

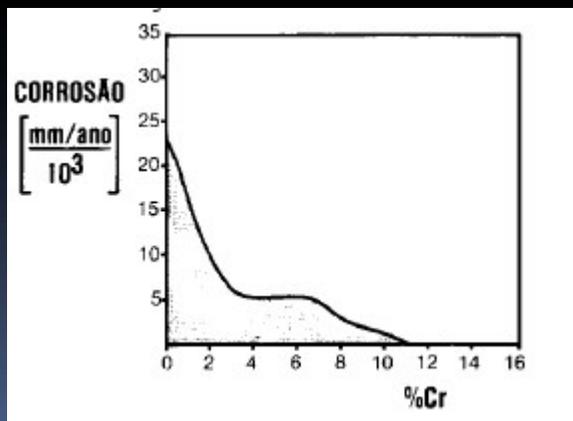


Engenharia e Ciência dos Materiais I  
Profa.Dra. Luralice Canale

# AÇOS INOXIDÁVEIS

# Introdução

- Os aços inoxidáveis são aços que resistem à oxidação e corrosão, motivados pela ação de agentes atmosféricos e dos agentes químicos
- Para isto, possuem um elevado teor de cromo em sua composição (acima de 12%)



# Introdução

- O cromo tem a propriedade de formar, na presença de oxigênio um filme de óxido com excepcional resistência aos ataques de agentes químicos
- A formação deste filme se dá pela absorção de gás oxigênio por átomos de cromo na camada superficial e é mantida na superfície por forças atômicas, sendo, por isto, bastante estável
- Nesta situação o aço adquire um estado passivo

- O filme de óxido formado é invisível, contínuo e sua espessura é inferior a dois centésimos de micron
- Tanto a espessura do filme como seu teor de cromo aumentam à medida que se melhora o polimento superficial, portanto deve se formar sobre uma superfície metálica limpa
- Se o filme for rompido,  
instantaneamente se restaura se  
o aço estiver em meio oxidante

# Corrosão Uniforme

- É o tipo mais comum de corrosão e se caracteriza por se apresentar sobre toda a superfície da peça
- A formação de ferrugem no aço pode ser considerada como corrosão uniforme
- No processo de ferrugem há a oxidação do ferro, formando hidróxido de ferro  $[\text{Fe}(\text{OH})_2]$  que posteriormente se oxida formando hidrato de óxido férrico

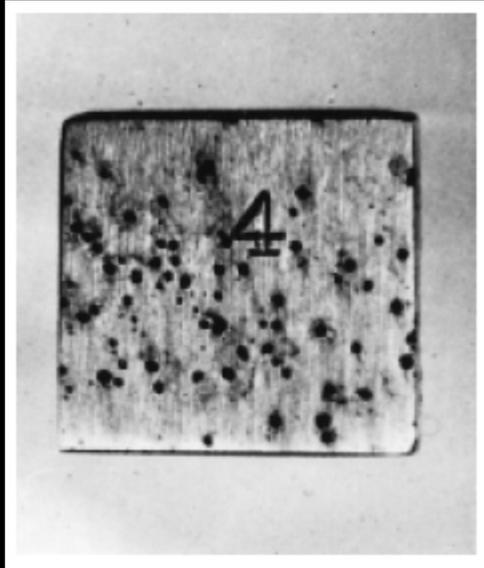


- 
- Nos aços inoxidáveis o filme de óxido protege o material impedindo a formação de ferrugem com exceção em meios muito agressivos como água do mar

# Corrosão por Pite

- Esse tipo de corrosão não se apresenta com um aspecto homogêneo sobre toda a superfície, mas concentrado em pequenas áreas
- Isto ocorre devido ao rompimento da película de óxido por um agente agressor em pequenas zonas

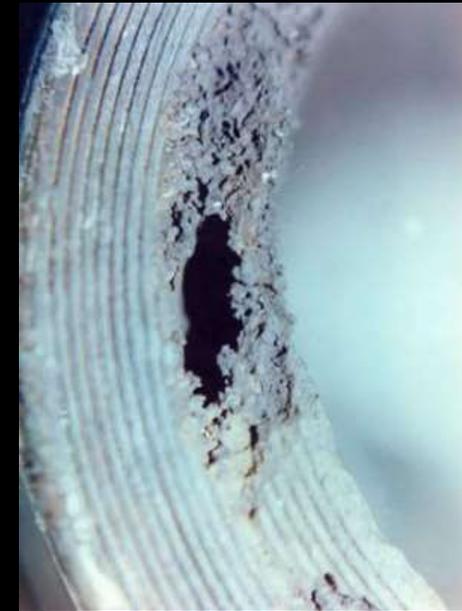
# Corrosão por Pite



- Neste caso a corrosão se localiza em crateras de pequeno diâmetro e grandes profundidades
- A adição de molibdênio aumenta significativamente a resistência à corrosão por pites

# Corrosão em Frestas

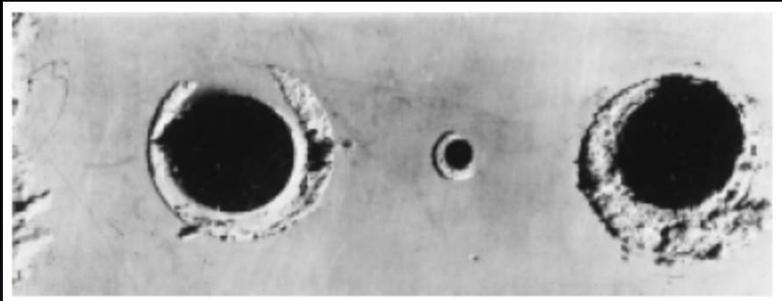
- Ocorre em fendas , pontos de contato entre materiais iguais ou diferentes e sob depósitos de sujeira ou de produtos de corrosão onde a solução se torna estagnada e há presença insuficiente de oxigênio para formação da camada passiva



Corrosão por fresta em rosca

# Corrosão em Frestas

- A fenda deve ser ampla o suficiente para que a solução penetre, porém estreita o suficiente para que haja estagnação do fluido





