



SOLDAGEM DE AÇOS INOXIDÁVEIS

AULA 05

Soldagem em Aços Inoxidáveis Martensíticos

Prof.: Dr. Paulo Sergio Olivio Filho



PRÉ - AULA

- Acesse pelo site: pauloolivio.github.io/Solda

Soldagem de Aços Inoxidáveis

Soldagem de Aços Inoxidáveis Martensíticos

🏠 Página Principal

Soldagem de Aços Inoxidáveis Martensíticos

Conteúdo Abordado neste Tópico

Nesta aula sobre a soldagem de aços inoxidáveis martensíticos, exploraremos os princípios e desafios envolvidos na soldagem desse tipo específico de aço, conhecido por sua elevada dureza e resistência mecânica. Abordaremos uma contextualização, características químicas e metalúrgicas dos aços inoxidáveis martensíticos, a metalurgia da soldagem no processo de soldagem e o cálculo de cromo e níquel equivalente.

Este tópico é essencial para quem deseja entender as nuances da soldagem de aços inoxidáveis martensíticos e como garantir a integridade estrutural em aplicações críticas.

Página anterior Próxima página Page: 1 / 34

Ministério da Educação
UNIVERSIDADE TECNOLÓGICA FEDERAL DO PARANÁ
Campus Cornélio Procópio

UTFPR
CORNÉLIO PROCÓPIO

Pré-Aula

Utilize o material de estudo Pré-Aula

- [Highlights em audio-texto.](#)

Ferramentas e Atividades

Jogos, calculadoras e Quizzes para aplicação e fixação do conteúdo da aula.

- [Calculadora - Diagrama Schaeffler](#)
- [Flash Cards](#)

**Use o QR code para
acessar o site**

**Sempre realize a pré-aula ouvindo o resumo
do conteúdo ou lendo o flash cards.**

CONTEÚDO DA AULA

- Contextualização e aplicações dos aços inoxidáveis martensíticos
- Classificação dos aços inoxidáveis martensíticos
- Ligas e consumíveis para soldagem de aços inoxidáveis martensíticos
- Estudo de Caso
- Metalurgia
- Metalurgia da Soldagem
- Precipitações em aços inoxidáveis martensíticos
- Diagrama Schaeffler e cálculo do Cromo x Níquel equivalente
- Atividade avaliativa

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- FOLKHARD, E. Welding Metallurgy of Stainless Steels. Springer, 1988. DOI: 10.1007/978-3-7091-8965-8.
- KOU, S. Welding Metallurgy. 2nd ed. Wiley, 2002.
- LIPPOLD, J.C.; KOTECKI, D.J. Welding Metallurgy and Weldability of Stainless Steels. Wiley, 2005. ISBN 0-471-46035-6.
- ABINOX. Associação Brasileira do Aço Inoxidável. Disponível em: <https://abinox.org.br/>. Acesso em: 17 ago. 2024.
- GONÇALVES, F. Rotores de turbinas hidráulicas para usinas. LinkedIn, [s.d.]. Disponível em: <https://pt.linkedin.com/pulse/rotores-de-turbinas-hidráulicas-para-usinas-flávio-gonçalves>. Acesso em: 17 ago. 2024.

INTRODUÇÃO E CONTEXTUALIZAÇÃO

Para que servem os aços inoxidáveis martensíticos?

- Peças de automóveis;
- Componentes de aeronaves;
- Tubulações para indústria Offshore
- Pás de turbinas



Imagens: <https://abinox.org.br/>



Imagem: <https://pt.linkedin.com/pulse/rotores-de-turbinas-hidráulicas-para-usinas-flávio-gonçalves>

INTRODUÇÃO E CONTEXTUALIZAÇÃO

Outras aplicações dos aços inoxidáveis martensíticos.

- Facas e garfos;
- Utensílios de cozinha
- Ferramentas cirúrgicas;
- Ferramentas industriais;
- Gaiolas industriais e para animais de estimação;
- Relógios e anéis.



AÇOS INOXIDÁVEIS MARTENSÍTICOS

Como são classificados os aços martensíticos?

Aço martensítico de baixo carbono e martensíticos macios.

- Possui teor de carbono entre 0,05% a 0,25% e Cromo de 12-15%
- Os aços martensíticos macios possuem melhor tenacidade que ferríticos e outros martensíticos
- Oferecem boa resistência à corrosão e tem maior potencial de fabricação e soldabilidade.

Aço martensítico de alto carbono

- Possuem teor de carbono entre 0,61% e 1,50% e Cromo de 16-18%
- Possuem maior dureza, maior resistência a abrasão e menor tenacidade que os martensíticos de baixo carbono
- Oferecem boa resistência a corrosão e baixa soldabilidade devido alto risco de fratura a frio.

Qual o efeito da composição química em aço inox martensítico?

- **Cromo 12%** - Garante proteção contra corrosão após tratamento superficial
- **Ligas com Carbono 0,10-0,25%** - Gera uma estrutura martensítica com um máximo de 30% de ferrita delta.
- **Carbono $< 0,06\%$** - Gera dureza máxima 38 HRC e baixo risco de fratura a frio na soldagem.
- **Carbono de 0,06 - 0,30%** - Apresenta dureza como soldado entre 35-55 HRC, podendo ter maior risco de trincas a frio. Sugerido pré-aquecimento entre 200°C a 300°C.
- **Carbono $> 0,30\%$** - Dureza “como-soldado” 55-65 HRC. Necessita de cuidados especiais para evitar trincas a frio.
- **Ligas com Níquel 4-6% e Carbono 0,06%** - Reduz o teor de ferrita delta entre 1-4% FN.
- **Mo, V, W, Nb** - conferem resistência à alta temperatura e formação de carbonetos estáveis.

AÇOS INOXIDÁVEIS MARTENSÍTICOS

Quais as ligas e sua utilização comum?

Usos comuns :

- Cutelarias, lâminas de faca (tipo 410, 420);
- Componentes do motor (tipo 410);
- Instrumentos cirúrgicos (tipo 420);
- Discos de freio (tipo 420);
- Eixos (tipo 410, 440).

Type	UNS No.	Composition (wt%) ^a					
		C	Cr	Mn	Si	Ni	Other
403	S40300	0.15	11.5–13.0	1.00	0.50	—	—
410	S41000	0.15	11.5–13.5	1.00	1.00	—	—
410NiMo	S41500	0.05	11.4–14.0	0.50–1.00	0.60	3.5–5.5	0.50–1.00 Mo
414	S41400	0.15	11.5–13.5	1.00	1.00	1.25–2.50	—
416	S41600	0.15	12.0–14.0	1.25	1.00	—	0.15 S min., 0.6 Mo
420	S42000	0.15 min	12.0–14.0	1.00	1.00	—	—
422	S42200	0.20–0.25	11.5–13.5	1.00	0.75	0.5–1.0	0.75–1.25Mo, 0.75–1.25W, 0.15–0.3V
431	S43100	0.20	15.0–17.0	1.00	1.00	1.25–2.50	—
440A	S44002	0.60–0.75	16.0–18.0	1.00	1.00	—	0.75 Mo
440B	S44003	0.75–0.95	16.0–18.0	1.00	1.00	—	0.75 Mo
440C	S44004	0.95–1.20	16.0–18.0	1.00	1.00	—	0.75 Mo
CA-15	—	0.15	11.5–14.0	1.00	1.50	1.00	0.50 Mo
CA-6NM	—	0.06	11.5–14.0	1.00	1.00	3.5–4.5	0.40–1.0 Mo

^aA single value is a maximum.

Lippold, J.C., & Kotecki, D.J. (2005). Stainless Steel Welding: Metallurgy, Technology, and Practice. Wiley. ISBN 0-471-46035-6.

AÇOS INOXIDÁVEIS MARTENSÍTICOS

Quais os consumíveis de soldagem típicos?

