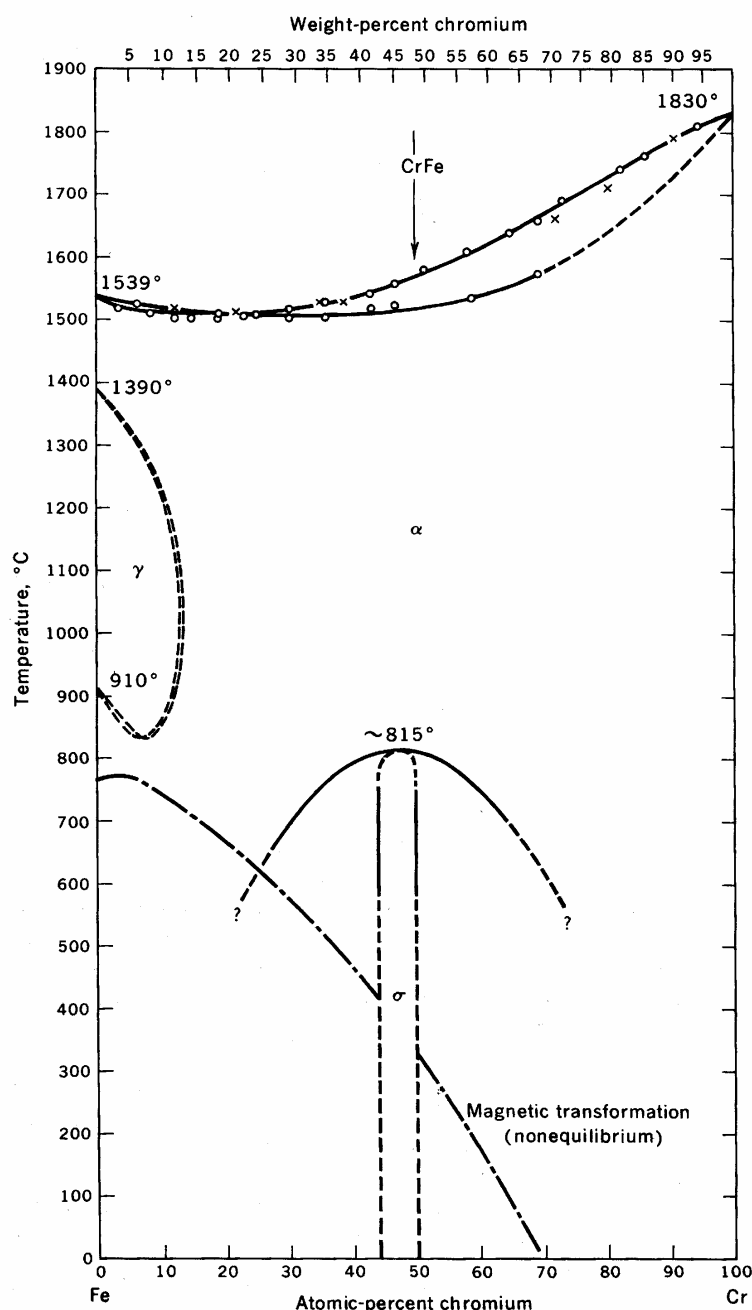
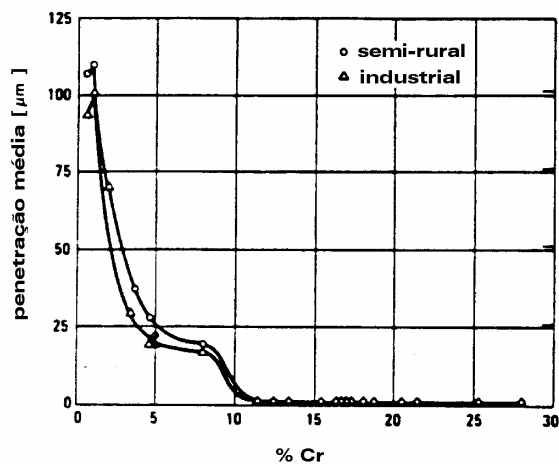


AÇOS INOXIDÁVEIS

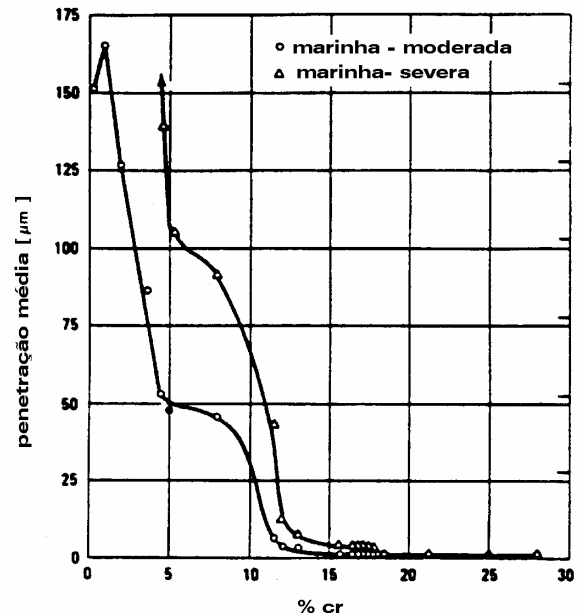
A corrosão dos aços carbono e dos aços baixa-liga é caracterizada pela presença de uma camada de oxidação permeável. Em um meio corrosivo, estes aços sofrem oxidação contínua, até a completa desintegração do componente. A adição de cromo, acima de 12%, confere a característica de "inoxidabilidade" aos aços. Isto ocorre pela formação de uma película, denominada camada passiva, composta por um óxido hidratado à base de Fe e Cr, que impede o transporte de oxigênio da atmosfera para o metal. Esta camada é aderente, transparente e impermeável.

O termo aço inoxidável não é um termo preciso, uma vez que aços denominados inoxidáveis, sob certas condições, também são passíveis de corrosão. No entanto, são considerados aços inoxidáveis, as ligas ferrosas que contenham uma quantidade de cromo superior a 10%.





Corpos-de-prova em aços contendo diferentes teores de Cr, expostos à corrosão atmosférica por 8 anos.



Os fatores que afetam a estabilidade da camada passiva e, conseqüentemente, a resistência à corrosão dos aços inoxidáveis são:

- sua composição química;
- as condições de oxidação do meio ou do eletrólito;
- o acabamento superficial do componente;
- a ocorrência de fenômenos de natureza galvânica;
- a ocorrência de corrosão localizada;
- a presença de fissuras ou frestas e
- a presença de tensões.

Efeito dos elementos de liga:

- Cromo – é o elemento responsável pela formação da camada passiva na superfície. Além da resistência à corrosão, o Cr é um elemento “alfagênico”, isto é, amplia a faixa de estabilidade da ferrita. As adições de Cr têm influência significativa nas propriedades mecânicas promovendo o endurecimento por solução sólida. Na presença de C, o Cr forma carbonetos do tipo M_7C_3 e $M_{23}C_6$. Além do Cr, diversos elementos são adicionados nos aços inoxidáveis visando melhorar suas propriedades mecânicas e resistência à corrosão:
- Níquel - elemento “gamagênico”, isto é, sua adição amplia a faixa de estabilidade da austenita. É um elemento endurecedor por solução sólida. Também pode auxiliar na formação da camada passiva (óxido de Cr-Ni) aumentando a resistência à corrosão e a resistência ao calor.
- Manganês – a adição de pequenas quantidades de Mn, associadas à presença de Ni, melhoram significativamente as funções atribuídas ao Ni.

- Molibdênio - aumenta a estabilidade da camada passiva e a resistência a corrosão em ácido sulfúrico e na água do mar (resistência a corrosão por pite).
- Titânio, tântalo e nióbio – São elementos formadores de carbonetos. Sua presença minimiza a corrosão intergranular.
- Nitrogênio - melhora a ductilidade (0,5 a 1%) e a dureza (0,3 a 0,4%). Estabiliza a austenita podendo ser empregado como um substituto de níquel.
- Carbono – a adição de C está relacionada com o tipo de aço inoxidável. Nos aços martensíticos, a adição visa aumentar a dureza da martensita e a precipitação de carbonetos, aumentando a resistência mecânica e a resistência ao desgaste. Nos aços austeníticos e ferríticos, o teor de C é limitado devido ao fenômeno de sensitização e corrosão intergranular.
- Enxofre – é normalmente considerado com impureza e mantido em teores inferiores a 0,040%. Sua adição intencional, em conjunto com o Mn, visa a formação de inclusões de MnS e conseqüente melhoria da usinabilidade (aços inoxidáveis de corte-fácil).

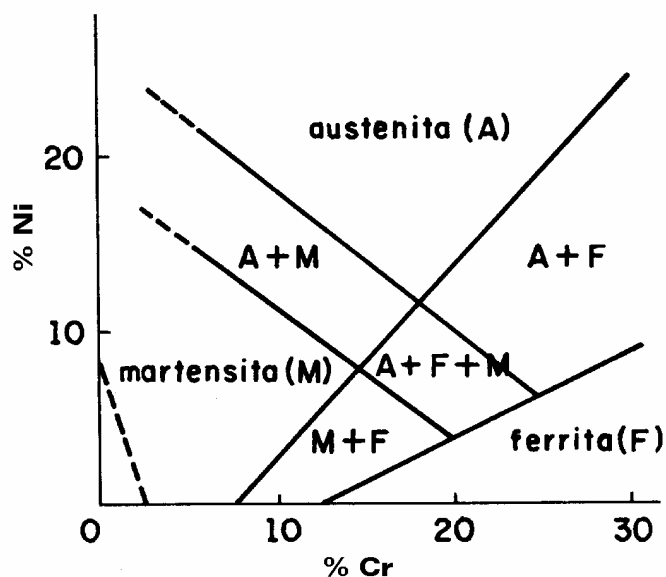
CLASSIFICAÇÃO

Quanto ao tipo de produto, os aços inoxidáveis são classificados em aços inoxidáveis conformados (fornecidos em chapas, barras, perfis ou forjados) e aços inoxidáveis fundidos (fornecidos como peças fundidas).

