

## X V I I I

## AÇOS RESISTENTES À CORROSÃO E AO CALOR

1 — **Introdução** — A perda de peças metálicas por ação da corrosão tem preocupado engenheiros e metalurgistas que procuram constantemente não só aperfeiçoar ou desenvolver novos métodos de proteção como também aperfeiçoar ou criar novas ligas que apresentem o característico de resistência à corrosão.

A corrosão pode ser considerada como o ataque gradual e contínuo de um metal por parte do meio circunvizinho, que pode ser ou a atmosfera mais ou menos contaminada das cidades, ou um meio químico, líquido ou gasoso.

O processo de corrosão resulta de reações químicas entre os metais e elementos não metálicos contidos nesses meios, com a conseqüente formação de compostos químicos, que são óxidos ou sais.

A velocidade do ataque e sua extensão dependem não só da natureza do meio circunvizinho, como também do tipo do metal ou liga sofrendo a ação corrosiva.

Geralmente, a proteção contra a corrosão é feita criando-se sobre a superfície do metal uma película protetora, que separa o metal-base do meio corrosivo. Essa película protetora pode ser criada artificialmente, mediante depósito propositado de uma outra substância — metálica ou orgânica — sobre a superfície do metal a proteger, ou naturalmente, isto é, produção espontânea da película superficial pela formação de um composto químico, mantido na superfície metálica por forças atômicas, resultante da reação de certos elementos de liga introduzidos no metal com o meio circunvizinho.

Essa formação espontânea da película protetora é a que interessa nos materiais objetos do presente capítulo, dando origem aos chamados **aços resistentes à corrosão**.

A condição característica dos aços resistentes à corrosão, assim como de outros metais ou ligas anti-corrosivos, de permanecerem inalterados no meio circundante chama-se «passividade».

Os metais que se podem ligar ao ferro em condições econômicas para conferir-lhe em grau maior ou menor essa condição de passividade em relação ao meio, são o cromo e o níquel principalmente. Em menor grau, o cobre, o silício e o molibdênio.

O cromo é, na realidade, o mais importante, pois quando em teores acima de 10 %, confere ao aço acentuada resistência ao ataque químico. Assim foram originados os primeiros aços inoxidáveis.

O papel do cromo como elemento protetor à corrosão está ilustrado no gráfico da Figura 55 em que se observa que, numa atmosfera industrial, o aço, à medida que o seu teor em cromo aumenta, passa de um metal de grande corrosibilidade a um metal praticamente indestrutível.

A temperaturas elevadas, verifica-se também o mesmo fato: isto é, à medida que o cromo aumenta, diminui a oxidação. Passa-se assim dos aços simplesmente inoxidáveis aos aços resistentes ao calor, cujos característicos são não só resistência à oxidação como também razoável resistência mecânica às altas temperaturas.

O gráfico da Figura 56 ilustra o efeito do cromo na resistência do aço à oxidação a altas temperaturas. Verifica-se que o efeito mais positivo do cromo, nesse caso, só se desenvolve quando o seu teor está acima de 20 %.

A ação do cromo no sentido de tornar o aço passivo em relação ao meio circunvizinho é devida à formação de uma camada superficial cromo-oxigênio, impermeável, extremamente estável, a qual, ainda que invisível, é contínua e em meios oxidantes possui uma pressão de solução tão baixa que confere ao metal um comportamento nobre.

A passividade dos aços resistentes à corrosão depende de uma série de fatores, dentre os quais, os de maior importância são:

- a) composição química;
- b) condições de oxidação;
- c) suscetibilidade à corrosão localizada («pitting»);
- d) tratamento térmico.

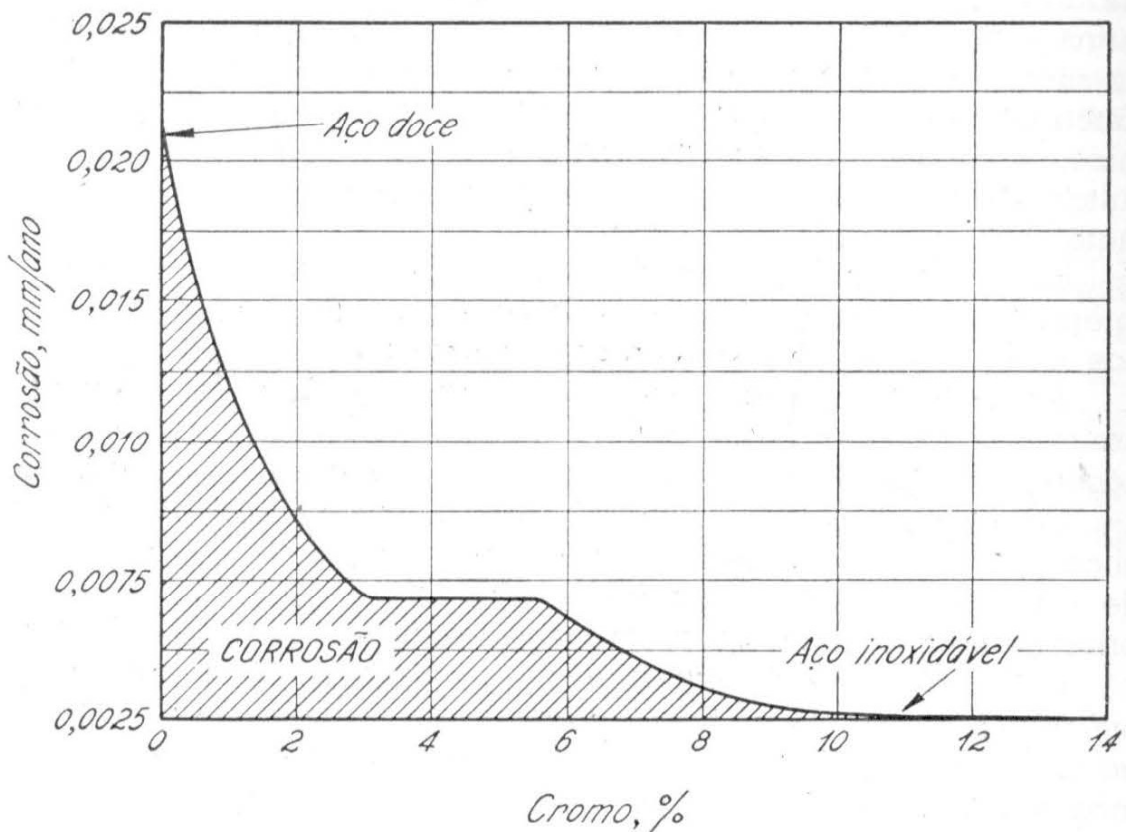


FIG. 55 — Gráfico ilustrando a passividade dos aços-cromo expostos durante 10 anos a uma atmosfera industrial (Adaptado do livro «Stainless Steels» de C.A. Zapffe editado pela American Society for Metals, 1949).