AWS Classification	UNS No.	Composition (wt%) ^a						Base Metal
		C	Cr	Mn	Si	Ni	Mo	
E410-XX	W41010	0.12	11.0–13.5	1.0	0.90	0.7	0.75	410, CA-15
ER410	S41080	0.12	11.5–13.5	0.6	0.5	0.6	0.75	410, CA-15
E410TX-X	W41031	0.12	11.0–13.5	0.60	1.0	0.60	0.5	410, CA-15
E410NiMo-XX	W41016	0.06	11.0–12.5	1.0	0.90	4.0–5.0	0.40–0.70	410NiMo, CA-6NM
ER410NiMo	S41086	0.06	11.0–12.5	0.6	0.5	4.0–5.0	0.4–0.7	410NiMo, CA-6NM
E410NiMoTX-X	W41036	0.06	11.0–12.5	1.0	1.0	4.0–5.0	0.40–0.70	410NiMo, CA-6NM
ER420	S42080	0.25–0.40	12.0–14.0	0.6	0.5	0.6	0.75	420

^aA single value is a maximum.

Lippold, J.C., & Kotecki, D.J. (2005).

Percebam que não há consumíveis compatíveis com os **aços inoxidáveis martensíticos de alto teor de carbono**

Se por algum motivo eu tiver que reparar um peça feita de AISI 440. O que devo fazer?



JOGO: DECOLAR E ATERRISSAR

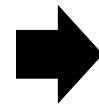
Se por algum motivo eu tiver que reparar um peça feita de AISI 440. O que devo fazer?

- Soldar o aço AISI 440, é uma tarefa fácil? ➡ Não, o material pode fraturar devido a formação martensítica
- Posso soldar o material com o AISI 420? ➡ Não, o material é menos nobre e induzirá martensita na solda.
- Posso soldar o material com um consumível austenítico compatível? ➡ Sim, pois a austenita é mais dúctil e absorve a tensão na formação martensítica.
- Posso soldar com eletrodo revestido (SMAW)? ➡ Sim, contudo, o fluxo não garante uma solda totalmente protegida, livre de oxidação e hidrogênio
- Posso usar eletrodo exposto a umidade? ➡ Não, a umidade do eletrodo, não garantirá a qualidade mínima da solda, produzindo mais oxidação e difusão do hidrogênio na poça fundida.

JOGO: DECOLAR E ATERRISSAR

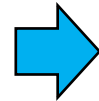
Se por algum motivo eu tiver que reparar um peça feita de AISI 440. O que devo fazer?

Soldar com TIG (GTAW) é a melhor opção?



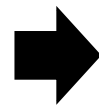
Sim, pois o processo é mais limpo, e reduz a possibilidade de fragilização a frio induzida por hidrogênio.

Realizar pré-aquecimento no metal de base é a coisa certa a se fazer?



Sim, pois o pré-aquecimento garantirá uma taxa de resfriamento mais lenta e atenuará a formação martensítica

Devo realizar tratamentos pós soldagem?



Sim, mas devo verificar a possibilidade de precipitação de fases frágeis ou fratura durante o revenido

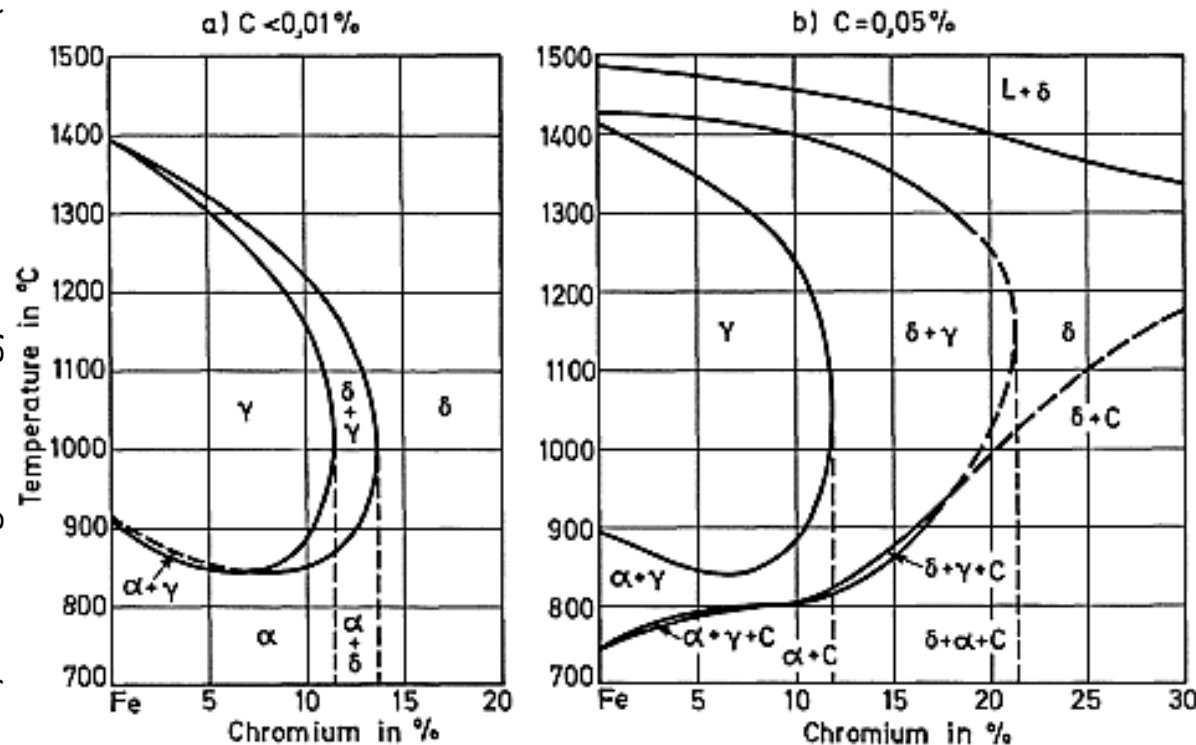
Como engenheiro e soldador, posso garantir uma peça reparada de qualidade?



Não, nesse caso, a solda é um procedimento provisório e a peça deve ser substituída

METALURGIA DO AÇO INOX MARTENSÍTICO

Diagramas Binários, Ternário e pseudo-binários



Binários: Em ligas complexas, o diagramas binários servem para dar um norte, mas não ajuda a prever todas as mudanças de fase da liga.

Ternários e pseudo-binários:
Excelentes para prever as mudanças de fases da liga complexa

