



União de Materiais Dissimilares

Prof. Paulo J. Modenesi
Departamento de Engenharia Metalúrgica e de Materiais
Universidade Federal de Minas Gerais

1




União de Materiais Dissimilares

Ementa (4 horas-aula):

Fundamentos da união de materiais dissimilares e os problemas envolvidos (com ênfase na uniões de aço inox ou aço alta liga com aço comum ao carbono, ligas de Cu-Ni com aço ao carbono e aço Inox, ligas de Ni com aço ao carbono, aço inox com ligas de Cobre, aço com alumínio e suas ligas, cobre com alumínio e suas ligas, e níquel com cobre); Diluição; Problemas gerais de soldabilidade e soluções (formação de compostos intermetálicos, migração de carbono, etc.); Aplicação de diagramas de Schaeffler/ De Long para soldar matérias dissimilares; Consumíveis; Procedimentos e técnicas de união; Falhas em serviço (fadiga térmica, desaderência, etc.).

(4 horas-aula)


2

 Associação Brasileira de Soldagem

Introdução

Aplicações:

- Transições em:
 - Propriedades mecânicas
 - Resistência à corrosão
 - Função
 - Desempenho em geral
- União de materiais de soldabilidade complicada
- União de materiais revestidos





Otimizar:

- Desempenho,
- Vida útil
- Custo

3

MMAT 25
(UNIÃO DE MATERIAIS DISSIMILARES)



 Associação Brasileira de Soldagem


Introdução

Métodos de Soldagem:

- **Soldagem por fusão:**
 - Composição da ZF é determinada pela contribuição dos MB(s) e MA(s)
 - Diferença de propriedades → Soldagem/Serviço
 - Importância na seleção de consumíveis e do procedimento de soldagem
 - Limitação nas combinações possíveis!
- **Soldagem por deformação:**
 - Menor influência das composições dos MBs (flexibilidade↑)
 - Diferença de propriedades continua importante no serviço
 - Considerar limitações dos processos específicos!

4

MMAT 25
(UNIÃO DE MATERIAIS DISSIMILARES)



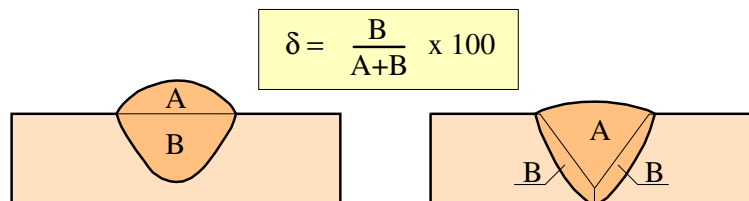


Soldagem por Fusão (Fundamentos Gerais)

Diluição

$$\delta = \frac{\text{Massa fundida do metal base}}{\text{Massa total do cordão de solda}} \cdot 100 (\%)$$

Determinação Experimental:



5



Soldagem por Fusão (Fundamentos Gerais)

Diluição

$$\delta = \frac{\text{Massa fundida do metal base}}{\text{Massa total do cordão de solda}} \cdot 100 (\%)$$

Efeito na Composição do Metal de Solda:

Sem interação
com o ambiente:

$$\% X = \left(1 - \frac{\delta}{100}\right) \cdot \% X_A + \left(\frac{\delta}{100}\right) \cdot \% X_B$$

Com interação
com o ambiente:

$$\% X = \left(1 - \frac{\delta}{100}\right) \cdot (\% X_A + \Delta X) + \left(\frac{\delta}{100}\right) \cdot \% X_B$$

6



Soldagem por Fusão (Fundamentos Gerais)

Diluição

Processo de Soldagem	Diluição (%)
Eletrodo revestido (básico)	20 – 30
Eletrodo revestido (rutílico)	15 – 25
Soldagem MIG/MAG	10 – 50
Arco Submerso	40 – 70
Arco submerso (tira)	10 – 20
Eletroescória (tira)	7 – 16
Soldagem TIG	0 – 100

7



Soldagem por Fusão (Fundamentos Gerais)

Diluição

Considere a soldagem de uma junta de aço inoxidável 316 com um aço 2,25Cr-1Mo usando um metal de adição ERNiCr3. Estime a composição da ZF supondo 35% de diluição (20% do aço 316 e 15% do aço Cr-Mo).

	%Cr	%Ni	%Mo	%Fe
Aço Cr-Mo	2,5	--	1,0	95,5
Aço 316	17,0	12,0	2,5	63,0
ERNiCr3	20,0	72,0	--	3,0

8



Soldagem por Fusão (Fundamentos Gerais)

Diferenças de Propriedades Físicas

Propriedade	Cobre	Alumínio	Inox Aust.	70Ni-30Cu
Coef. de exp. térmica	1,4	1,9	1,3	1,2
Condutividade térmica	7,8	3,1	0,3	0,5
Calor específico	0,8	1,9	1,0	1,1
Densidade	1,1	0,3	1,0	1,1
Temperatura de fusão	0,7	0,4	0,9	0,9

Valor relativo ao aço de baixo carbono

9



Soldagem por Fusão (Fundamentos Gerais)

Propriedades Físicas: Temperatura de Fusão

- Maior diferença →
- Dificuldade de controle da poça
 - Em geral, maior incompatibilidade metalúrgica
 - Tendência à formação de trincas de liquação

Propriedades Físicas: Condutividade Térmica

Maior valor → Maior dificuldade de fusão

Soluções → Direcionar arco para maior condutor
Pré-aquecer

10

Soldagem por Fusão (Fundamentos Gerais)

Propriedades Físicas: Coeficiente de Expansão Térmica

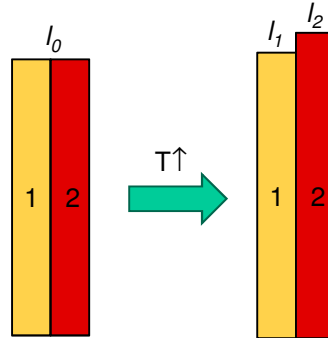
Valores diferentes → Tensões térmicas

Ciclagem térmica → Fadiga térmica

$$l_1 - l_0 = \alpha_1 l_0 \Delta T$$

$$l_2 - l_0 = \alpha_2 l_0 \Delta T$$

$$l_2 - l_1 = (\alpha_2 - \alpha_1) l_0 \Delta T \rightarrow \sigma_T$$



Remédio: - Amanteigamento/ZF de características intermediárias
- Juntas de transição

