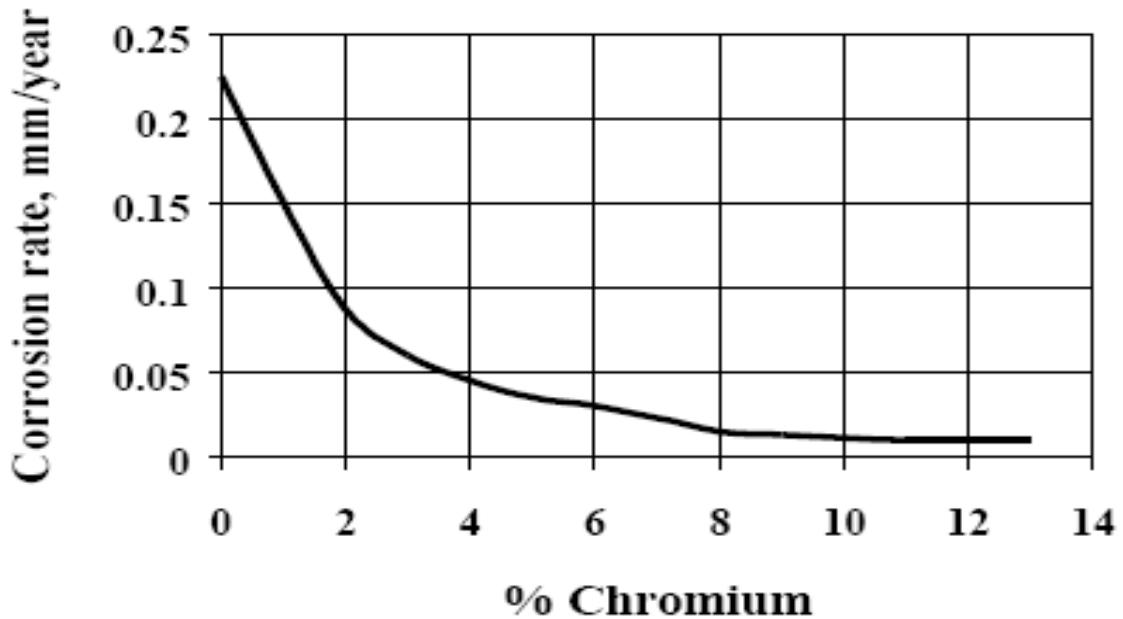


Aços Inoxidáveis

Aços de alta liga específicos para a resistência a corrosão

- Principal elemento de liga: **Cr** normalmente superior a 12%
 - Cr forma um fino filme de óxido de Cr aderente a superfície do aço que protege a superfície contra a corrosão

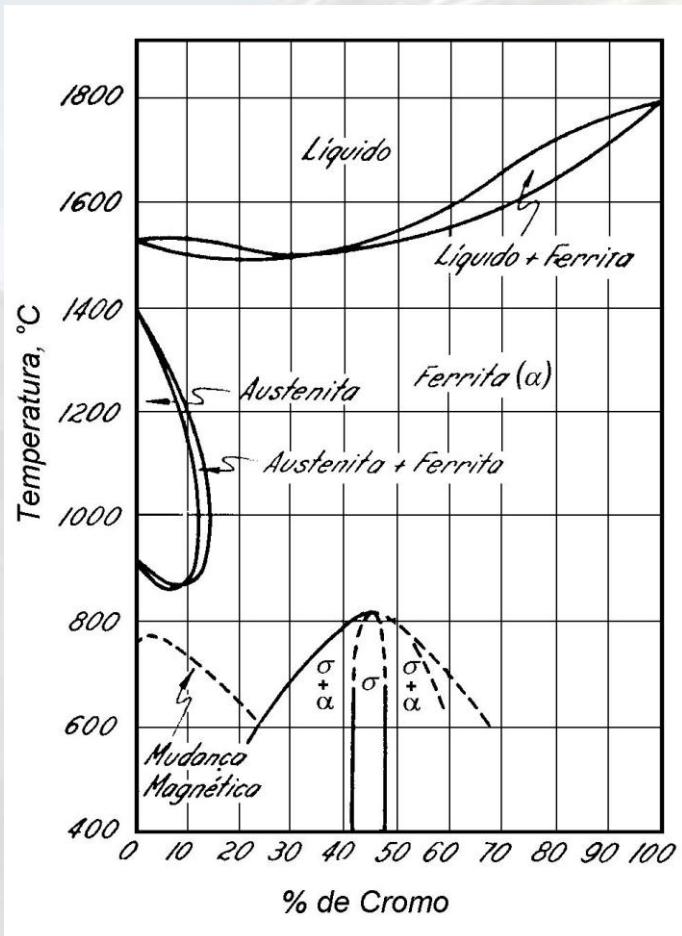


O cromo também aumenta a resistência à oxidação em altas temperaturas.

Aços inoxidáveis

- Ni é outro elemento de liga importante aumenta a resistência a corrosão em certos aços inoxidáveis
- **Carbono** é usado para aumentar a resistência mecânica e a dureza dos aços inoxidáveis;
alto teor de C reduz a resistência a corrosão favorecendo a formação de carbetas de cromo que reduz o Cr disponível

Diagrama Fe-Cr



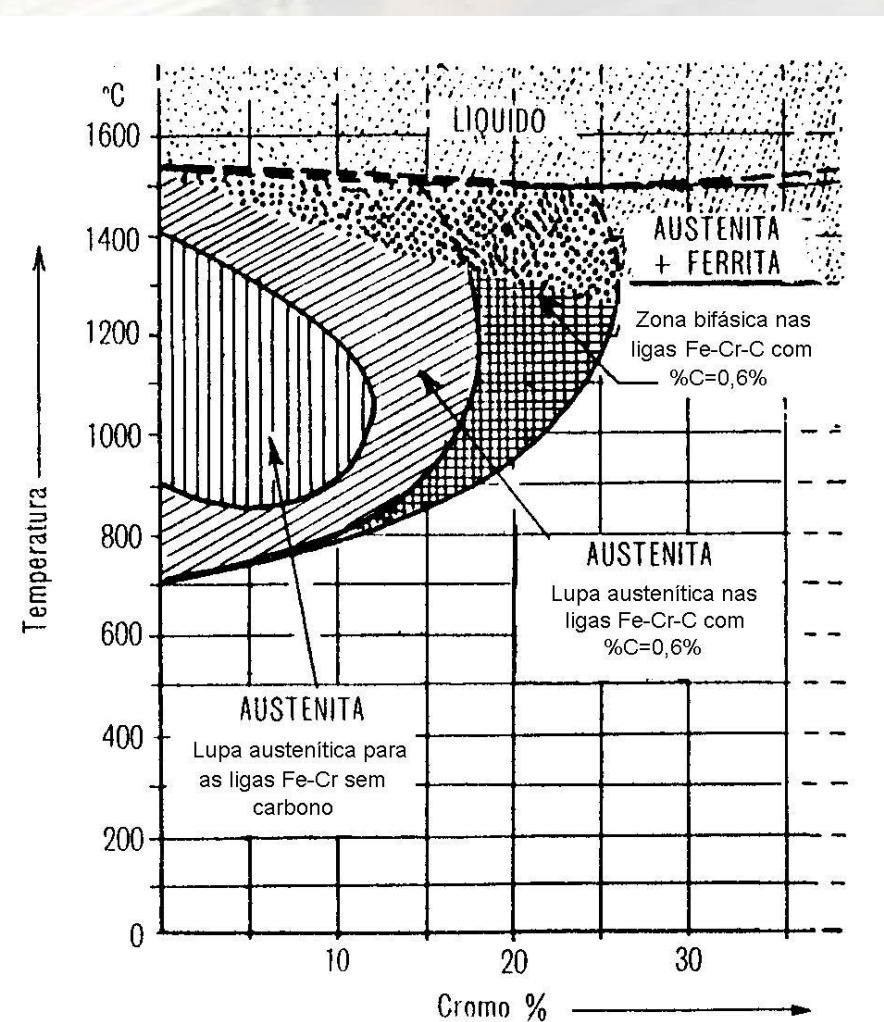
Fonte: [16]