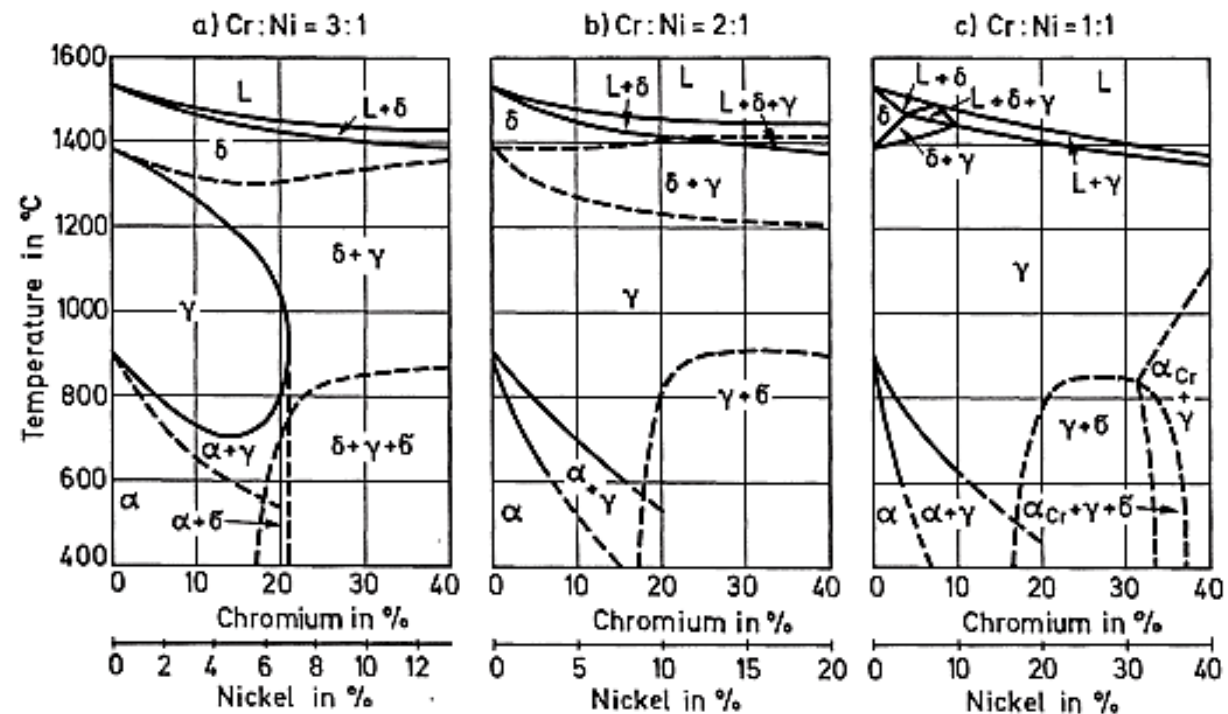
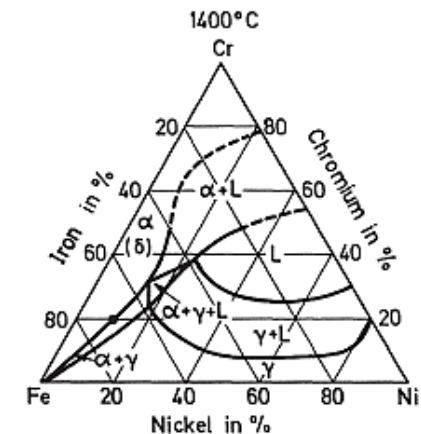
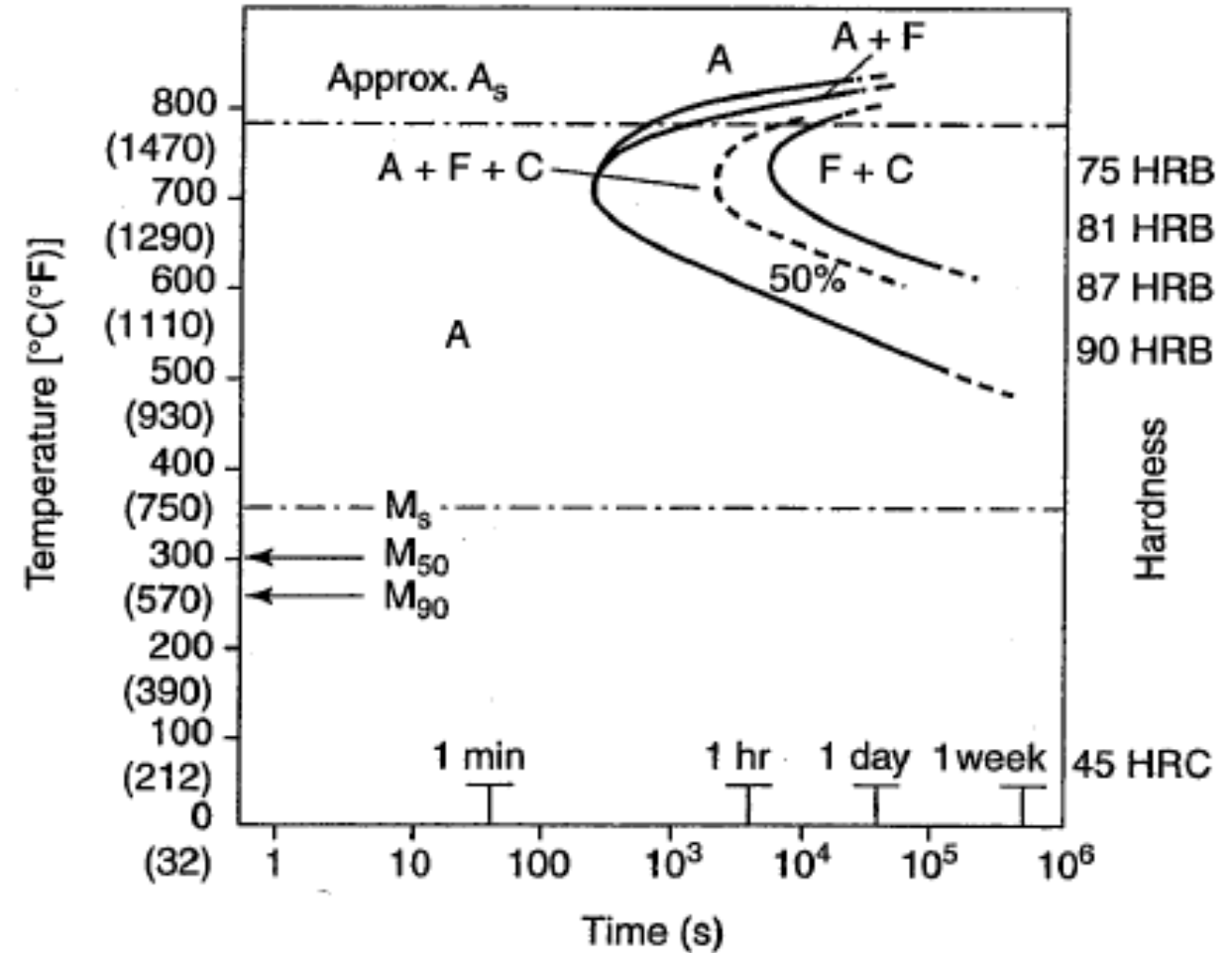


DIAGRAMA TTT – INOX MARTENSÍTICO

O “nariz” do diagrama TTT, mostra a curva de formação da ferrita que ocorre para tempos >100 s.

Sendo assim o aço é temperável ao ar, e na maioria das soldagens, forma-se martensita