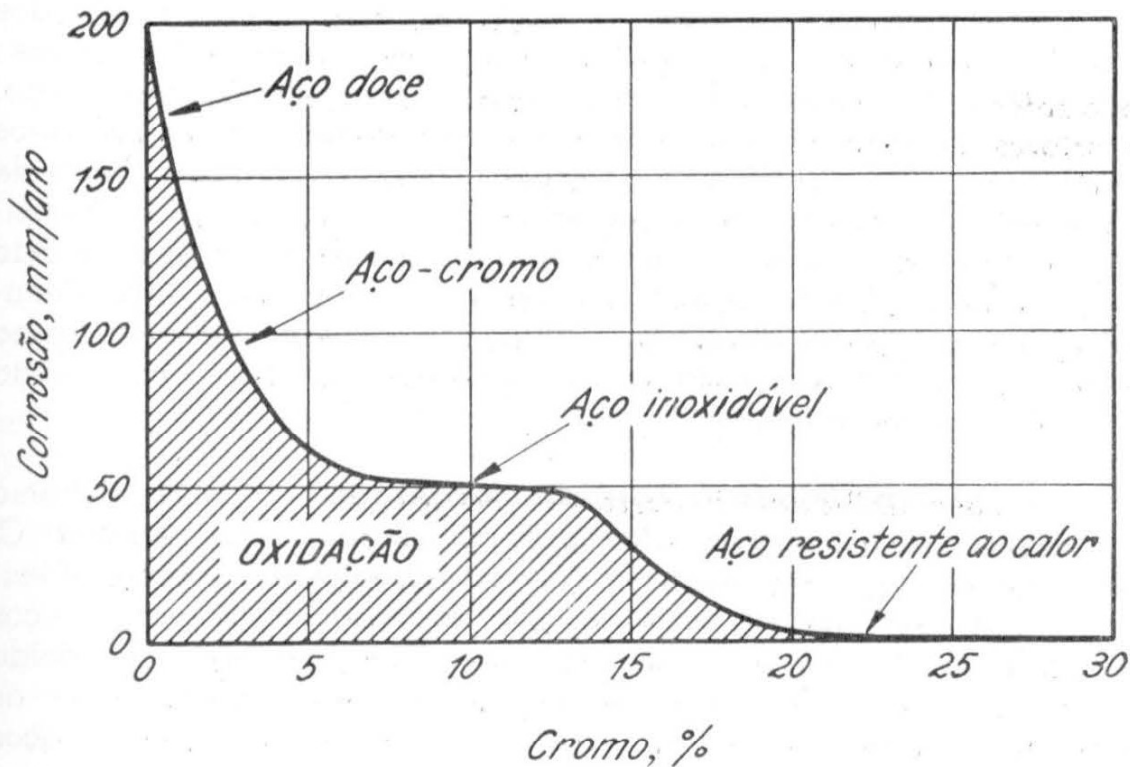


FIG. 56 — Gráfico ilustrando o efeito do cromo na resistência dos aços à oxidação a altas temperaturas. A curva mostra a penetração da oxidação de cubos de  $\frac{1}{2}$ " aquecidos durante 48 horas a  $1000^{\circ}\text{C}$  (Adaptado do livro «Stainless Steels» de C. A. Zapffe editado pela «American Society for Metals», 1949).

a) **composição química** — Os elementos a serem aqui considerados são o cromo, o níquel, o carbono e o molibdênio. O **cromo** é, como se viu, o mais importante: um teor mínimo de 12% de cromo é exigido para atingir a necessária passividade, a qual é, por assim dizer, completa com cromo de 20 a 30%. O **níquel** segue o cromo em importância; sua atuação se faz sentir não só no melhorar a resistência à corrosão dos aços inoxidáveis em soluções neutras de cloretos e em ácidos de baixa capacidade de oxidação como também no melhorar suas propriedades mecânicas. Essa influência é particularmente notável quando o teor de níquel é superior a 6 ou 7%. O **carbono**, forçosamente presente em qualquer tipo de aço, diminui ligeiramente a resistência à corrosão dos aços inoxidáveis quando no estado dissolvido, decresce-a apreciavelmente quando na forma de carbonetos livres e uniformemente distribuídos e pode causar completa desintegração dos aços inoxidáveis ao cromo-níquel quando precipitado na forma de carbonetos nos contornos dos grãos. Finalmente, o **molibdênio** geralmente melhora a passividade e melhora a resistência à corrosão nos ácidos acético, sulfúrico e sulfuroso a altas temperaturas e pressão e em soluções neutras de cloreto, particularmente na água do mar.

b) **condições de oxidação** — É evidente que a extensão e a velocidade do ataque depende da capacidade de oxidação

do meio circunvizinho. Nessas condições, pode-se classificar todos os meios corrosivos, quer líquidos, quer gasosos, em dois grupos: **oxidantes**, se tendem a tornar passiva uma determinada liga; **redutores**, se tendem a destruir sua passividade. Em relação aos ácidos fortes, pode-se verificar experimentalmente que a linha de separação entre os ácidos oxidantes e os redutores é representada pelo ácido sulfúrico. No lado oxidante, encontra-se o ácido nítrico e no redutor, os ácidos clorídrico e fluorídrico. Assim sendo, o aço inoxidável que é perfeitamente utilizado em meio como ácido nítrico, perde toda a sua utilidade quando em contáto com ácidos redutores.

c) **suscetibilidade à corrosão localizada** — Os aços-cromo são suscetíveis de serem atacados por cloro; o ion negativo Cl de soluções aquosas causa a corrosão localizada chamada «pitting». Tal fato precisa ser lembrado ao se tentar utilizar os aços inoxidáveis em contáto com qualquer concentração de ácido clorídrico. Até mesmo a atmosfera salina tende a prejudicar as excelentes qualidades de resistência à corrosão de muitos aços inoxidáveis. A corrosão localizada às vezes pode ser mais prejudicial do que a corrosão generalizada, pois pode criar pontos de concentração de tensões que poderão levar o metal à ruptura por fadiga.

d) **tratamento térmico** — O tratamento térmico pode causar, nos aços inoxidáveis Cr-Ni, a ruinosa precipitação de um constituinte de contorno de grão, numa certa faixa de temperatura. Tem-se verificado que o aquecimento dêesses aços dentro da faixa de temperaturas de 400 a 900° C, ainda que durante um tempo muito curto (poucos segundos ou minutos), pode causar a sua quase que completa desintegração, após algumas horas de exposição numa solução corrosiva. A explicação que se admite para o fenômeno é a seguinte: certos constituintes, e principalmente um carboneto complexo de cromo e ferro, dissolvem-se com facilidade cada vez maior na austenita, à medida que a temperatura sobe além de 900° C. Entretanto, entre 400 e 900° C, eles precipitam ao longo dos contornos dos grãos, em vez de no interior dos mesmos grãos como seria de esperar. Essa precipitação parece localizar o ataque químico no espaço entre as partículas precipitadas e o próprio grão, provocando a separação não só dos grãos como das próprias partículas.

Esse fenômeno pode ser contornado de diversas maneiras; por exemplo, a manutenção do aço a temperaturas acima da faixa considerada, como entre 1000 e 1100° C, causará a redissolução na matriz dos carbonetos existentes nos contornos dos grãos. Garante-se essa redissolução pelo resfriamento rápido através da faixa 400-900° C, pois se evita sua nova precipitação. Esse procedimento nem sempre é conveniente, pois pode haver oxidação e empenamento a essas elevadas temperaturas; além

disso, em certos casos, o resultado obtido pode ser destruído por um reaquecimento posterior, através daquela faixa crítica, devido, por exemplo, a uma solda que se faça necessária. Outro método de evitar esse fenômeno indesejável, é reduzir o teor de carbono do aço a valores que o tornem ineficaz na formação de carbonetos ou, na realidade, na remoção do cromo da matriz. A Figura 57 ilustra de modo claro o efeito do carbono na resistência à corrosão do conhecido aço inoxidável 18-8 (18 % de Cr e 8 % de Ni), amostras do qual, para o traçado do gráfico da figura, foram propositadamente aquecidas de modo a se ter no maior grau possível o fenômeno da precipitação de carbonetos. Verifica-se que à medida que o carbono decresce, diminui o ataque corrosivo, o mínimo verificando-se quando o mesmo atinge 0,03 %. Até cerca de 0,03 % de carbono, qualquer que tenha sido o tratamento térmico usado, o carbono ou permanece dissolvido sem qualquer efeito nocivo, ou precipita nos contornos dos grãos na forma de um carboneto de cromo, em quantidade, entretanto, ainda insuficiente para formar um envólucro contínuo em torno dos grãos de modo que não se verifica qualquer dano.