DETALHES IMPORTANTES

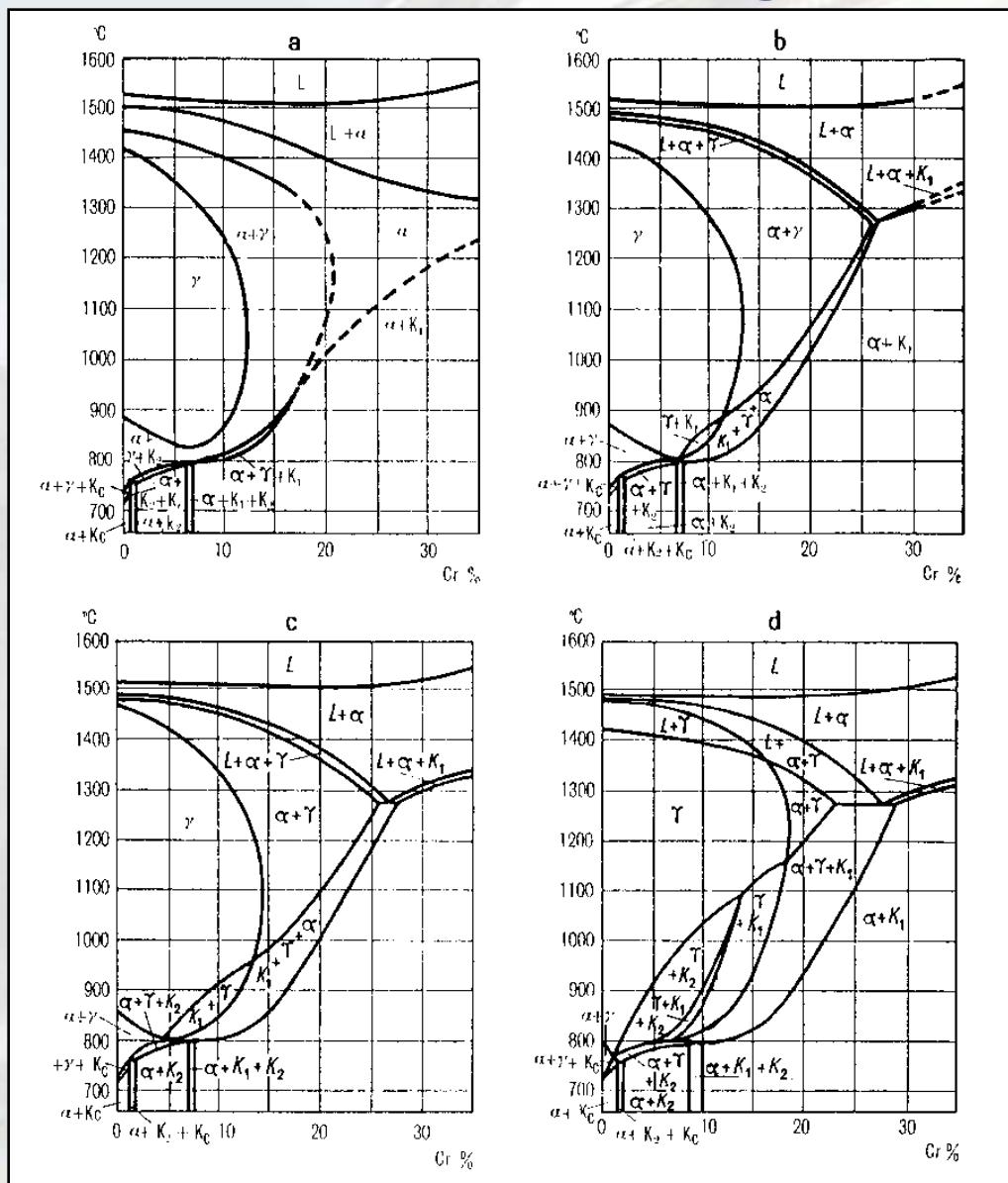
- Lupa austenítica
- Fase sigma

Influência do carbono no diagrama Fe-Cr

- Aumenta a lupa austenítica
- Cria campos de estabilidade para carbonetos



Influência do carbono no diagrama Fe-Cr



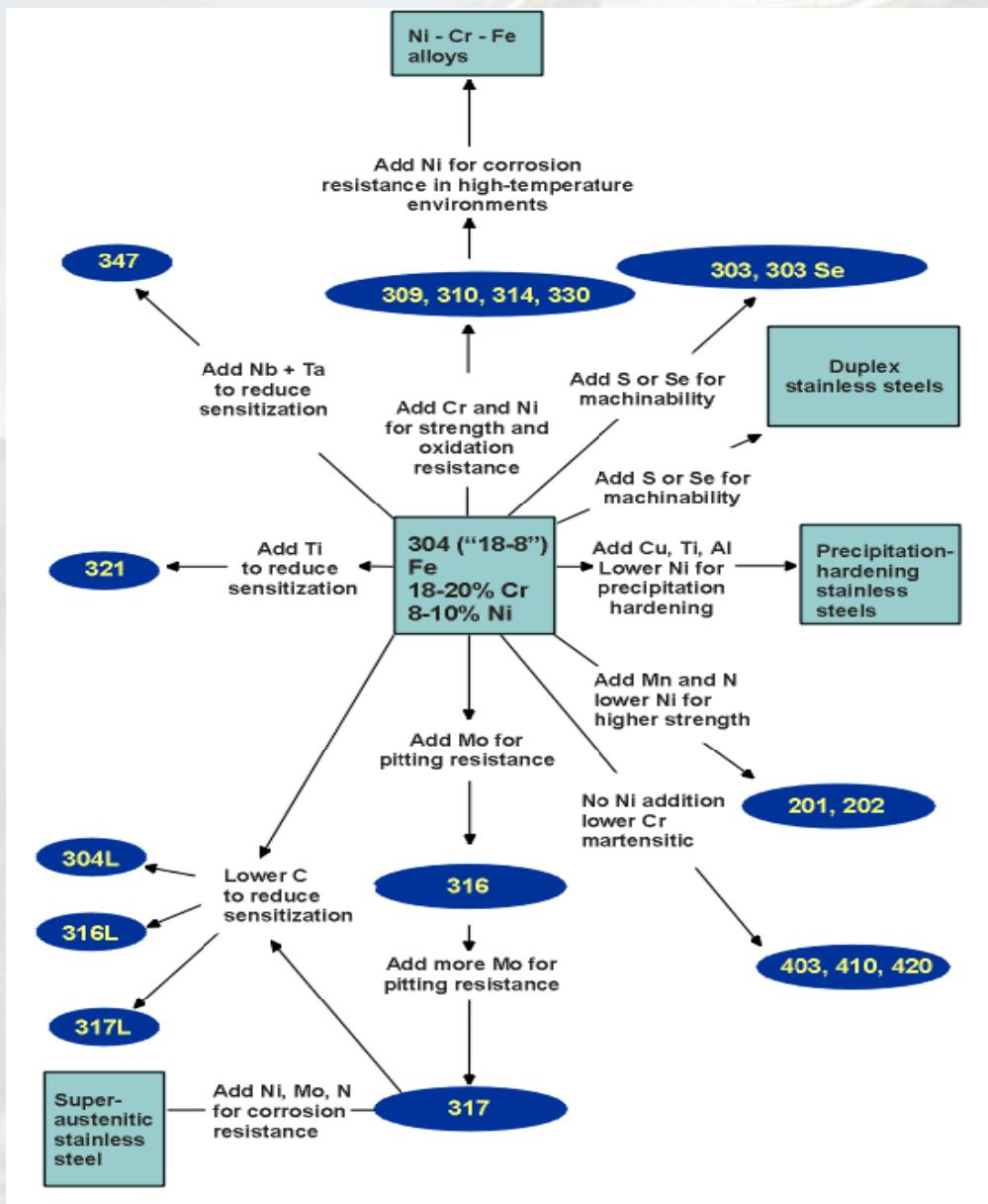
Tipos de aços inoxidáveis

- Classificação de acordo com a fase predominante a temperatura ambiente :
 1. **Austeniticos:** composição típica 18% Cr e 8% Ni
 2. **Ferriticos** - 15% to 20% Cr, baixo C, sem Ni
 3. **Martensiticos** - máximo 18% Cr sem Ni, teor de C maior que nos ferríticos

Outros aços inoxidáveis

- Outros aços de alta liga também foram classificados como inoxidáveis
4. ***Endurecidos por precipitação*** - 17% Cr e 7%Ni, pequenas adições de elementos de liga Al, Cu, Ti, e Mo
 5. ***Duplex*** - mistura de fase austenitica e ferritica em quantidades similares

The figure below provides a map of the compositional and property linkages to the family of stainless steel alloy.



Aços inoxidáveis

PROPRIEDADES FÍSICAS DOS AÇOS INOXIDÁVEIS

Comparação com aço ao C

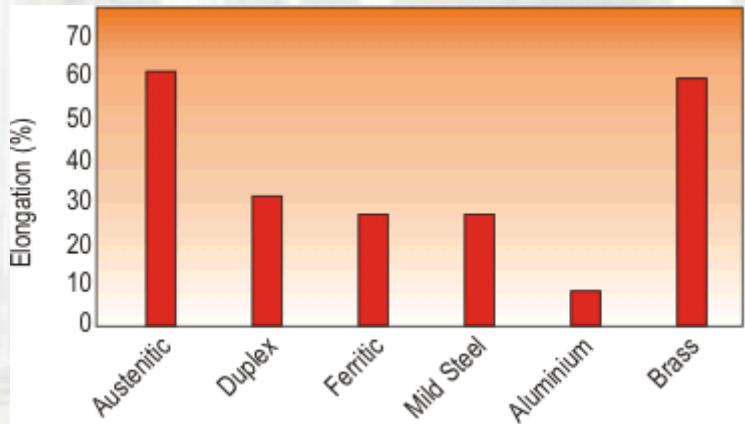
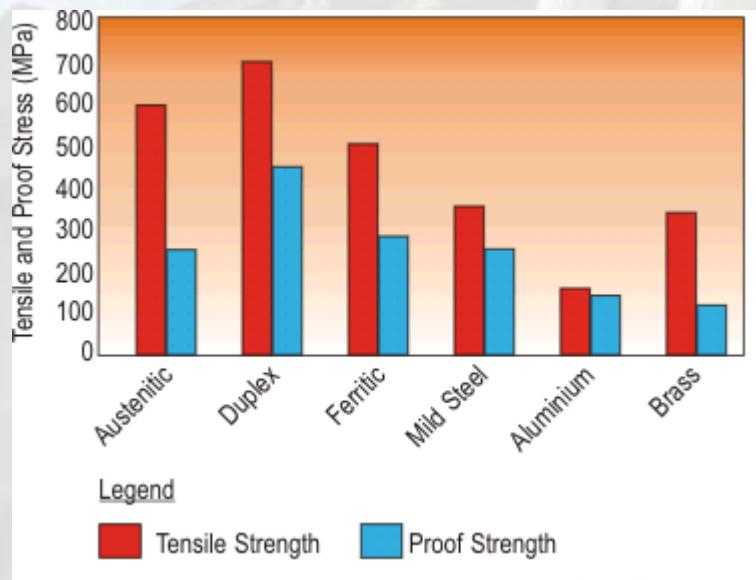
Propriedade	Austeníticos	Ferríticos	Martensíticos	Aço-C
densidade (g/cm ³)	7,8 - 8,0	7,8	7,8	7,8
E (GPa)	193 - 200	200	200	200
Coef. expansão térmica (10 ⁻⁶ m/m/°C)	17 - 19,2	11,2 – 12,1	11,6 – 12,1	11,7
Condutividade térmica (100°C) (W/m.K)	18,7 – 22,8	24,4 – 26,3	28,7	60
Cal. específico (0°C a 100°C)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