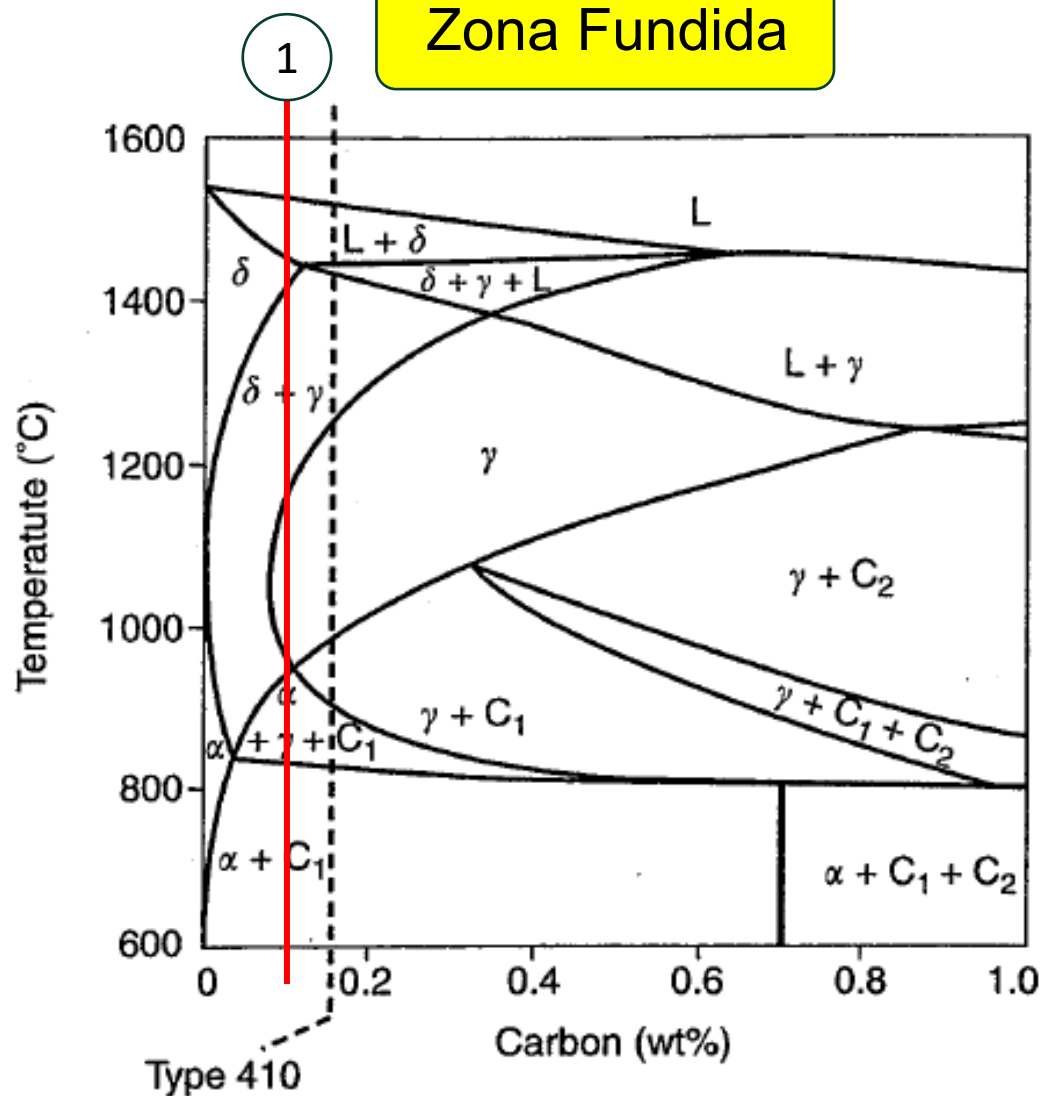
A porcentagem de elementos de liga desloca a isoterma M_s e M_f para temperaturas menores.



TTT - AISI 410

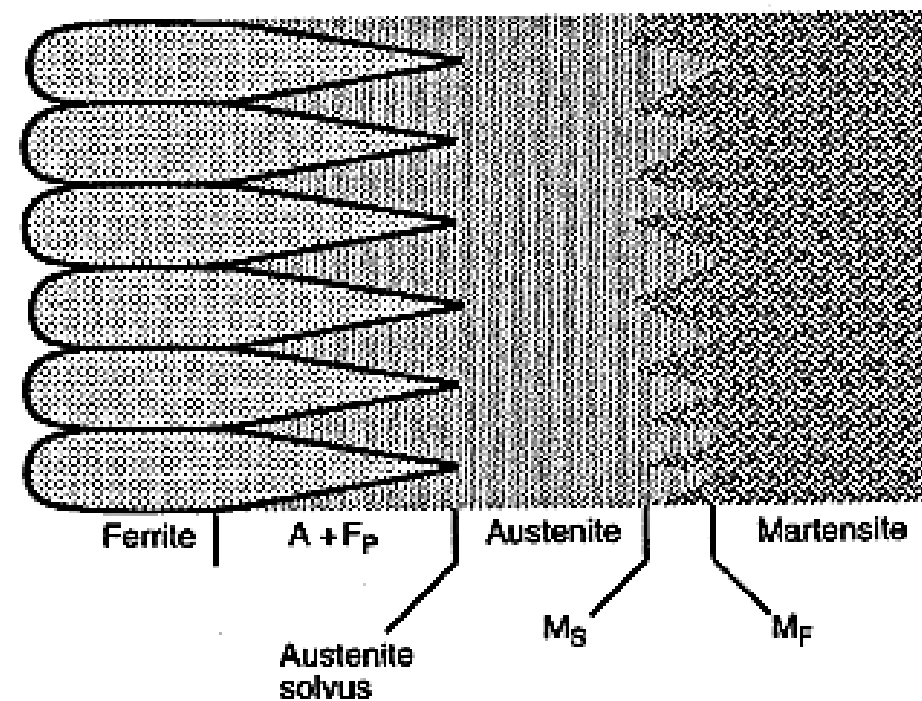
TRANSFORMAÇÃO NA SOLDAGEM

Zona Fundida



Caminho para transformação martensítica - 1

$L \rightarrow L + F_p \rightarrow F_p \rightarrow F_p + A \rightarrow A \rightarrow \text{martensita}$



Lippold, J.C., & Kotecki, D.J. (2005).

Diagrama pseudo-binário Fe-Cr-C -13Cr

TRANSFORMAÇÃO NA SOLDAGEM

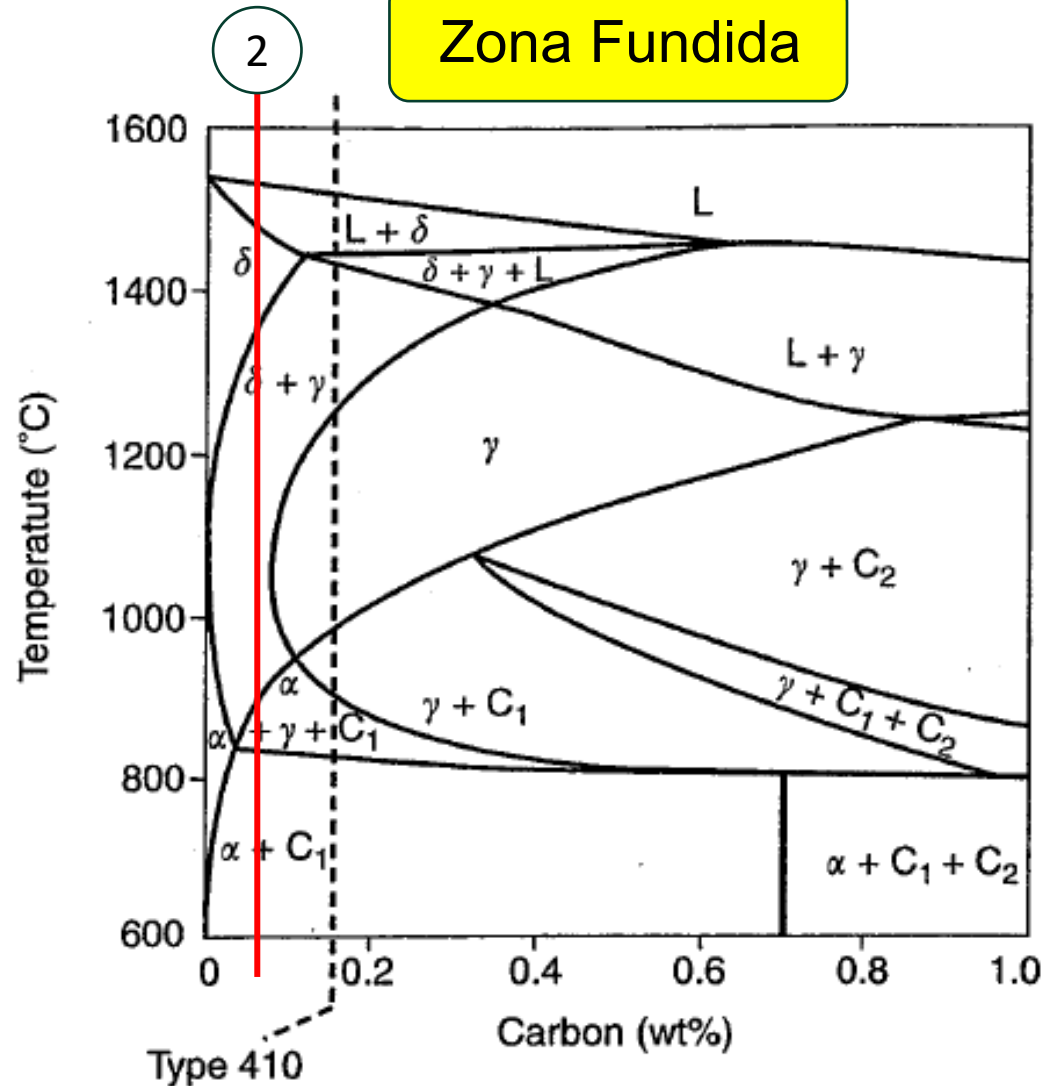
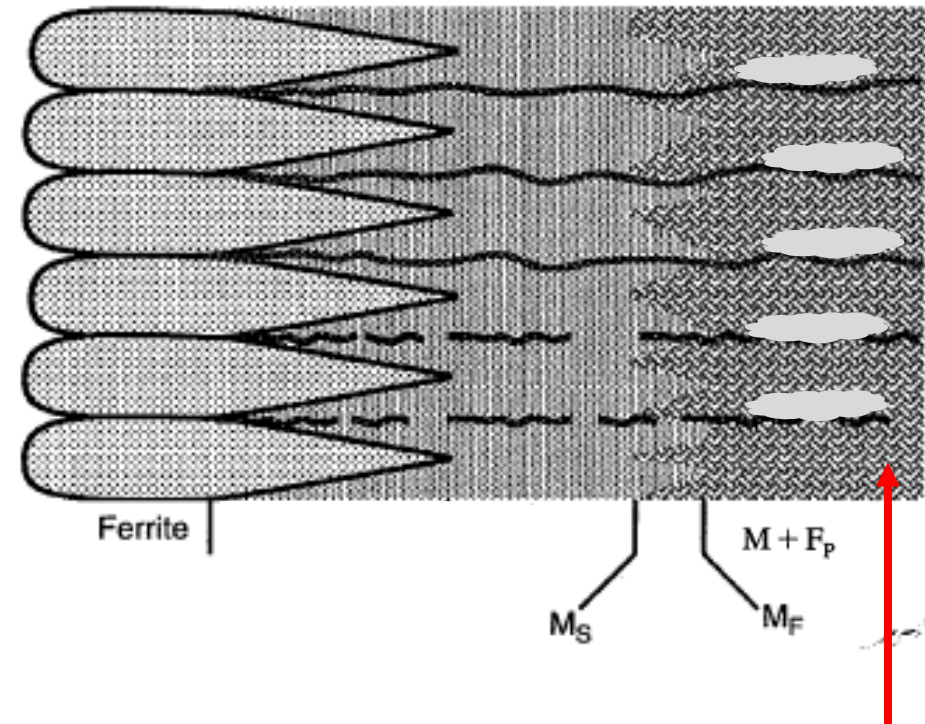


