

SOLDABILIDADE DOS AÇOS INOXIDÁVEIS

Introdução e Conceitos Básicos dos Aços Inoxidáveis

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

SOLDAGEM DOS AÇOS INOXIDÁVEIS

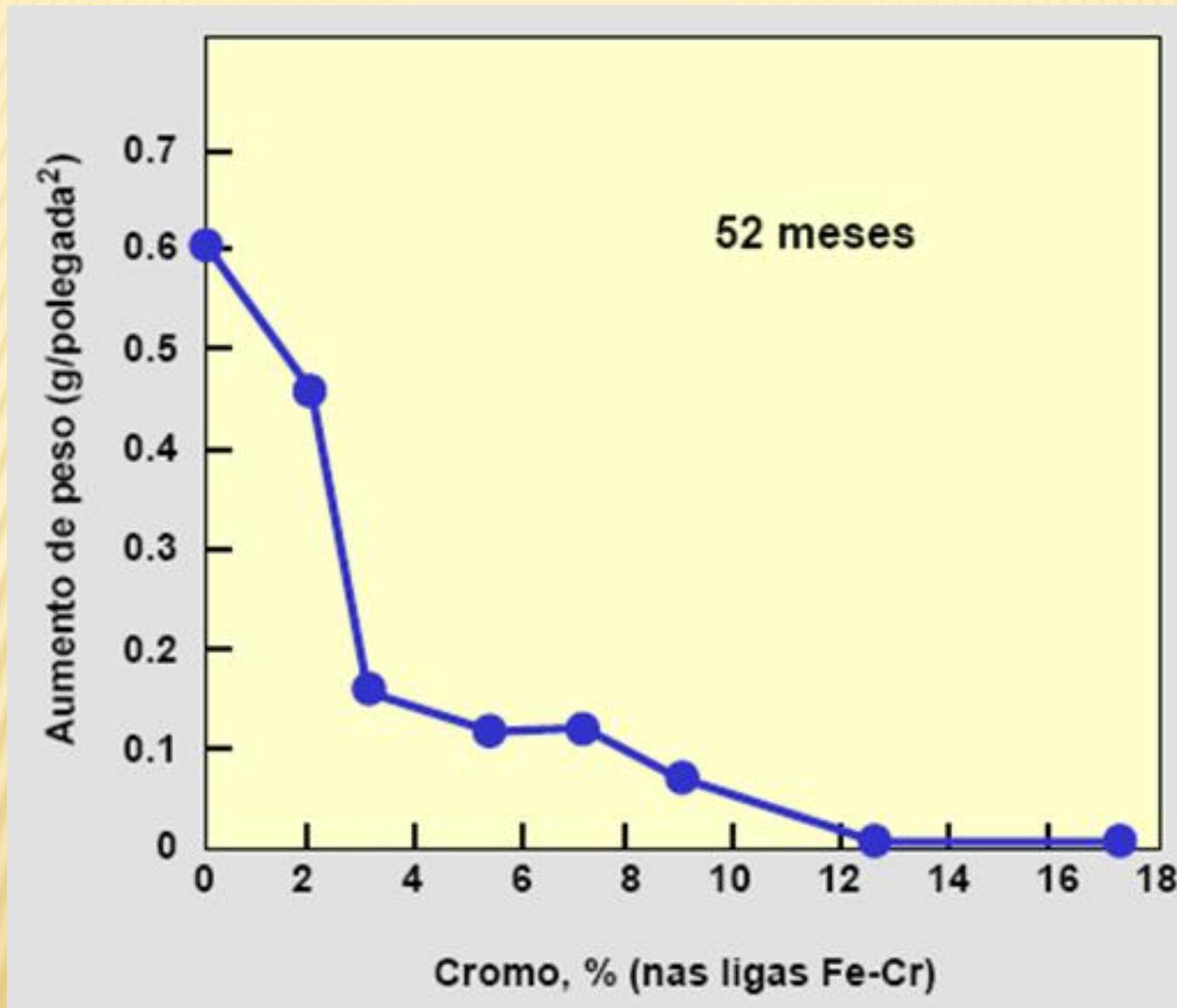
**São compatíveis os aços
inoxidáveis com os aços ao
carbono ??**

O QUE É AÇO INOXIDÁVEL?

É uma liga Fe-Cr, com baixo teor de carbono, contendo, no mínimo,
10,5% Cr

Elementos de Liga ⇒ Ni, Mo, Nb, Ti, Al, S, Se
grande faixa de propriedades

Oxidação das ligas Fe-Cr em atmosferas rurais em 52 meses.



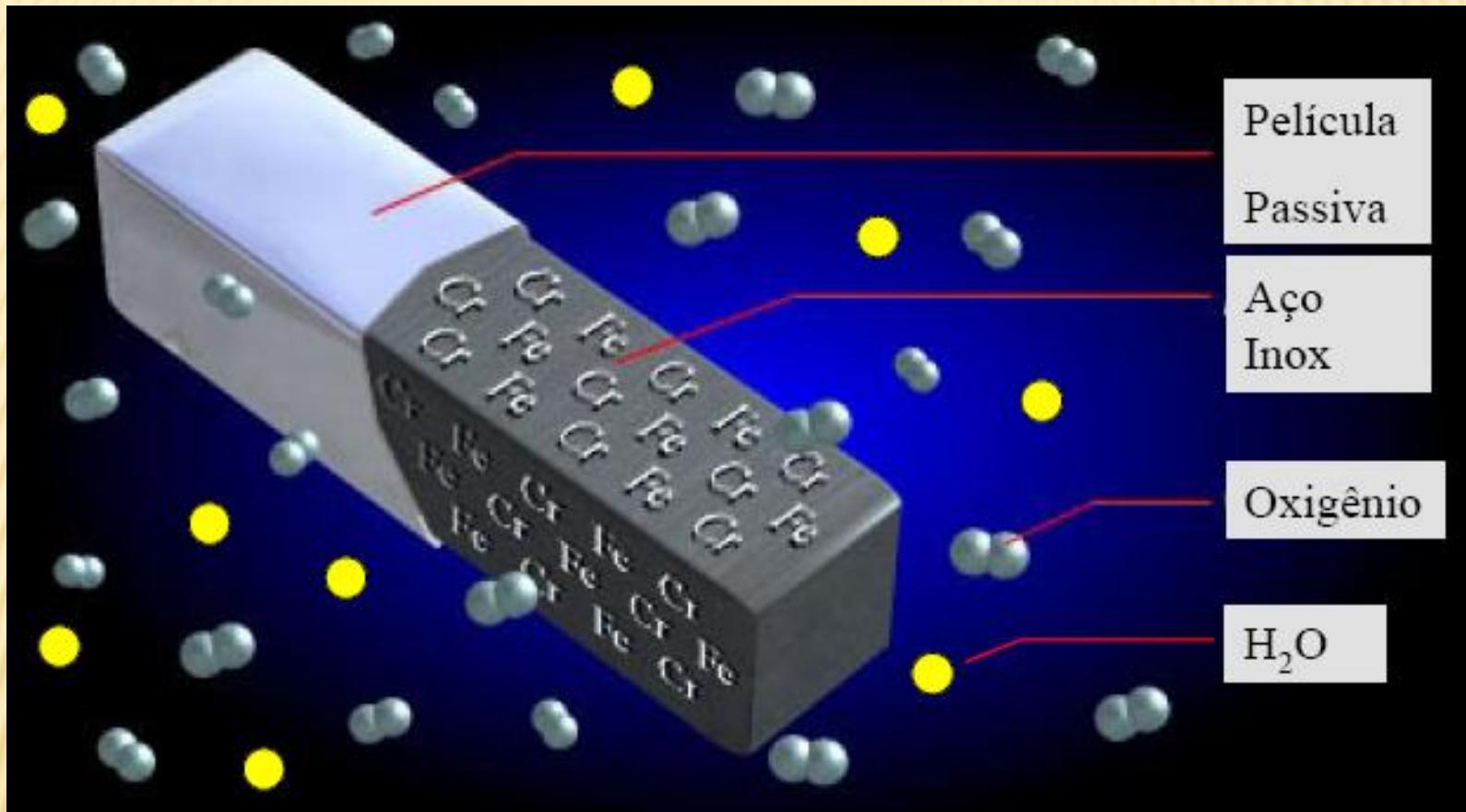
Observa-se uma grande diminuição da velocidade de oxidação nas ligas Fe-Cr com aumento de Cr na mesma.

PASSIVAÇÃO

✖ Presença de Cromo ➤ passivação instantânea = formação de óxido de cromo superficial ➤ superfície inoxidável

- Oxido de cromo é um filme muito fino, da ordem de 30 a 50 Å°
- Óxidos e hidróxidos de Cromo aderente
- Protege contra a corrosão
- Quando desgastado, riscado ou retirado por efeito mecânico, o filme volta a **passivar** num meio que contenha oxigênio, recuperando seu efeito protetor.

PASSIVAÇÃO



Os aços inoxidáveis podem ser definidos como sendo ligas ferrosas contendo $\text{Cr} \geq 12\%$, e baixo teor de carbono. A partir de 12% Cr, o aço adquire boa resistência à corrosão atmosférica. O cromo também aumenta a resistência à oxidação em altas temperaturas.

Propriedades do filme passivo

Espessura de 10 \AA = distâncias interatômicas

Composição (oxi-hidróxido)

Elementos oxidáveis (Fe, Cr, etc..)

Água e seus derivados (H_2O , H_3O^+ , OH^-)

Cromo (do INOX) + Oxogênio (do ar) = CAMADA PASSIVA

Propriedades do filme passivo

- ✖ O cromo participa da formação de uma película fina, aderente e protetora na forma de óxido de cromo. Esta película se forma naturalmente em atmosferas oxidantes ou no ar ambiente.
- ✖ A resistência à corrosão dos aços inoxidáveis aumenta com o teor de Cr e de outros elementos que participam e estabilizam o filme passivado, tais como o Ni, Mo, N e Cu.
- ✖ Entretanto, em geral, é necessário que estes elementos estejam em **solução sólida**. É preciso evitar a precipitação de fases ricas em Cr (carbonetos, fases intermetálicas), sob risco de perda de resistência à corrosão e fragilização do material.

500

Ensaios de corrosão atmosférica em Niagara Falls, de 1941 a 1946, de ligas Fe - 0,06%C - x%Cr

*W. D. Binder, C. M. Brown. Atmospheric corrosion tests on High-chromium steels.
Proceedings of the American Society for Testing and Materials, 1946, p. 593-609.*

Cromo em solução sólida fornece a “inoxidabilidade”

taxa de corrosão [g/m²]

200

100

0

0

3

6

9

12

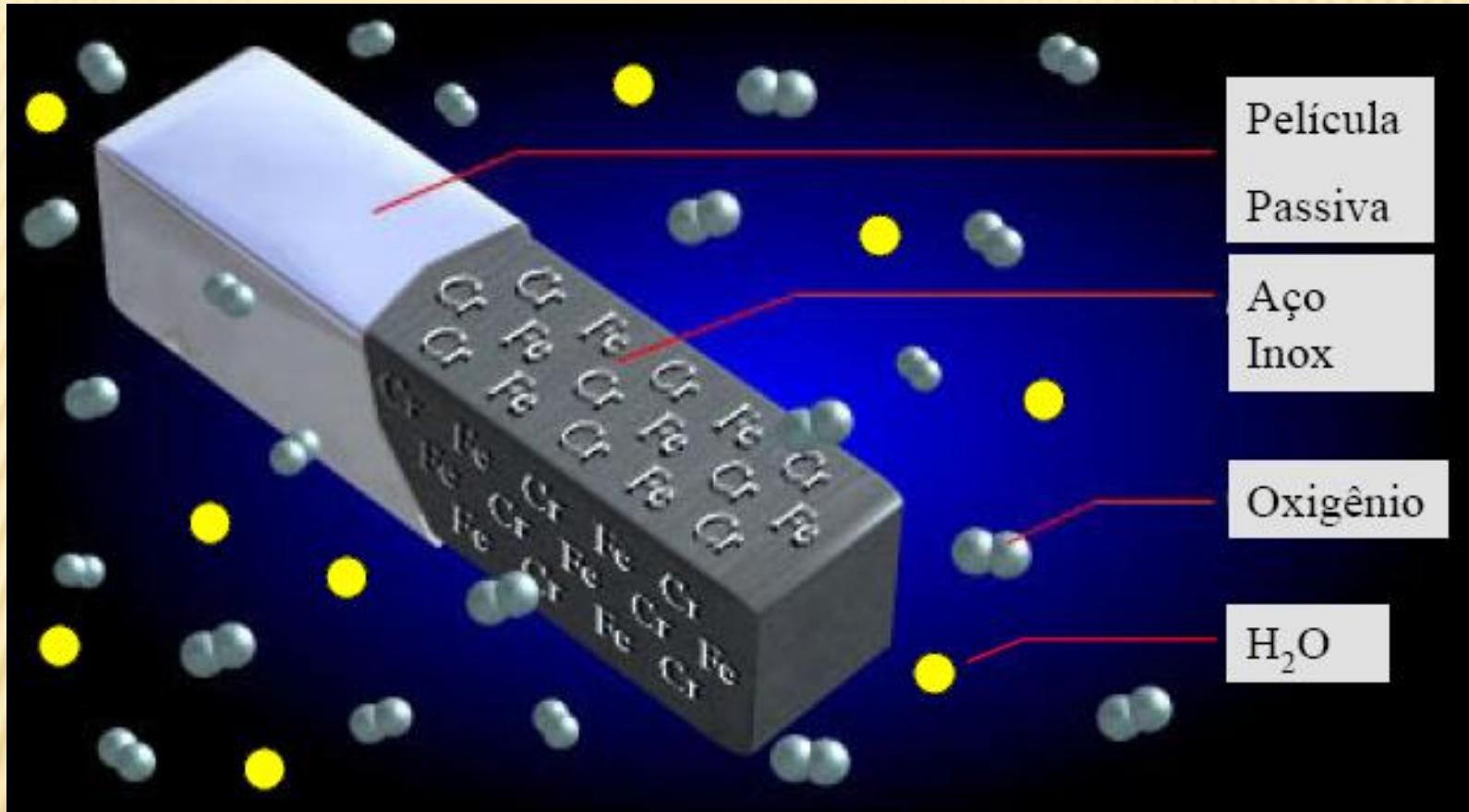
15

18

Cr [%massa]

■ 20 meses
▲ 42 meses

PASSIVAÇÃO



Os aços inoxidáveis podem ser definidos como sendo ligas ferrosas contendo $\text{Cr} \geq 12\%$, e baixo teor de carbono. A partir de 12% Cr, o aço adquire boa resistência à corrosão atmosférica. O cromo também aumenta a resistência à oxidação em altas temperaturas.

PROPRIEDADES FÍSICAS DOS AÇOS INOXIDÁVEIS

Comparação com aço ao Carbono

Propriedades	Austeníticos	Ferríticos	Martensíticos	Aço ao Carbono
densidade (g/cm ³)	7,8 - 8,0	7,8	7,8	7,8
E (GPa)	193 - 200	200	200	200
Coef. expansão térmica (10 ⁻⁶ m/m/°C)	17 - 19,2	11,2 – 12,1	11,6 – 12,1	11,7
Condutividade térmica (100°C) (W/m.K)	18,7 – 22,8	24,4 – 26,3	28,7	60
Calor Específico (0°C a 100°C) (J/kg.K)	69 - 108	59 – 67	55 – 72	12

PRINCIPAIS APLICAÇÕES

-Aquecedores.

- Evaporadores.

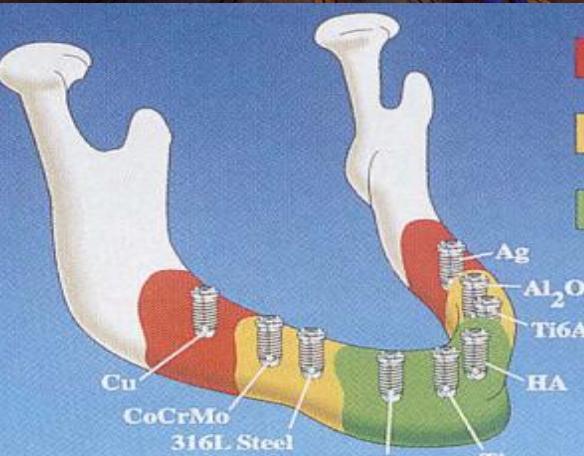
- Cozedores.

- Caldeiras.

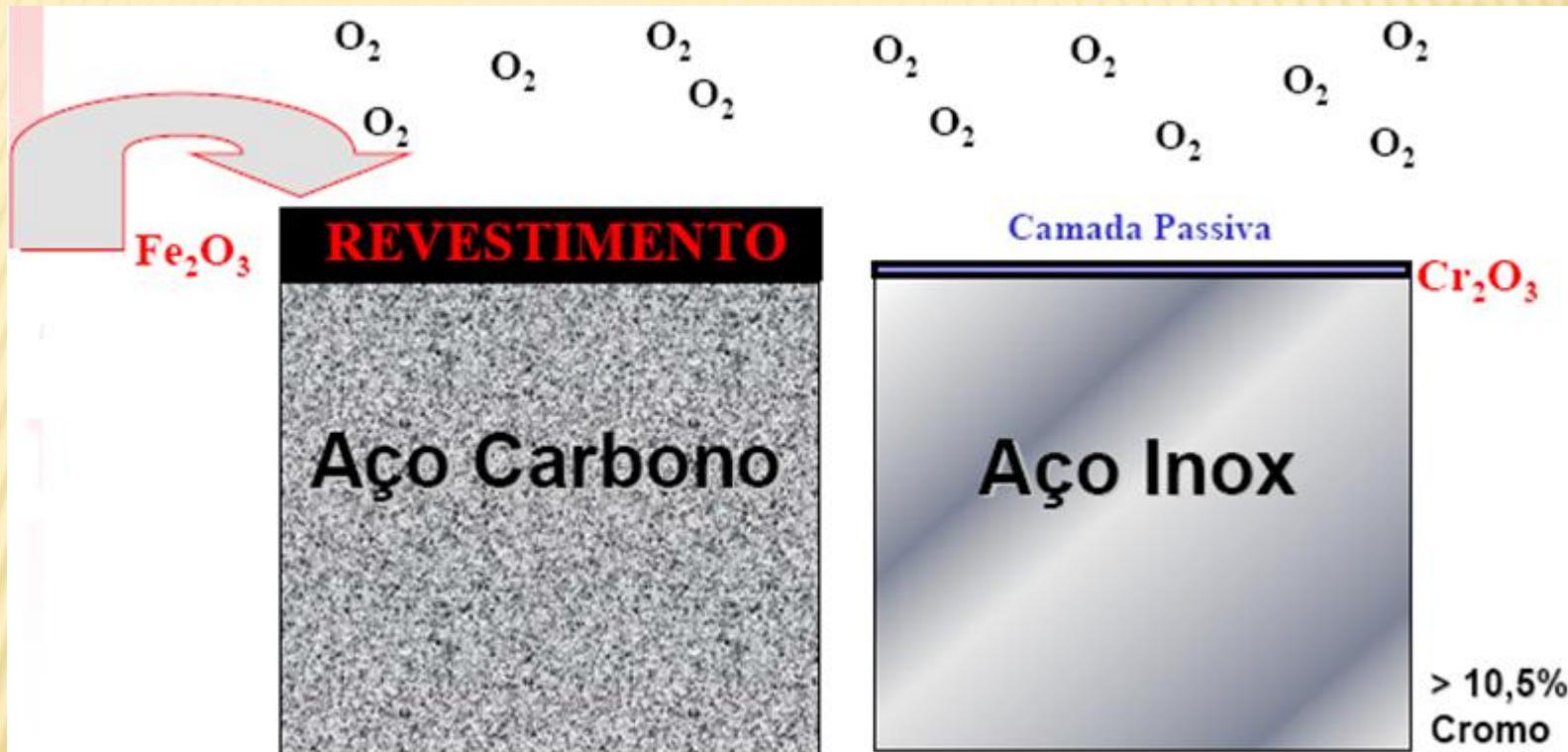
- Tubos de condução

- Revestimentos.....

- Outras.....



Aço Carbono x Aço Inoxidável



Sobre a formação de Fe_2O_3 no aço carbono é necessário depositar REVESTIMENTOS do tipo pintura, galvanização, metalização e outros.

Dependendo do meio corrosivo também devem ser protegidos através de revestimentos

HISTÓRIA

- ✖ **1912** - Alemanha (20%Cr 7%Ni) - Aço Inoxidável Austenítico;
- ✖ **1912** - Inglaterra (12,8%Cr 0,24%C) – Aço Inoxidável Martensítico;
- ✖ **1913** – (16%Cr 0,015%C) – Ferrítico;
- ✖ **1945** – EUA – (U.S. Steel) – Aço Inoxidável Endurecido por Precipitação;
- ✖ **1950** – EUA – Escassez E \$ de Ni – Aços Inoxidáveis com Mg e N em substituição parcial de Ni (AISI 200);
- ✖ **1970** – EUA – (Processo OAD) – Permitiu a redução drástica de C sem perda acentuada de Cr para escória – Carga menos cara;
- ✖ **~1970** – LC – Custo e Homogeneidade Química;
- ✖ **2005** – Aço Inoxidável de Alto Desempenho.

CLASSIFICAÇÃO DOS AÇOS INOXIDÁVEIS

- Aços Inoxidáveis Ferríticos**

- Série 400 - ligados ao Cr - Não-temperáveis

- Aços Inoxidáveis Martensíticos**

- Série 400 - ligados ao Cr - temperáveis

- Aços Inoxidáveis Austeníticos**

- Série 300 - ligados ao Cr-Ni (Cr-Ni-Mo)
 - Série 200 - ligados ao Cr-Ni-Mn

- Aços Inoxidáveis Duplex (austeno-ferríticos)**

- Lean duplex, duplex e superduplex
 - 2205, 2304, 2202, 2101

Solidificação na ZF e Resfriamento na ZTA

A temperatura de equilíbrio termodinâmico entre um sólido e seu respectivo líquido é a temperatura de fusão [= à T° sólido apenas para substâncias puras e sistemas eutéticos]

Não significa que a solidificação se inicia nessa temperatura

O estudo da solidificação envolve 2 abordagens distintas

1. Termodinâmica → análise das energias envolvidas na solidificação.
2. Cinética → análise da velocidade com que os processos (de nucleação, crescimento e formação) acontecem.

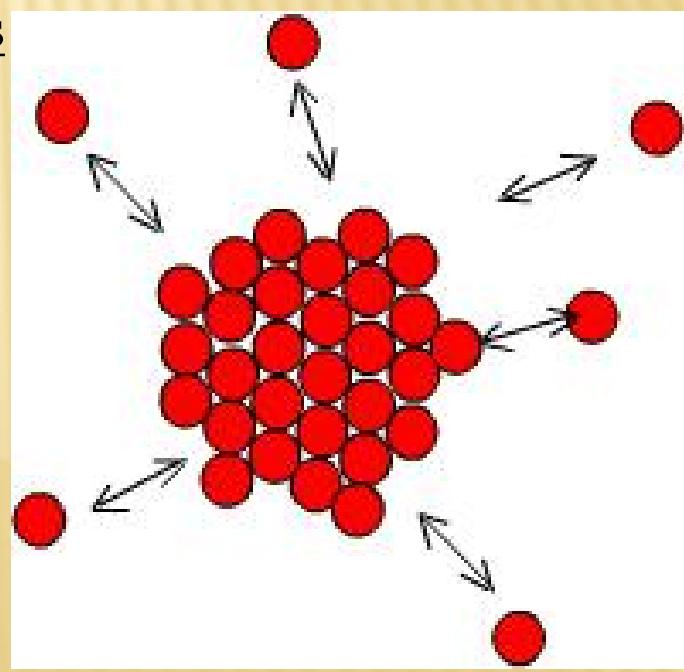


DIAGRAMA DE EQUILIBRIO DA LIGA FE-C

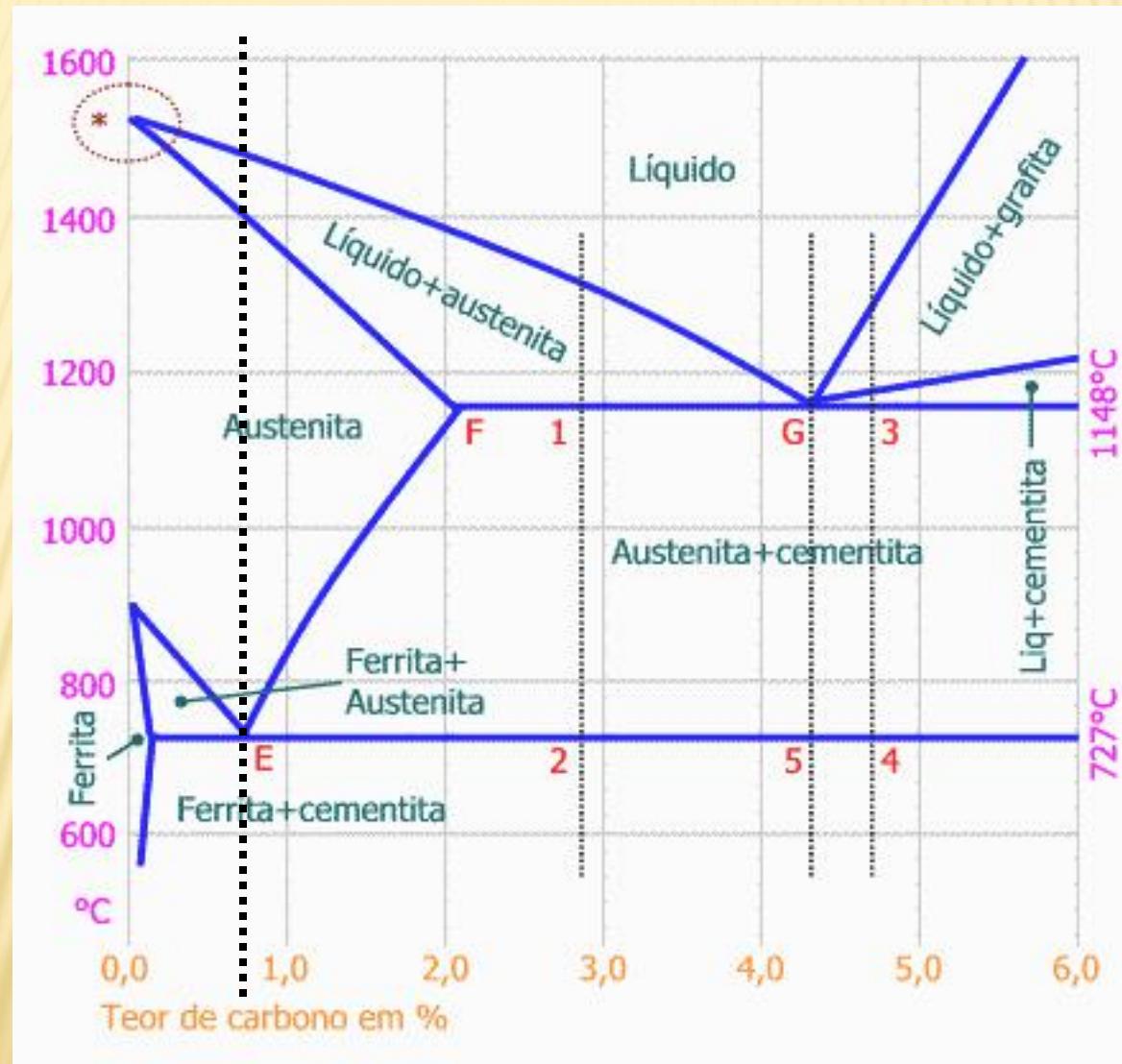
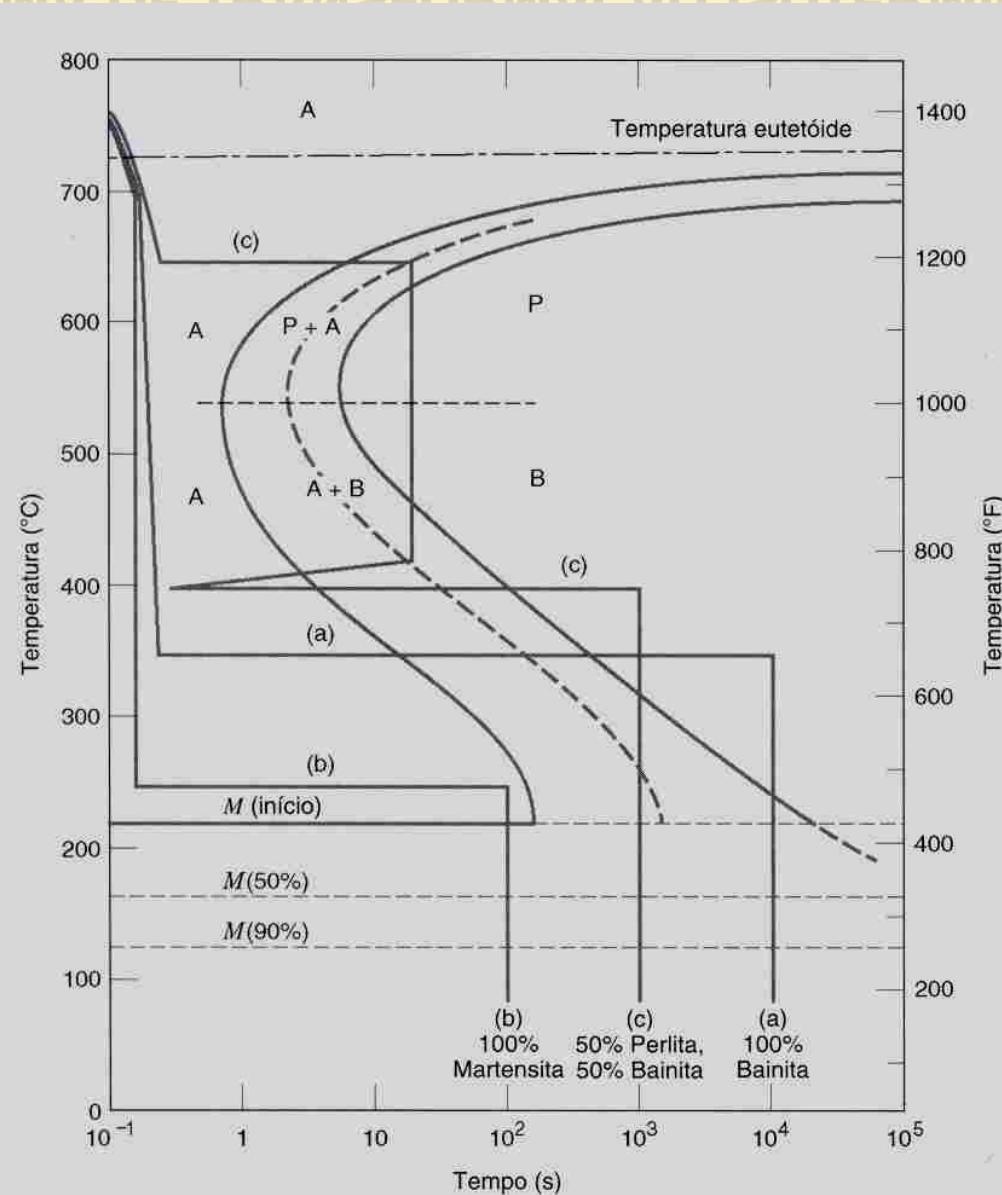


DIAGRAMA DE TRANSFORMAÇÃO ISOTÉRMICA



Fonte: Ciência e
Engenharia de Materiais:
uma introdução,
W.D.Callister Jr, Ed LTC.

Formação de diferentes microestruturas no aço eutetóide em função do tratamento térmico adotado [4].

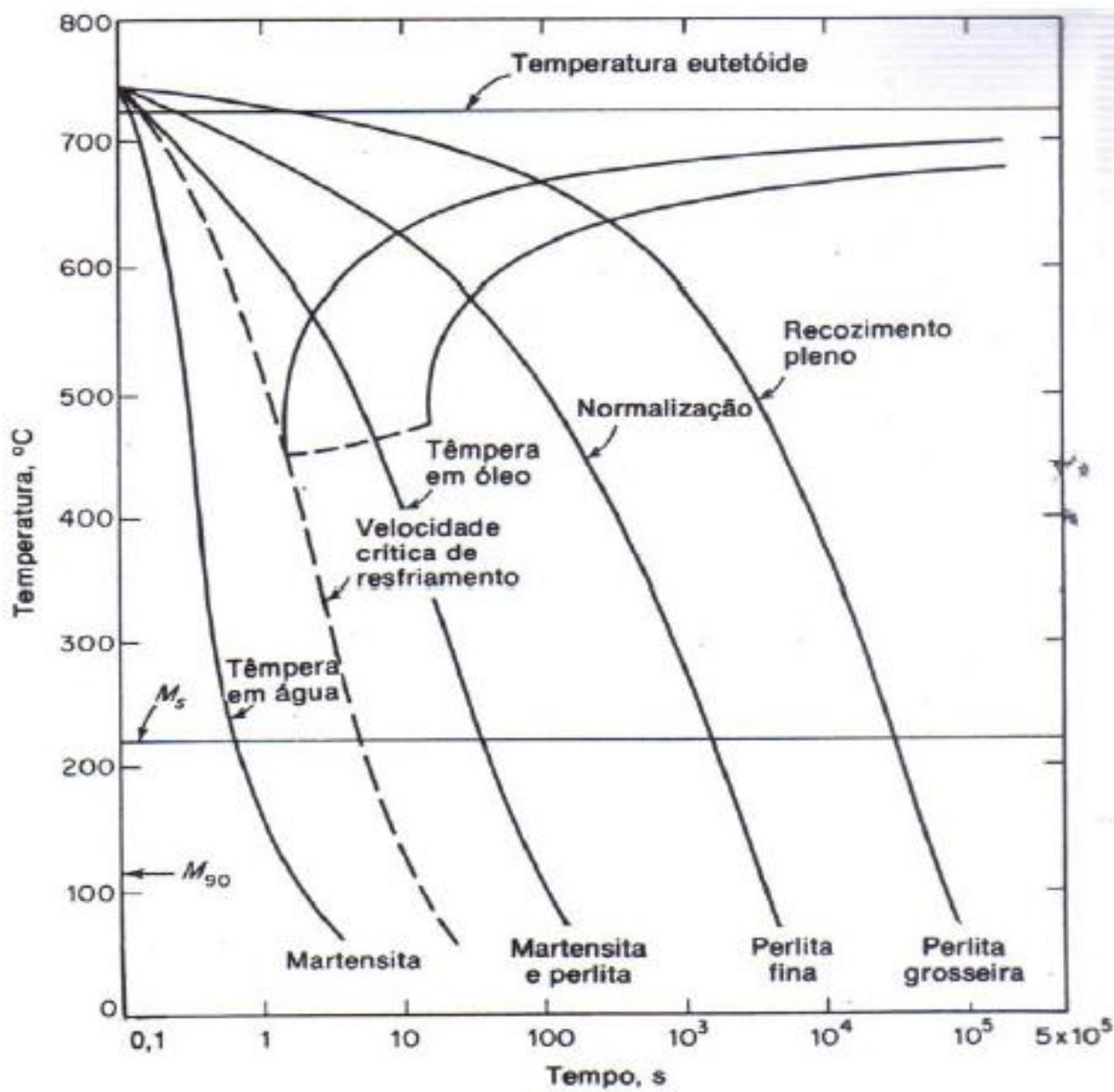
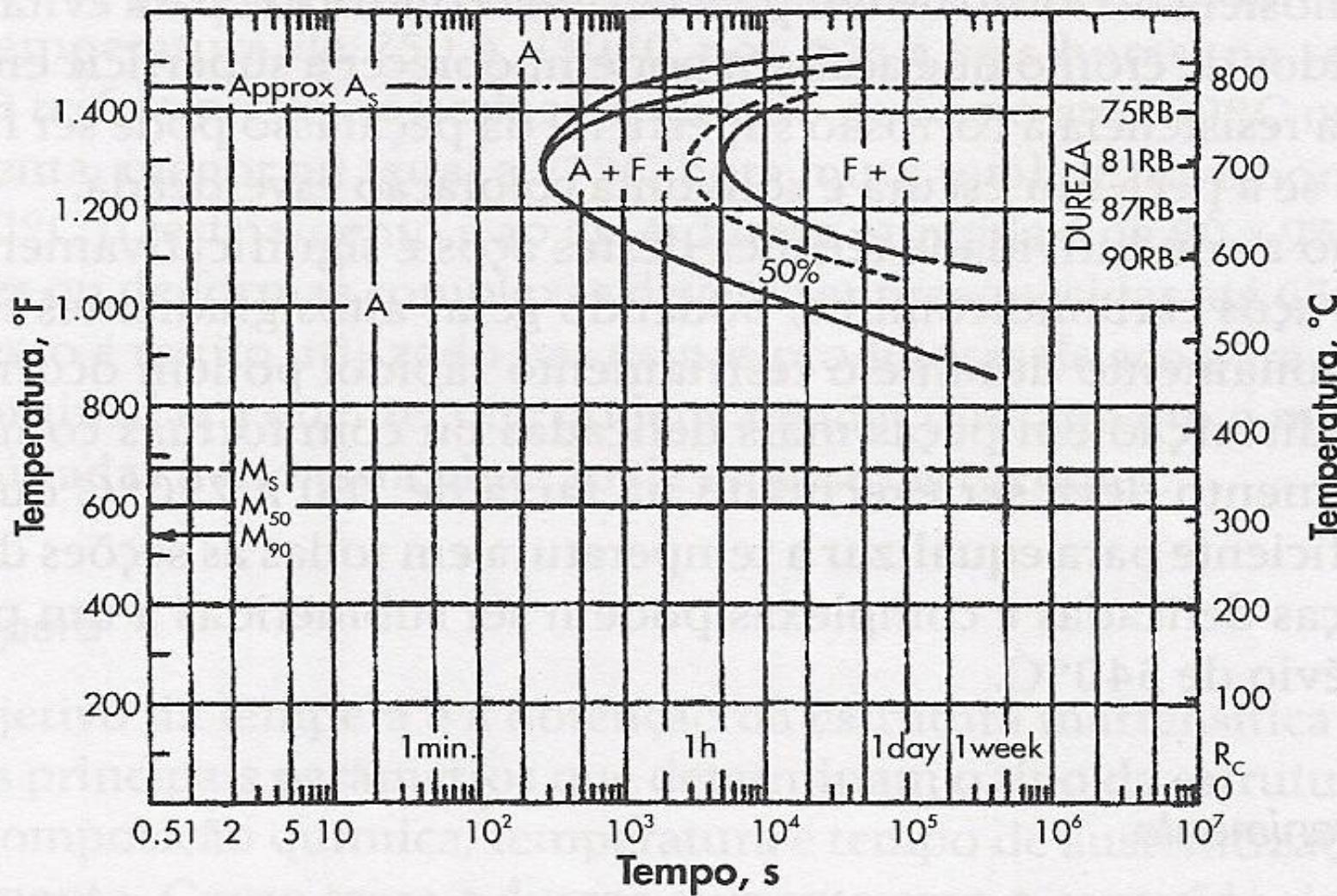


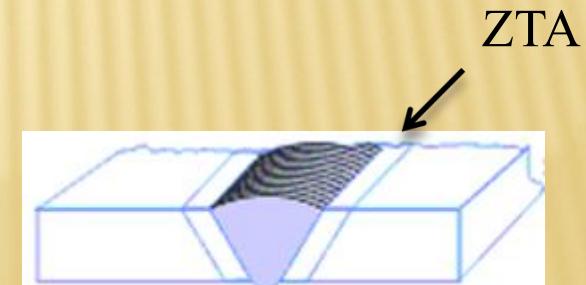
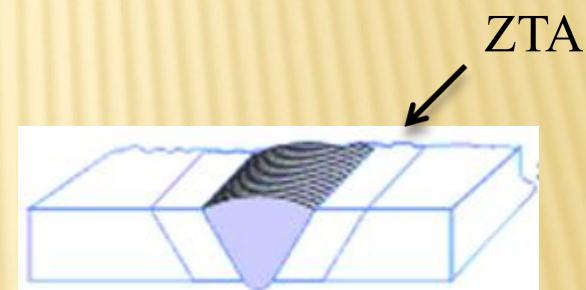
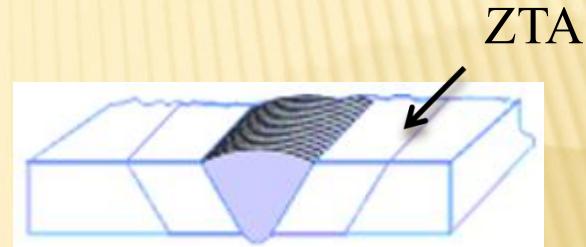
Diagrama TTT aço inoxidável AISI 410



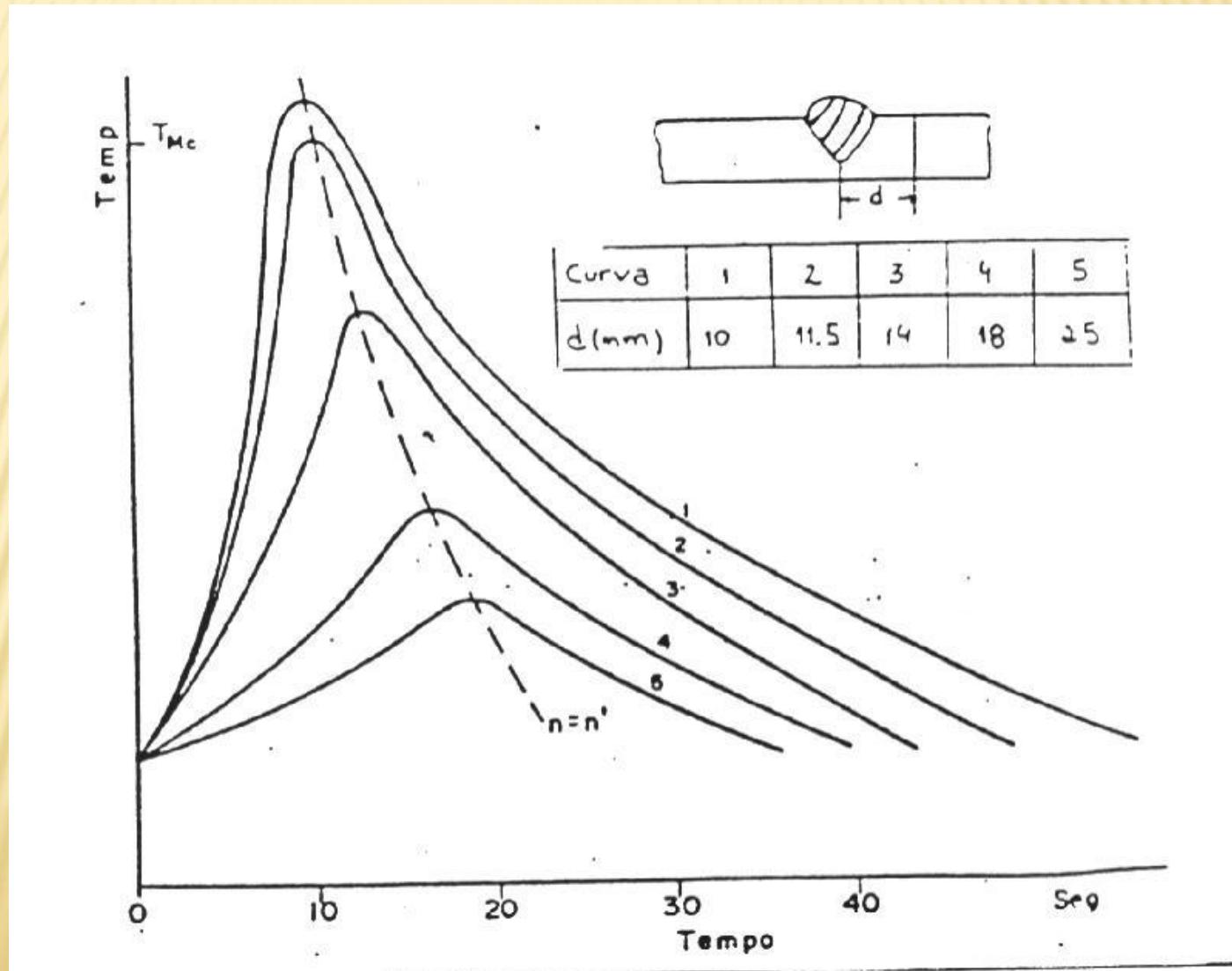
Tipo (AISI)	%C	%Cr	%Mn	%Si	%Mo	%Ni
410	0,15 máx.	11,5 – 13,5	1,0 máx.	1,0 máx.	-	-

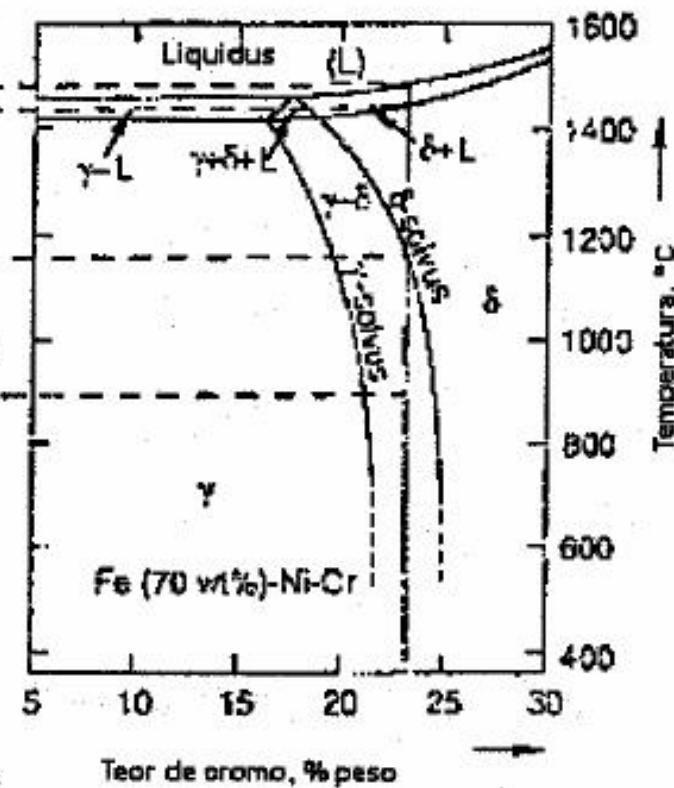
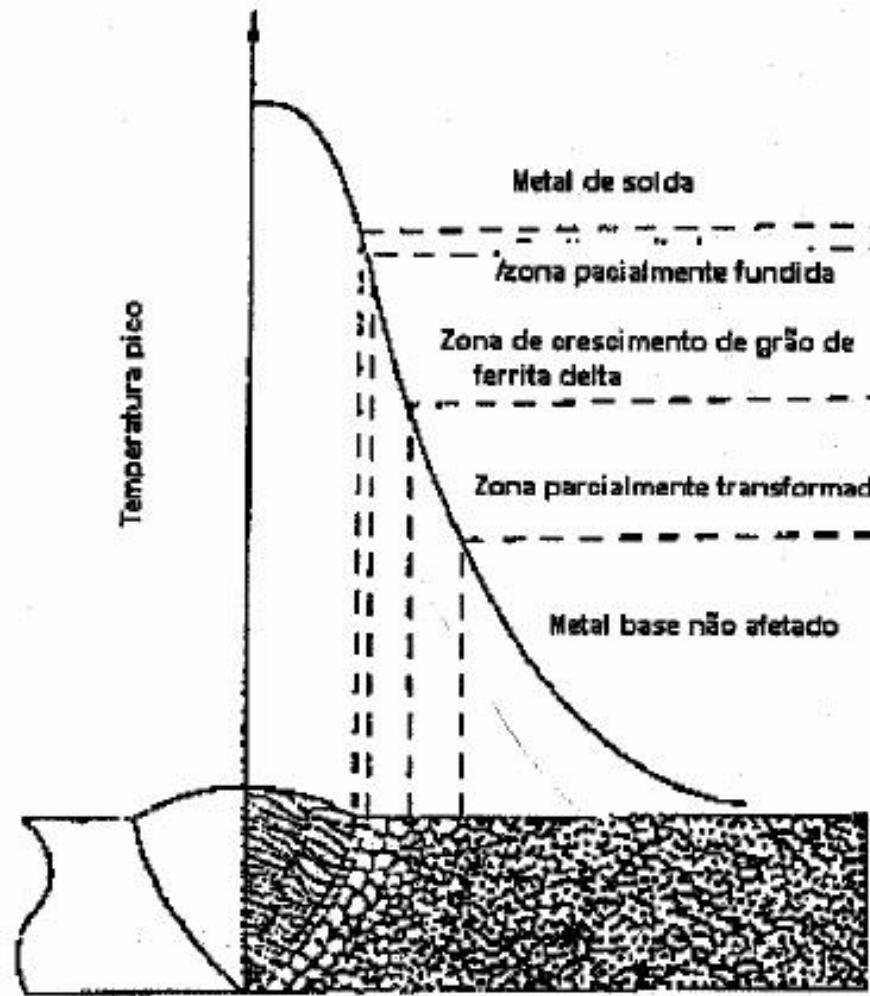
PROCESSOS DE SOLDAGEM PARA AÇOS INOXIDÁVEIS

- 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.