Propriedades dos aços inoxidáveis

- Além da resistência a corrosão os aços inoxidáveis apresentam um boa **combinação de resistência mecânica e ductilidade**
 - Apesar de atrativos para várias aplicações as suas propriedades resultam em dificuldades de processamento/fabricação
- São significativamente mais caros que os aços ao carbono e de baixa liga

Aços inoxidáveis - Propriedades

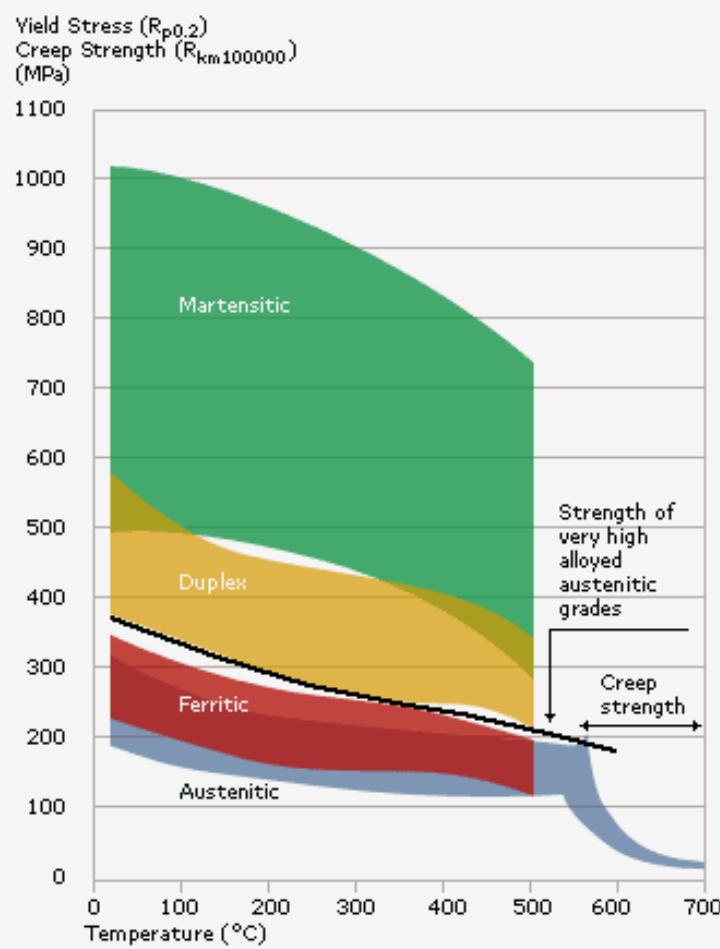
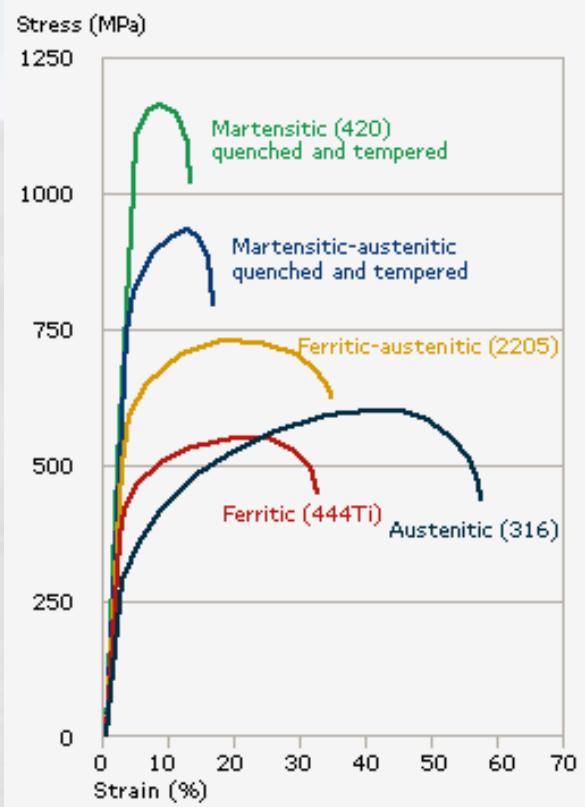
Typical Tensile Properties of Annealed Materials



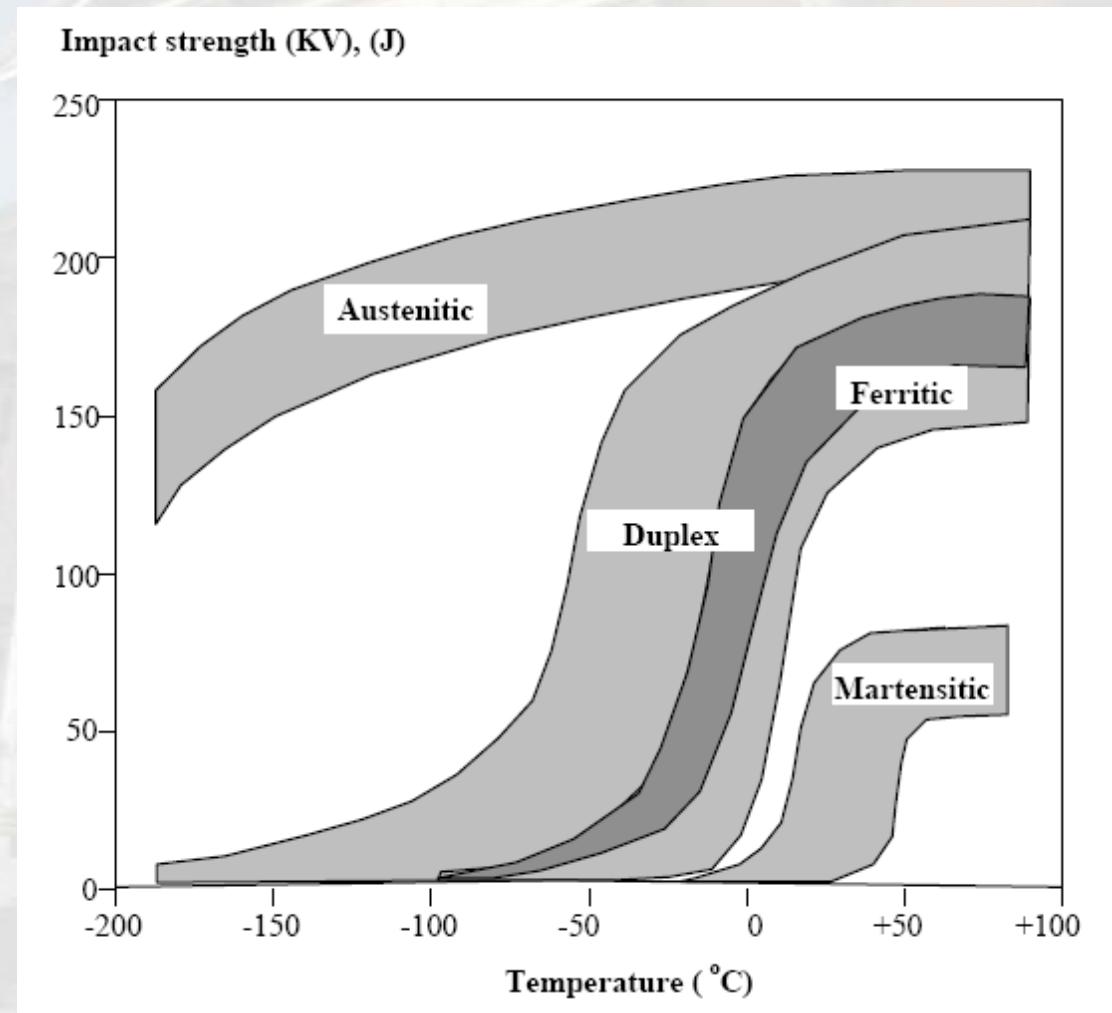
Typical elongations of annealed materials on fabrication.