DETALHE DO APOIO  
TERMOPLÁSTICO



# Corrosão Galvânica

- A corrosão galvânica ocorre quando dois metais ou ligas de composições diferentes são acoplados eletricamente e expostos a um eletrólito
- O metal menos nobre, ou mais reativo irá experimentar a corrosão e o metal mais inerte vai ser protegido contra a corrosão

# Corrosao Galvanica

**Table 16.2** The Galvanic Series

	Platinum
	Gold
	Graphite
	Titanium
	Silver
	[316 Stainless steel (passive)
	[304 Stainless steel (passive)
	[Inconel (80Ni-13Cr-7Fe) (passive)
	[Nickel (passive)
	[Monel (70Ni-30Cu)
	Copper-nickel alloys
	Bronzes (Cu-Sn alloys)
	Copper
	[Brasses (Cu-Zn alloys)
	[Inconel (active)
	[Nickel (active)
	Tin
	Lead
	[316 Stainless steel (active)
	[304 Stainless steel (active)
	[Cast iron
	[Iron and steel
	Aluminum alloys
	Cadmium
	Commercially pure aluminum
	Zinc
	Magnesium and magnesium alloys

↑  
Increasingly inert (cathodic)

↓  
Increasingly active (anodic)

Source: M. G. Fontana, *Corrosion Engineering*, 3rd edition. Copyright 1986 by McGraw-Hill Book Company. Reprinted with permission.

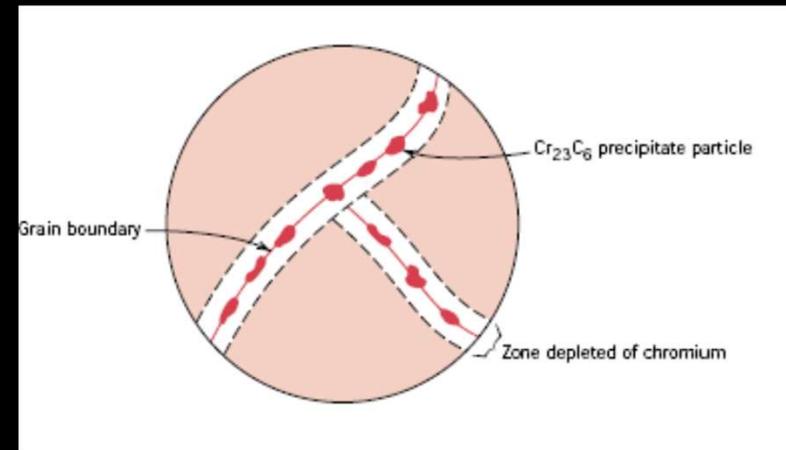
# Corrosão Galvânica

- A série galvânica indica as reatividades relativas de uma variedade de metais e ligas
- Quando dois metais são acoplados em um eletrólito aquela que estiver mais abaixo na série galvânica sofrerá corrosão
- Em certos eletrólitos o aço inoxidável pode ter a película passiva quebrada levando-o do estado passivo para um estado ativo

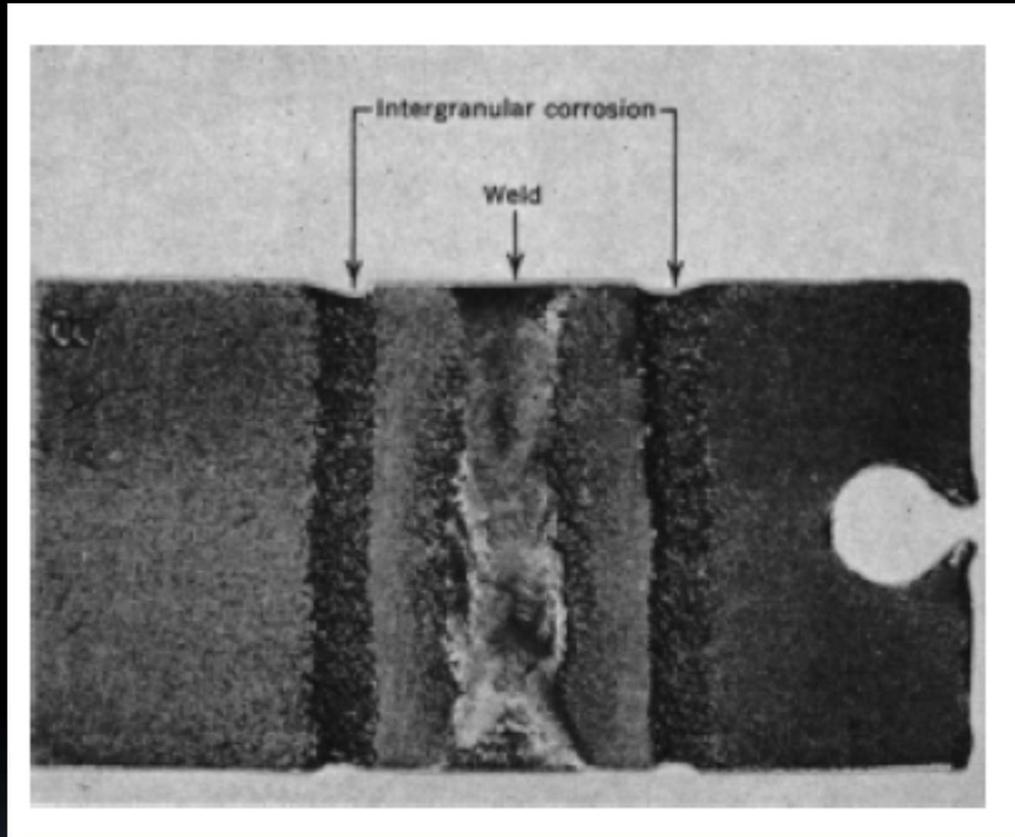


# Corrosão Intergranular

- Ocorre preferencialmente ao longo dos contornos de grãos para algumas ligas e em ambientes específicos
- O resultado é que uma amostra se desintegra ao longo dos seus contornos de grãos
- A composição química e o tratamento térmico são fatores bastante importantes para esse tipo de corrosão
- Sensitização