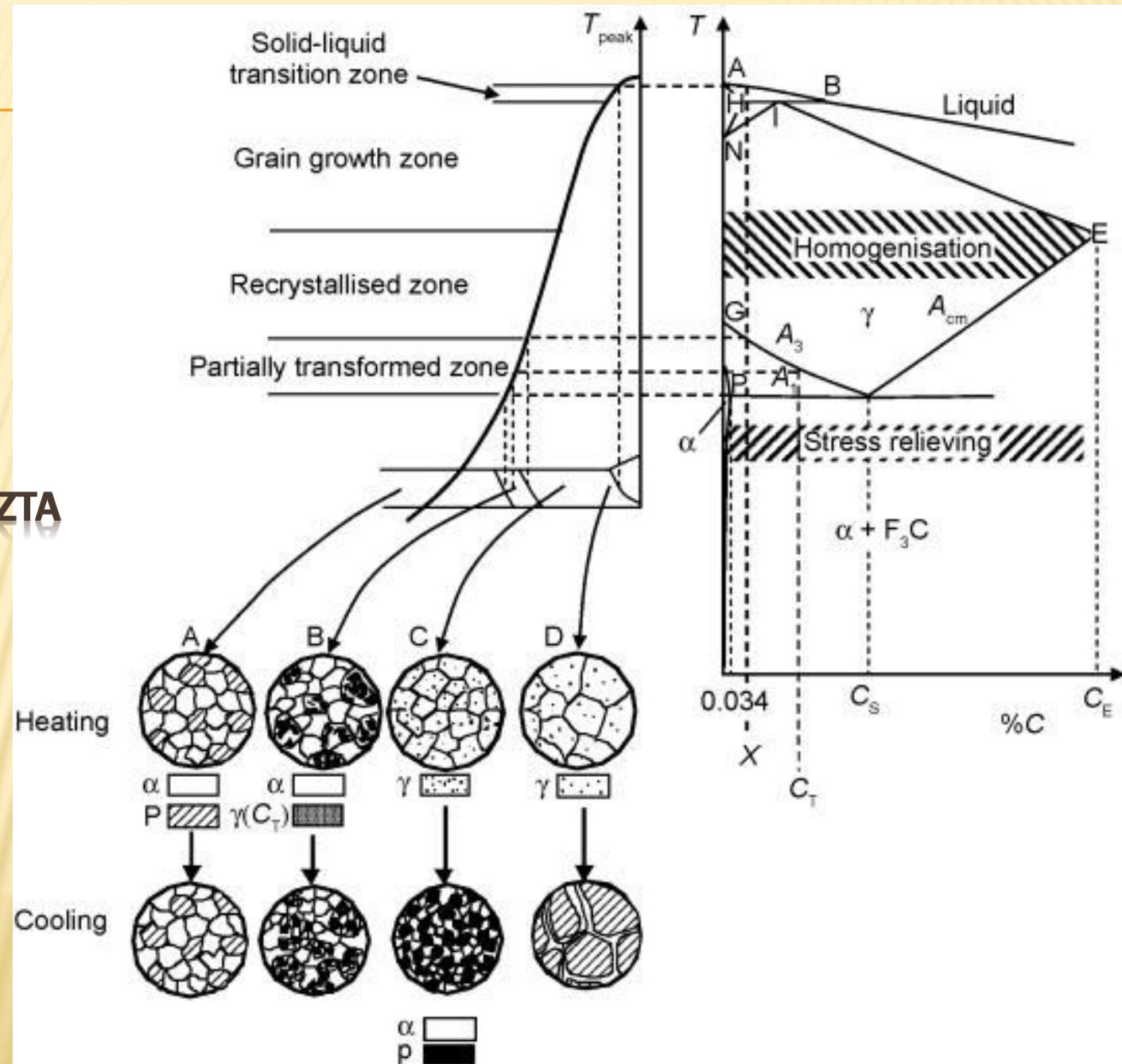


CICLOS TÉRMICOS DE SOLDAGEM

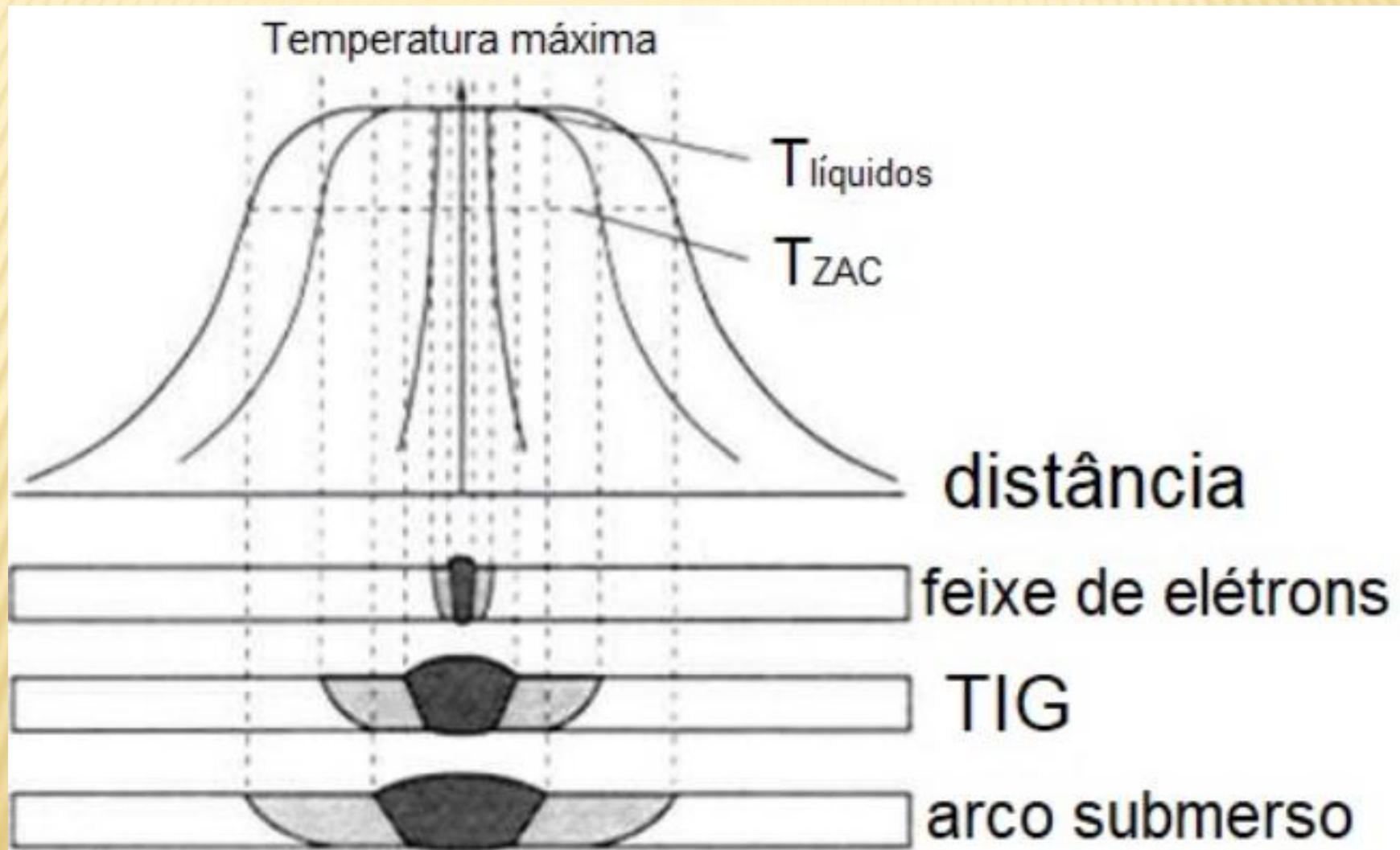




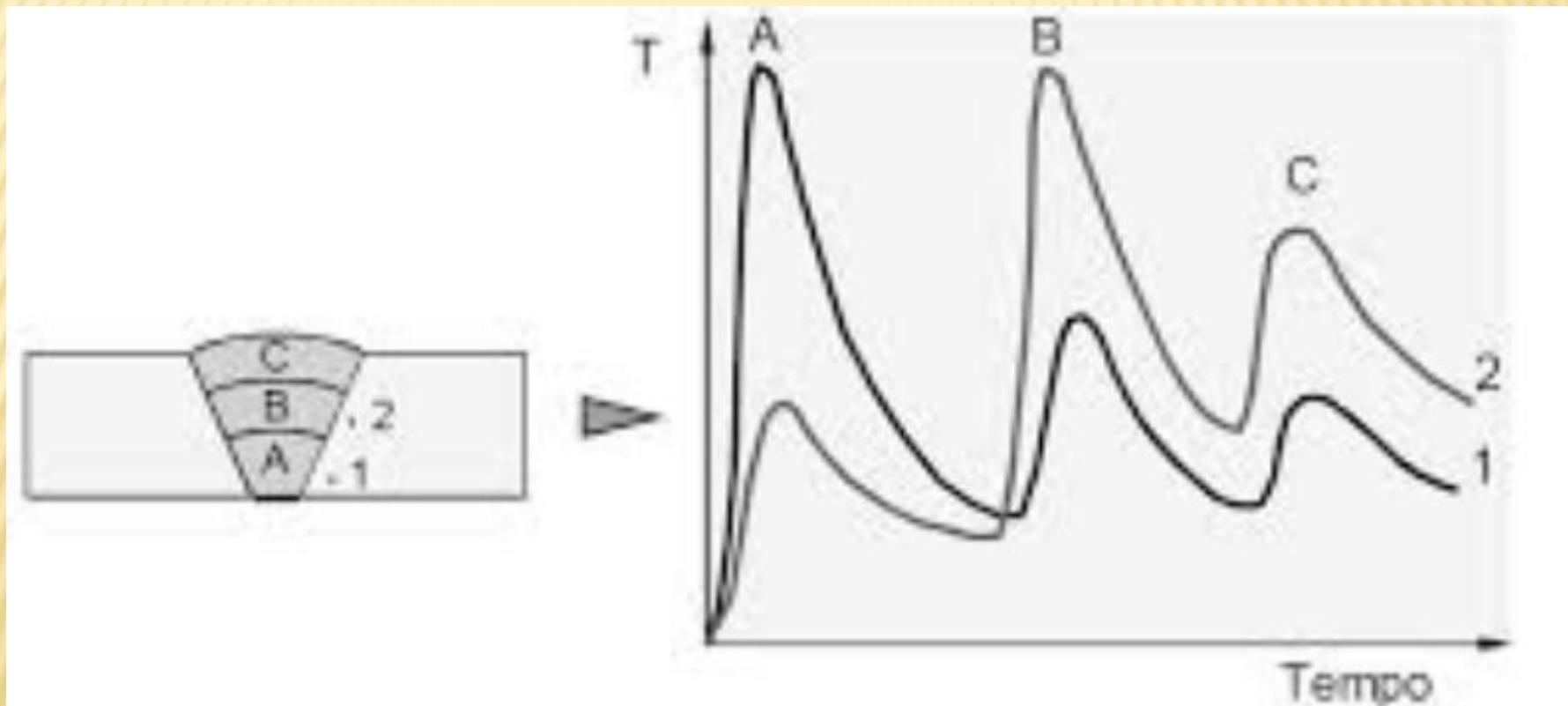
FORMAÇÃO DA ZTA



CICLOS DE SOLDAGEM X PROCESSOS

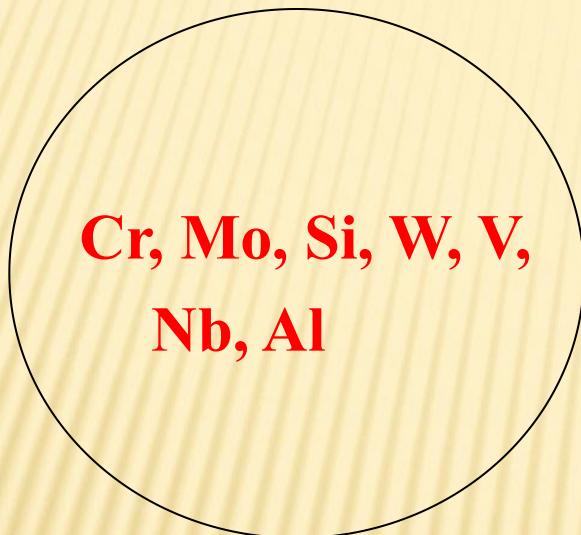


CICLOS DE SOLDAGEM VARIOS PASSES

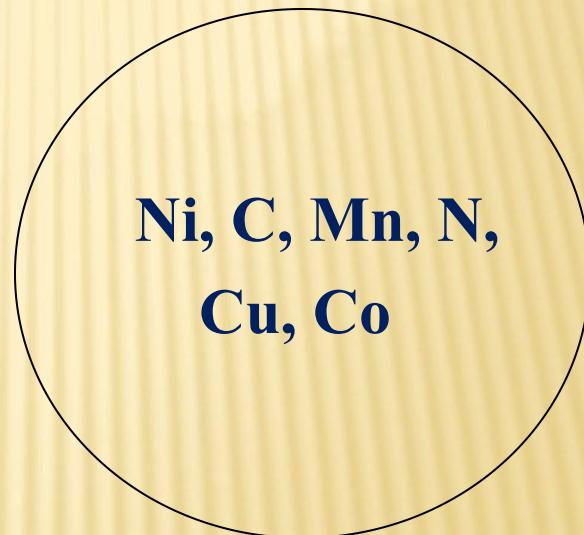


INFLUÊNCIA DOS ELEMENTOS DE LIGA

Elementos Ferritizantes x Elementos Austenitzantes



x



Efeito dos Elementos de Liga nos Aços

De um modo geral, ao introduzir-se elementos de liga nos aços, visam os seguintes objetivos:

- Alterar as propriedades mecânicas
- Aumentar a usinabilidade
- Aumentar a temperabilidade
- Conferir dureza a quente
- Aumentar a capacidade de corte
- Conferir resistência à corrosão
- Conferir resistência ao desgaste
- Conferir resistência a oxidação
- Modificar as características elétricas e magnéticas.
- Melhorar a soldabilidade.

Influência dos elementos de liga

- **Cr** = Principal elemento ferritizante e formador do filme passivo
- **Ni** = principal elemento austenitzante. Aumenta a resistência à corrosão
- **Mo** = Aumenta a resistência à corrosão por pites.
- **Cu** = As vezes é adicionado para melhorar a resistência à corrosão na presença de meios ácidos, por ex. H_2SO_4
- **Si** = Melhora as propriedades em temperaturas elevadas.
- **Mn** = As vezes pode substituir o Ni como elemento austenitzante. Também atua como elemento dessulfurante e desoxidante.
- **Ti e Nb** = Pela facilidade de se combinar com o C/N, são adicionados para evitar a formação de carbonetos e/ou carbonitretos de Cr.
- **N** = Também é um elemento austenitzante e contribui para melhorar a resistência à corrosão nos aços inoxidáveis austeníticos.

EFEITO DOS ELEMENTOS DE LIGA NOS AÇOS INOXIDÁVEIS

Tendências

A estabilizar a austenita [Ni equivalente]

► C, N, Ni, Mn

A estabilizar a ferrita delta [Cr equivalente]

► Cr, Si, Nb, Ti, Mo

A conferir resistência mecânica

► C, N

A estabilizar durante a soldagem

► Nb, Ti

A melhorar a resistência à pites

► Mo, N

A melhorar a resistência à trinca a quente

► Mn

Temperatura (°C)

1600

1400

1200

1000

800

600

400

25

10

15

20

25

30

(%Cr) (%Ni)

Líquido

$\gamma + L$

$\gamma + \alpha + L$

γ Solvus

γ

$\gamma + \alpha$

α

α Solvus

$\gamma + \alpha$

$\alpha + \sigma$

$\gamma + \alpha + \sigma$

Aços Duplex

22

CLASSIFICAÇÃO DOS AÇOS INOXIDÁVEIS

- Aços Inoxidáveis Ferríticos**

- Série 400 - ligados ao Cr - Não-temperáveis

- Aços Inoxidáveis Martensíticos**

- Série 400 - ligados ao Cr - temperáveis

- Aços Inoxidáveis Austeníticos**

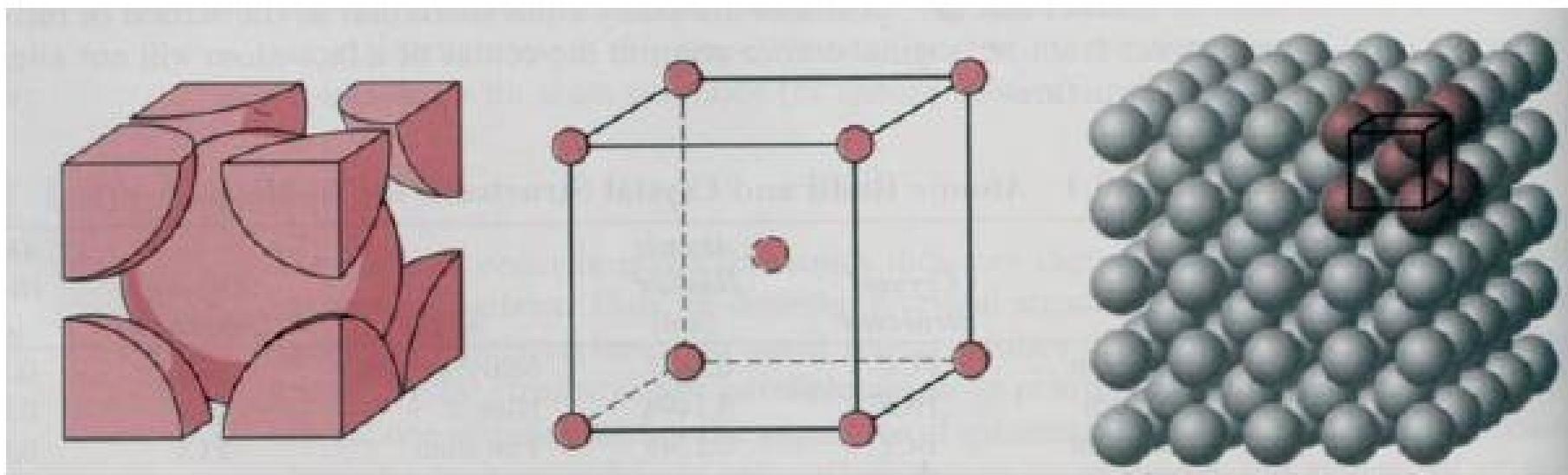
- Série 300 - ligados ao Cr-Ni (Cr-Ni-Mo)
 - Série 200 - ligados ao Cr-Ni-Mn

- Aços Inoxidáveis Duplex (austeno-ferríticos)**

- Lean duplex, duplex e superduplex
 - 2205, 2304, 2202, 2101

AÇOS FERRÍTICOS

- Basicamente ligas Fe-Cr
- Baixo C (0,15%) / Alto Cr (13 a 17%)
- Estrutura cúbica de corpo centrado (CCC)
- Magnéticos
- Não endurecíveis por tratamento térmico
- Baixo custo em relação aos austeníticos



Características dos Aços Inoxidáveis Ferríticos

- Ligas de **Cr (10,5-30%) e C (1,2%)** com estrutura cristalina CCC (ferrítica) e carbonetos dispersos;
- Não são endurecíveis por solubilização e têmpera, são utilizadas no estado recozido;
- Ferromagnético;
- Mo, Si, Al, Ti, Nb para características específicas;
- S e/ou Se aumenta a usinabilidade;
- Baixa ductilidade;
- Baixa formabilidade;
- Relativamente pobre resistência em altas temperaturas;
- Tenacidade limitada em baixas temperaturas e seções grossas;
- Pode substituir às ligas Fe-Cr-Ni-C em aplicações de resistência a corrosão *.

APLICAÇÕES



Baixelas



Pias



Utensílios domésticos



Talheres



Revestimentos

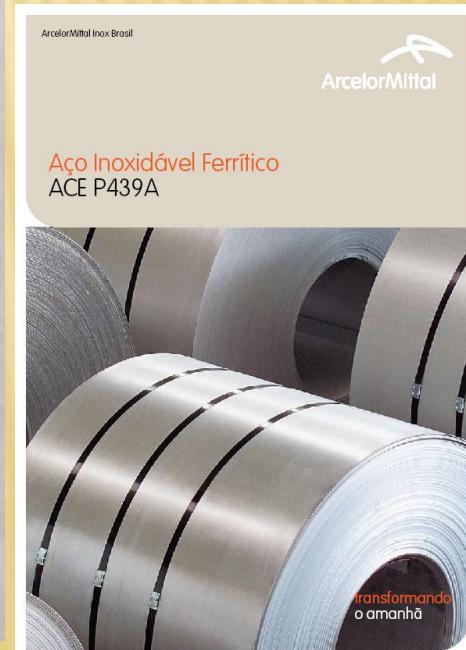
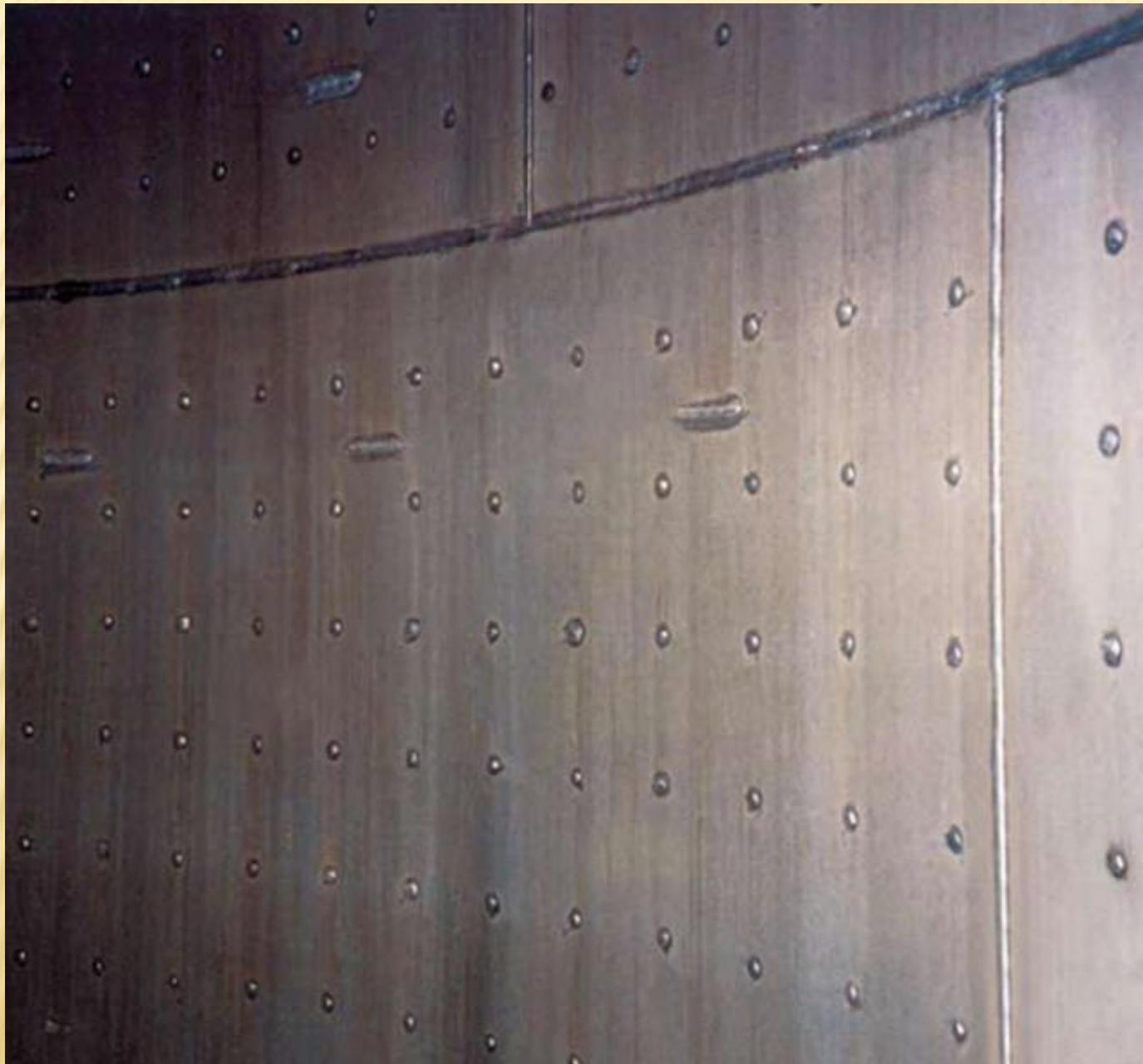


Mesa de fogão



Cesto de máquina
de lavar roupas

Aço 439 utilizado como revestimento de um cozedor.



Série 400

Ferríticos

Talheres, baixelas, pias,
fogões, moedas, etc.

430
 $C \leq 0.12$
Cr 16/18

-Mo

434
 $C \leq 0.12$
Cr 16/18
Mo 0.75/1.25

+Ti
+Mo
+Nb

444
 $C \leq 0.025$
Cr 17.5/19.5
Mo 1.75/2.50
 $Ti+Nb \geq 0.20 + 4(C+N)$

Melhor resistência à corrosão por pites.
Caixas d'água, aquecedores d'água.
Tubos evaporadores.

-C
-Cr
+Ti

409
 $C \leq 0.08$
Cr 10.5/11.75
 $Ti \geq 6 \times C$

Sistema de
escapamento.

-C
-Cr

Componentes do sistema de
escapamento de automóveis.
Máquinas de lavar roupas.
Microondas.

-Ti

439
 $C \leq 0.07$
Cr 17/19
 $Ti \geq 0.20 + 4(C+N)$

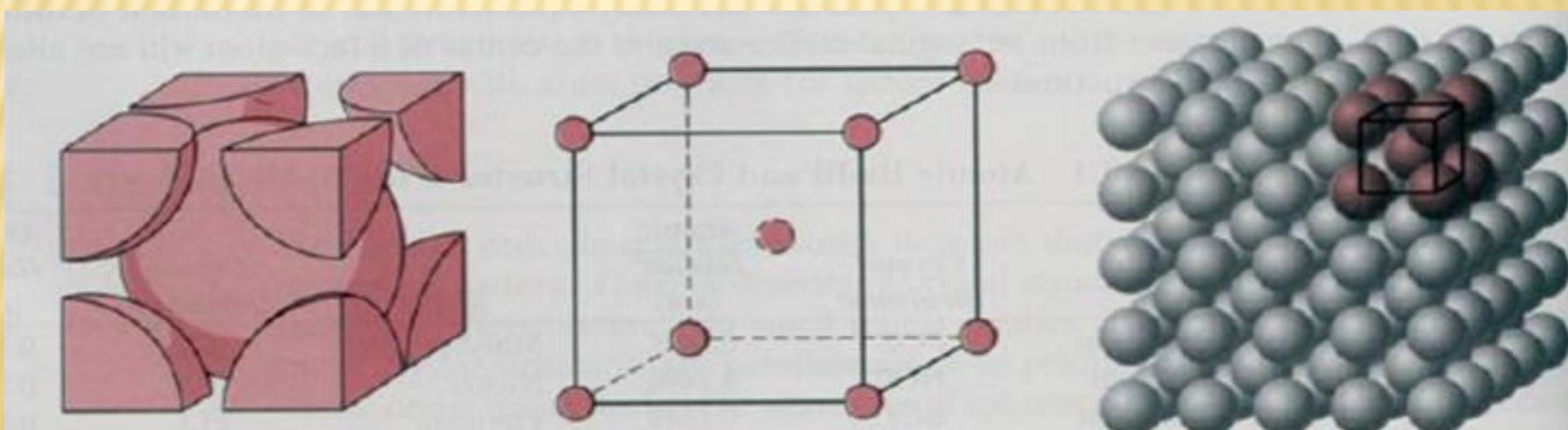
+Nb

DIN 1.4509
(ACE 441)
 $C \leq 0.03$
Cr 17.5/18.5
 $Nb \geq 3 \times C + 0.30$

Melhor resistência à fluidez
em altas temperaturas.
Sistema de escapamento de
automóveis.

AÇOS MARTENSÍTICOS

- Basicamente ligas Fe-Cr
- Alto C (>0,15%) / Baixo Cr (13%)
- Estrutura cúbica de corpo centrado (CCC) quando no estado recocido
- Magnéticos
- Endurecíveis por tratamento térmico
- Baixo custo em relação aos austeníticos
- Principal característica: alta dureza



Características dos Aços Inoxidáveis Martensíticos

- Ligas de Cr (10,5-18%) e C (1,2%) com estrutura martensítica com carbonetos dispersos;
- C aumenta dureza mas favorece a formação de carbonetos;
- Trabalhável a frio e a quente, quando C é baixo;
- Ferromagnético;
- Endurecível por tratamento térmico;
- Relativamente POUCO resistente a corrosão;
- Tempera pode melhorar a resistência a corrosão;
- Nb, Si, W e V modificam a resposta de revenido após o endurecimento;
- Excesso de Carboneto pode estar presente para aumentar a resistência ao desgaste ou manter o poder de corte;
- O Ni pode elevar a resistência corrosão e a tenacidade;
- S e/ou Se aumenta a usinabilidade;
- Revenido a baixa T° (150°C a 400°C).

APLICAÇÕES

A alta dureza e consequente resistência ao desgaste permitem aplicações em cutelaria, discos de freio, equipamentos cirúrgicos/odontológicos e turbinas



Instrumentos cirúrgicos

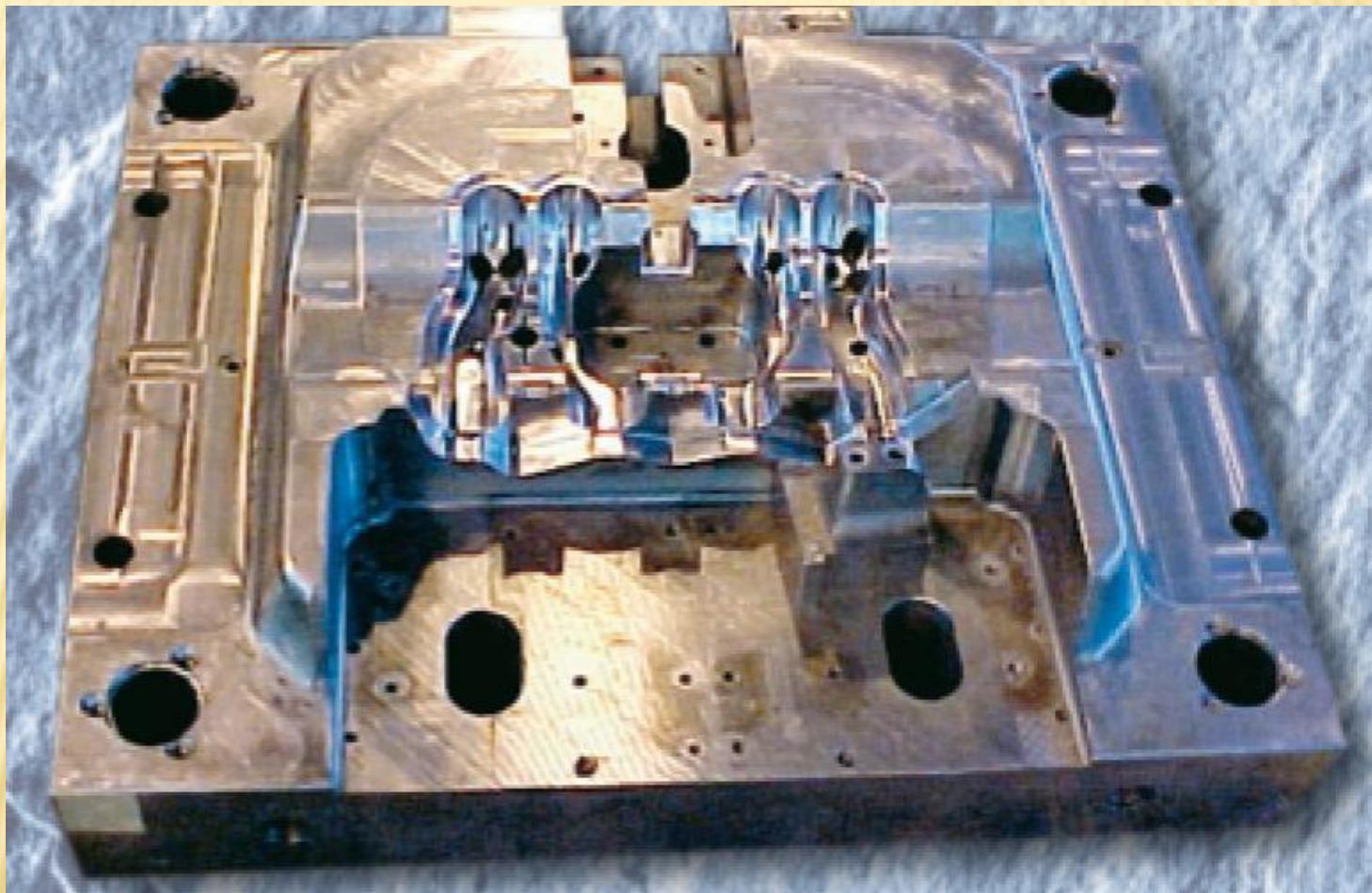


Facas de mesa



Facas profissionais

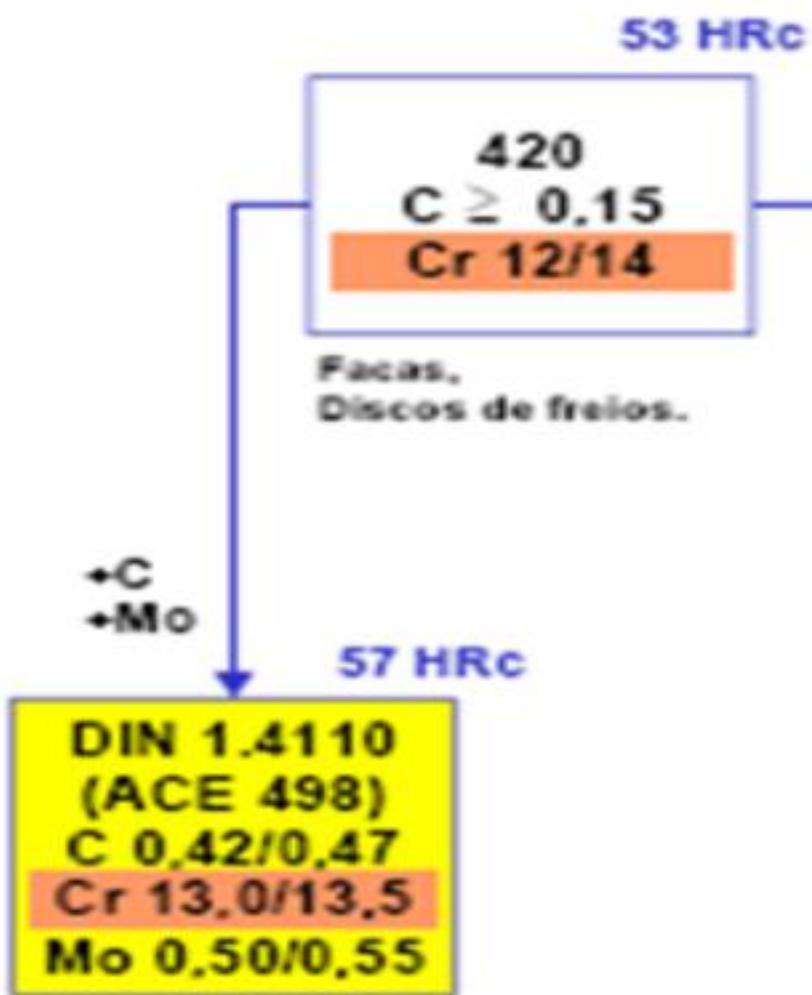




MATRIZ

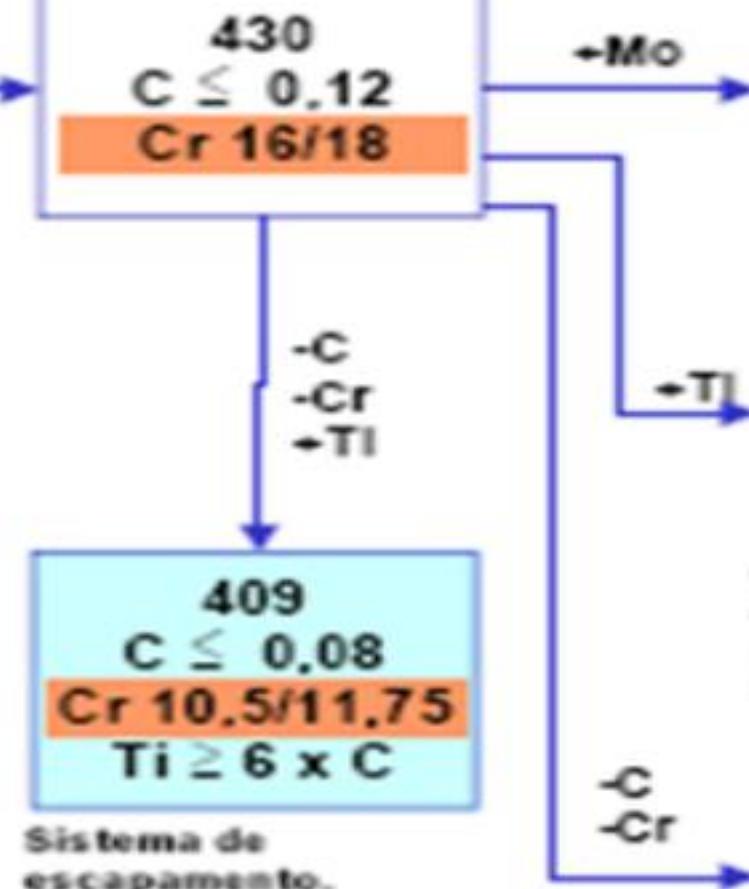
Aços Inoxidáveis da Série 400

Martensíticos



Ferríticos

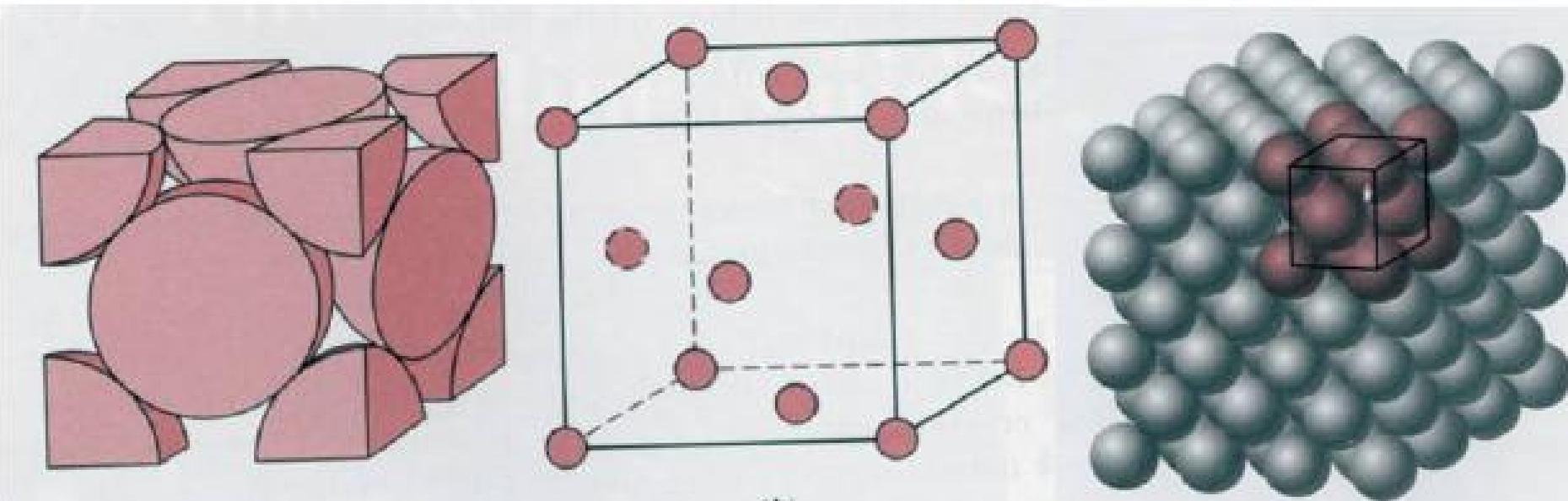
Talheres, baixelas, pias,
fogões, moedas, etc



Maior dureza.
Resistência ao desgaste.

AÇOS AUSTENÍTICOS

- Basicamente ligas Fe-Cr-Ni ou Fe-Cr-Ni-Mo
- Baixíssimo teor de C (< 0,08%) / Alto Cr (18%)
- Estrutura cúbica de face centrada (CFC)
- Não-Magnéticos
- Não-endurecíveis por tratamento térmico
- Endurecíveis por trabalho a frio e pela transformação martensítica
- Excelente resistência à corrosão, dutilidade e soldabilidade
- Alto custo, quando comparado aos ferríticos



Características dos Aços Inoxidáveis Austeníticos

- Cr (16-26%), Ni (até 35%) com estrutura cristalina CFC;
- Atingida através de elementos austenitzantes (ex.: Ni, Mn, N);
- Não magnético na condição recozido;
- Melhor resistência a corrosão;
- Endurecível apenas por trabalho a frio;
- Excelentes propriedades criogênicas;
- Boa Resistência em altas temperaturas;
- Série 2xx (Ni e Mn);
- Mo, Cu, Si, Al, Ti e Nb melhoram certas características e propriedades;
- S e/ou Se aumenta a usinabilidade.

APLICAÇÕES

- Aplicações que exigem resistência à corrosão e alta estampabilidade



O PETRÓLEO É NOSO

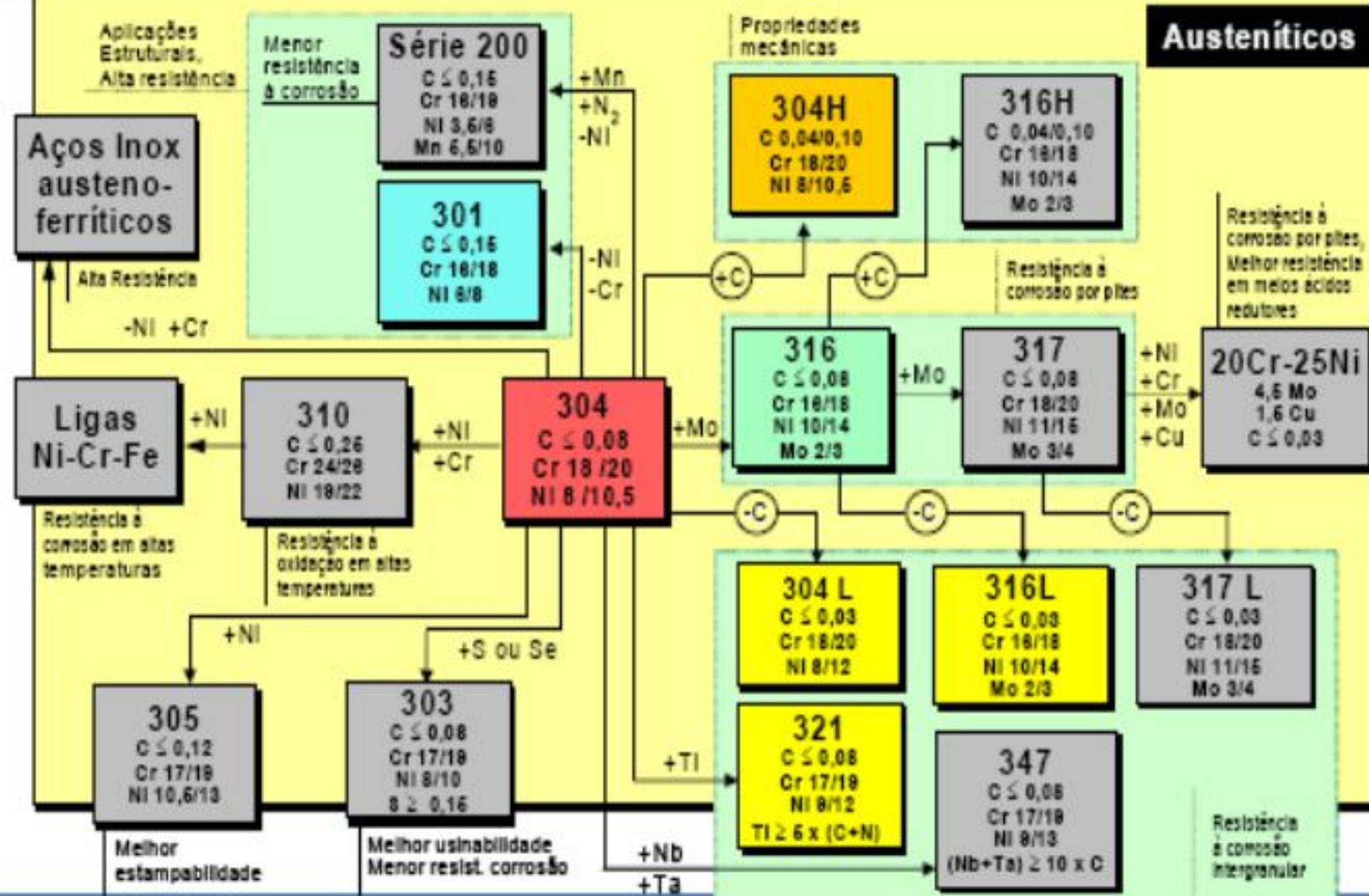
CRESCIMENTO DA
PRODUÇÃO NACIONAL
AMPLIA USO DE
AÇO INOX NAS
REFINARIAS



Aplicações



AÇOS INOX DA SÉRIE 300



CLASSIFICAÇÃO DOS AÇOS INOXIDÁVEIS

- Aços Inoxidáveis Ferríticos**

- Série 400 - ligados ao Cr - Não-temperáveis

- Aços Inoxidáveis Martensíticos**

- Série 400 - ligados ao Cr - temperáveis

- Aços Inoxidáveis Austeníticos**

- Série 300 - ligados ao Cr-Ni (Cr-Ni-Mo)
 - Série 200 - ligados ao Cr-Ni-Mn

- Aços Inoxidáveis Duplex (austeno-ferríticos)**

- Lean duplex, duplex e superduplex
 - 2205, 2304, 2202, 2101

Série 400

Ferríticos

Talheres, baixelas, pias,
fogões, moedas, etc.