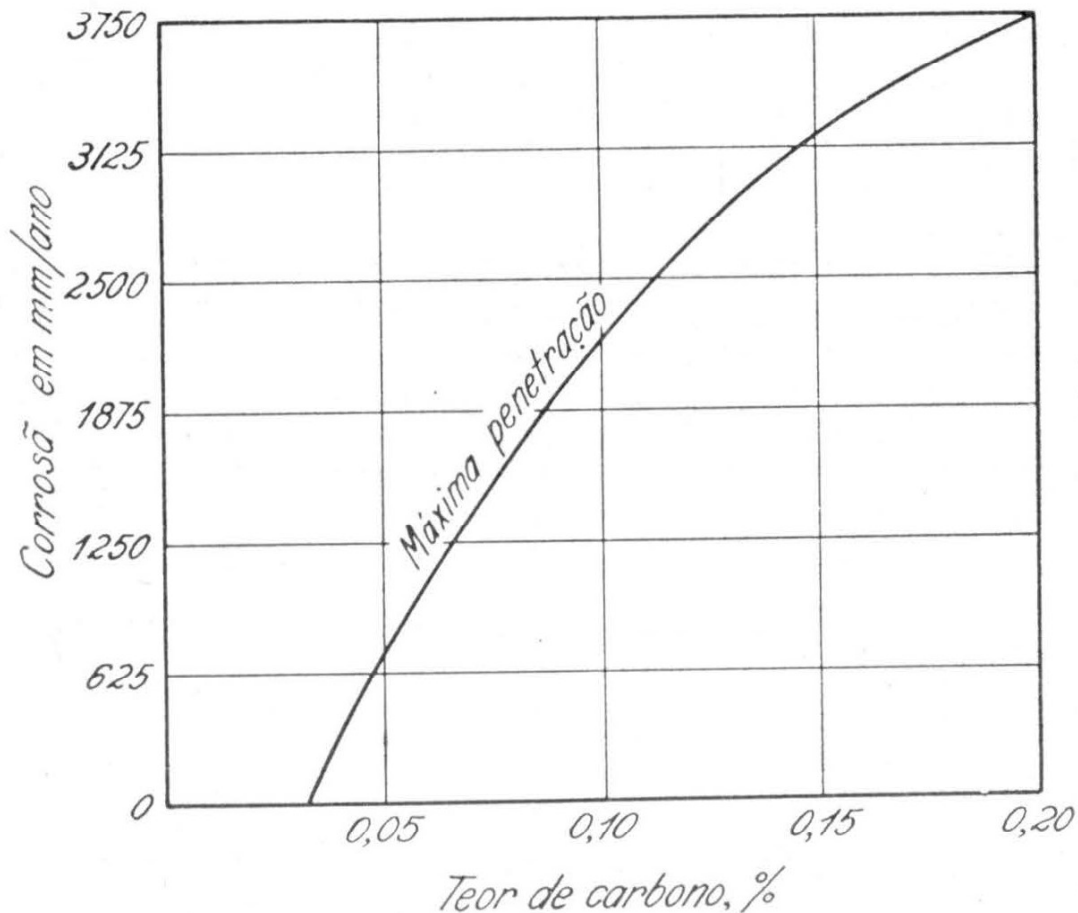


FIG. 57 — Efeito do teor de carbono sobre a corrosão de aço inoxidável 18-8 tratado termicamente de modo a produzir a máxima precipitação de carbonetos (Adaptada do livro «Stainless Steels» de C.A. Zappffe, editado pela «American Society for Metals», 1949).

Acima de 0,03 % de C, o carboneto de cromo formado começa a envolver de modo contínuo os grãos e, como êsse carboneto é muito rico em cromo, há empobrecimento do metal vizinho a tal ponto que sua inoxidabilidade é prejudicada e ocorre rápida penetração da corrosão.

Ainda outro método de prevenir o fenômeno em discussão consiste na introdução de um elemento de liga que tenha maior afinidade pelo carbono do que o cromo, evitando que êste apareça na forma de carbonetos e deixe de agir como elemento essencialmente passivador. Êste método é o mais satisfatório e o mais usado e os elementos de liga mais empregados, com êsse objetivo, são o titânio, o colômbio e o tântalo.

Como complemento das considerações até aqui feitas, pode-se fazer as seguintes generalizações :

- a) a resistência à corrosão depende da passividade;
- b) o cromo é o elemento básico para conferir passividade aos aços;
- c) condições fortemente redutoras, ou seja, a ausência de condições oxidantes, causa suscetibilidade ao ataque corrosivo;
- d) condições fortemente oxidantes promovem extraordinária resistência ao ataque;
- e) o ion de cloro é destrutivo em relação aos aços-cromo;
- f) o níquel além de melhorar as propriedades mecânicas dos aços inoxidáveis, melhora sua resistência à corrosão em soluções neutras de cloretos e ácidos de baixa capacidade de oxidação;
- g) o molibdênio aumenta a faixa de passividade dos aços inoxidáveis e melhora sua resistência à corrosão em ácidos sulfúrico e sulfuroso quentes em soluções neutras de cloretos, como água do mar;
- h) o ataque intergranular dos aços níquel-cromo, fenômeno típico nesses tipos de aços inoxidáveis, é evitado por baixos teores de carbono, tratamento térmico adequado, ou introdução de titânio e colômbio.

**2 — Classificação e constituição dos aços inoxidáveis** — A classificação mais simples e mais usada dos aços inoxidáveis é baseada na microestrutura que apresentam à temperatura ambiente. Nessas condições, são considerados os três grupos seguintes :

- I — Aços Inoxidáveis Martensíticos — ou endurecíveis;**
- II — Aços Inoxidáveis Ferríticos — não endurecíveis;**
- III — Aços Inoxidáveis Austeníticos — também não endurecíveis.**

Os grupos I e II são essencialmente ligas de ferro e cromo; o grupo III compreende as ligas ferro-cromo-níquel.

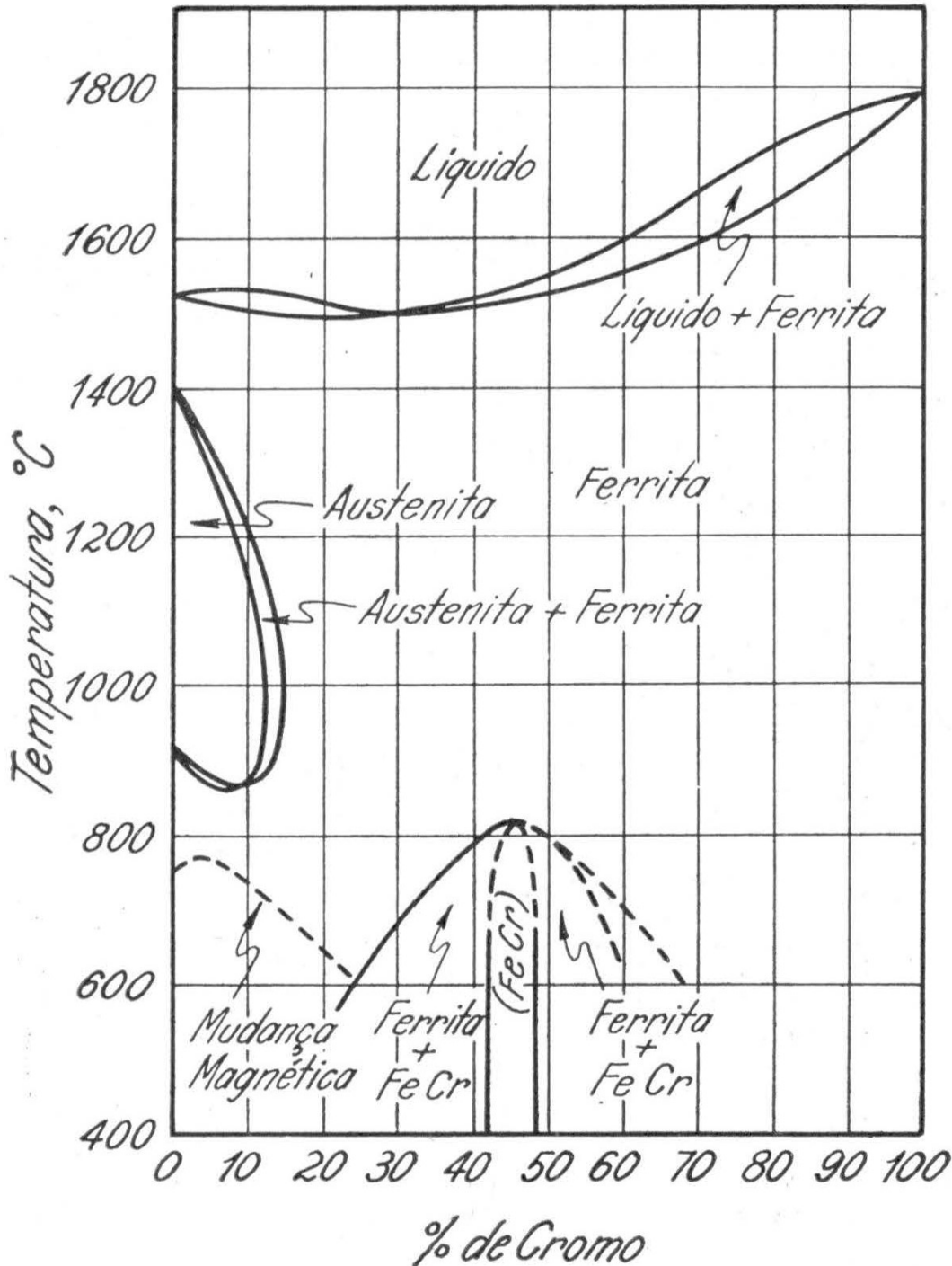


FIG. 58 — Diagrama de constituição da liga Fe-Cr (Extraído do «Metals Handbook» editado pela «American Society for Metals»).