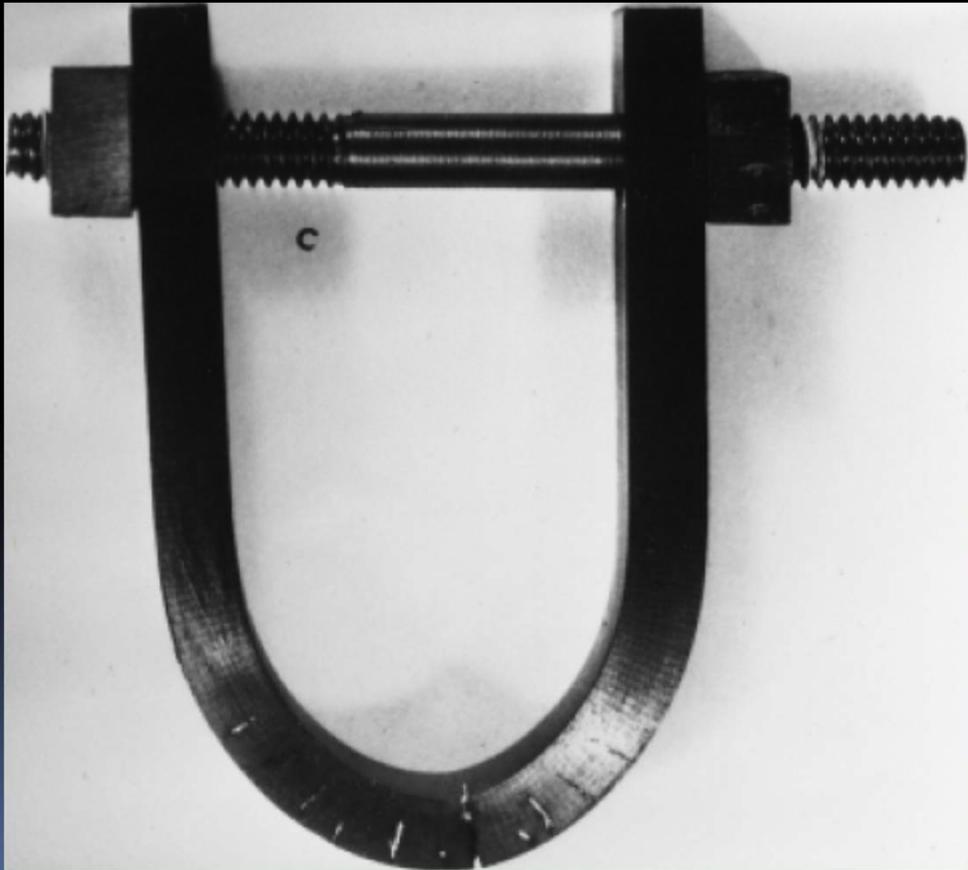


# Corrosão Intergranular



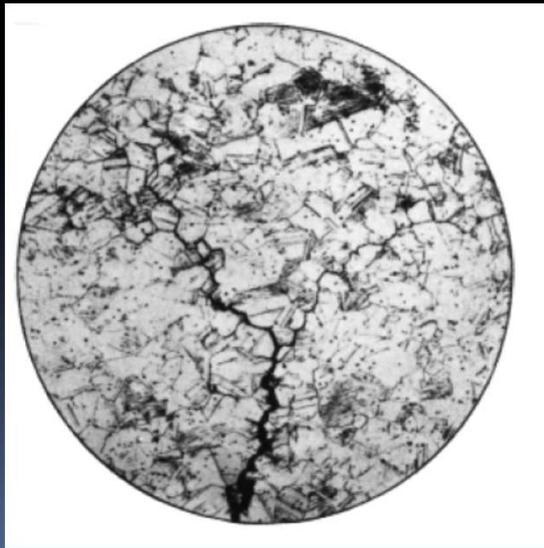
# Corrosão sob tensão

- Pode aparecer em quase todos os tipos de aços. Está ligada à existência conjunta de eletrólitos e tensões mecânicas e podem avançar para o interior do metal



# Corrosão sob tensão

- A maioria das ligas é suscetível à corrosão sob ambientes específicos
- Por exemplo, o latão é vulnerável quando exposto à amônia (fotomicrografia) enquanto que maioria dos aços inoxidáveis sofrem corrosão sob tensão em soluções que contém íons cloreto



# Corrosão sob tensão

- Entre os aços inoxidáveis os austeníticos são os que apresentam maior sensibilidade à corrosão sob tensão, surgindo principalmente nas zonas onde há deformação plástica

# Tipos de aços inoxidáveis

- Basicamente, os aços inoxidáveis podem ser divididos em:
  - ✓ Ferríticos: Liga Fe-Cr
  - ✓ Martensíticos: Liga Fe-Cr-C
  - ✓ Austeníticos: Liga Fe-Ni-Cr
- Existem ainda os aços que possuem duas fases, denominados Aços Duplex
- O carbono desempenha papel importante pois localiza um aço de alto cromo em ferrítico ou martensítico

# Tipos de aços inoxidáveis

- É necessário conhecer também a tendência de cada elemento no sentido de promover a estabilização da austenita (*gamagânica*) ou ferrita (*alfagânica*)
- Por exemplo, o cromo é alfavagânico enquanto que o Ni é gamagânico. Existe uma competição entre essas duas tendências uma vez que
- elementos de liga são adicionados
- e que nos dá uma ideia de qual
- estrutura irá se formar
- a temperatura ambiente

# Tipos de aços inoxidáveis

- Cr equivalente

- $=(\text{Cr})+2(\text{Si})+1,5(\text{Mo})+5(\text{V})+5,5(\text{Al})+1,75(\text{Nb})+1,5(\text{Ti})+ 0.75 (\text{W})$

- Ni equivalente

$$=(\text{Ni})+(\text{Co})+0,5(\text{Mn})+0,3(\text{Cu})+25(\text{N})+30(\text{C})$$