430
 $C \leq 0.12$
Cr 16/18

-Mo

434
 $C \leq 0.12$
Cr 16/18
Mo 0.75/1.25

+Ti
+Mo
+Nb

444
 $C \leq 0.025$
Cr 17.5/19.5
Mo 1.75/2.50
 $Ti+Nb \geq 0.20 + 4(C+N)$

Melhor resistência à corrosão por pites.
Caixas d'água, aquecedores d'água.
Tubos evaporadores.

-C
-Cr
+Ti

409
 $C \leq 0.08$
Cr 10.5/11.75
 $Ti \geq 6 \times C$

Sistema de
escapamento.

-C
-Cr

Componentes do sistema de
escapamento de automóveis.
Máquinas de lavar roupas.
Microondas.

-Ti

439
 $C \leq 0.07$
Cr 17/19
 $Ti \geq 0.20 + 4(C+N)$

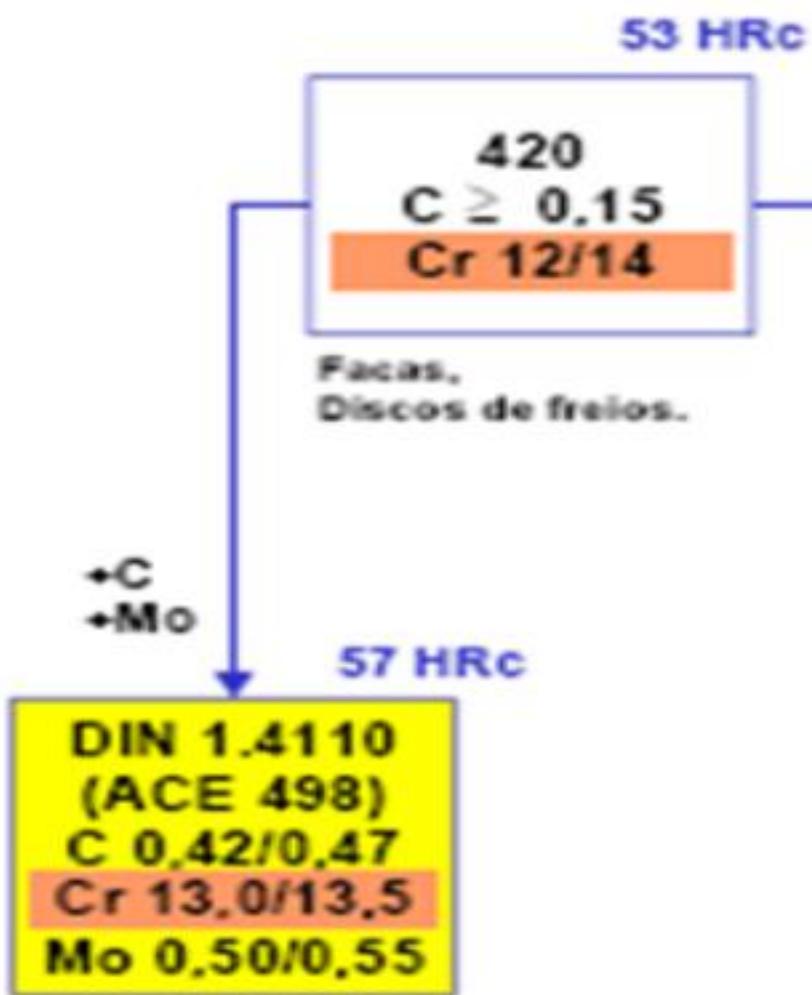
+Nb

DIN 1.4509
(ACE 441)
 $C \leq 0.03$
Cr 17.5/18.5
 $Nb \geq 3 \times C + 0.30$

Melhor resistência à fluidez
em altas temperaturas.
Sistema de escapamento de
automóveis.

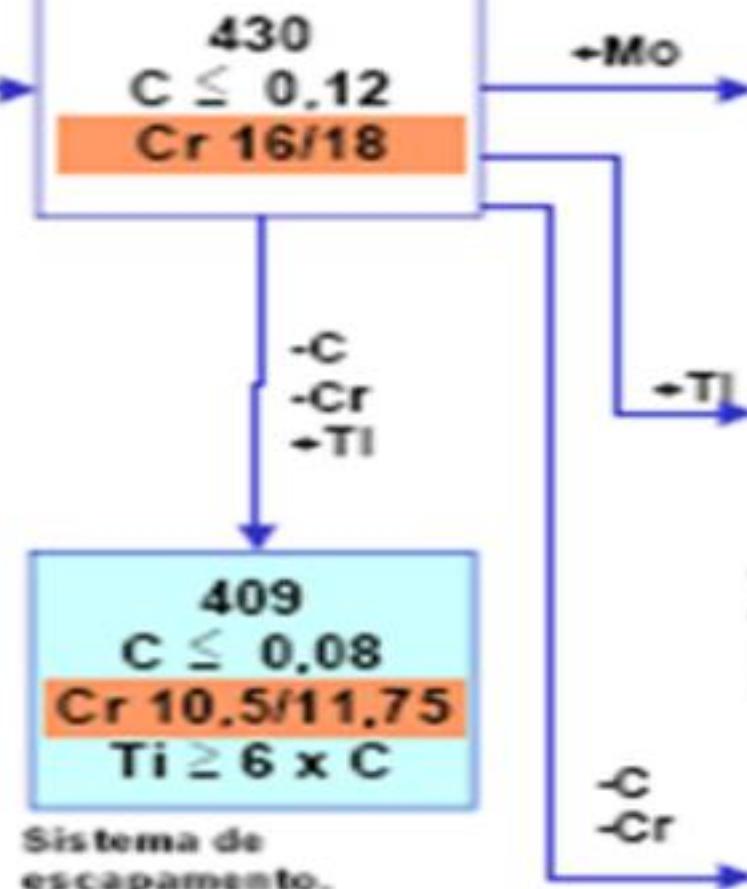
Aços Inoxidáveis da Série 400

Martensíticos



Ferríticos

Talheres, baixelas, pias,
fogões, moedas, etc



Maior dureza.
Resistência ao desgaste.

AÇOS INOX DA SÉRIE 300

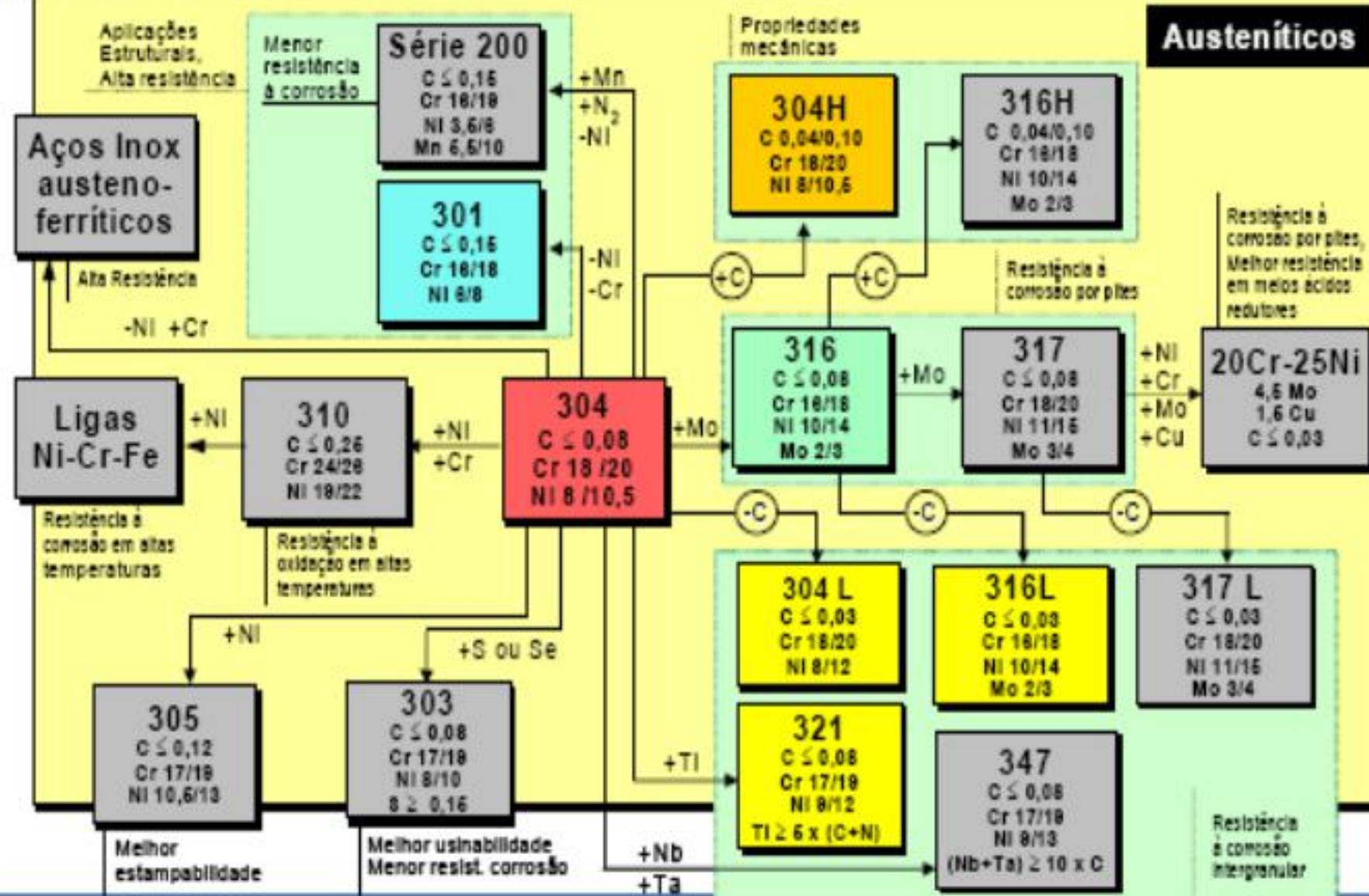
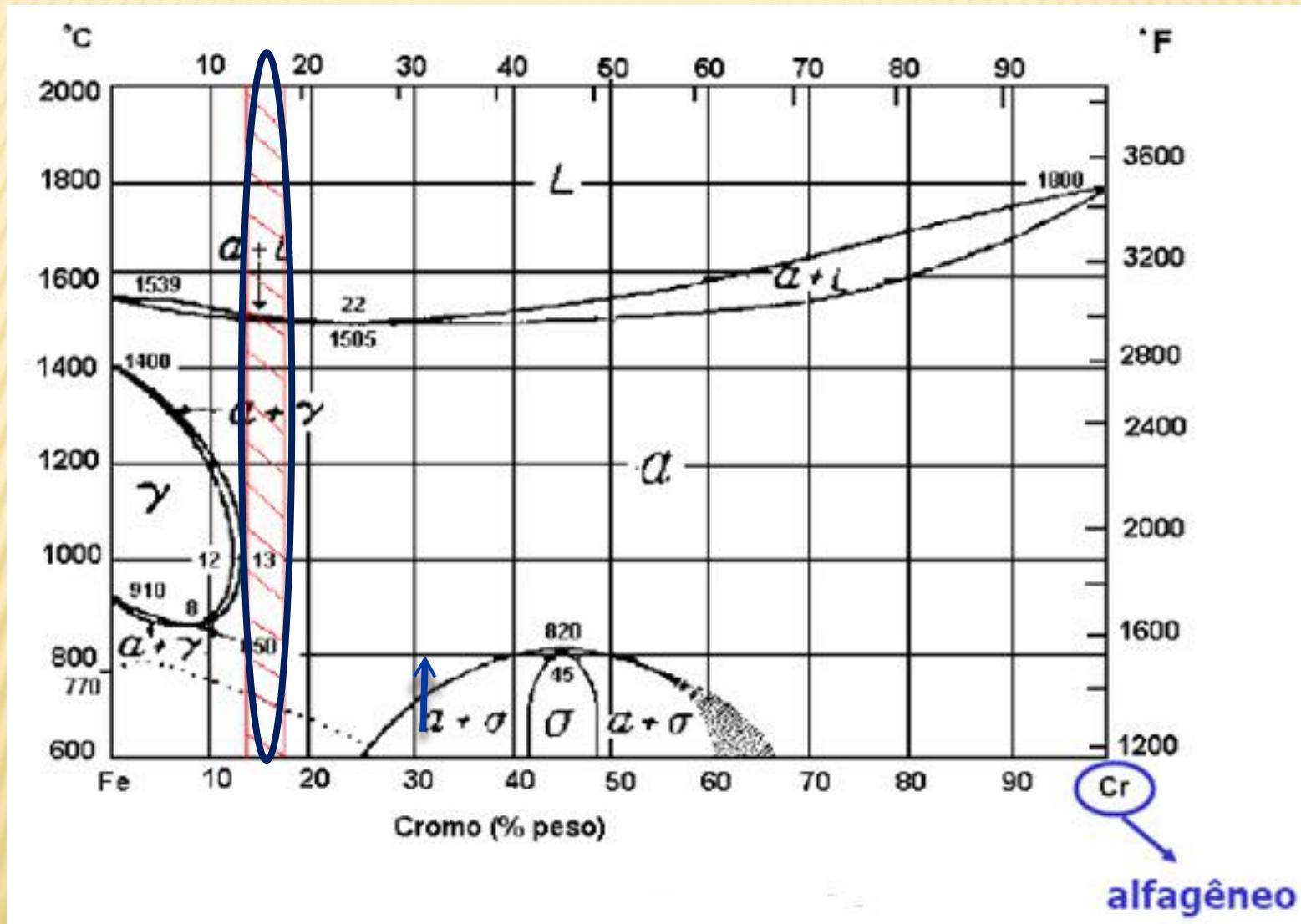
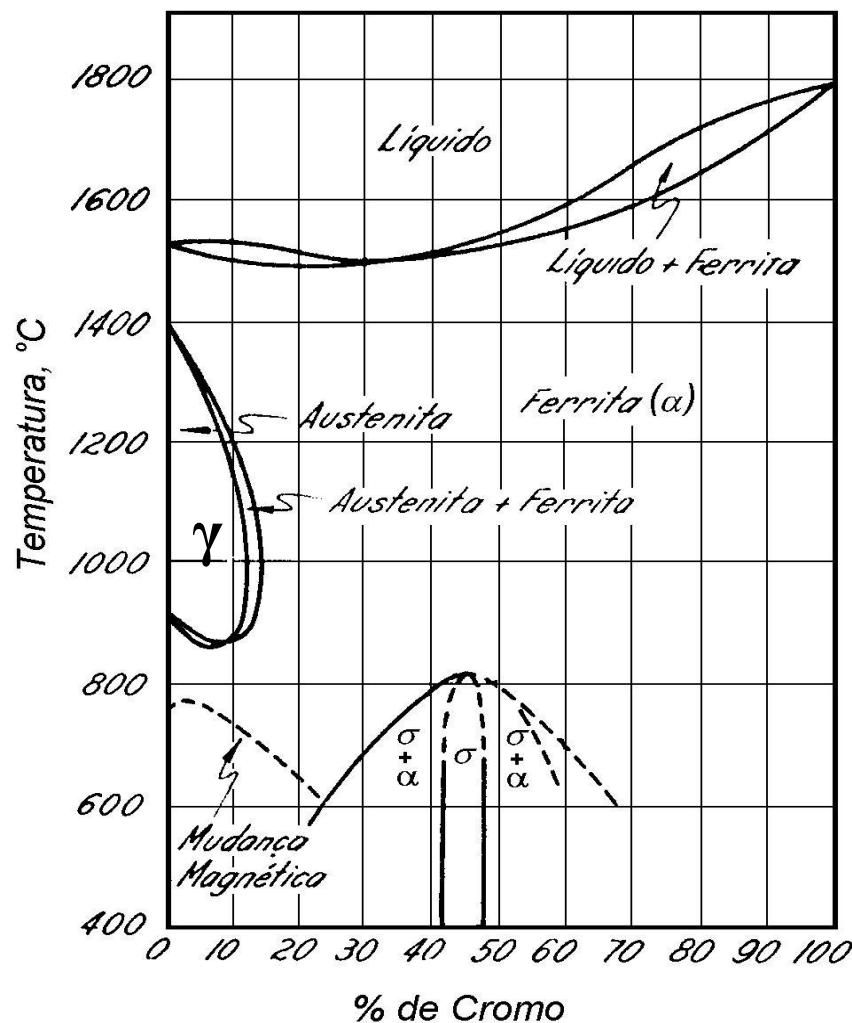


Diagrama de fases FeCr



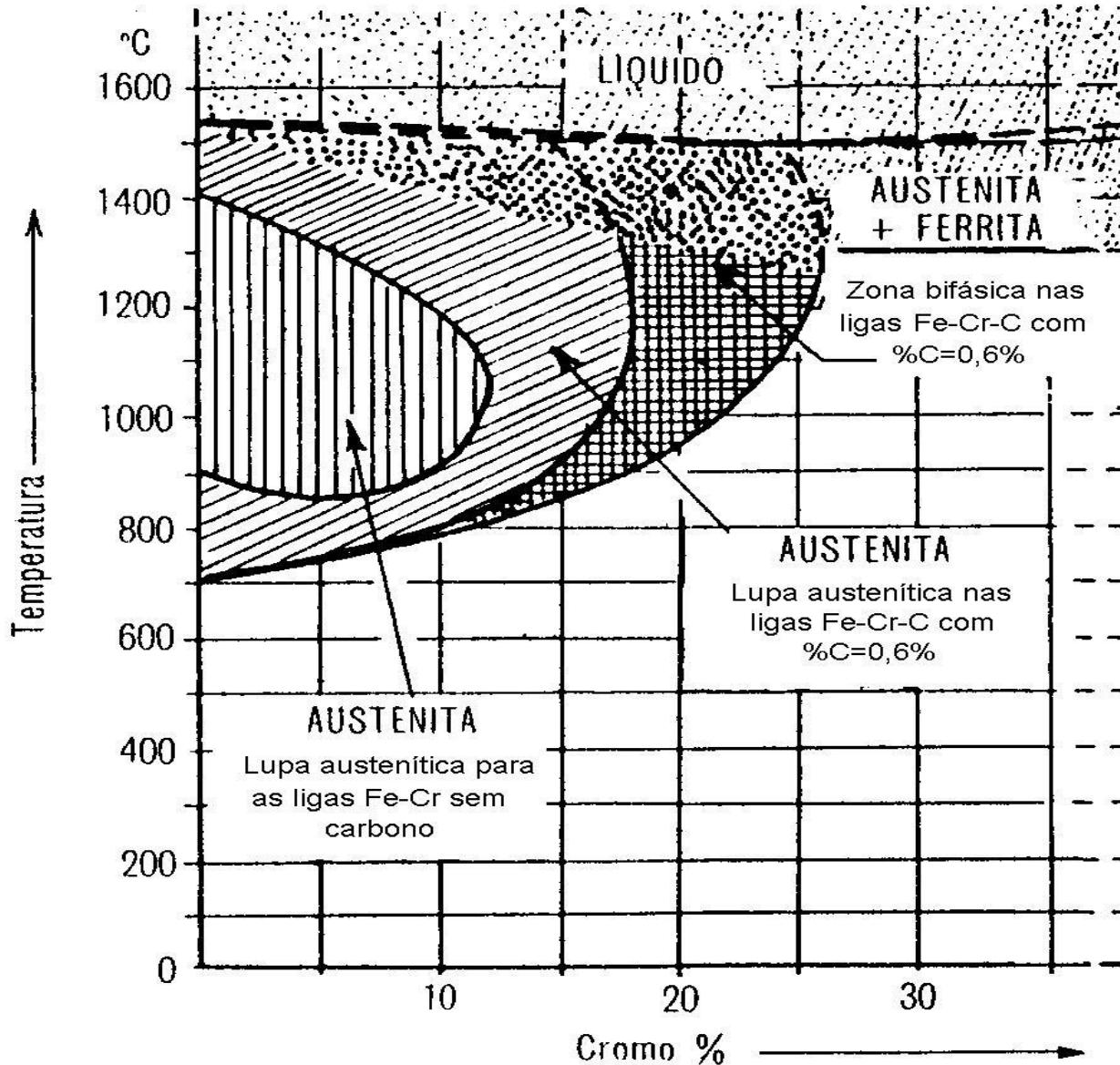
DETALHES IMPORTANTES: Lupa austenítica e Fase sigma

Detalhes do diagrama de fases FeCr



- Para qualquer Cr se forma primeiramente ferrita δ ;
- Cr é ferritizante;
- Normalmente tem N e C (austenitzantes);
- Pequenos teores de C e N ampliam muito γ (26%Cr, 0,19%C e 0,02%N);
- Aumento da T° de transformação α/γ (até 1250 °C para 26%Cr);
- Fase σ (sigma 44-50%Cr) p/ ligas 20 a 70%Cr;
 - Precipitado α' não magnético, ccc, 61~83%Cr;
 - Decomposição eutetóide p/ligas 15~70%Cr em temp. entre 400~550 °C e inicia em 440 ± 20 °C;
- Fragilização e redução de resistência a corrosão em ligas a 475 °C (reversível).

Efeito do carbono



Cria campos de estabilidade para carbonetos

No diagrama FeCr - Lupa austenitica

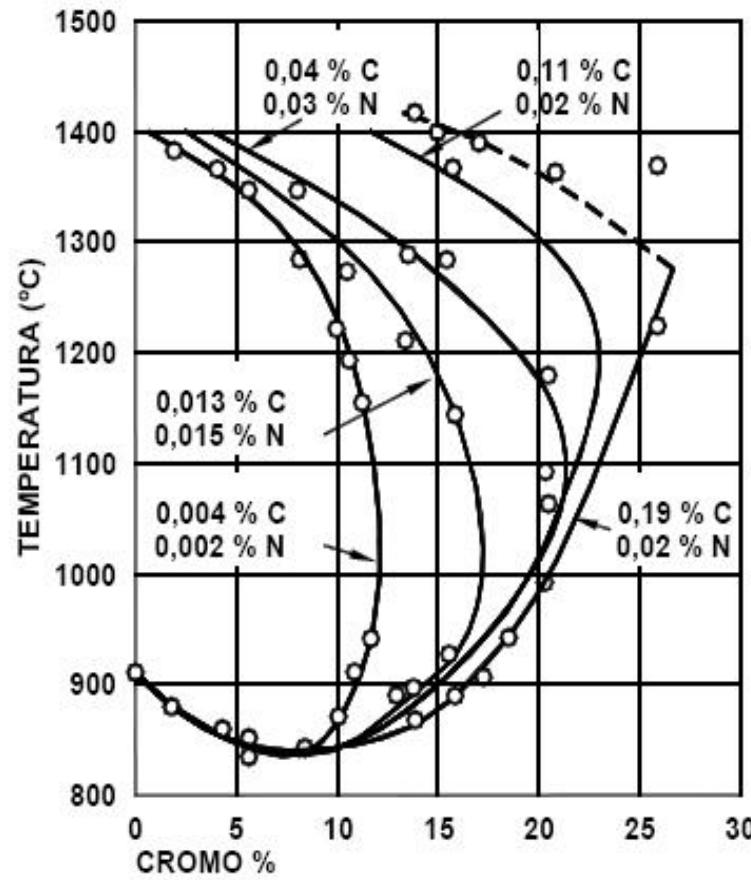
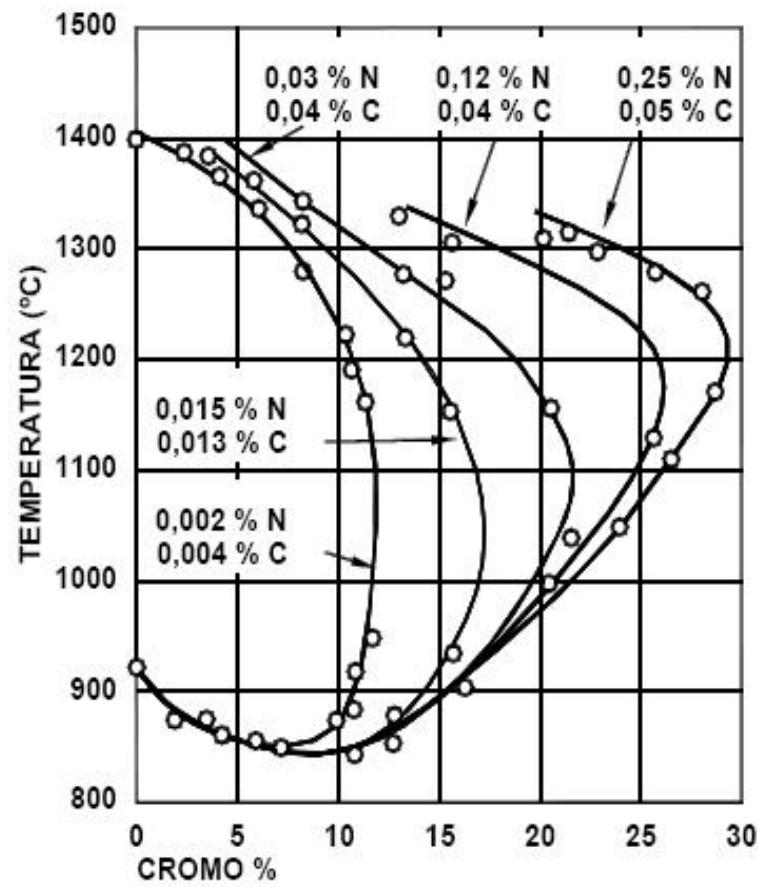
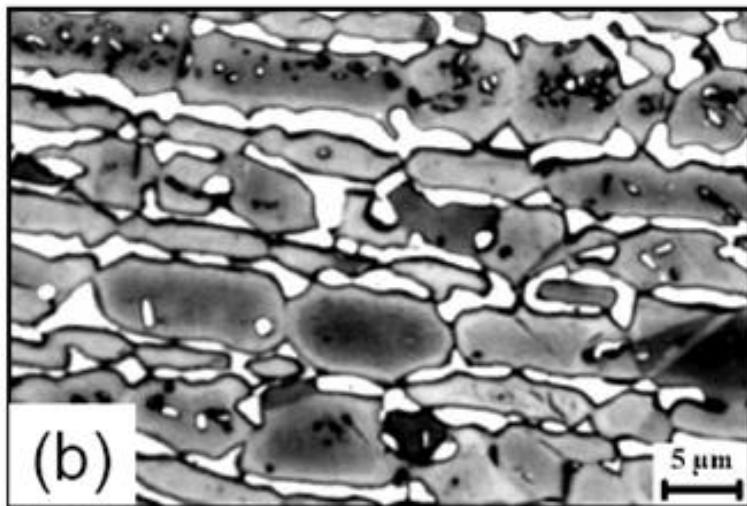
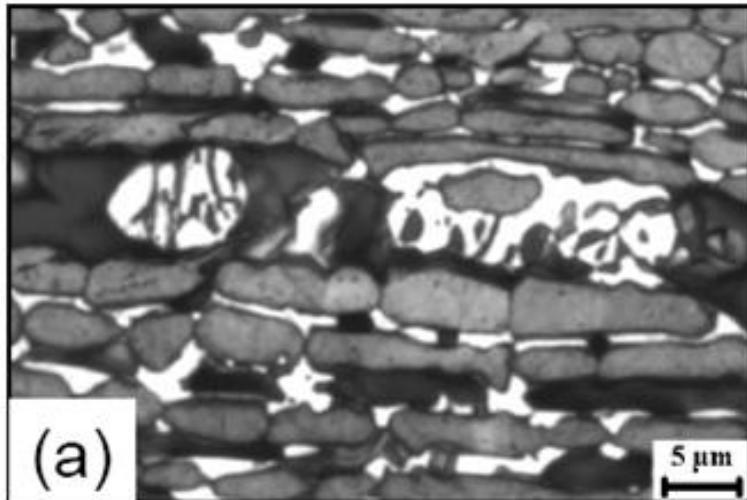


Figura 11- Níveis de concentração da austenita no sistema Fe-Cr-Ni com 0,1 e 0,3% de nitrogênio (Folkhard et al., 1984).

Detalhes da microestrutura da estrutura FeCr



UNS S31803 DSS (a) aged at 850 C for 30 minutes, showing ferrite (dark), austenite (gray) and sigma; (b) aged at 850 C for 100 hours, with austenite (gray) and sigma. Optical microscopy. Modified Behara etching.

α'

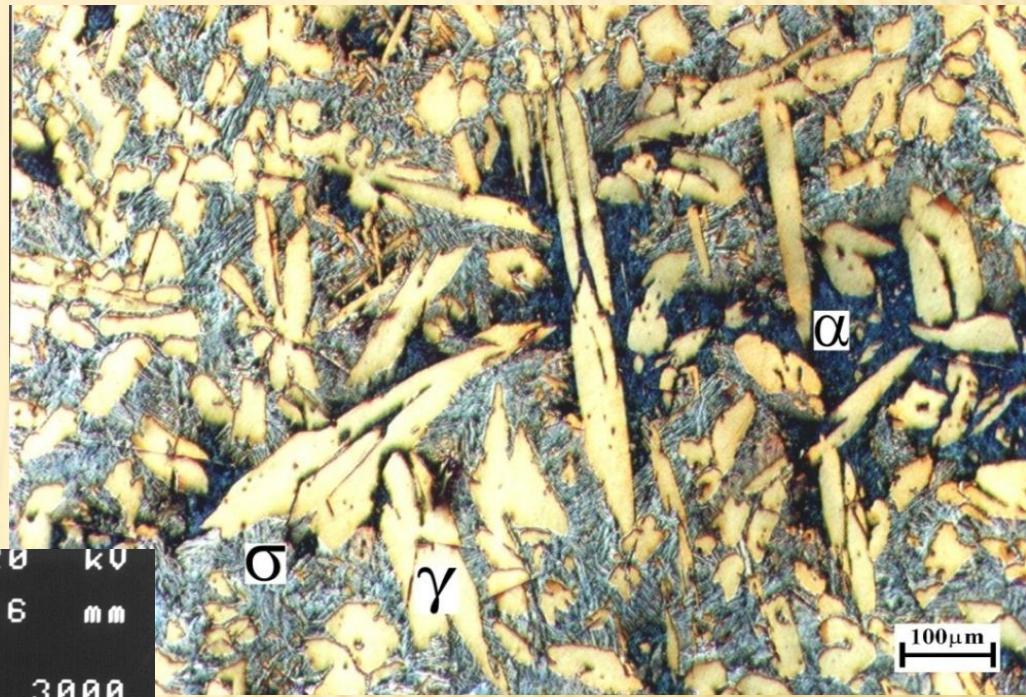
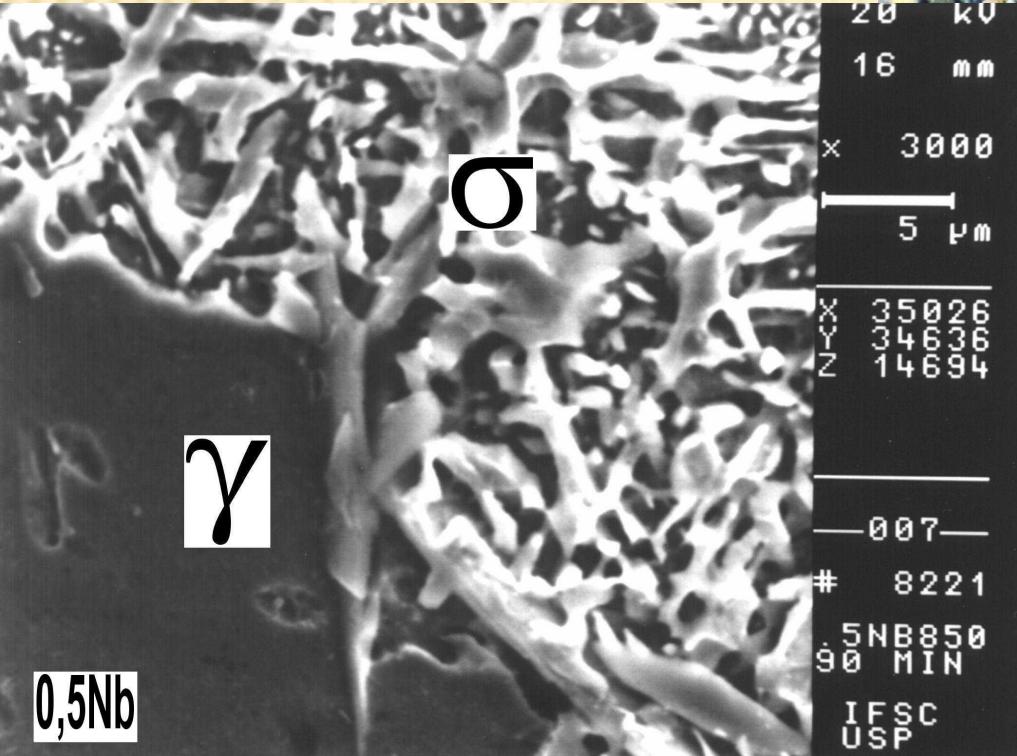
Estrutura CCC, rica em cromo
Causa fragilização (aumenta tendência à fratura por clivagem), especialmente a 475 C.

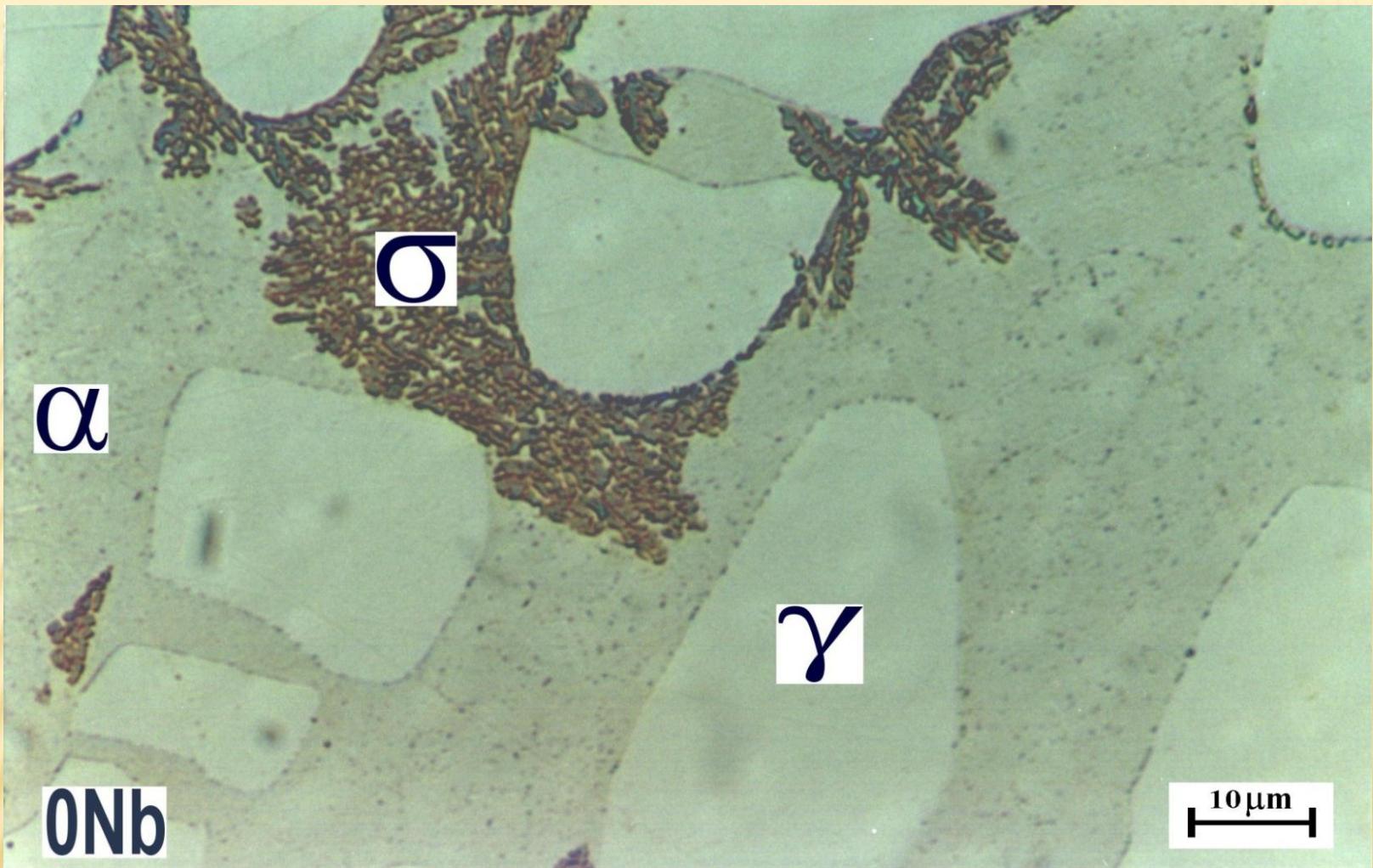
σ

Bain e Griffiths (1927): "B" ("brittleness")
Elevada dureza (940 HV ou 68 HRC), trinta átomos por célula unitária tetragonal ($c/a=0,52$), não magnética.
Presença de elementos ferritizantes favorecem sua formação.

Carbonetos e nitretos, principalmente de cromo

Outros detalhes.....





- ✖ Precipitação de Fase Sigma após tratamento térmico de solubilização a 1120°C/30 min seguido de resfriamento em água e envelhecimento a 850 °C por 5 minutos.

CLASSIFICAÇÃO DOS AÇOS INOXIDÁVEIS

- Aços Inoxidáveis Ferríticos**

- Série 400 - ligados ao Cr - Não-temperáveis

- Aços Inoxidáveis Martensíticos**

- Série 400 - ligados ao Cr - temperáveis

- Aços Inoxidáveis Austeníticos**

- Série 300 - ligados ao Cr-Ni (Cr-Ni-Mo)
 - Série 200 - ligados ao Cr-Ni-Mn

- Aços Inoxidáveis Duplex (austeno-ferríticos)**

- Lean duplex, duplex e superduplex
 - 2205, 2304, 2202, 2101

Corrosão nos aços inoxidáveis

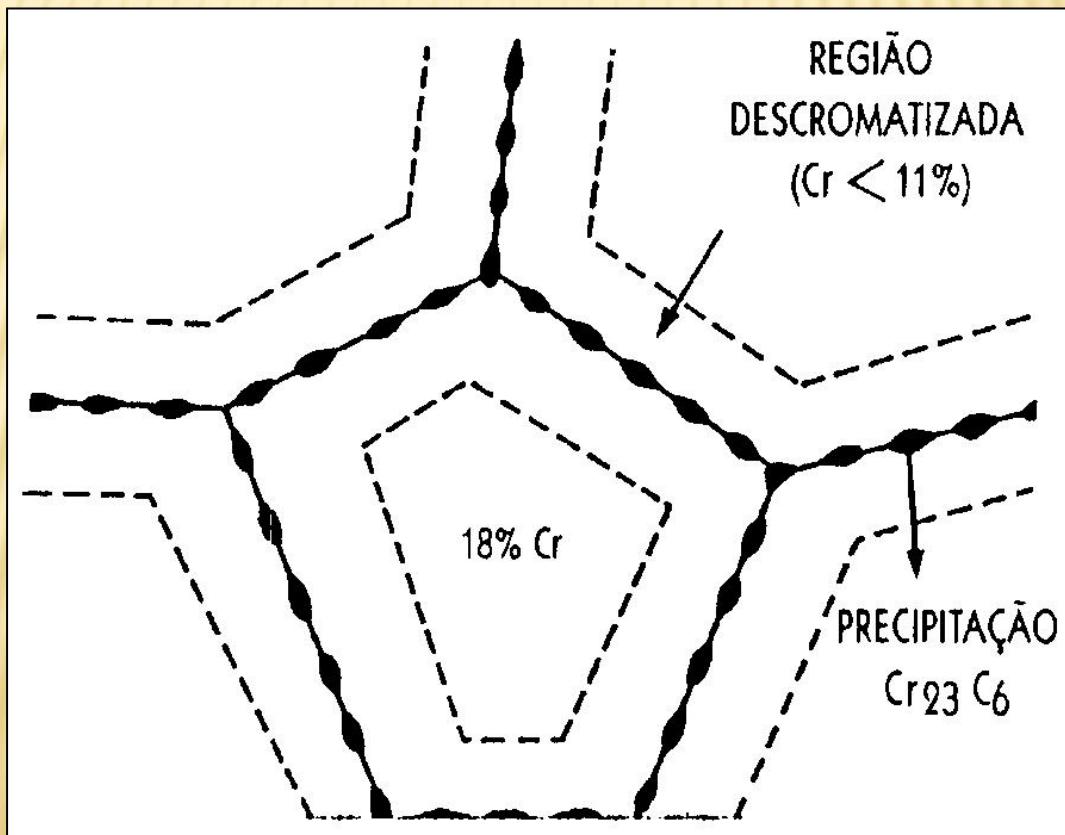
Corrosão intergranular

- Os aços inoxidáveis austeníticos quando:
 - Tratados termicamente;
 - Aquecidos para trabalhos;
 - Soldagem;
- Ou seja, aquecidos numa faixa de temperatura 400 a 870°C;
- Estão sujeitos a uma precipitação de carbonetos no contorno de grão.
- Nessa faixa de temperatura o Cr e o C se combinam para formar um carboneto de cromo (Cr_{23}C_6) e criar uma região empobrecida em cromo próxima ao contorno de grão.

⇒ Esse fenômeno é denominado: **SENSITIZAÇÃO**.

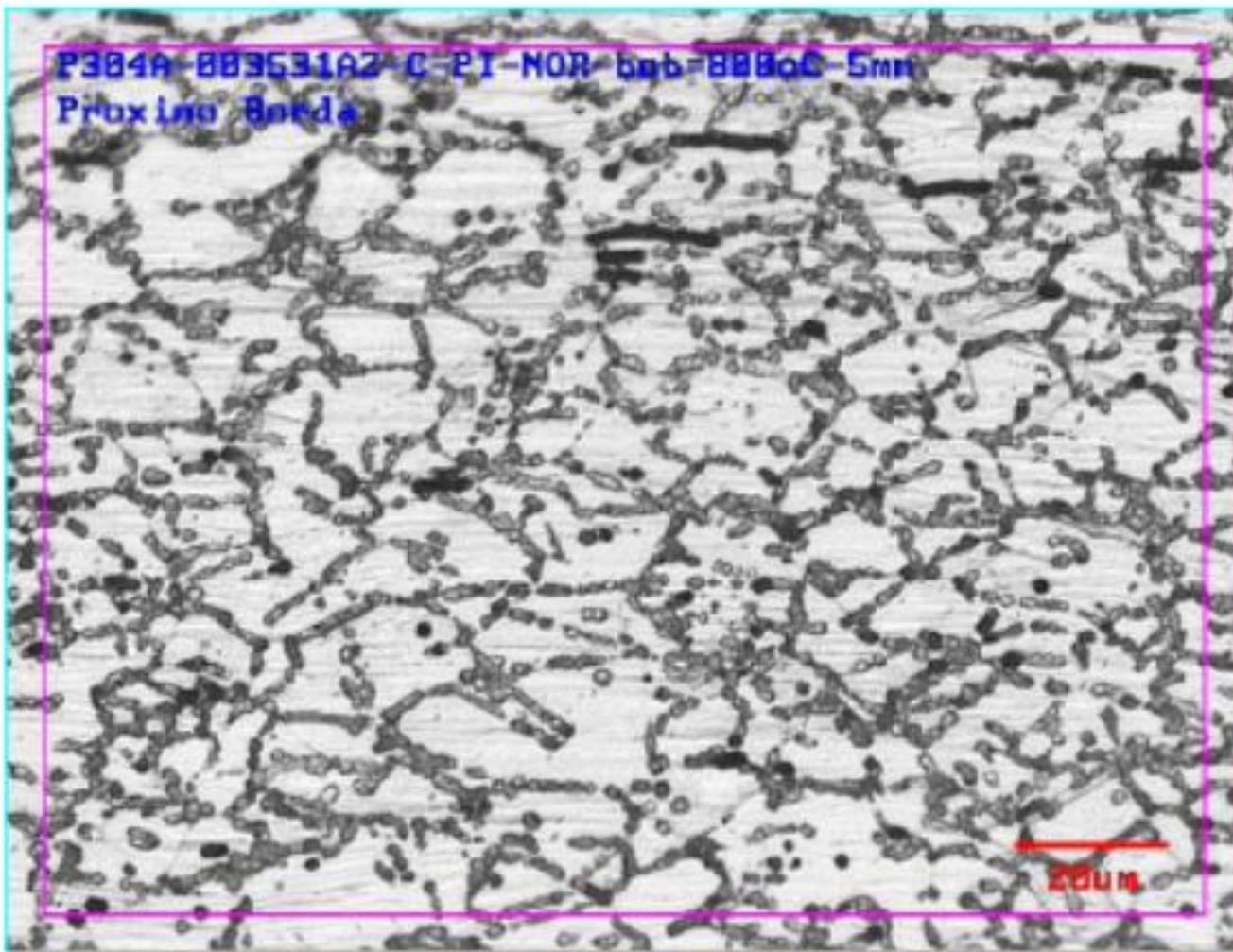
- Corrosão intergranular

Ocorre devido a precipitação de carbonetos de cromo nos contornos de grão, deixando uma região pobre em cromo no entorno. Esta região é preferencialmente anódica em relação ao interior dos grãos.



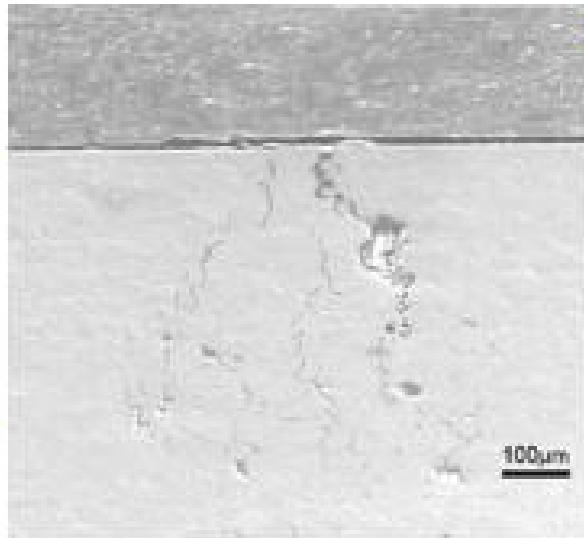
Corrosão intergranular

Formação de carbonetos de cromo nos contornos de grãos

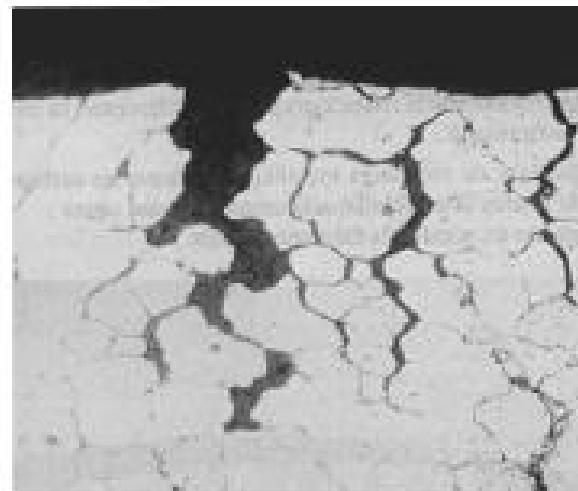


Corrosão intergranular

Mecanismo :



fratura intergranular



Corrosão e fratura intergranular

Corrosão intergranular

Soluções

- Austenitização à temperatura de 1100°C, seguido de resfriamento rápido.
- Temperatura > 1050°C o Cr_{23}C_6 é rapidamente dissolvido. O C e Cr ficam novamente em solução sólida.
- Quando resfria rápido, não ocorre a precipitação de Cr_{23}C_6 pois não tem tempo o Cr e C para combinar-se e o carbono pode ficar em solução sólida na austenita até temperatura ambiente.

