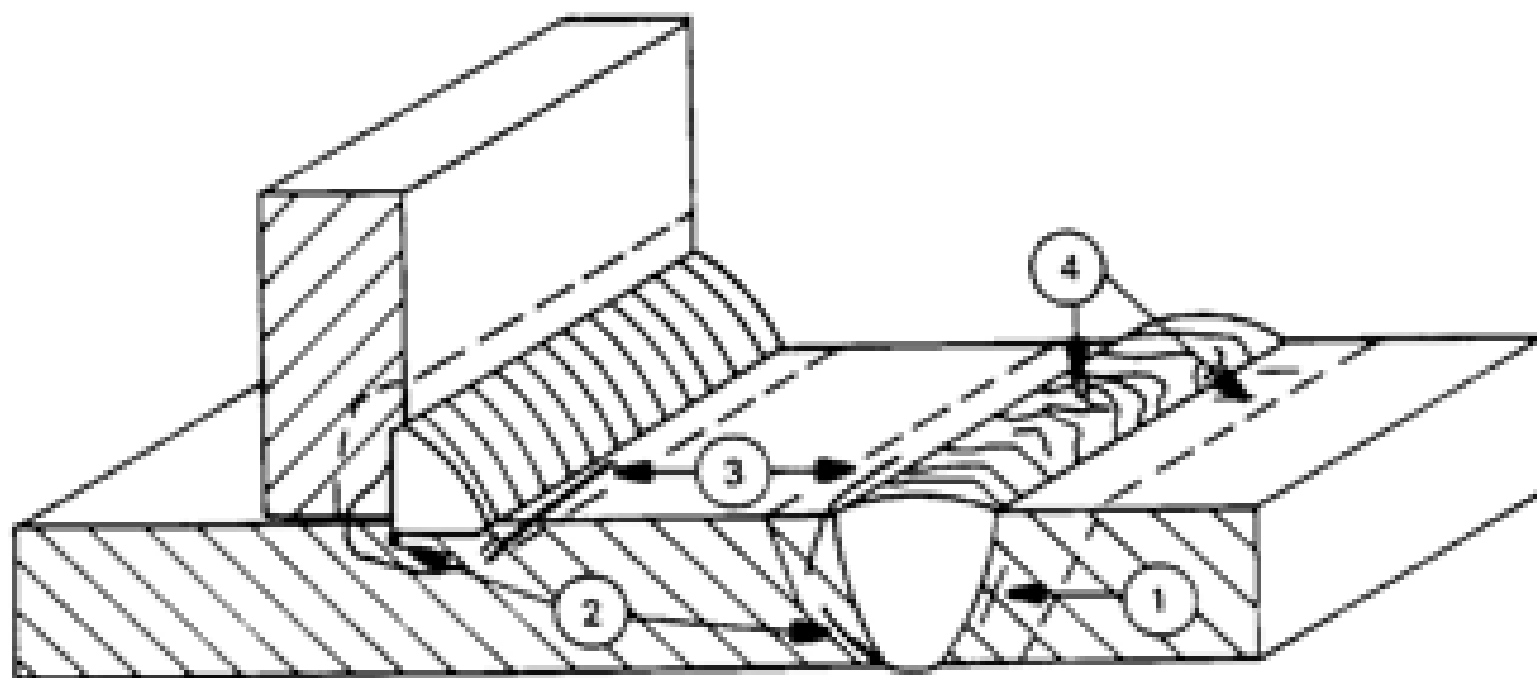
- ▲ **Formas de evitar o trincamento a frio pelo hidrogênio**

- ▲ Controle da micropureza (teor de H no aço)
- ▲ Pré aquecimento de 200 a 250°C -> possibilita que o hidrogênio absorvido na soldagem seja liberado;
- ▲ Energia de soldagem elevada -> TTAS (difusão do hidrogênio) evitando a queda da temperatura até a ambiente.
- ▲ Utilização de metal de adição austenítico