# Tipos de aços inoxidáveis

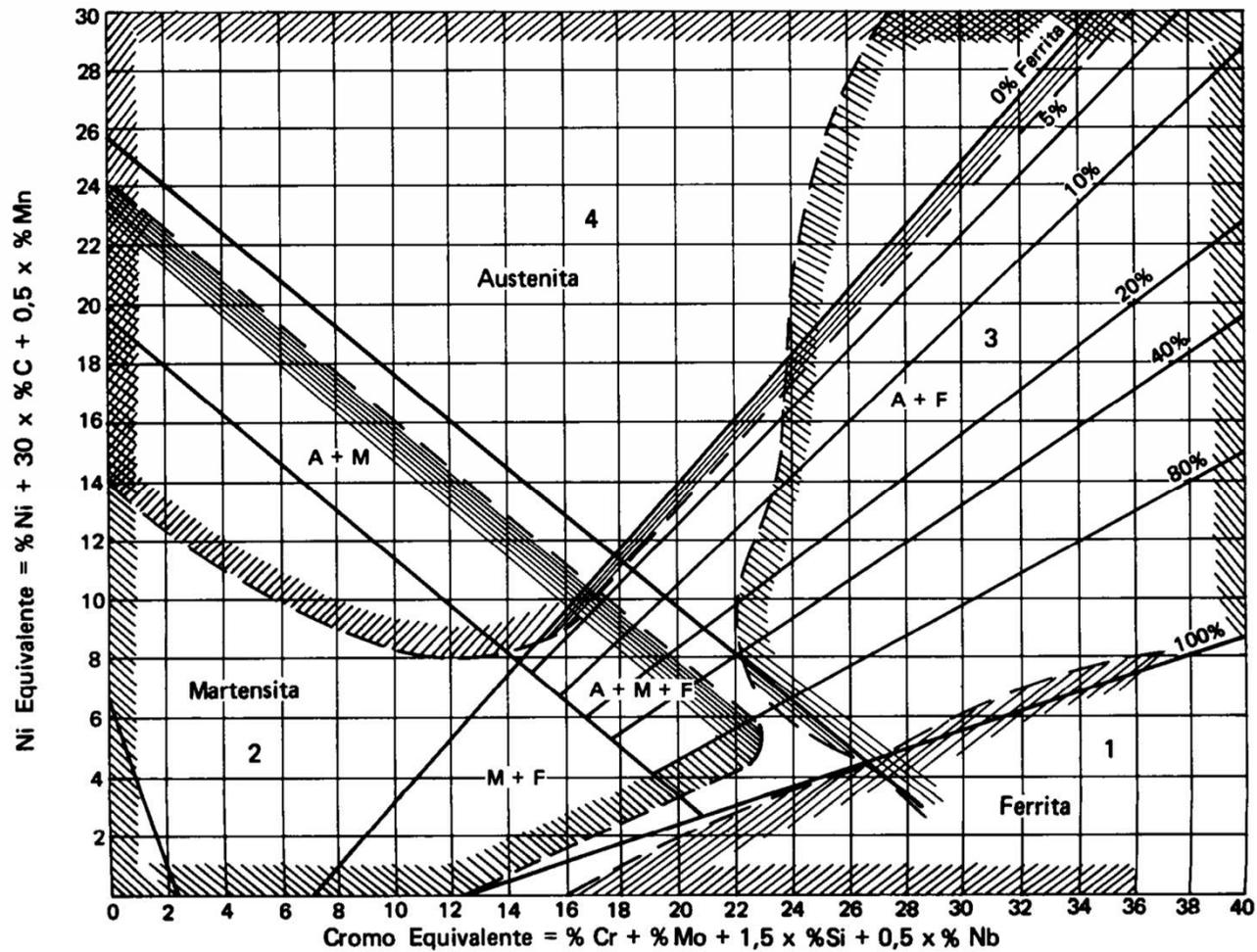


Fig. 6.28 – Diagrama de Schäffler

# Aços inoxidáveis Ferríticos

- São ligas de alto cromo (12 a 30%) e baixo carbono (abaixo de 0,2%) e estrutura ferrítica em todas as temperaturas inferiores ao ponto de fusão
- Não endurecem significativamente por tratamento térmico
- São relativamente baratos porque não contém níquel
- Boa resistência ao calor e corrosão
- Como o carbono é baixo, a austenita não se forma a altas temperaturas, portanto após têmpera tem-se ferrita e não martensita

# Aços inoxidáveis Ferríticos

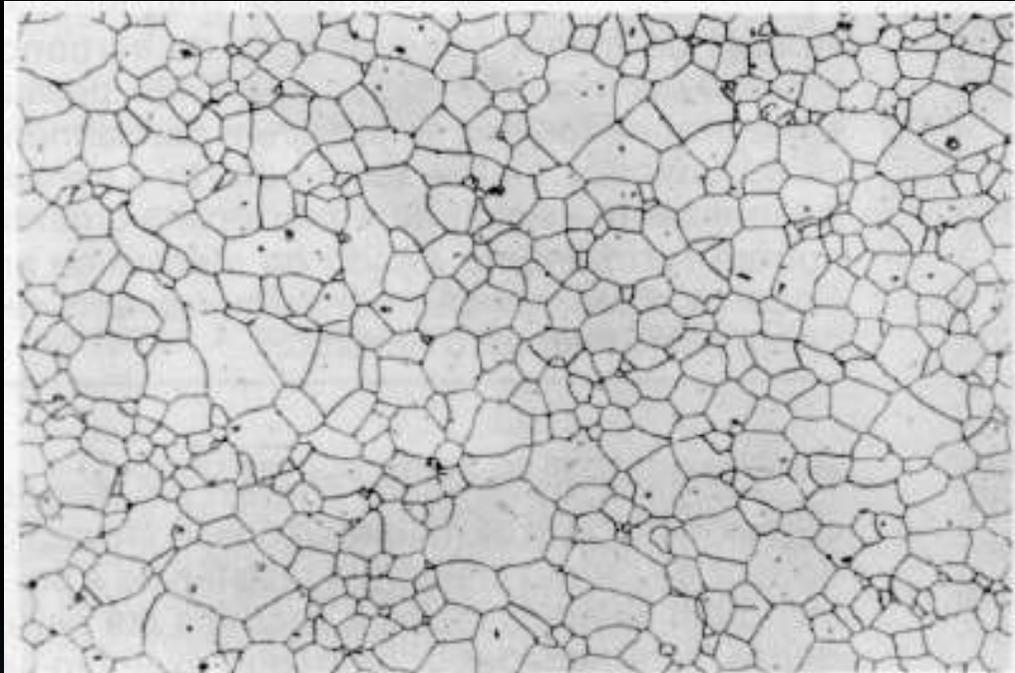


Figura 5 - Aço Inoxidável ferrítico ABNT 409  
- Microestrutura típica.