Corrosão intergranular

....continuação das soluções.....

- Nos anos 30 desenvolveram a adição de estabilizadores ou estabilizantes.
- O Ti e Nb, inibem a formação de Cr_{23}C_6 , devido ao fato de terem maior afinidade pelo C/N.
- Assim precipitam TiC e NbC e o Cr permanece em solução sólida.
- Ou seja, o Ti e Nb, são estabilizadores do C/N.
- Temos os denominados Aços Inoxidáveis estabilizados ao Ti e/ou Nb.

...continuam as soluções.....

- Redução do teor (%) de Carbono

- É a técnica mais utilizada.

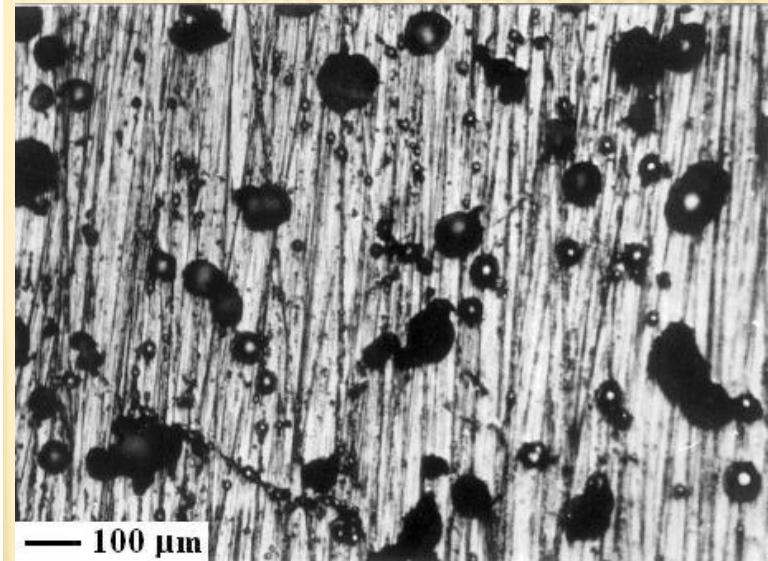
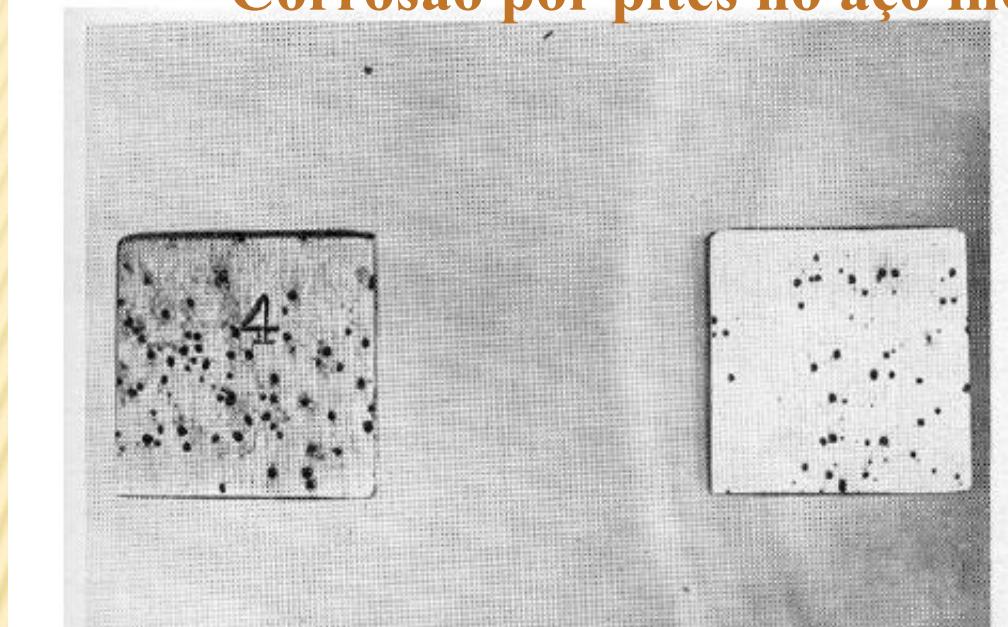
- Quanto maior o % de C = maior formação de Cr_{23}C_6 .

- Ou seja, a redução do teor de C diminui a intensidade de formação de carbonetos, com conseqüente menor remoção de Cr próximo aos contornos de grão.

Até 0,03% C - O carbono permanece dissolvido sem efeito nocivo. Precipita-se Cr_{23}C_6 em quantidade insuficiente para prejudicar, quando o tempo for suficiente longo na temperatura de formação.

Acima de 0,03%C - O Cr_{23}C_6 começa a envolver os contornos de grãos de forma continua, prejudicando a resistência à corrosão.

Corrosão por pites no aço inoxidável AISI 304

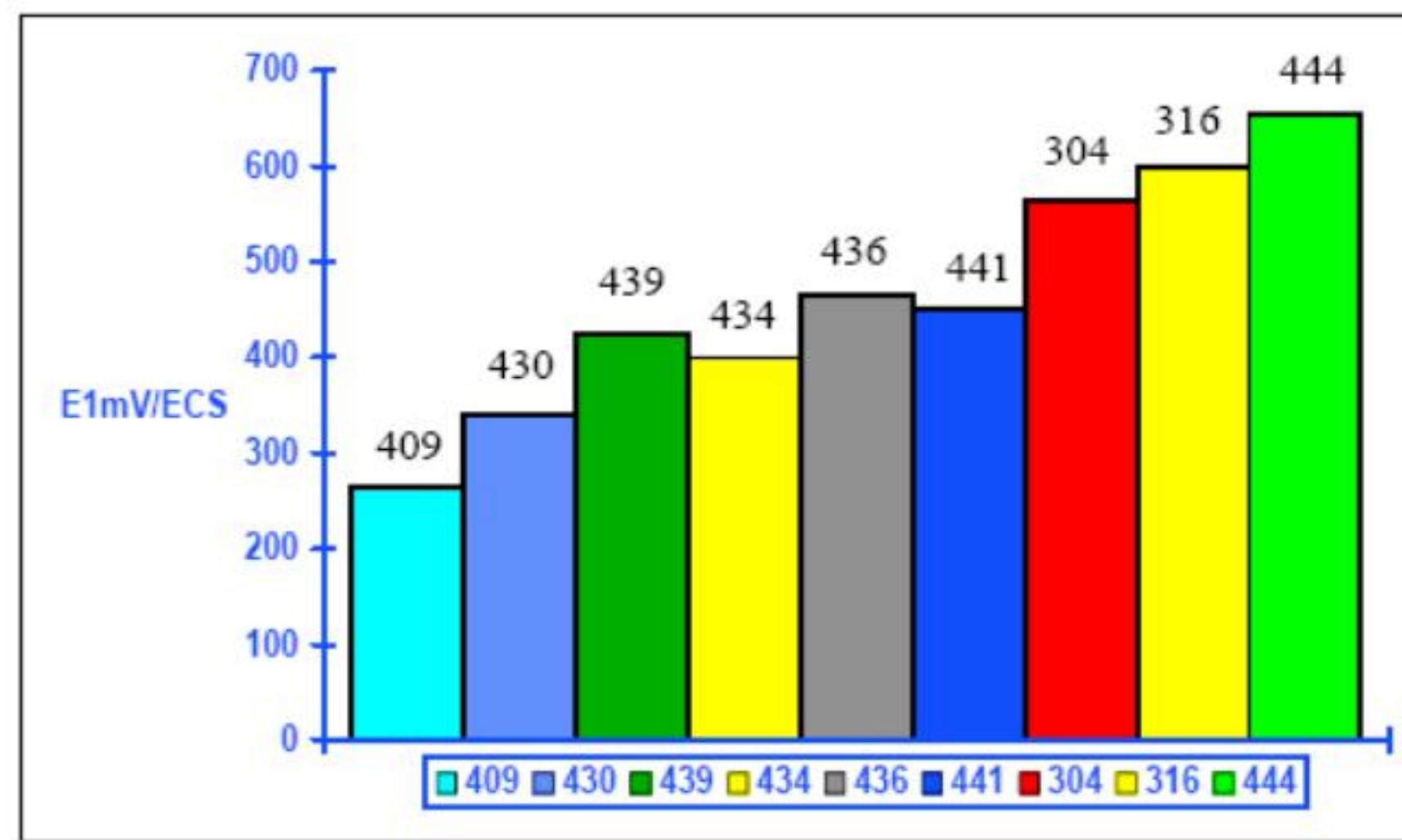


$$\text{Área anôdica} = A_a$$

$$\text{Área catódica} = A_c, A_c \ggg A_a$$

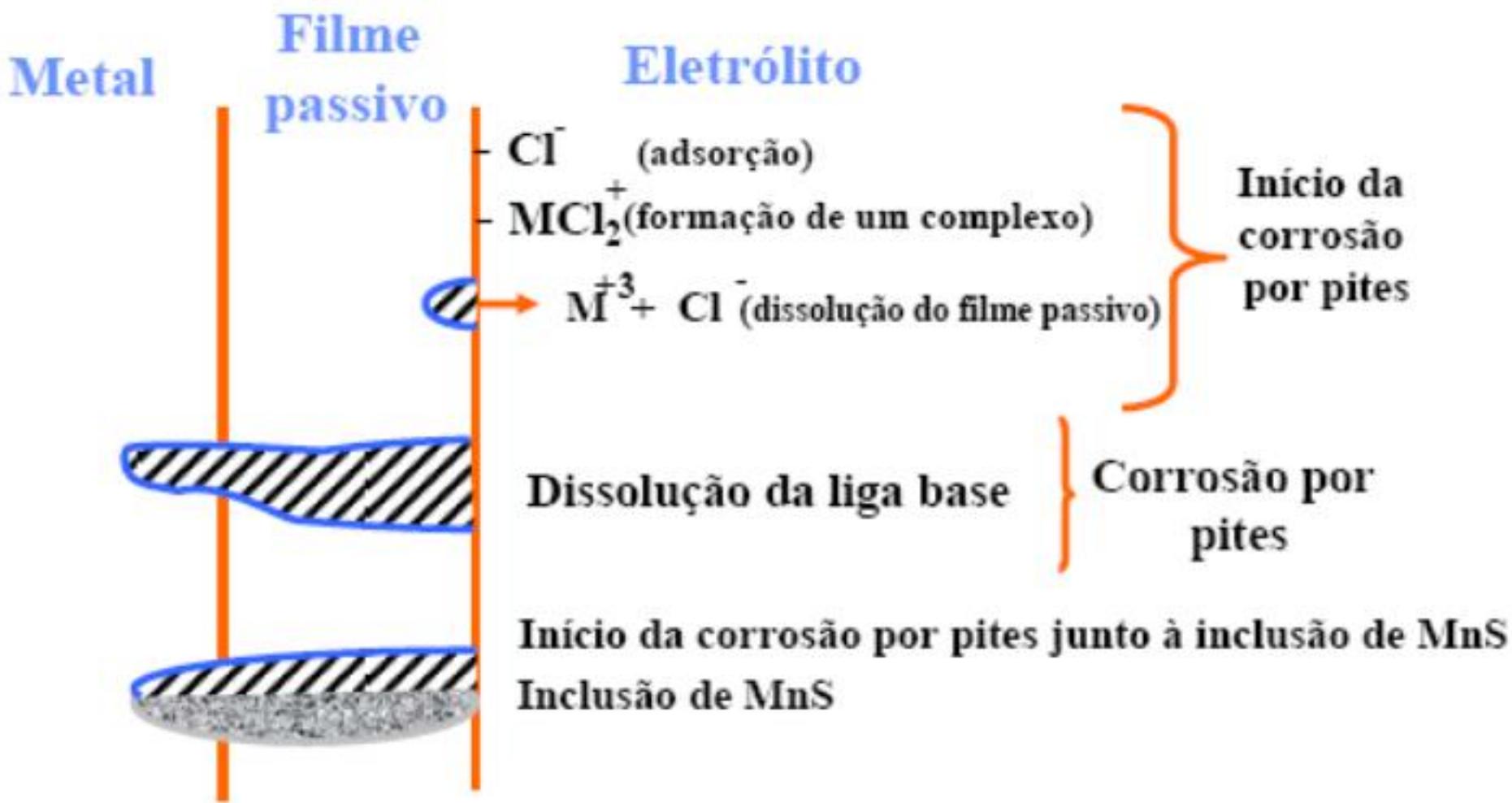
Corrosão por Pites

Potencial de Pite 0.02M NaCl pH=6.6



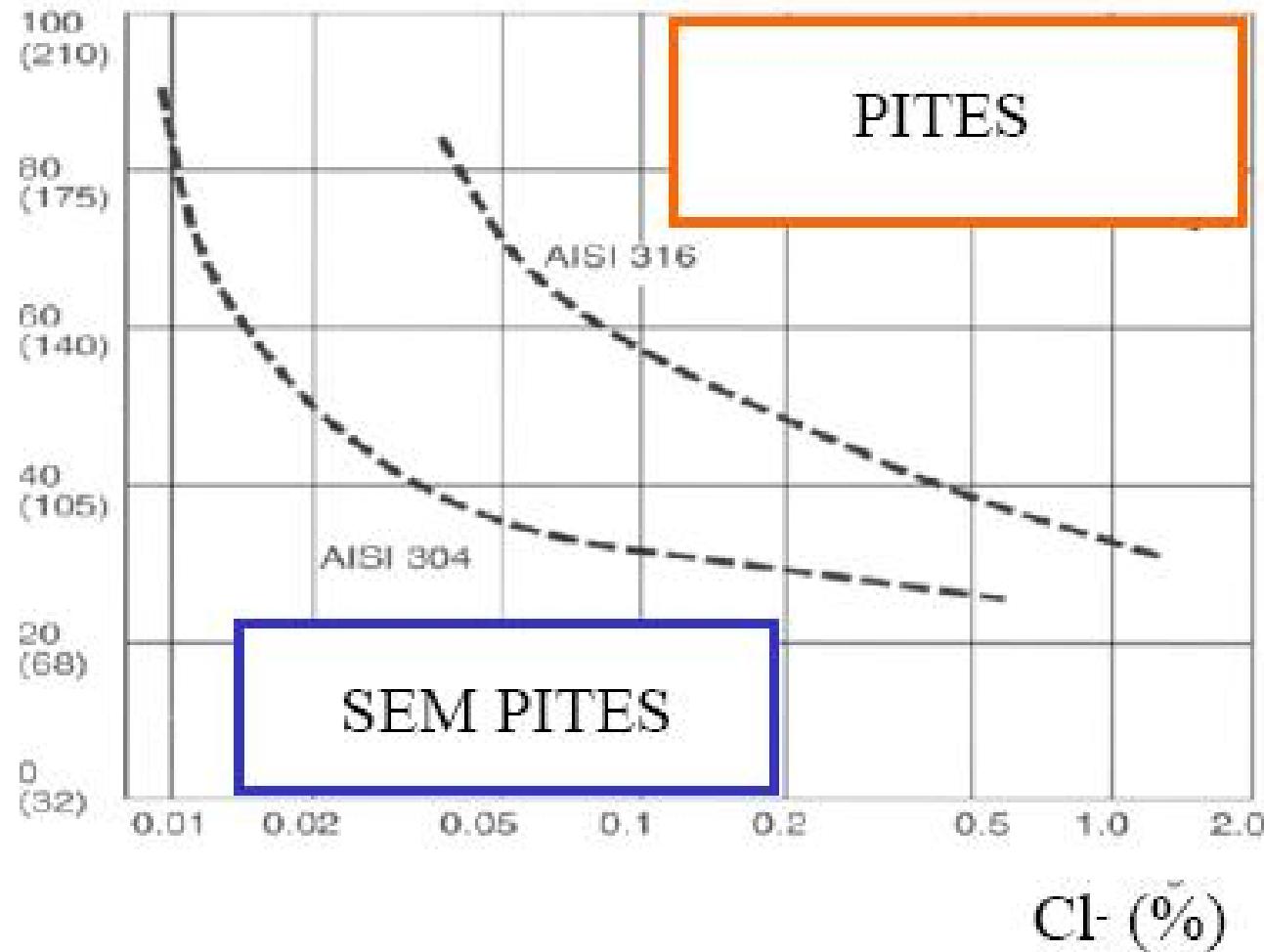
Corrosão por Pites

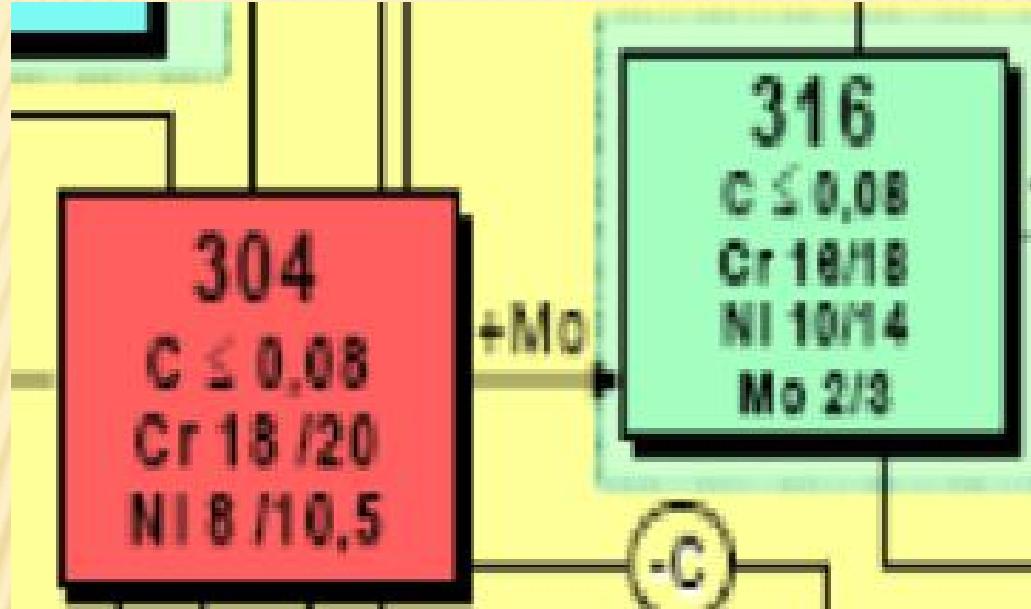
Mecanismo



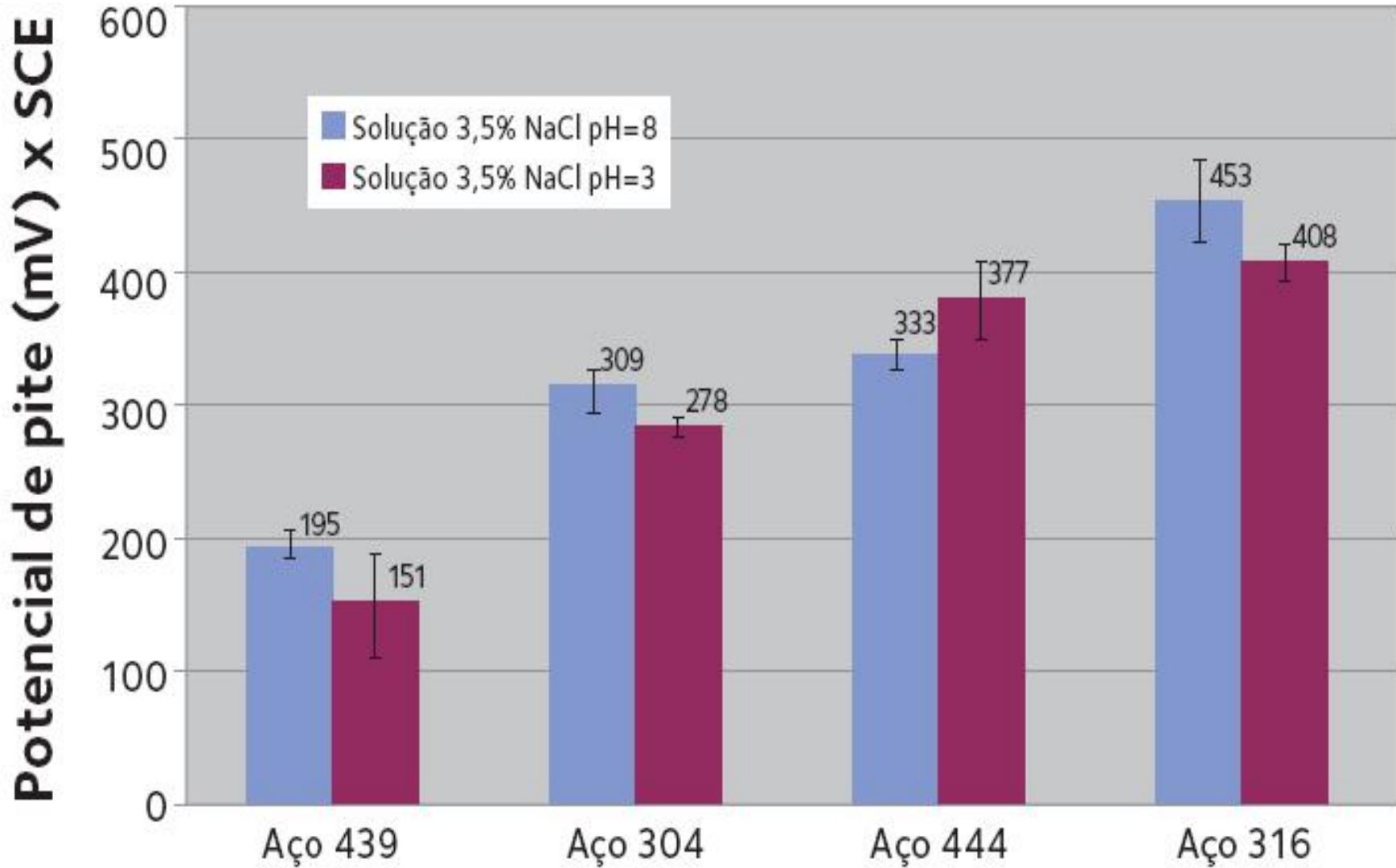
Corrosão por Pites

T($^{\circ}$ C/F)

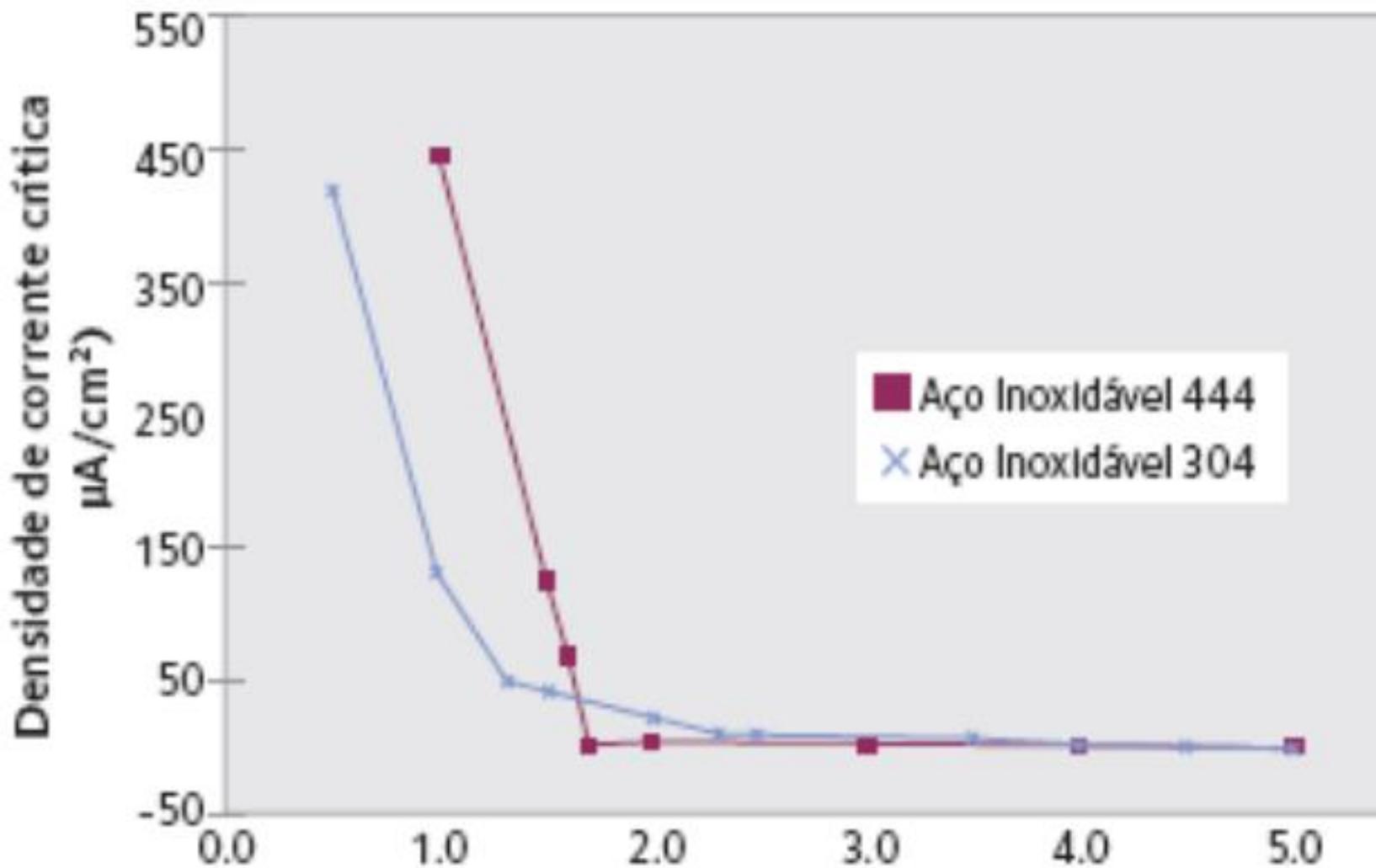




Corrosão por Pites

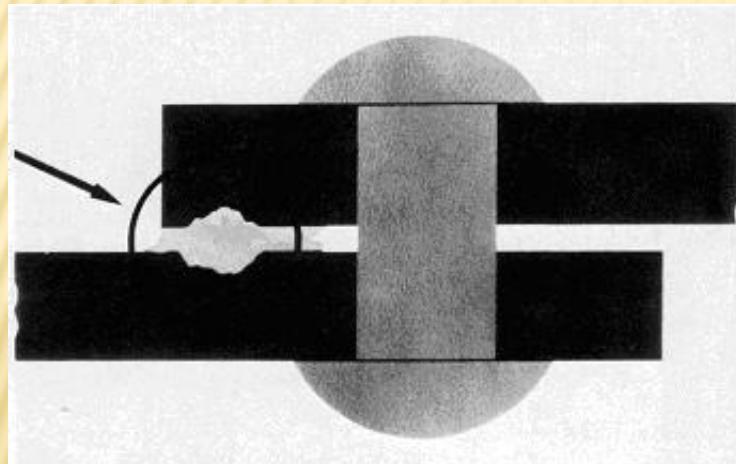


Corrosão por Pites



OUTROS TIPOS DE CORROSÃO NOS AÇOS INOXIDÁVEIS

- Corrosão em aresta ou frestas



- Pilha de aeração diferencial – a região em contacto com a menor pressão de O₂ se torna anódica → a corrosão ocorre nas interior das frestas.
- Pilha de concentração iônica – o eletrodo se torna mais ativo quando decresce a concentração de seus íons na solução → a corrosão ocorre nas bordas das frestas.

Corrosão por frestas



Fig. 9 - Corrosão por frestas em um aço inoxidável.

The image shows the front cover of a technical booklet. At the top left is the text "ArcelorMittal Inox Brasil". In the center is the ArcelorMittal logo, which consists of a stylized bird in flight above the word "ArcelorMittal". Below the logo is the title "Aços Inoxidáveis: aplicações e especificações". The main visual on the cover is a black and white photograph of a sailboat on a body of water, with its sail partially deployed. At the bottom right of the cover, there is a small circular graphic containing the text "transforming tomorrow". At the very bottom, the name "Eng. Héctor Mario Carbó" is printed.

- Corrosão sob tensão



- Materiais susceptíveis: aços inoxidáveis austeníticos, aços inoxidáveis martensíticos;
- Meios agressivos: soluções contendo cloretos, hidrogênio (H_2S , carregamento catódico).

Corrosão Geral ou uniforme

Características Principais:

- Corrosão a uma velocidade uniforme, em toda a sua superfície. O resultado final seria a perda de espessura.
- Reação química ou eletroquímica que se processa sobre toda a superfície exposta do material. Este se torna mais fino e, eventualmente, fratura.

Corrosão Geral ou uniforme

Características Principais:

As adições de Ni e Mo também expandem a faixa passiva.

A corrosão geral é uma ruptura uniforme do filme passivo.

Referências:

- taxa de corrosão < 0,05mm/ano - para alimentos,
- taxa de corrosão de 0,5 mm/ano - para aplicação industrial.
- taxa de corrosão > 1,3 mm/ano – pode ser toleradas, e acima não são viáveis.

Aços inoxidáveis: Ferríticos

Tipo	%C	%Si	%Mn	%Cr	%Al	%Mo	outros
405	0,08	1,0	1,0	11,5-13,5	0,1-0,3	-	-
409	0,08	1,0	1,0	10,5-11,8	-	-	0,5%Ti, até 0,5%Ni
430	0,12	1,0	1,0	16-18	-	-	-
430Ti	0,12	1,0	1,0	16-18	-	-	0,50%Ti
430Nb	0,12	1,0	1,0	16-18	-	-	0,50%Nb
442	0,20	1,0	1,0	18-23	-	-	-
444	0,20	1,0	1,0	17,5-19,5	-	1,8-2,5	Até 1%Ni, Ti+Nb=0,20+4(C+N)
446	0,25	1,0	1,0	23-27	-	-	

Principais características:

- Boa resistência à corrosão, especialmente **corrosão sob tensão**.
- Não são endurecíveis por tratamento térmico
- Têm boa conformabilidade plástica
- Podem sofrer diversos fenômenos de fragilização com o aquecimento em certas faixas de temperatura.

- Corrosão sob tensão



- Materiais susceptíveis: aços inoxidáveis austeníticos, aços inoxidáveis martensíticos;
- Meios agressivos: soluções contendo cloretos, hidrogênio (H_2S , carregamento catódico).

Aços Inoxidáveis Ferríticos da Série 400

Série 400

Ferríticos

Talheres, baixelas, pias,
fogões, moedas, etc.

430
 $C \leq 0.12$
 $Cr 16/18$

-Mo

434
 $C \leq 0.12$
 $Cr 16/18$
 $Mo 0.75/1.25$

-Ti
-Mo
-Nb

444
 $C \leq 0.025$
 $Cr 17.5/19.5$
 $Mo 1.75/2.50$
 $Ti+Nb \geq 0.20 + 4(C+N)$

Melhor resistência à corrosão por píres.
Caixas d'água, aquecedores d'água.
Tubos evaporadores.

-C
-Cr
-Ti

409
 $C \leq 0.08$
 $Cr 10.5/11.75$
 $Ti \geq 6 \times C$

Sistema de
escapamento.

-C
-Cr

-Ti

439
 $C \leq 0.07$
 $Cr 17/19$
 $Ti \geq 0.20 + 4(C+N)$

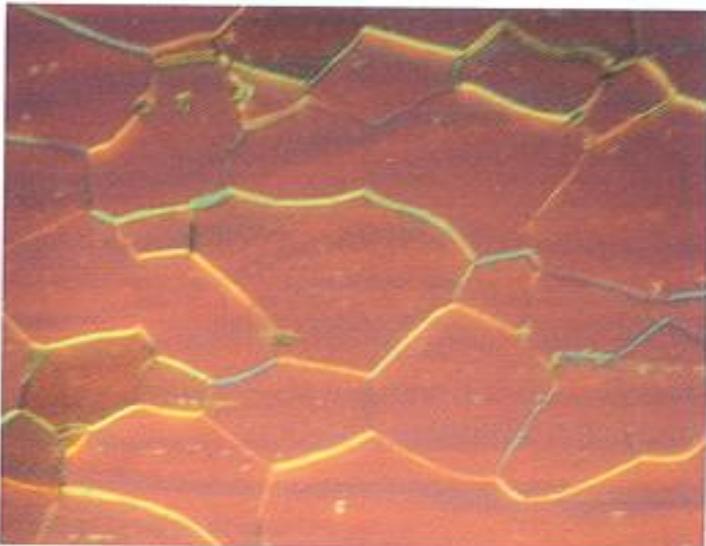
Componentes do sistema de
escapamento de automóveis.
Máquinas de lavar roupas.
Micro-ondas.

+Nb

DIN 1.4509
(ACE 441)
 $C \leq 0.03$
 $Cr 17.5/18.5$
 $Nb \geq 3 \times C + 0.30$

Melhor resistência à fluidez
em altas temperaturas.
Sistema de escapamento de
automóveis.

Ferritic Structure



Microestrutura típica do aço AISI 439

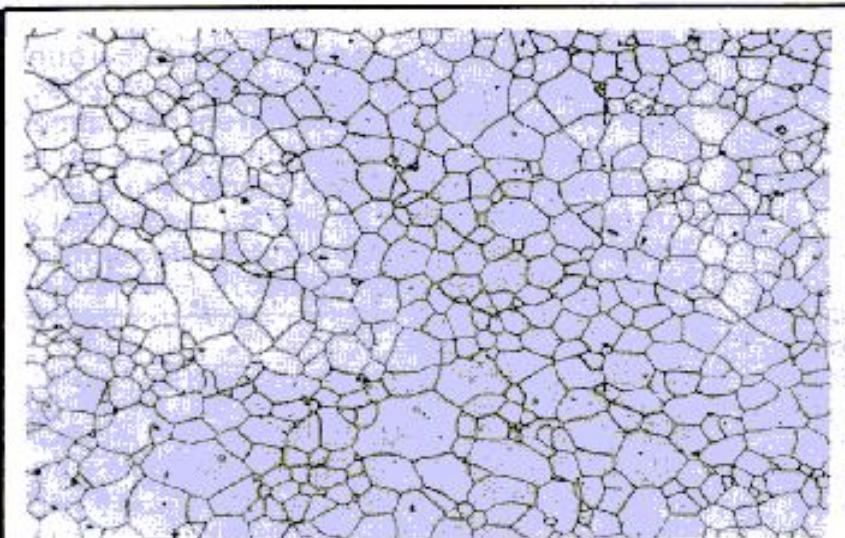
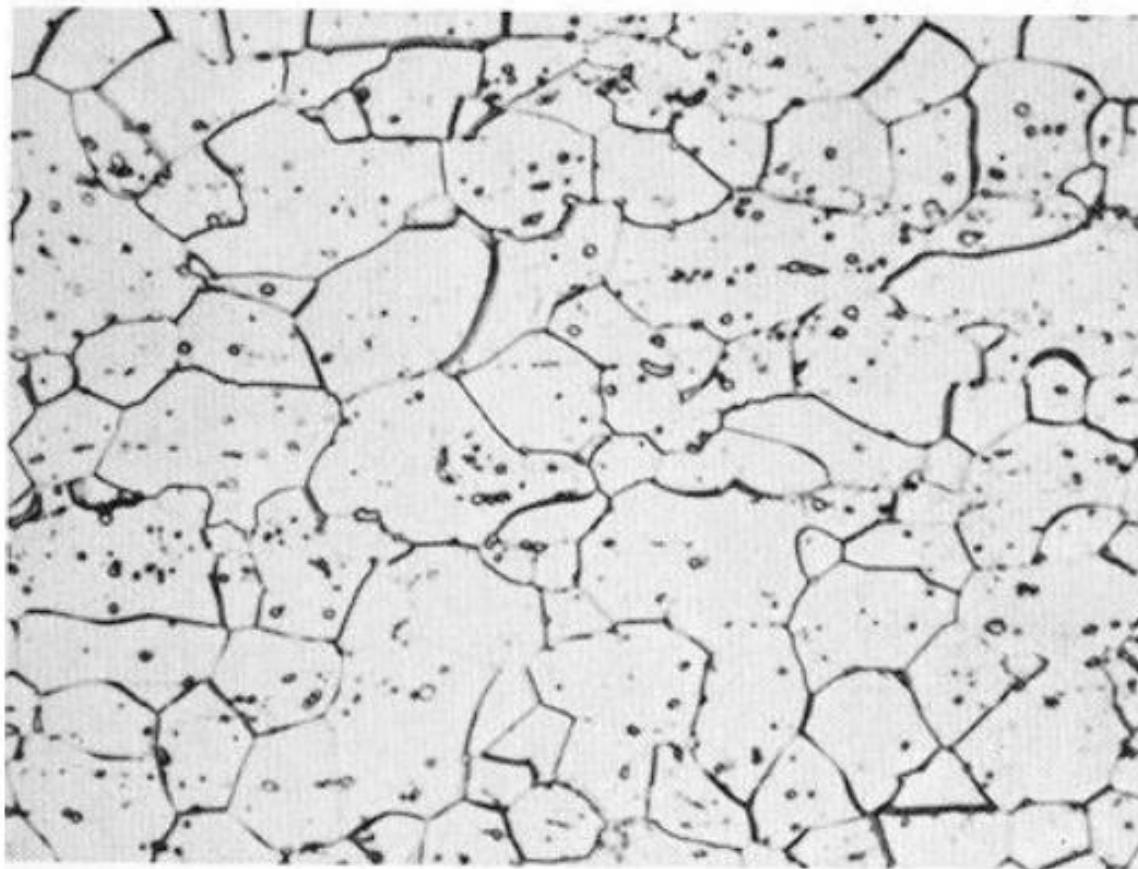


Figura 5 - Aço Inoxidável ferrítico ABNT 409
- Microestrutura típica.

Aços inoxidáveis ferríticos



Vilella's reagent

500×

1164 Type 430 stainless steel strip that was annealed at 1550 F (843 C) and cooled in air. The microstructure consists of equiaxed grains of ferrite and randomly dispersed particles of chromium carbide.

Microestrutura típica do aço AISI 409



HNO₃-acetic-HCl-glycerol

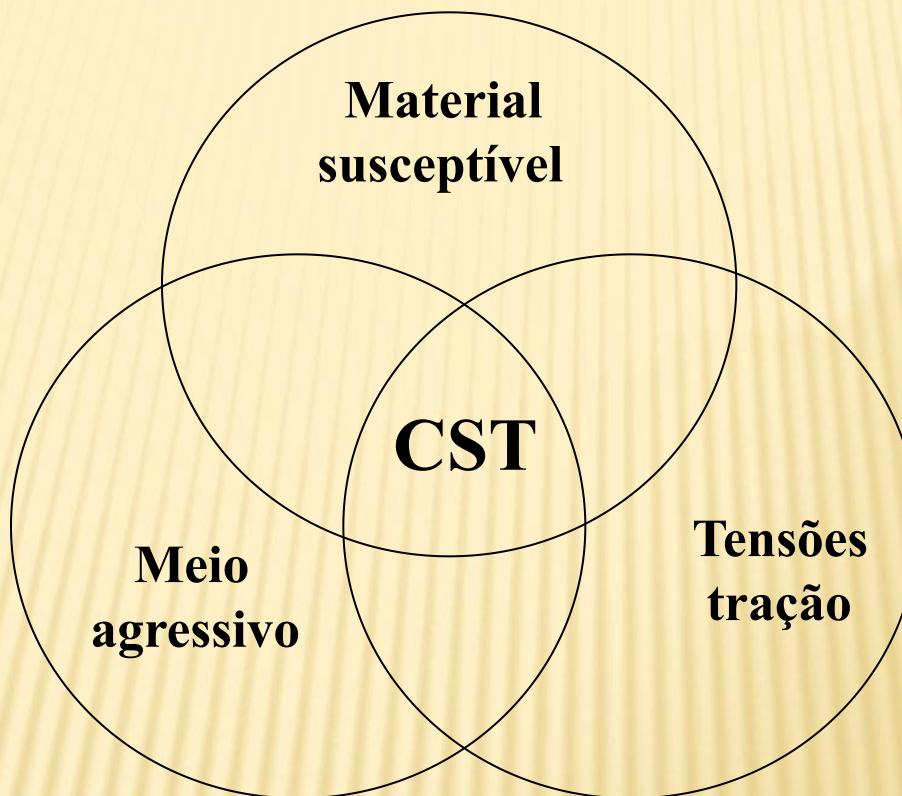
100 X

1145 Muffler-grade type 409 (0.045 C, 11 Cr, 0.50 Ti) strip annealed at 1600 F (871 C) 1 hr per inch of thickness and air cooled to room temperature. Equiaxed ferrite grains, and randomly dispersed titanium carbide particles.

Aplicações Aços Inoxidáveis Ferríticos.

Aço	C (%)	Cr(%)	Outros elementos	Aplicações
409	-	11,00	Ti	Sistema de exaustão de automóveis
	0,014	11,50		
430	0,040	16,00	-	Geral, talheres, baixelas, revestimentos, pias
	0,060	16,50		
430Nb	0,015	16,00	Nb	Talheres, baixelas, pias, estampagem em geral
	0,050	16,50		
439	-	17,00	Ti e Nb	Geral, linha branca, usinas de açúcar, automotivo
	0,020	17,75		
441	-	17,80	Ti e Nb	Sistemas de exaustão, partes mais quentes
	0,018	18,30		
444	-	17,50	Ti, Nb e Mo	Sistemas agressivos, com cloretos
	0,020	18,00		

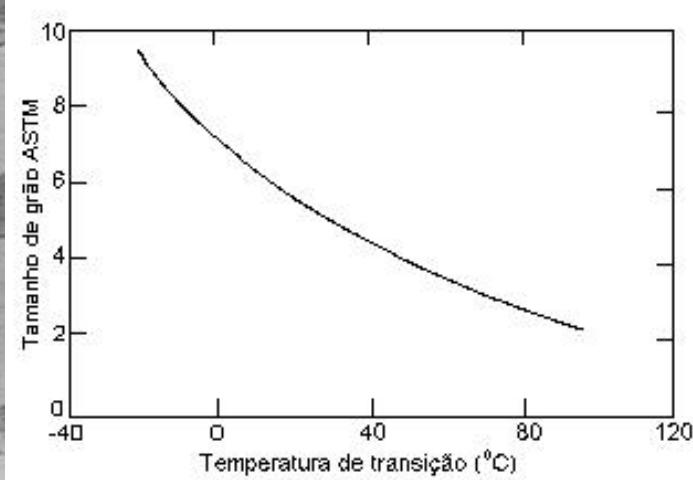
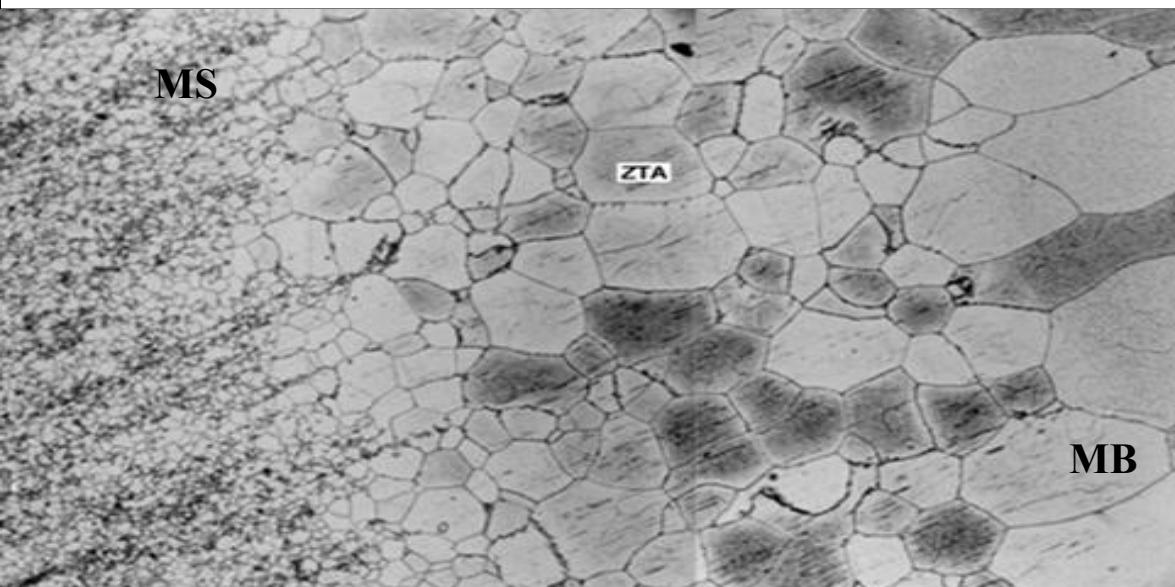
- Vantagens: Elevada resistência à corrosão sob tensão



FENÔMENOS DE FRAGILIZAÇÃO DOS AÇOS INOXIDÁVEIS FERRÍTICOS

Crescimento de grãos: os aços inox ferríticos têm forte tendência ao crescimento de grãos, pois não apresentam transformação de fase no estado sólido.

Por outro lado, por terem estrutura ccc, os inox ferríticos sofrem grande perda de tenacidade com o crescimento de grãos (aumento da temperatura de transição dúctil-frágil).



Continuação fragilização dos aços inoxidáveis ferríticos

Precipitação de fase α' na faixa de 350 a 550°C:

- Endurecimento
- Fragilização
- Perda de resistência à corrosão

Precipitação de fase σ :

- Faixa de precipitação nos aços inox ferríticos: 500°C – 800°C
- Endurecimento
- Fragilização
- Perda de resistência à corrosão

Quanto maiores os teores de Cr e Mo, mais suscetível o aço fica à formação das fases σ e α'

Continuação fenômenos de fragilização dos aços inoxidáveis ferríticos

Fragilização devido aos elementos intersticiais:

- Estes elementos se segregam nos contornos de grão, onde fragilizam o aço.
- **Na soldagem forma-se austenita em altas temperaturas e martensita intergranular no resfriamento.**
- C e N formam carbonetos e carbonitretos de **cromo** que fragilizam e causam perda da resistência à corrosão.

Soluções:

- Adição de Ti e/ou Nb
- Utilização de aços EBI
- Tratamento térmico pós-soldagem a cerca de 650°C – 850°C para transformar a martensita em ferrita mais carbonetos.

Aços Inoxidáveis Ferríticos da Série 400

Série 400

Ferríticos

Talheres, baixelas, pias,
fogões, moedas, etc.

430
 $C \leq 0.12$
 $Cr 16/18$

-Mo

434
 $C \leq 0.12$
 $Cr 16/18$
 $Mo 0.75/1.25$

-Ti
-Mo
-Nb

444
 $C \leq 0.025$
 $Cr 17.5/19.5$
 $Mo 1.75/2.50$
 $Ti+Nb \geq 0.20 + 4(C+N)$

Melhor resistência à corrosão por píres.
Caixas d'água, aquecedores d'água.
Tubos evaporadores.

-C
-Cr
-Ti

409
 $C \leq 0.08$
 $Cr 10.5/11.75$
 $Ti \geq 6 \times C$

Sistema de
escapamento.

-C
-Cr

439
 $C \leq 0.07$
 $Cr 17/19$
 $Ti \geq 0.20 + 4(C+N)$

Componentes do sistema de
escapamento de automóveis.
Máquinas de lavar roupas.
Micro-ondas.