Diagrama pseudo-binário Fe-Cr-C - 17Cr



Martensita + ferrita primária

Caminho para transformação martensítica - 2



TRANSFORMAÇÃO NA SOLDAGEM

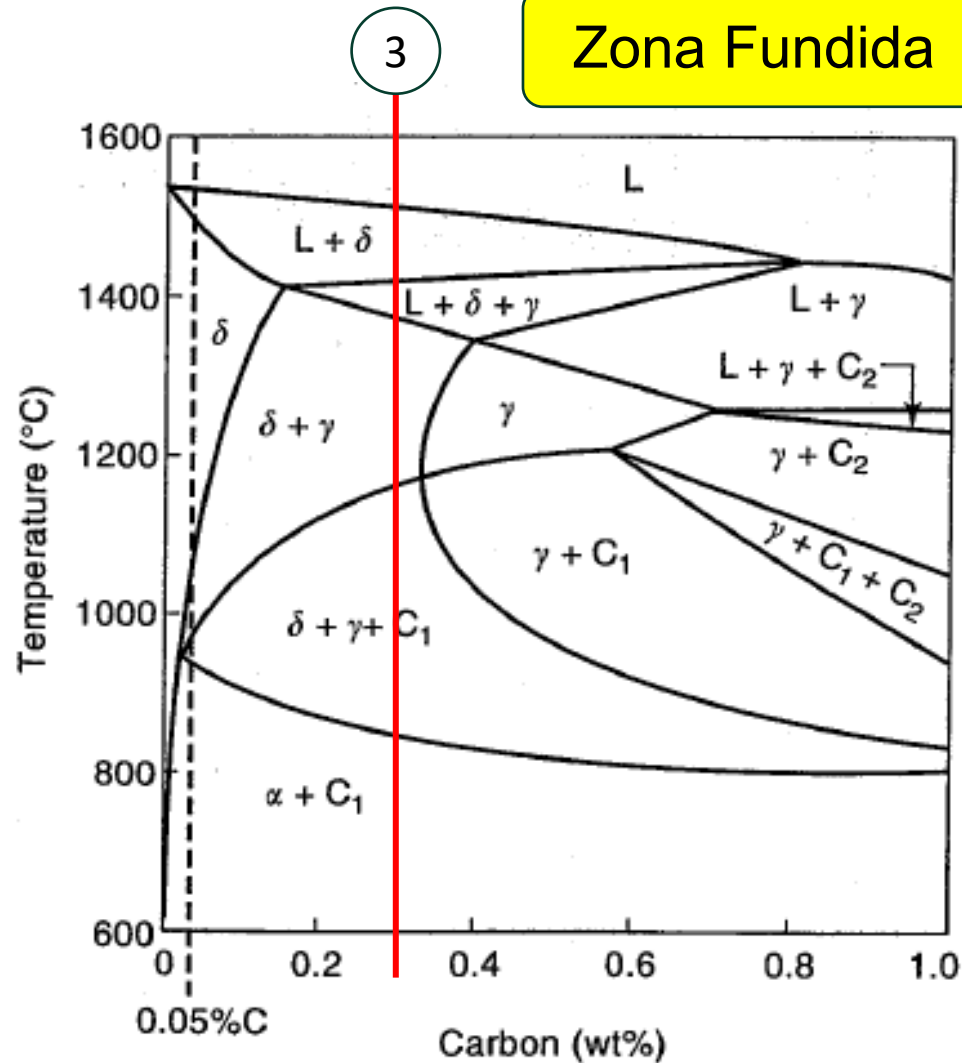
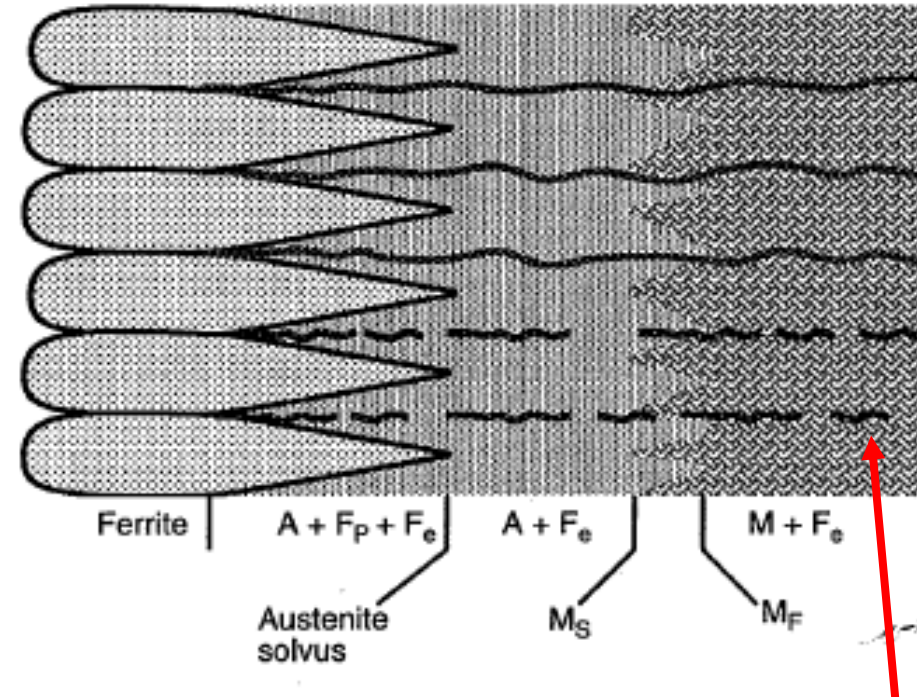