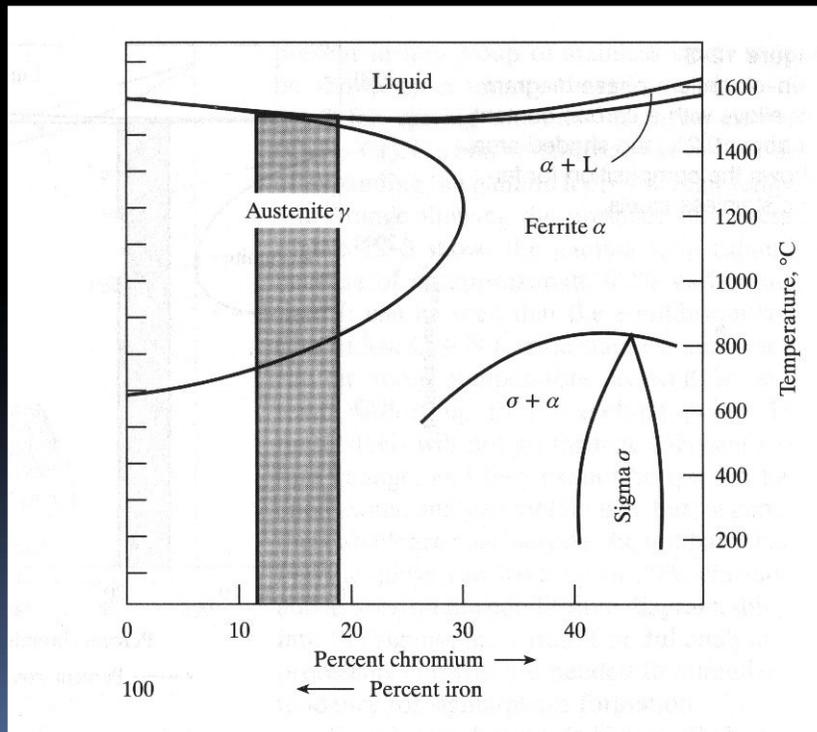
# Composição Química

Composição química, % máxima

Tipo de aço ABNT	C	Mn	Si	P	S	Cr	Ni	Outros
409	0.08	1.00	1.00	0.045	0.045	10.50 11.75		Ti $\geq 6 \times C$ Ti 0.75 máx
429	0.12	1.00	1.00	0.040	0.030	14.00 16.00		
430	0.12	1.00	1.00	0.040	0.030	16.00 18.00		
430F	0.12	1.25	1.00	0.060	0.15 min	16.00 18.00	0.60 (A)	
430FSe	0.12	1.25	1.00	0.060	0.060	16.00 18.00		Se 0.15 min
434	0.12	1.00	1.00	0.040	0.030	16.00 18.00		
436	0.12	1.00	1.00	0.040	0.030	16.00 18.00	0.75 1.25	Nb+Ta $\geq 5 \times C$ 0.70 máx
442	0.20	1.00	1.00	0.040	0.030	13.00 23.00	0.75 1.25	
446	0.20	1.50	1.00	0.040	0.030	23.00		N

# Aços inoxidáveis Martensíticos

- Neste grupo, a faixa de cromo é de 11,5 a 18% de cromo. O teor de carbono varia de 0,2 a 1,2 % de carbono. Essas composições, durante o aquecimento interceptam o campo austenítico



# Aços inoxidáveis Martensíticos

- São temperáveis e na condição temperado e revenido apresentam elevadas propriedades mecânicas
- Entre as principais aplicações incluem-se cutelaria, instrumentos cirúrgicos, peças para válvulas e bombas, peças para turbinas a vapor

# Aços Inoxidáveis Martensíticos

- Deve-se controlar a temperatura do revenido rigorosamente pois aquecimentos na faixa de 450 a 550 ° C tem efeito negativo sobre a tenacidade e a resistência à corrosão
- No revenido, a precipitação de carbonetos, que ocorre a partir da martensita supersaturada de C, diminui em muito o teor de Cr na solução. Isto porque esses carbonetos precipitados são ricos em cromo e o aço perde em resistência à corrosão

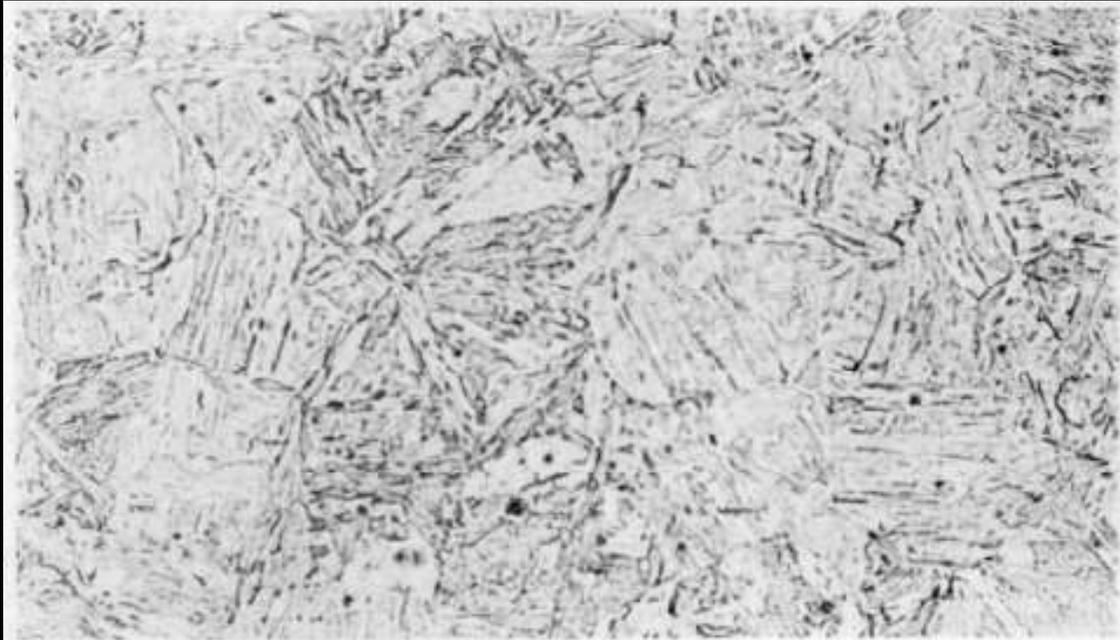


Figura 4 - Aço inoxidável ABNT 420  
Microestrutura típica.