11

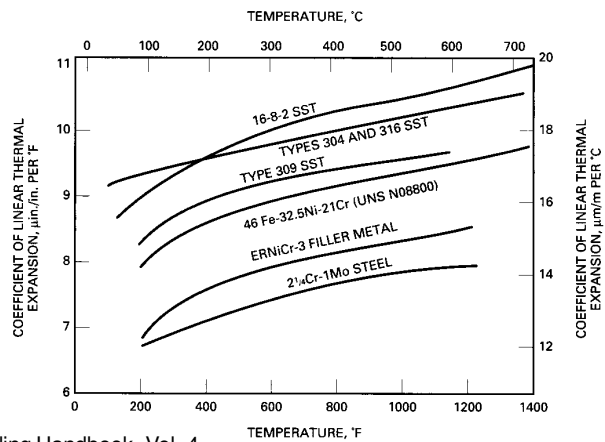


Soldagem por Fusão (Fundamentos Gerais)

Propriedades Físicas: Coeficiente de Expansão Térmica

Valores diferentes → Tensões térmicas

Ciclagem térmica → Fadiga térmica



Fonte: Welding Handbook, Vol. 4

12





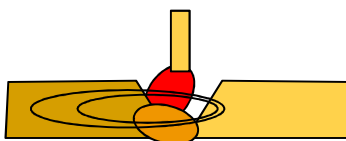
Soldagem por Fusão (Fundamentos Gerais)

Propriedades Físicas: Características Magnéticas

Diferenças de permeabilidade magnética



Sopro magnético



Maior permeabilidade

13



Soldagem por Fusão (Fundamentos Gerais)

Pré-Aquecimento e Tratamentos Térmicos:

- Ligas diferentes podem ter diferentes requisitos em termos de pré-aquecimento e de tratamentos térmicos
- Pré-aquecimento: Possibilidade de direcionar aquecimento para o componente que o necessita.
- Tratamento térmico após soldagem: + complicado!

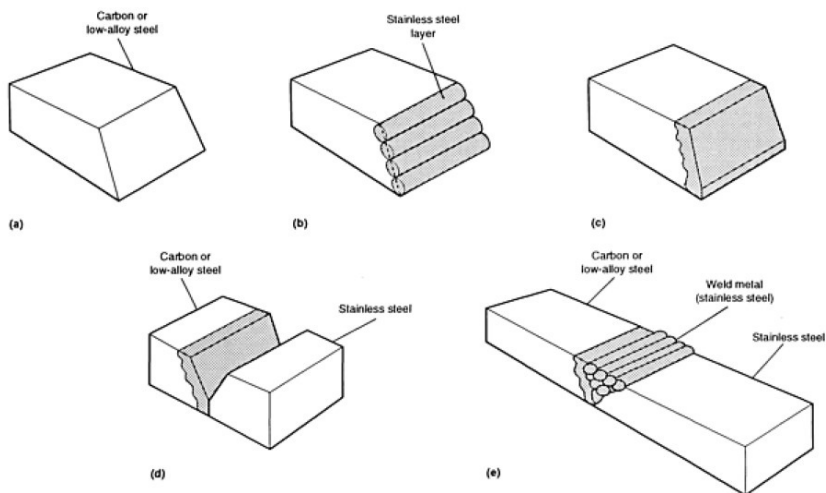
Abordagens: - Seleção cuidadosa de materiais
- Amanteigamento → Tratamento → Soldagem

14



Soldagem por Fusão (Fundamentos Gerais)

Amanteigamento:



Fonte: Materials Handbook, Vol. 6

15



Soldagem por Fusão (Fundamentos Gerais)

Propriedades Mecânicas

Resistência

- Regra geral: MS deve ser compatível com o membro **menos resistente** da junta
- MB frágil: Considerar MS macio e tenaz
Exemplo: Ferro fundido + Níquel

Fadiga térmica: Estrutura bruta de fusão tende a ter propriedades piores na fadiga.

16



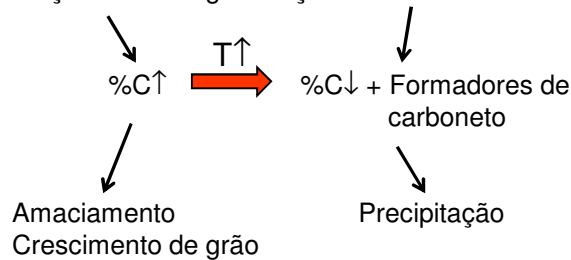
Soldagem por Fusão (Fundamentos Gerais)

Estabilidade Microestrutural

Materiais dissimilares → Gradientes de composição química

Serviço a $T \uparrow$ → - Difusão
- Formação de compostos

Exemplo: Aço de baixa liga x Aço inoxidável austenítico



17



Soldagem por Fusão (Fundamentos Gerais)

Resistência à Corrosão e Oxidação

Metais dissimilares → Células galvânicas

- Regra geral: MS deve ter **igual ou maior resistência** à corrosão do que o MB menos resistente

- Considerar problemas específicos, exemplos:
 - Geração de H por corrosão em aços de baixa liga
 - Sensitização
 - Efeito da diluição na resistência à corrosão

Problemas usuais:

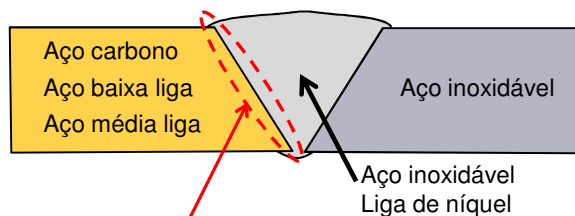
- Corrosão galvânica
- Corrosão por pites
- Corrosão em fendas
- Corrosão sob tensão
- Corrosão intergranular

18



Aço de Baixa/Alta Liga – Inoxidável Austenítico

Considerações Iniciais:



Região potencialmente mais crítica:

- Diferenças de propriedades físicas
- Diferenças de propriedades químicas
- Formação de constituintes indesejáveis
- Difusão

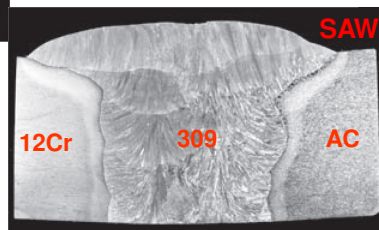
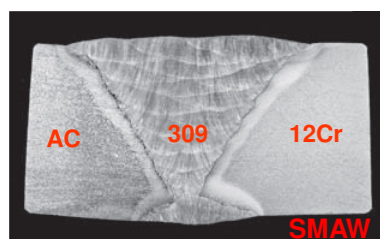
19