+Nb

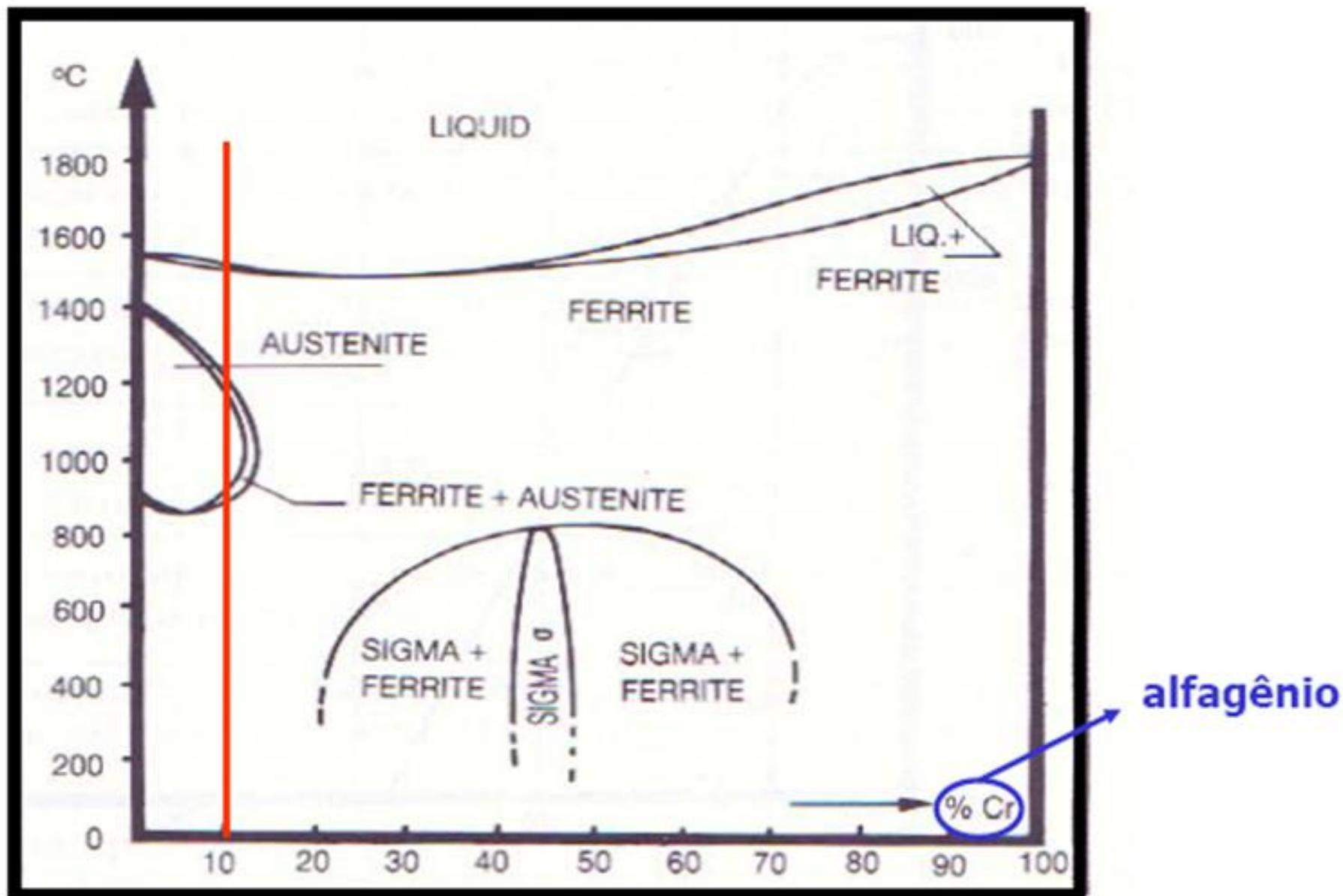
DIN 1.4509
(ACE 441)
 $C \leq 0.03$
 $Cr 17.5/18.5$
 $Nb \geq 3 \times C + 0.30$

Melhor resistência à fluidez
em altas temperaturas.
Sistema de escapamento de
automóveis.

AÇOS MARTENSÍTICOS

- Os conteúdos de Cr e C são balanceados de tal forma a permitir que a fase **austenítica**, estável à alta temperatura, se transforme em uma fase **martensítica**, de alta dureza, quando resfriada até a temperatura ambiente.
- Variáveis importantes no TT:
 - Temperatura / tempo de austenitização
 - Velocidade de resfriamento - têmpera (ar, água, óleo)
 - Temperatura/tempo de revenimento
- Estes aços são vendidos no estado recozido, com estrutura ferrítica, baixa dureza e boa ductilidade.

Diagrama FeCr para os aços inoxidáveis Martensíticos



Lupa do diagrama FeCr para os aços Inoxidáveis Martensíticos

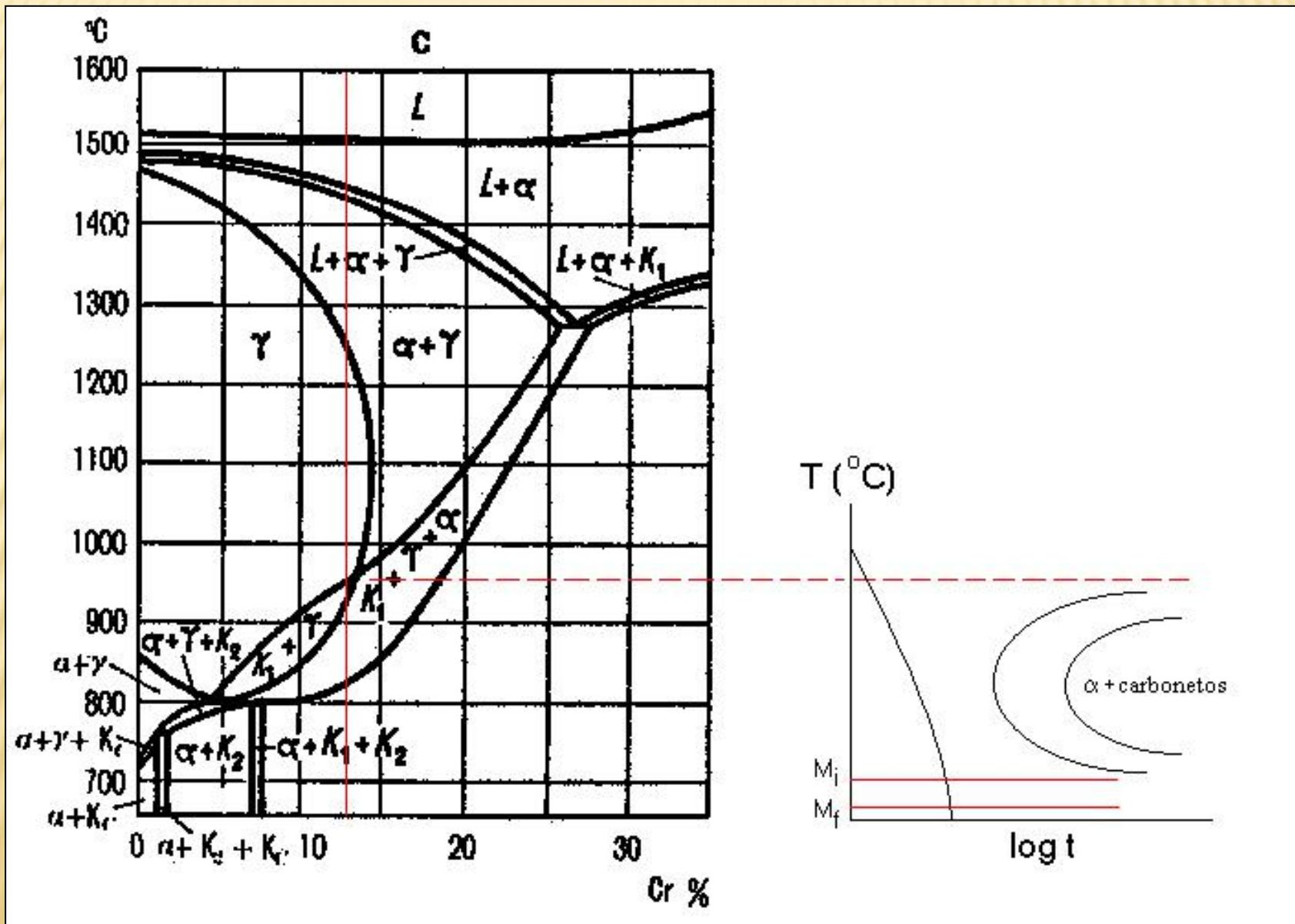


Diagrama FeCr para os aços Inoxidáveis Martensíticos

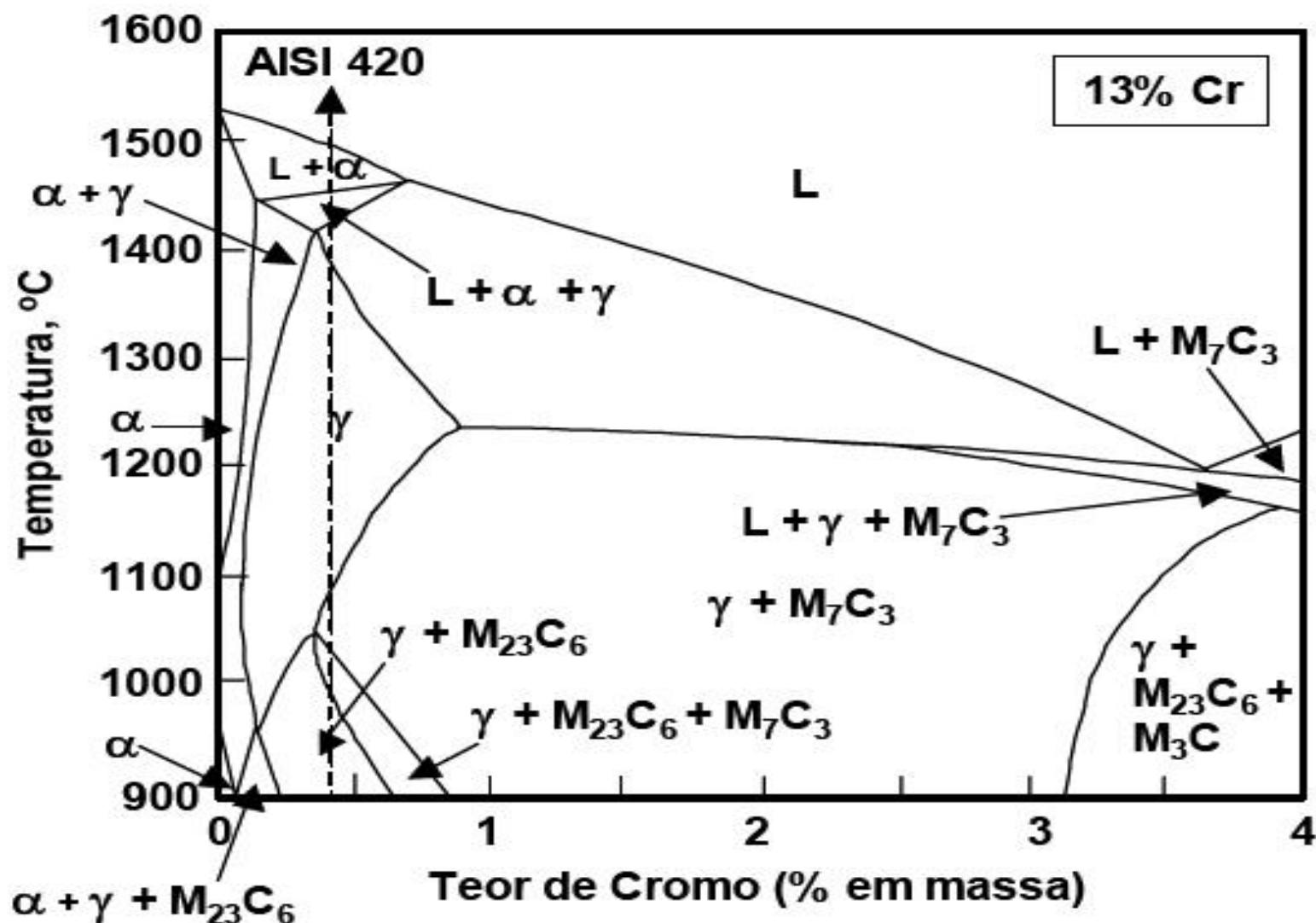
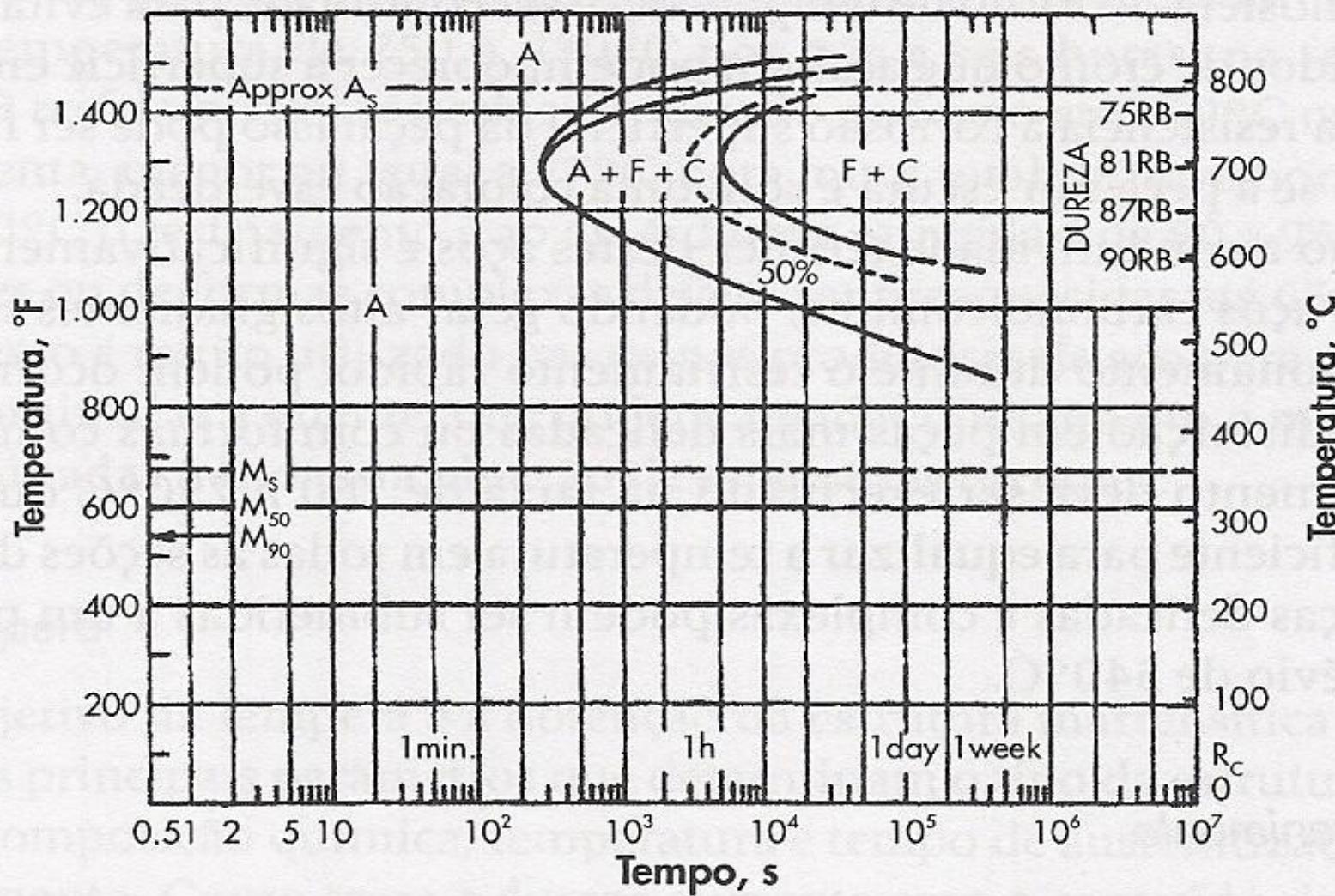
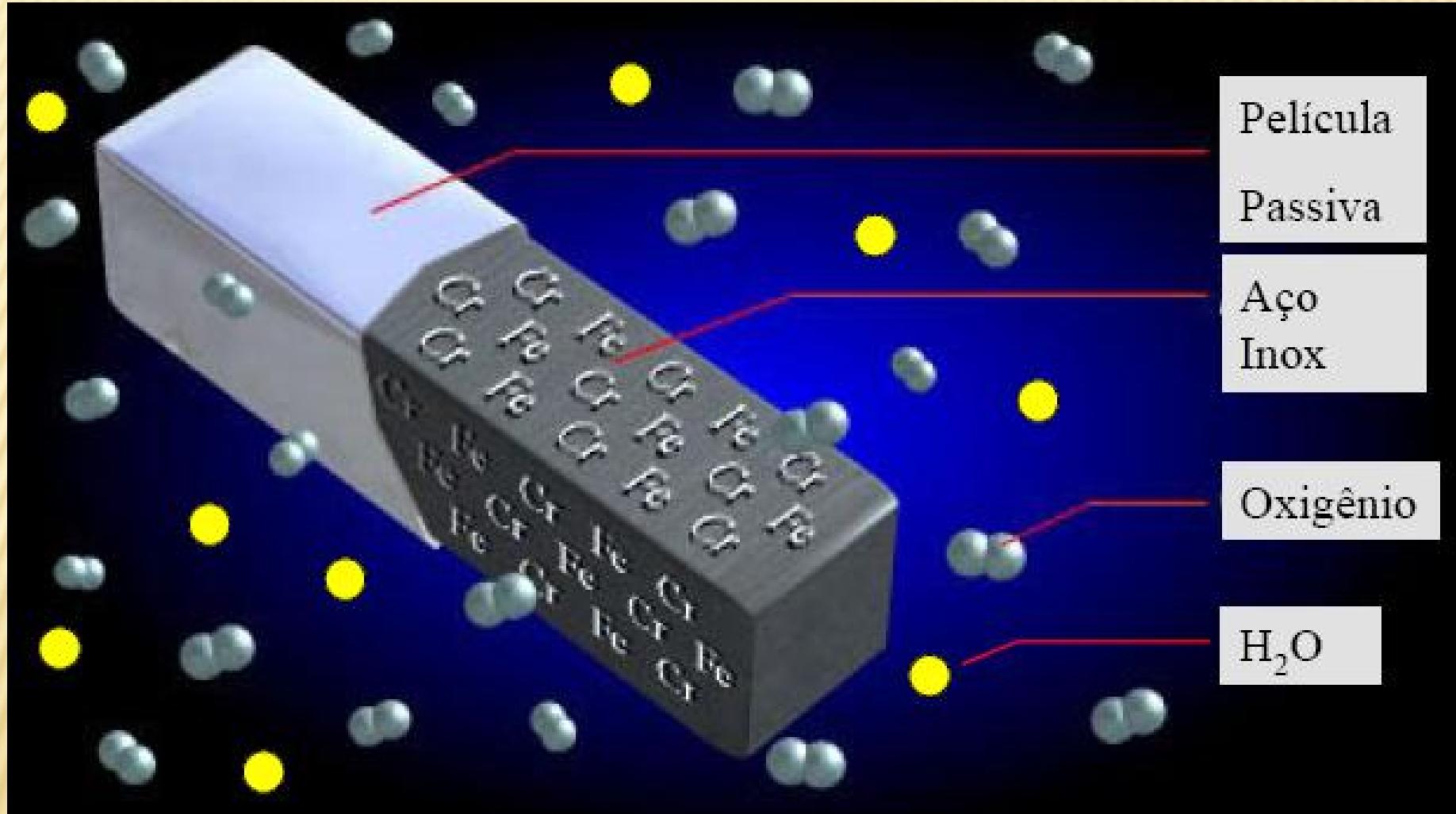


Figura 1 – Diagrama pseudobinário do sistema Fe-C-Cr [7].

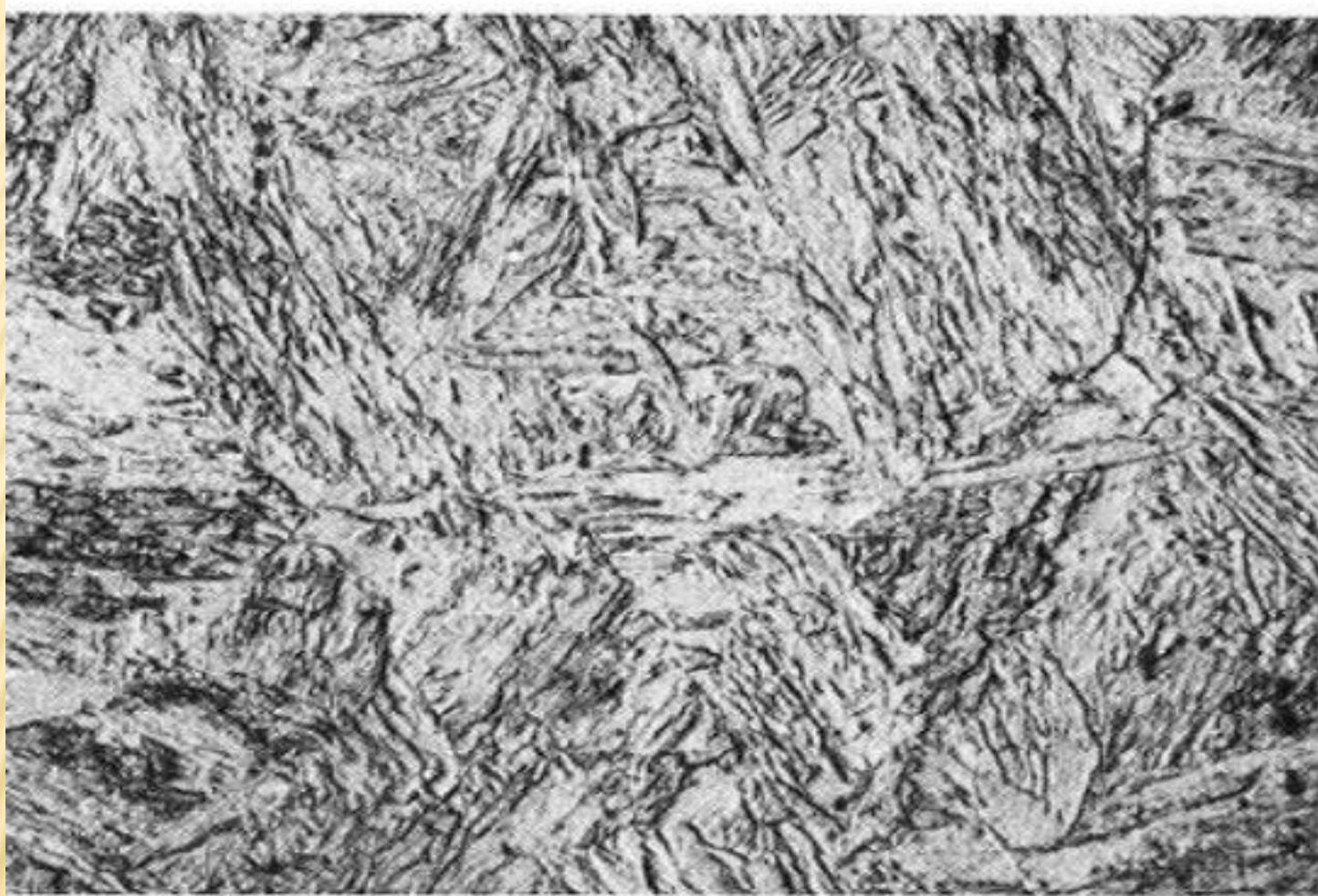
Diagrama TTT aço inoxidável AISI 410



Tipo (AISI)	%C	%Cr	%Mn	%Si	%Mo	%Ni
410	0,15 máx.	11,5 – 13,5	1,0 máx.	1,0 máx.	-	-



Microestrutura típica do aço AISI 410



Vilella's reagent

500×

1146 Type 410 stainless steel strip hardened by rapidly air cooling from 1800 F (982 C) to room temperature, and tempered 4 hr at 400 F (204 C). Structure: martensite with precipitated carbide particles. Oblique illumination.

Principais composições comerciais: Martensíticos

Tipo (AISI)	%C	%Cr	%Mn	%Si	%Mo	%Ni
410	0,15 máx.	11,5 – 13,5	1,0 máx.	1,0 máx.	-	-
420	> 0,15	12 – 14	1,0 máx.	1,0 máx.	-	-
440A	0,60 – 0,75	16 – 18	1,0 máx.	1,0 máx.	0,75	-
440B	0,75 – 0,95	16 – 18	1,0 máx.	1,0 máx.	0,75	-
440C	0,95 – 1,20	16 -18	1,0 máx.	1,0 máx.	0,75	-
431	0,20 máx.	15 -17	1,0 máx.	1,0 máx.	-	1,25 – 2,5

Principais características:

- Bom compromisso entre resistência mecânica e resistência à corrosão.
- São endurecíveis por tratamento térmico.

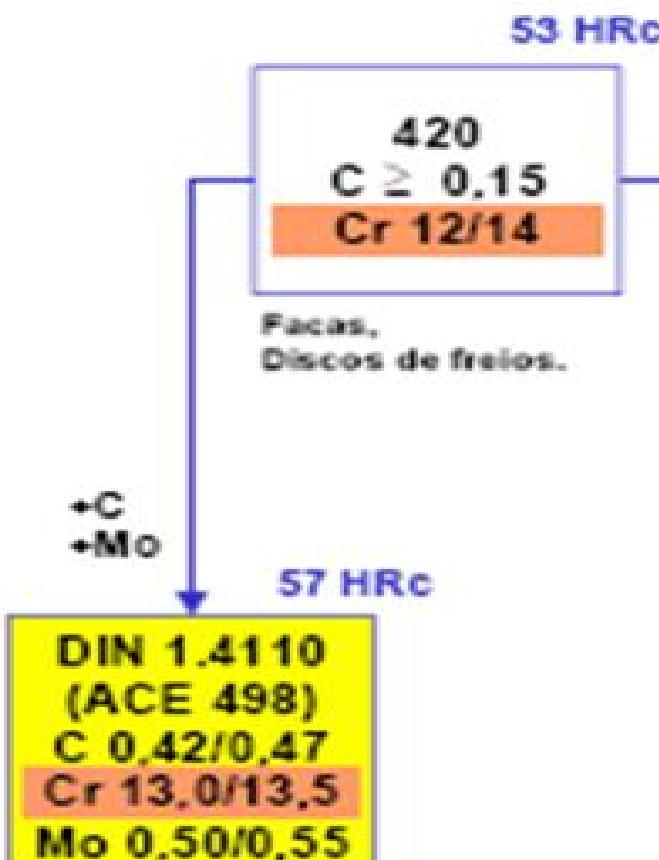
Tratamentos térmicos:

- Recozimento
- Têmpera
- Revenido

Aços Inoxidáveis Martensíticos e Ferríticos da Série 400

Aços Inoxidáveis da Série 400

Martensíticos



Ferríticos

Talheres, baixelas, piões,
fogões, moedas, etc

430
 $C \leq 0.12$
Cr 16/18

+Mo

-C
-Cr
-Ti

-Ti

409
 $C \leq 0.08$
Cr 10.5/11.75
 $Ti \geq 6 \times C$

Sistema de
escapamento.

-C
-Cr

Maior dureza.
Resistência ao desgaste.

Seleção da temperatura de têmpera

- Opções de revenido:

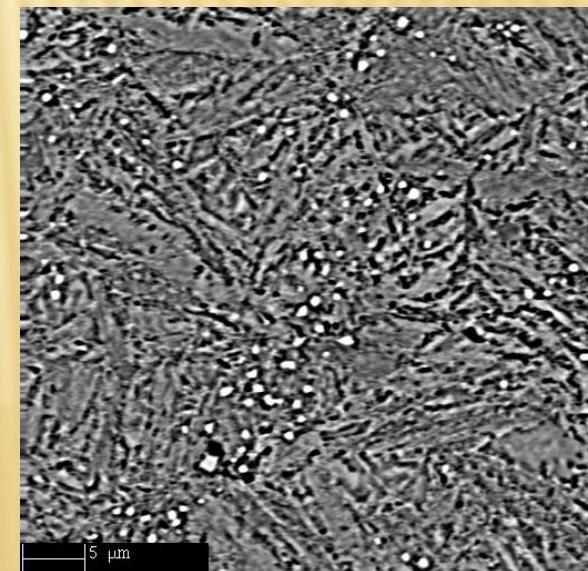
Tipo (classificação AISI)	Temperatura de têmpera (°C)
410	930 – 1010°C
420	980 – 1040°C
440 A	1010 – 1065°C
440 B	1010 – 1065°C
440 C	1010 – 1065°C
431	980 – 1065°C

200 – 350°C, quando se desejar elevada resistência mecânica; ou

600 – 700°C, quando se desejar elevadas ductilidade e tenacidade, em detrimento da resistência mecânica

O revenido na faixa de 400 e 600°C não deve ser realizado porque provoca perda acentuada de resistência à corrosão e queda da tenacidade (fragilidade do revenido).

A queda de resistência à corrosão é devida à precipitação de carbonetos grosseiros de Cr. Estes carbonetos também se formam na faixa superior de 600-700°C, porém nestas temperaturas acredita-se que o Cr pode se difundir facilmente e eliminar ou reduzir as regiões pobres em Cr.



Corrosão nos aços inoxidáveis

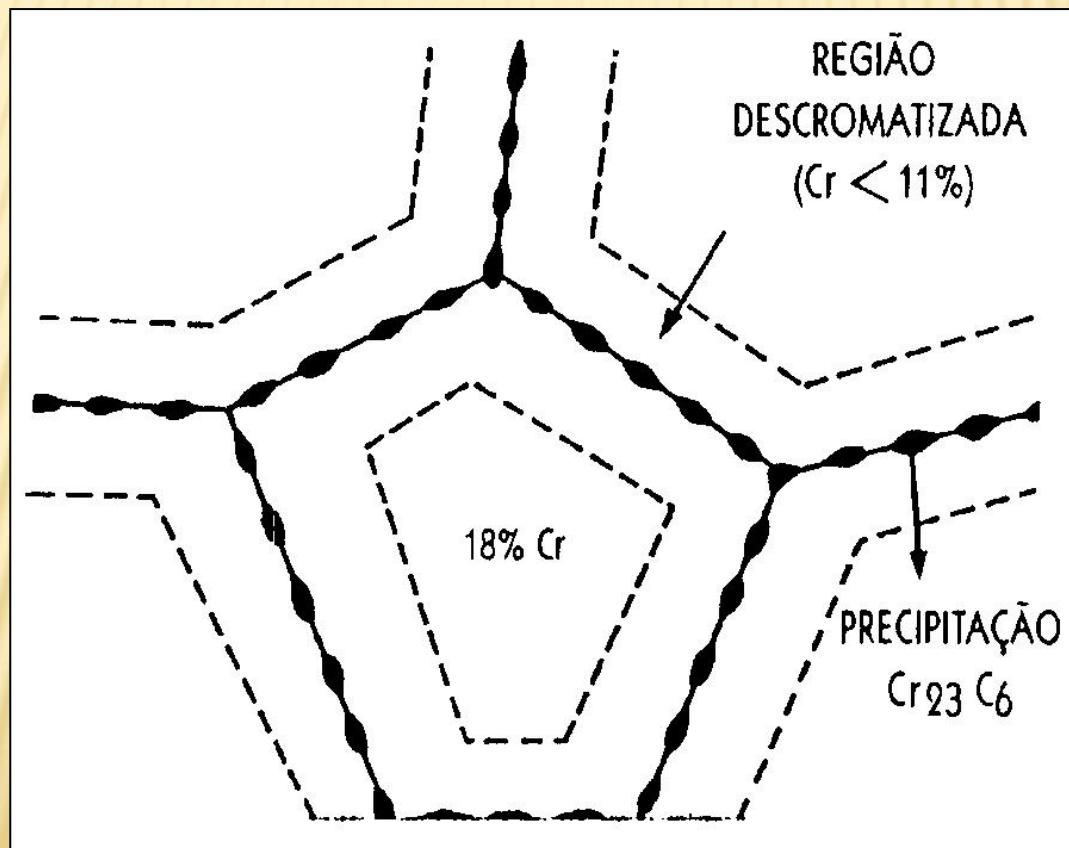
Corrosão intergranular

- Os aços inoxidáveis austeníticos quando:
 - Tratados termicamente;
 - Aquecidos para trabalhos;
 - Soldagem;
- Ou seja, aquecidos numa faixa de temperatura 400 a 870°C;
- Estão sujeitos a uma precipitação de carbonetos no contorno de grão.
- Nessa faixa de temperatura o Cr e o C se combinam para formar um carboneto de cromo (Cr_{23}C_6) e criar uma região empobrecida em cromo próxima ao contorno de grão.

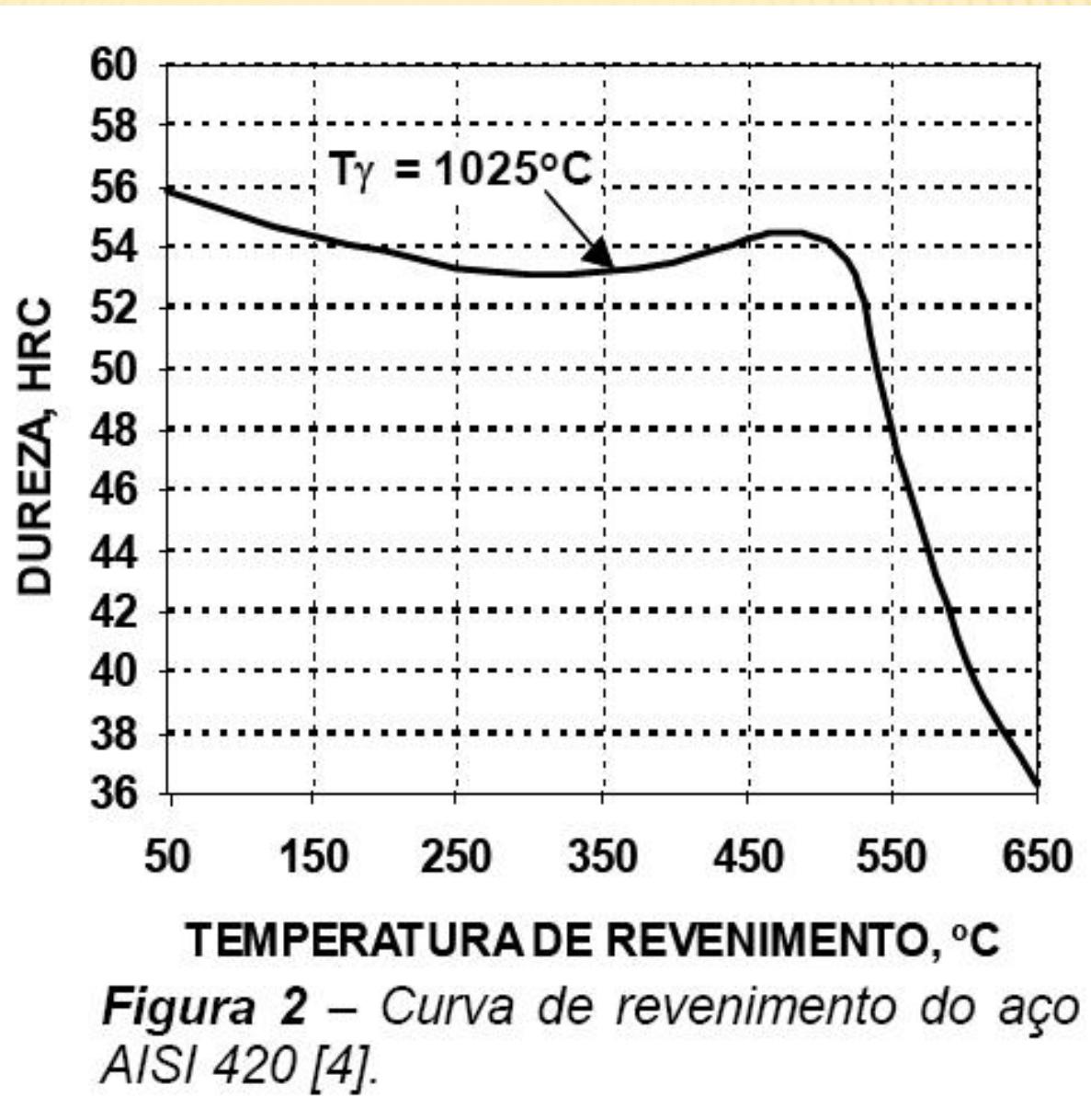
⇒ Esse fenômeno é denominado: **SENSITIZAÇÃO**.

- Corrosão intergranular

Ocorre devido a precipitação de carbonetos de cromo nos contornos de grão, deixando uma região pobre em cromo no entorno. Esta região é preferencialmente anódica em relação ao interior dos grãos.



Efeito da temperatura de Revenido

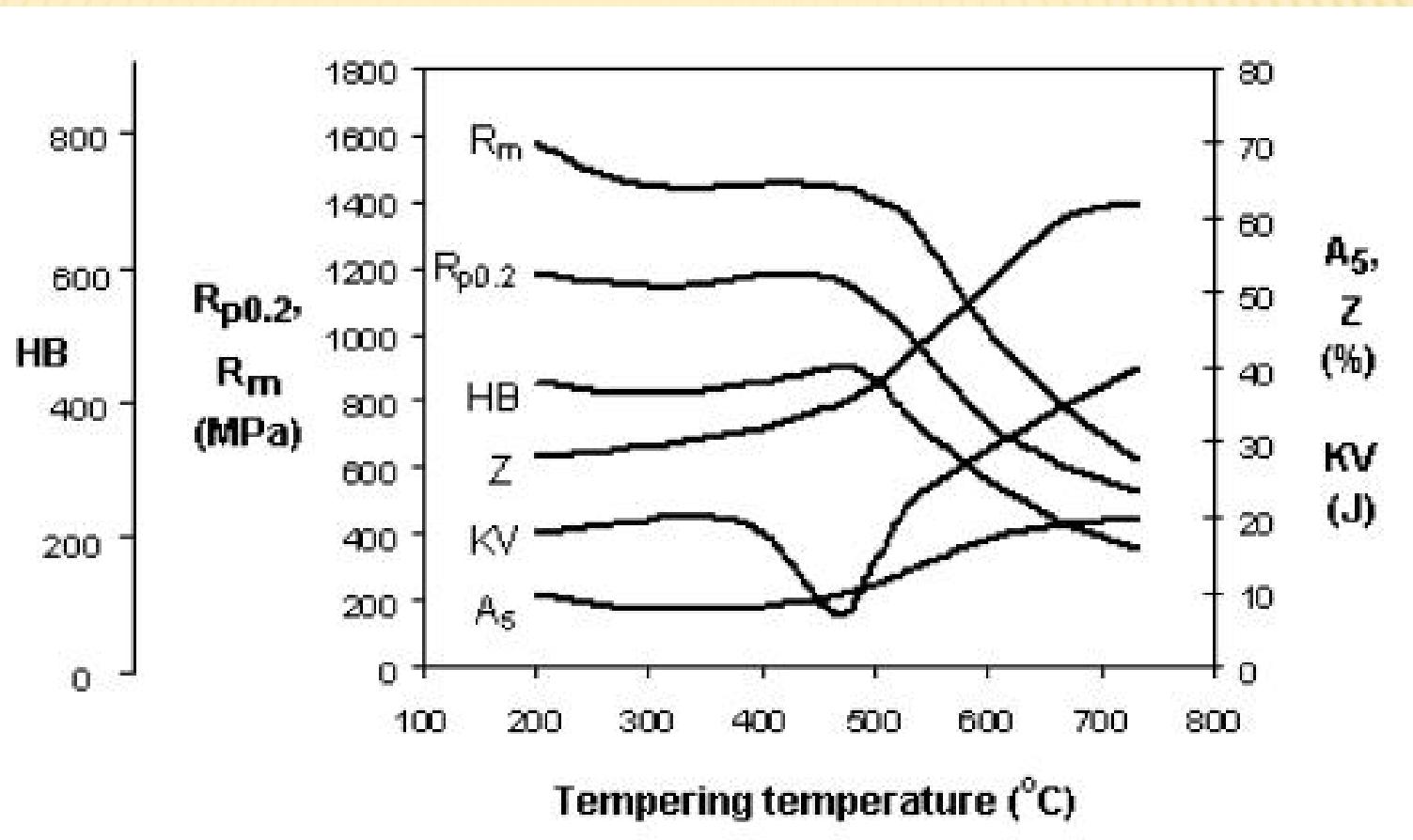


Aplicações

- Os aços martensíticos podem ser divididos em:
 - Aços com médio teor de carbono, como o 420 e o 498 (DIN 1.4110 e DIN 1.4116)
 - Aços com alto teor de carbono como o 440
- Alguns inox martensíticos:

Aço	C (%)	Cr(%)	Aplicações
420	0,30	12,00	cutelaria, instrumentos cirúrgicos
	0,35	14,00	
420D	0,18	12,00	
	0,22	14,00	
498V	0,45	13,00	cutelaria profissional
	0,51	15,00	

MATERIAS DE FABRICAÇÃO MECÂNICA



Curva de revenido para aço inoxidável AISI 431

Aços inoxidáveis supermartensíticos

Para melhorar as propriedades mecânicas, a resistência à corrosão e a soldabilidade dos aços inoxidáveis martensíticos convencionais, foram adicionados Ni e Mo, e reduzido o teor de carbono.

Dependendo do tratamento térmico ou termomecânico, a microestrutura pode conter, além de martensita, austenita e ferrita em pequenas quantidades (principalmente nos graus mais ligados ao Cr e Mo).

Principais composições

Alloy	C	N	Si	Mn	Cr	Ni	Mo	Cu	Ti
11Cr 2.5Ni	0.011	0.006	0.10	1.77	10.6	2.4	0.06	0.48	0.006
12Cr 4.5Ni 1.5Mo	0.017	0.011	0.20	1.77	11.7	4.9	1.39	0.51	0.007
12Cr 6.5Ni 2.5Mo	0.018	0.011	0.09	1.72	12.6	6.5	2.32	0.49	0.008

Efeito da temperatura e taxa de corrosão aços inox martensíticos

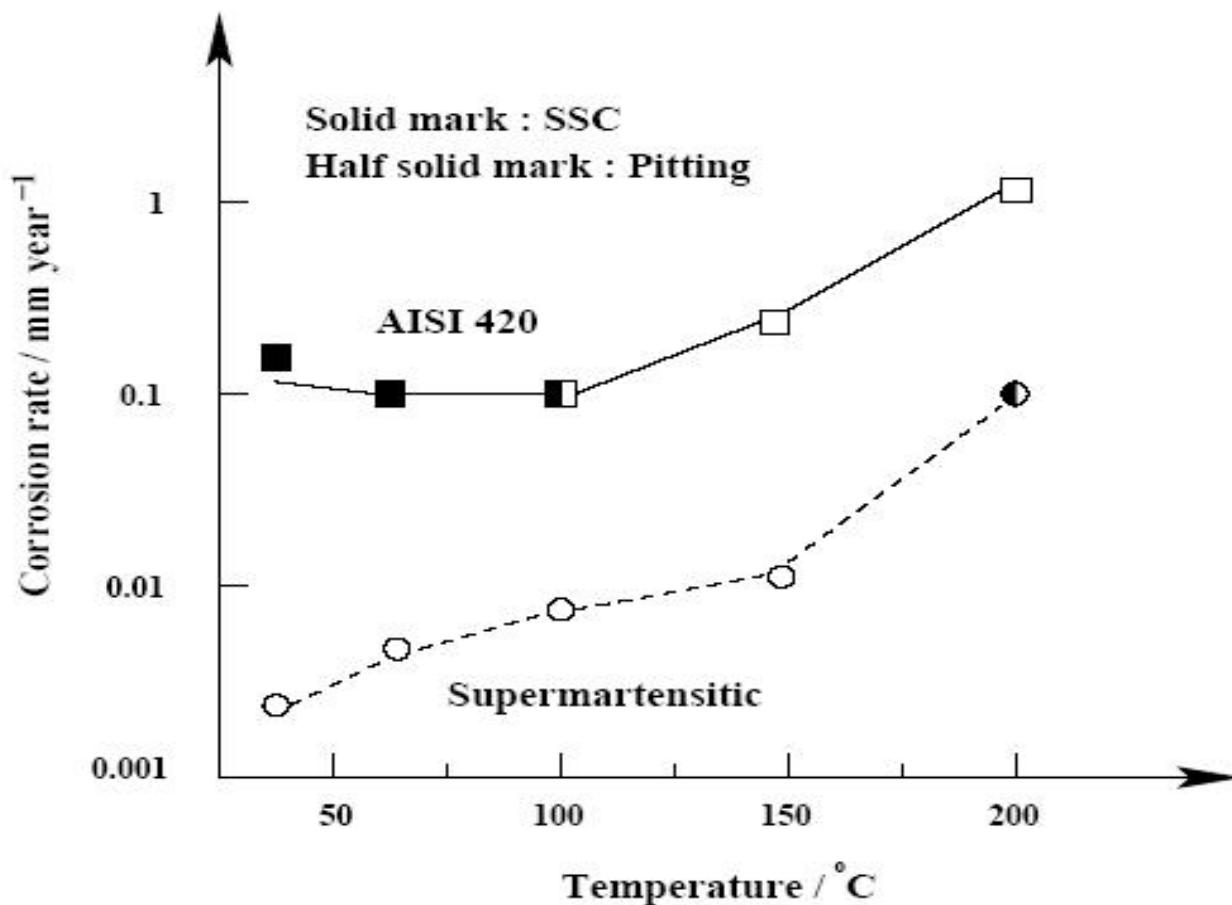


Figure 1.1: Effect of temperature on corrosion rate, localised corrosion and sulfide stress-cracking (SSC) of a conventional AISI 420 and a supermartensitic stainless steel (0.02 C 12 Cr 5.5 Ni 2 Mo wt%) [7]. Experimental conditions : 0.001 MPa H₂S, 3 MPa CO₂, 5 % NaCl, 100 % yield stress, immersed for 336 h.

Fonte: M. Ueda et al., “Corrosion resistance of weldable super 13Cr stainless steel in H₂S containing CO₂ environments”, In: CORROSION 1996, paper 58, NACE International

Propriedades dos aços inoxidáveis martensíticos

Supermartensíticos



Alloy	Y.S. (MPa)	T.S. (MPa)
11Cr 2.5Ni	598	753
12Cr 4.5Ni 1.5Mo	769	918
12Cr 6.5Ni 2.5Mo	733	931
22Cr 5Ni 3Mo	480	680
25Cr 7Ni 3.5Mo	550	760

Duplex

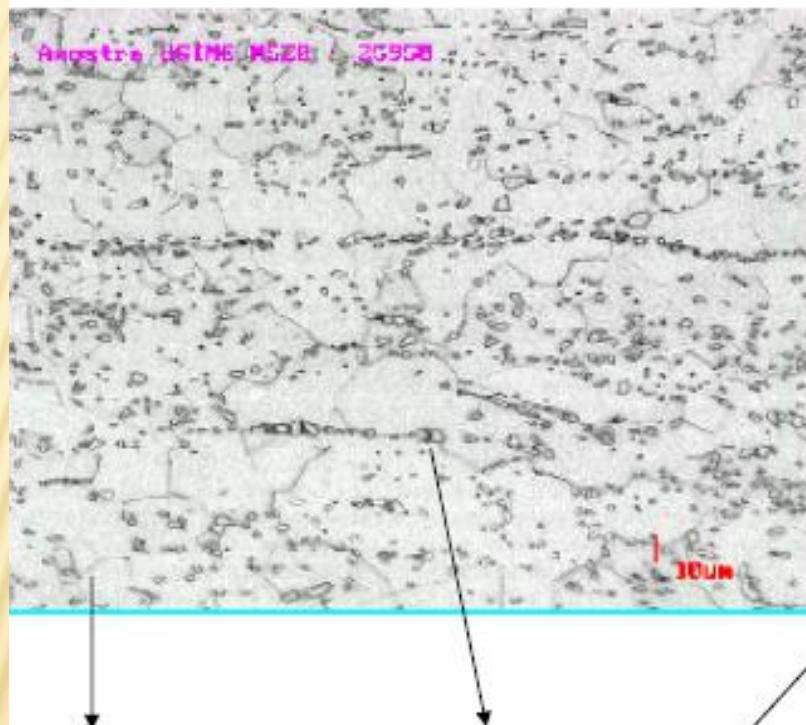


	C	Cr	Ni	Mo	Price
Carbon steel	0.26	0	0	0	1000
Duplex stainless steel 2205	≤ 0.03	22	5	3	4300
Supermartensitic stainless steel	~ 0.01	12	6	2.5	3200

Os aços supermartensíticos são mais baratos e podem apresentar resistência mecânica superior à dos aços duplex e superduplex. Entretanto, os duplex e superduplex podem apresentar melhor resistência à corrosão, dependendo das condições de uso (meio e temperatura).