# Composição Química

Composição química, % máxima								
Tipo de aço ABNT	C	Mn	Si	P	S	Cr	Ni	Outros
403	0,15	1,00	0,50	0,040	0,030	11,50 13,00		
405	0,08	1,00	1,00	0,040	0,030	11,50 14,50		Al 0,10/0,30
410	0,15	1,00	1,00	0,040	0,030	11,50 13,50		
414	0,15	1,00	1,00	0,040	0,030	11,50 13,50		Ni 1,25/2,50
416	0,15	1,25	1,00	0,060	0,15 min.	12,00 14,00	0,60 (A)	
416Se	0,15	1,25	1,00	0,060	0,060	12,00 14,00		Se 0,15 min.
420(B)	0,15 min	1,00	1,00	0,040	0,030	12,00 14,00		
420F	0,15 min	1,25	1,00	0,060	0,15 min.	12,00 14,00	0,60 (A)	
422	0,20 0,25	1,00	0,75	0,025	0,025	11,00 13,00	0,75 1,25	Ni 0,50/1,00 V 0,15/0,30 W 0,75/1,25
431	0,20	1,00	1,00	0,040	0,030	15,00 17,00		Ni 1,25/2,50
440 A	0,60 0,75	1,00	1,00	0,040	0,030	16,00 18,00	0,75	
440 B	0,75 0,95	1,00	1,00	0,040	0,030	16,00 18,00	0,75	
440 C	0,95 1,20	1,00	1,00	0,040	0,030	16,00 18,00	0,75	
501	0,10 min	1,00	1,00	0,040	0,030	4,00 6,00	0,40 0,65	
502	0,10	1,00	1,00	0,040	0,030	4,00	0,40	

# Aços inoxidáveis Austeníticos

- São aços com baixo teor de carbono (0,03 a 0,08% de C normalmente, podendo em alguns casos chegar a 0,25% de C com elevados teores de elementos gama-gênicos)
- O elemento gama-gênico mais utilizado é o Ni que aparece na faixa de 7 a 25 %. O Ni estabiliza a austenita que se forma à elevadas temperaturas de maneira que no resfriamento esta estrutura é retida
- Não são endurecíveis por tratamento térmico e não são magnéticos
- Apresentam ainda elevada ductilidade (adequados à fabricação por conformação)

# AÇOS INOXIDÁVEIS AUSTENÍTICOS

- São conhecidos pela sua excelente resistência à corrosão em muitos meios agressivos. Dos três grupos são os que apresentam melhor resistência à corrosão
- Outros elementos de liga como molibdênio, titânio e nióbio podem ser adicionados para melhorar a resistência à corrosão e minimizar a corrosão intergranular pela estabilização de carbonetos
- O aumento de dureza é obtido por encruamento.
- Eles combinam baixo limite de escoamento com alta resistência à tração e bom alongamento

# Aços inoxidáveis Austeníticos

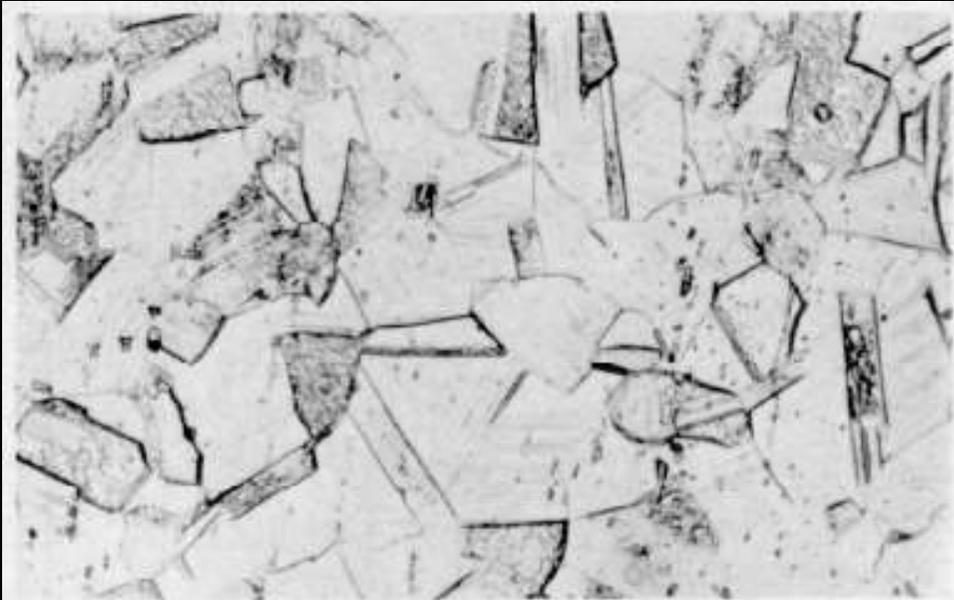


Figura 6 - Aço inoxidável austenítico ABNT 304  
- Microestrutura típica.