A seguir serão estudados os efeitos dos elementos Cr e Ni no diagrama de constituição Fe-C.

Primeiramente será considerado o diagrama de constituição da liga Fe-Cr, isenta de qualquer carbono (Figura 58).

O característico principal do diagrama é o fato de apresentar a chamada «lupa austenítica», a qual indica o seguinte: todas as ligas de composição à direita da lupa, mais ou menos além de 12 ou 13 % de Cr, solidificam na forma de ferrita e como tal permanecem até a temperatura ambiente.

Nota-se também, mais ou menos no centro, a presença de uma fase quebradiça Fe-Cr chamada fase sigma.

O sistema Fe-Cr torna-se bem complexo quando o carbono está presente, e o seu estudo tem sido simplificado pela observação do que ocorre no diagrama Fe-C quando se introduz cromo em teores crescentes.

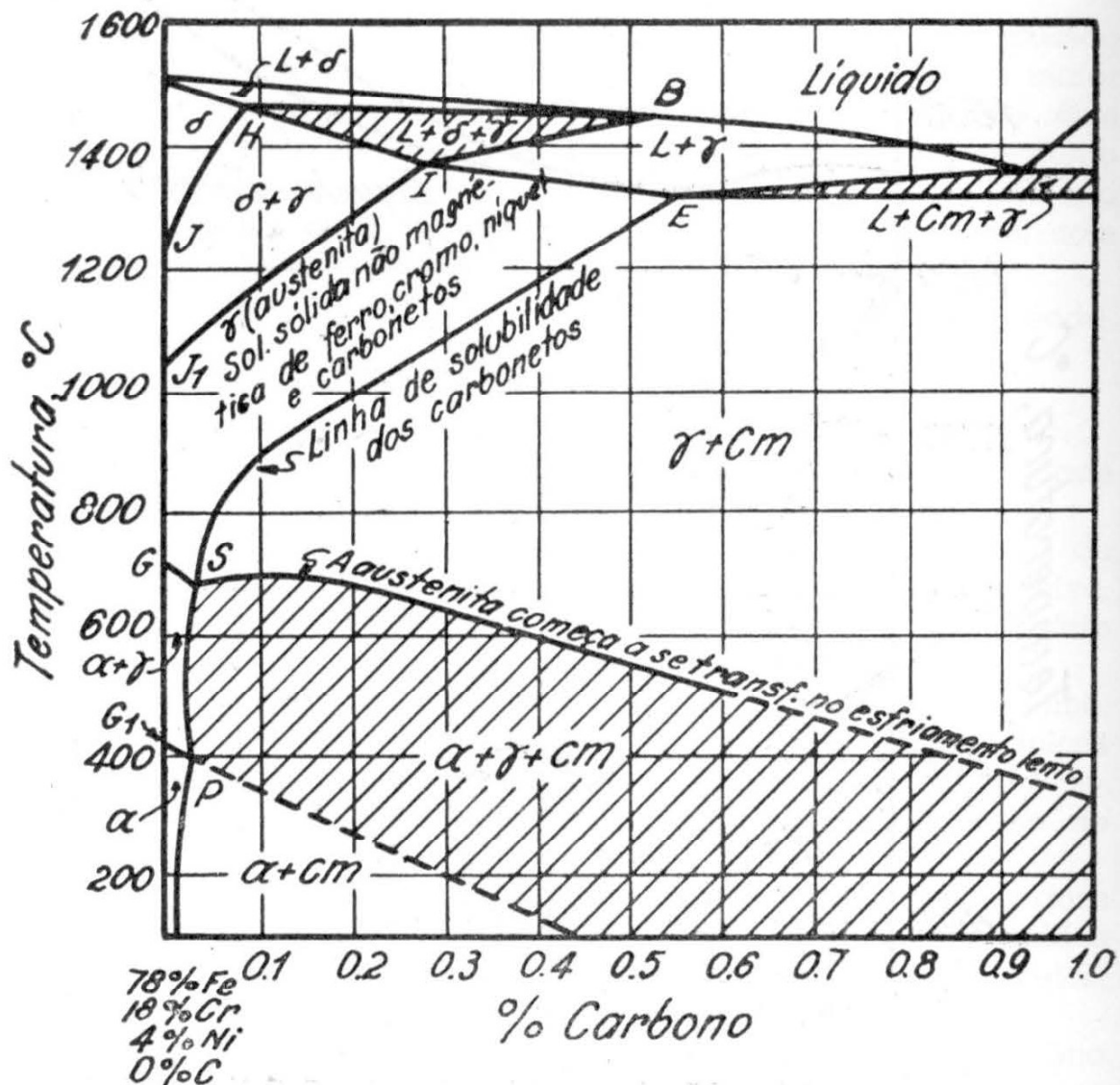


FIG. 59 — Influência do carbono numa liga de Fe-Cr-Ni com 18% Cr e 4% Ni (Extraída do livro «The Book of Stainless Steels» de E.E. Thum).

O efeito mais importante é verificado na zona austenítica, como mostra a Figura 9 (página 16). Nota-se que, à medida que o teor de cromo cresce, a faixa austenítica diminui, até praticamente desaparecer para cerca de 20 % de cromo. Esse fato leva à conclusão de que, à medida que o cromo aumenta, a composição das ligas Fe-Cr-C que permitirá obtenção de endurecimento total por têmpera fica reduzida a limites cada vez mais estreitos.

Quanto ao níquel, esse elemento tem forte tendência à formação da austenita. Sua ação na liga Fe-Cr-C, que é o que interessa nas presentes notas, pode ser vista nos diagramas das Figuras 59 e 60 em que estão representadas secções dos diagrá-