Aço de Baixa/Alta Liga – Inoxidável Austenítico

Considerações Iniciais:

Metal de adição: Aço inoxidável austenítico



- Juntas de transição
- Revestimentos contra corrosão
- União de ligas de difícil soldabilidade

Fonte: Taban et al., 2008

20

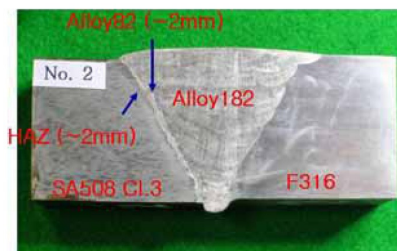
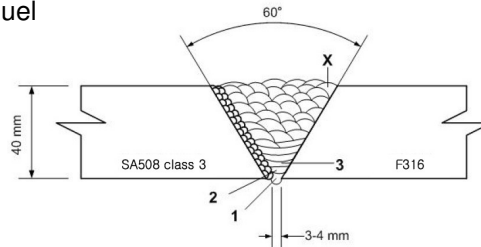


Aço de Baixa/Alta Liga – Inoxidável Austenítico

Considerações Iniciais:

Metal de adição: Liga de níquel

- Juntas de transição a alta temperatura
- Resistência à corrosão
- União de ligas de difícil soldabilidade



Fonte: Jang, C. et al.

21



Aço de Baixa/Alta Liga – Inoxidável Austenítico

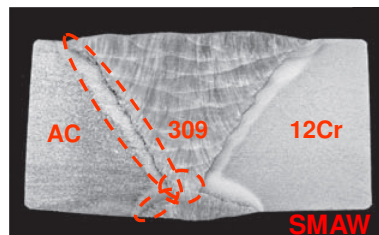
Metal de Adição: **Aço Inoxidável Austenítico**

Microestrutura:

Regiões de maior interesse:

- Passe de raiz
- Lado junto ao MB não inoxidável

→ Efeito mais acentuado da diluição



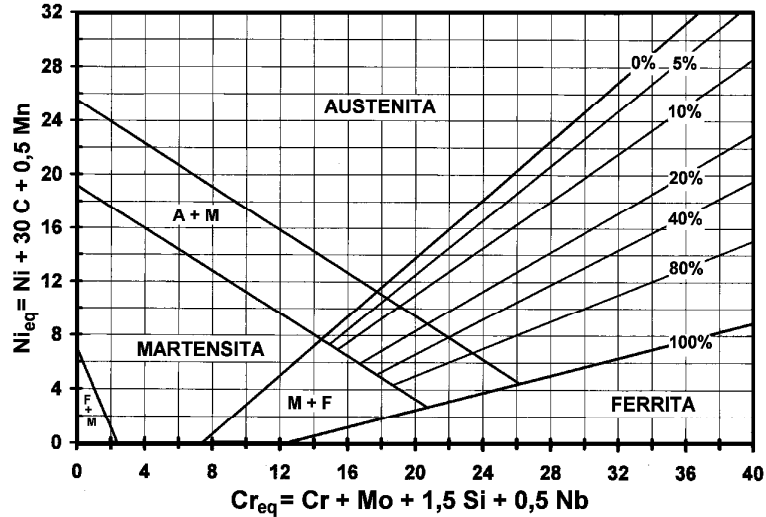
22



Aço de Baixa/Alta Liga – Inoxidável Austenítico

Metal de Adição: **Aço Inoxidável Austenítico**

Microestrutura: Diagrama de Schaeffler



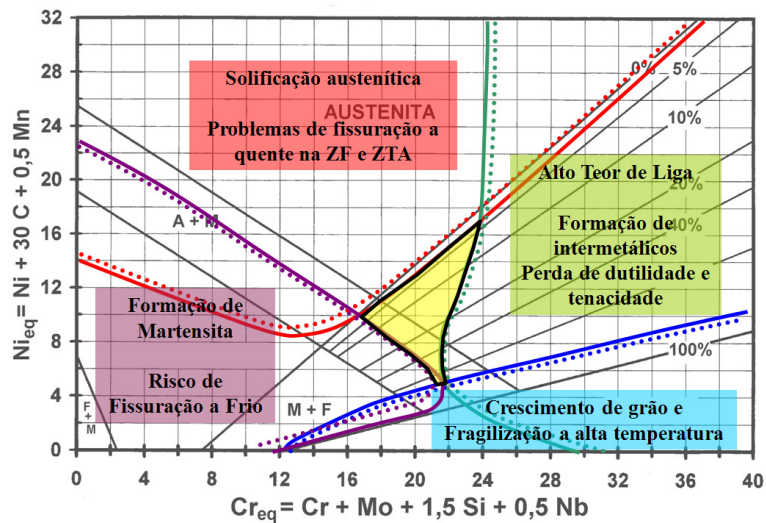
23



Aço de Baixa/Alta Liga – Inoxidável Austenítico

Metal de Adição: **Aço Inoxidável Austenítico**

Microestrutura: Diagrama de Schaeffler



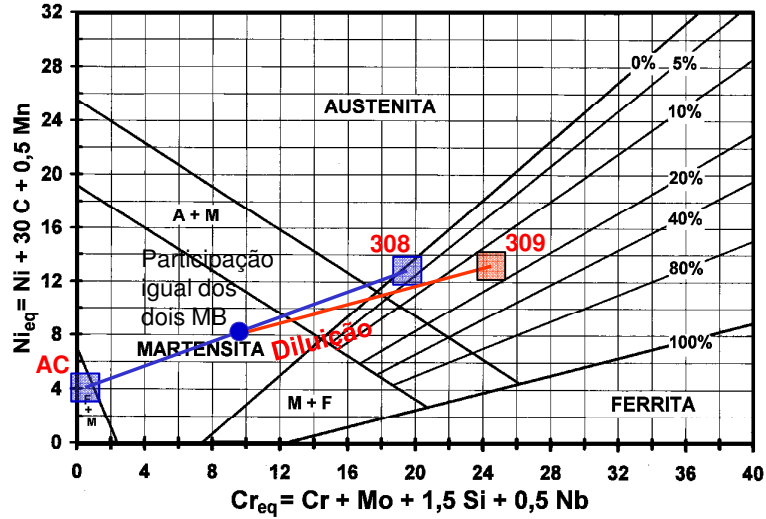
24



Aço de Baixa/Alta Liga – Inoxidável Austenítico

Metal de Adição: **Aço Inoxidável Austenítico**

Microestrutura: Diagrama de Schaeffler (Exemplo)