AÇOS MARTENSÍTICOS

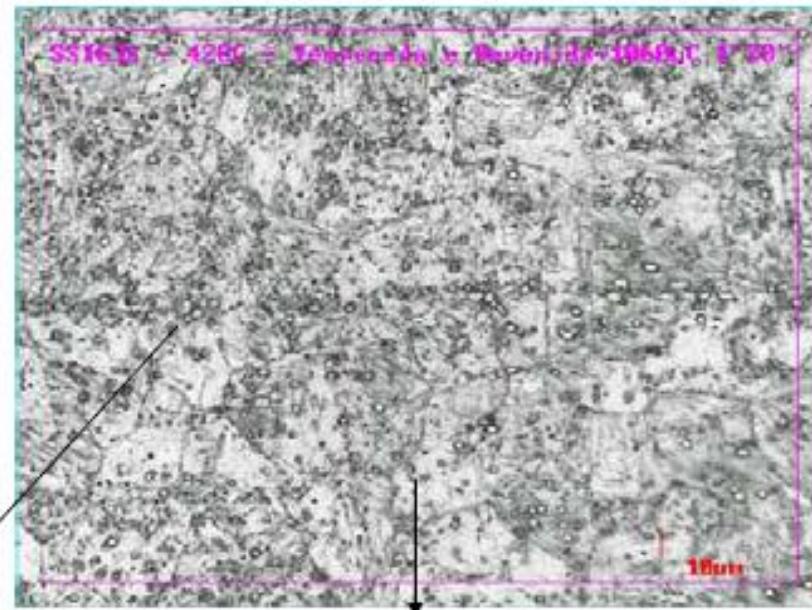
Estado recozido



Matriz ferrítica

Carbonetos de cromo

Estado temperado



Matriz martensítica

AÇOS AUSTENÍTICOS

- Os aços inoxidáveis austeníticos são utilizados em aplicações em temperatura ambiente, em altas temperaturas (até 1150°C) e em baixíssima temperaturas (condições criogênicas), uma série de alternativas que dificilmente são conseguidas com outros materiais
- Tipo mais popular: AISI 304 - 18%Cr, 8%Ni, com %C máx. 0,08%. Possui excelentes propriedades de resistência à corrosão, boa ductilidade etc. Principais aplicações: indústrias químicas, farmacêuticas, petroquímicas, açúcar e álcool, aeronáutica, naval, arquitetural, alimentícia etc.
- Adições de Mo melhoram a resistência à corrosão em frestas e porões, pois estabiliza a camada passiva. Tem-se assim os aço 316 e 317.

AÇOS AUSTENÍTICOS

- Quando permanecem entre 450 e 850°C, estão sujeitos à precipitação de carbonetos de cromo, nos contornos de grão, causando a **sensitização**
- A região em torno dos carbonetos fica mais pobre em cromo, localizando-se aí o ataque corrosivo, levando ao conhecido fenômeno da corrosão intergranular, com intenso comprometimento da resistência mecânica.
- As zonas termicamente afetadas pelos processos de soldagem, tem esta sensibilidade. Isto levou ao desenvolvimento dos aços 304L, 316L e 317L, com a redução do teor de C a um máximo de 0,03%.
- Ti e Nb também são utilizados para evitar a sensitização (AISI 321 e 347)

Aços inoxidáveis: Austeníticos

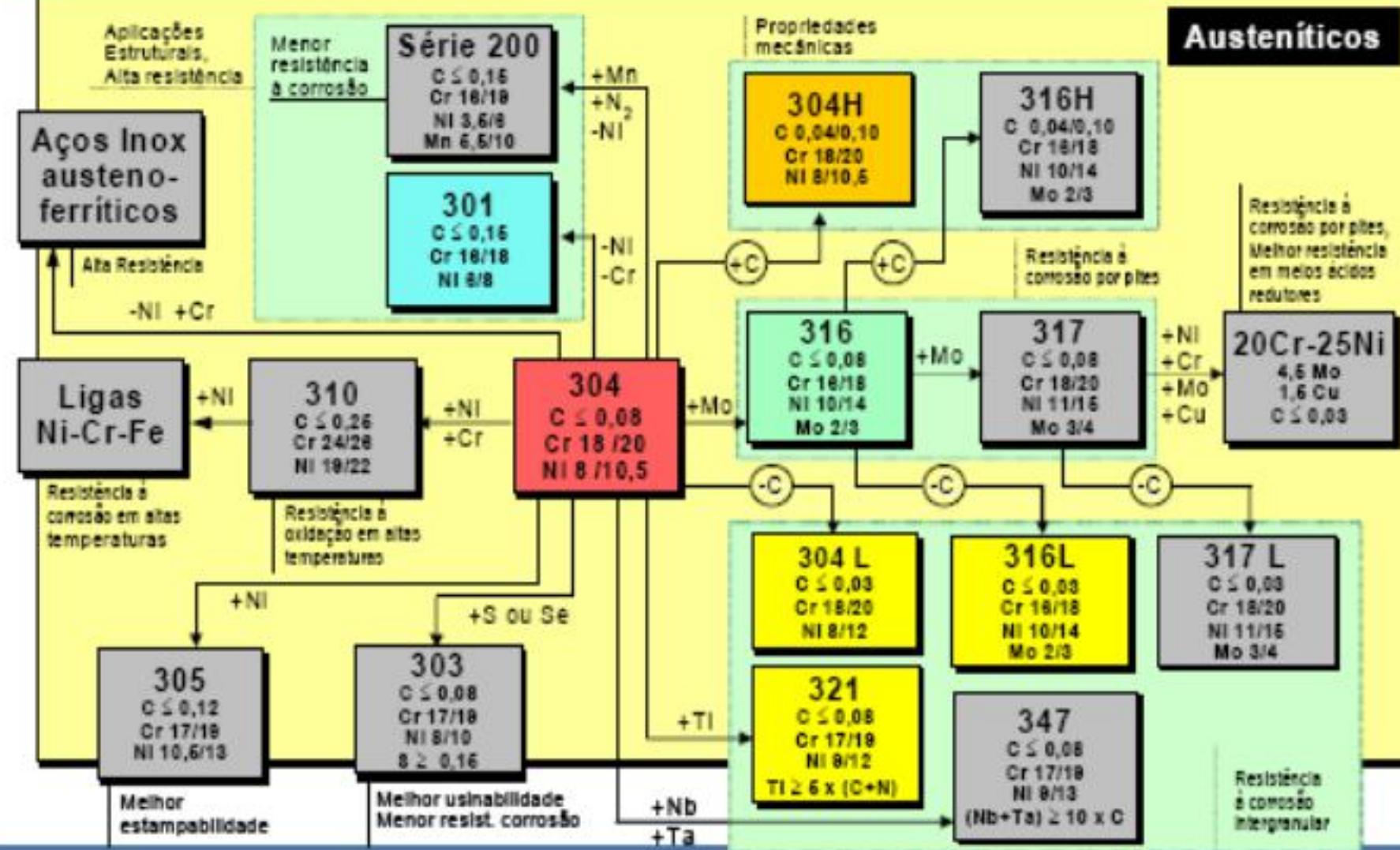
Tipo	%C (máx.)	%Cr	%Ni	%Mn (máx.)	%Si (máx.)	outros
201	0,15	16 - 18	3,5 – 5,5	5,5 – 7,5	1,0	até 0,25%N
301	0,15	16 - 18	6 – 8	2,0	1,0	-
302	0,15	17 - 19	8 - 10	2,0	1,0	-
304	0,08	18 – 20	8 – 10,5	2,0	1,0	-
304L	0,03	18 – 20	8 – 12	2,0	1,0	-
304N	0,08	18 - 20	8 – 10,5	2,0	1,0	0,16 - 0,30%N
316	0,08	16 – 18	10 – 14	2,0	1,0	2 – 3%Mo
316L	0,03	16 – 18	10 – 14	2,0	1,0	2 – 3%Mo
317	0,08	18 – 20	11 – 15	2,0	1,0	3 – 4%Mo
321	0,08	17 – 19	9 – 12	2,0	1,0	%Ti = 5 x %C
347	0,08	17 – 19	9 – 13	2,0	1,0	%Nb = 10 x %C
310	0,25	24 – 26	19 – 22	2,0	1,5	-
310S	0,08	24 - 26	19 - 22	2,0	1,5	-

Aplicações de alguns aços inoxidáveis Austeníticos

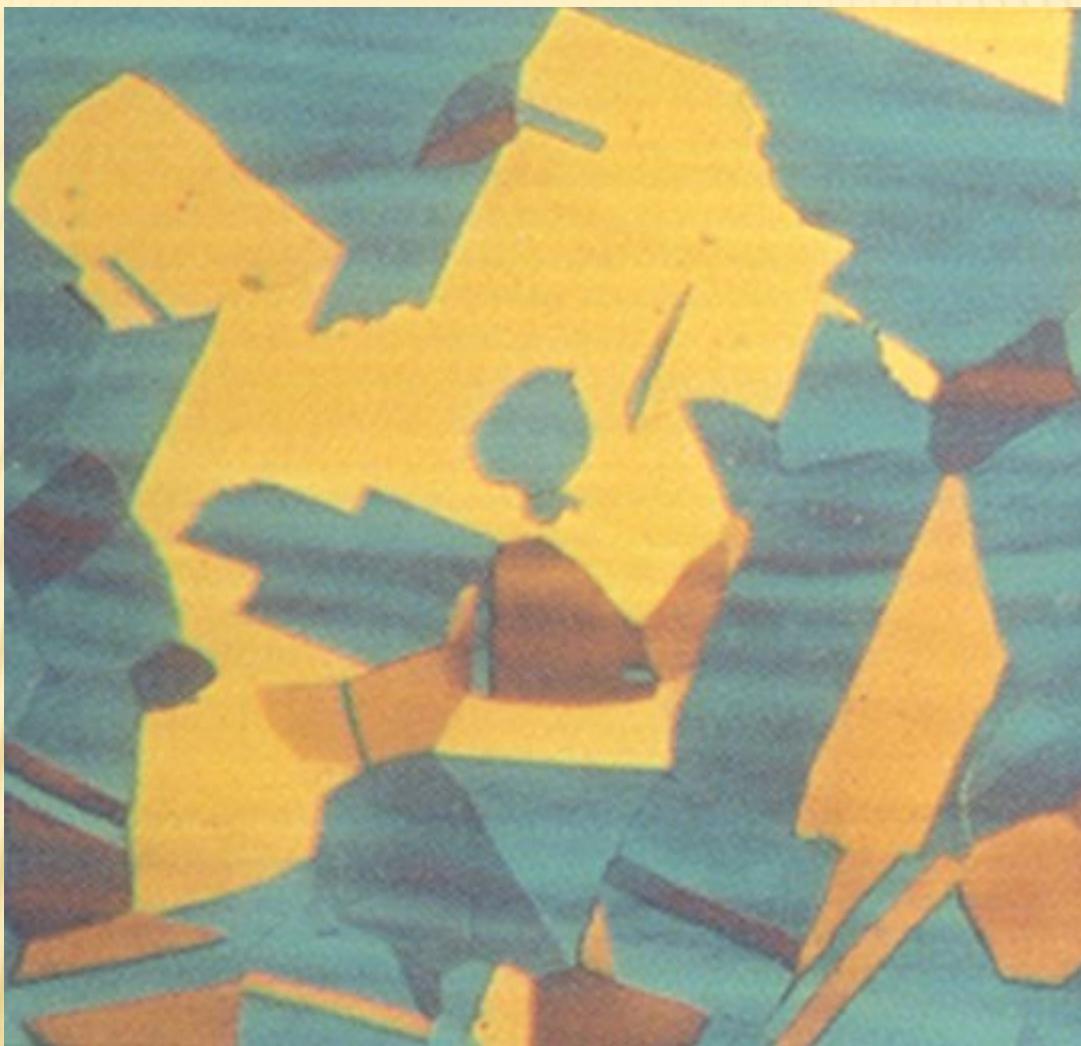
Aço	C (%)	Cr(%)	Ni(%)	Outros elementos	Aplicações
301	0,05	17,00	6,50	-	Fins estruturais
	0,08	17,80	7,00		
304	0,03	18,00	8,00	-	Aplicações onde são exigidas elevadas resistências à corrosão
	0,07	18,80	8,50		
304L	0,01	18,00	8,00	-	Aplicações onde são exigidas elevadas resistências à corrosão com risco de sensitização (baixo carbono – L)
	0,03	18,80	9,00		
310	0,03	25,00	19,00		Aplicação em altas temperaturas, como fornos.
	0,07	26,00	21,00		
316	0,01	16,50	10,00	Mo: 2,0	Maior resistência à corrosão; ambientes mais agressivos
	0,08	17,30	10,50		
317	0,01	18,00	11,00	Mo: 3,0	Ambientes ainda mais agressivos que o 316 (maior Mo).
	0,08	19,00	12,00		
321	0,01	17,00	9,00	Ti > 5(C+N)	Maior resistência à sensitização em alta temperatura que o aço 304.
	0,08	19,00	10,00		
347	0,01	17,20	9,00	Nb > 10 * C	Maior resistência à sensitização em alta temperatura que o aço 304.
	0,08	19,00	10,00		

Aços Inoxidáveis Austeníticos da Série 300

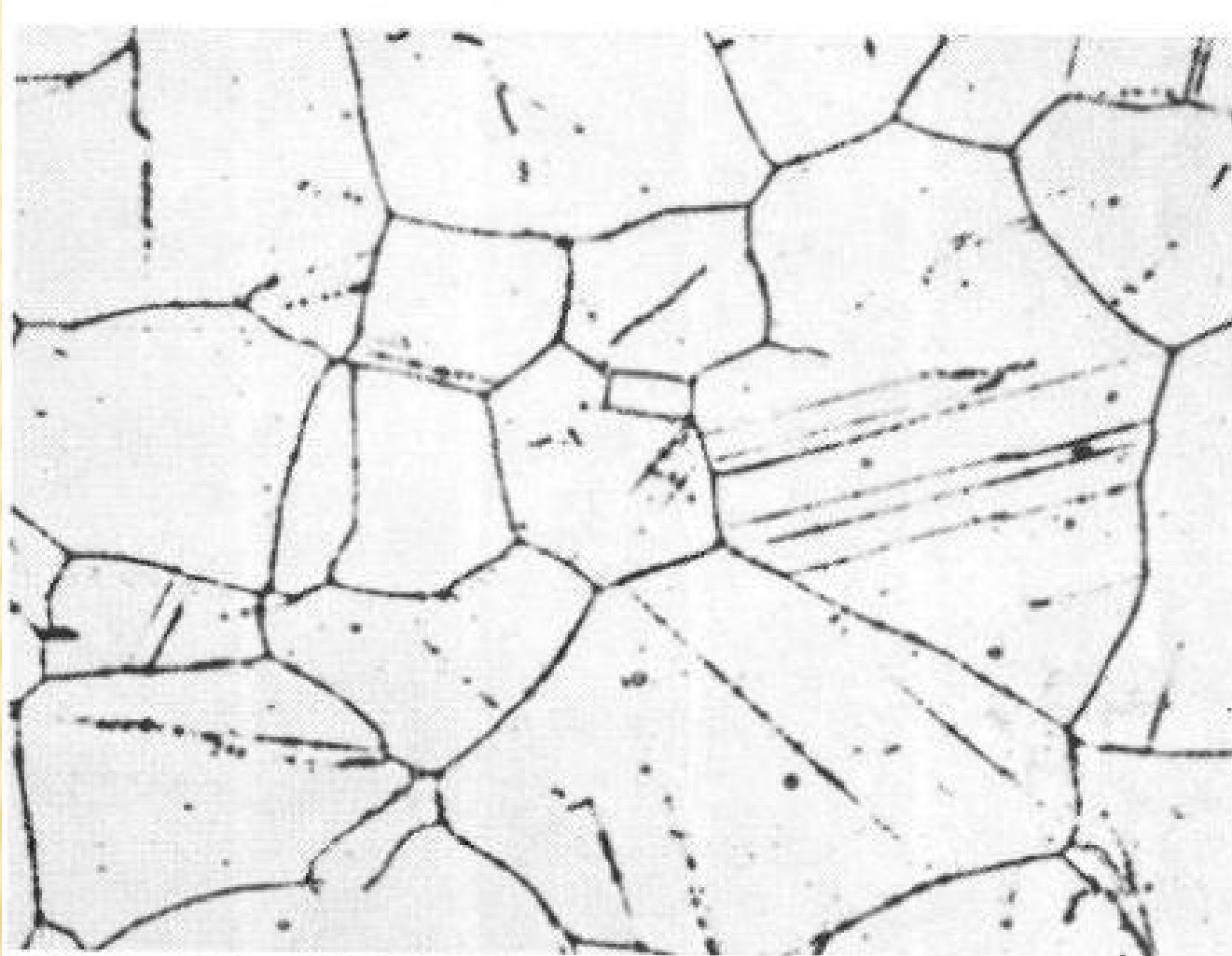
AÇOS INOX DA SÉRIE 300



Estrutura Austenitica



Microestrutura Aços Inox AISI 304



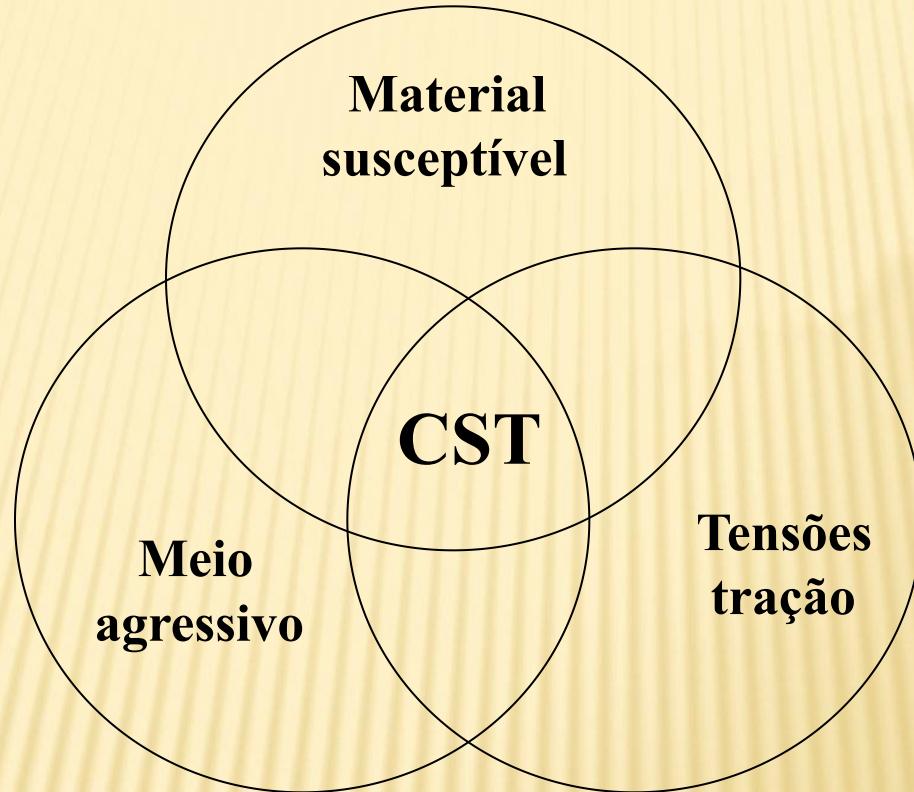
Electrolytic: 10% oxalic acid

500 \times

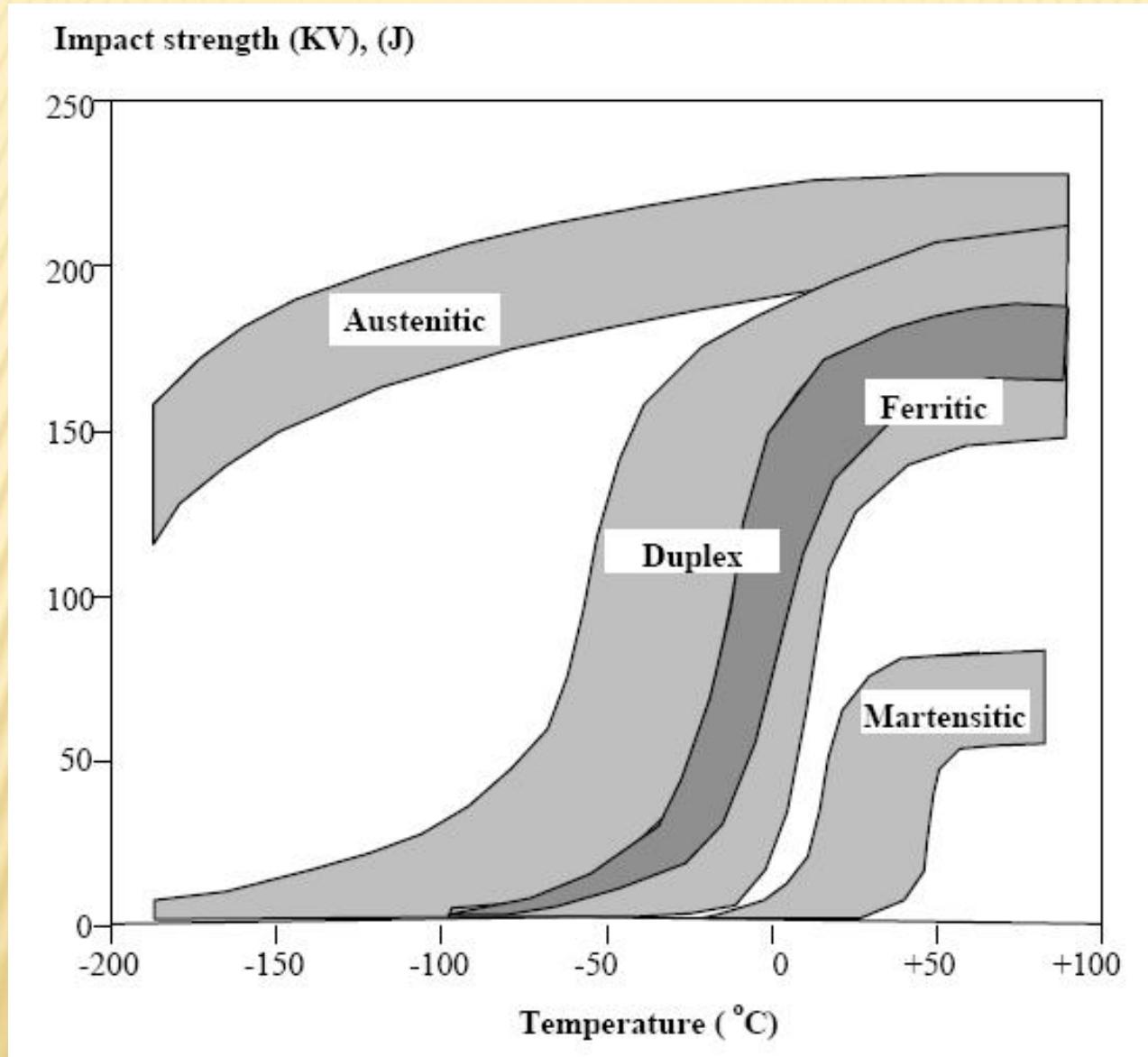
1084 Type 304 strip annealed at 1900 F (1038 C) and sensitized by reheating 1 hr at 1200 F (649 C). Carbide precipitation at grain boundaries and at twin boundaries.

PRINCIPAIS CARACTERÍSTICAS DOS AÇOS INOXIDÁVEIS AUSTENÍTICOS

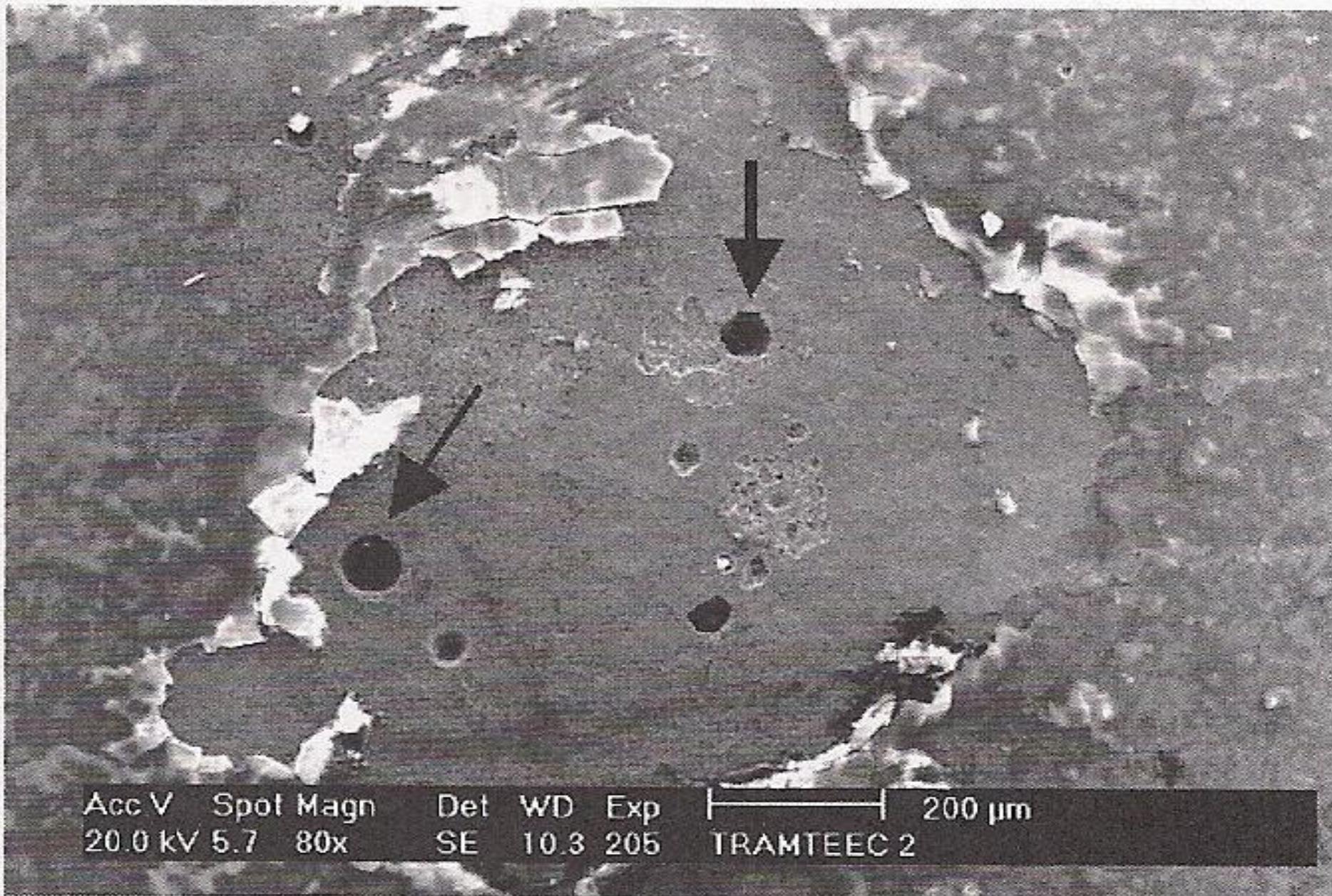
- ✗ Excelente resistência à corrosão, exceto corrosão sob tensão.**
- ✗ Não são endurecíveis por tratamento térmico.**
- ✗ Têm excelente conformabilidade.**
- ✗ Têm baixa energia de falha de empilhamento.**
- ✗ Apresentam alto coeficiente de encruamento (n).**
- ✗ A estrutura cfc apresenta boa resistência à fluência.**
- ✗ A estrutura austenítica não apresenta transição dúctil-frágil.**
- ✗ Possuem baixas condutividade elétrica e térmica (característica comuns aos inox).**
- ✗ Possuem elevado coeficiente de expansão térmica (maior do que os demais tipos de inox).**



COMPARAÇÃO DAS CURVAS TENACIDADE x TEMPERATURA



Corrosão por pites no aço inoxidável austenítico AISI 304



Corrosão sob tensão



TRINCA DE CORROSÃO SOB TENSÃO INICIADA EM PONTO DE CORROSÃO INTERGRANULAR

Na maioria dos casos, a CST nos aços inoxidáveis austeníticos é causada por íons cloretos.

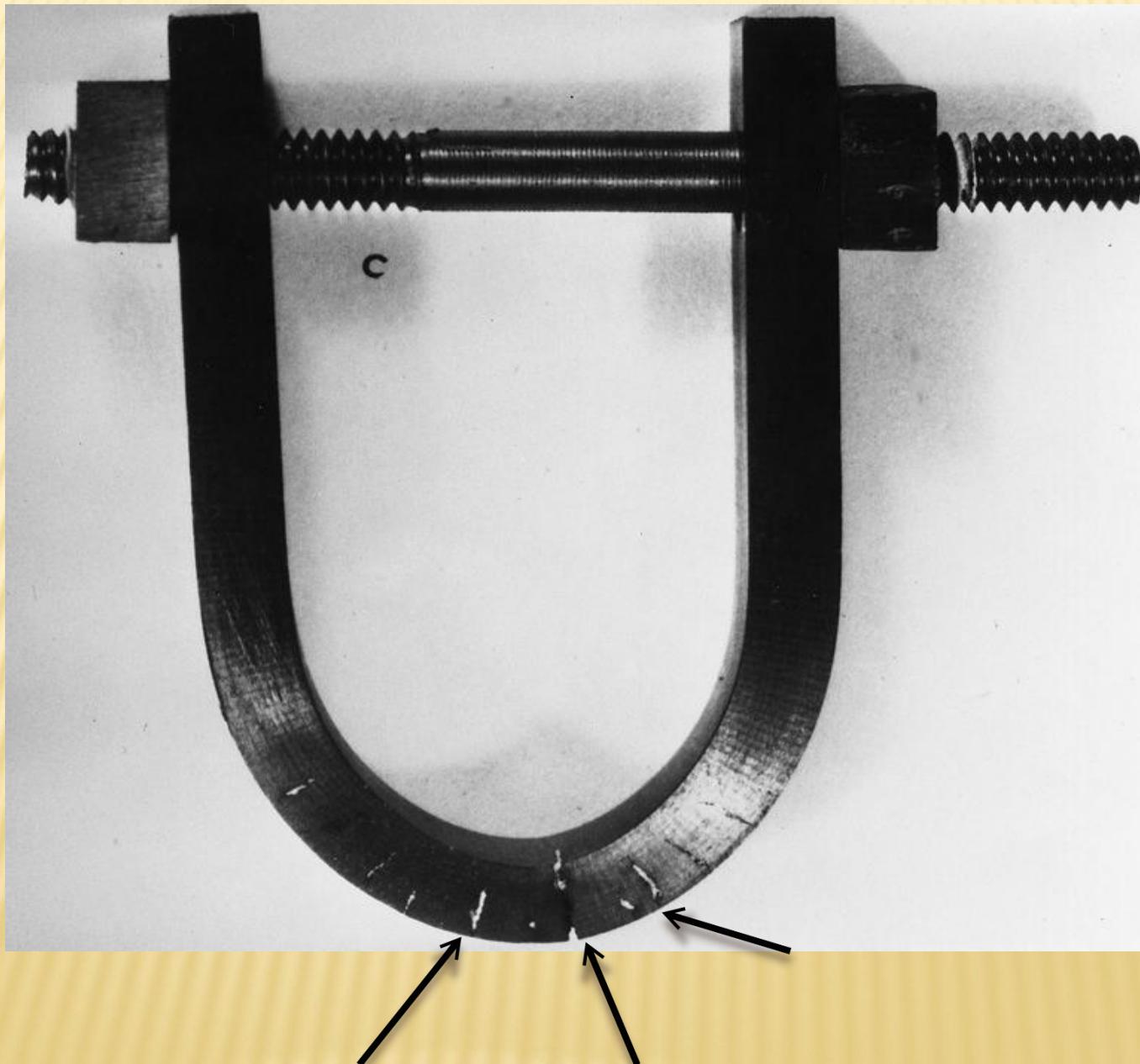
No setor nuclear, as juntas soldadas devem passar por tratamento térmico de alívio de tensões.

Corrosão sob tensão



Fig. 10 - Corrosão sob tensão em uma autoclave de aço 304.

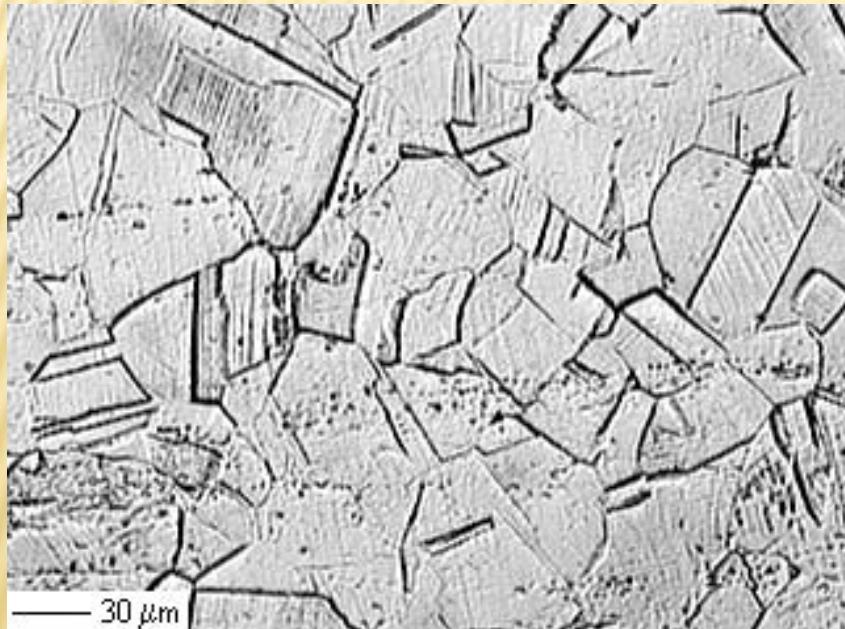
ASPECTO DA TRINCAS DE CORROSÃO SOB TENSÃO EM AÇOS INOXIDÁVEIS AUSTENITICOS EM SOLUÇÕES CONTENDO CLORETO ACIMA DE 60 °C



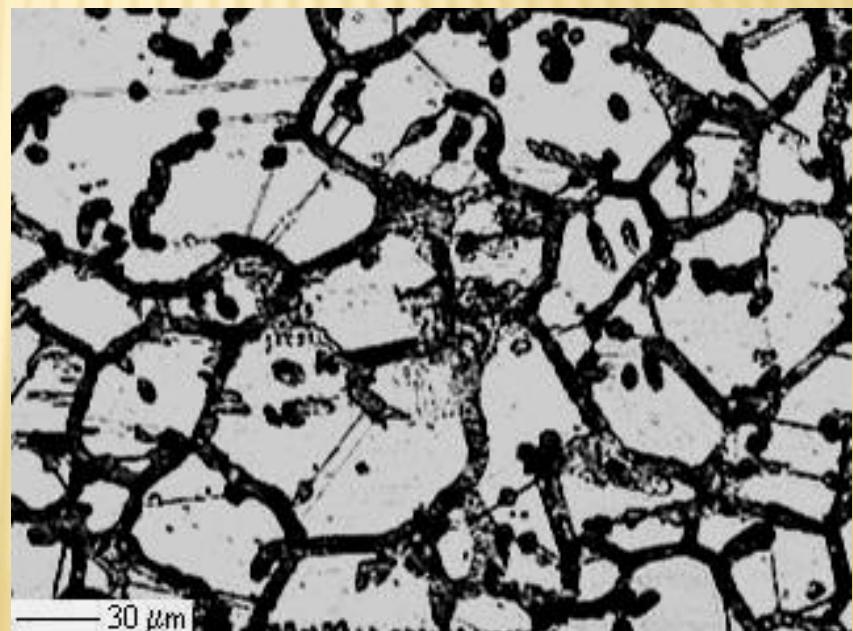
Sensitização ↔ corrosão intergranular

Sensitização é a precipitação de carbonetos de cromo, preferencialmente nos contornos de grão. A faixa de temperaturas em que a precipitação ocorre nos aços inox austeníticos é de 450°C a 850°C.

Norma ASTM A-262 – prática A – ataque eletrolítico em solução de ácido oxálico



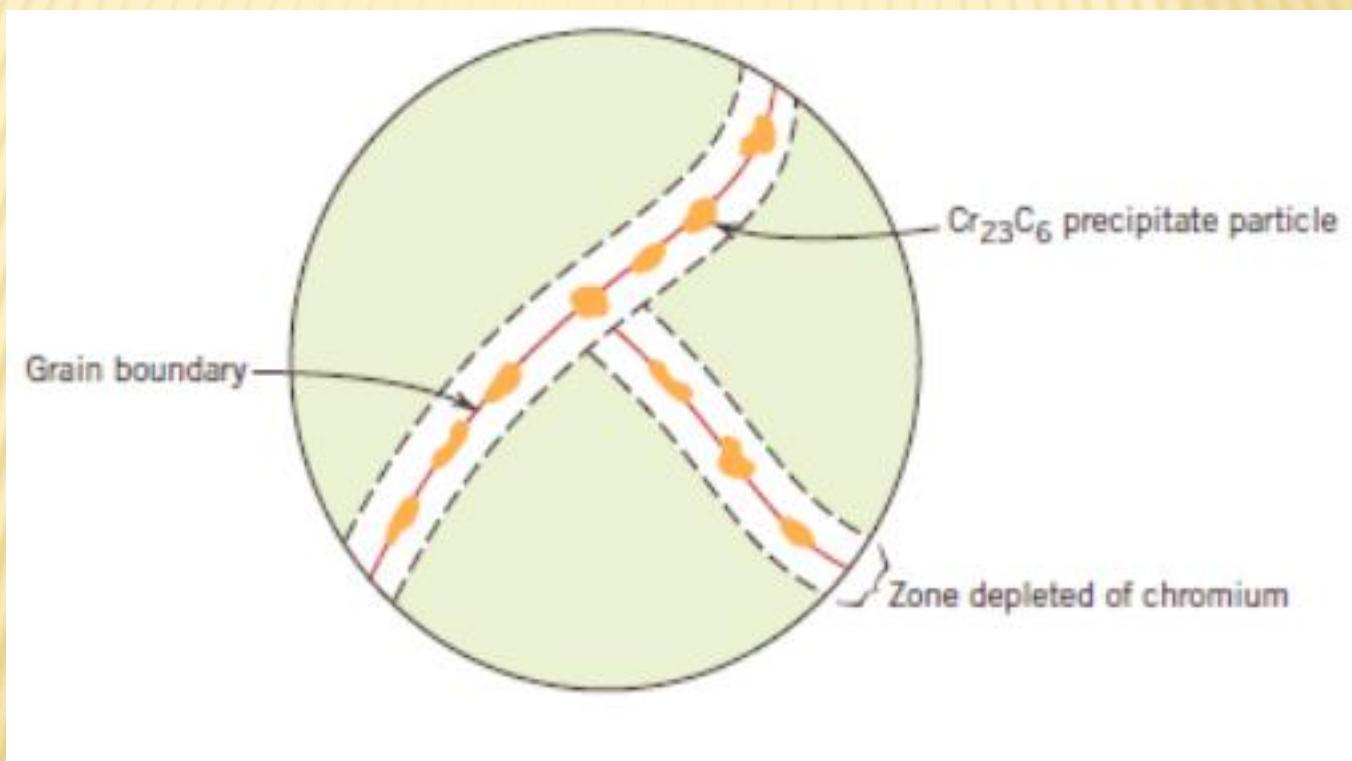
AISI 304 - Estrutura solubilizada
“step”



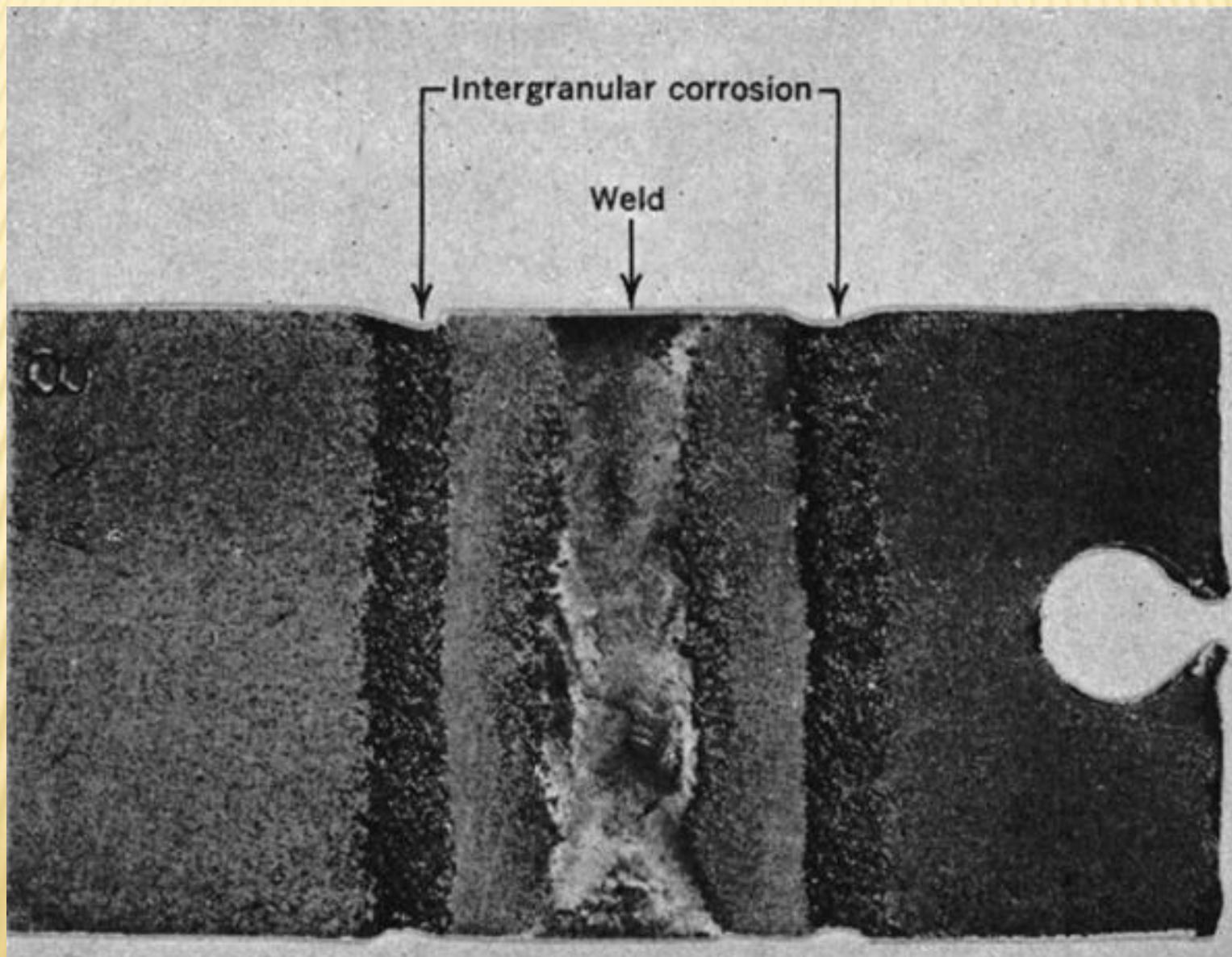
AISI 304 - Estrutura sensitizada
“ditch”

Mecanismo da corrosão intergranular

A CORROSÃO OCORRE NOS AÇOS INOXIDÁVEIS AUSTENÍTICOS QUANDO AQUECIDOS ENTRE 400 °C E 900 °C, FORMANDO O Cr_{23}C_6 .