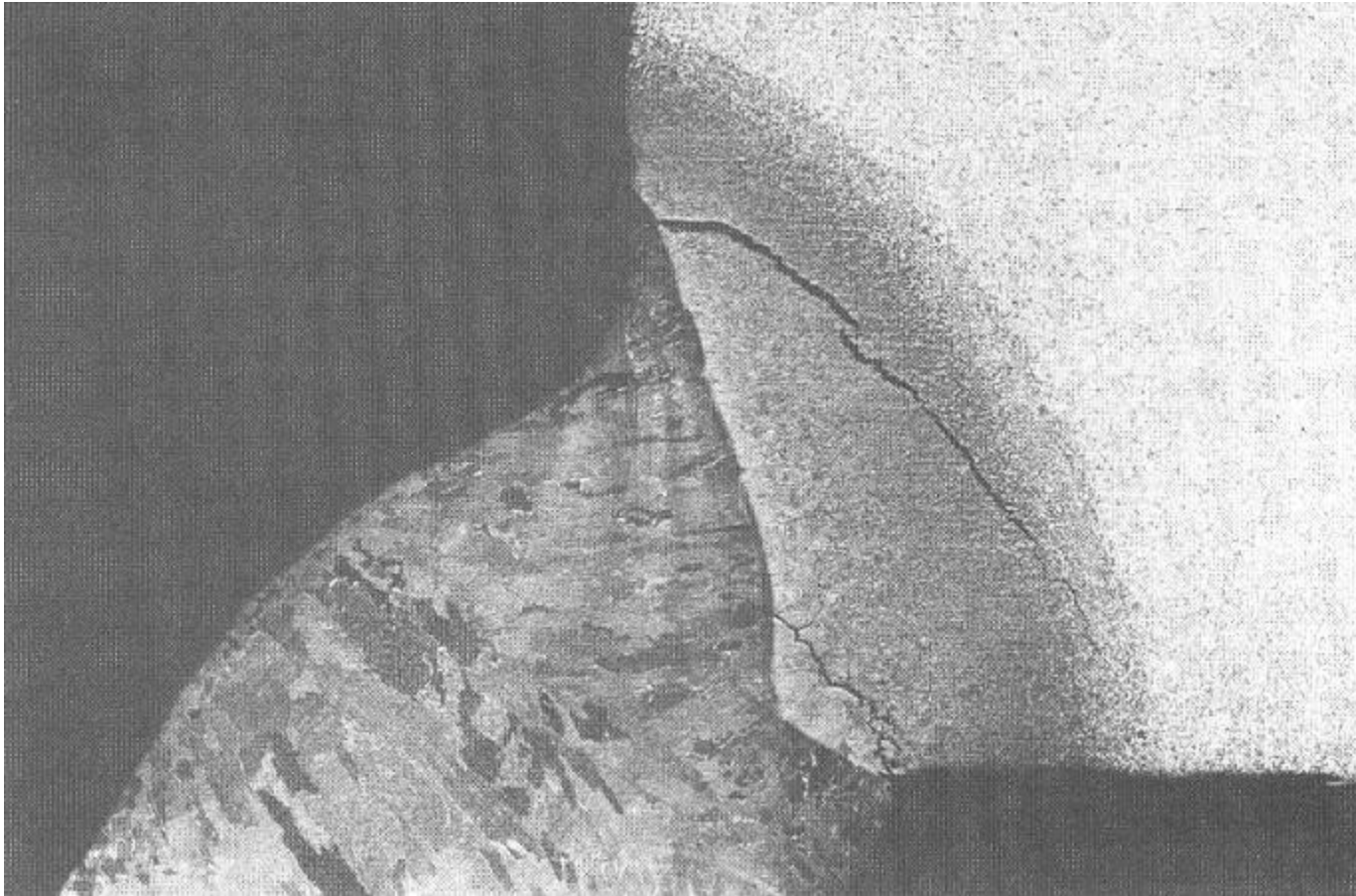
Soldagem dos aços martensíticos

PROCEDIMENTOS DE SOLDAGEM

- Elevada Temperabilidade - ZF e ZAC formam martensita no resfriamento
- Problemas relacionados à estrutura martensítica (trincas à frio)
- Teor de carbono - determina necessidade e parâmetros dos tratamentos de **pré e pós aquecimento**