25



Aço de Baixa/Alta Liga – Inoxidável Austenítico

Metal de Adição: **Aço Inoxidável Austenítico**

Microestrutura: Outros diagramas constitucionais

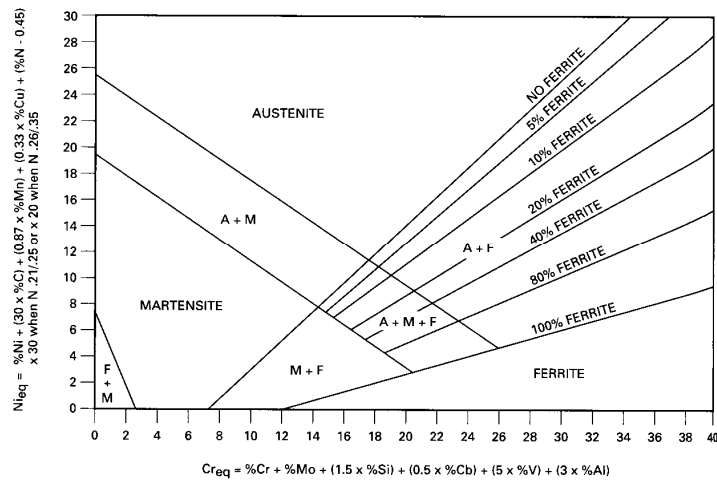


Diagrama de Espy (N ↑, Mn ↑)

Fonte: Welding Handbook, Vol. 4

26



Aço de Baixa/Alta Liga – Inoxidável Austenítico

Metal de Adição: **Aço Inoxidável Austenítico**

Microestrutura: Outros diagramas constitucionais

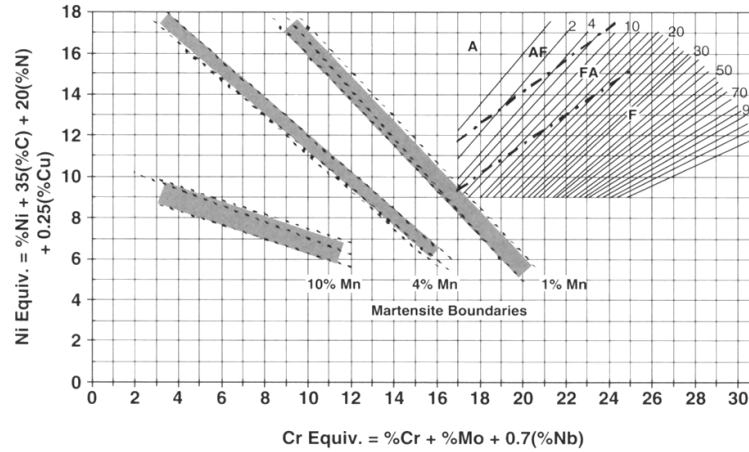


Diagrama WRC1992

Fonte: Lippold & Kotechi (2005)

27



Aço de Baixa/Alta Liga – Inoxidável Austenítico

Metal de Adição: **Aço Inoxidável Austenítico**

Microestrutura: Outros diagramas constitucionais

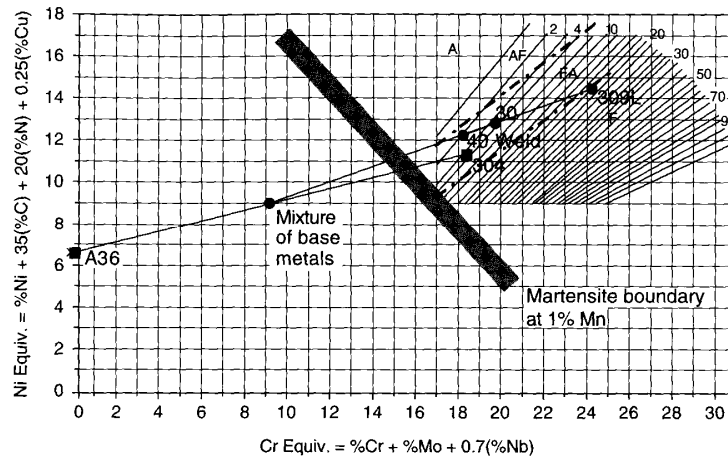


Diagrama WRC1992

Fonte: Lippold & Kotechi (2005)

28

Aço de Baixa/Alta Liga – Inoxidável Austenítico

Metal de Adição: **Aço Inoxidável Austenítico**

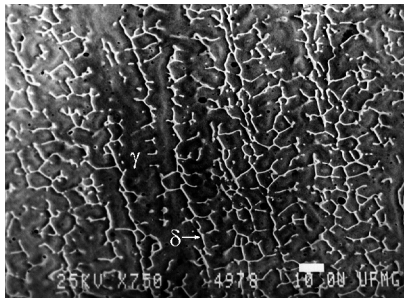
Microestrutura: Zona Fundida

Objetivo (em geral): Austenita + ferrita (FN de 3 a 8)

→ Resistência à fissuração a quente

→ Restrições: - Baixa temperatura (Tenacidade↓)

- Alta temperatura em TT ou serviço (intermetálicos)
- Ambientes muito agressivos (ataque preferencial da ferrita)

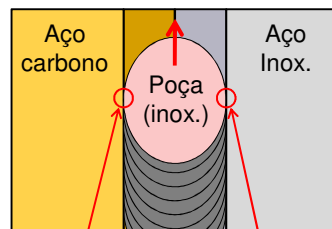


29

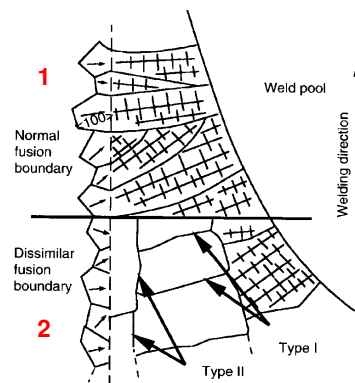
Aço de Baixa/Alta Liga – Inoxidável Austenítico

Metal de Adição: **Aço Inoxidável Austenítico**

Microestrutura: Linha de fusão na transição AC/Aust.