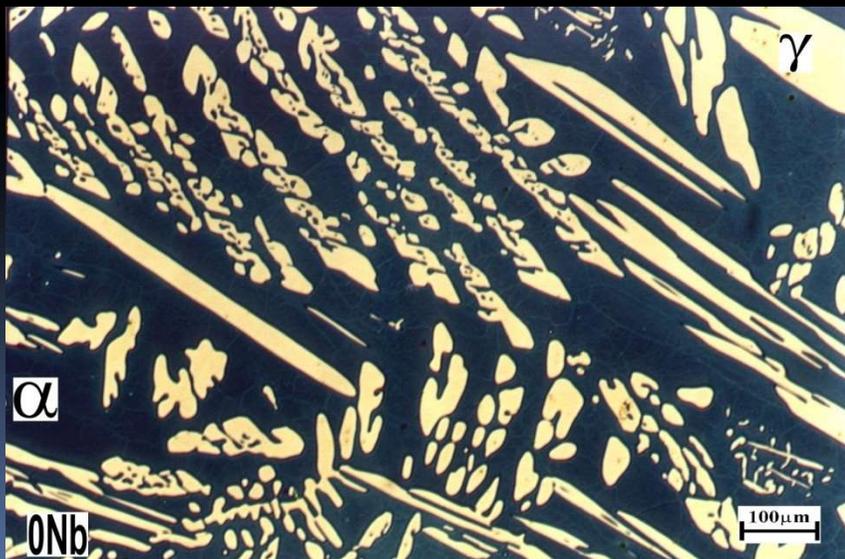
# Composição Química

Composição química, % máxima								
Tipo de aço ABNT	C	Mn	Si	P	S	Cr	Ni	Outros
201	0,15	5,50 7,50	1,00	0,060	0,030	16,00 18,00	3,50 5,50	N 0,25
202	0,15	7,50 10,00	1,00	0,060	0,030	17,00 19,00	4,00 6,00	N 0,25
205	0,12 0,25	14,00 15,50	1,00	0,060	0,030	16,50 18,00	1,00 1,75	N 0,32/0,40
301	0,15	2,00	1,00	0,045	0,030	16,00 18,00	6,00 8,00	
302	0,15	2,00	1,00	0,045	0,030	17,00 19,00	8,00 10,00	
302 B	0,15	2,00	2,00 3,00	0,045	0,030	17,00 19,00	8,00 10,00	
303	0,15	2,00	1,00	0,20	0,15 min.	17,00 19,00	5,00 10,00	M0 (A) 0,60
303 Se	0,15	2,00	1,00	0,20	0,060	17,00 19,00	8,00 10,00	Se 0,15 min.
<b>304</b>	<b>0,08</b>	<b>2,00</b>	<b>1,00</b>	<b>0,045</b>	<b>0,030</b>	<b>18,00 20,00</b>	<b>8,00 10,50</b>	
<b>304 L</b>	<b>0,030</b>	<b>2,00</b>	<b>1,00</b>	<b>0,045</b>	<b>0,030</b>	<b>18,00 20,00</b>	<b>8,00 12,00</b>	
304 N	0,08	2,00	1,00	0,045	0,030	18,00 20,00	8,00 10,50	N 0,10/0,16

Composição química, % máxima								
Tipo de aço ABNT	C	Mn	Si	P	S	Cr	Ni	Outros
3095	0,08	2,00	1,00	0,045	0,030	22,00 24,00	12,00 15,00	
310	0,25	2,00	1,50	0,045	0,030	24,00 26,00	19,00 22,00	
3105	0,08	2,00	1,50	0,045	0,030	24,00 26,00	19,00 22,00	
314	0,25	2,00	1,50 3,00	0,045	0,030	23,00 26,00	19,00 22,00	
<b>316</b>	<b>0,08</b>	<b>2,00</b>	<b>1,00</b>	<b>0,045</b>	<b>0,030</b>	<b>16,00 18,00</b>	<b>10,00 14,00</b>	<b>M0 2,00/3,00</b>
<b>316 L</b>	<b>0,030</b>	<b>2,00</b>	<b>1,00</b>	<b>0,045</b>	<b>0,030</b>	<b>16,00 18,00</b>	<b>10,00 14,00</b>	<b>M0 2,00/3,00</b>
316 F	0,08	2,00	1,00	0,20	0,10 min.	16,00 18,00	10,00 14,00	M0 1,75/2,50
316 N	0,08	2,00	1,00	0,045	0,030	16,00 18,00	10,00 14,00	M0 2,00/3,00 N 0,10/0,16
317	0,08	2,00	1,00	0,045	0,030	18,00 20,00	11,00 15,00	M0 3,00/4,00
317 L	0,030	2,00	1,00	0,045	0,030	18,00 20,00	11,00 15,00	M0 3,00/4,00
321	0,08	2,00	1,00	0,045	0,030	17,00 19,00	9,00 12,00	Ti $\geq$ 5 x C
329	0,10	2,00	1,00	0,040	0,030	25,00 30,00	3,00 6,00	M0 1,00/2,00
330	0,08	2,00	0,75 1,50	0,040	0,030	17,00 20,00	34,00 37,00	
347	0,08	2,00	1,00	0,045	0,030	17,00 19,00	9,00 13,00	Nb + Ta $\geq$ 10 x C
348	0,08	2,00	1,00	0,045	0,030	17,00 19,00	9,00 13,00 I	Nb + Ta $\geq$ 10 x C Ta 0,10 máx. C0 0,20 máx.
384	0,08	2,00	1,00	0,045	0,030	15,00 17,00	17,00 19,00	

# Aços inoxidáveis Duplex

- São ligas bifásicas baseadas no sistema Fe-Cr-Ni.
- Estes aços possuem, aproximadamente, a mesma proporção das fases ferrita e austenita e são caracterizados pelo seu baixo teor de carbono ( $<0,03\%$ ) e por adições de molibdênio, nitrogênio, tungstênio e cobre.
- Os teores típicos de cromo e níquel variam entre 20 e 30% e 5 e 8%, respectivamente.