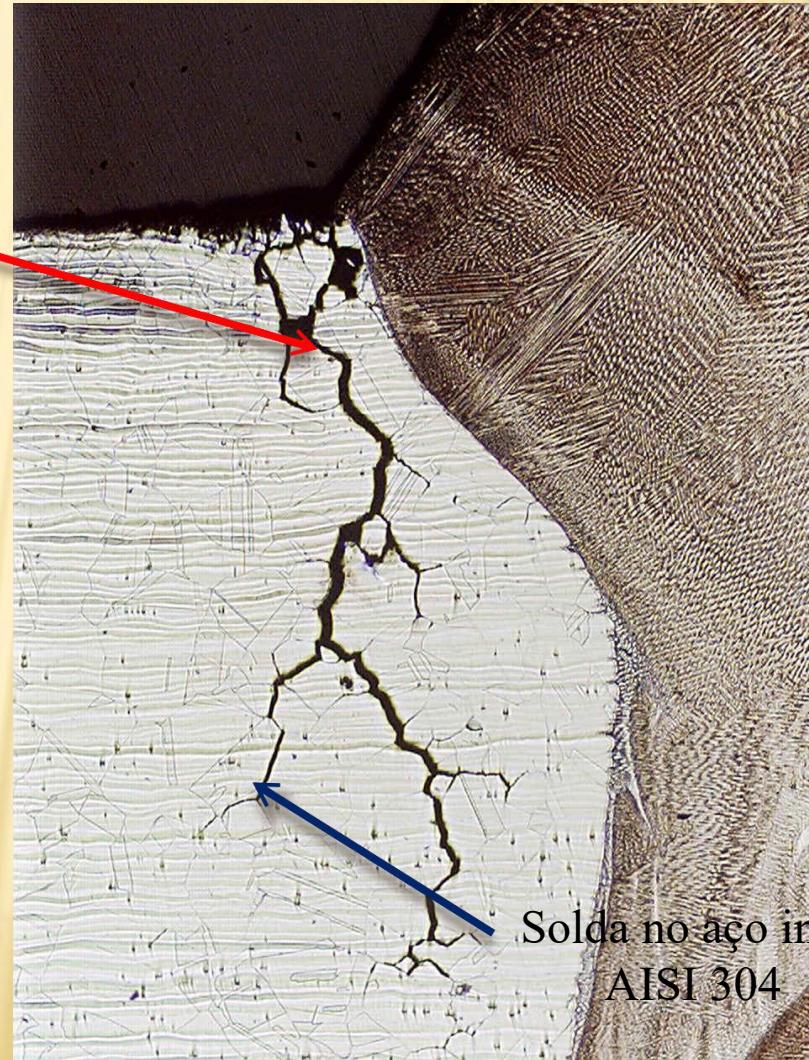


CORROSÃO INTERGRANULAR NUM AÇO INOXIDÁVEL SOLDADO NA PROXIMIDADE DO CORDÃO DE SOLDA



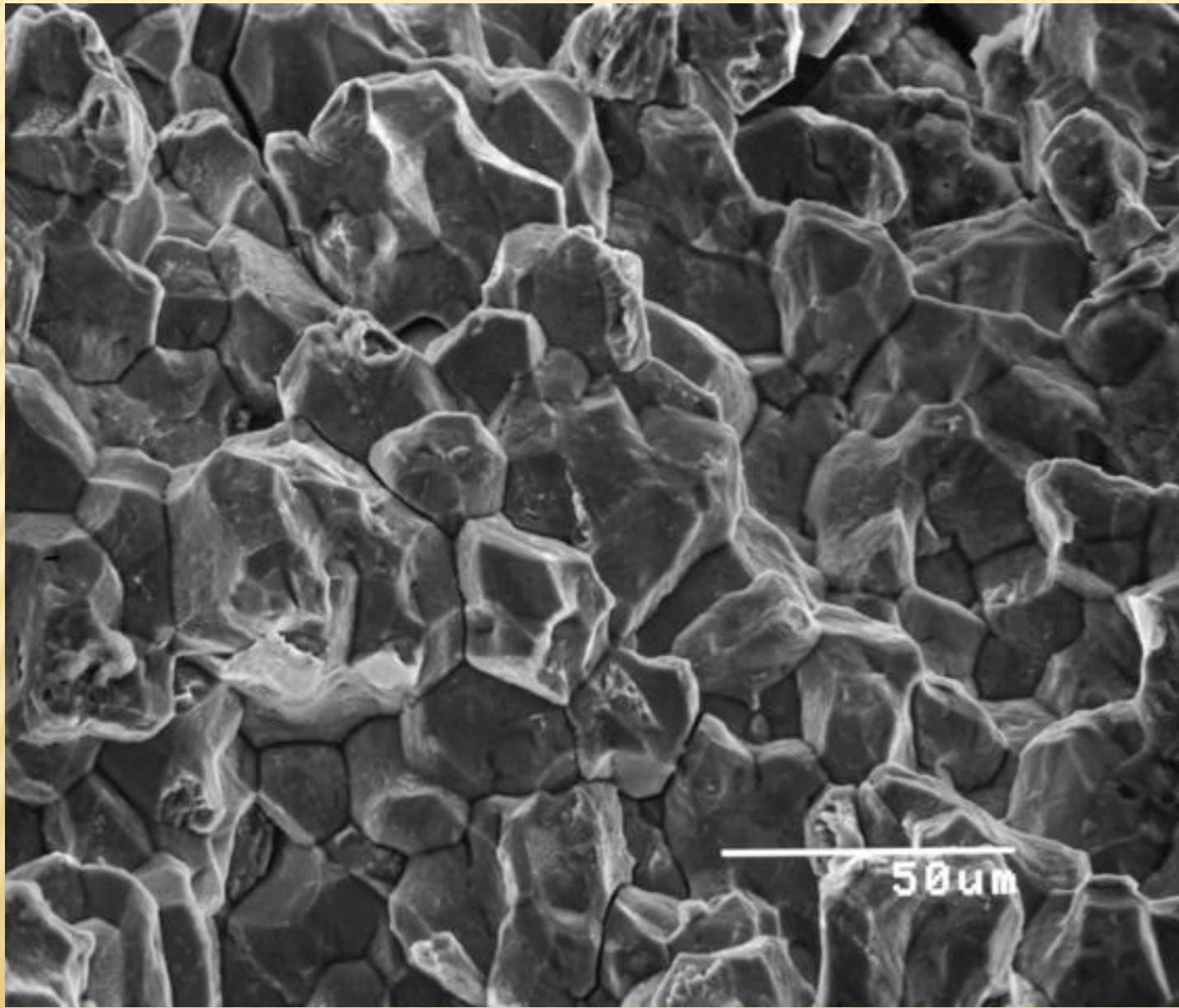
CORROSÃO INTERGRANULAR NA ZONA AFETADA PELO CALOR DE UMA SOLDA EM AÇO INOXIDÁVEL AISI 304

Trinca intergranular no aço inox AISI 304 na ZTA

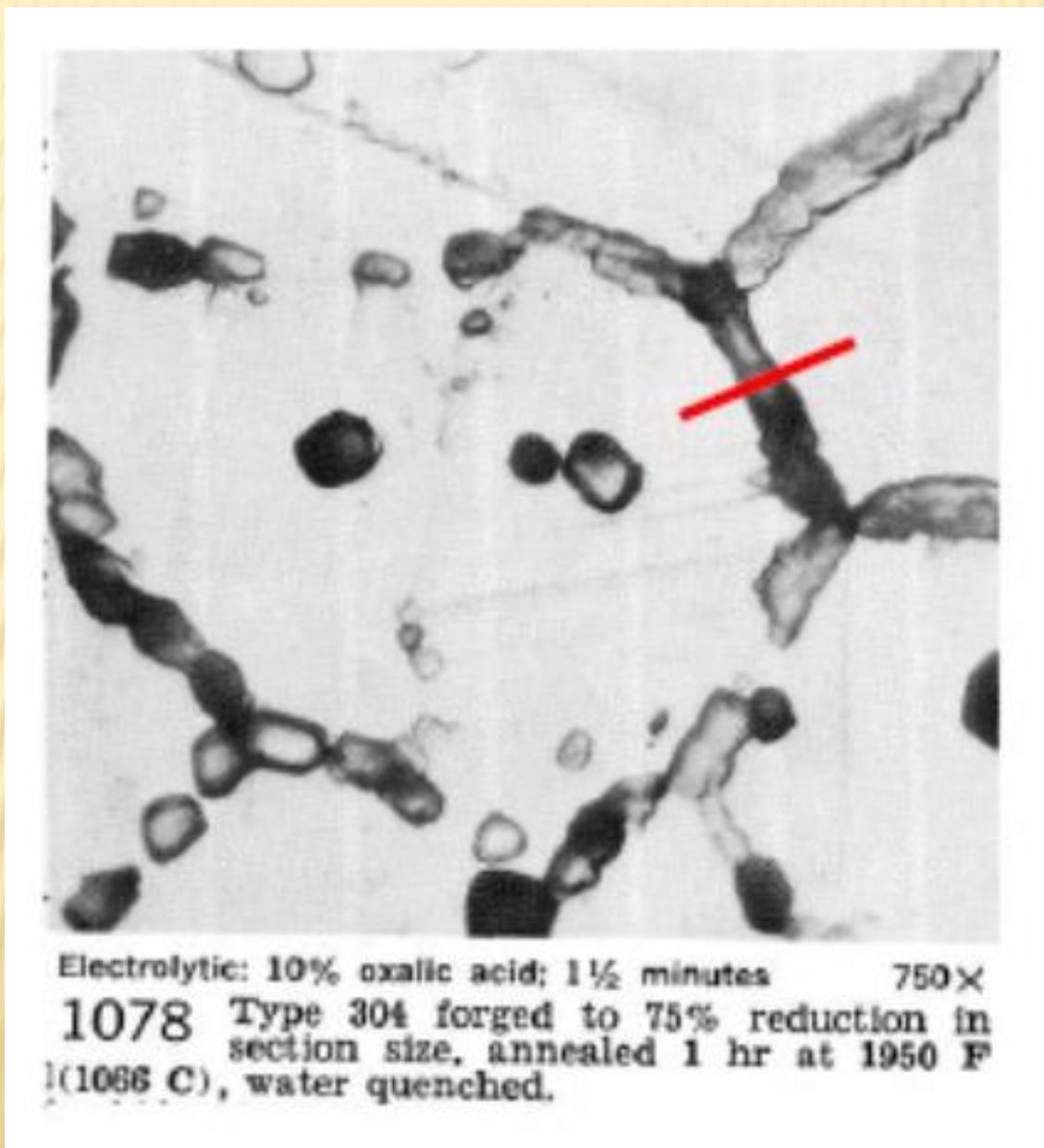


Solda no aço inox
AISI 304

ASPECTO DE UMA FISSURA INTERGRANULAR EM AÇO INOXIDÁVEL AISI 304 VISTA NO MICROSCÓPIO ELETRÔNICO DE VARREDURA



Sensitização e corrosão intergranular



Electrolytic: 10% oxalic acid; 1 1/2 minutes 750×

1078 Type 304 forged to 75% reduction in
section size, annealed 1 hr at 1950 F
(1066 C), water quenched.

Corrosão intergranular causada por Sensitização [precipitação de carbonetos de cromo, ou de fases ricas em cromo, nos contornos de grão].



Figure 6.1 Intergranular attack in a sensitized austenitic alloy produced by exposure to a boiling sulfuric acid–ferric sulfate solution. Prolonged exposure causes grains to detach from surface. (Magnification = 100 \times .)

Medidas para se evitar a corrosão intergranular nos aços inoxidáveis austeníticos

- Regenerando um aço sensitizado

- 1050°C – 1100°C resfriamento em água

- Utilizando aços com baixo teor de carbono

(L)

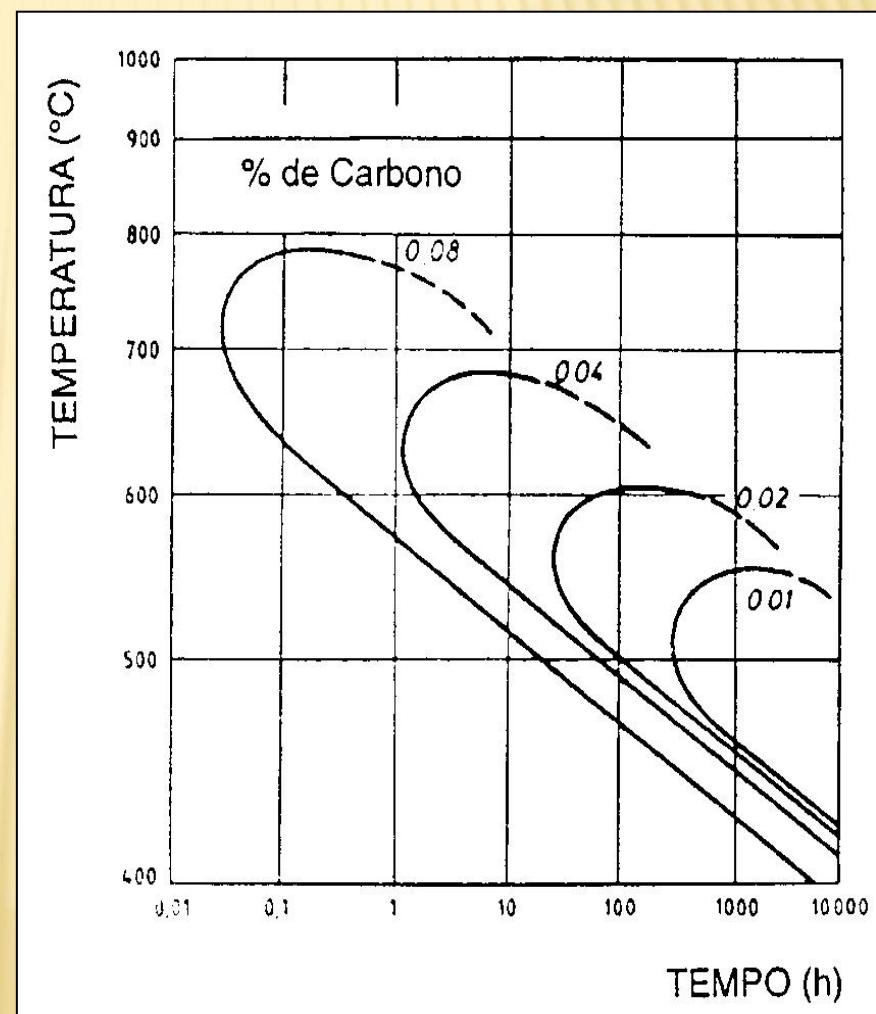


- 304L, 316L, 317L (%C < 0,03%)
- Reduzindo o teor de carbono retarda-se a cinética de precipitação dos carbonetos

- Utilizando aços estabilizados ao Ti (AISI 321) ou Nb (AISI 347):

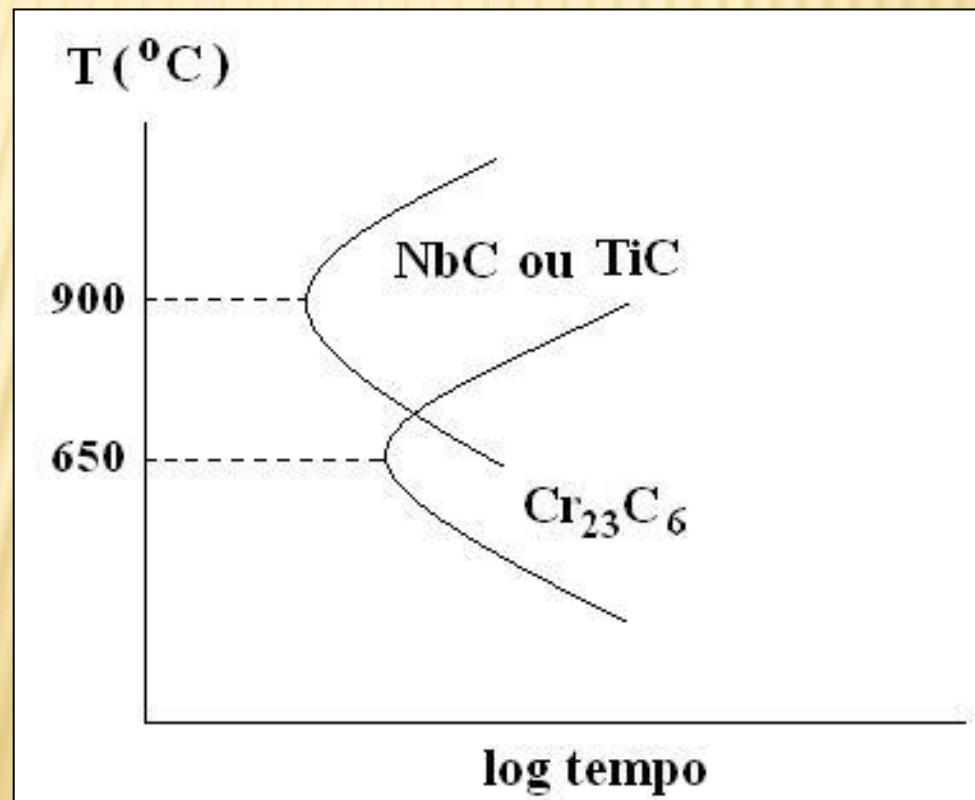
O Nb e o Ti formam carbonetos (NbC e TiC) evitando a formação dos carbonetos de cromo (Cr_{23}C_6).

Estes aços devem passar por um tratamento de **estabilização** após a soldagem ou antes da utilização na faixa de 600°C a 700°C.

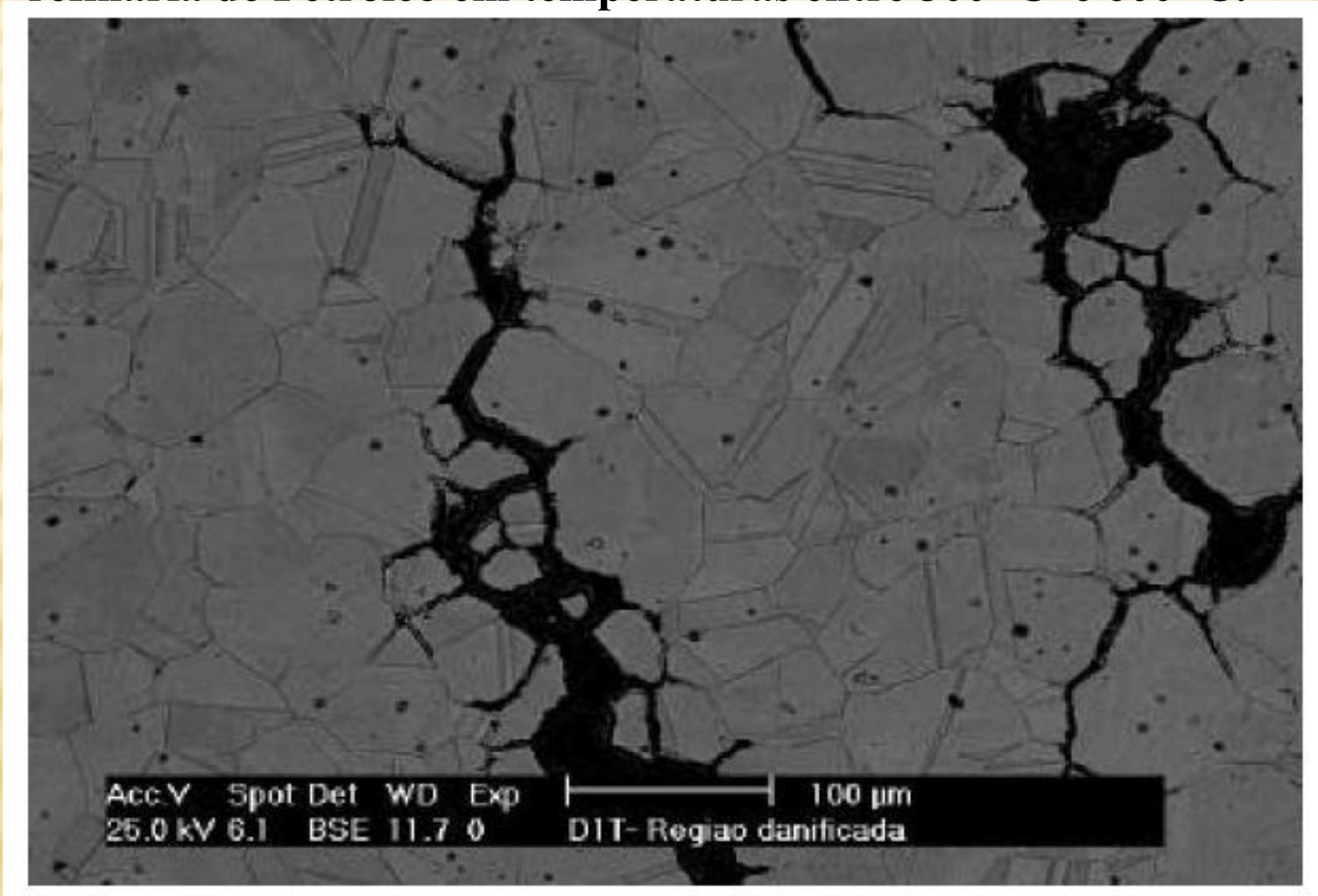


Medidas para se evitar a corrosão intergranular nos aços inoxidáveis austeníticos

- O tratamento térmico de estabilização deve provocar a precipitação de NbC ou TiC, retirando todo o carbono da solução sólida
- O tratamento térmico de estabilização deve ser feito na faixa de 850°C a 950°C.



Estudo da sensitização em aços inoxidáveis AISI 321 que operam em refinaria de Petróleo em temperaturas entre 500 °C e 600 °C.



Aspecto de amostra retirada de tubo do Aço Inox AISI 321 próximo da região trincada.

Sensitização

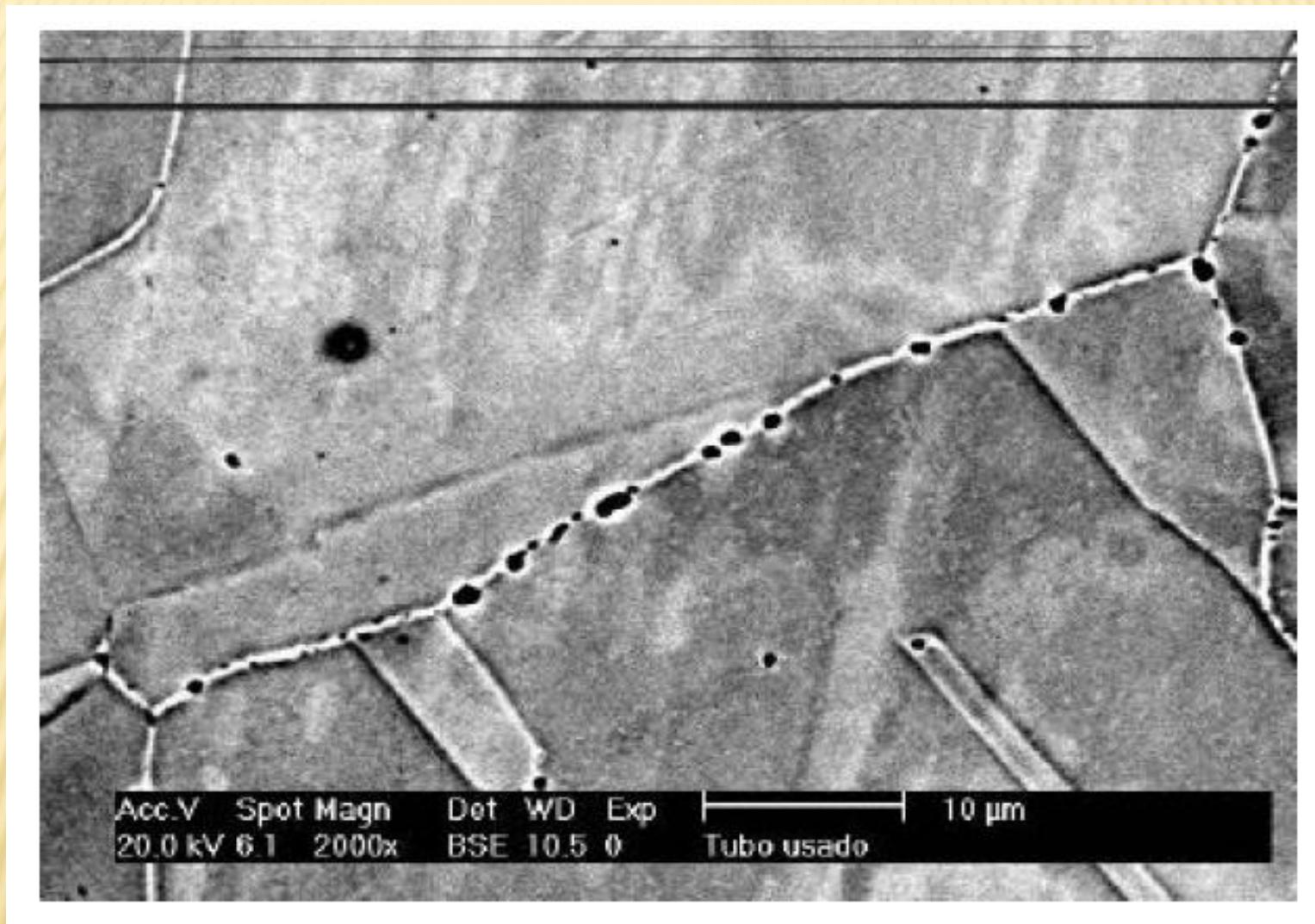


Figura 2 Presença de carbonetos no contorno de grão em amostra de tubo de aço AISI-321 retirado distante da região rompida.

Sensitização

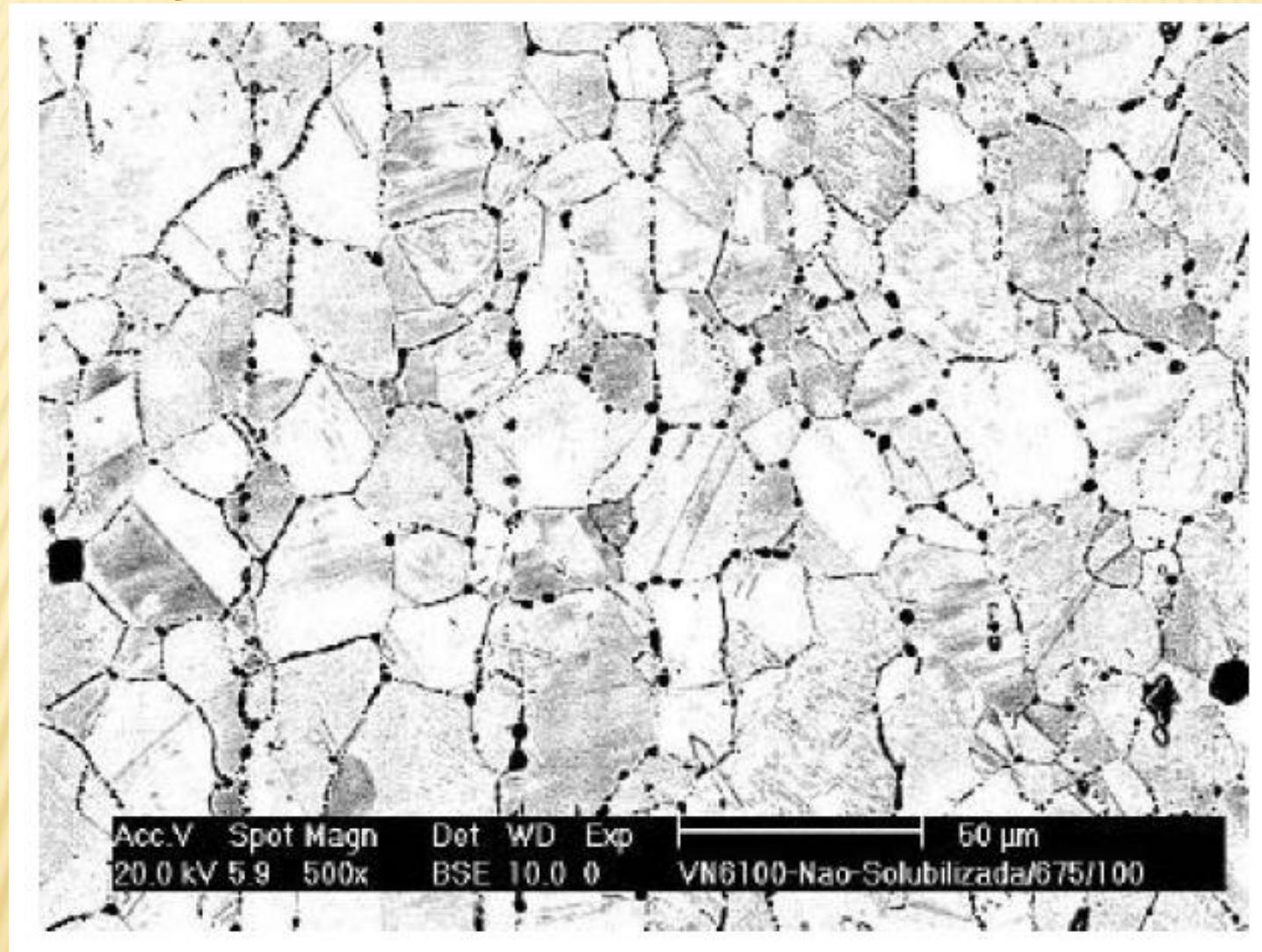


Figura 3 Presença de carbonetos no contorno de grão em amostra de tubo de aço AISI-321 retirado um tubo novo e submetido 100 horas a 675° C.

Aços Inoxidáveis Duplex

ACEROS INOXIDABLES SÚPER-DUPLEX

Composição química dos AID mais comuns, em destaque, os AISD

Nome Comercial	Denominação UNS	Cr	Mo	Ni	N	Outros Elementos	PRE*
SAF 2304	S32304	23	0,2	4	0,1	-	25
UR35N	S32304	23	0,2	4	0,1	-	25
3RE60	S31500	18,5	2,7	5	0,07	1,5 Si	29
UR 45	S31803	22	3	5,3	0,17	-	35
SAF 2205	S31803	22	3	5,3	0,17	-	35
2205	S31803	22	3	5,3	0,17	-	35
FALC 223	S31803	22	3	5,3	0,17	-	35
AF 22	S31802	22	3	5,3	0,17	-	35
VS 22	S31803	22	3	5,3	0,17	-	35
10RE51	S32900	25	1,5	4,5	-	-	30
DP3	S31260	25	3	6,5	0,16	0,5 Cu - 0,3 W	37
UR52N	S32550	25	3	6,5	0,18	1,6 Cu	38
FERRALIUM 255	S32550	25	3	6,5	0,18	1,6 Cu	38
UR 47N	S32200	25	3	6,5	0,18	-	38
ZERON 100	S32760	25	3,6	7	0,25	0,7 Cu – 0,7 W	41
UR52N+	S32550	25	3,8	6	0,25	1,5 Cu	42
SAF 2507	S32750	25	3,8	7	0,27	-	42

*PRE: equivalente de resistência ao pite

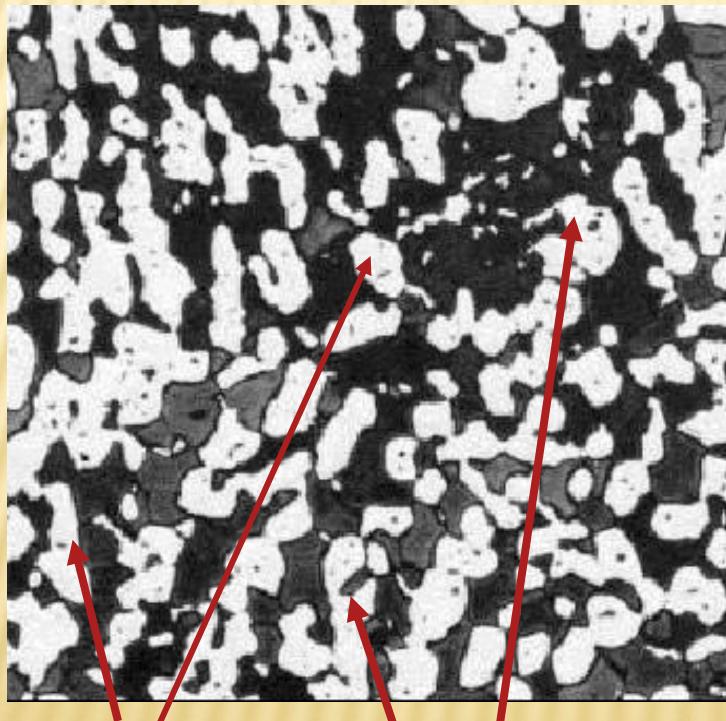
HISTÓRICO SÚPER-DUPLEX

- ✖ Aços Inoxidáveis – descobertos início século XX
 - + 1912 – austeníticos e martensíticos
 - + 1920 – ferríticos
 - + 1927 – duplex
- ✖ BRASIL
 - + Início de utilização – só nos anos 80
(desconhecimento + dificuldades na fabricação)
 - + Ainda não fabrica chapas de duplex ??????

PROPRIEDADES

- ✖ O que é um Aço inoxidável Duplex?
- ✖ Microestrutura Duplex constituída por duas fases em proporções aproximadamente iguais
 - + Ferrita (α) + Austenita (γ)
- ✖ Superduplex?

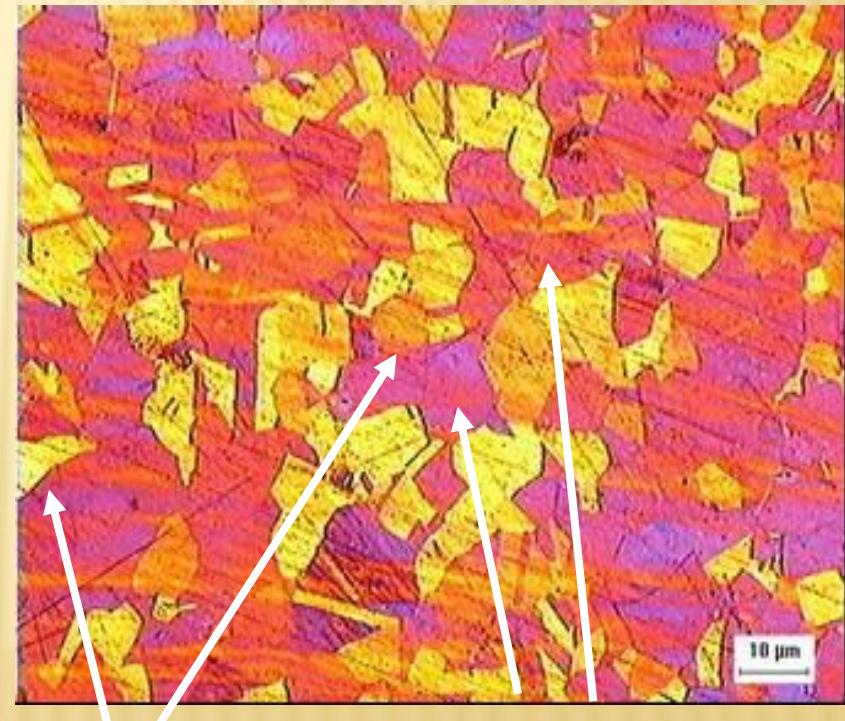
DUPLEX



FERRITA

AUSTENITA

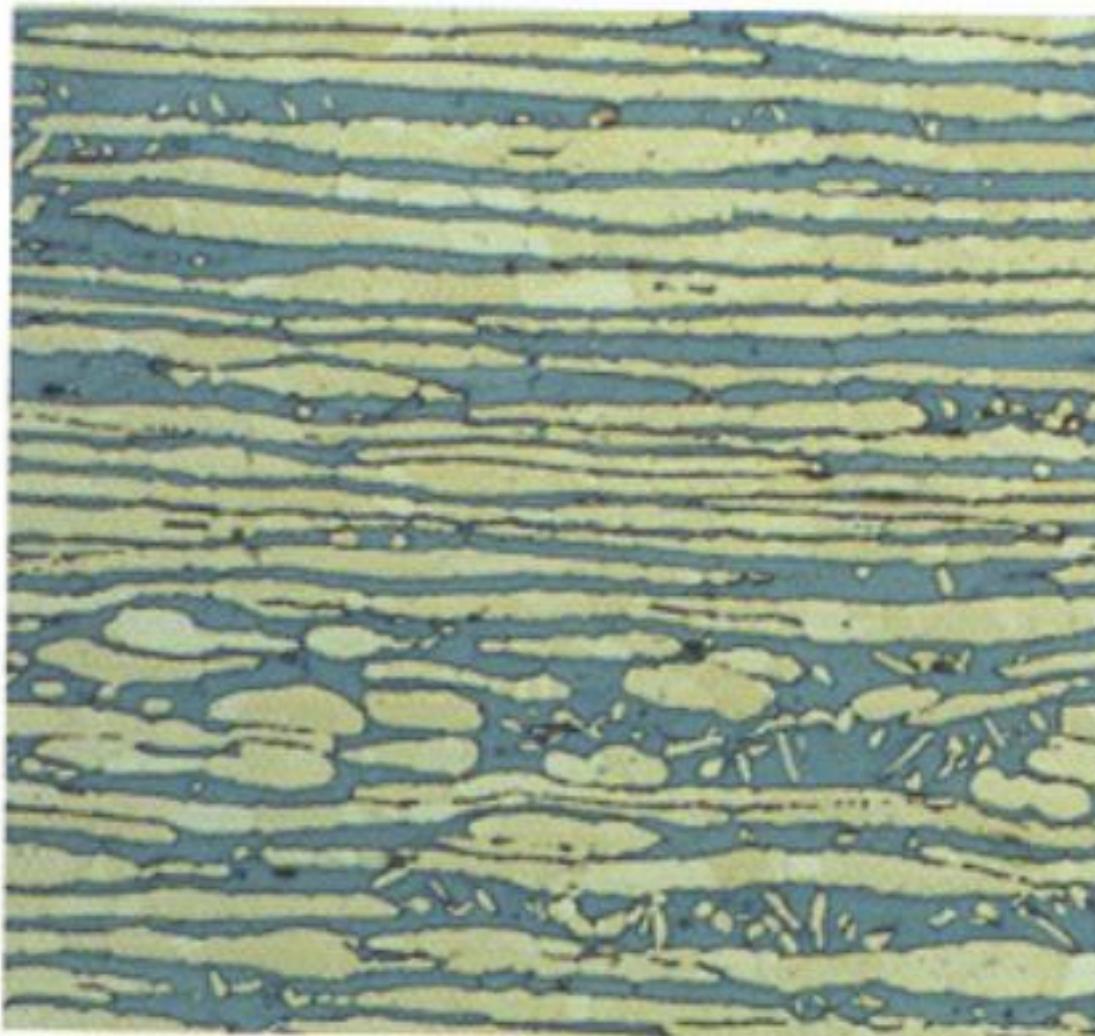
SÚPER-DUPLEX



FERRITA

AUSTENITA

Duplex Structure



Propriedades dos Aços inoxidáveis Duplex

- Cr e Ni com estrutura cristalina misturada de ferrita (ccc) e austenita (cfc);
- ccc/cfc é função da composição e do tratamento térmico;
- Maior parte das ligas contém iguais quantidades de fases quando recozido;
- Ni, Mo, Cu, Si, W balanço estrutural ou características de resistência a corrosão;
- Resistência a corrosão igual ao Aço Inox Austenítico com liga similar;
- Resistência Mecânica superior ao Aço Inox Austenítico com liga similar;
- Tenacidade intermediária entre ferrítico e austenítico.

Aços inoxidáveis Super-Duplex - Composição Química

- Similar à dos aços duplex, com maiores teores de Cr, Ni, Mo e N e também com adições de Cu e W.
- São caracterizados por transformações e precipitação complexa, contendo frações volumétricas comparáveis de austenita e ferrita, com diferentes propriedades físicas e mecânicas.
 - ▶ Isto leva à evolução de níveis elevados de tensões internas, tornando o material suscetível à formação de trincas durante o resfriamento.
 - ▶ Esta fragilização é atribuída à precipitação da fase sigma nos contornos de fase.
- Os aços inoxidáveis súper-duplex são amplamente utilizados em ambientes contendo íons da família dos halogênios, principalmente por íon cloreto (Cl^-). Os ambientes mais comuns, onde se utilizam esses materiais, são as águas de mar, onde as concentrações de NaCl variam de 3,0% a 21,0%.

- Os aços inoxidáveis superduplex têm propriedades mais nobres em relação aos duplex e apresentam uma superior resistência equivalente à corrosão por pite (P. R. E., **pitting resistance equivalent**) maior que 40, sendo o P. R. E. calculado pelas Equações 1 ou 2.

► **PREN = % Cr + 3,3% Mo + 16% N**

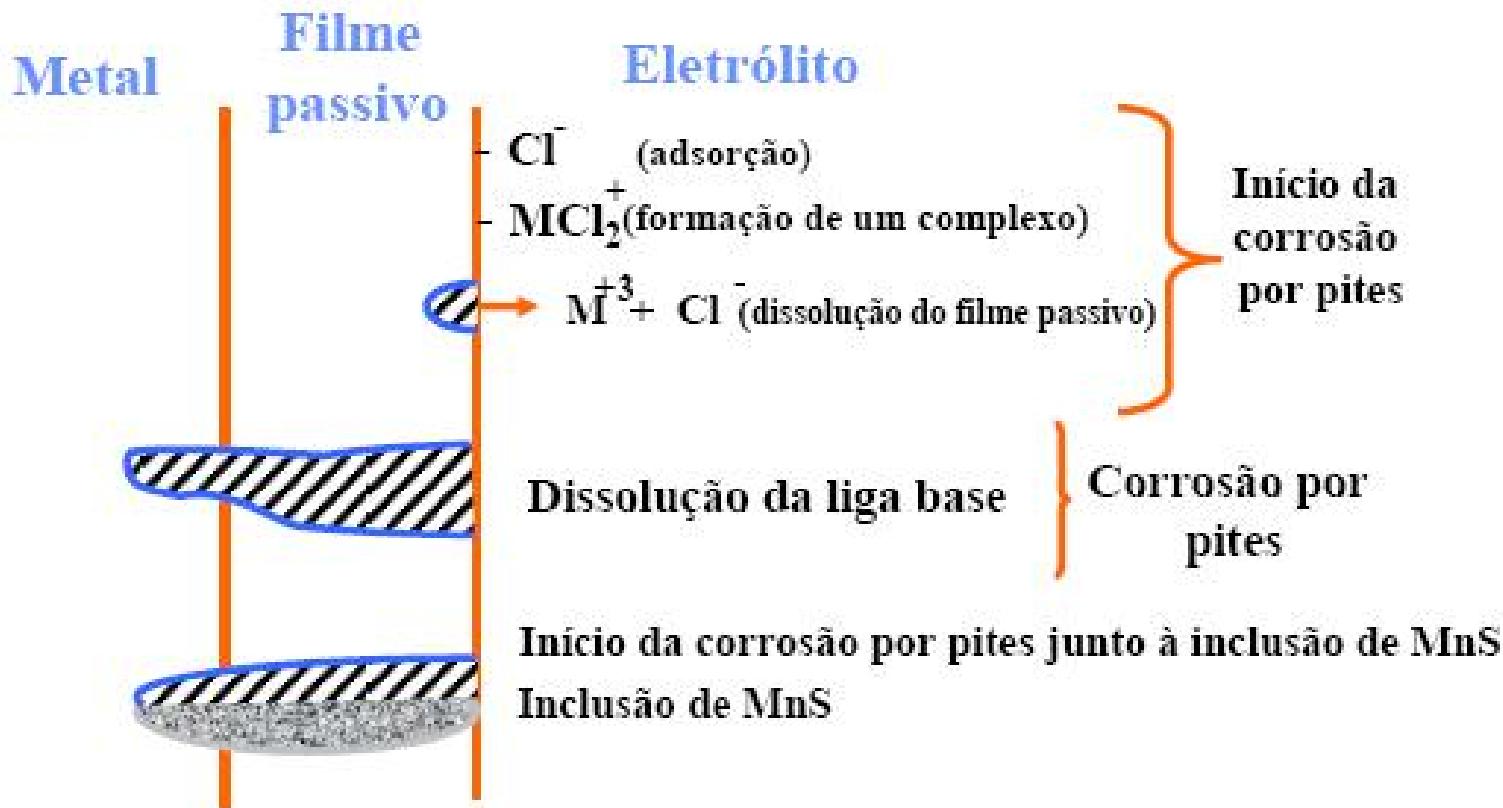
(Equação 1)

► **PREW = %Cr + 3,3(%Mo + 0,5% W) + 16% N**

(Equação 2)

Corrosão por Pites

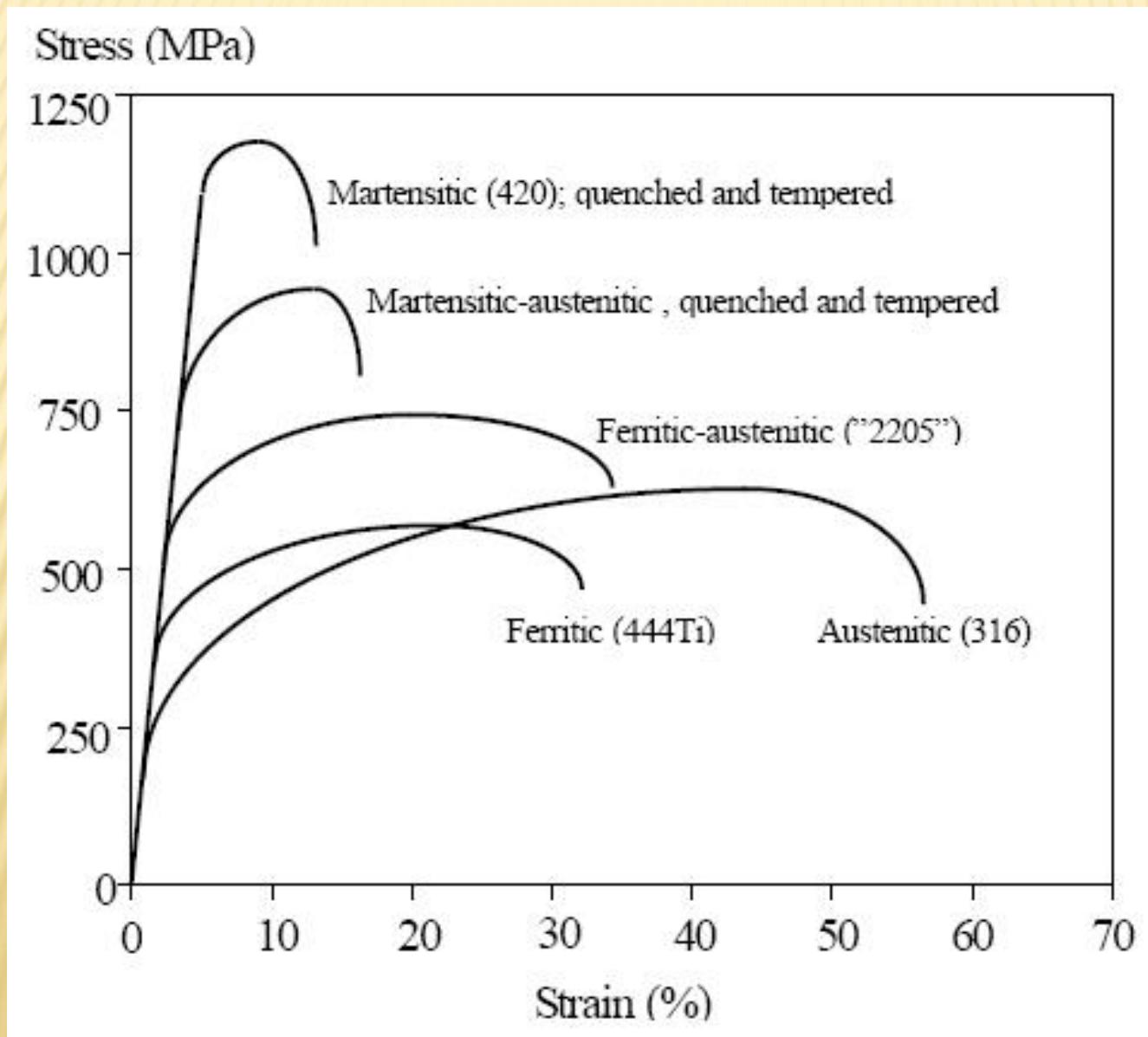
Mecanismo



Principais características dos aços inox duplex e superduplex

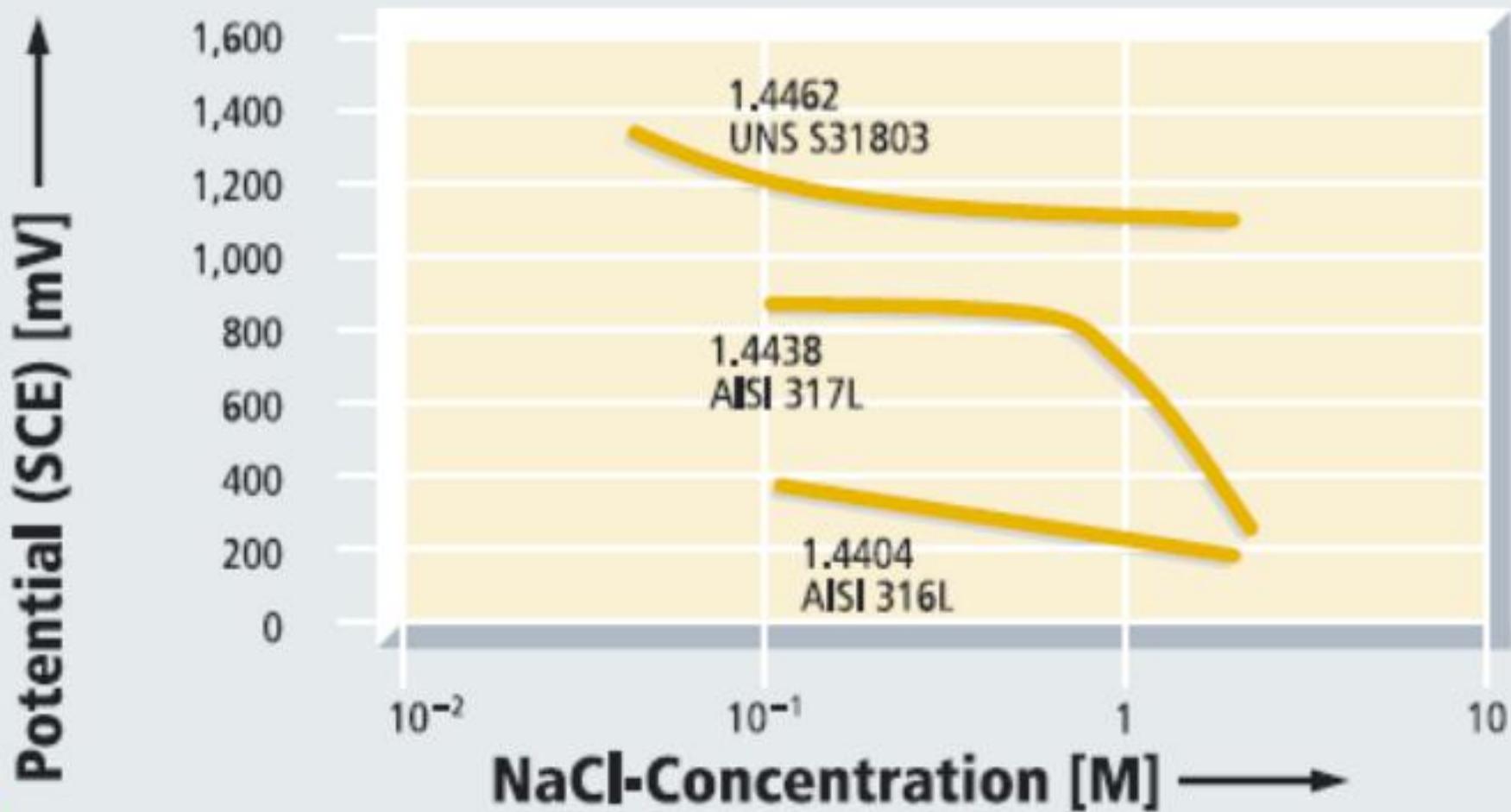
- Estrutura austeno-ferrítica de grãos finos
- Excelente resistência à corrosão, devido aos altos teores de Cr, Mo e N.
- Não são endurecíveis por tratamento térmico.
- Têm excelente conformabilidade plástica.
- Melhor resistência mecânica dos que os ferríticos e austeníticos.
- Excelente tenacidade no estado solubilizado.
- Susceptibilidade a fenômenos de fragilização com a temperatura.