Início da Solidificação



Fonte: Lippold & Kotachi (2005)

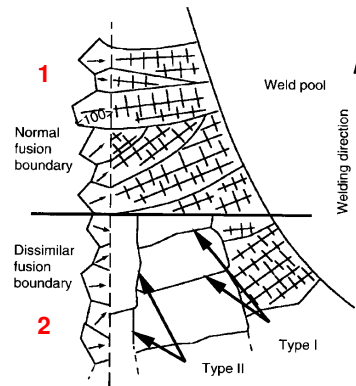
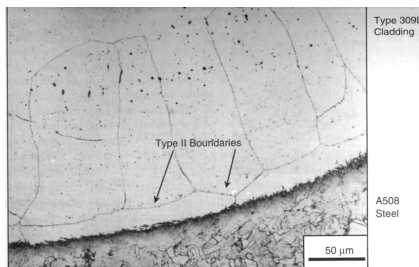
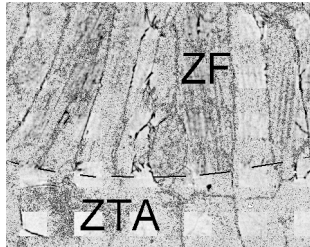
30



Aço de Baixa/Alta Liga – Inoxidável Austenítico

Metal de Adição: **Aço Inoxidável Austenítico**

Microestrutura: Linha de fusão na transição AC/Aust.



Fonte: Lippold & Kotechi (2005)

31

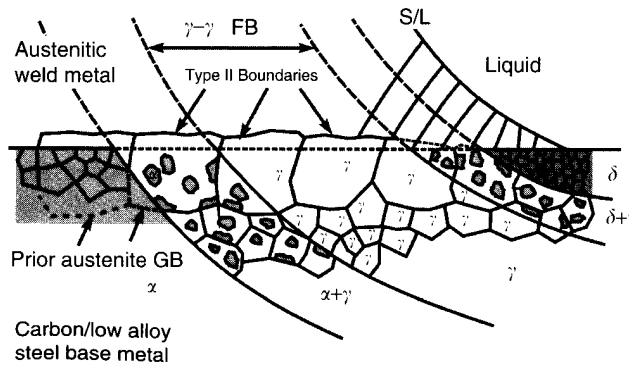


Aço de Baixa/Alta Liga – Inoxidável Austenítico

Metal de Adição: **Aço Inoxidável Austenítico**

Microestrutura: Linha de fusão na transição AC/Aust.

Interface tipo II - Mecanismo de formação



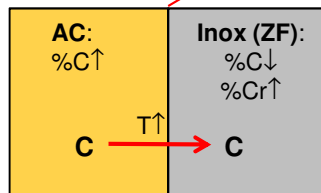
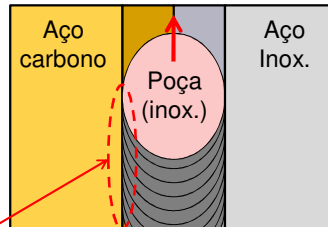
Fonte: Lippold & Kotechi (2005)

32

Aço de Baixa/Alta Liga – Inoxidável Austenítico

Metal de Adição: **Aço Inoxidável Austenítico**

Microestrutura: Migração de carbono



T > 425°C

Após tratamento térmico/serviço:

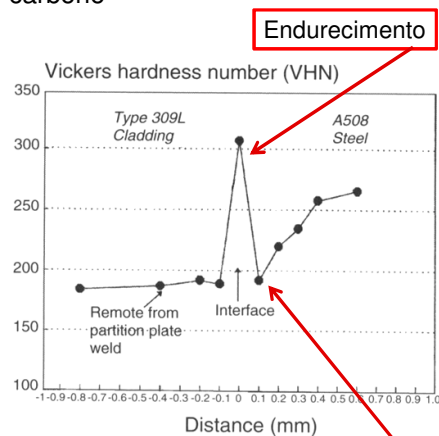
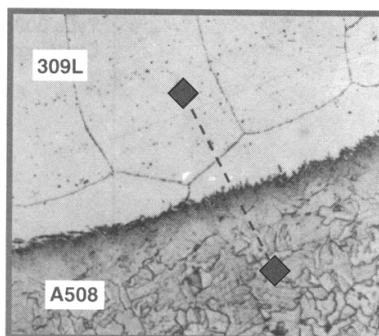
- Empobrecimento de C na ZAC
- Formação de carbonetos na ZF
- Formação de martensita

33

Aço de Baixa/Alta Liga – Inoxidável Austenítico

Metal de Adição: **Aço Inoxidável Austenítico**

Microestrutura: Migração de carbono



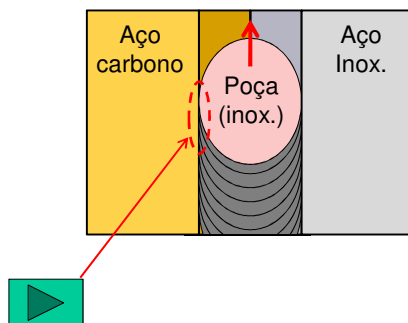
Fonte: Barnhouse & Lippold (1998) 34



Aço de Baixa/Alta Liga – Inoxidável Austenítico

Metal de Adição: **Aço Inoxidável Austenítico**

Fissuração na Solidificação:
Zona fundida completamente austenítica



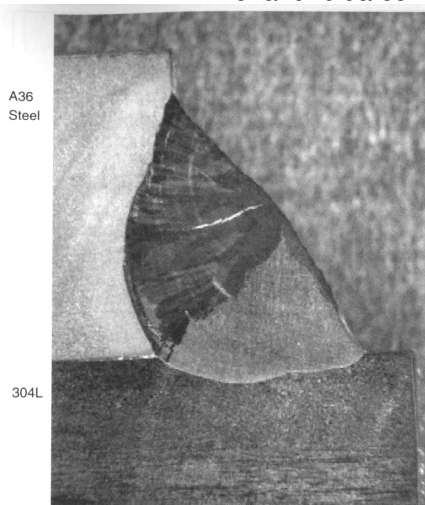
35



Aço de Baixa/Alta Liga – Inoxidável Austenítico

Metal de Adição: **Aço Inoxidável Austenítico**

Fissuração na Solidificação:
Zona fundida completamente austenítica



Fonte: Lippold & Kotechi (2005)

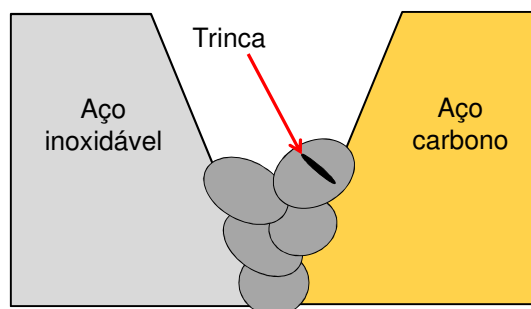
36



Aço de Baixa/Alta Liga – Inoxidável Austenítico

Metal de Adição: **Aço Inoxidável Austenítico**

Fissuração na Solidificação:
Zona fundida completamente austenítica



Fonte: Lippold & Kotechi (2005)