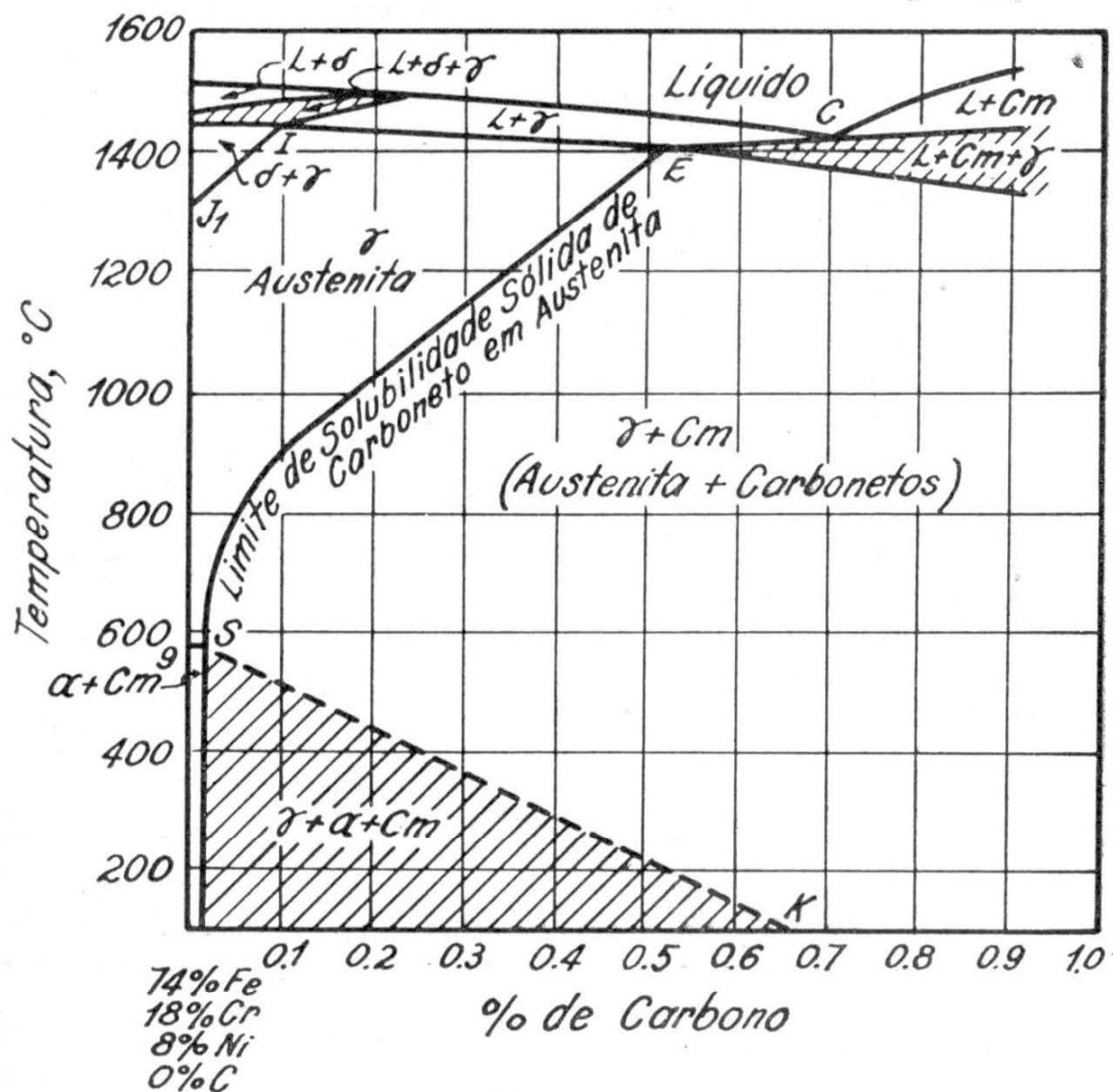


FIG. 60 — Andamento geral das reações em aços ao Ni-Cr com 18% Cr e 8% Ni (Extraída do livro «The Book of Stainless Steels» de E.E. Thum).

mas de equilíbrio Fe-Cr-Ni-C, para 18 % de Cr com 8 % e 4 % de Ni respectivamente. Verifica-se que a fase gama, à medida que aumenta o teor de Ni, torna-se cada vez mais estável a ponto de, com 8 % de níquel, para baixos teores de carbono, as ligas ficarem inteiramente austeníticas, mesmo com recozimento. Nessas condições, a liga 18-8, para todos os fins práticos, pode ser considerada **austenítica**.

3 — **Aços inoxidáveis martensíticos** — Êstes aços, caracterizados por serem aços-cromo, com Cr entre 12 e 18 %, tornam-se martensíticos e endurecem pela têmpera.

Dentro dêsse grupo podem ser consideradas ainda três classes :

- a) baixo carbono, também chamado tipo «turbina»;
- b) médio carbono, também chamado tipo «cutelaria»;
- c) alto carbono, também chamado tipo «resistente ao desgaste».

Êstes aços estão todos incluídos na classificação AISI que considera os tipos indicados na Tabela XXXI.

**T A B E L A X X X I**  
**Composição e Aplicação dos Aços Inoxidáveis Martensíticos**

Tipo AISI	COMPOSIÇÃO QUÍMICA. %				PROPRIEDADES GERAIS E APLICAÇÕES TÍPICAS
	C	Cr	Ni	Outros elementos	
403	0,15 max.	11,5 — 13,0	—	—	<b>Tipo turbina:</b> para lâminas forjadas de turbina.
410	0,15 "	11,5 — 13,5	—	—	<b>Tipo turbina:</b> aço inoxidável de baixo custo para aplicações gerais.
414	0,15 "	11,5 — 13,5	1,25 — 2,50	—	<b>Tipo turbina:</b> para molas, lâminas de faca, etc.
416	0,15 "	12,0 — 14,0	—	P, S, Se — 0,07 min.	<b>Tipo turbina:</b> de usinagem fácil.
431	0,20 max.	15,0 — 17,0	1,25 — 2,50	—	<b>Tipo turbina:</b> de melhores propriedades mecânicas e de maior resistência à corrosão dentre os tipos martensíticos ou endurecíveis.
420	acima de 0,15 %	12,0 — 14,0	—	—	<b>Tipo cutelaria:</b> instrumentos cirúrgicos, mancais de esferas, válvulas, ímãs, etc.
420 F	acima de 0,15 %	12,0 — 14,0	—	P, S, Se — 0,07 min. Zr, Mo — 0,60 max.	<b>Tipo cutelaria:</b> de usinagem fácil.
440 A	0,60 — 0,75	16,0 — 18,0	—	Mo — 0,75 max.	<b>Tipo cutelaria e resistente ao desgaste:</b> dureza elevada; para cutelaria, instrumentos, válvulas, etc
440 B	0,75 — 0,95	16,0 — 18,0	—	Mo — 0,75 max.	<b>Idem</b>
440 C	0,95 — 1,20	16,0 — 18,0	—	Mo — 0,75 max.	<b>Idem</b>

## TABELA XXXII

Tratamentos Térmicos dos Aços Inoxidáveis Martensíticos  
e Propriedades Mecânicas Resultantes

TIPO	TÉMPERA			REVENIDO		PROPRIEDADES MECÂNICAS MÉDIAS				
	Temperatura °C	Tempo min.	Meio de estriamento	Temperatura °C	Tempo h.	Dureza Brinell	Limite de resist. à tração kg/mm <sup>2</sup>	Limite de escoamento kg/mm <sup>2</sup>	Along. %	Resiliência kgm
403	925 — 1000	15 — 30	Óleo	225 — 375	1 — 3	360 — 380	130	98	15	2,8 — 6,2
410	925 — 1000	15 — 30	"	225 — 375	1 — 3	360 — 380	130	98	15	2,8 — 6,2
414	975 — 1050	15 — 30	Óleo ou ar	225 — 400	1 — 3	370 — 400	137	102	15	4,2 — 8,3
416	925 — 1000	15 — 30	Óleo	225 — 375	1 — 3	360 — 380	130	98	12	2,8 — 6,2
431	975 — 1075	15 — 30	Ar, óleo ou água	225 — 400	1 — 3	370 — 400	137	102	17	4,2 — 8,3
420	975 — 1050	15 — 30	Ar, ou óleo quente	150 — 375	1 — 2	470 — 530	175	158	8	1,1 — 2,1
440 A	1000 — 1075	15 — 30	"	150 — 375	1 — 2	500 — 560	189	182	5	0,4 — 0,8
440 B	1000 — 1075	15 — 30	"	150 — 375	1 — 2	520 — 590	196	189	3	0,3 — 0,7
440 C	1000 — 1075	15 — 30	"	100 — 375	1 — 2	540 — 620	199	193	2	0,3 — 0,7

TABELA XXXIII

## Composição e Aplicações dos Aços Inoxidáveis Ferríticos

Tipo AISI	COMPOSIÇÃO QUÍMICA, %			PROPRIEDADES GERAIS E APLICAÇÕES TÍPICAS
	C	Cr	Outros elementos	
405	0,08 max.	11,5 — 13,5	Al — 0,10 α 0,30	Não endurecível devido à presença do Al; para tubos de radiadores, caldeiras, recipientes para indústria petrolífera, etc.
406	0,15 max.	12,0 — 14,0	Al — 3,50 α 4,50	Não endurecível devido à presença do Al; resistente à oxidação a altas temperaturas; para resistências elétricas.
430	0,12 max.	14,0 — 18,0	—	É o tipo mais comum deste grupo por ser, de conformação muito fácil; muito usado em equipamento para indústria química, em equipamento de restaurantes, cozinhas, adornos de automóveis, decorações arquitetônicas interiores, etc.
430 F	0,12 max.	14,0 — 18,0	P, S, Se — 0,07 min.	Variedade de usinagem fácil; para parafusos, porcas, ferragens, etc.
442	0,20 max.	18,0 — 23,0	Zr, Mo — 0,60 max.	Para serviço a alta temperatura, quando não se exige facilidade de fabricação; para partes de fornos, etc.
443	0,20 max.	18,0 — 23,0	Cu — 0,90 α 1,23	Alta resistência à corrosão; para equipamento químico e aplicação a altas temperaturas; partes de fornos.
446	0,35 max.	23,0 — 27,0	—	Dentre os aços inoxidáveis ao cromo é o que apresenta a melhor resistência à corrosão e à oxidação até temperaturas de 1150°C; para peças de fornos, queimadores, radiadores, etc.

