



Aços Inoxidáveis: aplicações e especificações





Aços Inoxidáveis: aplicações e especificações

Eng. Héctor Mario Carbó
Assistência Técnica

Janeiro / 2008



Índice

- 7 Os aços inoxidáveis.
- 8 A resistência à corrosão e a passividade.
- 10 A formação de filmes passivos.
- 13 Os diferentes tipos de aços inoxidáveis.
 - Os martensíticos
 - Os ferríticos
 - Os austeníticos
- 23 Os acabamentos dos aços inoxidáveis.
- 28 Os aços inoxidáveis da ArcelorMittal Brasil e suas aplicações.
- 36 Os cuidados necessários na especificação, no projeto e na fabricação.
 - Os aços inoxidáveis e os meios ácidos
 - Os aços inoxidáveis e os meios que contêm cloretos
 - Os aços inoxidáveis e os meios ácidos redutores que contêm cloretos
 - Os aços inoxidáveis e o potencial de pite
 - O pH de depassivação nos aços inoxidáveis
 - Os acabamentos e a resistência à corrosão
 - A contaminação nos aços inoxidáveis
 - As propriedades mecânicas dos aços inoxidáveis e a resistência à oxidação em altas temperaturas
 - Os pares galvânicos e os aços inoxidáveis
 - A resistência dos aços inoxidáveis à corrosão na água
 - O projeto de equipamentos de aço inoxidável
- 52 Considerações finais.

Os aços inoxidáveis.

Os aços inoxidáveis são **ligas de ferro (Fe), carbono (C) e cromo (Cr) com um mínimo de 10,50% de Cr**. Outros elementos metálicos também integram estas ligas, mas o Cr é considerado o elemento mais importante porque é o que dá aos aços inoxidáveis uma elevada resistência à corrosão.

Em atmosferas rurais, com baixos índices de contaminação, observa-se uma grande diminuição da velocidade de oxidação destas ligas na medida em que aumenta a quantidade de Cr presente nas mesmas (ver figura 1). Com 10,50 % de Cr constata-se que a liga não sofre corrosão atmosférica nessas condições e este é o critério utilizado para sustentar a definição dada no início deste texto para os aços inoxidáveis.

Os aços inoxidáveis surgiram de estudos realizados em 1912, tanto na Inglaterra como na Alemanha. O aço estudado na Inglaterra era uma liga Fe-Cr, com cerca de 13% de Cr. Na Alemanha, tratou-se de uma liga que, além de Fe e Cr, continha também níquel (Ni). No primeiro caso, era um aço inoxidável muito próximo ao que hoje chamamos de 420 e, no segundo, outro aço inoxidável bastante parecido com o que hoje conhecemos como 302.

Anteriormente, na primeira metade do século XIX, foram feitas ligas Fe-Cr. Nessa época, o conceito predominante considerava que um material era resistente à corrosão se resistia ao mais popular e conhecido dos ácidos inorgânicos: o ácido sulfúrico. Esse fato e a incapacidade das aciarias daquela época de reduzir a quantidade de carbono (C) fizeram abandonar, durante muitos anos, o estudo destas ligas.

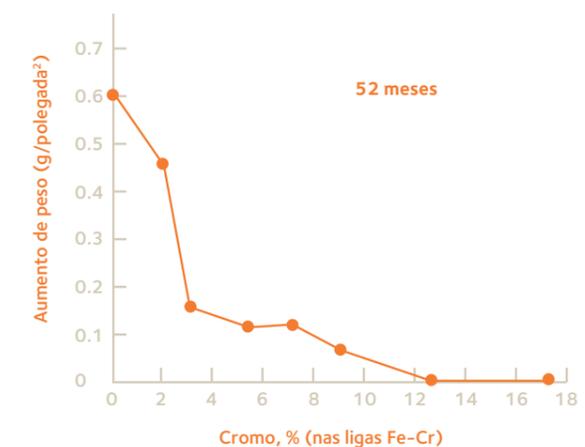
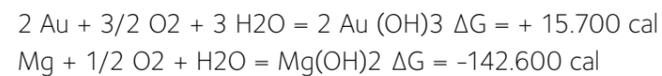


Fig. 1

A resistência à corrosão e a passividade.

De forma geral, todos os metais (salvo raras exceções) tem uma grande tendência a reagir em presença do meio ambiente, formando óxidos, hidróxidos e outros compostos químicos.

As reações químicas ocorrem quando a variação de energia livre das mesmas é negativa. Por exemplo, consideremos a reação de alguns metais com o oxigênio do ar e a água (seja das chuvas ou da umidade), para formar hidróxidos:



No primeiro caso, a variação de energia livre é positiva e o ouro (Au) não reage com o oxigênio e com a água para formar o hidróxido. A reação ocorre com o magnésio (Mg), pois a variação de energia livre é negativa.

Se comparamos com a física, podemos pensar em um corpo de massa m a uma determinada altura h (ver figura 2). Na posição (1), sua energia potencial é $E_p(1) = m \cdot g \cdot h$. Se o empurrarmos, o corpo cai. Na nova posição (2), sua energia potencial é $E_p(2) = 0$ (porque $h=0$). A variação de energia é a diferença entre a energia na posição final e na posição inicial, $\Delta G = E_p(2) - E_p(1)$, que neste caso é um valor negativo. O movimento é espontâneo porque a variação de energia é negativa.

O movimento contrário, que leva esse corpo da posição (2) à posição(1), terá uma variação de energia positiva, $\Delta G = E_p(1) - E_p(2) = E_p(1) - 0 = E_p(1)$, e não será espontâneo (será necessário gastar energia para realizar este movimento). Na química, ocorre o mesmo que na física.

Infelizmente, quase todos os metais se comportam como o Mg. Casos como o Au ou a platina (Pt), são exceções (são os chamados metais nobres). Os elementos Fe e Cr e todos os encontrados nos aços inoxidáveis, como o Ni, molibdênio (Mo), titânio (Ti), nióbio (Nb), alumínio (Al), cobre (Cu) e outros têm um comportamento semelhante ao do Mg e reagem em presença do meio ambiente.

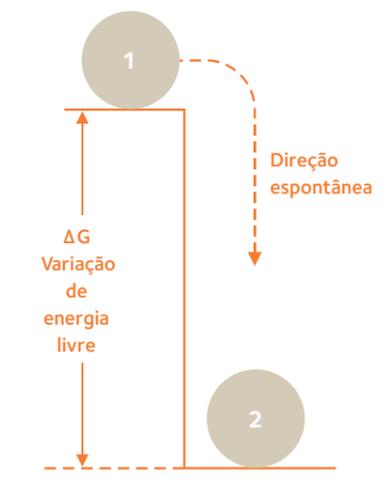


Fig. 2

Devemos destacar que a natureza, de acordo com o que foi comentado, transforma permanentemente os metais em compostos dos mesmos, por meio de reações espontâneas onde se libera energia. Por isso, encontramos os metais na natureza na forma de óxidos, hidróxidos e sais desses metais. **A siderurgia tem uma missão oposta: transformar esses minérios em metais mais ou menos puros ou em ligas dos mesmos. As reações na siderurgia são opostas às que ocorrem na natureza e, por esse motivo, não são espontâneas e precisam de energia para que possam ser realizadas** (ver figura 3).

Naturalmente, esses metais e ligas obtidos na siderurgia tendem, com o tempo, a se transformarem de maneira natural em compostos dos mesmos, e este processo é conhecido como corrosão.

Devido ao custo da corrosão, que em alguns países é considerado cerca de 3% do PIB, os homens trabalham há muito tempo com a intenção de diminuir os custos, através da criação de barreiras contra a corrosão para, pelo menos, minimizar estes problemas (já que é impossível eliminá-los).

Pintar uma superfície metálica, utilizar revestimentos, fazer metalizações, são algumas das formas encontradas. Outra maneira é desenvolver ligas que, por algum motivo, sejam mais resistentes à corrosão. Nessa última tentativa de combate à corrosão, participam os aços inoxidáveis.

Os aços inoxidáveis não são como Au e Pt, metais nobres que não reagem com o meio ambiente. **Os metais que constituem os aços inoxidáveis reagem com bastante facilidade. Um deles, em particular o Cr, possibilita a formação de filmes que protegem essas ligas de ataques subseqüentes. Este fenômeno, pelo qual o metal ou a liga deixam de ser corroídos, quando termodinamicamente deveríamos esperar o contrário, é conhecido como passividade.**

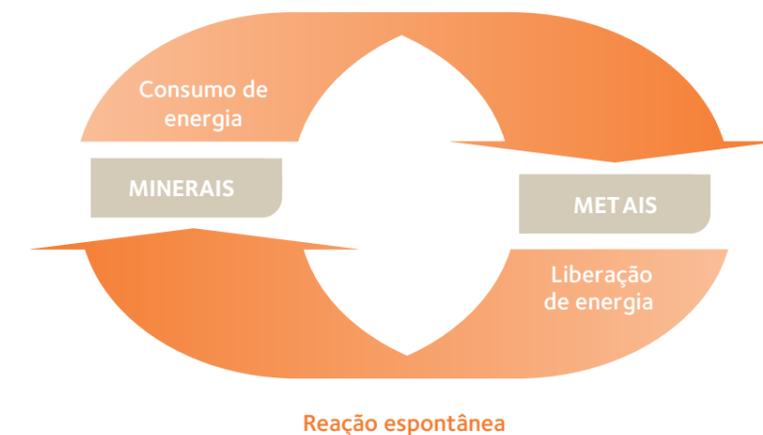


Fig. 3

A formação de filmes passivos.