Os aços inoxidáveis conformados são classificados de acordo com sua microestrutura, ou seja em:

- aços inoxidáveis austeníticos;
- aços inoxidáveis martensíticos;
- aços inoxidáveis ferríticos;
- aços inoxidáveis duplex e
- aços inoxidáveis endurecíveis por precipitação (PH)

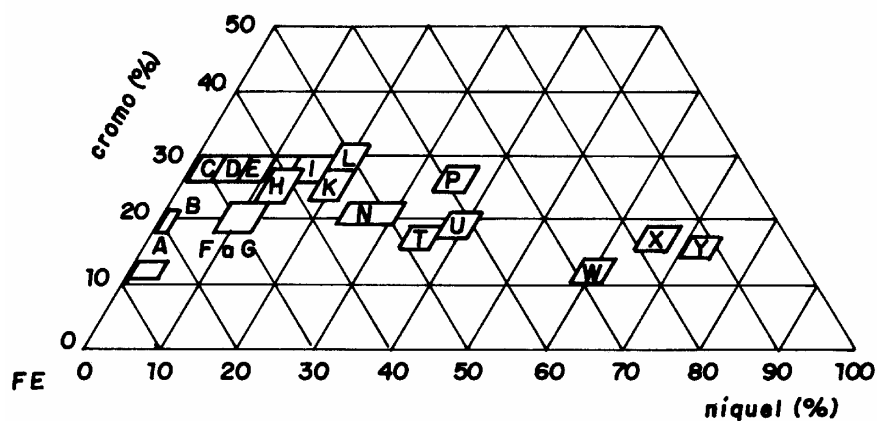
Como, essencialmente, os teores de Cr e Ni determinam a microestrutura destes aços, a figura abaixo apresenta as microestruturas resultantes para os diferentes teores de Cr e Ni.



Correlação entre os teores de Cr e Ni e a microestrutura preponderante nos aços inoxidáveis.

Os aços inoxidáveis fundidos são empregados para a fabricação de componentes por meio dos diferentes processos de fundição. A família destes aços é dividida em dois grupos:

- Aços inoxidáveis resistentes à corrosão (série C – “corrosion”). As composições químicas destes aços são muito similares as composições dos aços inoxidáveis conformados. Sua aplicações devem resistir aos meios de média corrosividade e temperaturas abaixo de 650°C. São identificados pelo prefixo C pelo sistema adotado pelo “Alloy Casting Institute” - ACI.
- Aços inoxidáveis resistentes ao calor (série H – “hot”). Suas aplicações envolvem resistência à fluência e a oxidação a quente em temperaturas de até 1200°C. As composições químicas apresentam teores mais elevados de Cr e Ni, podendo apresentar menos de 15% de Fe. São identificados por duas letras, o prefixo H e uma segunda letra que indica o teor de Cr e Ni da liga de acordo com a figura abaixo.



COMPOSIÇÃO QUÍMICA DE ALGUNS AÇOS INOXIDÁVEIS CONFORMADOS

Composição química em % em peso - faixas e limites						
AÇOS INOXIDÁVEIS AUSTENÍTICOS						
AISI nº	C (máx.)	Mn (máx.)	P (máx.)	Cr	Ni	OUTROS ELEMENTOS
201	0,15	5,5 / 7,50	0,060	16,0 / 18,0	3,5 - 5,5	N - 0,25 máx.
202	0,15	7,5 / 10,0	0,060	17,0 / 19,0	4,0 / 6,0	N - 0,25 máx.
205	0,12 / 0,25	14,0 / 15,0	0,060	16,5 / 18,0	1,0 / 1,75	N - 0,32 / 0,40
301	0,15	2,0	0,045	16,0 / 18,0	6,0 / 8,0	-
302	0,15	2,0	0,045	17,0 / 19,0	8,0 / 10,0	-
302B	0,15	2,0	0,045	17,0 / 19,0	8,0 / 10,0	Si - 2,0 / 3,0
303	0,15	2,0	.20	17,0 / 19,0	8,0 / 10,0	Zr ou Mo - 0,60 máx opcional; S - 0,15 mín.
303Se	0,15	2,0	.20	17,0 / 19,0	8,0 / 10,0	Se - 0,15 mín. ; S - 0,06 máx.
304	0,08	2,0	0,045	18,0 / 20,0	8,0 / 10,5	-
304H	0,04 / 0,10	2,0	0,045	18,0 / 20,0	8,0 / 10,5	-
304L	0,03	2,0	0,045	18,0 / 20,0	8,0 / 12,0	-
304N	0,08	2,0	0,045	18,0 / 20,0	8,0 / 10,5	N - 0,10 / 0,16
305	0,12	2,0	0,045	17,0 / 19,0	10,5 / 13,0	-
308	0,08	2,0	0,045	19,0 / 21,0	10,0 / 12,0	-
309	0,20	2,0	0,045	22,0 / 24,0	12,0 / 15,0	-
309S	0,08	2,0	0,045	22,0 / 24,0	12,0 / 15,0	-
310	0,25	2,0	0,045	24,0 / 26,0	19,0 / 22,0	Si - 1,5 máx.
310S	0,08	2,0	0,045	24,0 / 26,0	19,0 / 22,0	Si - 1,5 máx.
314	0,25	2,0	0,045	23,0 / 26,0	19,0 / 22,0	Si - 1,5 / 3,0
316	0,08	2,0	0,045	16,0 / 18,0	10,0 / 14,0	Mo - 2,0 / 3,0
316F	0,08	2,0	0,045	16,0 / 18,0	10,0 / 14,0	Mo - 1,75 / 2,5 ; S - 0,10 mín.
316H	0,04 / 0,10	2,0	0,045	16,0 / 18,0	10,0 / 14,0	Mo - 2,0 / 3,0
316L	0,03	2,0	0,045	16,0 / 18,0	10,0 / 14,0	Mo - 2,0 / 3,0
317	0,08	2,0	0,045	18,0 / 20,0	11,0 / 15,0	Mo - 3,0 / 4,0
317 L	0,03	2,0	0,045	18,0 / 20,0	11,0 / 15,0	Mo - 3,0 / 4,0
321	0,08	2,0	0,045	17,0 / 19,0	9,0 / 12,0	Ti = 5 x C mín.
321H	0,04 / 0,10	2,0	0,045	17,0 / 19,0	9,0 / 12,0	Ti = 5 x C mín.
329	0,10	2,0	0,045	25,0 / 30,0	3,0 / 6,0	Mo - 1,0 / 2,0
330	0,15	2,0	0,045	14,0 / 17,0	33,0 / 37,0	Si - 1,5 máx. ; S - 0,04 máx.
347	0,08	2,0	0,045	17,0 / 19,0	9,0 / 13,0	Nb + Ta = 10 x C mín.
347H	0,04 / 0,10	2,0	0,045	17,0 / 19,0	9,0 / 13,0	Nb + Ta = 10 x C mín.
348	0,08	2,0	0,045	17,0 / 19,0	9,0 / 13,0	Nb + Ta = 10 x C mín.; Ta - 0,1 máx.
348H	0,04 / 0,10	2,0	0,045	17,0 / 19,0	9,0 / 13,0	Nb + Ta = 10 x C mín.
384	0,08	2,0	0,045	15,0 / 17,0	17,0 / 19,0	-
385	0,08	2,0	0,045	11,5 / 13,5	14,0 / 16,0	-
AÇOS INOXIDÁVEIS MARTENSÍTICOS (TEMPERÁVEIS)						
403	0,15	1,0	0,040	11,5 / 13,0	-	Si - 0,5 máx.
410	0,15	1,0	0,040	11,5 / 13,5	-	-
414	0,15	1,0	0,040	11,5 / 13,5	1,25 / 2,5	-
416	0,15	1,25	0,060	12,0 / 14,0	-	Zr ou Mo - 0,6 máx.(opcional) ; S - 0,15 mín.
416Se	0,15	1,25	0,060	12,0 / 14,0	-	Se - 0,15 mín. ; S - 0,06 máx.
420	> 0,15	1,0	0,040	12,0 / 14,0	-	-
420F	≥ 0,15	1,25	0,060	12,0 / 14,0	-	Mo - 0,6 máx. (opcional) ; S - 0,15 mín.
422	0,20 / 0,22	1,0	0,025	11,0 / 13,0	0,5 / 1,0	Mo - 0,45 / 0,65 ; Si - 0,75 máx. ; S - 0,025 máx.
429	0,12	1,0	0,040	14,0 / 16,0	-	-
431	0,20	1,0	0,040	15,0 / 17,0	1,25 / 2,5	-
440A	0,60 / 0,75	1,0	0,040	16,0 / 18,0	-	Mo - 0,25 máx.
440B	0,75 / 0,95	1,0	0,040	16,0 / 18,0	-	Mo - 0,25 máx.
440C	0,95 / 1,20	1,0	0,040	16,0 / 18,0	-	Mo - 0,25 máx.
501	> 0,10	1,0	0,040	4,0 / 6,0	-	Mo - 0,40 / 0,65
503	0,15	1,0	0,040	6,0 / 8,0	-	Mo - 0,40 / 0,65 ; S - 0,040 máx.
504	0,15	1,0	0,040	8,0 / 10,0	-	Mo - 0,40 / 0,65 ; S - 0,040 máx.
AÇOS INOXIDÁVEIS FERRÍTICOS (NÃO TEMPERÁVEIS)						
405	0,08	1,0	0,040	11,5 / 14,5	-	Al - 0,10 / 0,3
409	0,08	1,0	0,045	10,5 / 11,8	0,5 máx.	Ti = 6 x C ou 0,75 máx. ; S - 0,045
429	0,12	1,0	0,040	14,0 / 16,0	-	-
430	0,12	1,0	0,040	16,0 / 18,0	-	-
430F	0,12	1,25	0,060	16,0 / 18,0	-	Mo - 0,6 máx. ; S - 0,15 máx.
430Se	0,12	1,25	0,060	16,0 / 18,0	-	Se - 0,15 mín. ; S - 0,06 máx.
434	0,12	1,0	0,040	16,0 / 18,0	-	Mo - 0,75 / 1,25
436	0,12	1,0	0,040	16,0 / 18,0	-	Mo - 0,75 / 1,25 ; Nb + Ta = 5 x C
442	0,20	1,0	0,040	18,0 / 23,0	-	S - 0,035 máx.
446	0,20	1,50	0,040	23,0 / 27,0	-	N - 0,25 máx.
502	0,10	1,0	0,040	4,0 / 6,0	-	Mo - 0,4 / 0,65

OBS: Enxofre: Todos os aços das séries 200, 300 400 e 500, máx. de 0,030% de S, a não ser que haja indicação de outras faixas ou limites.