Os tipos 410 e 416 são provavelmente os mais usados desse grupo de aços inoxidáveis martensíticos. Esses aços são ferromagnéticos; podem ser trabalhados facilmente tanto a quente como a frio, sobretudo quando o teor de carbono é baixo. Apresentam boa resistência à corrosão quando expostos ao tempo, à ação da água ou de certas substâncias químicas. A temperatura aumenta a sua resistência à corrosão; entretanto, principalmente nos tipos de alto carbono, é imprescindível que o tratamento térmico seja efetuado às temperaturas recomendadas, que podem ser vistas na Tabela XXXII (\*) onde também estão indicados os valores resultantes para as principais propriedades mecânicas.

O revenido considerado nada mais é do que um tratamento para alívio das tensões originadas na têmpera.

4 — **Aços inoxidáveis ferríticos** — Ainda neste grupo, o cromo é o principal elemento de liga. Aqui, entretanto, seu teor é mais elevado, de modo a eliminar definitivamente a austenita. Nestas condições, a estrutura da liga é, à temperatura ambiente, com qualquer velocidade de esfriamento, ferrítica e esses aços inoxidáveis são chamados também de não-endurecíveis.

Os principais tipos e algumas aplicações típicas estão agrupados na Tabela XXXIII.

As principais propriedades mecânicas desses aços inoxidáveis não endurecíveis estão representadas na Tabela XXXIV.

T A B E L A X X X I V

## Propriedades Mecânicas dos Aços Inoxidáveis Ferríticos

TIPO	Limite de resist. à tração kg/mm <sup>2</sup>	Limite de escoamento kg/mm <sup>2</sup>	Along. em 2'' %	Dureza Brinell	Resiliência Izod kgm
405	42	24,5	20	160 — 180	2,8 α 4,8
406	59,5	—	25	—	—
430	45,5	24,5	20 α 35	130 — 165	2,1 α 4,8
430 F	49,0	31,5	15 α 30	150 — 190	2,1 α 4,8
442	52,5	31,5	30 α 35	150 — 175	0,7 α 2,1
446	56,0	35,0	25 α 30	160 — 185	0,1 α 1,4

(\*) Adaptada do livro «Stainless Steels» de Carl A. Zapffe, editado pela «American Society for Metals», 1949.

O único tratamento térmico desses aços é o recozimento, feito principalmente com o objetivo de aliviar tensões originadas em trabalho a frio. O recozimento é feito à temperatura de 800 a 850° C, de 1 a 2 horas, seguida de esfriamento em ar, óleo ou água. O tipo 430 F, de usinagem fácil é recozido a temperatura mais baixa — 675 a 800° C.

5 — **Aços inoxidáveis austeníticos** — Ainda neste grupo o cromo é o elemento de liga predominante, seu teor variando de 16 a 26 %; aparece, entretanto, o níquel, com teores de 6 % até o máximo de 22 %. Caracterizam-se por apresentarem estrutura austenítica à temperatura ambiente. Encruam com grande facilidade; apresentam também grande resistência ao choque e são difíceis de usinar a não ser que contenham enxofre ou selênio. Possuem baixa trabalhabilidade, mas soldam facilmente. São os melhores aços inoxidáveis no que diz respeito à resistência a altas temperaturas e à resistência à corrosão e à oxidação. São sujeitos, entretanto, como se viu, à prejudicial precipitação de carbonetos nos contornos dos grãos entre 400 e 900° C.

A Tabela XXXV representa os principais tipos, classificados pela AISI, de aços inoxidáveis austeníticos com suas propriedades gerais e aplicações típicas.

Do exame dessa Tabela pode-se tirar as seguintes considerações :

a) Os tipos mais populares e generalizados são os conhecidos comercialmente com a designação 18-8, com 18 % de Cr e 8 % de Ni respectivamente. São os tipos 301, 302, 304, 321 e 347. Suas variedades são : 302 B com Si elevado para melhor resistência à oxidação a altas temperaturas; 303, para usinagem fácil e 321 e 347 estabilizados contra corrosão intergranular.

b) A presença de titânio e colúmbio previne a corrosão intergranular, devida à precipitação de carbonetos nos contornos dos grãos.

c) A introdução de Si melhora a resistência à formação de casca de óxido a altas temperaturas, além de melhorar a resistência à ação de certos agentes químicos.

d) O molibdênio, que constitui provavelmente a mais útil das adições aos aços 18-8, melhora as condições gerais de resistência ao ataque de muitos agentes químicos; além disso previne a corrosão inter-granular e melhora a resistência à oxidação a altas temperaturas.

e) Teores crescentes de Cr e Ni, tipos 309 e 310, aumentam a resistência à oxidação às altas temperaturas, tornando os aços resistentes ao calor e aplicáveis em serviço à temperaturas elevadas.

O tratamento térmico usual a que se submetem os aços inoxidáveis austeníticos, é uma «austenitização» seguida de resfriamento tão rápido quanto possível até a temperatura ambiente.

**T A B E L A X X X V**  
**Composição e Aplicações dos Aços Inoxidáveis Austeníticos**

Tipo AISI	COMPOSIÇÃO QUÍMICA, %				PROPRIEDADES GERAIS E APLICAÇÕES TÍPICAS
	C	Cr	Ni	Outros elementos	
301	0,08 — 0,20	16,0 — 18,0	6,0 — 8,0	Mn — 2,0 % max.	Tipo para aplicações gerais; boa trabalhabilidade; ornamentação, utensílios domésticos, fins estruturais; equipamento para indústria química, naval, fabricação de alimentos, de transporte etc.
302	0,08 — 0,20	17,0 — 19,0	8,0 — 10,0	Mn — 2,0 % max.	Idem como acima, facilmente fabricado; para aplicações decorativas ou de resistência à corrosão.
302 B	0,08 — 0,20	17,0 — 19,0	8,0 — 10,0	Si — 2,0 a 3,0 % Mn — 2,0 % max.	Melhor resistência à formação de casca de óxido a estas temperaturas devido à presença do Si.
303	0,15 max.	17,0 — 19,0	8,0 — 10,0	P, S, Se — 0,07 min. Zr, Mo — 0,60 max.	Tipo 18-8 de usinagem fácil; para eixos, parafusos, porcas, peças de carburador, etc.
304	0,08 max.	18,0 — 20,0	8,0 — 11,0	Mn — 2,0 % max.	Tipo 18-8 de C mais baixo; soldável com menor perigo de corrosão intercrystalina; mesmas aplicações que 301 e 302.
308	0,08 max.	19,0 — 21,0	10,0 — 12,0	Mn — 2,0 % max.	Maior resistência à corrosão que o 18-8; para eletrodos de solda.
309	0,20 max.	22,0 — 24,0	12,0 — 15,0	Mn — 2,0 % max.	Bóia resistência à oxidação e mecânica a altas temperaturas; para equipamento da indústria química; peças de fornos, estufas etc.
309 S	0,08 max.	22,0 — 24,0	12,0 — 15,0	Mn — 2,0 % max.	Devido baixo C, permite soldabilidade com menor perigo de corrosão intercrystalina.
310	0,25 max.	24,0 — 26,0	19,0 — 22,0	Mn — 2,0 % max.	Bóia estabilidade às temperaturas de solda; eletrodos de solda, equipamento para indústria química; peças de fornos, estufas; resiste à oxidação até temperaturas de 1050 ou 1100°C.
316	0,10 max.	16,0 — 18,0	10,0 — 14,0	Mo — 2 a 3 %	Melhor resistência à corrosão química; para equipamento da indústria química etc.
317	0,10 max.	18,0 — 20,0	11,0 — 14,0	Mo — 3 a 4 %	Melhor resistência à corrosão que o tipo 316; idênticas aplicações.
321	0,08 max.	17,0 — 19,0	8,0 — 11,0	Ti — 5 x C min.	Tipo 18,8, estabilizado contra corrosão intercrystalina a altas temperaturas; para aplicações que exigem solda.
347	0,08 max.	17,0 — 19,0	9,0 — 12,0	Cb — 10 x C	Tipo 18-8 estabilizado para serviço a alta temperatura e onde se exige solda.

A necessidade do resfriamento rápido deriva do fato de que a melhor ductilidade se tem quando o aço está inteiramente na forma austenítica, a qual é melhor garantida mediante a mais alta velocidade de resfriamento.