# Aplicações

Esse material é muito usado em ambientes que exigem alta resistência à corrosão, como centrífugas para produção de sabonetes em indústrias químicas e bombas hidráulicas que trabalham na indústria petrolífera e de mineração, em contato com meios lamacentos

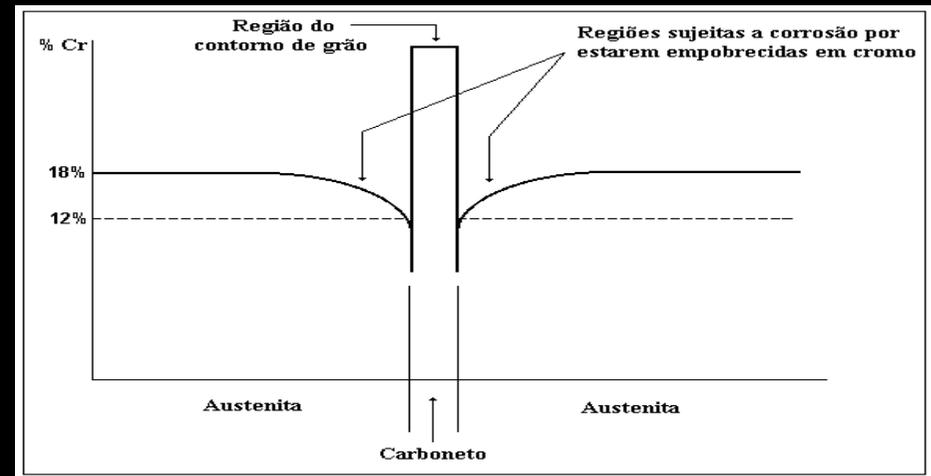


# Sensitização

- Os contornos de grãos são regiões de mais alta energia e por isso, sítios de precipitação de segundas fases
- Quando aços inoxidáveis austeníticos (304 ou 316) são aquecidos na faixa de 425°C a 815°C ou resfriados lentamente nessa temperatura pode ocorrer precipitação de carbonetos de cromo nos contornos de grãos

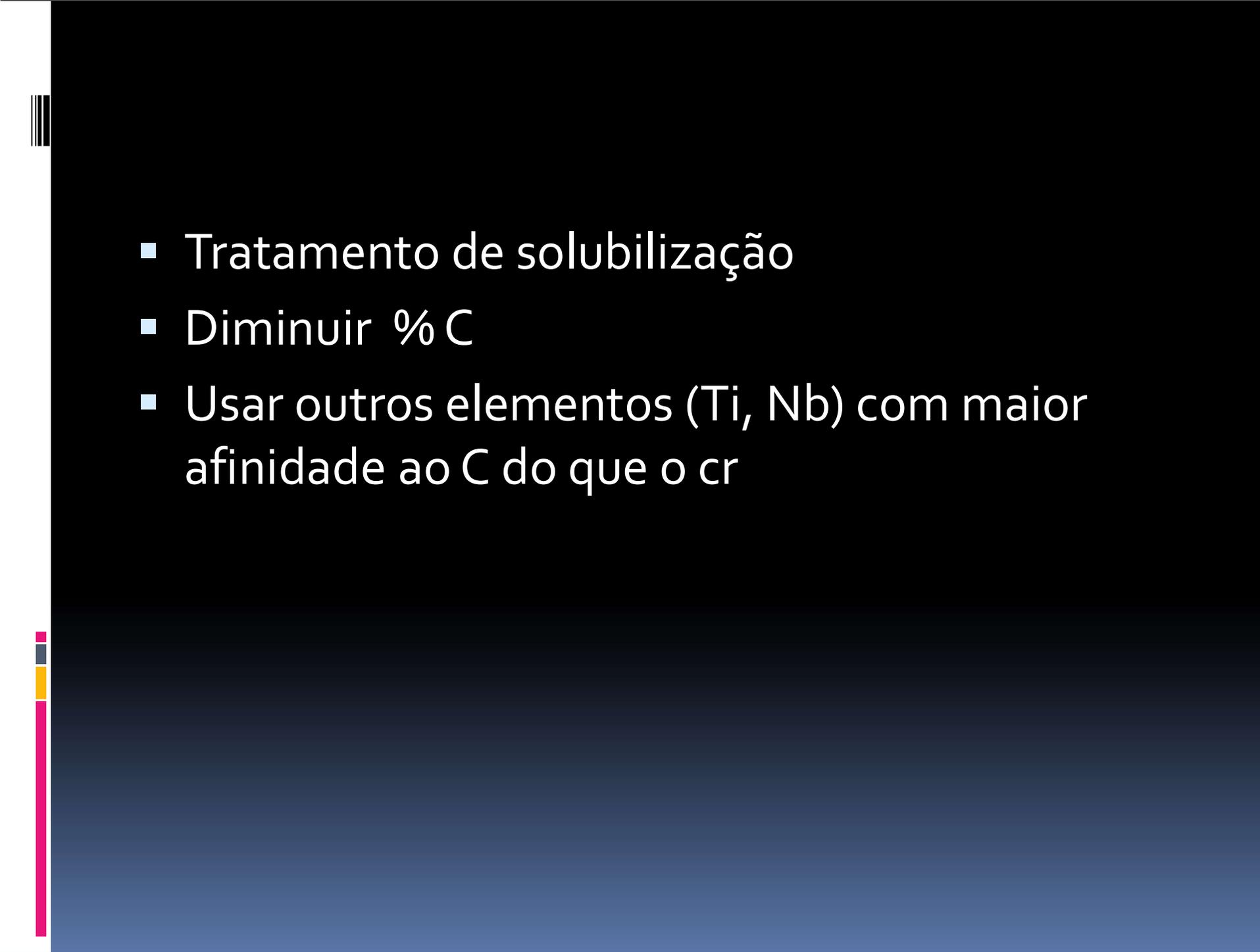
# Sensitização

- A precipitação do carboneto  $\text{Cr}_{23}\text{C}_6$  rico em cromo remove este elemento da matriz. A região da austenita ao redor dos precipitados fica empobrecida em cromo e suscetível à corrosão



# Aços inoxidáveis - Sensitização

- A sensitização nos aços inoxidáveis austeníticos pode ocorrer no resfriamento lento após solubilização ou forjamento; alívio de tensões na faixa de precipitação de carbonetos ou na soldagem
- Quando a sensitização ocorre durante a soldagem, permite posteriormente corrosão localizada na zona afetada pelo calor, na faixa que permaneceu por mais tempo na temperatura de sensitização

- 
- Tratamento de solubilização
  - Diminuir % C
  - Usar outros elementos (Ti, Nb) com maior afinidade ao C do que o Cr