O fenômeno da **passividade** é estudado faz muitos anos e houve (e há) diversas interpretações sobre o mesmo.

Os filmes passivos são extraordinariamente finos (nos aços inoxidáveis são filmes de uma espessura aproximada de 30 a 50 angströms, sendo um angström o resultado da divisão de 1mm por dez milhões) e isso cria grandes dificuldades para uma interpretação definitiva sobre a forma e a natureza dos mesmos.

Sabe-se que **a formação destes filmes é favorecida pela presença de meios oxidantes.**

A primeira experiência, realizada aproximadamente há 160 anos, foi feita com aço-carbono (nessa época não havia aços inoxidáveis) em meios nítricos. Uma amostra de aço-carbono, colocada em um bécher com ácido nítrico diluído, era atacada rapidamente, o que se manifestava através da produção de vapores nitrosos. Outra amostra, idêntica, colocada em outro bécher com ácido nítrico concentrado (que é mais oxidante que o nítrico diluído), não era atacada. Se neste mesmo bécher, era adicionada água diluindo o ácido nítrico concentrado até que ficasse com a mesma concentração do ácido nítrico diluído do primeiro bécher, o aço-carbono continuava sem ser atacado.

A única diferença que existia entre a primeira amostra (que foi atacada pelo ácido nítrico diluído) e esta última (que não foi), era que a última havia permanecido durante um certo tempo em ácido nítrico concentrado. Assim, chegou-se à conclusão que, provavelmente, o ácido nítrico concentrado havia formado um filme sobre a superfície do aço e que este o protegia de um ataque posterior com ácido nítrico diluído. Para demonstrar que era um filme, a amostra foi riscada e imediatamente o desprendimento de vapores nitrosos provenientes da parte riscada mostrou novamente a existência do ataque com ácido nítrico diluído.

A passividade, como pode ser notada através desta experiência, não é um fenômeno exclusivo dos aços inoxidáveis. A maioria dos metais forma filmes passivos e, de uma maneira geral, podemos dizer que quanto mais oxidável é um metal, tanto maior é a tendência do mesmo para formar tais filmes.

Até poucos anos atrás, predominou a idéia de que estes filmes eram óxidos dos metais (ou óxidos hidratados), sendo que, no caso dos aços inoxidáveis, o filme era constituído por um óxido (ou óxido hidratado) de Cr, o elemento mais facilmente oxidável das ligas Fe-Cr. O filme passivo poderia se formar inclusive, para muitos estudiosos deste assunto, pela reação espontânea entre o Cr e o oxigênio do ar.

Mas existem objeções a este ponto de vista. Uma barra de aço-carbono, colocada em um deserto, em uma atmosfera sem umidade e com temperaturas elevadas, não se oxida. No entanto, a mesma barra, submersa em água previamente desoxigenada por adição de nitrogênio (N), se oxida.

Aparentemente, nos aços inoxidáveis, o filme passivo se forma pela reação entre a água e o metal base, e está constituído por um oxihidróxido dos metais Cr e Fe. Duas regiões poderiam ser consideradas dentro deste filme passivo: uma, mais próxima ao metal, onde predominam os óxidos, e outra, mais próxima do meio ambiente, onde predominam os hidróxidos. Este filme não seria estático: com a passagem do tempo, existiria uma tendência ao crescimento dos óxidos (não dos hidróxidos) e também um enriquecimento de Cr.

O filme passivo dos aços inoxidáveis é muito fino e aderente. Os filmes formados em meios oxidantes (como é o caso do ácido nítrico, freqüentemente utilizado em banhos de decapagem) são mais resistentes. Os aços inoxidáveis formam e conservam filmes passivos em uma grande variedade de meios, o que explica a elevada resistência à corrosão destes materiais e a grande quantidade de alternativas que existem para a utilização dos mesmos.

Em geral, os aços inoxidáveis apresentam uma boa resistência à corrosão em meios oxidantes (que facilitam a formação e a conservação dos filmes passivos). A resistência destes materiais à corrosão é fraca em meios redutores (que não possibilitam a formação destes filmes ou os destroem).

A diferença de comportamento entre um aço inoxidável e outro material, que não tenha a capacidade de formar filmes passivos em um determinado meio, se manifesta com o traçado de curvas "velocidade da corrosão x concentração de oxidante no meio".

Consideremos um meio redutor como o ácido sulfúrico, por exemplo com 50% de concentração, e adicionemos lentamente um oxidante, por exemplo cátion férrico, Fe(+3).

Em um material que não apresenta o fenômeno da passividade (ver figura 4), observamos que, quanto mais aumentamos a concentração de oxidante, maior é a velocidade de corrosão (pequenos aumentos na concentração de oxidante provocam grandes aumentos na velocidade de corrosão. Notar que nas abscissas são utilizadas potências de 10).

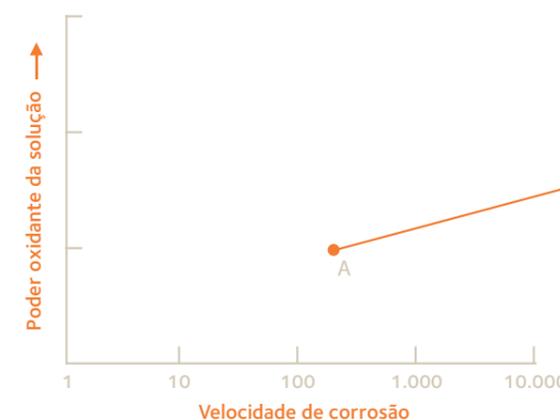


Fig. 4

Um aço inoxidável, submerso em ácido sulfúrico com essa concentração, no início também terá uma elevada velocidade de corrosão (ponto A da figura 5) e, com pequenos aumentos da concentração de oxidante, teremos um comportamento semelhante ao de um metal não sujeito à passividade.

Mas, depois de atingida uma determinada concentração de oxidante (ponto B na mesma figura), o meio será suficientemente oxidante provocando a formação do filme passivo e a velocidade de corrosão cairá bruscamente não voltando a crescer com novos aumentos da concentração de oxidante. Quando esta concentração é muito alta, novos aumentos na velocidade de corrosão poderão acontecer.

Na curva da figura 5, se diferenciam nitidamente **3 regiões: atividade, passividade e transpassividade.**

O fato de que uma grande quantidade de meios “agressivos” atuem no domínio da passividade explica a elevada resistência à corrosão dos aços inoxidáveis e as amplas possibilidades de utilização dos mesmos em diversas aplicações.

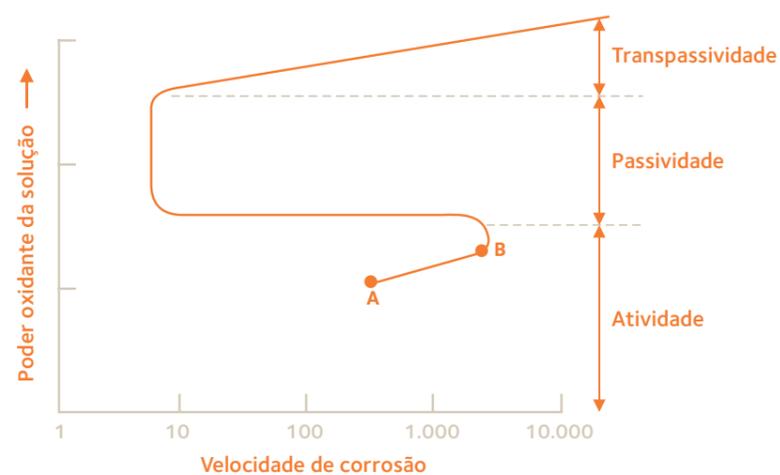


Fig. 5

Os diferentes tipos de aços inoxidáveis.

Já foi comentado que os aços inoxidáveis são ligas Fe-Cr com um mínimo de 10,50% de Cr. A adição de outros elementos permite formar um extenso conjunto de materiais. Nos aços inoxidáveis, dois elementos se destacam: o cromo, sempre presente, por seu importante papel na resistência à corrosão, e o níquel, por sua contribuição na melhoria das propriedades mecânicas.

Mesmo existindo diferentes classificações, algumas mais completas da que aqui será apresentada, podemos, em princípio, dividir os aços inoxidáveis em dois grandes grupos: **a série 400 e a série 300.**

A série 400 é a dos **aços inoxidáveis ferríticos**, aços magnéticos com estrutura cúbica de corpo centrado, basicamente ligas Fe-Cr.

A série 300 é a dos **aços inoxidáveis austeníticos**, aços não magnéticos com estrutura cúbica de faces centradas, basicamente ligas Fe-Cr-Ni.

Em todos os aços inoxidáveis, estão também sempre presentes o carbono e outros elementos que se encontram em todos os aços, como o silício (Si), manganês (Mn), fósforo (P) e enxofre (S).

Os aços inoxidáveis da série 400 podem ser divididos em dois grupos: os ferríticos propriamente ditos, que em geral apresentam o cromo mais alto e o carbono mais baixo, e os **martensíticos**, nos quais predomina um cromo mais baixo e um carbono mais alto (em comparação com os ferríticos).