Seleção de Materiais

Aços inoxidáveis - Propriedades

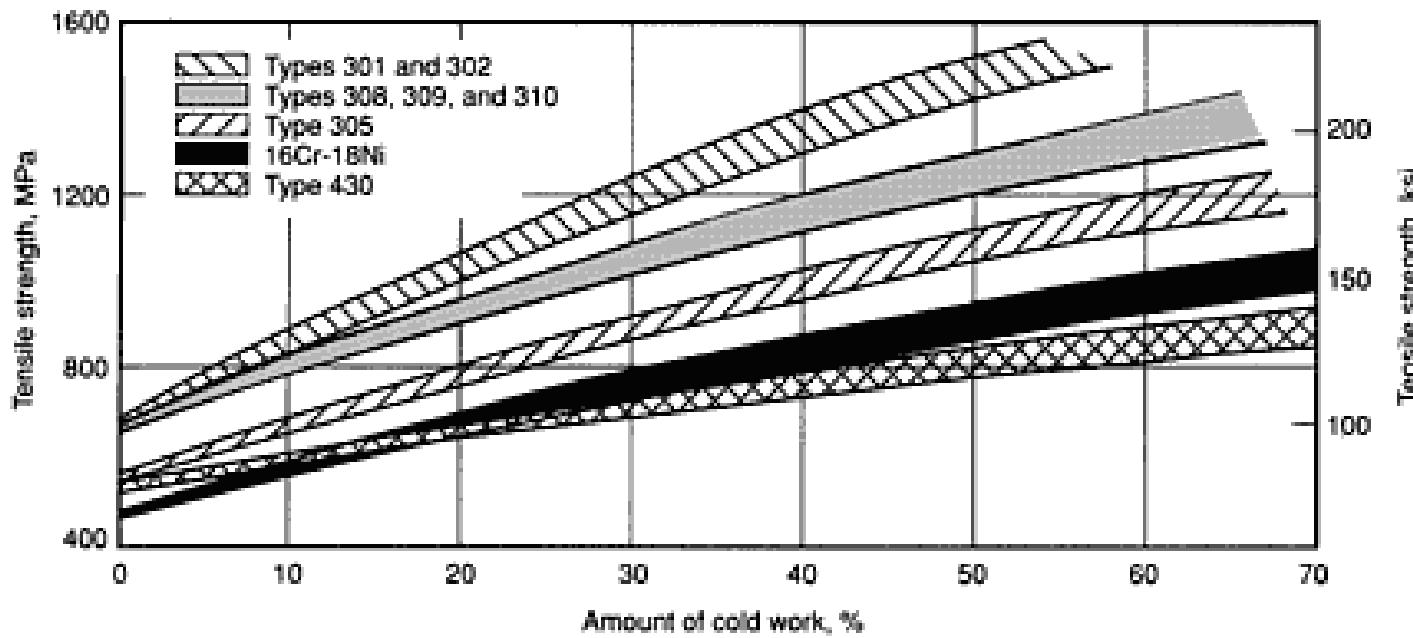


COMPARAÇÃO DAS CURVAS TENACIDADE X TEMPERATURA



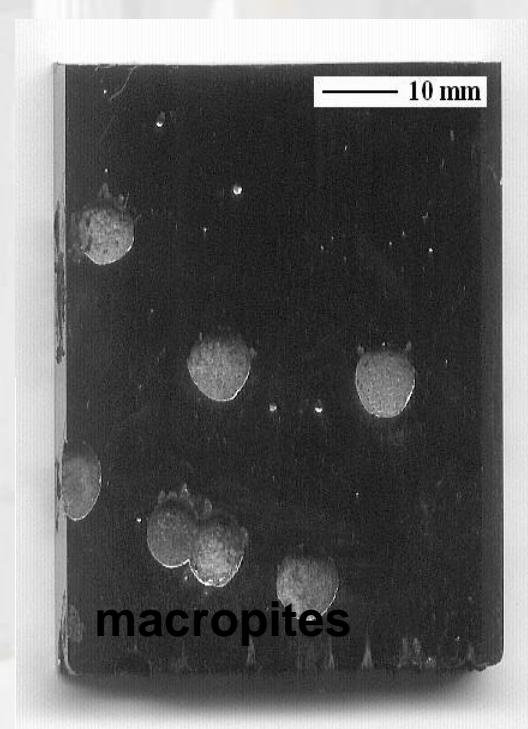
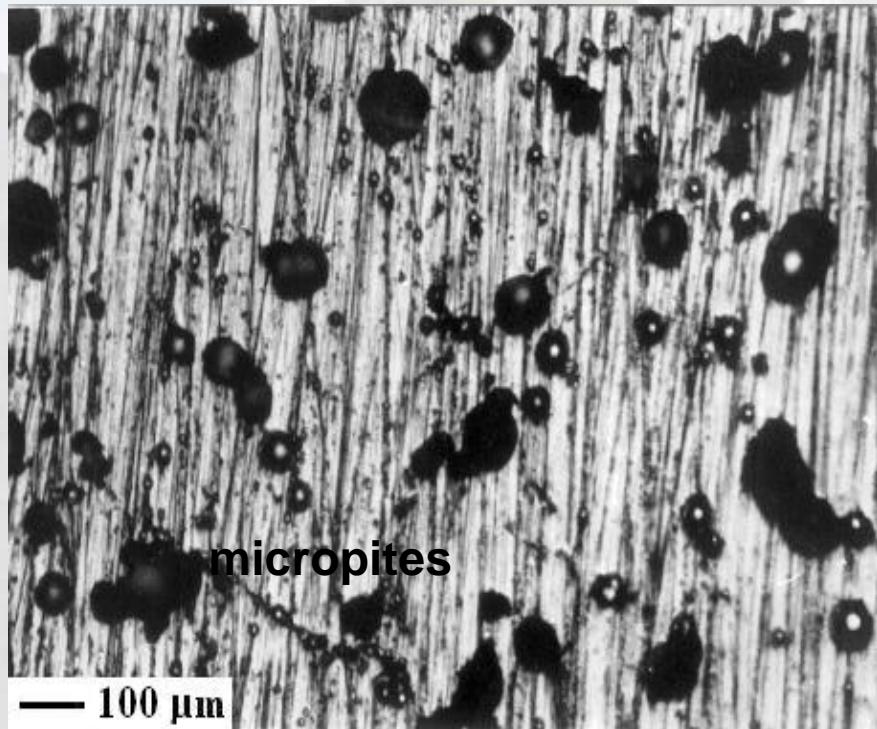
Seleção de Materiais

Aços inoxidáveis – efeito do encruamento



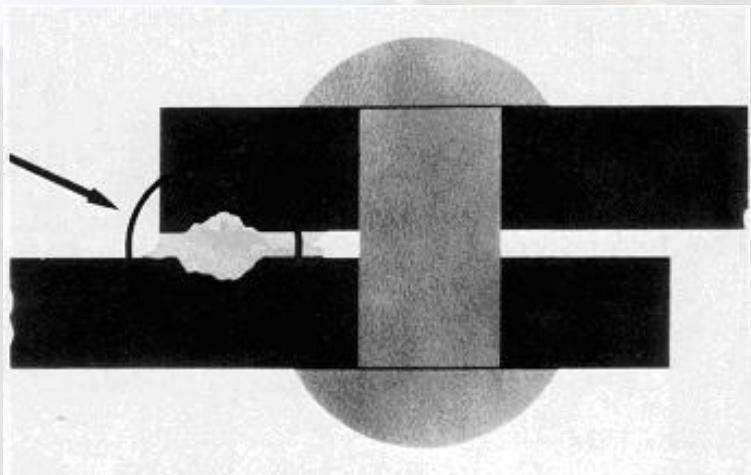
Tipos de corrosão nos aços inoxidáveis

- Corrosão por pites



Tipos de corrosão nos aços inoxidáveis (cont.)

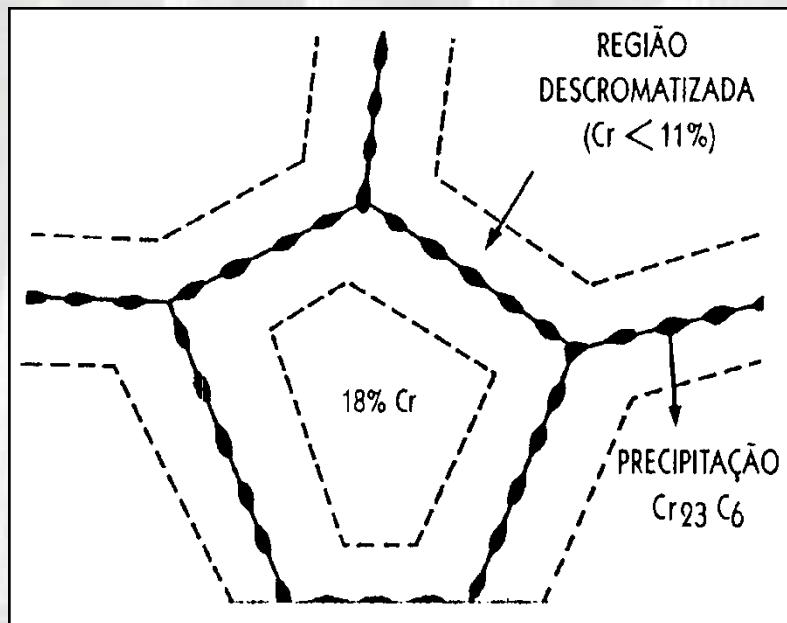
- Corrosão em aresta ou frestas



- 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 intergranular

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



Aços inoxidáveis ferríticos

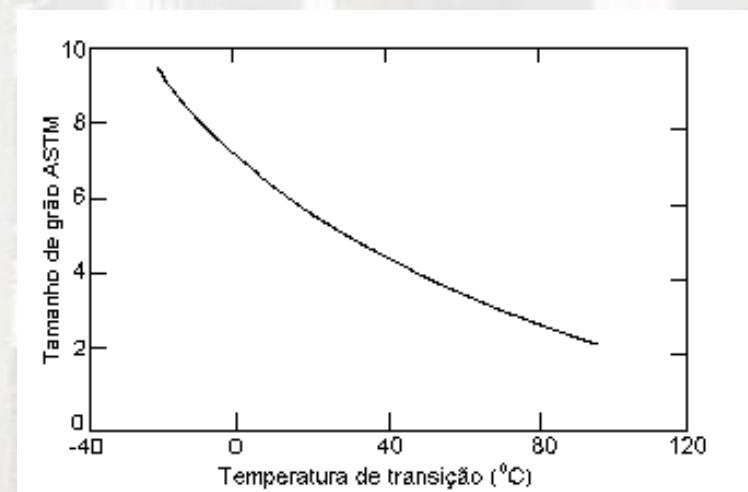
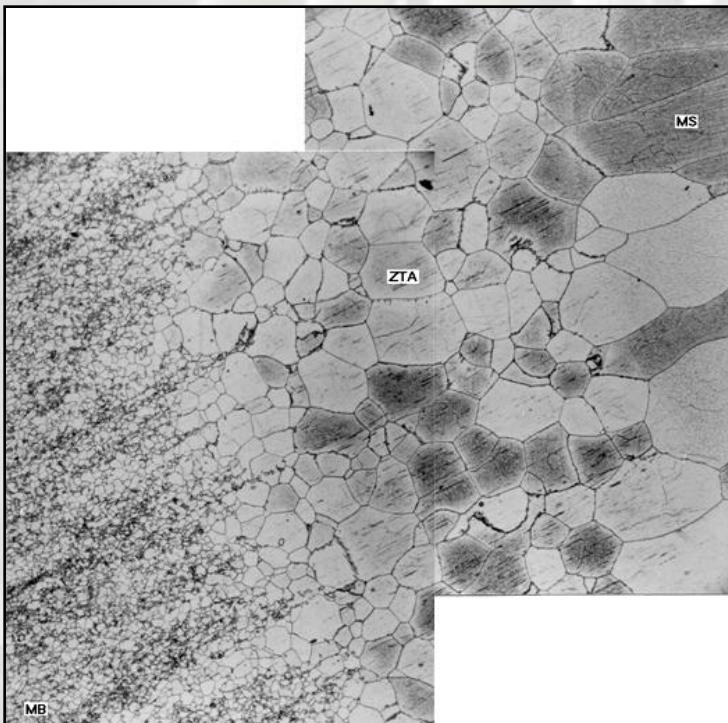
Tipo	%C	%Si	%Mn	%Cr	%Al	%Mo	outros
405	0,08	1,0	1,0	11,5-13,5	0,1-0,3	-	-
409	0,08	1,0	1,0	10,5-11,8	-	-	0,5%Ti, até 0,5%Ni
430	0,12	1,0	1,0	16-18	-	-	-
430Ti	0,12	1,0	1,0	16-18	-	-	0,50%Ti
430Nb	0,12	1,0	1,0	16-18	-	-	0,50%Nb
442	0,20	1,0	1,0	18-23	-	-	-
444	0,20	1,0	1,0	17,5-19,5	-	1,8-2,5	Até 1%Ni, 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.