Diagrama pseudo-binário Fe-Cr-C - 17Cr



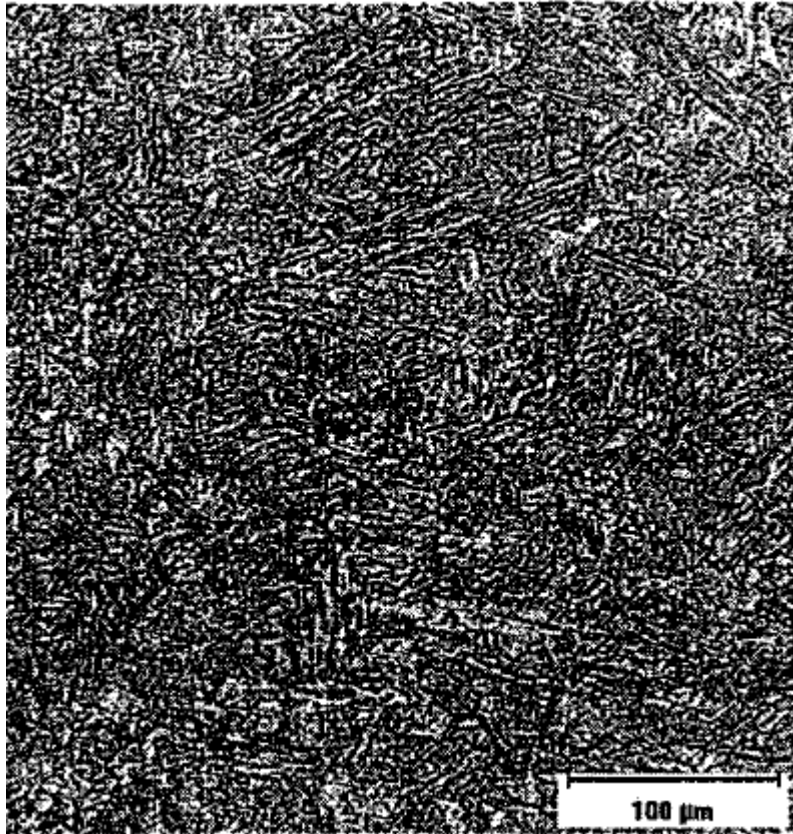
Martensita + ferrita eutética

Caminho para transformação martensítica - 3

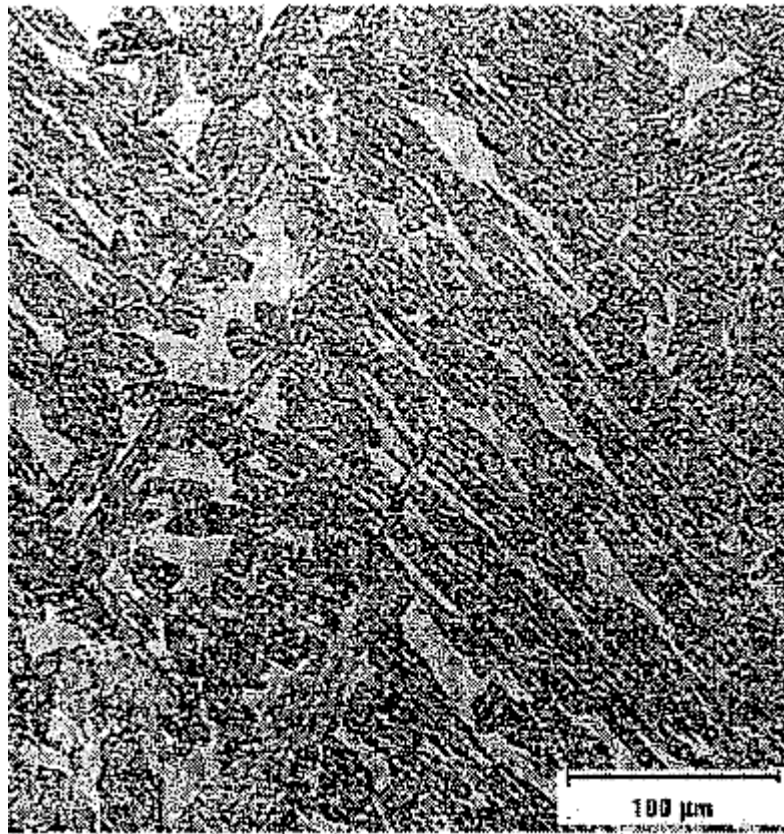


MICROESTRUTURA DA ZONA FUNDIDA

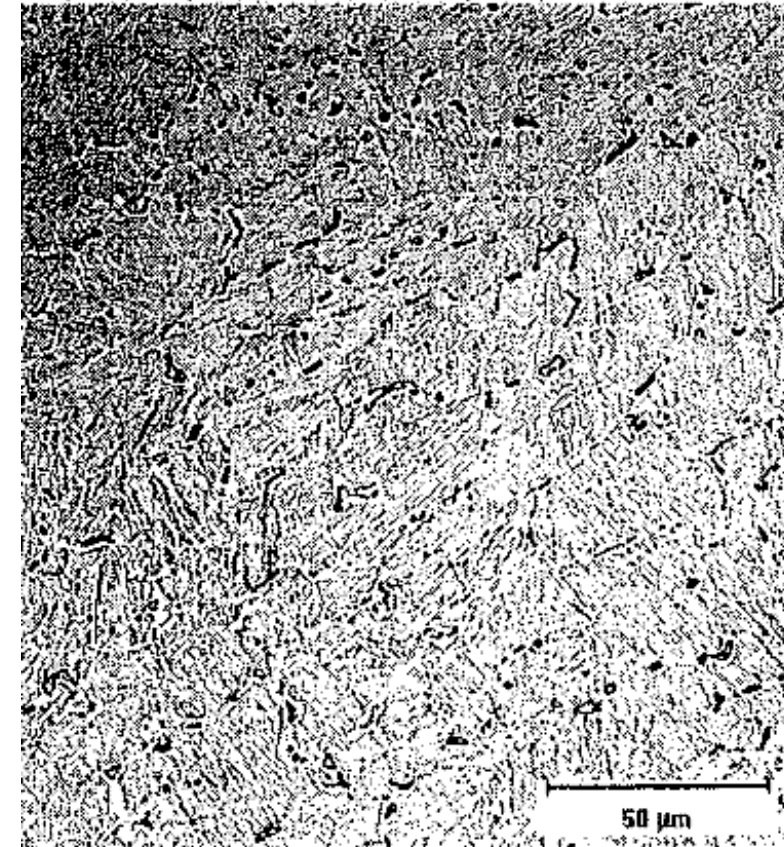
Formação total de Martensita.
Resíduo de 1 a 4% Fp