Os martensíticos

Nos aços inoxidáveis martensíticos (figura 6) o carbono está em uma determinada concentração que permite a transformação de ferrita em austenita em altas temperaturas. Durante o resfriamento, a austenita se transforma em martensita.

A martensita é uma fase rica em carbono, frágil e muito dura.

Esses aços são fabricados e vendidos pela indústria siderúrgica no estado recozido, com estrutura ferrítica, baixa dureza e boa ductilidade. Somente depois de um tratamento térmico de têmpera, terão uma estrutura martensítica sendo muito duros e pouco dúcteis. Mas nestas condições (temperados) é que serão resistentes à corrosão.

Entre os aços inoxidáveis martensíticos, o mais conhecido é o aço **420**, com pouco mais de 12% de Cr e aproximadamente 0,35% de C.

No estado recozido, ferrítico, o 420 não possui boa resistência à corrosão atmosférica. Isso se deve à operação de recozimento que é realizada a uma temperatura próxima aos 760° C, temperatura na qual o C e o Cr presentes no aço se combinam para formar **carboneto de cromo**, Cr₂₃C₆, que precipita. Cada molécula de Cr₂₃C₆ precipitada possui, em peso, aproximadamente 95% de Cr. Como o aço 420 tem muito carbono e pouco cromo (quando comparado com outros inoxidáveis), praticamente a metade de cromo do aço 420 acaba sendo precipitado e retirado da solução sólida. Nesta condição, o material não resiste à corrosão atmosférica (não existe um mínimo de 10,50% de Cr na solução sólida).

Assim, o aço inoxidável 420 (como todos os martensíticos) tem que sofrer a operação da têmpera, que transforma a ferrita em austenita e esta última em martensita durante o resfriamento. Com o temperamento, o carbono forma parte da fase martensítica e não está disponível para ser precipitado como carboneto de cromo. **Somente depois de temperados, estes materiais passam a ser resistentes à corrosão.**

A alta dureza do material temperado (estrutura martensítica) faz com que estes materiais sejam muito utilizados na fabricação de facas. A resistência ao desgaste é muito forte.

Outros aços inoxidáveis martensíticos são variantes do aço 420. O aço **410** possui uma quantidade máxima de carbono de 0,15%. Sendo a martensita uma fase rica em carbono, é evidente que este aço, ao ser temperado, atingirá uma dureza menor que a do 420.

O aço **P498V** (designação interna da ArcelorMittal Inox Brasil) ou aço **EN 1.4116**, com um teor de carbono de aproximadamente 0,47%, com cromo um pouco superior ao do aço 420, com presença de molibdênio e de vanádio (V), apresenta, depois de temperado, durezas maiores que as atingidas com o 420. O molibdênio, como elemento de liga, melhora a resistência à corrosão deste material e o vanádio melhora a tenacidade.

Existem também os aços **440** (tipos A, B e C), com teores mais altos de carbono (maior dureza na têmpera) e valores mais elevados de cromo e molibdênio (melhor resistência à corrosão).

O aço 420F, fabricado normalmente na forma de produto não plano, é uma variante do 420 na qual o aumento na quantidade de enxofre facilita a usinagem do material.

Aços inoxidáveis da Série 400

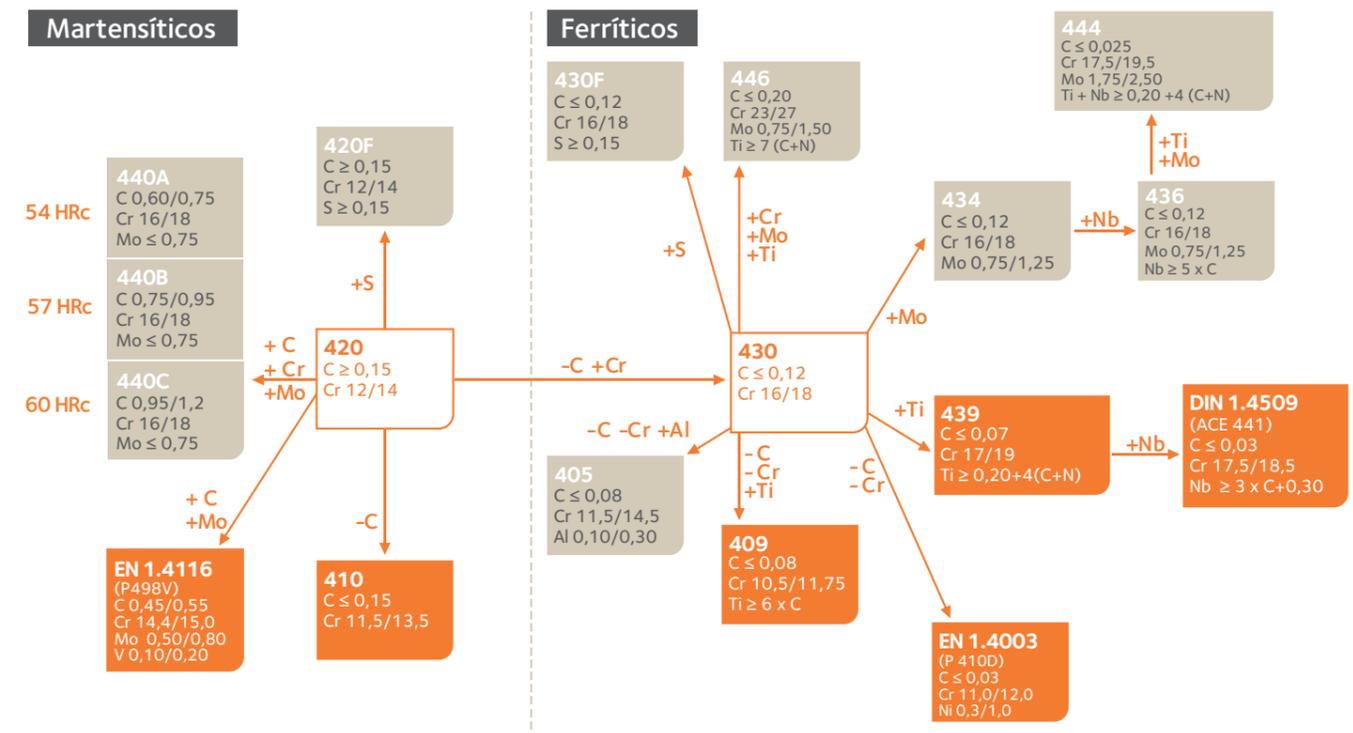


Fig. 6

Os ferríticos

Os aços inoxidáveis ferríticos (também na figura 6) contêm, em geral, uma quantidade de cromo superior a dos martensíticos. Isso melhora a resistência à corrosão, mas em parte sacrifica outras propriedades, como a resistência ao impacto.

O mais popular dos aços ferríticos é o **430**. Com cromo superior a 16%, é um material com **ótima resistência à corrosão. Sua capacidade de estampagem também é boa**, mas estampagens muito profundas não podem ser conseguidas com esse tipo de aço.

A maior limitação para a utilização do aço 430 é a soldabilidade do mesmo. **As soldas nesse aço são frágeis e de menor resistência à corrosão.** A formação parcial da martensita (mesmo com o baixo conteúdo de carbono), a precipitação de carbonitreto de cromo e o crescimento excessivo do tamanho do grão nas regiões soldadas são as principais causas que acarretam o mal desempenho deste material na soldagem. As aplicações do 430 se restringem àquelas que não precisam de soldagem, ou quando as soldas não são consideradas operações de alta responsabilidade. Por exemplo, uma pia de cozinha pode ser soldada com a mesa, mas não se pode construir um tanque para estocar ácido nítrico (mesmo que o 430 resista muito bem a este ácido). Uma solução para este problema de soldabilidade seria fazer o recozimento depois de soldar. Porém, isto aumenta os custos e, muitas vezes, pelas características da estrutura soldada, um recozimento não é possível.

Outra alternativa (que é utilizada na prática) é a de adicionar, como elementos de liga, estabilizadores como o titânio e o nióbio. Os elementos estabilizadores têm uma grande afinidade química com o carbono, formando então carbonetos destes elementos. Ataca-se desta maneira, principalmente, a formação de martensita (fase rica em carbono) e a precipitação de carbonitreto de cromo. O crescimento de grão das regiões soldadas é também, em parte, limitado pela presença de elementos estabilizadores.

Entre os aços inoxidáveis ferríticos estabilizados, podemos mencionar o **439** (com aproximadamente 17% de cromo), o **441** (semelhante em cromo ao anterior mas com um excesso de nióbio), o **409** (com 11% de cromo) e o **444** (com 18% de cromo e aproximadamente 2% de molibdênio).

Todos eles podem ser soldados pelo fato de serem aços inoxidáveis ferríticos estabilizados. O aço 439 também apresenta um melhor comportamento que o 430 na estampagem e uma melhor resistência à corrosão (devido ao Ti, o enxofre

precipita como sulfeto de titânio e não como sulfeto de manganês, inclusões estas últimas que são preferencialmente atacadas na corrosão por pites).

O aço 444 possui uma excelente resistência à corrosão graças à presença de 2% de molibdênio na liga. O 441, semelhante ao 439, possui uma melhor resistência à fluência em altas temperaturas devido à maior quantidade de nióbio.