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);



Fonte: [4]

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'

Aços inoxidáveis ferríticos

Fragilização devido aos elementos intersticiais SCHON:

- 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 ELI
- Tratamento térmico pós-soldagem a cerca de 650°C – 850°C para transformar a martensita em ferrita mais carbonetos

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	$\%Ti = 5 \times \%C$
347	0,08	17 – 19	9 – 13	2,0	1,0	$\%Nb = 10 \times \%C$
310	0,25	24 – 26	19 – 22	2,0	1,5	-
310S	0,08	24 - 26	19 - 22	2,0	1,5	-

Principais características dos aços inoxidáveis austeníticos

- Excelente resistência à corrosão, exceto corrosão sob tensão.
- Não são endurecíveis por tratamento térmico
- Têm excelente conformabilidade plástica
- 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)

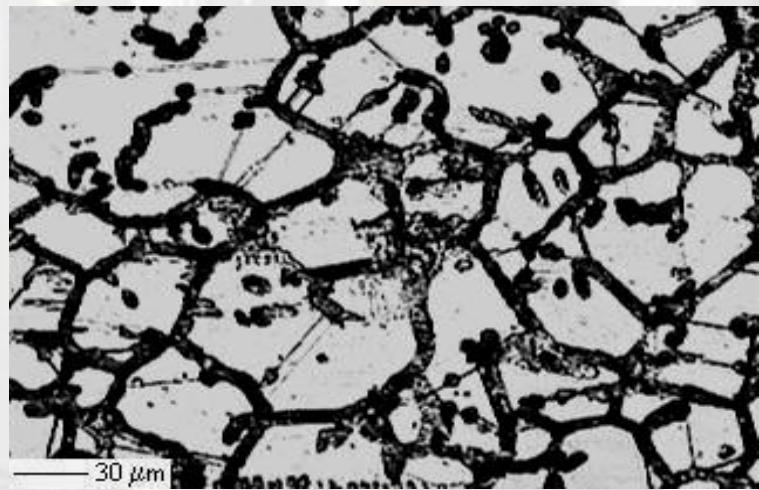
Problemas de corrosão

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.



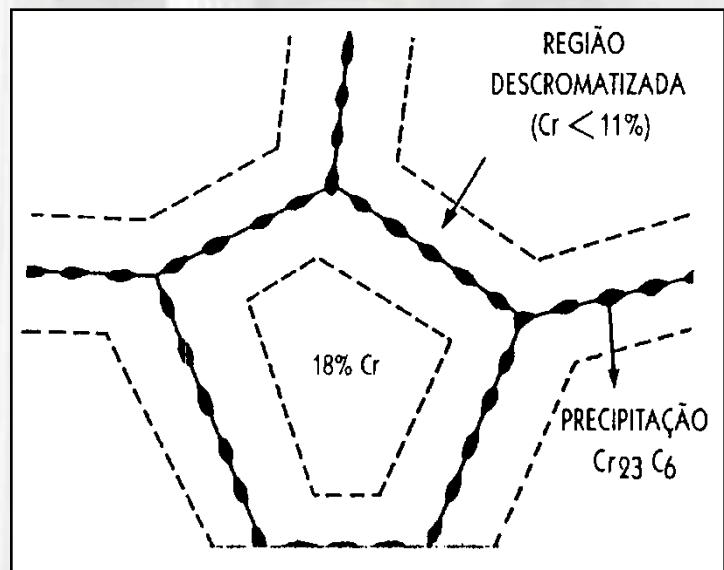
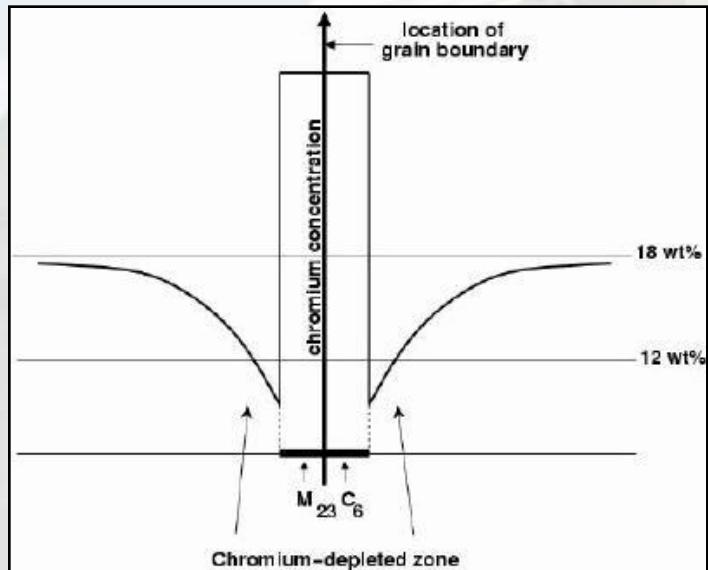
AISI 304 - Estrutura solubilizada



Estrutura sensitizada

Aços inoxidáveis austeníticos

O aço sensitizado fica suscetível à corrosão intergranular, pois as regiões adjacentes aos contornos de grão ficam pobres em Cr.



As regiões adjacentes aos contornos ficam preferencialmente anódicas

Medidas para se evitar a corrosão intergranular nos aços inoxidáveis austeníticos:

- Regenerando um aço sensitizado

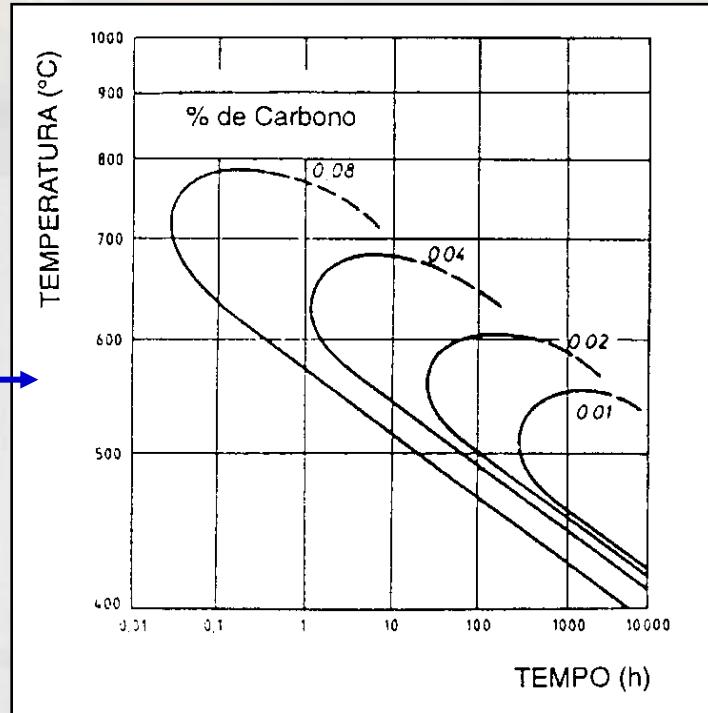
- 1050°C – 1100°C resfriamento em água
- 900°C (healing)

- 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

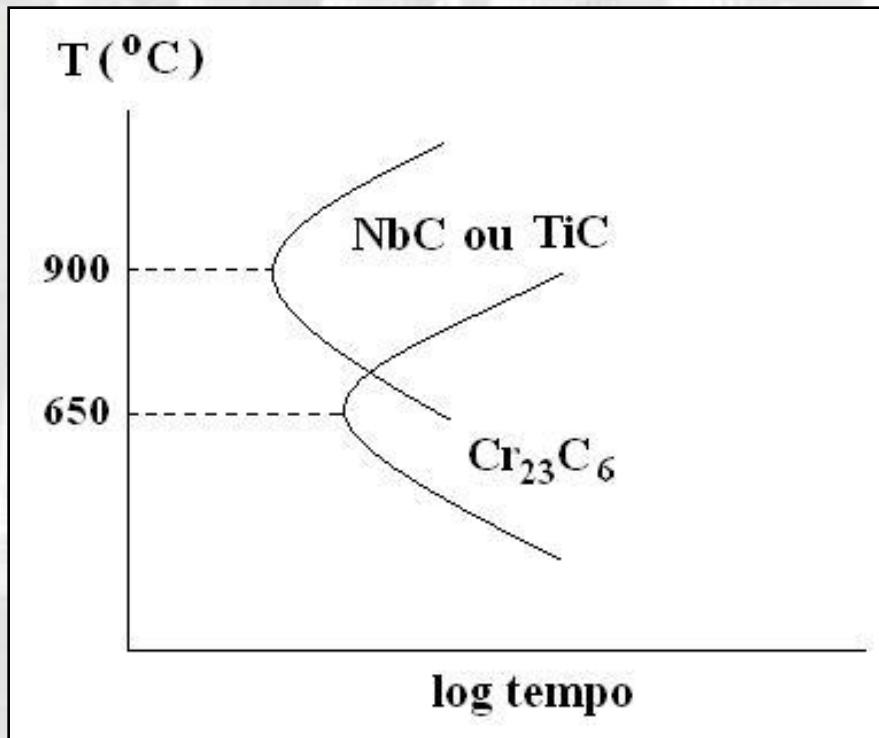
- Utilizando aços estabilizados ao Ti (AISI 321) ou Nb (AISI 347):

- 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.