M + Ferrita
primária retida



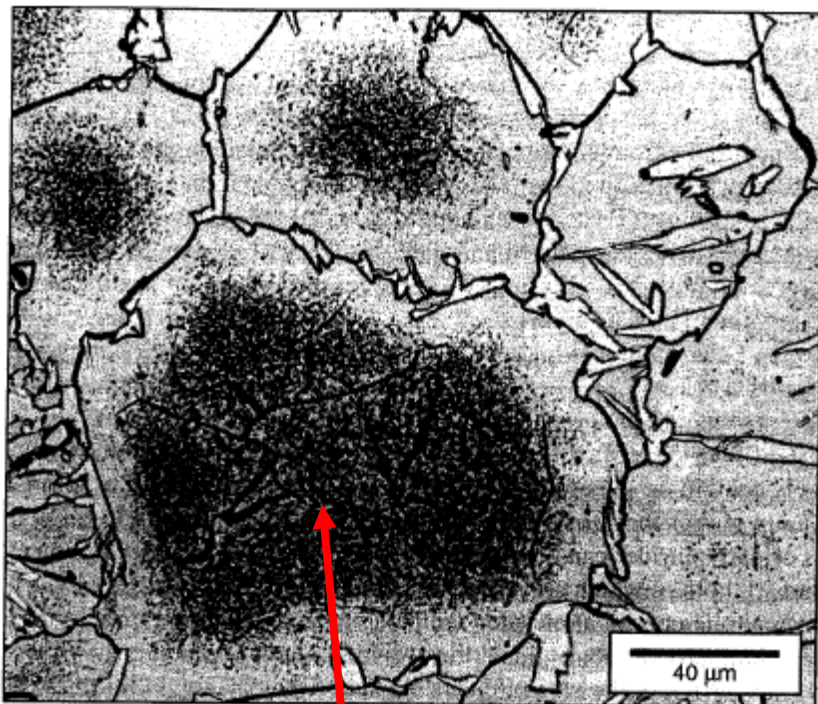
M + Ferrita eutética entre
os contornos de grão



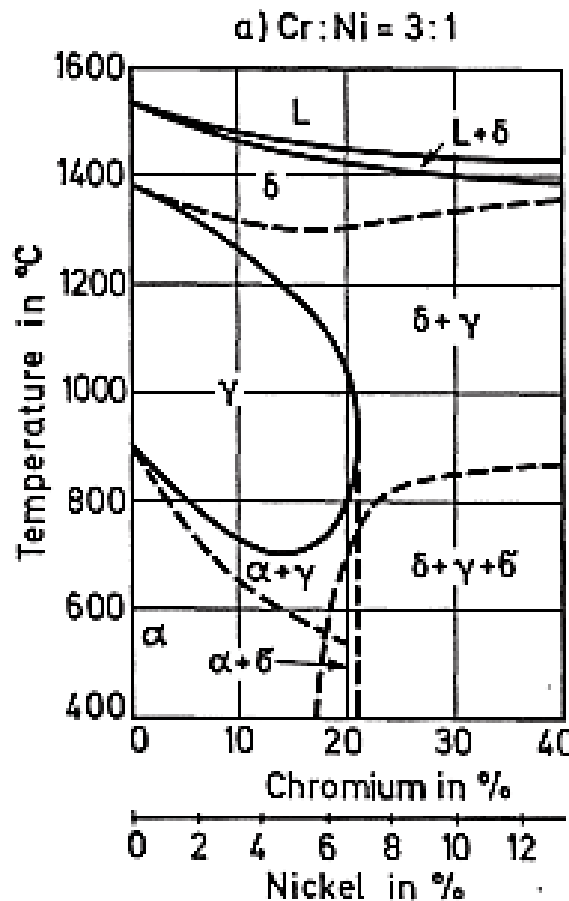
PRECIPITADOS EM AÇO INOX MARTENSÍTICO

Quais as precipitações que podem formar em aço inox martensítico?

Similar ao Aço Inox Ferrítico AISI 430



Carbonetos precipitam no interior do grão durante o revenido



Temperatura entre 600°C e 800°C

- Carboneto de Cromo - Cr₂₃C₆
- Fase Chi – Fe-Cr-Mo
- Fases Laves – Fe₂Cr
- Fase Sigma

Temperatura de 475°C

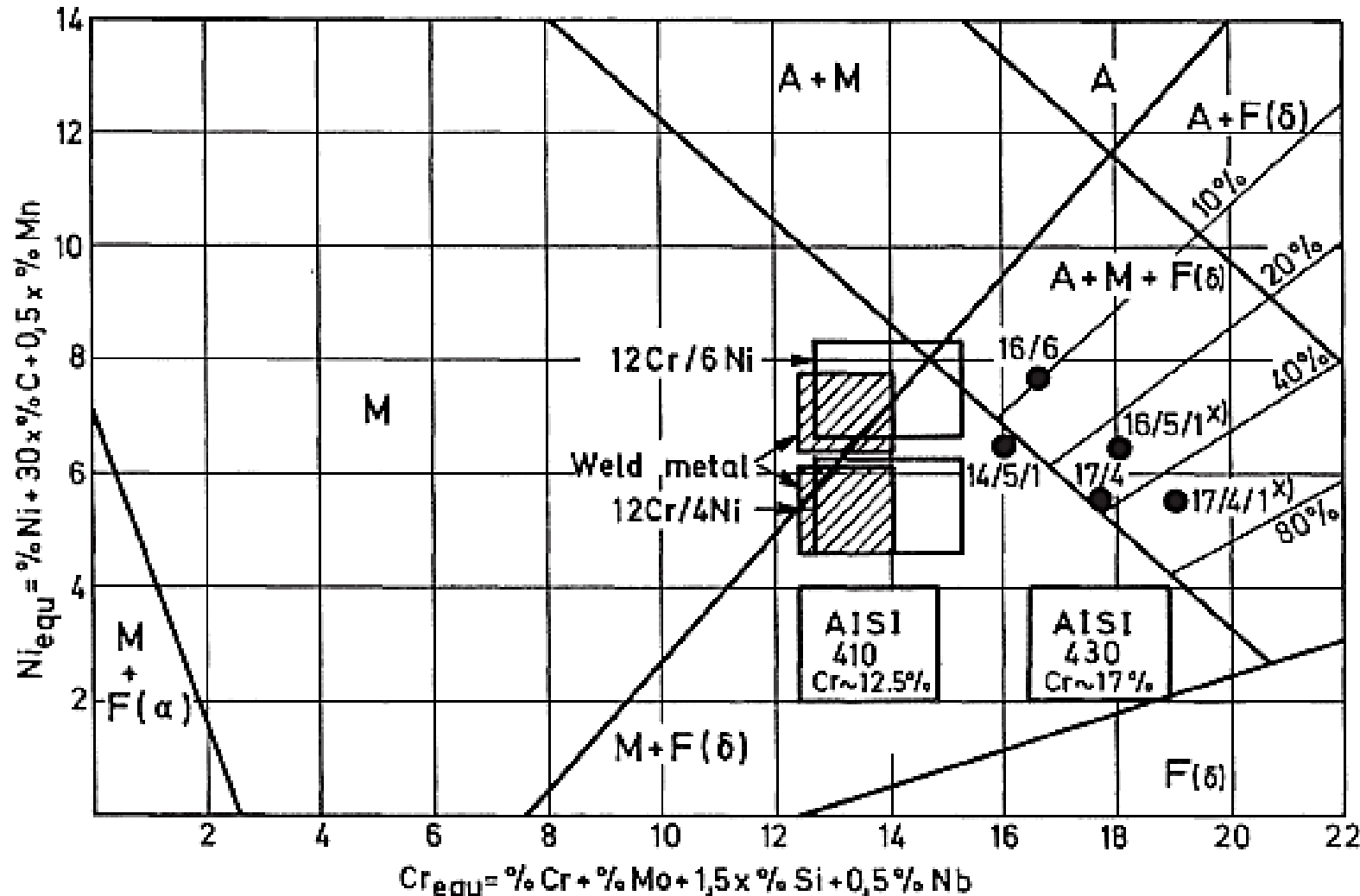
- Carbonetos – MC, M₂C

Pouca fragilização por fase sigma devido aos teores limitados de Cr.