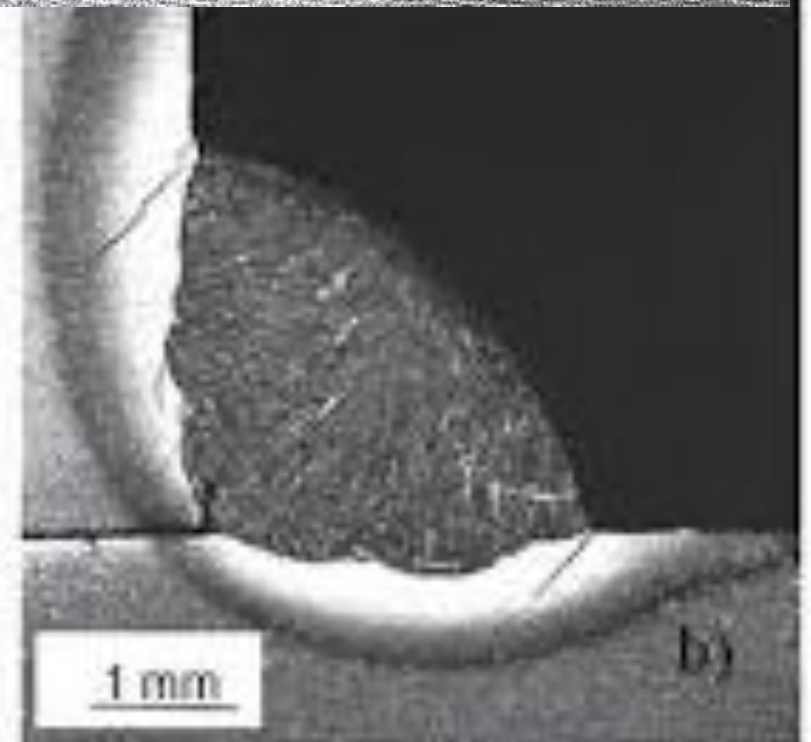
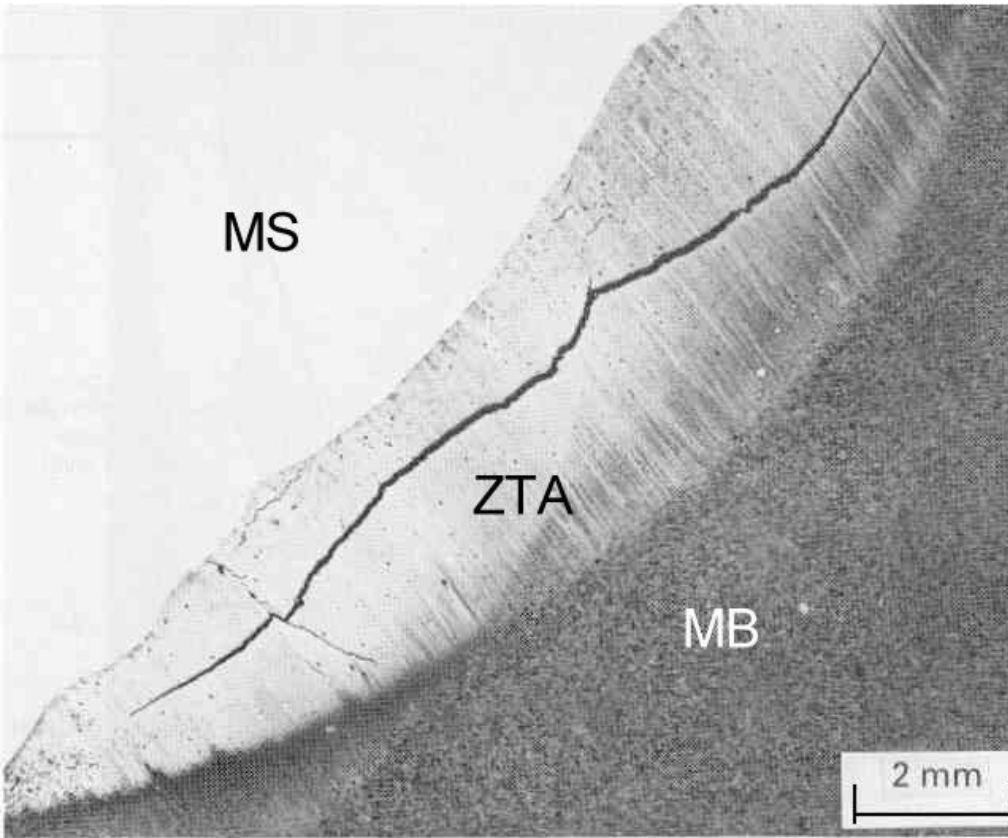


1. trinca sob cordão (underbead crack)
2. trincas na raiz (root cracks)
3. trincas na margem (toe cracks)
4. trincas transversais (transverse cracks)



Trincas por hidrogênio na zona termicamente afetada numa junta em ângulo feita com um eletrodo rutílico.

Trincas por hidrogênio na zona termicamente afetada



Soldagem dos aços martensíticos

PROCEDIMENTOS DE SOLDAGEM

- **Pré aquecimento da ordem do Mi (350 - 400°C)**
 - ▲ Diminuir velocidade de resfriamento (martensita);
 - ▲ Reduzir nível de tensões residuais;
 - ▲ Redução do teor de hidrogênio dissolvido.

Diagrama de Balmforth

Diagrama desenvolvido por Balmforth representa um incremento significativo na previsão da % de ferrita dos aços inoxidáveis martensíticos