Silício: Todos os aços das séries 200, 300 400 e 500, máx. de 1,0% de Si, a não ser que haja indicação de outras faixas ou limites

Os sufixos empregados indicam: **B** - aços com teores de Si entre 2 e 3%; **Se** - Aços de usinagem fácil, com adição de selênio; **S** - Aços com baixo teor de C (0,08%); **L** - aços com baixíssimo teor de C (0,03%) e **F** - aços para usinagem fácil.

COMPOSIÇÃO QUÍMICA DE ALGUNS AÇOS INOXIDÁVEIS FUNDIDOS

Designação		Composição química [% em peso]								
Fundida	Trabalhada	C (máx.)	Mn (máx.)	Si (máx.)	P (máx.)	S (máx.)	Cr	Ni	Fe	Outros
AÇOS INOXIDÁVEIS FUNDIDOS RESISTENTES À CORROSÃO (SÉRIE C)										
CA-6NM		0,06	1,00	1,00	0,040	0,040	11,5 / 14	3,5 / 4,5	Bal.	Mo - 0,4 / 1,0
CA-15	410	0,15	1,00	1,50	0,040	0,040	11,5 / 14	1,0	Bal.	
CA-15M		0,15	1,00	0,65	0,040	0,040	11,5 / 14	1,0	Bal.	Mo - 0,15 / 1,0
CA-40	420	0,40	1,00	1,50	0,040	0,040	11,5 / 14	1,0	Bal.	
CB30	431	0,30	1,00	1,50	0,040	0,040	18 / 22	2,0	Bal.	
	442	0,30	1,00	1,50	0,040	0,040	18 / 22	2,0	Bal.	
CB-7Cu	17-4PH	0,07	1,00	1,00	0,040	0,040	15,5 / 17	3,6 / 4,6	Bal.	Cu - 2,3 / 3,3
CC-50	446	0,50	1,00	1,50	0,040	0,040	26 / 30	4,0	Bal.	
CD-4MCu		0,04	1,00	1,00	0,040	0,040	25 / 26,5	4,8 / 6,0	Bal.	Mo - 1,75 / 2,25 Cu - 2,75 / 3,25
CF-30		0,30	1,50	2,00	0,040	0,040	26 / 30	8 / 11	Bal.	
CF-3	304L	0,03	1,50	2,00	0,040	0,040	17 / 21	8 / 12	Bal.	
CF-8	304	0,08	1,50	2,00	0,040	0,040	18 / 21	8 / 11	Bal.	
CF-20	302	0,20	1,50	2,00	0,040	0,040	18 / 21	8 / 11	Bal.	
CF-3M	316L	0,03	1,50	1,50	0,040	0,040	17 / 21	9 / 13	Bal.	Mo - 2,0 / 3,0
CF-8M	316	0,08	1,50	2,00	0,040	0,040	18 / 21	9 / 12	Bal.	Mo - 2,0 / 3,0
CF-8C	347	0,08	1,50	2,00	0,040	0,040	18 / 21	9 / 12	Bal.	
CF-8xC	347 Mod.	0,08	1,50	2,00	0,040	0,040	18 / 21	9 / 12	Bal.	Nb - 1,0
CF-16F	303	0,16	1,50	2,00	0,17	0,040	18 / 21	9 / 12	Bal.	Mo - 1,5
CG-8M	317	0,08	1,50	1,50	0,040	0,040	18 / 21	9 / 13	Bal.	Mo - 3,0 / 4,0
CG-12		0,12	1,50	2,00	0,040	0,040	20 / 23	10 / 13	Bal.	
CH-20	309	0,20	1,50	2,00	0,040	0,040	22 / 26	12 / 15	Bal.	
CK-20	310	0,20	2,00	2,00	0,040	0,040	23 / 27	19 / 22	Bal.	
CN-7M		0,07	1,50	1,50	0,040	0,040	19 / 22	27,5 / 30,5	Bal.	Mo - 2,0 / 3,0 Cu - 3,0 / 4,0
CW-12M		0,12	1,00	1,50	0,040	0,030	15,5 / 20	Bal.	7,5	W - 5,25 ; V - 0,4 Co - 2,5
CY-40		0,40	1,50	3,00	0,015	0,015	14 / 17	Bal.	11,0	
CZ-100		1,0	1,50	2,00	0,015	0,015		95 mín.	1,5	
N-12M		0,12	1,00	1,00	0,040	0,030	1,00	Bal.	6,0	V - 0,6 ; Co - 2,5
AÇOS INOXIDÁVEIS FUNDIDOS RESISTENTES AO CALOR (SÉRIE H)										
HÁ		0,20	0,65 min.	1,00	0,040	0,040	8 / 10	-	Bal.	Mo - 0,9 / 1,2
HC	446	0,50	1,00	2,00	0,040	0,040	26 / 30	4	Bal.	Mo - 0,5
HD		0,50	1,50	2,00	0,040	0,040	26 / 30	4 / 7	Bal.	Mo - 0,5
HE		0,2 / 0,5	2,00	2,00	0,040	0,040	26 / 30	8 / 11	Bal.	Mo - 0,5
HF	302B	0,2 / 0,4	2,00	2,00	0,040	0,040	19 / 23	9 / 12	Bal.	Mo - 0,5
HH	309	0,2 / 0,5	2,00	2,00	0,040	0,040	24 / 28	11 / 14	Bal.	Mo - 0,5 ; N - 0,2
HI		0,2 / 0,5	2,00	2,00	0,040	0,040	26 / 30	14 / 18	Bal.	Mo - 0,5
HK	310	0,2 / 0,6	2,00	2,00	0,040	0,040	24 / 28	18 / 22	Bal.	Mo - 0,5
HL		0,2 / 0,6	2,00	2,00	0,040	0,040	28 / 32	18 / 22	Bal.	Mo - 0,5
HN		0,2 / 0,5	2,00	2,00	0,040	0,040	19 / 23	23 / 27	Bal.	Mo - 0,5
HP		0,3 / 0,8	2,00	2,00	0,040	0,040	24 / 28	33 / 37	Bal.	Mo - 0,5
HT		0,3 / 0,8	2,00	2,00	0,040	0,040	15 / 19	33 / 37	Bal.	Mo - 0,5
HU		0,3 / 0,8	2,00	2,50	0,040	0,040	17 / 21	37 / 41	Bal.	Mo - 0,5
HW		0,3 / 0,8	2,00	2,50	0,040	0,040	10 / 14	58 / 62	Bal.	Mo - 0,5
HX		0,3 / 0,8	2,00	2,50	0,040	0,040	15 / 19	64 / 68	Bal.	Mo - 0,5

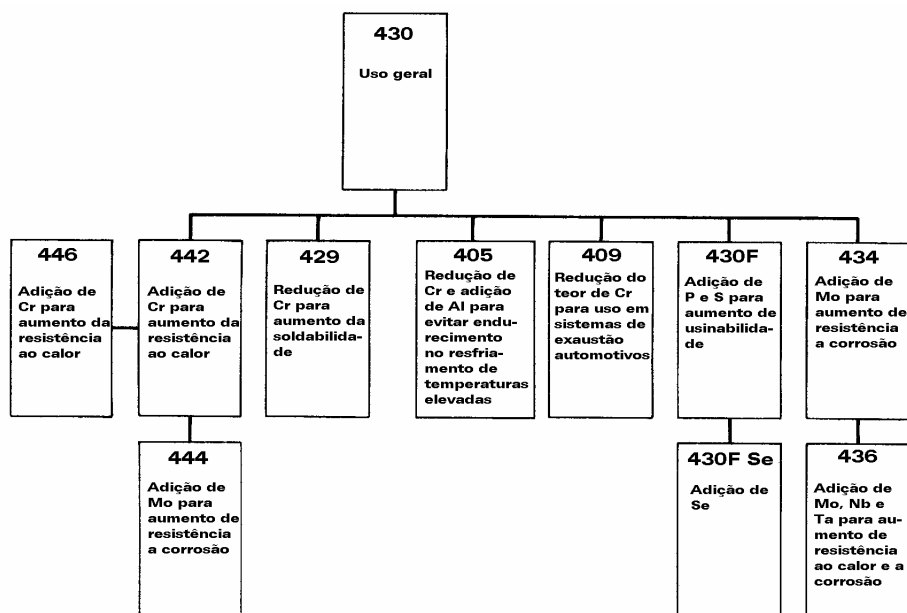
OBS: Bal.: balanço.

AÇOS INOXIDÁVEIS CONFORMADOS

AÇOS INOXIDÁVEIS FERRÍTICOS

As principais características dos aços inoxidáveis ferríticos envolvem:

- são, basicamente, ligas do sistema Fe-Cr;
- o cromo é o principal elemento de liga, podendo atingir valores superiores a 25%;
- em geral, o carbono é mantido em teores inferiores a 0,12% e assim, estes não são endurecíveis por têmpera;
- o tratamento térmico usual é o recozimento;
- estão sujeitos a sofrer fragilização pela presença de fase sigma quando mantidos, por períodos prolongados, à temperaturas da ordem de 475°C (vide diagrama Fe-Cr)e
- apresenta melhor resistência à corrosão em meios ácidos.