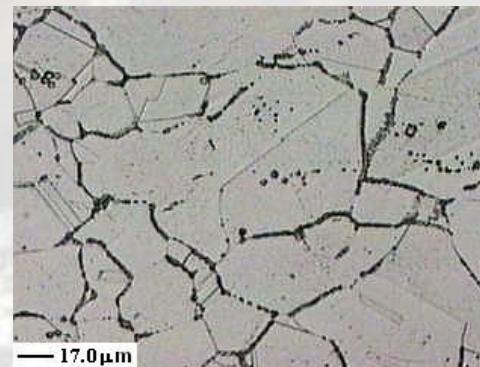
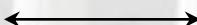
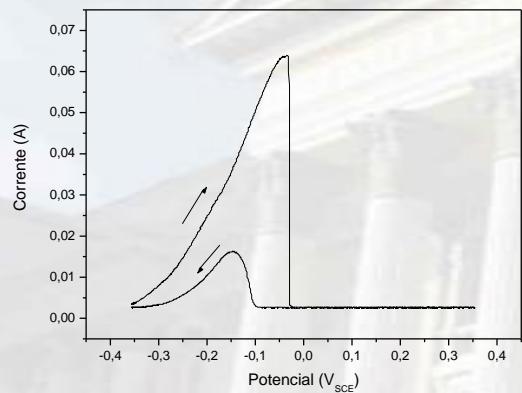
Aços inoxidáveis austeníticos

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

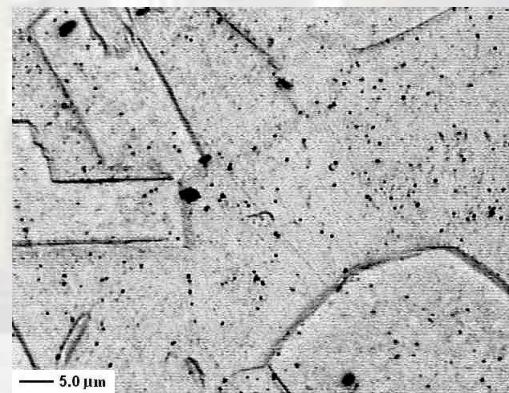
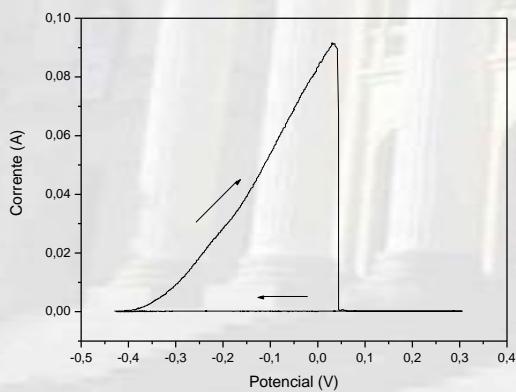


Aços inoxidáveis austeníticos

Aço inoxidável AISI 321 solubilizado a 1100°C e tratado a 600°C por 48 horas

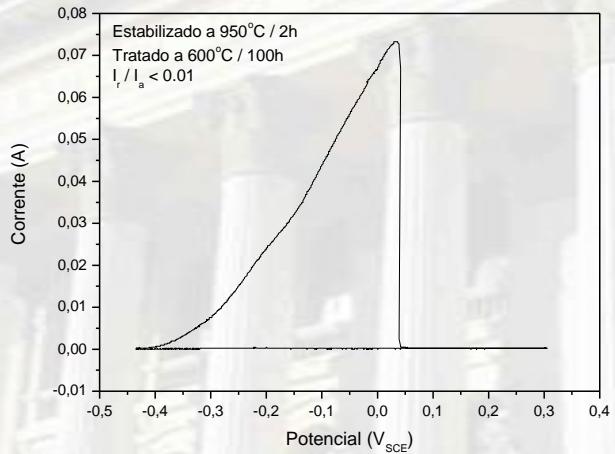


Aço inoxidável AISI 321 solubilizado a 875°C e tratado a 600°C por 100 horas

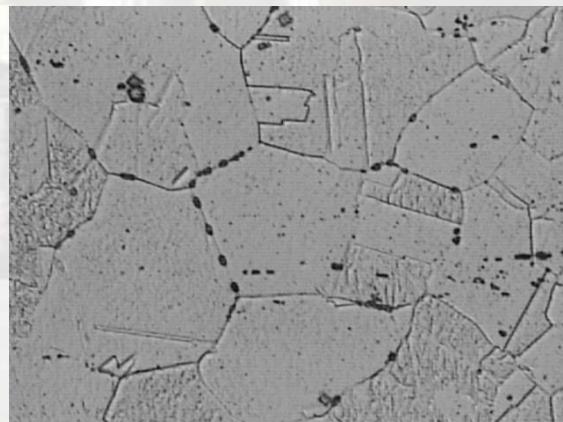
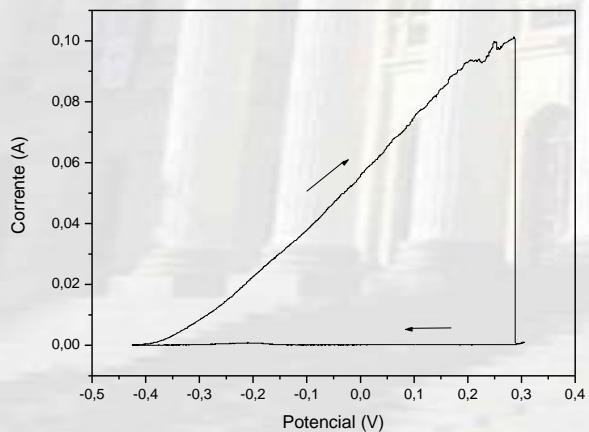


Aços inoxidáveis austeníticos

Aço inoxidável AISI 321 solubilizado a 950°C e tratado a 600°C por 100 horas

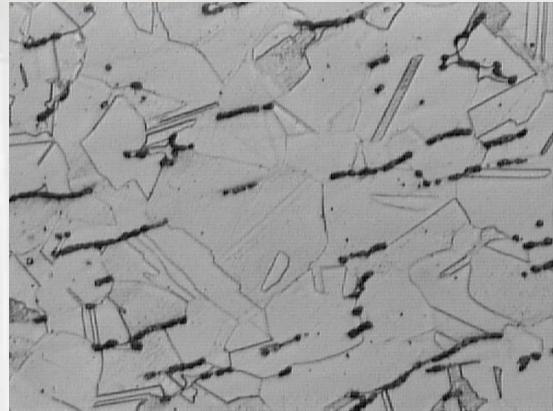
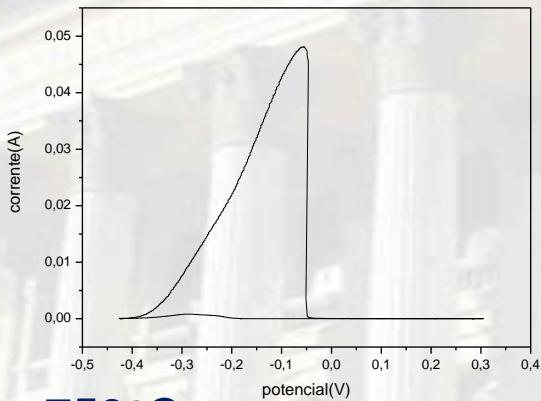


Aço inoxidável AISI 321 solubilizado a 975°C e tratado a 600°C por 100 horas

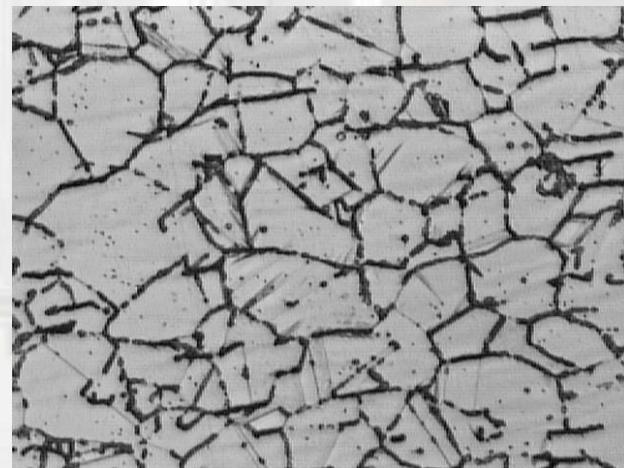
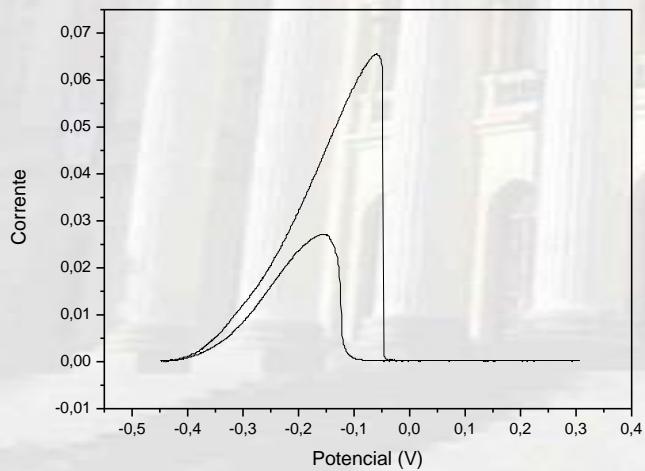