Fragilização a 475°C ocorre apenas após tempos muito longos

ANALISANDO A ZONA FUNDIDA E DILUÍDA

Diagrama Schaeffler



Informe a fase e a composição Cr e Ni equivalente para uma diluição na soldagem de 30%

Calcule relação Cr x Ni equivalente para o metal de base e para o metal de adição:

- Metal de Base: 410NiMo
- Metal de adição: ER410NiMo

ANALISANDO A ZONA FUNDIDA E DILUÍDA

Utilize a calculadora on-line para o
feed-back da atividade



**Informe a fase e a composição Cr e
Ni equivalente para uma diluição
na soldagem de 30%**

Metal de Base – AISI 410 NiMo:

C: 0,05 % ; Cr: 11,4 % ; Ni: 3.5% ;

Mn: 1% ; Si: 0,6% ; Mo: 0,5%

Metal de adição – ER 410 NiMo - XX:

C: 0,06% ; Cr: 12,5% ; Ni: 5,0% ; Mn:

1% ; Si: 0,50 ; Mo: 0,7%

ANALISANDO A ZONA FUNDIDA E DILUÍDA

Passo 1: Identificar a composição química do metal de base e do metal de adição

Metal de Base – AISI 410 NiMo:

C: 0,05 % ; Cr: 11,4 % ; Ni: 3.5% ; Mn: 1% ; Si: 0,6% ; Mo: 0,5%

Metal de adição – ER 410 NiMo - XX:

C: 0,06% ; Cr: 12,5% ; Ni: 5,0% ; Mn: 1% ; Si: 0,50 ; Mo: 0,7%

Passo 2: Calcular o Cromo equivalente (Creq) e do Níquel equivalente (Nieq) do metal de base e metal de adição.

Metal de base - AISI 410 NiMo:

$$C_{req} = Cr + 1,5 \times Si + Mo = 11,4 + 0,9 + 0,5 = 12,8$$

$$Ni_{eq} = Ni + 30 \times C + 0,5 \times Mn = 3,5 + 30 \times 0,05 + 0,5 = 5,5$$

Metal de adição – ER 410 NiMo - XX:

$$C_{req} = Cr + 1,5 \times Si + Mo = 12,5 + 1,5 \times 0,5 + 0,7 = 13,95$$

$$Ni_{eq} = Ni + 30 \times C + 0,5 \times Mn = 5,0 + 30 \times 0,06 + 0,5 = 7,3$$

**MODELO
EXEMPLO PARA
DILUIÇÃO DE 30%**

ANALISANDO A ZONA FUNDIDA E DILUÍDA

Passo 3: Calcular a relação cromo-níquel na zona diluída.

- **Cálculo do Cromo Equivalente (Creq) da Zona Diluída**

$\text{Creq zona diluída} = (\text{Creq metal de base} \times 0,30) + (\text{Creq metal de adição} \times 0,70)$

$\text{Creq zona diluída} = (12,8 \times 0,30) + (13,95 \times 0,70)$

$\text{Creq zona diluída} = 3,84 + 9,765 = 13,60$

- **Cálculo do Níquel Equivalente (Nieq) da Zona Diluída**

$\text{Nieq zona diluída} = (\text{Nieq metal de base} \times 0,30) + (\text{Nieq metal de adição} \times 0,70)$

$\text{Nieq zona diluída} = (5,5 \times 0,30) + (7,3 \times 0,70)$

$\text{Nieq zona diluída} = 1,65 + 5,11 = 6,76\text{N}$

- **Resultado Final**

Creq da Zona Diluída: 13,605

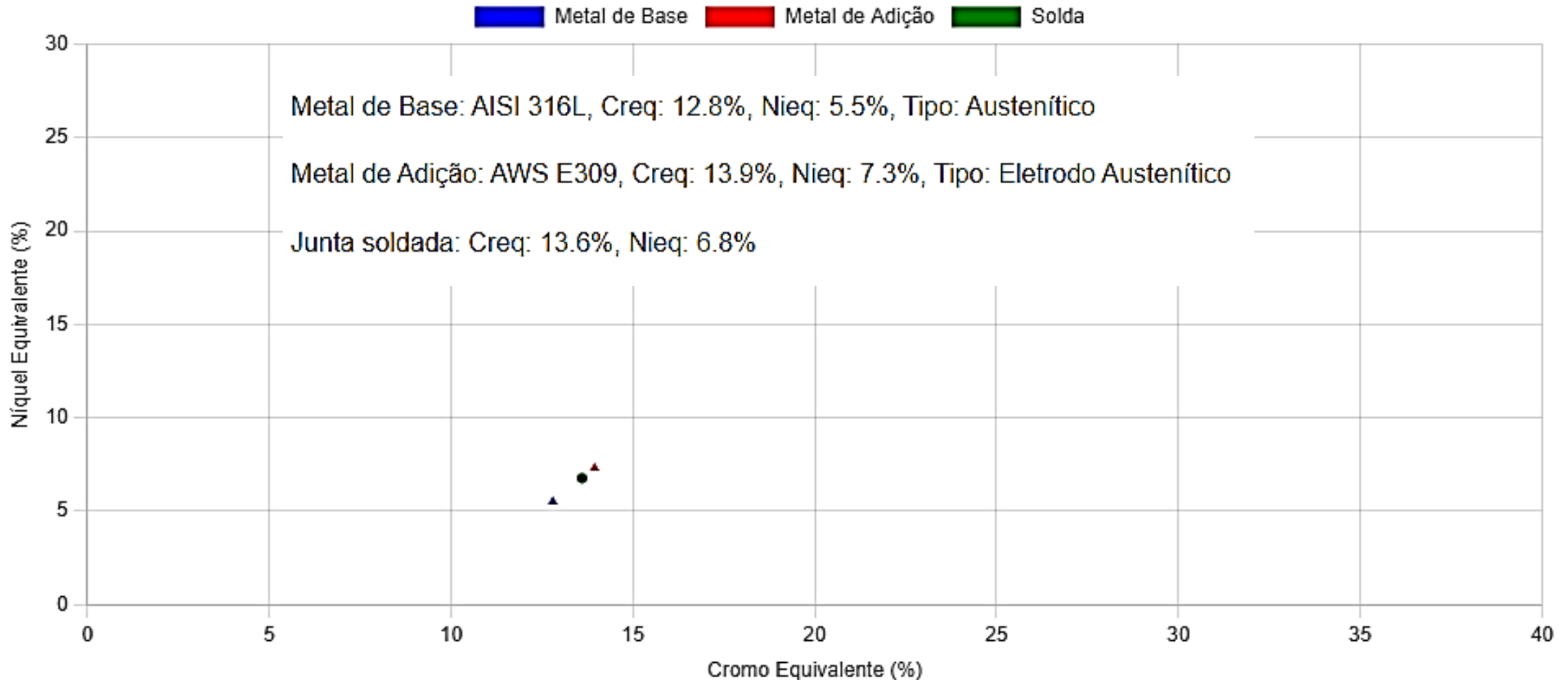
Nieq da Zona Diluída: 6,76

**MODELO
EXEMPLO PARA
DILUIÇÃO DE 30%**

ANALISANDO A ZONA FUNDIDA E DILUÍDA

Resultado

Diagrama de Schaeffler



ATIVIDADE AVALIATIVA EM EQUIPES

Quem não Solda, passa Cola!

Jogo de Flash Cards

Instruções:

1. Você serão separados em 2 equipes.
2. Cada aluno deverá responder uma questão.
3. O aluno poderá pedir cola no tempo arbitrado
4. As questões são aleatórias
5. Clique na carta para ver a pergunta.
6. Você tem 15 segundos para responder cada pergunta.
7. Responda a pergunta em voz alta.
8. Clique sobre o cartão para ver a resposta.
9. Clique mais uma vez para ir para a próxima pergunta.
10. O jogo termina após 10 perguntas.
11. A equipe que mais acertar as respostas, vence.

Começar o Jogo

O professor irá separar aleatoriamente as equipes



**A equipe campeã
receberá um prêmio**

A nota será proporcional ao número de acertos das equipes.