Classificação dos aços inoxidáveis ferríticos

APLICAÇÕES

Aço	Características principais e aplicações típicas
405 e 409	baixo Cr (10 a 14%) a presença de Al garante a estrutura ferrítica, podendo ser soldado sem que haja formação de martensita. Aplicações: radiador, caldeira, recipiente para indústria petroquímica, exaustores de automóvel
430 e 430F	é o mais usado resistente a ácidos, principalmente nítrico, orgânico e água do mar é o único não inteiramente ferrítico podendo sofrer ligeiro endurecimento. Adição de S ou Se melhora usinabilidade (430F) Aplicações: componentes das indústrias automobilística, química e de aparelhos domésticos
442	boa resistência a oxidação a altas temperaturas. Aplicações: peças de forno e câmaras de combustão.
446	o que tem mais alto Cr (23 a 27%) maior resistência a corrosão e oxidação a altas temperaturas, baixa resistência ao choque (presença de carbonetos dispersos). Aplicações: peças forno, queimador, trocadores de calor

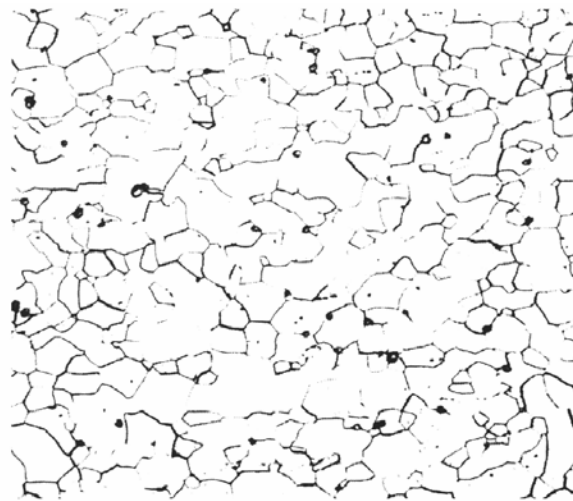
PROPRIEDADES MECÂNICAS E TRATAMENTOS TÉRMICOS

Aço AISI	Forma do produto	Condição do produto	Propriedades mecânicas (mínimas)			
			Limite de resistência [MPa]	Limite de escoamento [MPa]	Alongamento [%]	Dureza [HRB]
405	arame	recozido	480	275	20	-
	chapa	recozido	415	170	20	88 máx.
409	barra	recozido	450	240	25	75 máx.
	chapa	recozido	415	205	22	80 máx.
429	barra	recozido	490	310	30	-
	chapa	recozido	450	205	22	88 máx.
430	barra	recozido	480	275	20	-
	arame	recozido	480	275	20	-
	chapa	recozido	450	205	22	88 máx.
430 F	arame	encruado	585 a 860	-	-	-
430 Ti	barra	recozido	515	310	30	-
434	arame	recozido	545	415	33	90 máx.
	chapa	recozido	530	365	23	83 máx.
436	chapa	recozido	530	365	23	83 máx.
442	Barra	recozida	550	310	20	90 máx.
	Chapa	recozida	515	275	20	95 máx.
444	chapa	recozida	415	275	20	95 máx.
446	barra	recozida	480	275	20	-
	arame	recozida	480	275	20	-
	chapa	recozida	480	275	16	-

MICROESTRUTURA



Aço inoxidável ferrítico AISI 430 recozido a 845°C . 500X
Microestrutura constituída por matriz ferrítica e dispersão de carbonetos de cromo.

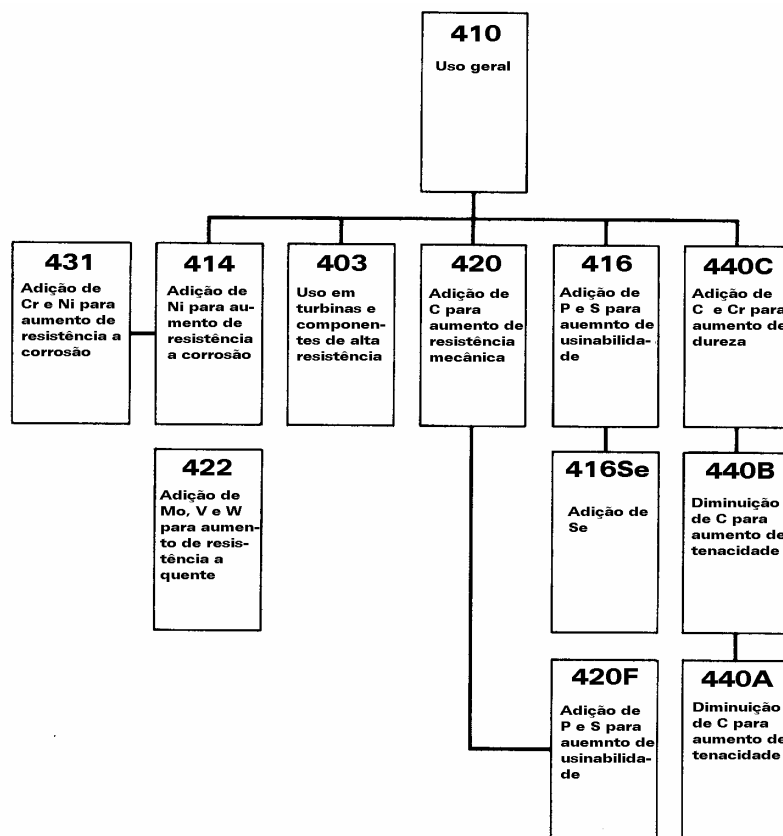


Aço inoxidável ferrítico AISI 409. Chapa recozida a 870°C. 100X
Microestrutura constituída por matriz ferrítica e dispersão de carbonetos de Ti (TiC).

AÇOS INOXIDÁVEIS MARTENSÍTICOS

As principais características dos aços inoxidáveis martensíticos envolvem:

- são ligas do sistema Fe-Cr-C, com teores de C superiores a 0,15%;
- são endurecíveis por meio dos tratamento térmicos de têmpera e revenimento, gerando martensita com dureza elevada;
- são ferromagnéticos.



Classificação dos aços inoxidáveis martensíticos

PROPRIEDADES E APLICAÇÕES

Aço	Características principais e aplicações típicas
403 410	baixo C, fácil de conformar a frio no estado recozido, laminas de turbina, compressores, tesouras, armas de fogo, componentes de micrômetros e instrumentos de medida, componentes da indústria petroquímica
420	alta dureza e razoável tenacidade após tratamento térmico. Aplicações: cutelaria, instrumentos cirúrgicos, eixos de bomba, válvulas, peças de motores a jato, mancais de esfera, parafusos, buchas
414 431	alta dureza e resistência mecânica, o 431 é o de melhor resistência a corrosão entre os aços inoxidáveis martensíticos. Aplicações: mola, parafuso, porca, peças de bomba, peça de avião, eixo de hélices marítimas, peças para fornos, componentes da indústria petroquímica
416, 416 Se 420 F	componentes submetidos a meios corrosivos brandos e que necessitam de usinagem fácil
440 (A,B,C)	elevados teores de C, alta resistência ao desgaste. Aplicações: instrumentos cirúrgicos e odontológicos, mancais de esfera, válvulas, bocais, lâminas de barbear

PROPRIEDADES MECÂNICAS APÓS TRATAMENTOS TÉRMICOS

A tabela abaixo apresenta algumas propriedades mecânicas obtidas em aços inoxidáveis martensíticos:

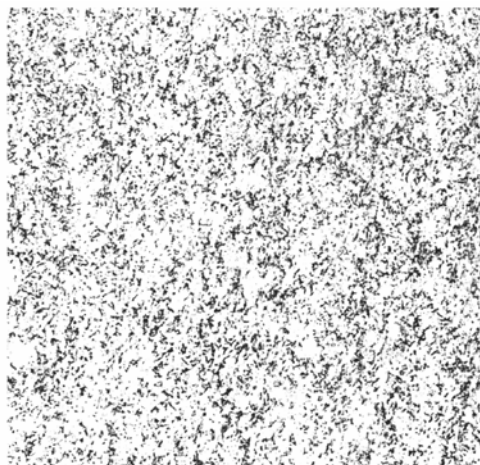
AISI	TÊMPERA		REVENIMENTO		PROPRIEDADES MECÂNICAS			
	Temperatur a [°C]	Meio de Têmpera	Temperatur a [°C]	Dureza [HB]	Limite de resistência [MPa]	Limite de escoamento [MPa]	Alonga mento [%]	Charpy [J]
430	925 - 1000	Óleo	220 - 380	360 - 380	1280	960	15	28 - 61
410	925 - 1000	Óleo	220 - 380	360 - 380	1280	960	15	28 - 61
414	975 - 1050	Óleo ou ar	220 - 400	370 - 400	1340	1000	15	40 - 82
416	925 - 1000	Óleo	220 - 380	360 - 380	1240	960	12	28 - 61
431	975 - 1070	Água, óleo ou ar	220 - 400	370 - 400	1340	1000	17	40 - 82
420	975 - 1050	Ar ou martêmpera	150 - 380	470 - 530	1720	1550	8	11 - 21
440A	1000 - 1075	Ar ou martêmpera	150 - 380	500 - 560	1850	1790	5	4 - 9
440B	1000 - 1075	Ar ou martêmpera	150 - 380	520 - 590	1920	1850	3	3 - 7
440C	1000 - 1075	Ar ou martêmpera	150 - 380	540 - 620	1960	1890	2	3 - 7

MICROESTRUTURAS



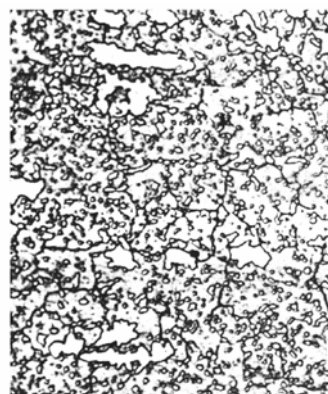
500X

Aço inoxidável AISI 440A no estado recozido. Microestrutura constituída por matriz ferrítica e dispersão de carbonetos de cromo.



100X

Aço inoxidável AISI 420 temperado e revenido. Microestrutura constituída por martensita revenida.