O aço 409, com somente 11% de cromo (no limite, portanto, do que é definido como aço inoxidável) é o ferrítico estabilizado mais popular e é muito utilizado no sistema de escapamento de automóveis.

Os aços inoxidáveis ferríticos podem também conter alumínio, um estabilizador da ferrita. O aço **405** tem aproximadamente 0,20% de alumínio e é utilizado na fabricação de estruturas que não podem ser recozidas depois da operação de soldagem. A resistência à corrosão (o material tem 12% de cromo) é semelhante a do 409.

O aço **434** é um 430 com 1% de molibdênio, para melhorar a resistência à corrosão. O aço **436** é a versão estabilizada do 434. Com 26% de cromo, o aço **446** é um material com boas características para aplicações em altas temperaturas. A fragilidade do material, no entanto, é maior, devido ao alto conteúdo de cromo. No aço **430F**, fabricado em algumas empresas siderúrgicas somente como produto não plano, o conteúdo mais alto de enxofre melhora a usinagem do mesmo.

Aços inoxidáveis da Série 300

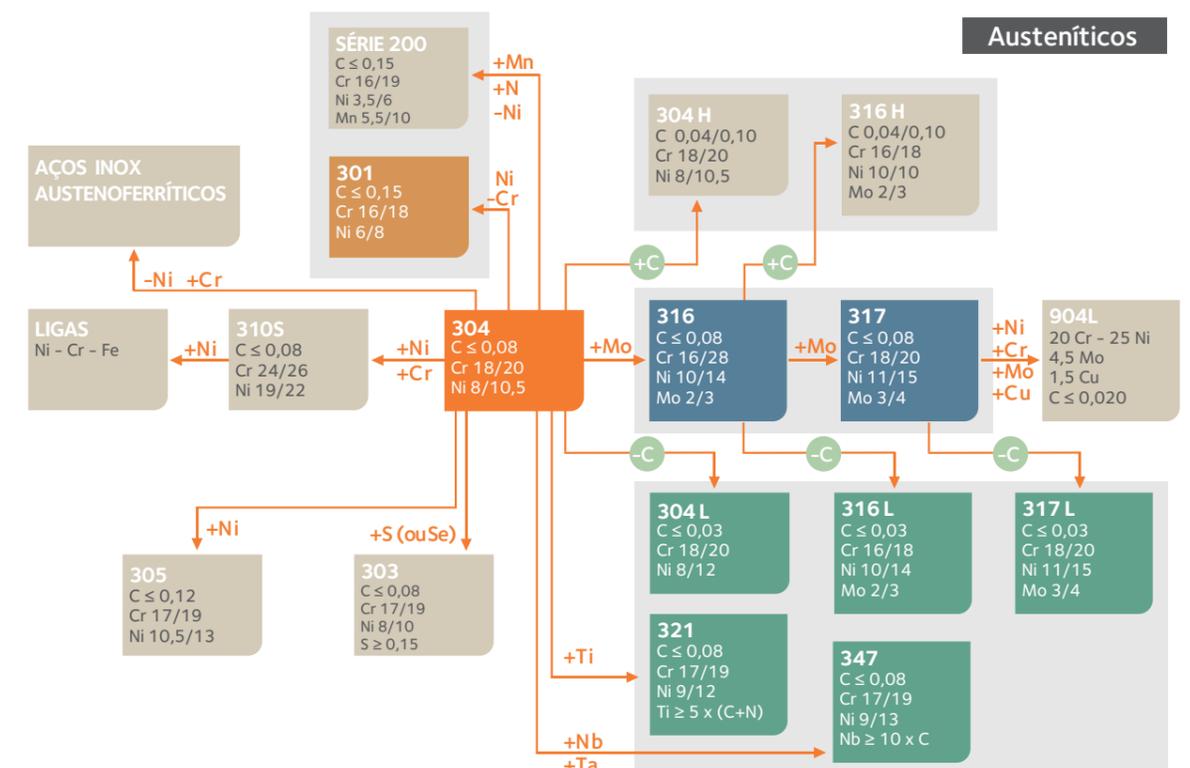


Fig. 7

Os austeníticos

A adição de níquel como elemento de liga, em determinadas quantidades, permite transformar a estrutura ferrítica em austenítica e isso tem como consequência uma grande mudança em muitas propriedades.

Os aços inoxidáveis austeníticos (figura 7), dos quais o **304** (18%Cr-8%Ni) é o mais popular, **têm excelente resistência à corrosão, excelente ductilidade** (existe aqui uma grande mudança nas propriedades mecânicas se os comparamos com os ferríticos) **e excelente soldabilidade**.

Os inoxidáveis austeníticos são utilizados em aplicações em temperatura ambiente, em altas temperaturas (até 1.150° C) e em baixíssimas temperaturas (condições criogênicas), uma série de alternativas que dificilmente são conseguidas com outros materiais.

O aço 304 é um material com grandes possibilidades em suas aplicações, a tal ponto que podemos encontrá-lo em nossas casas (em um garfo ou em uma panela, por exemplo) e também na indústria, em aplicações de grande responsabilidade.

Dependendo do meio ambiente, o 304 não é o austenítico mais utilizado.

Um dos problemas enfrentado pelo 304 (e o mesmo ocorre com outros aços inoxidáveis) é o da ação corrosiva provocada pelo ânion cloreto, Cl(-). Dependendo da concentração de cloretos no meio, da temperatura e do pH, três formas de corrosão podem ocorrer: **por pites** (figura 8), **por frestas** (figura 9) **e sob tensão** (figura 10). Dessas três formas de corrosão, os ferríticos também são propensos às duas primeiras e podemos dizer que, em geral, os austeníticos possuem melhor resistência que os ferríticos às corrosões por pites e em frestas (devido à ação do níquel, que favorece a repassivação do material nas regiões onde o filme passivo foi quebrado por estas formas de corrosão).

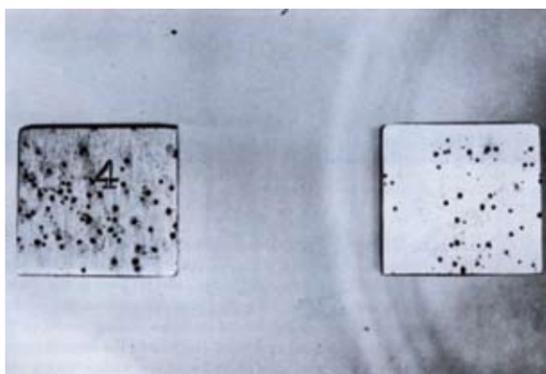


Fig. 8 - Corrosão por pites em aço 304 (provocada por uma solução ácida com presença de cloretos).

A adição de molibdênio (cerca de 2%) transforma o 304 no aço inoxidável 316, um material muito mais resistente à corrosão por pites e por frestas. Podemos mencionar, como exemplo, que o 304 é recomendado para trabalhar, em temperatura ambiente, com águas que contêm, no máximo, 200

ppm (partes por milhão) de cloreto. O 316, nas mesmas condições, é recomendado em águas que contenham até 800 ppm de cloreto. Se a quantidade de cloreto é mais alta (ou mesmo sendo mais baixa, se a temperatura é mais elevada ou se o meio possui características ácidas), adições maiores de molibdênio são necessárias, como é o caso do aço **317**.

A corrosão por pites e a corrosão por frestas, que mencionamos, são formas de corrosão extraordinariamente localizadas e são bastante parecidas, pelo menos em seus mecanismos de propagação. Como o próprio nome indica, na corrosão por frestas é necessário que exista um interstício. O interstício pode ter sido criado na construção do equipamento (um problema de projeto) ou pode ser consequência do próprio processo, como por exemplo uma incrustação ou um depósito nas paredes do mesmo.

O 316 é um pouco melhor que o 304 na corrosão sob tensão (a corrosão que envolve normalmente três fatores: meio agressivo, em nosso caso, cloretos, temperatura e, como o nome indica, tensões, sejam estas aplicadas ou residuais do processo de fabricação). Mas as vantagens do 316 sobre o 304, nesta forma de corrosão, são muito limitadas. A corrosão sob tensão é conhecida como o calcanhar de Aquiles dos aços inoxidáveis austeníticos. Um grande aumento no teor de níquel diminui o risco de corrosão sob tensão. É muito importante observar que **os aços inoxidáveis ferríticos são imunes a esta forma de corrosão** (figura 11).

A quantidade máxima de carbono nos aços 304, 316 e 317 é de 0,08%. Quando esses materiais são submetidos a temperaturas entre 425 e 850 C, o carbono e o cromo se combinam e se precipitam como carboneto de cromo (Cr₂₃C₆).