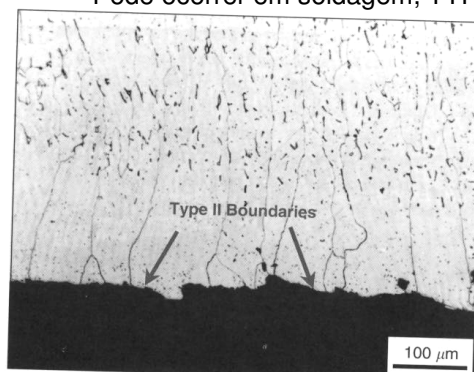
37



Aço de Baixa/Alta Liga – Inoxidável Austenítico

Metal de Adição: **Aço Inoxidável Austenítico**

Perda de aderência: Falha ao **longo de interfaces tipo II**
Pode ocorrer em soldagem, TTPS ou serviço



Mecanismo: Tensões térmicas + fragilização dos contornos de grão

Linha de martensita: Potencial para fragilização pelo hidrogênio

Fonte: Lippold & Kotechi (2005)

38



Aço de Baixa/Alta Liga – Inoxidável Austenítico

Metal de Adição: **Aço Inoxidável Austenítico**

Falha por fluência:

$T \uparrow \rightarrow$ Tensões térmicas

Fadiga térmica:

$T = f(\text{tempo})$

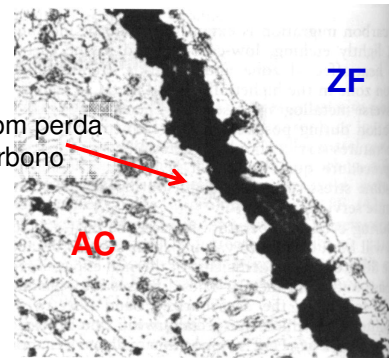
Migração de C:

Amaciamento da ZTA

$T \uparrow \rightarrow$ Tensões térmicas

\rightarrow Fluência localizada

$T = f(\text{tempo}) \rightarrow$ Variações de tensão/deformação



Fonte: Welding Handbook, Vol. 4

39



Aço de Baixa/Alta Liga – Inoxidável Austenítico

Metal de Adição: **Aço Inoxidável Austenítico**

Formação de intermetálicos:

$600 < T < 900^\circ\text{C} \rightarrow$ Fase Sigma (Regiões com ferrita)

TTPS/Serviço a $T \uparrow \rightarrow$ Fragilização

40

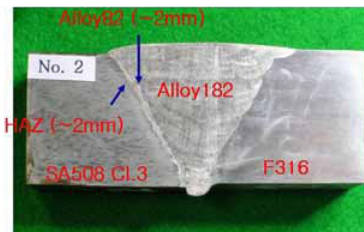
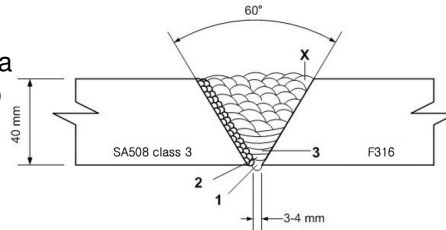
Aço de Baixa/Alta Liga – Inoxidável Austenítico

Metal de Adição: **Liga de Níquel**

Coeficiente de expansão térmica com valor intermediário entre o aço carbono e o inoxidável



Tensões térmicas menores e distribuídas nos dois lados da junta



Fonte: Jang, C. et al.

41

Aço de Baixa/Alta Liga – Inoxidável Austenítico

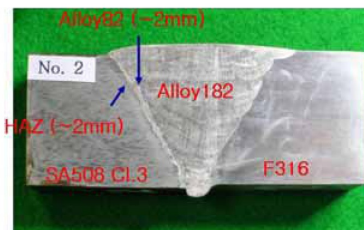
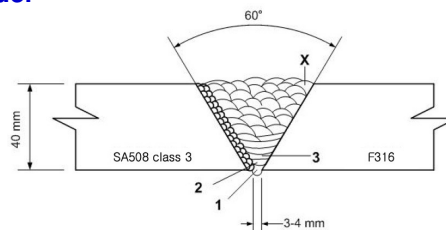
Metal de Adição: **Liga de Níquel**

Não possuem, em sua composição, elementos formadores de carbonetos



Menor tendência à migração de carbono

Além disto, não tendem a formar compostos intermetálicos



Fonte: Jang, C. et al.

Aplicação principal: Juntas para trabalho a quente ($T > 425^{\circ}\text{C}$)

42



Aço de Baixa/Alta Liga – Inoxidável Austenítico

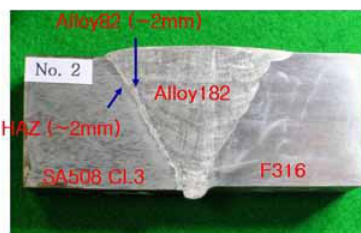
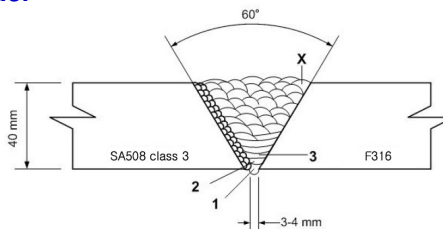
Metal de Adição: Liga de Níquel

Problemas:

- Maior sensibilidade à fissuração na solidificação
- Maior custo

Exemplos:

- AWS ENiCrFe-2 (INCO A)
- AWS ENiCrFe-3 (alloy 82)



Fonte: Jang, C. et al.