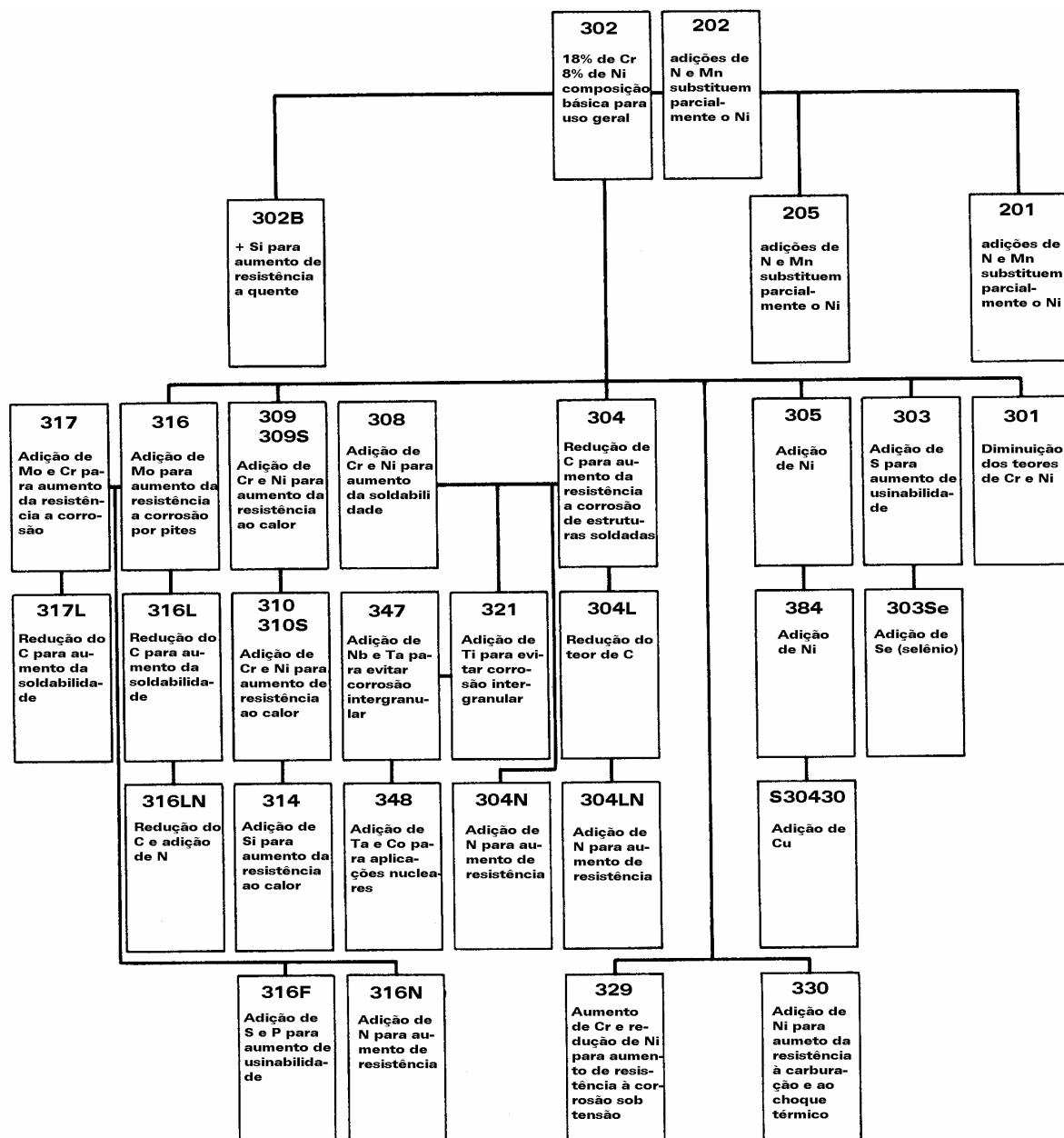
500X

Aço inoxidável AISI 440C temperado e revenido. Austenitizado a 1025°C, resfriado ao ar e submetido a revenimento duplo a 425°C. Microestrutura constituída por matriz de martensita revenida e dispersão de carbonetos esferoidizados.

AÇOS INOXIDÁVEIS AUSTENÍTICOS

As principais características dos aços inoxidáveis austeníticos envolvem:

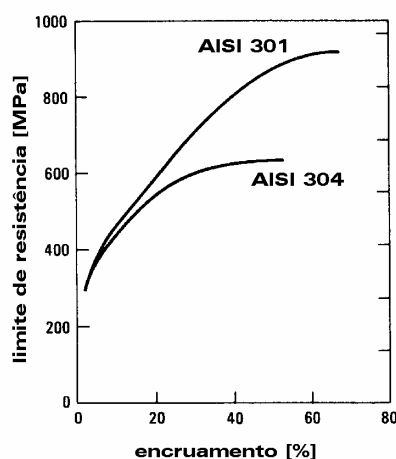
- são ligas do sistema ternário Fe-Cr-Ni;
- entre os aços inoxidáveis conformados, é a classe que apresenta maior resistência à corrosão e, conseqüentemente, são os mais utilizados em componentes industriais sujeitos à corrosão;
- apresentam microestrutura austenítica (CFC) na temperatura ambiente;
- não são ferromagnéticos;
- não são endurecíveis por têmpera;
- apresentam aumento de dureza quando encruados e
- são os mais propensos a sofrer corrosão intergranular.



Classificação dos aços inoxidáveis austeníticos

PROPRIEDADES MECÂNICAS

As propriedades mecânicas dependem das condições do material, se ele se encontra recozido ou encruado ($\frac{1}{4}$ duro, $\frac{1}{2}$ duro, $\frac{3}{4}$ duro ou totalmente duro). O aumento de dureza só pode ser obtido por encruamento. Entretanto a resposta ao encruamento depende do tipo de aço. A figura abaixo apresenta uma comparação entre resistência mecânica após encruamento entre os aços inoxidáveis austeníticos AISI 301 e AISI 304.



Variação do limite de resistência a tração com o encruamento para os aços inoxidáveis AISI 301 e 304.

Verifica-se que, para a mesma quantidade de encruamento, o aço AISI 301 apresenta um aumento de resistência muito superior ao obtido no aço AISI 304. Isto ocorre devido à existência de dois mecanismos de endurecimento no aço AISI 301: o encruamento, propriamente dito e a ocorrência de transformação martensítica induzida pela deformação. De fato, uma das características mais relevantes do aço AISI 301 é a sua capacidade de ser endurecido por meio de encruamento. A tabela I apresenta as propriedades mecânicas do aço AISI 301 em função da quantidade de encruamento.

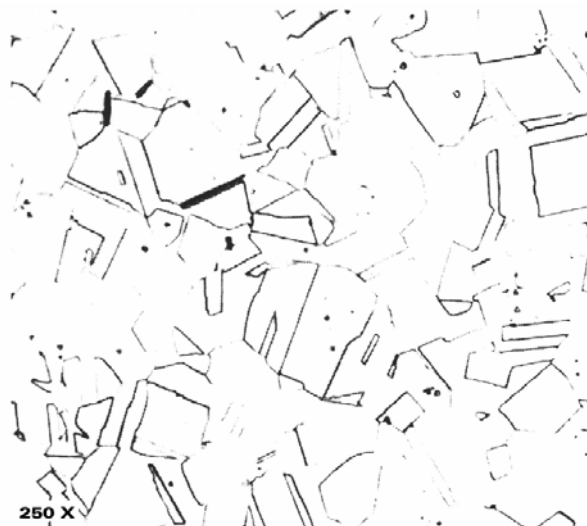
Tabela I - Propriedades mecânicas do aço inoxidável AISI 301 em função da quantidade de encruamento³.

Encruamento	Redução de área na trefilação [%]	Limite de resistência [MPa]	Limite de escoamento [MPa]	Alongamento mín. (em 25 mm) [%]
Recozido	-	515	205	40
$\frac{1}{4}$ duro	10 a 15	860	515	25
$\frac{1}{2}$ duro	20	1030	760	18
$\frac{3}{4}$ duro	30	1210	930	12
Totalmente encruado	40	1280	965	9

PRINCIPAIS APLICAÇÕES

Aço	Aplicações típicas
301, 302, 304	utensílios culinários, componentes para fins estruturais, indústria química, naval, transportes
303	Eixos de acionamento, elementos de fixação (parafusos, porcas), buchas, válvulas diversas
308	eletrodos de solda, componentes de fornos industriais
309	Componentes da indústria química, peças de fornos industriais, estufas, peças de bombas
310	eletrodos de solda, estufas, (resistente a oxidação até 1050°C)
316, 317 316L	Reatores para indústria química, cilindros para indústria de papel, próteses ortopédicas
321, 347	vasos de pressão, juntas de expansão, trocadores de calor

MICROESTRUTURAS



Aço inoxidável austenítico AISI 302 recozido a 1065°C. Microestrutura constituída por grãos de austenita. Note as macias de recozimento na austenita.



Aço inoxidável AISI 301 laminada a frio com 10% de redução (1/4 duro). Microestrutura constituída por matriz de austenita e martensita formada por deformação.

AÇOS INOXIDÁVEIS ENDURECÍVEIS POR PRECIPITAÇÃO

As principais características dos aços inoxidáveis "PH" envolvem:

- são indicados por "PH", do inglês: "precipitation hardening";
- são endurecidos por meio de tratamentos térmicos de solubilização e envelhecimento;
- são divididos em martensíticos, semi-austeníticos e austeníticos
- apresentam a melhor combinação entre resistência a corrosão, resistência mecânica e boa ductilidade.