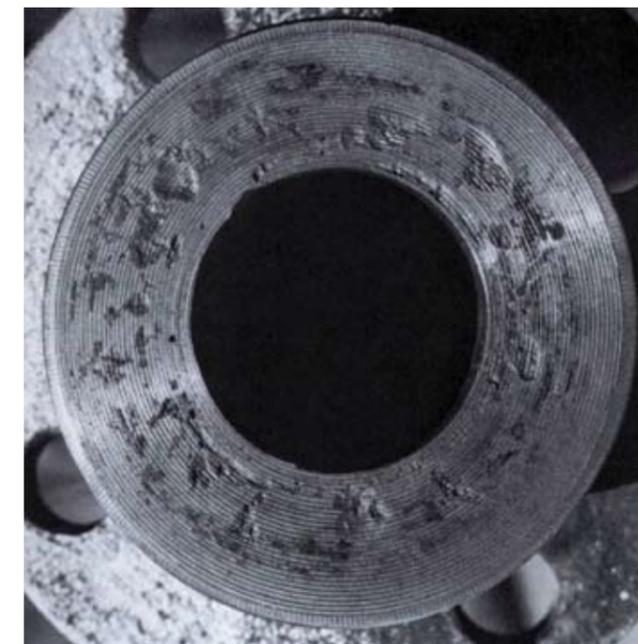


Fig. 9 - Corrosão por frestas em um aço inoxidável.

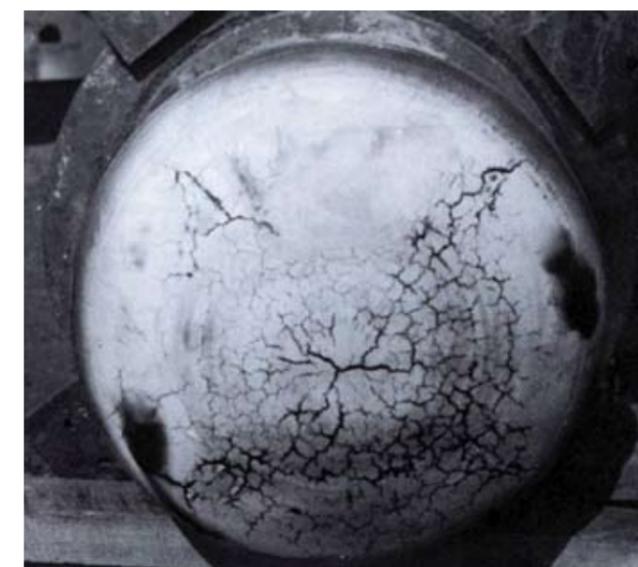


Fig. 10 - Corrosão sob tensão em uma autoclave de aço 304.

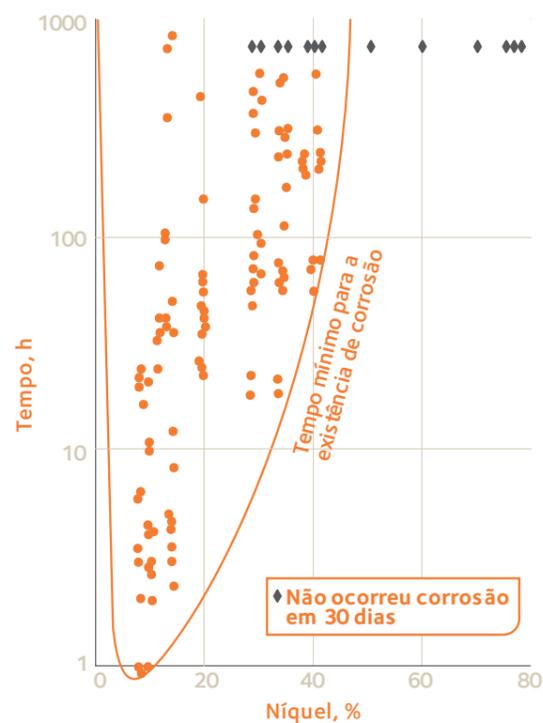


Fig. 11 - Corrosão sob tensão nas ligas Fe-Cr-Ni em cloreto de magnésio 42% em ebulição

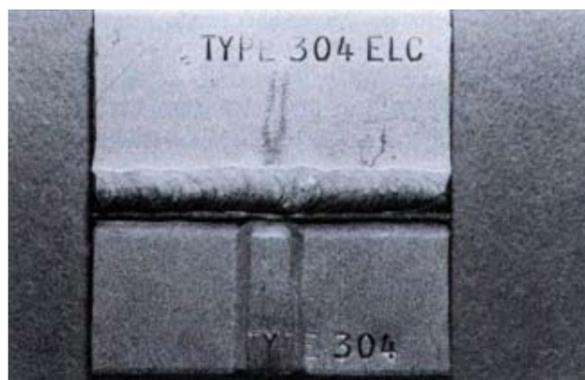


Fig. 12 - Eliminação de problemas de corrosão nas regiões afetadas pelo calor em uma soldagem com a utilização do 304 L.

elementos têm, como já foi comentado, uma afinidade química com o carbono superior àquela que tem o cromo. Carbonetos desses metais são precipitados, impedindo desta maneira a precipitação de carbonetos de cromo. Exemplos destes tipos de aço são o **321** e o **347**, basicamente aços 304 estabilizados. O **316Ti** é a versão estabilizada do 316.

A adição de elementos de liga ou o controle dos mesmos em determinados valores é sempre feita com objetivos previamente determinados. Um aço inoxidável como o 904L, com 20% de cromo, 25% de níquel, 4,5% de molibdênio, 1,5% de cobre e

Esta precipitação ocorre preferencialmente nos contornos de grão do material, o que provoca um empobrecimento de cromo nas regiões adjacentes dos mesmos. O fenômeno é conhecido como sensitização e um material sensitizado (dependendo da intensidade da precipitação de carbonetos de cromo) pode ficar com quantidades de cromo em solução sólida, nas adjacências dos contornos de grão, tão baixas que essas regiões já não terão a resistência à corrosão dos aços inoxidáveis. Os materiais sensitizados, quando estão em contato com determinados meios, em particular meios ácidos, sofrerão corrosão. Como o empobrecimento do cromo ocorre nas adjacências dos contornos de grão, esse tipo de corrosão, que acaba destacando os grãos do material, é conhecida como **corrosão intergranular**. Os materiais sensitizados são também mais propensos às formas de corrosão anteriormente mencionadas.

Como o cromo precipita como carboneto, uma solução óbvia é reduzir a quantidade de carbono nestes materiais. Os aços inoxidáveis **304L** (ver figura 12), **316L** e **317L**, com carbono máximo de 0,03% são as versões extra baixo carbono para os aços 304, 316 e 317 e são utilizados na fabricação de equipamentos que trabalham com meios capazes de provocar corrosão em materiais sensitizados.

Elementos estabilizadores, como titânio e nióbio, podem ser adicionados com o objetivo de evitar a sensitização, pois esses

com carbono máximo 0,02%, que entra na categoria dos superausteníticos possui tal composição química por motivos definidos, para ser utilizada em aplicações específicas, em condições muito agressivas. Através da composição química deste material, podemos esperar: garantia de que o material não será sensitizado em um processo de soldagem (baixos valores de carbono), ótima resistência às corrosões por pites e em frestas (altos valores de cromo e principalmente de molibdênio), melhor resistência à corrosão sob tensão que o 304 e o 316 (alto conteúdo de níquel). Além disso, os valores elevados de níquel e molibdênio (e também a presença de cobre), melhoram a resistência à corrosão em meios ácidos.

Para evitar problemas de corrosão associados a sensitização do material, como já foi visto, é reduzida a quantidade de carbono, mas, às vezes, quando a corrosão não é uma ameaça, teores mais altos de carbono podem desempenhar um papel benéfico. Os aços **304H** e **316H** são semelhantes aos tipos 304 e 316, com a diferença que, nos tipos "H", o carbono mínimo é de 0,04%. São aços utilizados em altas temperaturas nas quais ocorre precipitação de carbonetos de cromo. Uma fina rede de carbonetos de cromo precipitados ajudará estes aços a conservarem melhor as propriedades mecânicas em altas temperaturas.

Aumentos significativos de cromo e níquel, como no aço **310** (25%Cr-20%Ni), aumentam consideravelmente a resistência à oxidação em altas temperaturas porque a temperatura de descamação passa a ser maior. Trabalhando em contato com o ar, o 304 é recomendado em serviços contínuos até temperaturas de 925°C porque, para temperaturas maiores, os óxidos formados começam a se desprender provocando novas oxidações do material ficando sem uma barreira de óxidos que o defenda. Eventos sucessivos de formação de uma camada de óxidos e descamação da mesma vão reduzindo a espessura do material. Nas mesmas condições, o 310 resiste a temperaturas de até 1.150°C. É um dos aços inoxidáveis refratários, dos quais podemos mencionar também o 314 que, além de altos valores de cromo e níquel, possui também um elevado conteúdo de silício.

O aço 304 é um material com excelente ductilidade. Em alguns casos de estampagem muito profunda, um aumento no níquel permite melhorar ainda mais esta característica. Com esta finalidade tem sido desenvolvido o aço **305**.

Mesmo que os aços austeníticos não sejam magnéticos, depois de um processo de estampagem, ou em uma conformação a frio, como na laminação, nas partes que sofreram maior deformação, pode ser observado um certo caráter magnético. Isso é consequência da transformação parcial da austenita em martensita, que ocorre por deformação a frio. Reduções nos valores de níquel (quando comparamos com o 304), diminuem a estabilidade da austenita, permitindo uma maior formação de martensita na laminação a frio. Isso é utilizado para a fabricação de aços inoxidáveis para aplicações estruturais, como é o caso do aço **301** (com valores aproximados de 17% de cromo e 7% de níquel), que é fabricado e vendido na condição de laminado (sem tratamento térmico posterior) com diversos graus de dureza e propriedades mecânicas.