Aços inoxidáveis austeníticos

304H como recebido

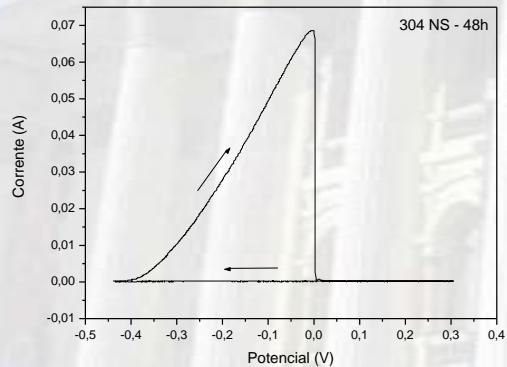


304H envelhecido 4 horas 750°C

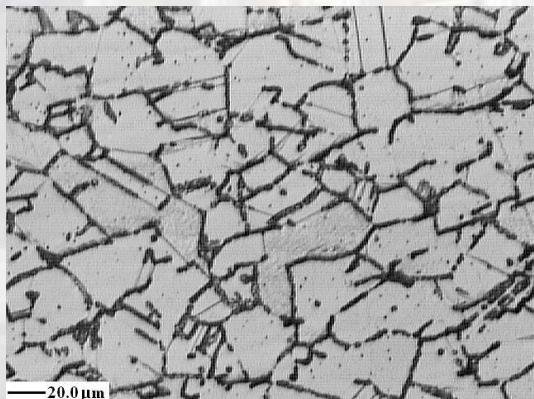


Aços inoxidáveis austeníticos

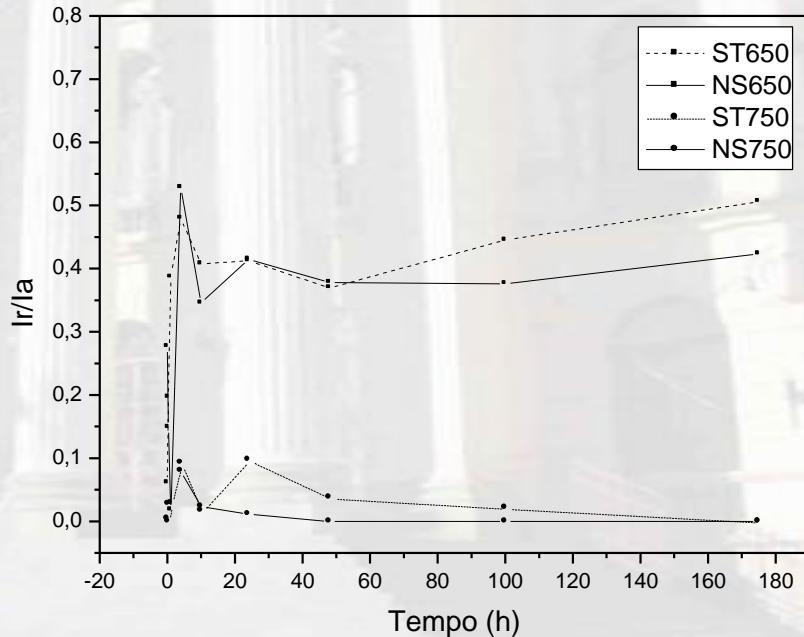
A utilização dos aços austeníticos convencionais na faixa de sensitização se baseia no fato de que o material pode ser recuperado (ou curado) com o tempo de envelhecimento, pela difusão do cromo. Este fenômeno que pode demorar muito ou pouco tempo, dependendo da temperatura de utilização e composição química do aço.

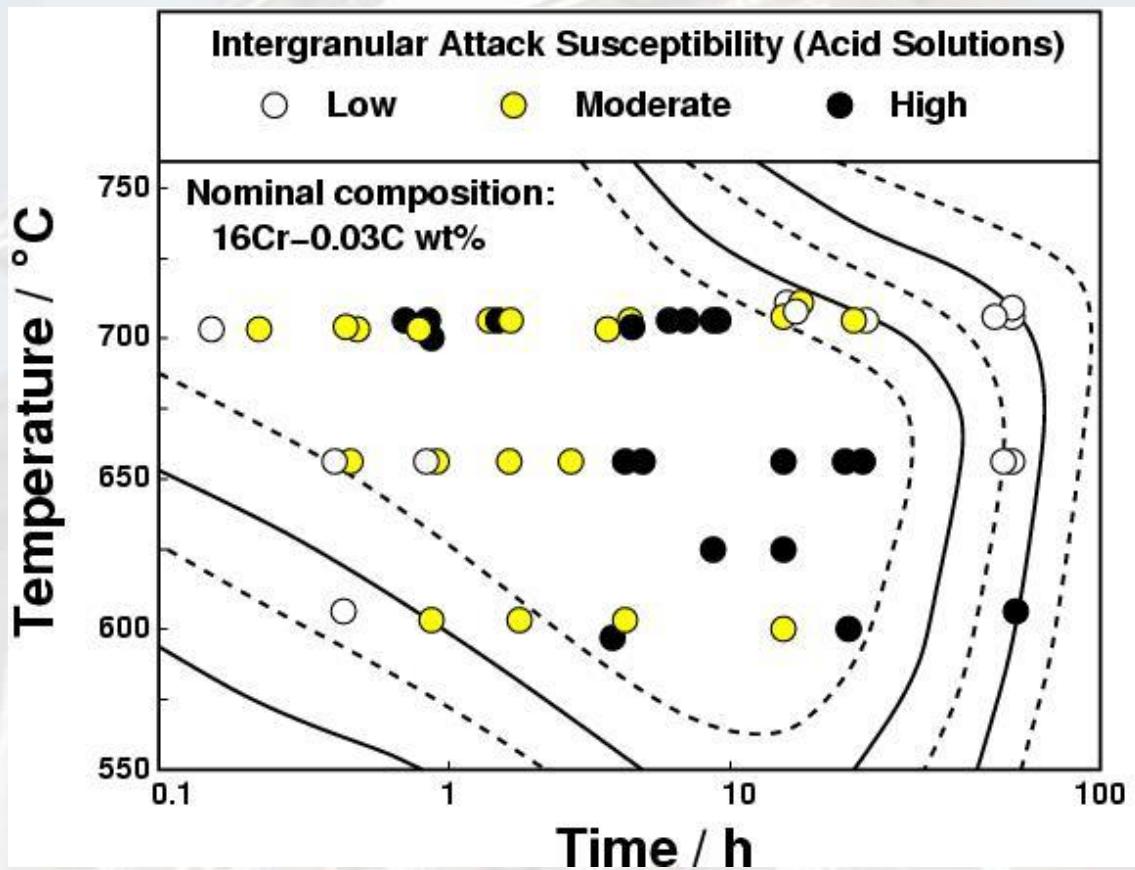


48 h / 750°C



Aço austenítico com 18%Cr-0,05%C

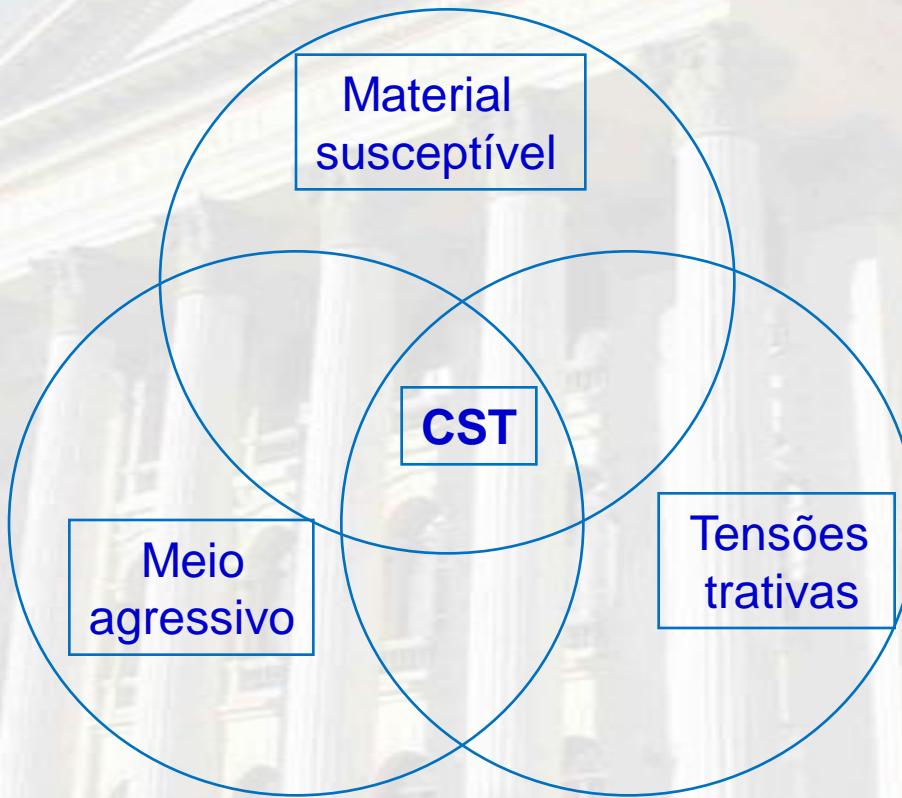




Aço austenítico contendo 16%Cr-0,03%C

Fonte: William E. Mayo, "Predicting IGSCC/IGA susceptibility of Ni-Cr-Fe alloys by modeling of grain boundary chromium depletion", Materials Science and Engineering A252 (1997) pp 129-139.