Classe	Nome comercial	ASTM A 564	Composição química								
			C (máx)	Mn (máx)	P (máx)	S (máx)	Si (máx)	Cr	Ni	Cu	Outros
Martensíticos	17-4 PH	630	0,07	1,0	0,04	0,03	1,0	16,5	4	4	Nb+Ta = 0,3
	Stainless W	635	0,08	1,0	0,04	0,03	1,0	16,7	6,75	-	Al = 0,4 máx Ti = 0,8
Semi-austeníticos	17-7PH	631	0,09	1,0	0,04	0,03	1,0	17	7,1	-	Al = 1,10
	PH 15-7 Mo	632	0,09	1,0	0,04	0,03	1,0	15	7,1	-	Mo = 2,5
	AM-350	-	0,08	0,8	0,01	0,01	0,25	16,5	4,3	-	Al = 1,10 Mo = 2,75 N = 0,10
	AM-355	634	0,13	0,95	0,01	0,02	0,25	15,5	4,3	-	Mo = 2,75 N = 0,10
Austeníticos	17-10P	-	0,15	1,0	0,30	0,04	1,0	17	10,8	-	
	17-14CuMo	-	0,12	0,75	0,02	0,01	0,5	15,9	14,1	3	Mo = 2,5 Nb = 0,5 Ti = 0,25

PROPRIEDADES MECÂNICAS

Nome comercial	Tratamento térmico	Propriedades mecânicas			
		Limite de resistência [MPa]	Limite de escoamento [MPa]	Alongamento [%]	Dureza
Stainless W	Solubilização a 1040°C – resfriamento em óleo	930	660	14	26 HRC
	Solubilização acima e envelhecimento a 510°C por 0,5 h	1450	1380	10	44 HRC
17-4PH	Solubilização a 1040°C – resfriamento em óleo	1030	760	12	363 HB
	Solubilização acima e envelhecimento a 480°C por 1 h	1380	1280	14	44 HRC
AM-350	Solubilização entre 1010°C e 1065°C – resfriamento ao ar	1000	410	40	20 HRC
	Solubilização acima + aquecimento a 930°C, resfriamento até -75°C e envelhecimento a 455°C por 1 h.	1430	1200	13,5	45 HRC
AM-355	Mesma solubilização aplicada ao AM-350	1110	390	26	-
	Mesmo envelhecimento aplicada ao AM-350	1490	1260	19	-
17-7PH	Solubilização a 1065°C – resfriamento em óleo	890	270	35	85 HRB
	Laminado a frio e envelhecido a 480°C por 1 h.	1820	1800	2	49 HRC
PH-15-7Mo	Solubilização a 1065°C – resfriamento em óleo	890	380	35	88 HRB
	Solubilização acima + envelhecido a 480°C por 1 h.	1820	1800	2	49 HRC
17-10P	Solubilização a 1120°C – resfriamento em água	620	260	70	90 HRB
	Solubilização acima + envelhecimento a 705°C por 24 h.	930	610	25	30 HRC
17-14 CuMo	Solubilização a 1120°C – resfriamento em água	600	290	45	-
	Solubilização acima + envelhecimento a 730°C por 5h.	620	280	45	-

AÇOS INOXIDÁVEIS DUPLEX

As principais características dos aços inoxidáveis duplex envolvem:

- desenvolvidos após a segunda guerra e mantidos, até algumas décadas atrás, sob sigilo militar;
- apresentam em sua microestrutura austenita e ferrita em frações volumétricas similares;
- esta porcentagem de austenita e ferrita é função da composição química e do balanço adequado entre elementos de liga gamagênicos e alfa-gênicos;
- composição química típica: 22Cr-3Mo-5Ni;
- apresentam alta resistência a corrosão (pite, intergranular e sob tensão);
- elevadas propriedades mecânicas;
- alta ductilidade e soldabilidade;
- possuem quase o dobro do limite de escoamento dos aços inoxidáveis ferríticos e austeníticos tradicionais e alongamento maior que os martensíticos e endurecíveis por precipitação.

Efeito dos elementos de liga:

Adição	Efeito
Até 0,5% de C	Formação de carbonetos e conseqüente aumento de resistência ao desgaste
Até 0,4% de N	Aumento de resistência mecânica e à corrosão por pites
0,5 a 5% de Si	Aumento de resistência à corrosão e ao calor
0,5 a 5% de Mn	Aumento de resistência à corrosão e ao desgaste abrasivo
0,2 a 5% de Mo	Aumento de resistência à corrosão e corrosão por pites
Até 12% de Co	Aumento da soldabilidade e resistência mecânica
Até 1,5% de Nb	Aumento de resistência à corrosão e ao desgaste
Até 4% de Cu	Aumento de resistência à corrosão e Aumento de resistência mecânica pela formação de precipitados coerentes (endurecimento por precipitação)
Até 1,5% de W	Aumento de resistência à corrosão
Até 0,5% de Ti	Aumento de resistência mecânica pela formação de precipitados coerentes (endurecimento por precipitação)
Até 0,1% de Al	Aumento de resistência mecânica pela formação de precipitados coerentes (endurecimento por precipitação)

RESISTÊNCIA À CORROSÃO DOS AÇOS INOXIDÁVEIS

A tabela abaixo apresenta uma referência sobre as aplicações dos aços inoxidáveis em diferentes meios corrosivos³:

Aço	Atmosfera branda e água pura	Atmosfera agressiva		Água salgada	Meios químicos		
		industrial	marinha		brando	oxidante	reductor
Aços inoxidáveis austeníticos							
201							
202							
205							
301							
302							
302B							
303							
303Se							
304							
304H							
304L							
304N							
S30430							
305							
308							
309							
309S							
310							
310S							
314							
316							
316F							
316H							
316L							
316N							
317							
317L							
321							
321H							
329							
330							
347							
347H							
348							
348H							
384							
Aços inoxidáveis ferríticos							
405							
409							
429							
430							
430F							
430FSe							
434							
436							
442							
446							
Aços inoxidáveis martensíticos							
403							
410							
414							
416							
416Se							
420							
420F							
422							
431							
440A							
440B							
440C							

CORROSÃO DOS AÇOS INOXIDÁVEIS

Conforme já mencionado, os aços inoxidáveis apresentam um comportamento à corrosão diferente dos aços carbono pela presença da camada passiva. Esta camada é formada por óxidos hidratados de Cr e Fe e apresenta-se de forma contínua, insolúvel e não-porosa, formando uma barreira entre a metal e o meio e, conseqüentemente, evitando sua corrosão. Se, por alguma razão, a camada protetora for interrompida, esta se restabelece rapidamente (repassivação), sendo chamada, muitas vezes, camada protetora auto-selante.

É importante destacar que a repassivação só ocorre em meio oxidante (aerado) e garantida a ausência de espécies agressivas como cloretos. De fato, a passivação dos aços inoxidáveis ocorre em condições específicas e depende de vários fatores, como, por exemplo, da composição química do aço, condições de sua superfície e natureza do meio. As condições mais propícias para uma boa passivação são aquelas em que a superfície da liga está isenta de qualquer contaminação e o meio de exposição seja oxidante.

Porém, caso a camada passiva seja destruída e as condições do meio não permitam a repassivação, as taxas de corrosão podem ser elevadas, inclusive, muito superiores do que as do aço carbono. Os principais tipos de corrosão em aços inoxidáveis são: corrosão intergranular; corrosão por pites, corrosão uniforme e corrosão sob tensão.

De fato, um estudo de 1977, envolvendo 954 casos de corrosão em aços inoxidáveis, mostra que 38% ocorrem por corrosão sob tensão, 25% por corrosão por pites, 17,8% por corrosão uniforme, 11,5% por corrosão intergranular e 7,7% por outros tipos de corrosão⁴.

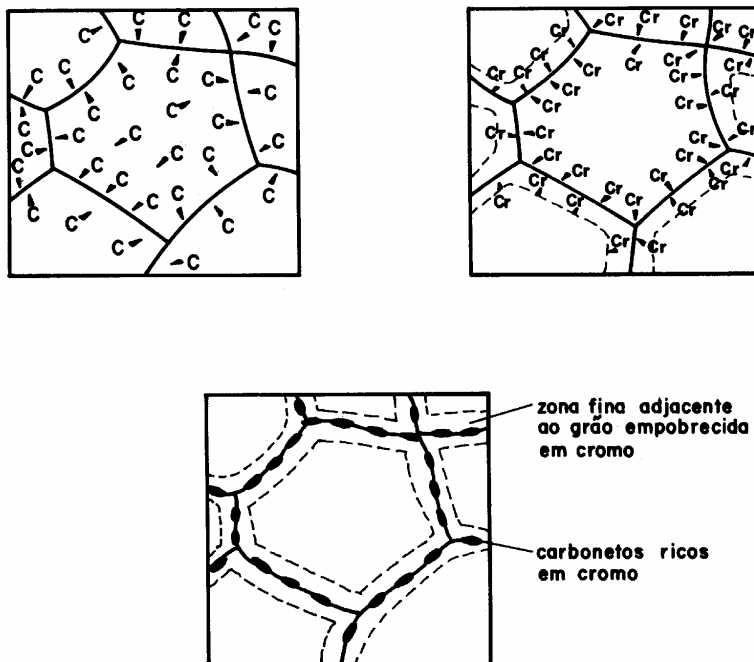
CORROSÃO INTERGRANULAR

Os aços inoxidáveis austeníticos e ferríticos podem se tornar susceptíveis à corrosão intergranular, devido à precipitação de carbonetos ricos em Cr. Entre os materiais mais susceptíveis a este tipo de corrosão estão os aços inoxidáveis e as ligas de alumínio.

A corrosão intergranular é um tipo de corrosão eletroquímica localizada nos contornos de grão de uma liga metálica. Sua ocorrência, muitas vezes, só é detectada quando ocorre a ruptura do componente.

Mecanismo para os aços inoxidáveis:

Com o aquecimento ou resfriamento lentos entre 400e 900°C, ocorre uma precipitação de carbonetos de cromo (carbonetos do tipo $M_{23}C_6$ – onde M é, basicamente, Cr e Fe) em contornos de grão. Tais carbonetos apresentam cerca de 80% em peso de Cr e a sua precipitação, empobrece de Cr as regiões adjacentes ao carboneto. Estas regiões podem atingir teores de Cr inferiores a 12%, perdendo assim, sua característica inoxidável.



Como existe uma diferença muito grande entre as áreas dos grãos e dos contornos de grão, há a formação de uma pilha eletroquímica:

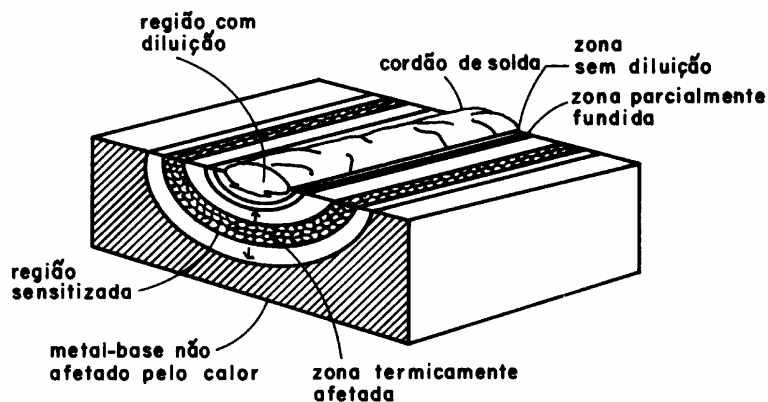
- Grãos – área catódica (grande)
- Contornos de grão – área anódica (pequena)

Assim, a corrosão é concentrada nos contornos de grão, causando a fragmentação do metal de maneira acelerada.