Também utilizados em aplicações estruturais, os aços da **série 200** são o resultado de uma substituição parcial de níquel por manganês. A resistência à corrosão destas ligas (Fe-Cr-Ni-Mn) é inferior a dos aços equivalentes da série 300. Algumas ligas da série 200, de mais recente fabricação, contendo cobre (Cu), permitem a utilização de alguns destes aços em outras aplicações (não apenas estruturais), como por exemplo, em estampagem profunda.

Nos austeníticos, há também uma versão do 304 com alto enxofre, para melhorar a usinagem: o aço **303**. É fabricado somente como produto não plano.

Grandes aumentos de níquel nos levam às ligas Ni-Fe-Cr, onde o elemento em maior porcentagem já não é o ferro e sim o níquel. São conhecidas como ligas à base de níquel (não são classificadas como aços inoxidáveis) e possuem excelente resistência à corrosão em muitos meios em altas temperaturas.

Os acabamentos nos aços inoxidáveis.

Quando se especifica um aço inoxidável, o acabamento é um dos aspectos relevantes que devem ser considerados. O acabamento possui uma importante influência em algumas características do material como, por exemplo, na facilidade da limpeza e na resistência à corrosão. Em determinadas aplicações, uma superfície polida transmitirá a idéia de que os aços inoxidáveis são materiais “limpos” e de que são limpados com facilidade. Em outras, um acabamento com maior rugosidade poderá ter um impacto estético que favorecerá as vendas de um determinado produto.

Superfícies com baixa rugosidade terão, na maioria dos casos, um efeito favorável na resistência à corrosão, mas tratando-se de corrosão sob tensão, um jateamento da superfície poderá ser uma grande ajuda na resistência do material. Operações de embutimento profundo também são influenciadas pelo acabamento do aço inoxidável.

Há uma grande variedade de acabamentos. A definição dada a cada um deles enfrenta certas dificuldades pois, com o mesmo nome, dependendo dos fabricantes, podemos ter coisas diferentes: a composição química do banho de decapagem, a rugosidade dos cilindros de laminação, a grana e o estado das lixas utilizadas, fazem com que o aspecto superficial do material não seja o mesmo entre os diferentes fabricantes e inclusive em um mesmo fabricante.

O mesmo acabamento tem um aspecto diferente para cada tipo de aço (o aspecto superficial de um 430 e de um 304 é diferente, mesmo tendo o mesmo acabamento). E mesmo sendo o mesmo tipo de aço, o acabamento pode ser diferente, dependendo da espessura (materiais mais finos são sempre mais brilhantes).

A norma ASTM A-480 define os acabamentos mais utilizados nos aços inoxidáveis. Dentro dessa norma encontramos os seguintes acabamentos:

Nº 1: Laminado a quente, recozido e decapado.

A superfície é um pouco rugosa e fosca. É um acabamento freqüente nos materiais com espessuras não inferiores a 3,00 mm, destinados a aplicações industriais. Muitas vezes, na fabricação da peça final, o material é submetido a outros acabamentos, como o lixado, por exemplo.

Nº 2D: Laminado a frio, recozido e decapado.

Muito menos rugoso que o acabamento Nº 1, mas mesmo assim apresenta uma superfície fosca, mate. Esse acabamento não é utilizado, por exemplo, no aço 430, já que com este acabamento, durante a conformação, estes materiais dão lugar ao aparecimento de linhas de Lüder.

Nº 2B: Laminado a frio recozido e decapado seguido de um ligeiro passe de laminação em laminador com cilindros brilhantes (skin pass).

Apresenta um brilho superior ao acabamento 2D e é o mais utilizado entre os acabamentos da laminação a frio. Como a superfície é mais lisa, o polimento resulta mais fácil que nos acabamentos Nº 1 e 2D.

BA: Laminado a frio com cilindros polidos e recozido em forno de atmosfera inerte.

Superfície lisa, brilhante e refletiva, características que são mais evidentes na medida em que a espessura é mais fina. A atmosfera do forno pode ser de hidrogênio ou misturas de hidrogênio e nitrogênio.

Nº 3: Material lixado em uma direção.

Normalmente o lixamento é feito com abrasivos de grana aproximadamente 100 mesh.

Nº 4: Material lixado em uma direção com abrasivos de grana de 120 a 150 mesh.

É um acabamento com rugosidade menor que a do Nº 3.

Nº 6: O material com acabamento Nº4, é tratado depois com panos embebidos com pastas abrasivas e óleos.

O aspecto é fosco, satinado, com refletividade inferior a do acabamento Nº 4. O acabamento não é dado em uma única direção e o aspecto varia um pouco porque depende do tipo de pano utilizado.

Nº 7: Acabamento com alto brilho.

A superfície é finalmente polida, mas conserva algumas linhas de polido. É um material com alto grau de refletividade obtido com polimentos progressivos cada vez mais finos.

Nº 8: Acabamento espelho.

A superfície é polida com abrasivos cada vez mais finos até que todas as linhas de polimento desapareçam. É o acabamento mais fino que existe e permite que os aços inoxidáveis sejam usados como espelhos. Também é utilizado em refletores.

Acabamento TR: Acabamento obtido por laminação a frio ou por laminação a frio com recozimento e decapagem de maneira que o material tenha propriedades mecânicas especiais.

Geralmente as propriedades mecânicas são mais elevadas que as dos outros acabamentos e a principal utilização é em aplicações estruturais.

Não são mencionados na norma ASTM A-480, mas são incluídos aqui, os acabamentos Nº 0 e Nº 5.

Nº 0: Laminado a quente e recozido.

Apresenta a cor preta dos óxidos produzidos durante o recozimento. Não é realizada decapagem. Às vezes, são vendidas desta forma chapas de grande espessura e particularmente de aços inoxidáveis refratários que serão utilizados em altas temperaturas.

Nº 5: O material do acabamento Nº 4 submetido a um ligeiro passe de laminação com cilindros brilhantes (skin pass).

Apresenta um brilho maior que o acabamento Nº 4.

IL (rolled on)

A ArcelorMittal Inox Brasil não fabrica aços inoxidáveis com o acabamento BA. No centro de serviços da ArcelorMittal Inox Brasil, existe uma grande variedade de acabamentos lixados e polidos, entre os quais podemos destacar:

RF (RUGGED FINISH): Obtido com lixas, com grana entre 60 e 100 mesh.

A aparência é de um lixamento com alta rugosidade. A rugosidade varia de 2,00 a 2,50 microns Ra.

SF (SUPER FINISH): Acabamento do material com lixas com grana de 220 a 320 mesh.

É um lixamento de baixa rugosidade, variando entre 0,70 e 1,00 microns Ra.

ST (SATIN FINISH): Acabamento com Scotch Brite, sem uso de pastas abrasivas.

O material possui uma rugosidade que varia entre 0,10 e 0,15 microns Ra, mesmo que sua aparência seja fosca.

HL (Hair Line): Material com acabamento em linhas contínuas, realizado com lixas com grana de até 80 mesh.

É também um lixamento de alta rugosidade (2,00 a 2,50 microns Ra).

BB (BUFFING BRIGHT): Polimento feito com granas que variam entre 400 e 800 mesh.

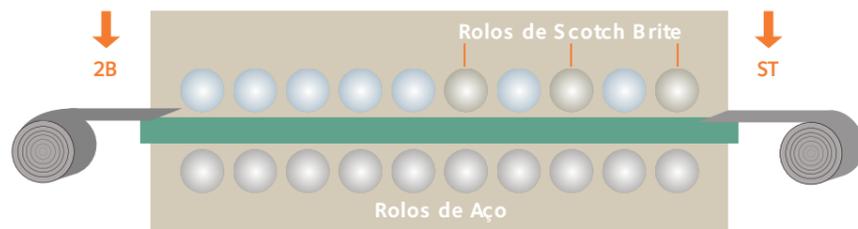
É um material muito brilhante (o Nº 7 da classificação dada anteriormente pela Norma ASTM A-480). A rugosidade é inferior a 0,05 microns Ra.

Os acabamentos Nº 3 e Nº 4 da ArcelorMittal Inox Brasil são apresentados em duas versões: uma quando o lixamento é feito nas bobinas, e a outra quando é feito nas chapas. No primeiro caso, a rugosidade varia entre 0,15 e 0,40 microns Ra no acabamento Nº 4, e entre 0,41 e 0,80 microns Ra no acabamento Nº 3. No lixamento das chapas, no centro de serviços da ArcelorMittal Inox Brasil, o acabamento Nº 4 tem uma rugosidade que varia entre 1,00 e 1,20 microns Ra, e o Nº 3 tem entre 1,20 e 1,50 microns Ra.

O valor de rugosidade no acabamento 2D é de aproximadamente 0,27 microns Ra. No 2B, a rugosidade é normalmente inferior a 0,17 microns Ra. As rugosidades podem ser muito mais baixas nesses dois últimos acabamentos, mas devemos lembrar que dependem também da espessura do material.

De maneira bastante esquemática, os processos para a obtenção dos acabamentos ST e BB (da ArcelorMittal Inox Brasil) podem ser vistos nas figuras 13 e 14.