As temperaturas usadas variam de 1000° a 1100° C; mais precisamente os tipos 301, 302, 303, 304 e 308 são austenitizados entre 950° e 1125° C; os tipos 309, 316 e 317, entre 1000° e 1125°; o tipo 310 entre 1050° e 1075°; o tipo 321 entre 925° e 1075° e o tipo 347 entre 925° e 1100° C. As faixas mais elevadas são usadas ou quando se deseja menor dureza, ou para os tipos com teores mais elevados de liga ou ainda quando se quer garantir completa dissolução dos carbonetos livres. O resfriamento é feito em água podendo as peças pequenas serem resfriadas ao ar.

Costuma-se, também, fazer um tratamento a baixa temperatura para alívio de tensões nos aços austeníticos trabalhados a frio. As temperaturas usadas variam de 275° a 450° C. Há, com êsse tratamento, igualmente certa melhora no escoamento e na resistência à tração do aço.

As principais propriedades mecânicas dos aços inoxidáveis austeníticos, depois de convenientemente austenitizados, estão indicadas na Tabela XXXVI.

T A B E L A X X X V I

## Propriedades Mecânicas dos Aços Inoxidáveis Austeníticos

TIPO	Limite de resist. à tração kg/mm <sup>2</sup>	Limite de escoamento kg/mm <sup>2</sup>	Along. em 2" %	Dureza Brinell	Resiliência Izod kgm
301	70	28	50 — 60	155 — 175	9,7 — 15,2
302	59,5	24,5	50 — 60	140 — 160	9,7 — 15,2
302 B	66,5	28,0	50 — 60	150 — 170	11 — 13,8
303	59,5	24,5	30 — 55	155 — 175	9,7 — 15,2
304	59,5	21,0	50 — 60	140 — 160	9,7 — 15,2
308	59,5	24,5	50 — 60	145 — 165	—
309	63,0	28,0	45 — 50	165 — 185	9,7 — 15,2
310	63,0	28,0	45 — 50	165 — 185	6,9 — 13,8
316	56,0	24,5	50 — 60	140 — 160	9,7 — 15,2
317	56,0	24,5	50 — 60	140 — 160	9,7 — 15,2
321	59,5	24,5	50 — 55	145 — 160	9,7 — 15,2
347	59,5	24,5	45 — 55	145 — 160	9,7 — 15,2

6 — Aços resistentes ao calor — a) **Introdução** — Os materiais metálicos resistentes ao calor são os que apresentam a capacidade de suportarem as condições de serviço quando ex-



postos quer continuamente quer intermitentemente a temperaturas superiores a cerca de 550° C.

Muitos aços-carbono de baixo teor em liga são usados com certo êxito, quando sujeitos a esforços de pequeno vulto, a temperaturas até aproximadamente 480° C.

Dentre os aços, entretanto, os mais indicados para serviço a alta temperatura, são os que contém cromo ou cromo e níquel em altos teores.

Os principais campos de aplicação desses materiais estão localizados nas indústrias de refino de petróleo, de fornos, de equipamento químico, equipamento para tratamento térmico, equipamento para usinas de força, turbinas a gás e a vapor, válvulas de automóvel, aviões, etc...

Quais os requisitos exigíveis de um material que opera a altas temperaturas?

É óbvio que a temperaturas elevadas — acima, por exemplo de 425° C — as propriedades que os metais apresentam à temperatura ambiente começam a perder seu significado, pois, além do valor da carga e da velocidade e duração de sua aplicação, outros fatores devem ser considerados. As propriedades que devem ser consideradas às altas temperaturas são: fluência («creep»), expansão térmica, estabilidade estrutural e resistência à corrosão; em segundo lugar, limite de fadiga e resiliência.

Sabe-se que a fluência é a deformação lenta que ocorre num metal quando o mesmo fica sujeito a uma carga constante durante longo período de tempo. Em aplicações a altas temperaturas, como turbinas a gás ou a vapor, esse característico é de grande importância, porque nesses como em muitos outros casos de serviço a temperaturas elevadas, uma estrutura ou uma peça metálica fica inutilizada se, em serviço, se alongar acima de 0,01 a 0,10 %.

A expansão térmica é característico muito importante sob o ponto de vista de projeto, quando se exige nas peças tolerâncias de dimensões muito estreitas.

A estabilidade estrutural é outro requisito que deve ser considerado porque certas ligas, ainda que apresentando alta resistência inicial, quando sujeitas a elevadas temperaturas podem falhar a tensões muito menores devido a ter ocorrido alguma modificação na sua estrutura interna, como por exemplo, precipitação de constituintes frágeis nos contornos dos grãos e outras alterações.

É evidente a importância da resistência à corrosão, sobretudo quando se considera que quase todos os meios tendem a se tornar corrosivos quando as temperaturas são elevadas. As consequências do ataque corrosivo são mais graves, quando a corrosão for localizada ou quando for de natureza intergranular.

A fadiga é afetada pela corrosão diferencial ou localizada e pela instabilidade estrutural, pois tais fenômenos causam concentração de tensões.

**TABELA XXXVII**  
**Composição dos Aços Resistentes ao Calor**

TIPO	C	Mn	Si	Cr	Ni	Mo	W	Cb	Ti	Outros elementos
<b>AÇOS — CROMO</b>										
501 AISI	0,10 (min.)	1,00 (max.)	1,00 (max.)	4,00 — 6,00	—	—	—	—	—	—
7 Cr	0,15 (max.)	0,60 ( " )	0,50 — 1,00	6,00 — 8,00	—	0,45 — 0,65	—	—	—	—
9 Cr	0,15 ( " )	0,60 ( " )	1,00 (max.)	8,00 — 10,0	—	0,90 — 1,10	—	—	—	—
403 AISI	0,15 ( " )	1,00 ( " )	0,50 ( " )	11,5 — 13,0	—	—	—	—	—	—
410 AISI	0,15 ( " )	1,00 ( " )	1,00 ( " )	11,5 — 13,5	—	—	—	—	—	—
430 AISI	0,12 ( " )	1,00 ( " )	1,00 ( " )	14,0 — 18,0	—	—	—	—	—	—
442 AISI	0,25 ( " )	1,00 ( " )	1,00 ( " )	18,0 — 23,0	—	—	—	—	—	—
446 AISI	0,35 ( " )	1,50 ( " )	1,00 ( " )	23,0 — 27,0	—	—	—	—	—	(max.) N — 0,25
<b>AÇOS — CROMO — NIQUEL</b>										
302 AISI	0,08 — 0,20	2,00 (max.)	1,00 (max.)	17,0 — 19,0	8,0 — 10,0	—	—	—	—	—
302B AISI	0,08 — 0,20	2,00 ( " )	2,0 — 3,0	17,0 — 19,0	8,0 — 10,0	—	—	—	—	—
304 AISI	0,08 (max.)	2,00 ( " )	1,00 (max.)	18,0 — 20,0	8,0 — 11,0	—	—	—	—	—
309 AISI	0,20 ( " )	2,00 ( " )	1,00 ( " )	22,0 — 24,0	12,0 — 15,0	—	—	—	—	—
310 AISI	0,25 ( " )	2,00 ( " )	1,50 ( " )	24,0 — 26,0	19,0 — 22,0	—	—	—	—	—
316 AISI	0,10 ( " )	2,00 ( " )	1,00 ( " )	16,0 — 18,0	10,0 — 14,0	2,0 — 3,0	—	—	5 x C	—
321 AISI	0,08 ( " )	2,00 ( " )	1,00 ( " )	17,0 — 19,0	8,0 — 11,0	—	—	10 x C	—	—
347 AISI	0,08 ( " )	2,00 ( " )	1,00 ( " )	17,0 — 19,0	9,0 — 12,0	—	—	0,30	0,20	—
19-9 DL	0,25	0,50	0,60	19,0	9,0	1,25	1,20	—	—	—
16-25-6 (Timken)	0,10	1,35	0,70	16,72	25,23	6,25	—	—	—	N — 0,147

Em resumo, podem ser feitas as seguintes generalizações relativamente aos aços resistentes ao calor:

— estruturas estáveis são mais resistentes que as meta-estáveis;

— estrutura de granulação grosseira é mais resistente que a de granulação fina (oposto do que ocorre à temperatura ambiente);

— estruturas austeníticas são mais resistentes que as feríticas.

b) **Tipos de aços resistentes ao calor** — Dois grupos principais devem ser considerados:

— aços-cromo;

— aços-cromo-niquel.