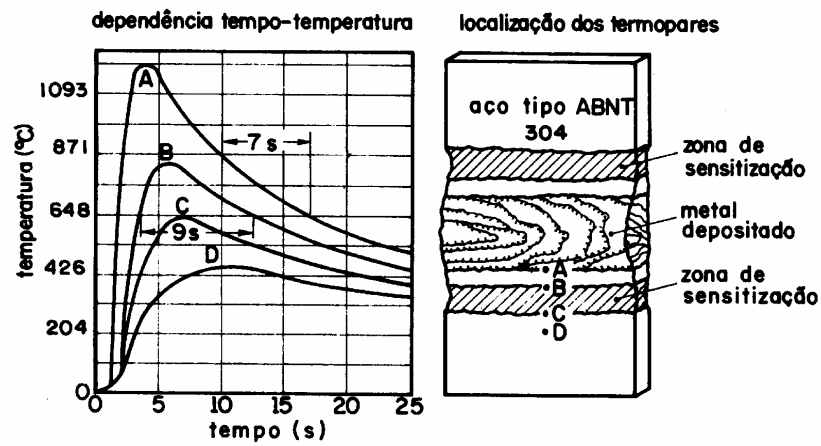
Ocorrências:

A precipitação de carbonetos ocorre na faixa de temperaturas entre 400°C e 900°C. Como a cinética desta precipitação é rápida, períodos de exposição relativamente curtos promovem a precipitação ou a sensitização dos aços inoxidáveis.

Um exemplo desta precipitação ocorre em componentes soldados:

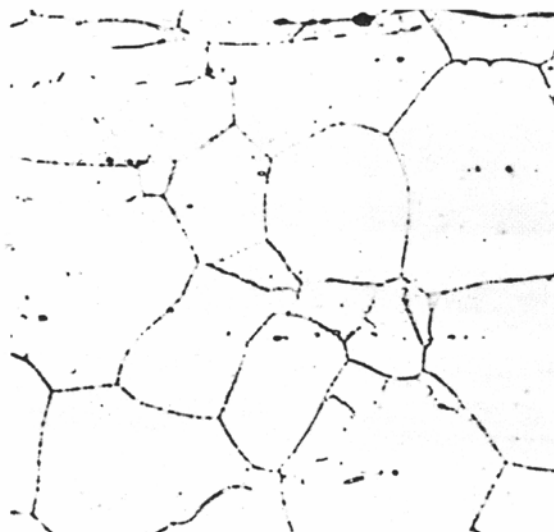


Croqui esquemático das regiões de um cordão de solda sobre uma chapa.



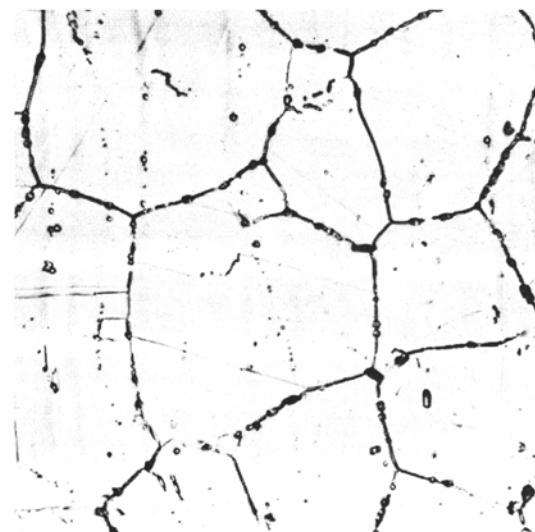
Variação de temperatura em função do tempo em 4 pontos de uma chapa de aço AISI 304 submetida a soldagem com arco elétrico.

Microestrutura de componentes sensibilizados e que sofreram corrosão intergranular:



Electrolytic: 10% sodium cyanide

500X

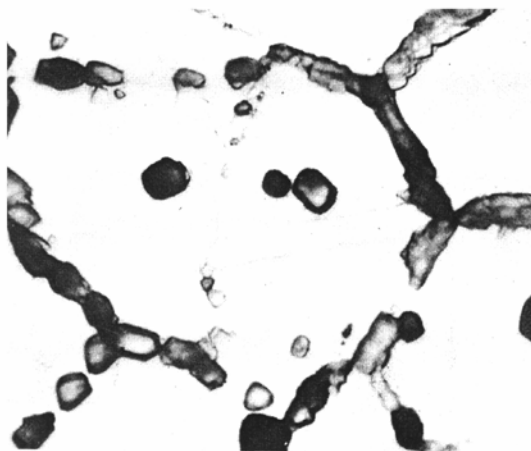


Electrolytic: 10% chromic acid

500X

Aço inoxidável AISI 302 contendo 0,15%C sensibilizado por 1h a 650°C. Microestrutura construída por matriz austenítica e rede contínua de carbonetos nos contornos de grão.

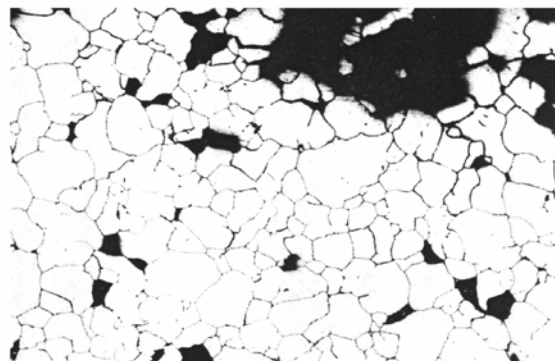
Detalhe dos carbonetos em contornos de grão precipitados a 650°C.



Electrolytic: 10% oxalic acid; 1½ minutes

750X

Aço inoxidável austenítico AISI 304 forjado. Após o forjamento, a amostra foi aquecida a 1070°C por 1 h e resfriada em água. Verifica-se a presença de carbonetos em contornos de grão.



Electrolytic: 10% sodium cyanide

75X

Hélice fabricada em aço inoxidável AISI 302 fraturada por corrosão intergranular. A foto ilustra a região sensibilizada e corroída adjacente a solda. O ambiente apresentava vapor de água e ácido sulfúrico na atmosfera.

MEDIDAS PARA EVITAR A CORROSÃO INTERGRANULAR

- **Tratamento térmico de solubilização:** consiste no aquecimento em temperaturas entre 1060 e 1100°C seguido de resfriamento rápido. Nestas temperaturas os carbonetos do tipo $M_{23}C_6$ são dissolvidos e os átomos de C e Cr ficam em solução sólida.
- **Redução do teor de C:** É obtido por meio do refino via AOD do aço, no qual são obtidos teores de C da ordem de 0,03%. São os aços denominados classe L (“low carbon”).
- **Adição de elementos de liga:** Consiste na adição de elementos de liga que possuam maior afinidade com o C que o Cr. São elementos formadores de carbonetos, como o Ti, o Nb e o Ta. Aços que contenham estes elementos são chamados de aços estabilizados.

CORROSÃO POR PITES

Os aços inoxidáveis são susceptíveis a sofrer corrosão por pites e este tipo de corrosão pode estar associado à descontinuidades locais da camada passiva, que podem ter sido originadas em imperfeições da estrutura metálica, tais como, inclusões não-metálicas, frestas, trincas ou riscos de usinagem. Constitui uma forma de corrosão localizada que se caracteriza por ataques profundos de pequena abertura externa e ocorre principalmente em materiais e ligas que apresentam camadas passivas, tais como ligas de alumínio e aços inoxidáveis.

A corrosão por pites pode ser determinada pela quebra localizada da camada passiva pela ação de espécies agressivas presentes no meio, das quais a mais significativo é o íon cloreto (Cl^-). Os íons brometo e hipoclorito também provocam corrosão por pites nos aços inoxidáveis. Dentre os cátions, os íons provenientes de oxidação dos metais, tais como, íons férrico (Fe^{3+}), cúprico (Cu^{2+}) e mercúrico (Hg^{2+}) são os mais agressivos.

Convém ressaltar que condições estagnadas são altamente prejudiciais. Assim, em equipamentos, como trocadores de calor, deve-se evitar paradas prolongadas em que os líquidos fiquem estagnados. Caso necessário, deve-se tomar o cuidado de esvaziar os tubos e lavá-los com água limpa.

A detecção deste tipo de corrosão é dificultada pelo pequeno tamanho dos pites e pelo fato destes estarem, quase sempre, recobertos com produtos de corrosão.

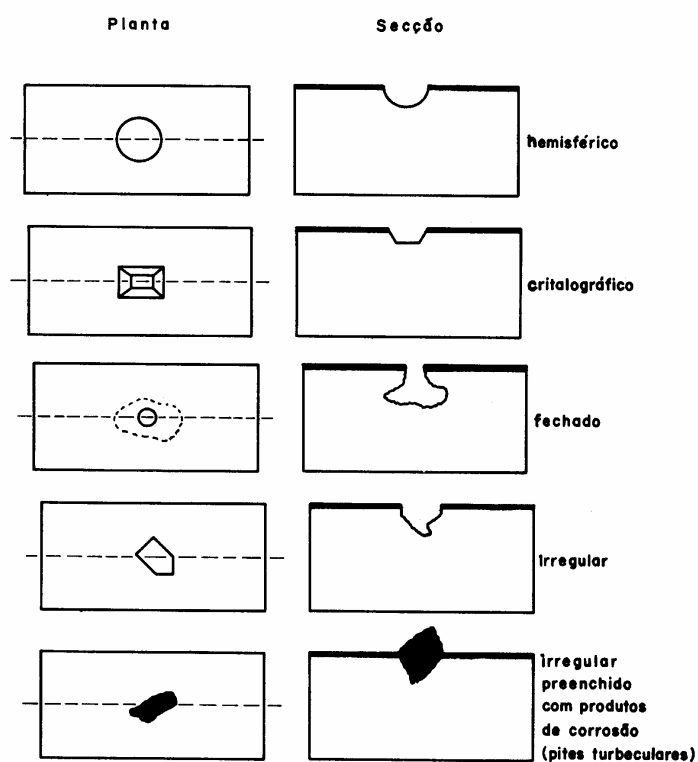
A resistência à corrosão por pites é fortemente dependente de sua composição. Assim, Cr, Ni e Mo aumentam a resistência à corrosão por pites. Impurezas tais como S, formam inclusões de MnS e constituem sítios para a nucleação de pites.