Comparação Propriedades de tração com outros aços inoxidáveis

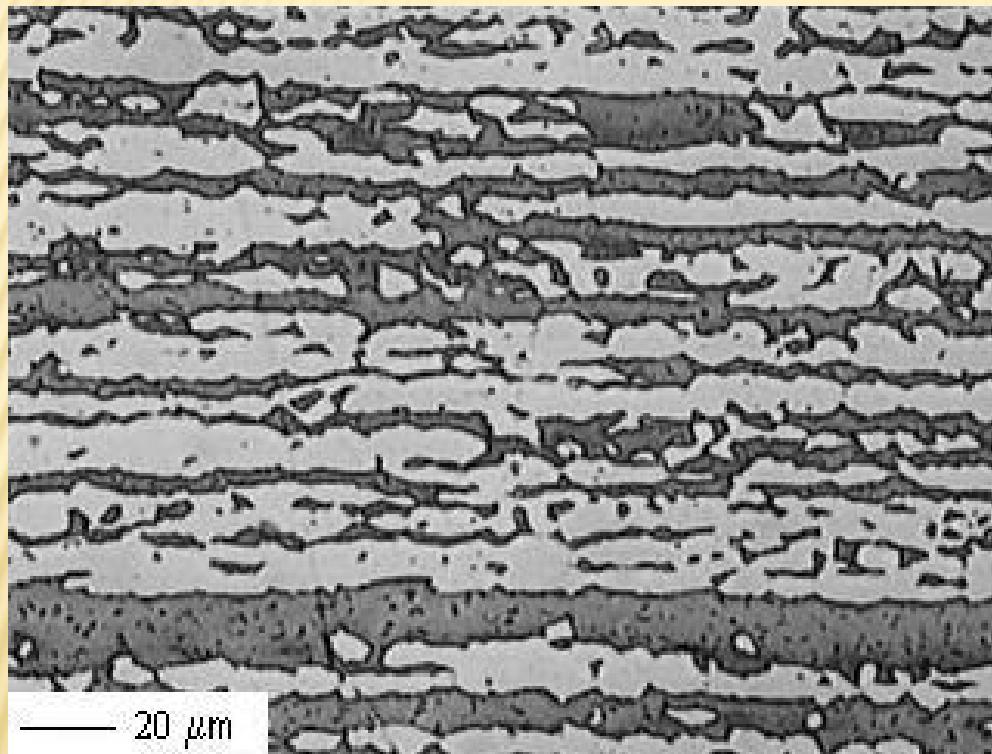


Comparação do duplex UNS S31803 com os aços inoxidáveis austeníticos AISI 316L e 317L

- Potencial de pites em soluções aquosas de NaCl



A microestrutura ideal para os aços duplex e superduplex deve ser constituída de frações volumétricas aproximadamente iguais das fases ferrita e austenita e ausência de outras fases deletérias.



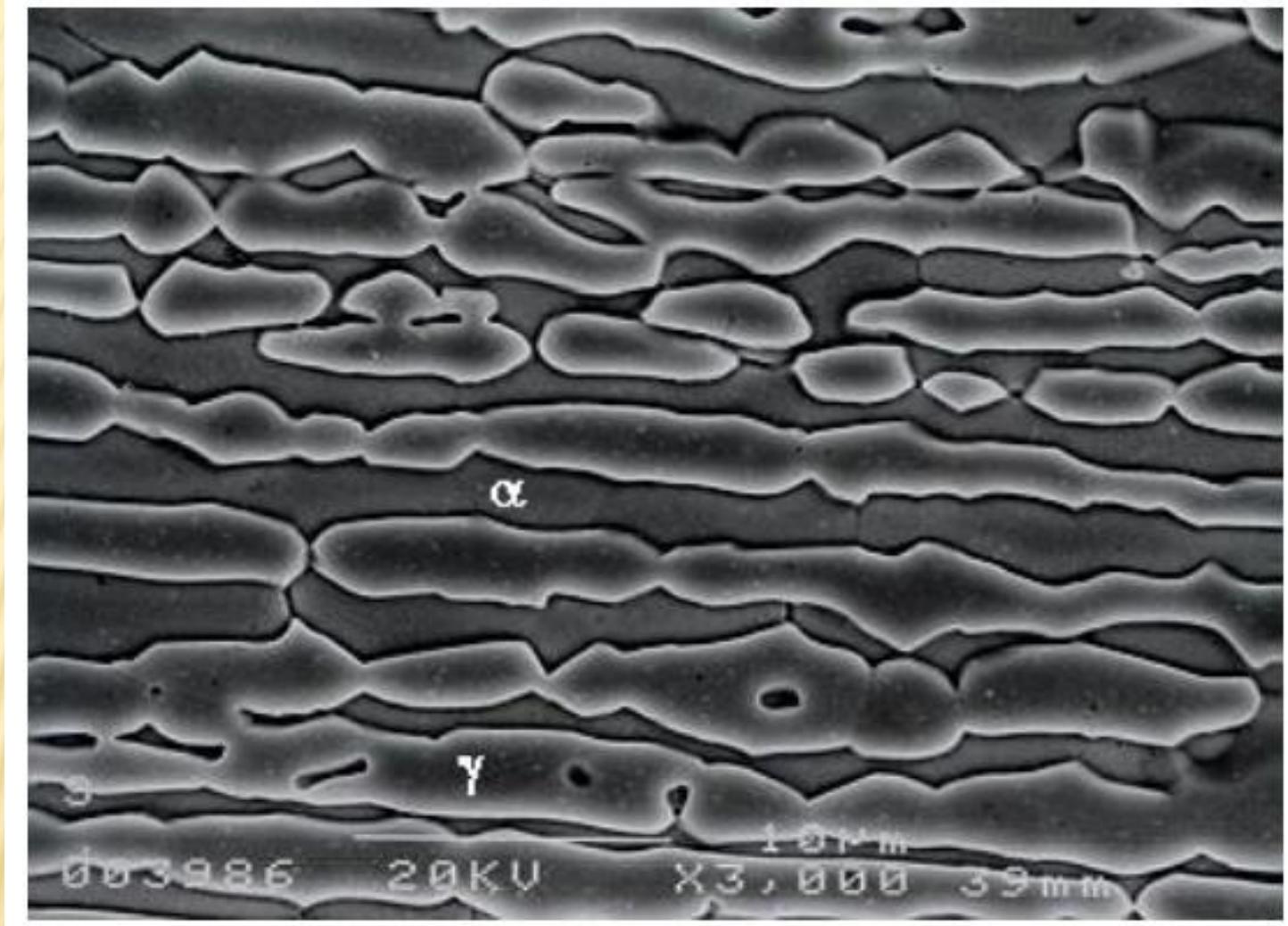
METALOGRAFIA

Ataque de Murakami

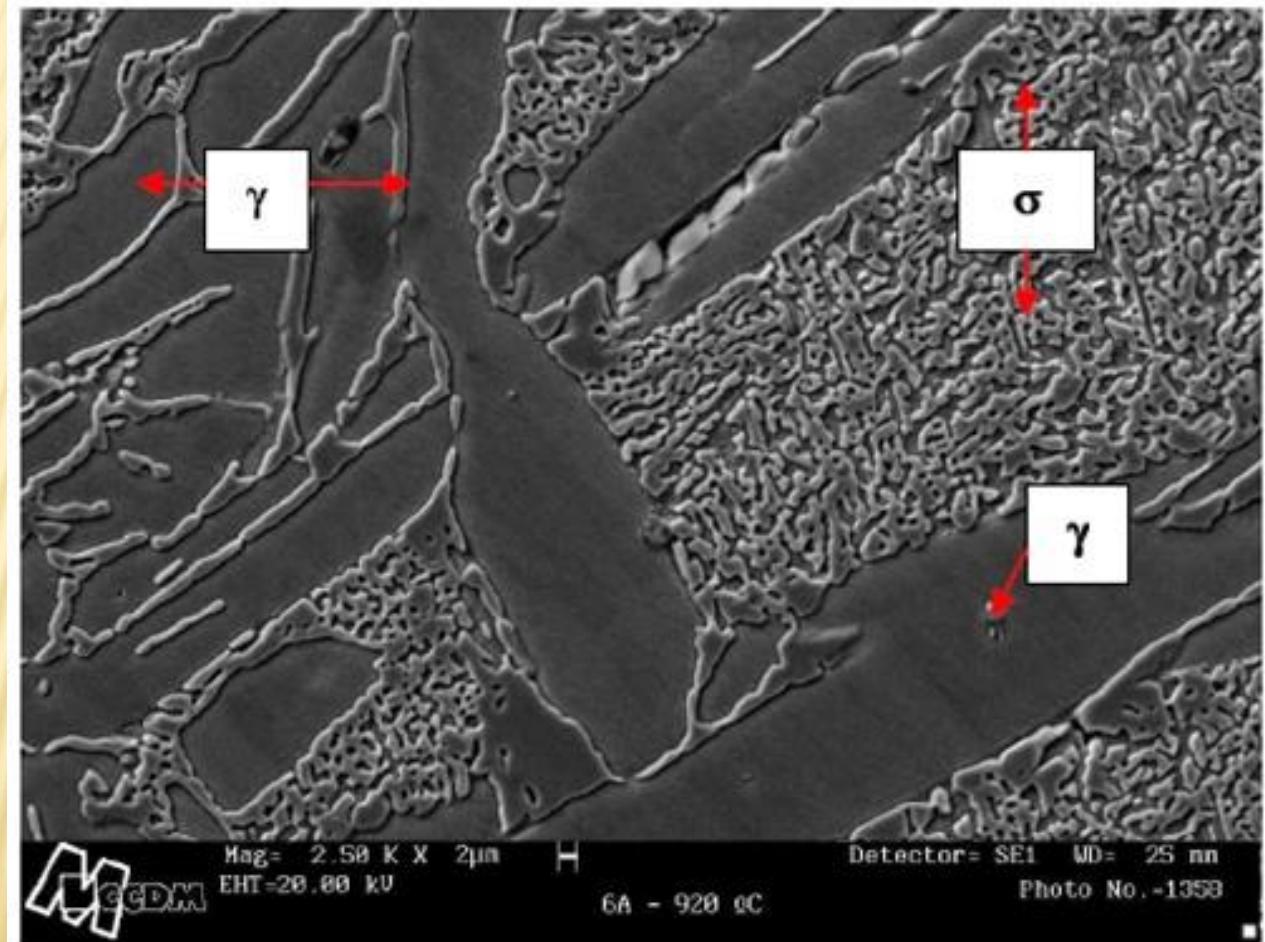
- Ataque de Behara
- Ataque eletrolítico com NaOH
- Ataque eletrolítico com ácido oxálico

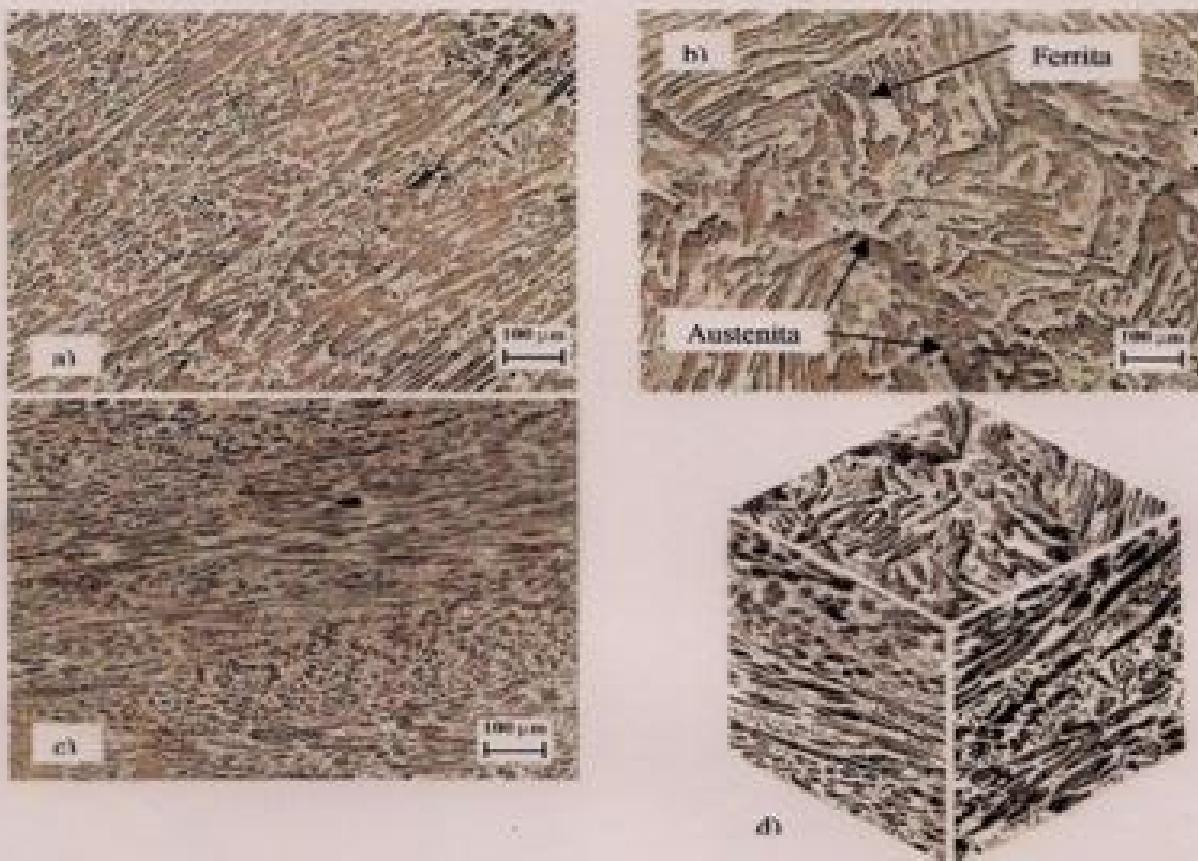
A manutenção deste balanço microestrutural é objetivada nas operações de soldagem dos aços duplex e superduplex.

Microestrutura Aço SuperDuplex



Micrografia MEV de aço inoxidável SuperDuplex envelhecido a 920°C





100x.

Microestrutura das três direções da chapa de aço inoxidável duplex UNS S31803. (a) e (c) Secção longitudinal. (b) Secção transversal. (d) Perspectiva mostrando as três direções da chapa. Ataque: Beraha.

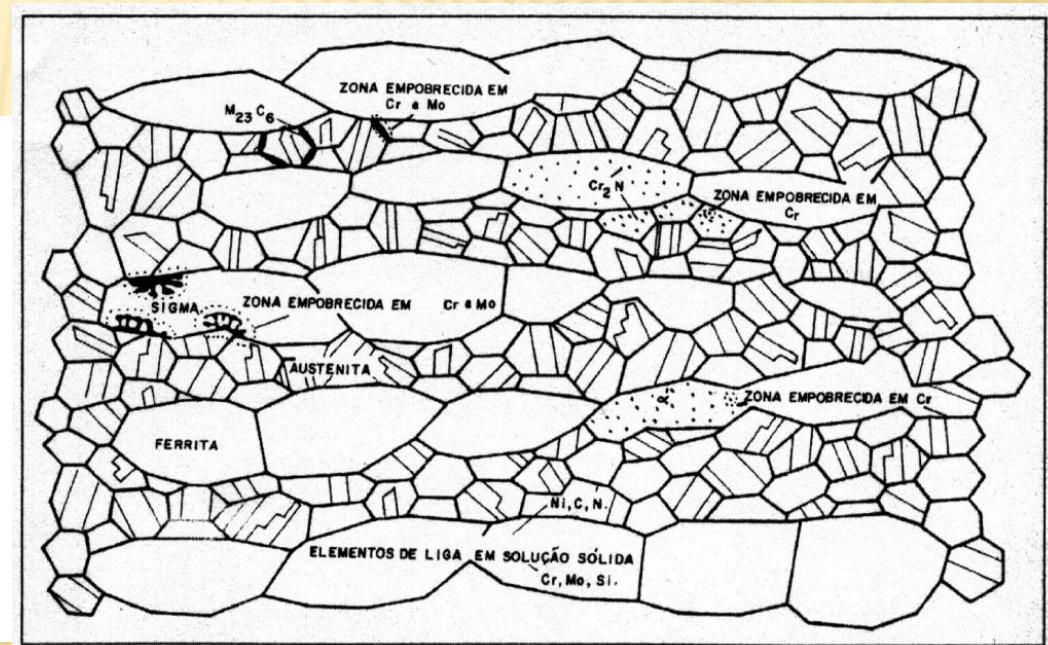
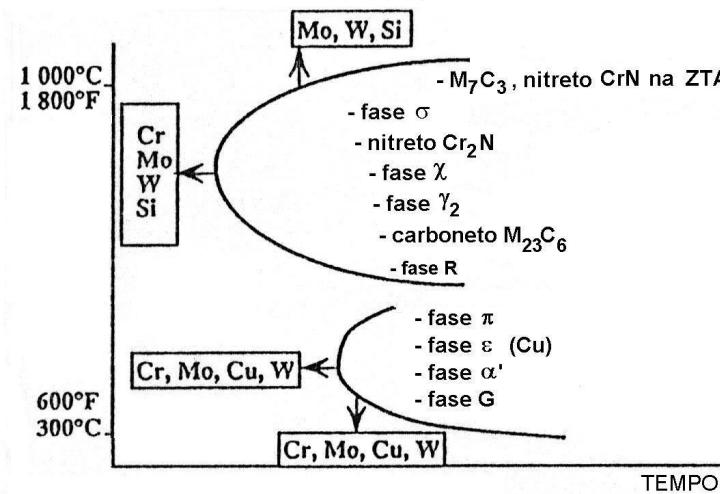
Tabela 1- Composição química típica do metal de base.

Elementos	C	Mn	P	S	Si	Cr	Ni	Cu	Mo	N
Teores (%)	0,017	1,56	0,022	0,001	0,39	22,27	5,54	0,35	0,35	0,17

Solubilizado a uma temperatura mínima de 1050 °C e resfriada em água

Fenômenos de Fragilização dos aços Duplex e SuperDuplex

- 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
- (Precipitação de austenita secundária)
- Outras fases



Comparação a resistência à corrosão por pites

	C	N	Cr	Ni	Mo	PREN
304L	0,02	0,04	18	8,0	---	19
316L	0,02	0,03	17	10, 0	2,0	24
317L	0,02	0,05	18	11	3,0	29
430	0,05	0,05	16	---	---	17
444	0,01	0,01	18	---	1,8	24
2205	0,02	0,17	22	5,3	3,0	35
2304	0,02	0,12	23	3,7	0,3	26
2202	0,02	0,21	22	2,5	0,3	26

PREN (Pitting Resistance Equivalent Number) = Cr+3,3Mo+16N

Propriedades Mecânicas

	Austeníticos	Ferríticos	Duplex				
	304	316	430	444	2205	2304	2202
LE0,2% (MPa)	280	280	360	350	510	450	480
LR (MPa)	580	570	520	500	750	670	700
Along. (%)	55	55	28	25	35	40	38

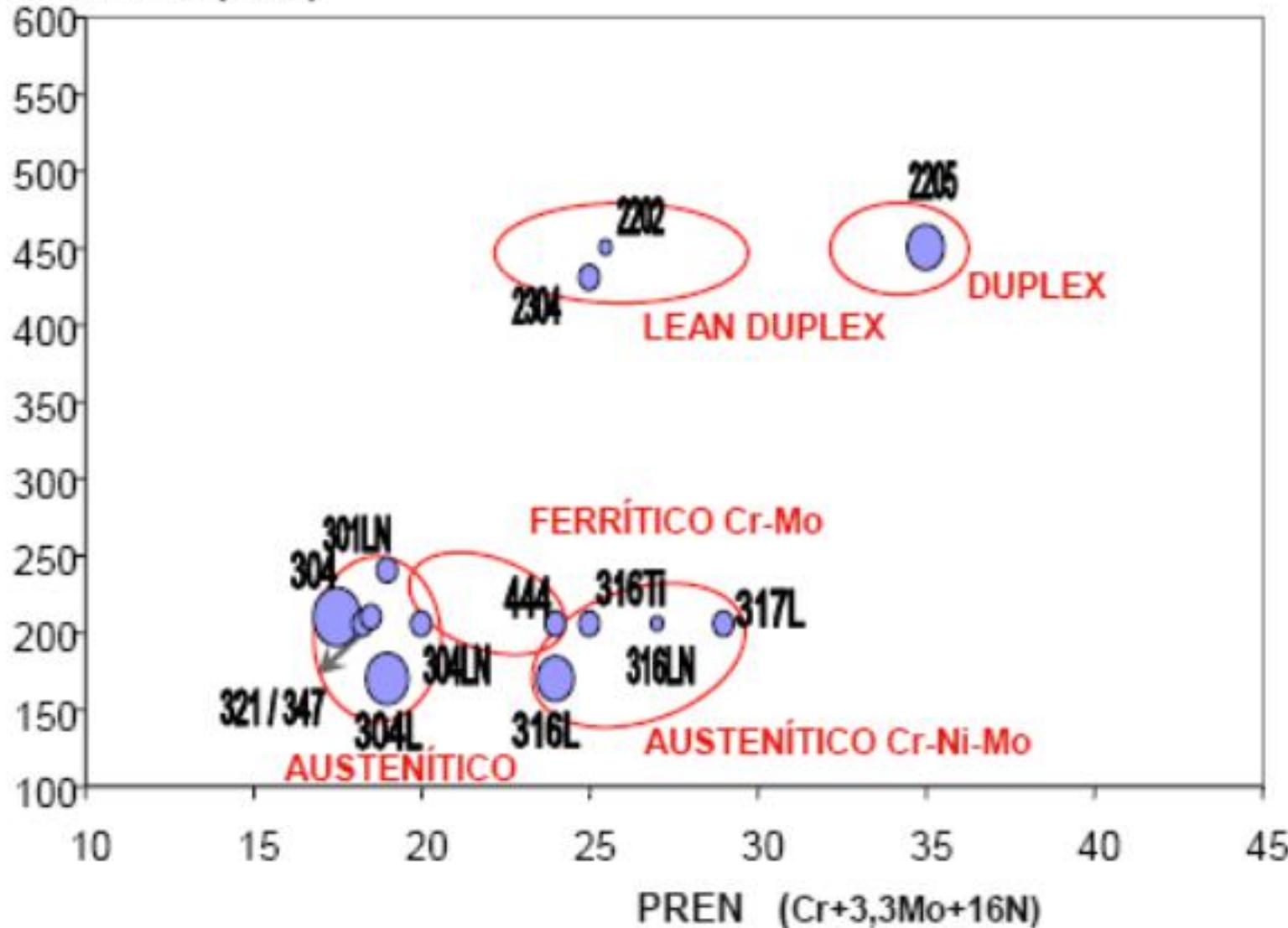
$$LF \cong 0,45LR.$$

P399B Charpy V: EA 110J à -40°C (ASTM A923 Método B: 54J)

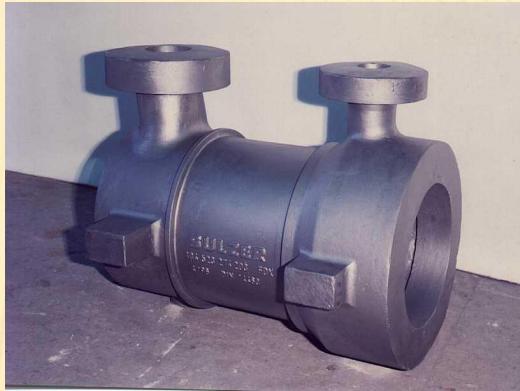
Temperatura aplicação (ASME seção VIII divisão 1): 300°C.

Resistência Corrosão X Propriedades Mecânicas

LE Mínimo (MPa)



APLICAÇÕES



APLICAÇÕES



Customer: PETROBRÁS

Pump Type: GSG 150-360 1+5

Fluid: Sea Water

Flow: 445 m³/h (1958 USGPM)

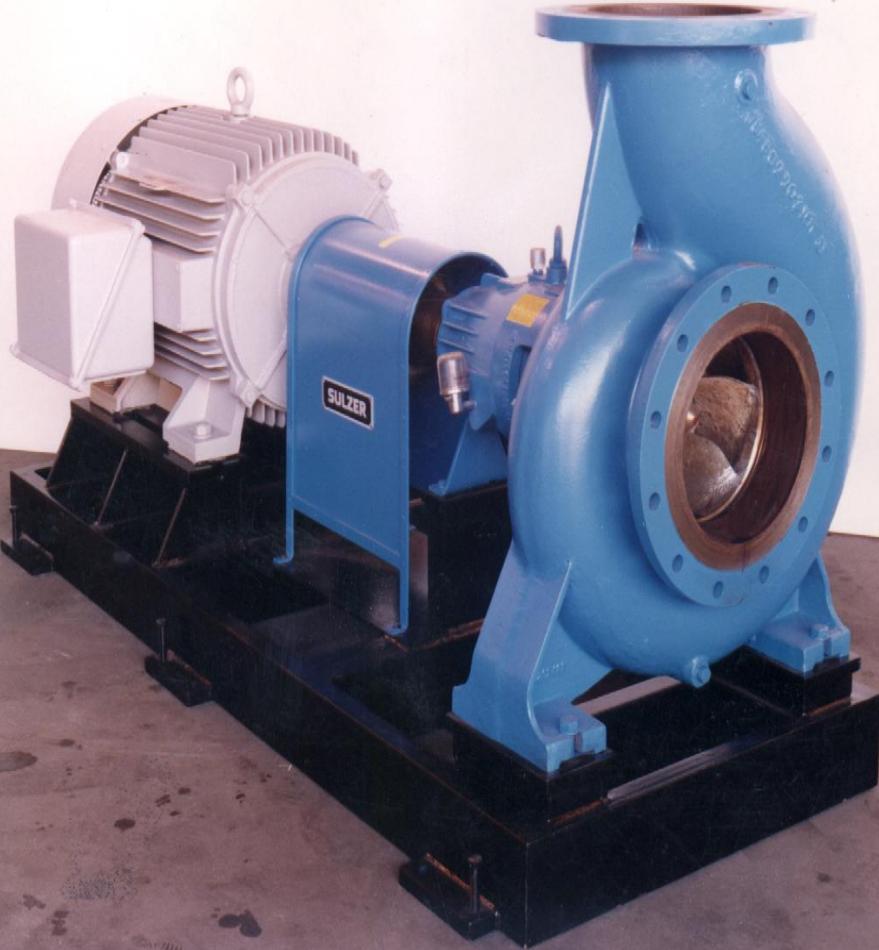
Power: 3287 HP

Total Weight: 160 tons

Dimensions (total):

- Length: 16 m (52,5 ft)
- Width: 7 m (23 ft)
- Height: 4,2 m (14 ft)

APLICAÇÕES



Customer:
RIPASA/SP - Papel Celulose

Pump Type:
NCH-300-350

Application:
residual water extraction

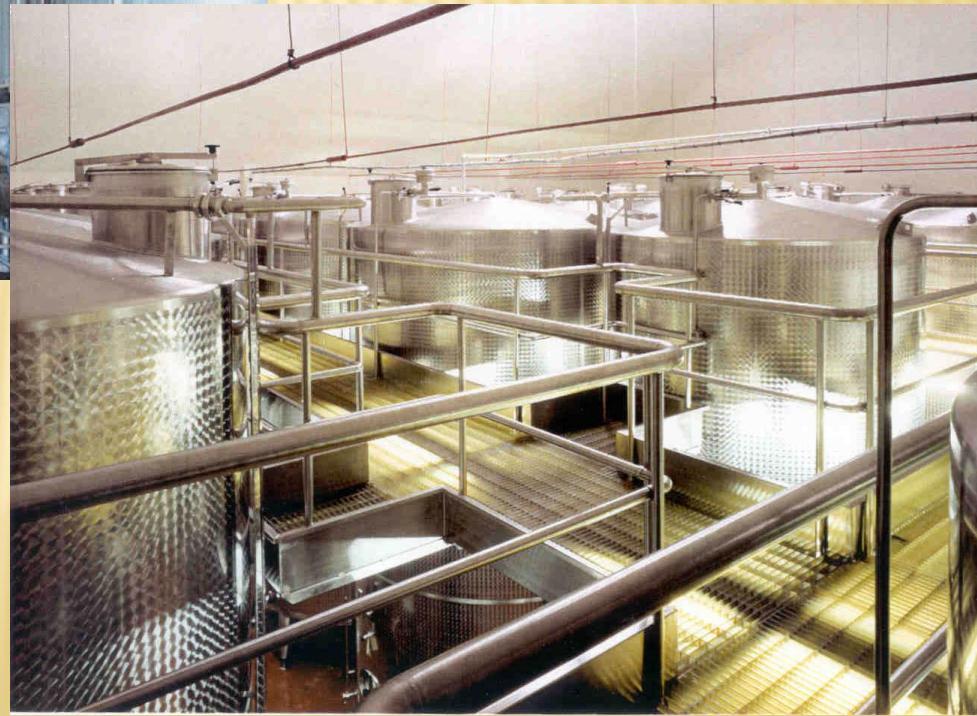
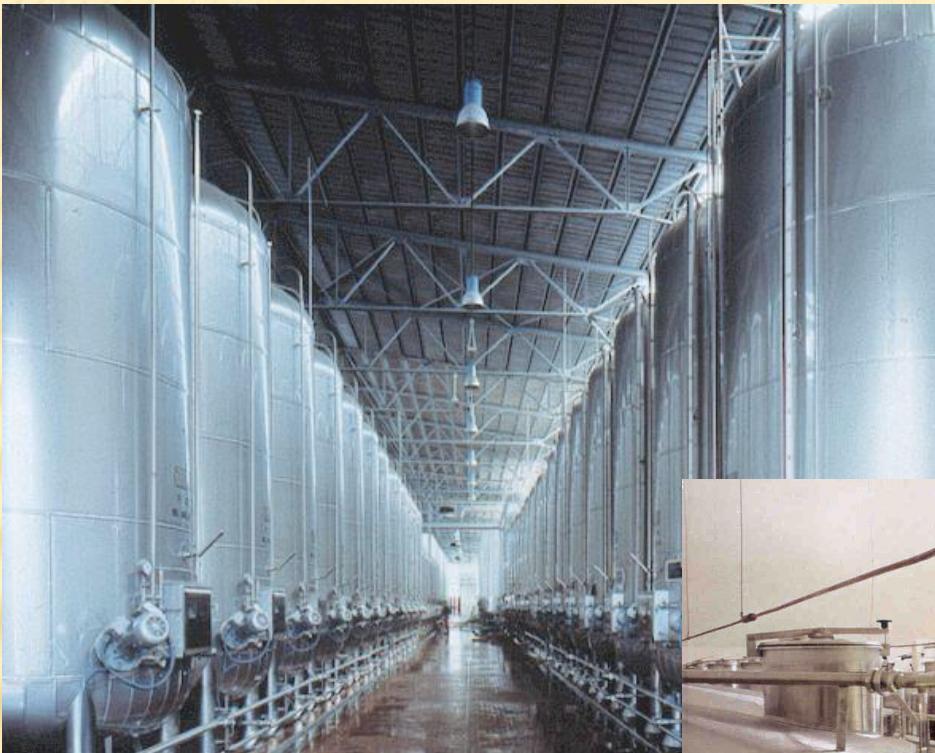
Flow: 1200 m³/h

Head: 24 m

Power: 150 HP



INDÚSTRIA DO VINHO



AÇOS INOXIDÁVEIS



Celulose e papel



Indústria petroquímica



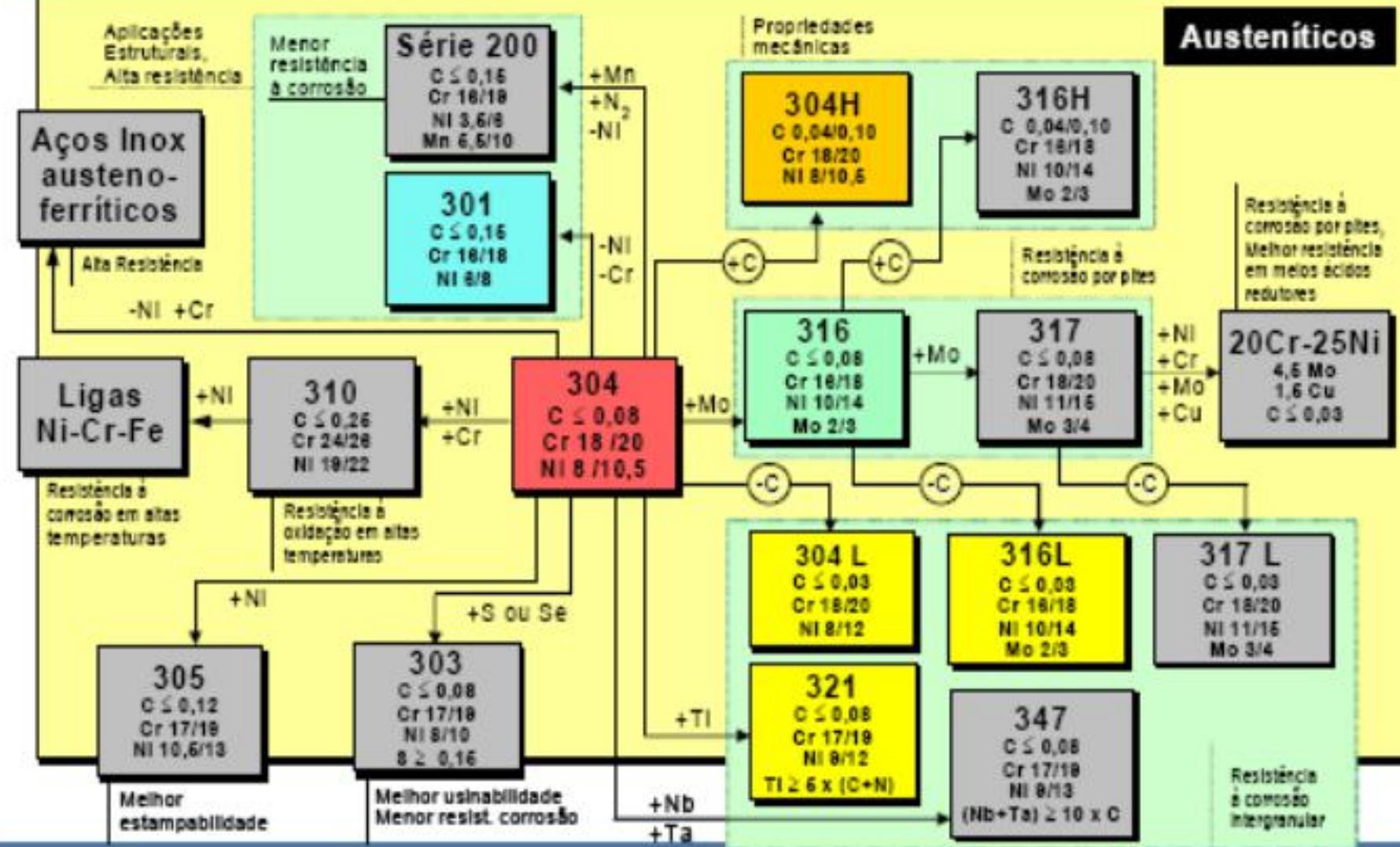
Indústria de alimentos



Trocadores de calor

Aços Inoxidáveis Austeníticos da Série 300

AÇOS INOX DA SÉRIE 300



ACEROS INOXIDABLES ENDURECIDOS POR PRECIPITAÇÃO

Alguns aços austeníticos foram desenvolvidos para serem endurecíveis por precipitação. Eles contém elementos tais como Ti, Al e V, que se precipitam na forma de finas partículas de compostos intermetálicos.

Estes aços são endurecíveis por tratamento térmico, o qual deve consistir de uma solubilização, seguido de envelhecimento na faixa de 600°C a 850°C. Um exemplo é o aço A-286.

A tabela a seguir apresenta a composição química e as propriedades mecânicas deste aço obtidas após solubilização a 980°C e envelhecimento a 750°C. O endurecimento neste aço é provocado pela precipitação do intermetálico γ' , de estequiometria $\text{Ni}_3(\text{Al},\text{Ti})$.

Composição Química							Propriedades em tração		
%C	%Cr	%Ni	%M o	%Al	%Ti	%V	σ_{LE} (MPa)	σ_{LR} (MPa)	Alongam. (%)
0,05	15,0	26,0	1,2	0,15	2,0	0,30	≈ 700	≈ 1000	≈ 25

OUTROS AÇOS INOXIDAVEIS ENDURECIDOS POR PRECIPITAÇÃO

AISI	C	Mn	Si	Cr	Ni	Mo	Outros
W Inoxidável	0,07	0,5	0,5	16,75	6,75	-	0,8 Ti 0,2Al
17-4 PH	0,04	0,4	0,5	15,50	4,25	-	0,25 Nb 3,6 Cu
17-7 PH	0,07	0,7	0,4	17	7	-	1,15 Al
PH 15-7 Mo	0,07	0,7	0,4	15	7	2,25	1,15 Al
AM 350	0,1	0,75	0,35	16,5	4,25	2,25	0,1 N

Aços martensíticos de transformação controlada



Aço	%C	%Mn	%Si	%Cr	%Ni	%Mo	%Al	%Cu
15-7 PH	0,07	0,5	0,2	17,0	7,0	2,5	1,2	-
17-7 PH	0,07	0,50	0,30	17,0	7,1	-	1,1	-
PH 15-7Mo	0,07	0,50	0,30	15,2	7,1	2,2	1,2	-
PH 14-8Mo	0,04	0,02	0,02	15,1	8,2	2,2	1,2	-
AM-350 ^(a)	0,10	0,75	0,35	16,5	4,25	2,75	-	-
AM-355 ^(a)	0,13	0,85	0,35	15,5	4,25	2,75	-	-

.....Aços martensíticos de transformação controlada

Alguns elementos podem ser adicionados para provocar reações de precipitação nos inoxidáveis martensíticos. Esta precipitação deve ocorrer num tratamento de envelhecimento (ou revenido).

Assim, podem ser citadas as adições de Cu (3 a 4%), Al ou Ti. Note-se que o teor de níquel desses aços é mais elevado e que o carbono é baixo, o que deve lhes garantir boa resistência a corrosão.



Aço	%C	%Mn	%Si	%Cr	%Ni	%Mo	%Al	%Cu	%Ti	%Nb
17-4PH*	0,04	0,30	0,60	17,0	4,2	-	-	3,4	-	0,25
15-5PH*	0,04	0,30	0,40	15,0	4,2	-	-	3,4	-	0,25
Custom 450**	0,03	0,25	0,25	15,0	6,0	0,8	-	1,5	-	0,3
Stainless W***	0,06	0,50	0,50	16,75	6,25	-	0,2	-	0,8	-

ALGUMAS VANTAGENS DA UTILIZAÇÃO DOS AÇOS INOXIDÁVEIS

- Possibilidade de redução de espessura por não ter a necessidade de compensar perdas por corrosão.
- **Maior vida útil, mesmo partindo-se de menores espessuras.**
- Baixa rugosidade, o que reduz a aderência de incrustações e facilita as operações de limpeza.
- **Relativo menores custos de manutenção.**
- Maior coeficiente de troca térmica, facilita as transformações térmicas, químicas e metalúrgicas.

TABELA 3 – TEMPERATURAS LIMITES

Materiais	Temperatura Máxima de Operação - °C	
	Partes Pressurizadas	Partes não Pressurizadas
Aço Carbono qualidade estrutural	150	530
Aço Carbono não acalmados [materiais qualificados]	400	530
Aços Carbono acalmados ao Silício	450	530
Aços Liga ½ Mo	500	530
Aços Liga 1 1/4Cr – 1/2Mo	530	550
Aços Liga 2 1/4Cr – 1Mo	530	570
Aços Liga 5Cr – 1/2Mo	480	600
Aços Inoxidáveis 405, 410, 410S (3)	480	700
Aços Inoxidáveis 304, 316 (1,2)	600	800
Aços Inoxidáveis 304L, 316L	400	800
Aços Inoxidáveis 310 (2)	600	1100

Notas:

- para temperaturas de projeto superiores a 550°, recomenda-se o uso de aços inoxidáveis tipo H.
- Chama-se a atenção para a possibilidade de formação da fase σ para temperaturas acima de 600 °C, resultando em severa fragilização para o material. Essa mudança na estrutura metalúrgica ocorre principalmente para os aços 316 e 310.
- Esses materiais são suscetíveis de sofrer fragilização em torno de 475 °C por períodos longos.

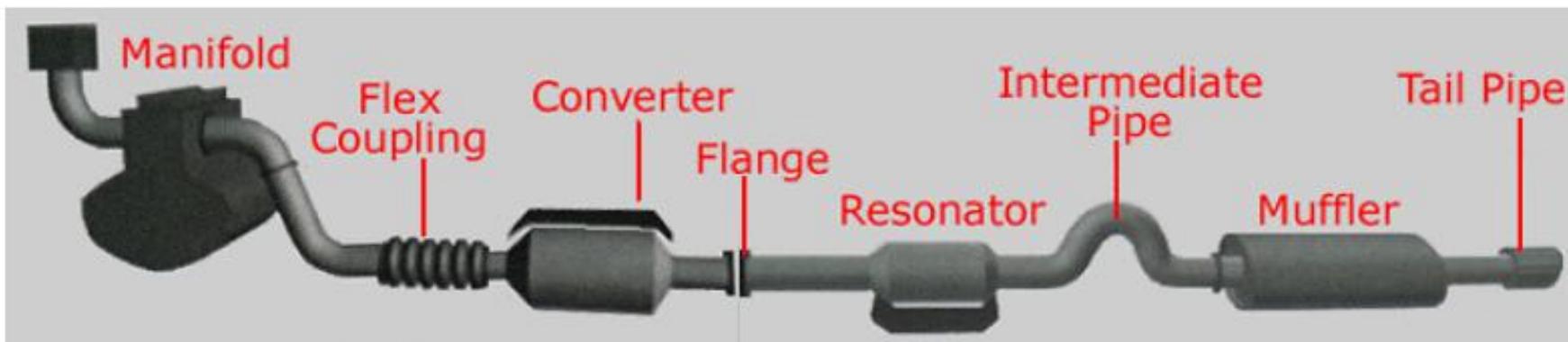
Tipos de aços inoxidáveis utilizados nos escapamentos de automóveis

>900 °C

750-900 °C

500-700 °C

400 °C



409
444
441
429
310S
321
1.4828

304
321

409
436
439
441

436
430 Ti Nb
409
434

409
434
436
439
304

Materiales para los
Sistemas de Escape
en Automoción

Propiedades e influencia de
los elementos de aleación

M.ª Concepción Merino Casals
Departamento de Ciencia de
Materiales e Ingeniería Metalúrgica,
Facultad de Ciencias Químicas,
Universidad Complutense de Madrid,
España

José Luis Sastre de Miguel
ESAB Ibérico, Galileo Galilei 21
Polígono Industrial La Garena,
28806 Alcalá de Henares (Madrid),
España



Informação Núcleo Inox



Bibliografia

O texto de “**Metalurgia e Soldabilidade de Aços Inoxidáveis**” abrange os aspectos mais importantes da metalurgia e soldagem dos aços inoxidáveis e tem como objetivo proporcionar informação para avaliar a soldabilidade e dos aços inoxidáveis.

O texto foi preparado utilizando diversas fontes da literatura, destacando-se os seguintes textos:

- Modenesi P., et. al. Curso de Metalurgia da Soldagem. UFMG. 1992.
- Bussinger E.R. Soldagem dos Aços Inoxidáveis. Edição Petrobras.
- Solari M.J.^a Metalurgia del Metal de Soldadura. CONEA – 1981
- Folkhard E. Welding Metallurgy os Stainless Steels. N.Y.
- Timerman Rúl, Palma J. Ciencia y Técnica de la Soldadura. Tomo I. Ed. Conarco 1983.
- Telles Emerson. Monografia: Aços Inoxidáveis. Curso de Especialização em Materiais Metálicos – UFPR, Novembro de 2002
- Daniela Bianchi Ponce Leon de Lima. Avaliação da Soldabilidade do Aço Inoxidável SuperDuplex UNS S32750. 2006. Dissertação de Mestrado - PGMEC- UFPR
- Alexandro de Castro Lopez. Avaliação da soldabilidade dos aços inoxidáveis ferríticos extra baixo intersticiais EBI/P444. 2005. Dissertação de Mestrado em Engenharia Mecânica - UFPR

- Thiana Berthier da Cunha. Fragilização por Hidrogênio de uniões soldadas de aços inoxidáveis austeníticos, utilizados como barreira contra a corrosão no processo de refino do petróleo. 2003. Dissertação de Mestrado UFPR.
 - Fabiano Brasil da Silva Costa. Revestimento em tubos de aço inoxidável austenitico com alumínio depositado por aspersão térmica por arco elétrico e avaliação da resistência à corrosão sob tensão. 2003. Dissertação de Mestrado UFPR.
 - Ângela Maria de Oliveira. Fragilização por hidrogênio em uniões soldadas de aços inoxidáveis austeniticos revestidos com alumínio utilizadas no processo de refino do petróleo. 2006. Dissertação de Mestrado UFPR.
 - Sérgio Luiz Henke. Efeito da soldagem plasma pulsada na microestrutura e resistência à fadiga de um aço inoxidável supermartensítico. 2010. Tese (Doutorado em Engenharia Mecânica) - UFPR.
- Portanto, qualquer complemento para maiores esclarecimentos e aprofundamento dos conteúdos apresentados neste texto poderá ser encontrado na literatura indicada.***