Outras Combinações

Aço inoxidável série 400 x Aço carbono/baixa liga:

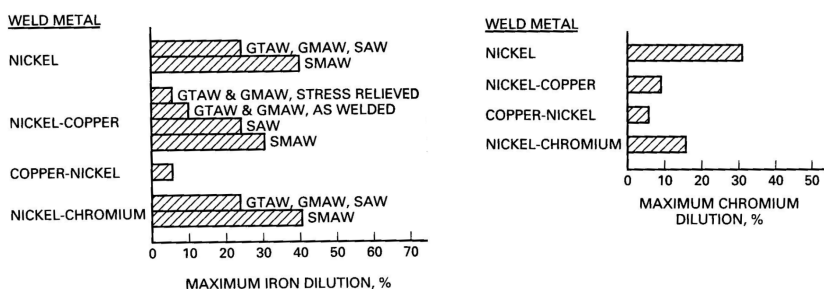
- Aços ao cromo temperáveis podem ser soldados com outro com maior teor de cromo usando metal de adição com um teor de cromo igual ou intermediário ao dos dois aços desde que a junta seja adequadamente tratada termicamente.
- Uma regra geral para a soldagem de um destes aços com um aço de baixa liga é usar o metal de adição com composição similar ao do aço de baixa liga. A entrada do cromo na ZF por diluição deve ser considerada.
- Para a soldagem de qualquer aço ao cromo a um aço ao carbono, um metal de adição de aço carbono pode ser usado. Embora um consumível similar ao aço ligado possa ser considerado, é preferível usar o metal de adição menos temperável.
- Metal de adição inoxidável austenítico pode ser usado um aço ao cromo a outro desde que a diferença de expansão térmica não crie tensões inaceitáveis ou a solda fica sensível à fissuração devido à diluição.
- Metal de adição NiCr ou NiCrFe pode ser usado para um bom casamento das expansões térmicas em juntas de aço ao cromo e outro aço.



Outras Combinações

Ligas de Níquel x Aços:

- Metal de adição usual: Baseados em níquel.
(Aço baixa liga → martensita, Inox austenítico → fissuração na solidificação)
- S / P → Fissuração na solidificação (controle de diluição)
- Diluição de outros elementos (Fe e Cr):



Fonte: Welding Handbook, Vol. 4 45



Outras Combinações

Ligas de Níquel x Aços:

- Metais de adição:

UNS #	Designação	Tipo de MA	Aço C & BL	Aço Inoxidável
N02200	Níquel comercialmente puro	Eletrodo revestido Arame	ENi-1, ENiCrFe-2	ENi-1, ENiCrFe-2, ENiCrFe-3 ERNi-1, ERNiCr-3, ERNiCrFe-6
N04400 N05500 N05502	Alloy 400 Alloy K500 Alloy 502	Eletrodo revestido Arame	ENiCu-7, ENi-1 ERNi-1	ENiCrFe-2, ENiCrFe-3 ERNiCr-3, ERNiCrFe-6
N06600 N08800	Alloy 600 Alloy 800	Eletrodo revestido Arame	ENiCrFe-2, ENiCrFe-3 ERNiCr-3, ERNiCrFe-6	ENiCrFe-2, ENiCrFe-3 ERNiCr-3, ERNiCrFe-6
N06625	Alloy 625	Eletrodo revestido Arame	ENiCrFe-2, ENiCrMo-3 ERNiCr-3, ERNiCrMo-3	ENiCrFe-2, ENiCrMo-3 ERNiCr-3, ERNiCrMo-3
N08825	Alloy 825	Eletrodo revestido Arame	ENiCrMo-3 ERNiCrMo-3	ENiCrMo-3 ERNiCrMo-3
N10665	Alloy B-2	Eletrodo revestido Arame	ENiMo-7 ERNiMo-7	ENiMo-7 ERNiMo-7

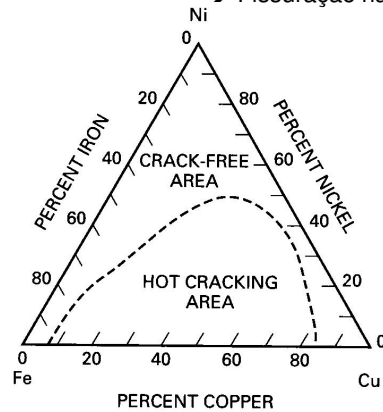
Fonte: Welding Handbook, Vol. 4 46



Outras Combinações

Ligas de Cobre x Aços:

- Cobre no aço: - Penetração intergranular (infiltração)
- Ferro no cobre: - Baixa solubilidade no estado sólido
 - Problemas de corrosão
 - Fissuração na solidificação



Fonte: Welding Handbook, Vol. 4

47



Outras Combinações

Ligas de Cobre x Aços:

- Cobre puro:
 - Elevada condutividade térmica → Pré-aquecimento
 - Elevada diferença de temperatura de fusão
 - Para minimizar efeitos de diluição: Amanteigamento com ligas de níquel
- Ligas Cu-Ni:
 - MA de Cu-Ni: $(Fe + Cr) > 5\%$ (fissuração)
 - Considerar amanteigamento (Ex: ERNi-1)
- Latão:
 - $Zn > 20\%$ → Vaporização / Porosidade
 - Amanteigamento do aço com Cu-Sn (CC-)
 - Soldagem com o mesmo MA (CA)
 - Evitar aquecer o latão com o arco → Vaporização

Considerar soldagem no estado sólido!

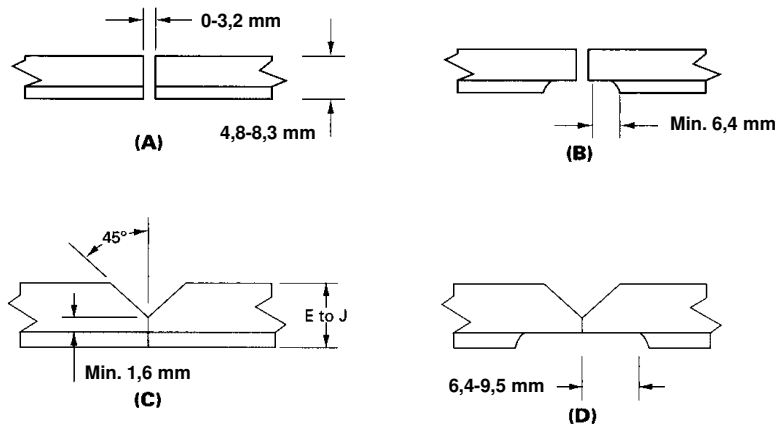
Fonte: Welding Handbook, Vol. 4

48



Soldagem de Aço com "Cladding"

Juntas:

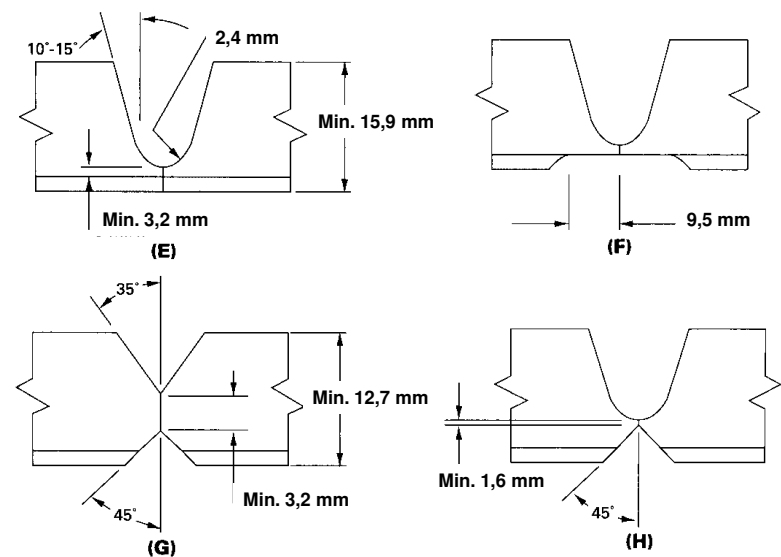


Fonte: Welding Handbook, Vol. 4 49



Soldagem de Aço com "Cladding"

Juntas:



Fonte: Welding Handbook, Vol. 4 50



Soldagem de Aço com “Cladding”

Procedimentos : Juntas Compostas

1. O aço base é normalmente soldado primeiro.
 - Controlar diluição do clad (fragilização do aço):
 - Remoção do clad na região da junta (maior custo)
 - Face do chanfro + controle do procedimento + goivagem da raiz (reverso + ligado)

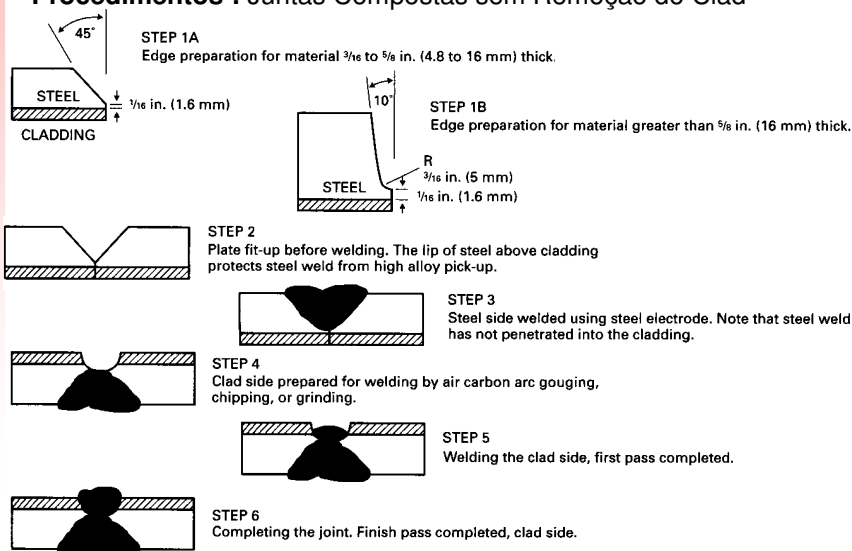
2. Soldagem do clad:
 - Considerar amanteigamento (+ ligado)
 - Controlar diluição:
 - Passes retos de baixa energia
 - Usar várias camadas/ remover parte da 1ª camada
 - Tecer em soldagem automática,

51



Soldagem de Aço com “Cladding”

Procedimentos : Juntas Compostas sem Remoção do Clad



Fonte: Welding Handbook, Vol. 4

52



Soldagem de Aço com “Cladding”

Procedimentos : Juntas de pequena espessura

Para $t \leq 9,5$ mm

- Considerar fazer toda a solda com material similar ao clad.
- Considerar necessidade de amanteigamento das faces da junta.
- Solda resultante deve atender as propriedades mecânicas e químicas necessárias

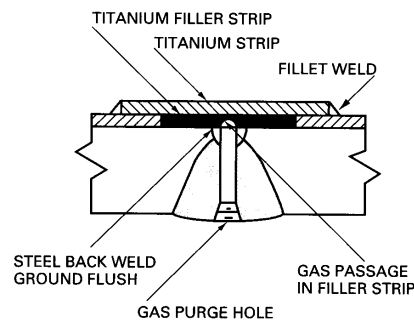
53



Soldagem de Aço com “Cladding”

Aços com Cladding de Titânio:

- Aço e Titânio são incompatíveis do ponto de vista metalúrgico
- Titânio é um metal extremamente reativo e pode ser fragilizado por pequenas contaminações (O, N, H)
- Soldagem do Clad é feita independentemente da do aço.



Fonte: Welding Handbook, Vol. 4

54

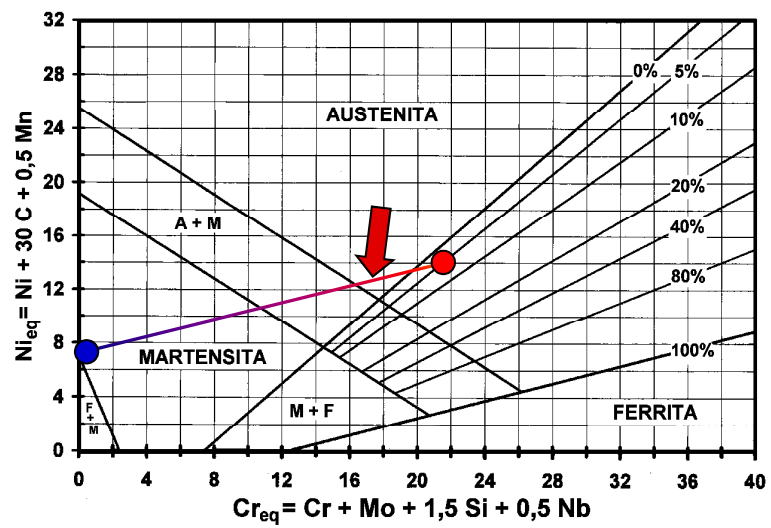


FIM

Fissuração na Solidificação



Aço carbono x Aço Inoxidável





- AWS ENiCrFe-2 (INCO A):

Ni+Co.....	62.0 min.	Cu.....	0.50 max.
C	0.10 max.	Cr	13.0-17.0
Mn.....	1.0-3.5	Nb+Ta	0.5-3.0
Fe.....	12.0 max.	Mo.....	0.5-2.5
S	0.02 max.	P	0.03 max.
Si	0.75 max.	Others	0.50 max.

- AWS ENiCrFe-3 (alloy 82):

Ni+Co	59.0 min.	Cu.....	0.50 max.
C	0.10 max.	Cr	13.0-17.0
Mn.....	5.0-9.5	Ti.....	1.0 max.
Fe.....	10.0 max.	Nb+Ta	1.0-2.5
S	0.015 max.	P.....	0.030 max.
Si.....	1.0 max.	Others	0.50 max.