Acabamento Satin Finish (ST)



Acabamento Buffing Bright (BB)



Fig. 13



Fig. 14

Nos acabamentos TR (endurecidos por laminação), podemos indicar os seguintes graus de encruamento:

TIPO	DUREZA HRc
1/16 duro	20/25
1/8 duro	25/28
1/4 duro	28/30
3/8 duro	30/32
1/2 duro	32/34
5/8 duro	34/36
3/4 duro	36/39
7/8 duro	39/42
Totalmente duro	Maior que 42

Os aços inoxidáveis da ArcelorMittal Inox Brasil e suas aplicações.

Indicamos abaixo os aços inoxidáveis fabricados pela ArcelorMittal Inox Brasil e seus equivalentes com as designações ASTM, EN e código UNS.

As figuras 15 e 16 mostram todos esses aços inoxidáveis.

CLASSIFICAÇÃO	AÇO ACESITA	UNS (ASTM)	OBSERVAÇÕES
Austenítico	301	S30100	
"	304	S30400	304 comum
"	304	S30400	Maior conteúdo de Níquel
"	304L	S30403	
"	304H	S30409	
"	316	S31600	Hoje é fabricado um tipo único 316/316L
"	316L	S31603	
"	321	S32100	
Ferrítico	409	S40910	Estabilizado com Ti
"	409	S40900	Estabilizado com Ti, Nb
"	410S	S41008	
"	430	S43000	
"	430	S43000	Estabilizado com Nb
"	439	S43932	
"	441	DIN 1.4509	
"	444	S44400	
Martensítico	420	S42000	C aprox. 0,33%
"	420	S42000	C aprox. 0,20%
"	ACE 498		C máx. 0,47%

Aços inoxidáveis da Série 300

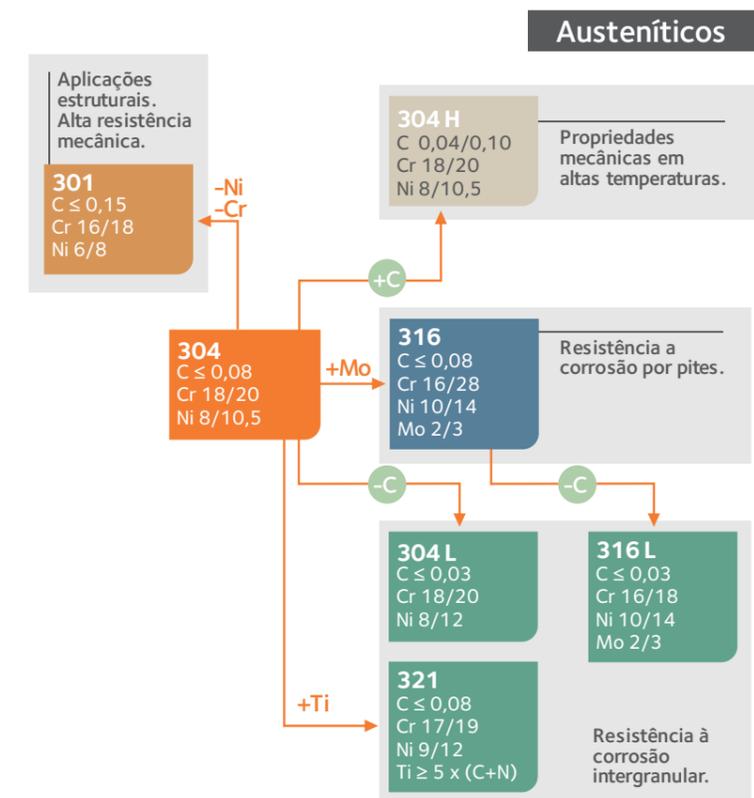


Fig. 15

Aços inoxidáveis da Série 400

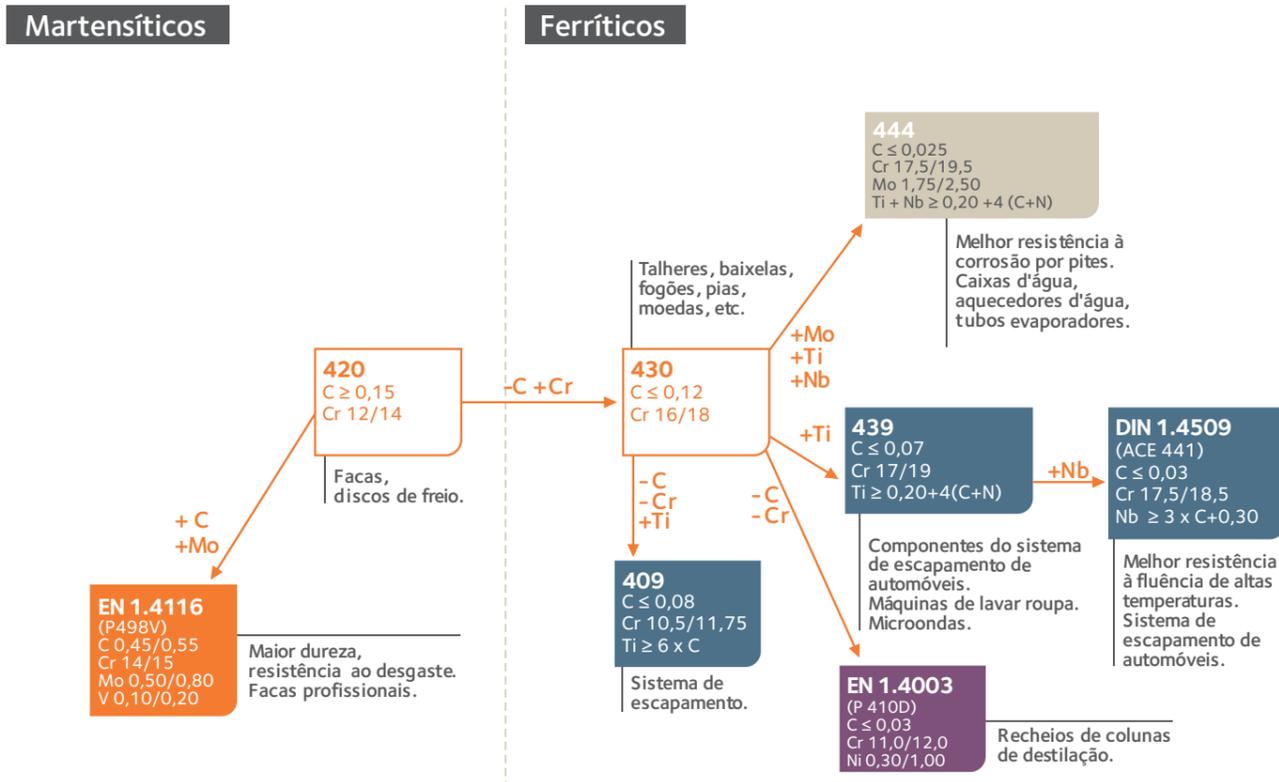


Fig. 16

O aço 301 (17Cr-7Ni) é vendido no estado recozido e também no estado endurecido por laminação. A resistência à corrosão é semelhante a do aço 304 e, de um modo geral, pode ser utilizado nas mesmas aplicações que o 304. Já foi mencionado que sua austenita é menos estável e, em consequência, a transformação parcial de austenita em martensita é maior. Por esse motivo, em processos de estampagem, quando comparado com o 304, opõe uma maior resistência. Normalmente, a maior utilização do 301 é na forma de encruado por laminação, em aplicações estruturais, em uma grande diversidade de graus de endurecimento que vão desde o 1/16 duro (com durezas entre 20 a 25 HRC) até o totalmente duro (dureza superior a 42 HRC). É muito utilizado na indústria ferroviária. Os vagões dos metrô de várias cidades do mundo são fabricados com este material. Também é usado na parte estrutural dos ônibus, quase sempre na forma de tubos retangulares e quadrados, e também em peças pequenas que requerem altas propriedades mecânicas e durezas (limpadores de pára-brisas, calçados de segurança, molas). É utilizado também, na fabricação de facas populares (sendo nesta aplicação inferior ao 420).

A ArcelorMittal Inox Brasil fabrica tipos diferentes de aços 304 (18Cr-8Ni), alguns deles para estampagem extraprofunda, com teores de Ni mais elevados ou com a presença de Cu. O maior conteúdo de Ni nestes materiais, ou a presença de Cu, permitem a obtenção de uma austenita mais estável. Por isso, os 304 com Ni mais alto ou com Cu são recomendados para operações de estampagem profunda, como por exemplo em panelas, jarras e pias. O 304 comum, com Ni mais baixo, tem ótima ductilidade e é utilizado com sucesso em muitas operações de estampagem, sendo sempre recomendado, salvo quando a complexidade da estampagem determina a necessidade de utilizar um 304 para estampagem extraprofunda. Na seleção de aços 304 para estampagem é sempre recomendável observar as propriedades que constam no Certificado de Qualidade da ArcelorMittal Inox Brasil, para cada bobina ou pacote de chapas. Em geral, para estampagem profunda, recomendamos escolher materiais que tenham um baixo valor do quociente limite de escoamento/limite de resistência, baixa dureza, alto valor de alongamento e tamanho de grão próximo a 8.