Nos aços inoxidáveis austeníticos, a presença de Mo em teores superiores a 2% determina um aumento significativo da resistência à corrosão por pites. Dentre estes aços o AISI 316 é o mais conhecido.

A tabela abaixo apresenta uma classificação qualitativa da resistência a corrosão por pites de alguns aços inoxidáveis:

Material	Resistência a corrosão por pites
Titânio	++++
Hastelloy C	++++
Aço inoxidável duplex	+++
Aço inoxidável 254 SMO	+++
Aço inoxidável AISI 316	++
Aço inoxidável AISI 304	+

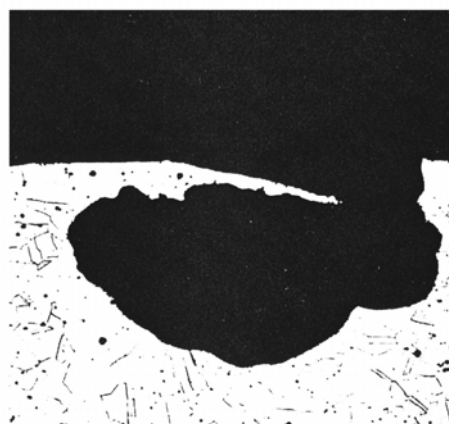
Geralmente um pite pode ser descrito como uma cavidade com diferentes formas:



Croqui esquemático de alguns tipos de corrosão por pites



Sem ataque
Pite em aço inoxidável AISI 302 sujeito a um meio contendo cloretos.



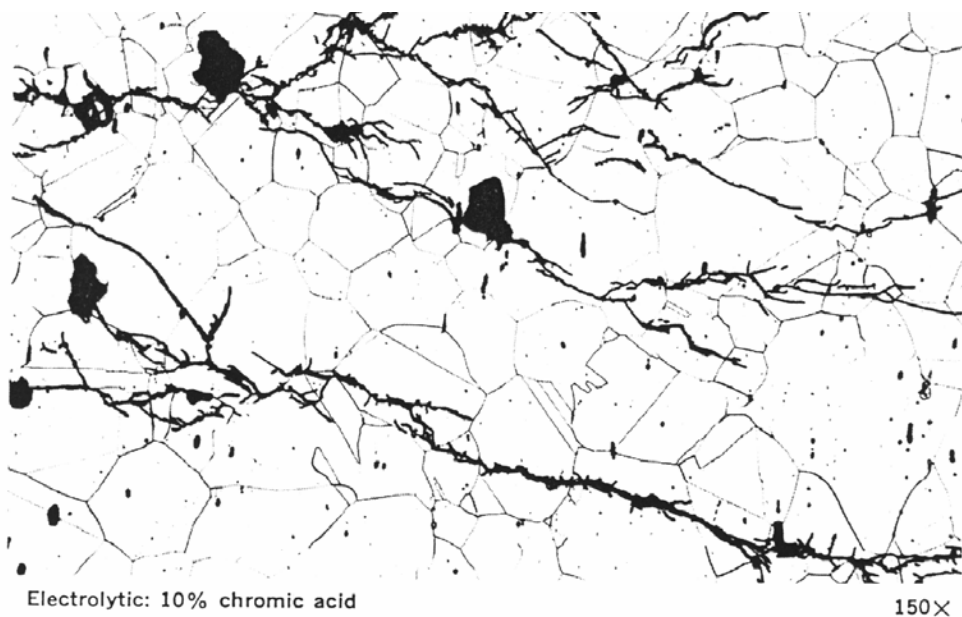
Ataque eletrolítico - 10% ácido oxálico
Aço inoxidável AISI 347 recozido. Pite provocado por exposição em meio contendo cloretos.

CORROSÃO SOB TENSÃO

A susceptibilidade à corrosão sob tensão depende do tipo de aço inoxidável. Os aços inoxidáveis ferríticos, por exemplo, são particularmente muito mais resistentes à corrosão sob tensão que os aços austeníticos. Para que este tipo de corrosão ocorra, é necessário que coexistam três condições básicas:

- tensões de tração resultantes do serviço ou tensões residuais resultantes de encruamento, operações de soldagem ou tratamento térmico;
- temperatura, a corrosão sob tensão raramente ocorre em temperaturas inferiores a 60°C e
- meio, presença de íons haletos, dos quais o cloreto (Cl^-) é o mais comum. A presença de hidróxido de sódio (NaOH) ou gás sulfúrico (H_2S) pode causar corrosão sob tensão sob condições de alta temperatura e concentração.

A morfologia das trincas de corrosão sob tensão é muito particular, facilitando, em parte, a detecção do fenômeno. As trincas podem ser intergranulares e transgranulares e há uma forte tendência a ramificações.



Electrolytic: 10% chromic acid 150X
Aço inoxidável AISI 310 recozido. Corpo-de-prova submetido a tensão de tração após exposição a um meio contendo cloretos. Microestrutura austenítica evidenciando trincas típicas de corrosão sob tensão.

A prevenção da corrosão sob tensão é fundamentada nas condições de projeto, devendo-se sempre que possível evitar:

- componentes submetidos a tensões de tração muito elevadas;
- regiões com alta concentração de tensões, tais como, cantos vivos ou riscos de usinagem;
- processos que resultem tensões residuais de tração;
- fatores que contribuam para a formação de pite;
- contaminação por cloretos e
- sempre que as condições de projeto permitirem, dar preferência aos aços inoxidáveis ferríticos, mais resistentes à corrosão sob tensão.

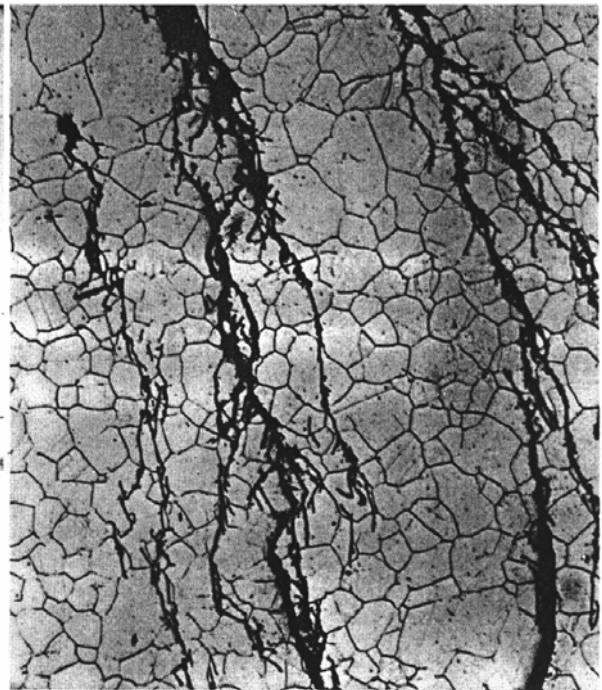
Microestrutura típica de componentes que apresentam corrosão sob tensão:



As polished (not etched)

100X

Seção transversal de uma trinca de corrosão sob tensão. Aço inoxidável AISI 304.



Electrolytic: HNO₃-acetic, then 10% oxalic

200X

Detalhe da amostra anterior submetida a ataque químico para revelar o contorno de grão. Verifica-se que as trincas de corrosão sob tensão são trans-granulares.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

1. Corrosão e Proteção contra Corrosão em Equipamentos e Estruturas Metálicas. PANOSSIAN, Z., IPT, cap.3, 1993.
2. Aços e Ligas Especiais. COSTA E SILVA, A.L., MEI, P.R., Eletrometal, cap.6, 1988.
3. Metal Handbook, Properties and selection: stainless steels, tool materials and special-purpose metals v.3, 9th edition ASM International 1980
4. Aços Inoxidáveis Austeníticos. PADILHA, A.F., GUEDES, L.C., ABM, 1995

Lista de exercícios – aços inoxidáveis

- 1- O que são aços inoxidáveis? O que garante sua inoxidabilidade? Quais os fatores que podem afetar esta característica?
- 2- O que irá ocorrer com a resistência a corrosão de um aço inoxidável austenítico se este for submetido a condições redutoras (meios contendo CO ou H₂)?
- 3- Faça uma classificação de resistência a corrosão (da maior para a menor) dos aços inoxidáveis estudados.
- 4- Quais as principais aplicações do aço AISI 440? Porque existem os tipos A, B e C?
- 5- Aços martensíticos podem sofrer corrosão intergranular após serem revenidos ?
- 6- Uma mesa para embutimento de lingüiça foi fabricada em aço AISI 304. Após um mês de utilização, observou-se a ocorrência de pontos discretos de corrosão (pites). Quais as ações que você recomendaria para solucionar o problema?
- 7- O eixo de aço inoxidável austenítico da balsa Santos-Guarujá rompeu de forma frágil após pouco tempo de uso em uma região próxima do cordão de solda. Foi utilizado um aço inoxidável que resistia aos efeitos corrosivos da água do mar.
 - a)- O que efetivamente pode ter causado a ruptura e como você provaria sua hipótese?
 - b)- Que elementos de liga havia neste aço para fazer com que ele resistisse aos efeitos corrosivos da água do mar?
 - c) Quais as ações corretivas que você implantaria no projeto deste eixo?
- 8- Qual a diferença em se soldar um aço inoxidável austenítico comum (tipo 304) e um dito estabilizado, com relação ao processo de corrosão que pode resultar após o processo de soldagem? Quais os tipos de corrosão envolvidos nos dois casos e seus mecanismos? Como evitar a corrosão para os dois materiais?
- 9- O que entende por corrosão sob tensão? Qual seu mecanismo e como evita-la?