Os principais tipos dos dois grupos estão representados na Tabela XXXVII.

A resistência à oxidação desses aços está indicada na Tabela XXXVIII, onde se pode notar as temperaturas máximas para operação satisfatória dos aços em questão, sem que haja excessiva formação de casca de óxido.

### TABELA XXXVIII

**Temperaturas Máximas Comparativas para Operação de Aços Resistentes ao Calor sem excessiva Oxidação**

Aços — Cr	Temperatura máxima °C	Aços — Cr-Ni	Temperatura máxima °C
501 AISI	620	302 — 304 AISI	900
7 Cr	650	302 B AISI	985
9 Cr	675	309 AISI	1090
403 — 410 AISI	705	310 AISI	1150
430 AISI	840	316 AISI	900
442 AISI	955	321 AISI	900
446 AISI	1090	347 AISI	900

Quanto às propriedades mecânicas, a Tabela XXXIX mostra, para alguns tipos de aços resistentes ao calor, os valores do limite de resistência à tração, da resistência à ruptura e da fluência a várias temperaturas.

O gráfico da Figura 61 mostra as propriedades de resistência à ruptura e fluência em função de várias temperaturas, para diversos tipos de aços resistentes ao calor. Estão incluídas também as curvas para um aço de baixo carbono, para servir, por assim dizer, de ponto de referência.

## TABELA XXXIX

Algumas Propriedades Mecânicas de certos Aços Resistentes ao Calor em Função da Temperatura \*

Temperatura oC	Tipo 501			Tipo 410			Tipo 446			Tipo 304 (18-8)			Tipo 310		
	Resist. tração kg/mm <sup>2</sup>	Resist. ruptura kg/mm <sup>2</sup>	Fluência kg/mm <sup>2</sup>	Tração kg/mm <sup>2</sup>	Ruptura kg/mm <sup>2</sup>	Fluência kg/mm <sup>2</sup>	Resist. tração kg/mm <sup>2</sup>	Ruptura kg/mm <sup>2</sup>	Fluência kg/mm <sup>2</sup>	Resist. tração kg/mm <sup>2</sup>	Ruptura kg/mm <sup>2</sup>	Fluência kg/mm <sup>2</sup>	Resist. tração kg/mm <sup>2</sup>	Ruptura kg/mm <sup>2</sup>	Fluência kg/mm <sup>2</sup>
Ambiente	53,5	—	—	62,5	—	—	58	—	—	61	—	—	67	—	—
95	44	—	—	58	—	—	54,5	—	—	55	—	—	65	—	—
205	42	—	—	53	—	—	51,5	—	—	52	—	—	61,5	—	—
315	40,5	—	—	51	—	—	50	—	—	51	—	—	59,5	—	—
425	39	—	—	46	—	—	48	—	—	48,5	—	—	59	—	—
540	31	13,6	6,3	31	—	7,7	43	—	—	40,5	—	—	56,5	—	14
650	17	4,2	1,4	15,5	—	1,4	17	2,8	—	31	10,5	—	43	12,0	6,3
760	8,5	1,4	—	6,5	—	—	8,5	1,2	—	20,5	4,9	—	28	5,0	1,6
870	—	—	—	6,6****	—	—	3,8	—	—	11	—	—	17,5	2,1	—
985	—	—	—	5	—	—	2	—	—	6	—	—	9,5	1,4	—
1090	—	—	—	3	—	—	1,5	—	—	3,8	—	—	5,5	—	—
1205	—	—	—	1,8	—	—	0,87	—	—	—	—	—	3,5	—	—
1315	—	—	—	0,35	—	—	—	—	—	—	—	—	2,5	—	—

\* A Tabela acima foi adaptada do «Metals Handbook» edição de 1948, onde, às páginas 563 até 569, podem ser obtidos dados completos.

\*\* Tensão para ruptura em 100 horas.

\*\*\* Tensão para 1% de fluência em 10.000 horas.

\*\*\*\* Aumento devido à transformação da ferrita em austenita.

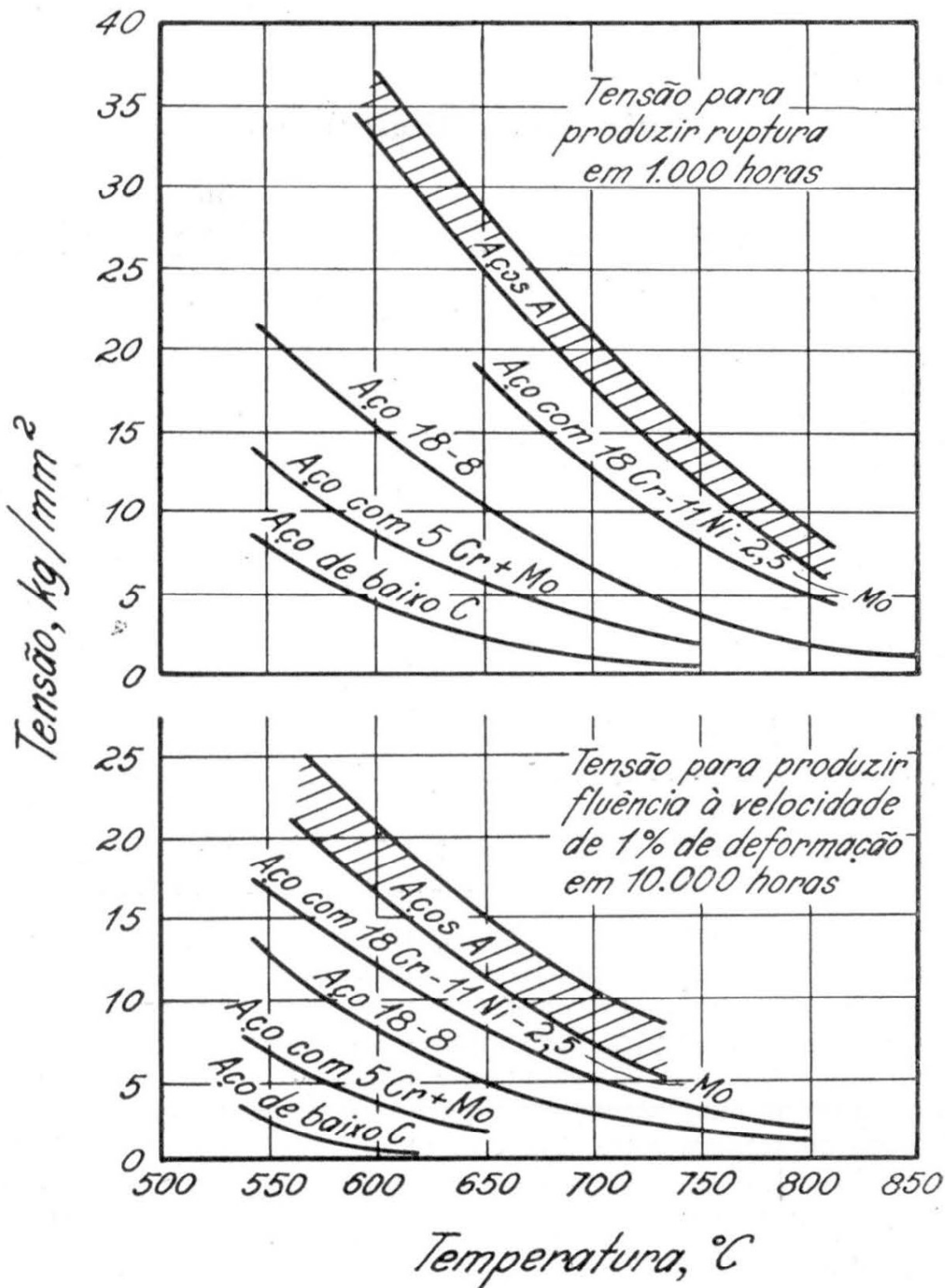


FIG. 61 — Relação entre a resistência à fluência e resistência à ruptura de um lado e temperatura de outro para alguns tipos de aços resistentes ao calor. Os aços representados por «A» são dos tipos 19-9 DL e 16-25-6 (Adaptada do livro «Structure and Properties of Alloys» de R. M. Brick e A. Phillips», editado pela McGraw Hill Book Co. — 1949).