- Corrosão sob tensão



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

Corrosão sob-tensão



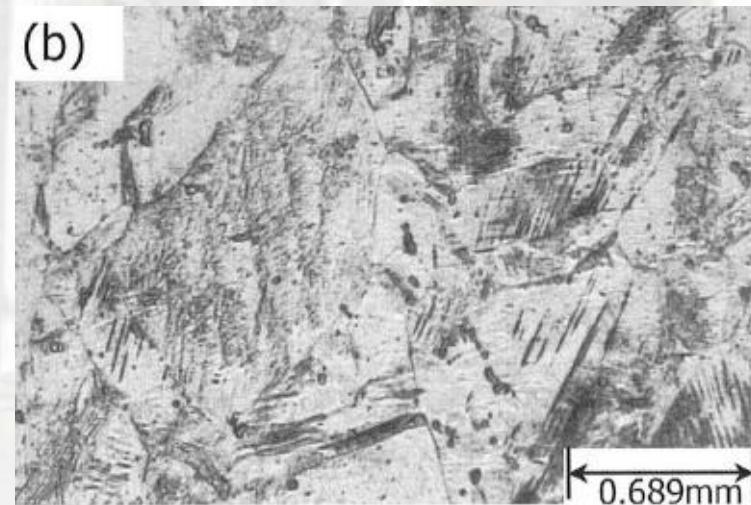
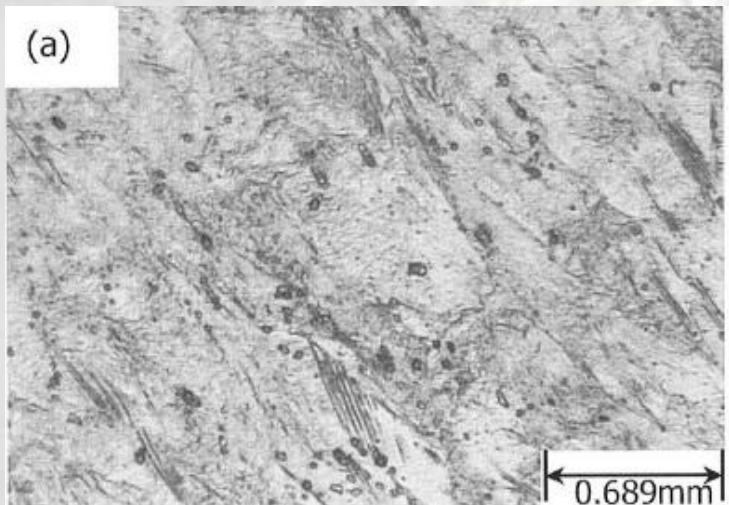
TRINCA DE CORROSÃO SOB TENSÃO INICIADA EM PONTO DE CORROSÃO INTERGRANULAR

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

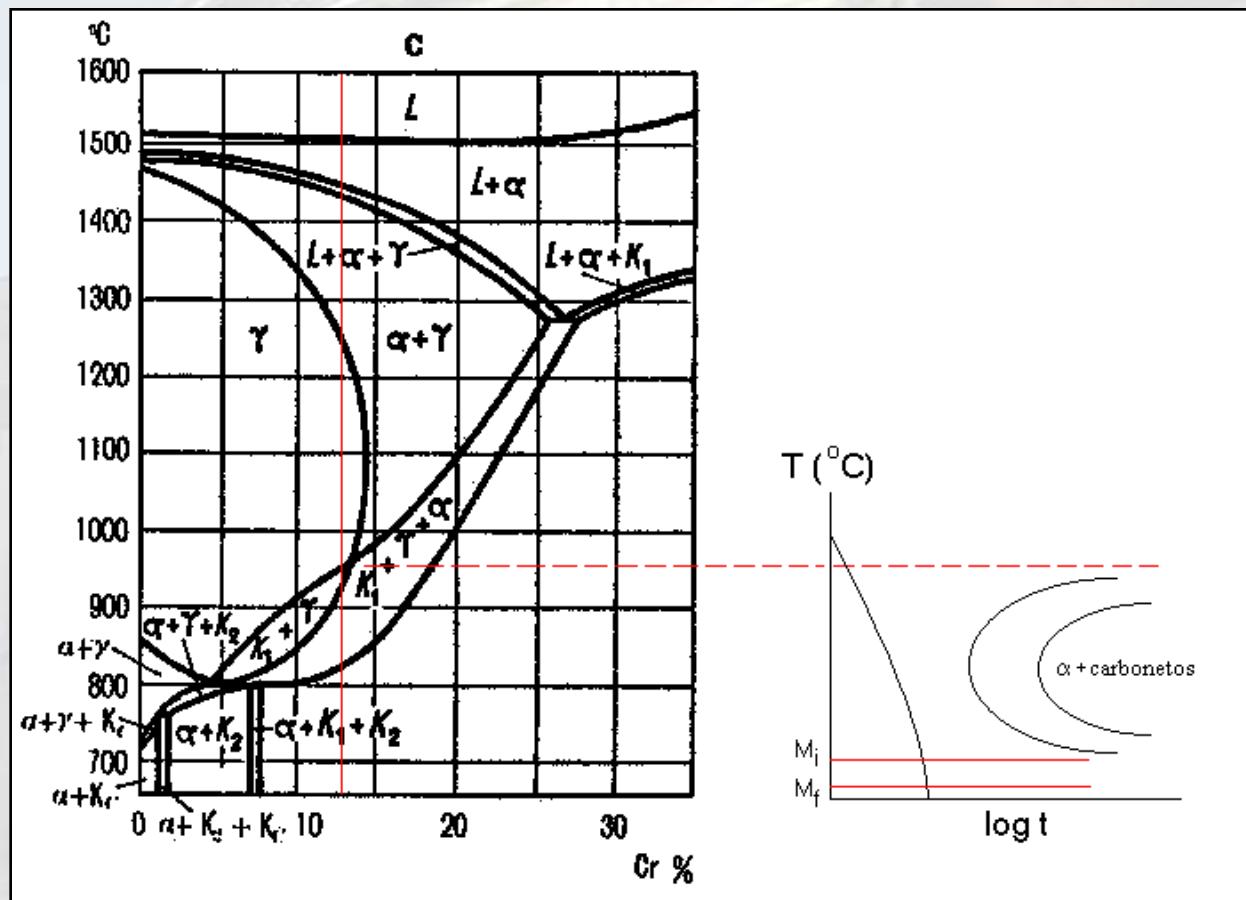
Martensitas induzidas por deformação

Fase	Estrutura	Parâmetros Cristalinos (Å)
Austenita	CFC	$a = 3,588$
Martensita α'	CCC	$a = 2,872$
Martensita ϵ	HC	$a = 2,532$ e $c = 4,114$

Metalografia



Aços inoxidáveis martensíticos



Principais composições comerciais:

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**

Seleção da temperatura de têmpera

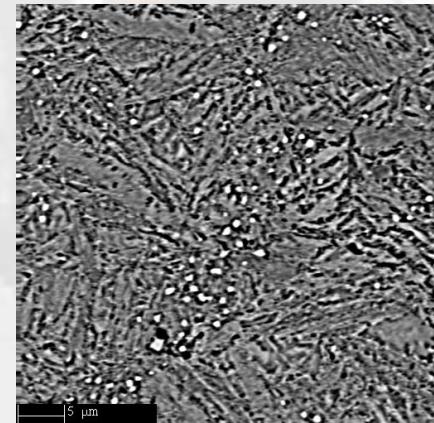
- Opções de revenido:

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 por que 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 cromo. Estes carbonetos também se formam na faixa superior de 600-700°C, porém nestas temperaturas acredita-se que o cromo pode se difundir facilmente e eliminar ou reduzir as regiões pobres em cromo (“healing”).

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



Aços inoxidáveis supermartensíticos

Para melhorar as propriedades mecânicas, a resistência à corrosão e 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, quantidades minoritárias de austenita e ferrita (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

Aços inoxidáveis martensíticos

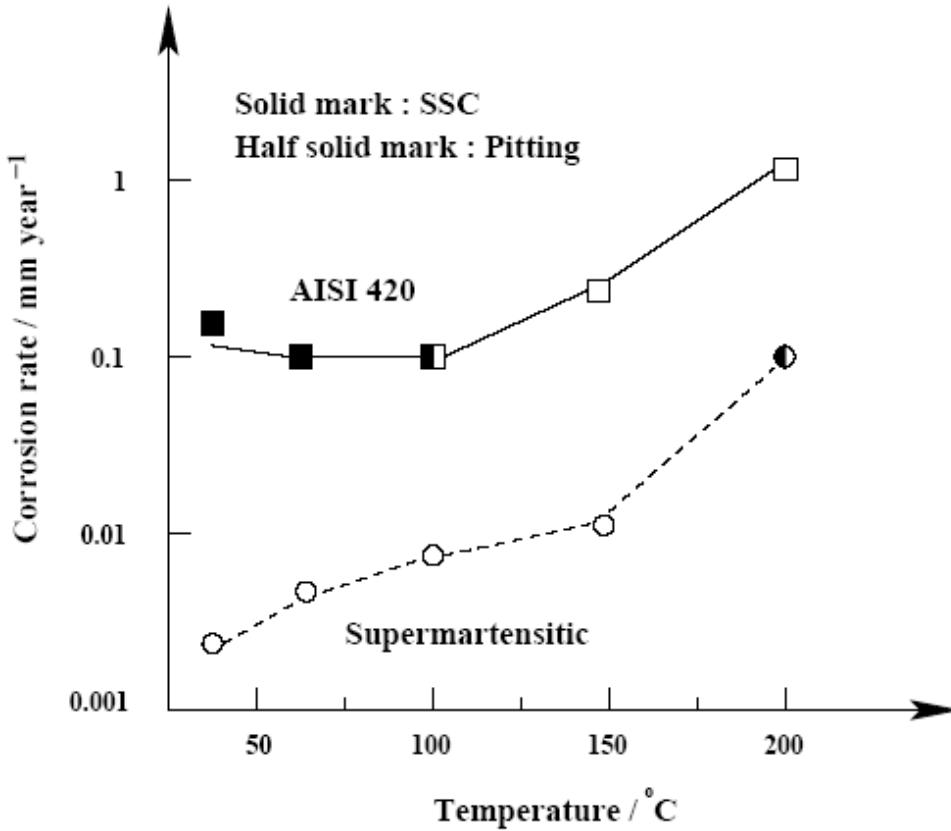


Figure 1.1: Effect of temperature on corrosion rate, localised corrosion and sulfide stress-cracking (SSC) of a conventional AISI 420 and a supermartensitic stainless steel (0.02 C 12 Cr 5.5 Ni 2 Mo wt%) [7]. Experimental conditions : 0.001 MPa H₂S, 3 MPa CO₂, 5 % NaCl, 100 % yield stress, immersed for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

Supermartensíticos →

Duplex →

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

	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).