Sem dúvida, o 304 é o aço inoxidável com maior variedade de aplicações, o que é uma consequência direta de sua excelente resistência à corrosão, sua capacidade de conformação, sua ótima soldabilidade e as excelentes propriedades mecânicas que possui. Com o 304, se fabricam talheres, baixelas e panelas, bules para café e leite, cubas e pias, fogões e fornos (elétrico e microondas), cestos de máquinas de lavar roupa e muitos outros utensílios domésticos e eletrodomésticos. Na construção civil, é usado em elevadores, no revestimento de edifícios (superfícies externas e internas). Nas aplicações industriais está presente em tubos, tanques, reatores, colunas de destilação, trocadores de calor, condensadores, em diversas indústrias, como por exemplo do álcool, do açúcar, dos sucos de fruta, da cerveja, do vinho, do leite e laticínios, indústrias químicas, farmacêuticas, de cosméticos e de derivados do petróleo. As indústrias aeronáutica, ferroviária, naval, de papel

e celulose, petroquímica, têxtil, frigorífica, hospitalar, utilizam esse material. Também é muito utilizado em caminhões, em tanques para transporte de produtos (alimentos e produtos químicos).

O aço **304L** tem uso específico em aplicações industriais, as mesmas que foram mencionadas para o aço 304, e somente é escolhido quando a precipitação de carbonetos de cromo, que ocorre nas operações de soldagem no aço 304, possa provocar problemas de corrosão. **Ou, em outras palavras, se o meio é capaz de atacar regiões empobrecidas sem cromo devido ao problema de sensitização, o material recomendado não será o 304 e sim o 304L.**

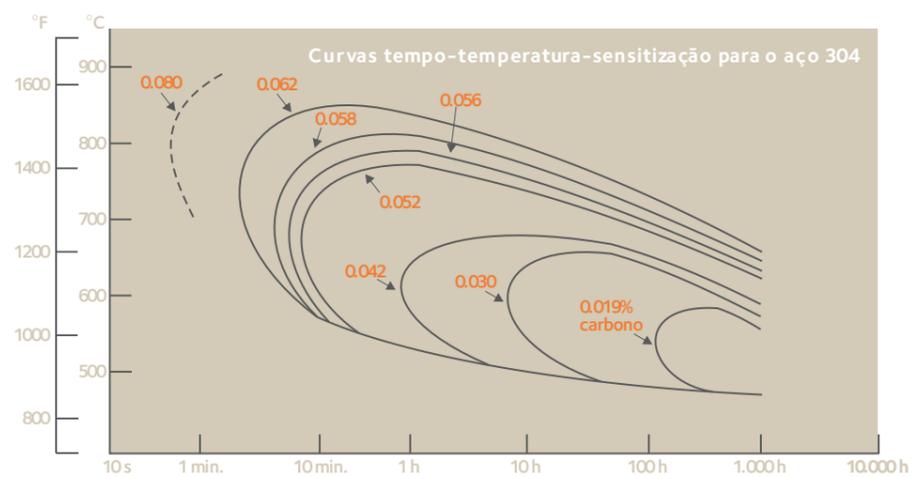


Fig. 17

A figura 17, mostra uma curva tempo-temperatura-sensitização para os aços 304 com diferentes conteúdos de carbono. Qualquer combinação de tempo e temperatura que fique dentro do nariz da curva representa uma condição em que o material será sensitizado. Nota-se que, à medida que diminuimos a quantidade de carbono, a curva se desloca para a direita, ou seja, é preciso mais tempo em uma determinada temperatura crítica para provocar a sensitização. Um material como o 304L, com máximo de carbono 0,03% precisará de muito tempo na temperatura crítica para ficar sensitizado.

Devemos observar que as propriedades mecânicas (os valores mínimos estabelecidos pela norma ASTM A-420) são menores no 304L que no 304. Como o projeto de equipamentos é sempre feito utilizando o valor mínimo estabelecido pela norma, um equipamento em 304L terá que ter uma espessura maior que a utilizada se o material de construção for o 304.

Uma importante utilização do 304L é nos tanques para conter ácido nítrico. Essa escolha é feita porque o ácido nítrico é capaz de provocar corrosão intergranular em regiões soldadas e sensitizadas do aço 304. Alguns poderão pensar que a utilização de um “material mais resistente”, como o 316L, é mais segura, considerando a

“agressividade do ácido nítrico”. No entanto, o ácido nítrico é um meio muito oxidante e, nos meios com estas características, o 304L é mais resistente que o 316L. O exemplo é bom para chamar a atenção sobre um problema que encontramos na prática com muita frequência: não existem “meios muito agressivos” ou “materiais muito resistentes”. Quando falamos de corrosão, nos referimos sempre a um material em um determinado meio e em determinadas condições. O material resiste ou não ao meio, é adequado ou não para uma determinada utilização.

Em aplicações em altas temperaturas, todos os materiais metálicos têm tendência a sofrer uma diminuição em suas propriedades mecânicas. O 304L sofre mais com essa perda que o 304. Por isso, em equipamentos que trabalham em altas temperaturas, quando não existe perigo de corrosão associada a precipitação de carbonetos de cromo, o material recomendado é o 304H, que é igual ao 304, com a diferença de que as normas não fixam um valor mínimo de carbono para o 304 e sim para o 304H (carbono mínimo 0,04%). Uma fina rede de carbonetos de cromo precipitados nos contornos de grão faz com que o material conserve melhor suas propriedades mecânicas em altas temperaturas. Em contato com o ar, como já foi comentado, esta temperatura não pode exceder os 925°C.

O aço **316/316L** tem aplicação no mesmo tipo de indústrias em que são usados o 304 e o 304L. Se esses dois últimos materiais, em determinados meios (principalmente com cloretos) possuem tendência à corrosão por pites e em frestas, o 316/316L pode ser uma solução. Não é só a concentração de cloretos que determina a possibilidade de ocorrer estas formas de corrosão. A temperatura e o pH também possuem uma influência considerável nos dois casos. As corrosões por pites e em frestas, em meios com cloretos, são favorecidas pelo aumento da temperatura e pela acidez do meio. Em cada caso, a determinação real das condições em que o equipamento deve trabalhar define o aço que será utilizado. Por exemplo, nas destilarias de álcool, na primeira coluna de destilação, com alta temperatura e com maiores teores de cloretos, o 316/316L é necessário. Mas a segunda coluna (álcool hidratado) e a terceira (álcool anidro), onde as concentrações de cloretos são muito baixas, são construídas com aço 304. Em meios ácidos, em geral, o 316/316L apresenta melhor comportamento que os aços 304 e 304L. O molibdênio, como elemento de liga, é o responsável pela diferença de comportamento entre esse material e o 304. O filme passivo do aço 316/316L parece ser muito mais resistente às duas formas localizadas de corrosão mencionadas anteriormente.

O aço 321, que na história do desenvolvimento dos aços inoxidáveis apareceu uns 25 anos antes que o 304L (nos anos 40 era mais fácil adicionar titânio que reduzir carbono), perdeu um significativo campo de aplicações quando apareceram os aços extrabaixo carbono. Mesmo assim, para aplicações em altas temperaturas, o 321 é o aço recomendado, por conservar melhor suas propriedades mecânicas. Em tubos para resistências elétricas, por exemplo, é sempre o material indicado. De forma geral, com temperaturas maiores que 250°C, trabalha-se quase sempre

com o 321 (e raramente com o 304 e 304L). Isso desde que o 321 tenha condições de resistir ao meio que se encontra nessas temperaturas.

Dos aços inoxidáveis ferríticos, o mais utilizado é o 430. A ArcelorMittal Inox Brasil fabrica dois aços 430, um estabilizado com nióbio e outro sem estabilização (que corresponde ao aço 430 típico das indústrias siderúrgicas). O estabilizado com nióbio, mesmo não atendendo em algumas propriedades mecânicas às exigências da norma ASTM A-240, possui melhor comportamento em operações de estampagem.

O 430 é um material com ótima resistência à corrosão (devemos lembrar que a definição dada aos aços inoxidáveis é a de ligas Fe-Cr com, pelo menos, 10,50% de Cr). O 430 possui um cromo muito mais elevado que o mínimo exigido. A capacidade de repassivação (iniciada uma corrosão por pites, ter a capacidade de regenerar o filme passivo) do 430 é inferior a do 304 (provavelmente o níquel tem um papel decisivo neste aspecto). Por isso, o 430 é muito mais utilizado, na construção civil, em regiões internas. Geralmente, em grandes cidades, onde existe bastante contaminação ambiental, na construção civil, o 430 é utilizado no interior de edifícios e o 304 em regiões externas. Se a cidade se encontra no litoral, devido a presença de cloretos na atmosfera, é preferido o 316.

Em nosso cotidiano, encontramos o 430 em muitas aplicações: talheres, baixelas, pias de cozinha, fogões, tanques de máquinas de lavar roupa, lava-pratos, fornos microondas, cunhagem de moedas. É muito usado também em revestimentos de balcões e em gabinetes de telefonia. A utilização industrial é, como já foi comentado, limitada pelo problema da fragilização na soldagem.

Os ferríticos estabilizados, como o 409 têm uso quase que exclusivo na indústria automobilística, no sistema de escapamento dos gases de combustão. Em algumas partes onde exige-se maior resistência à corrosão, o preferido é o 439 e também o 441, materiais com maior quantidade de cromo. O 441, com excesso de nióbio, possui também maior resistência à fluência em altas temperaturas e por esse motivo é utilizado em partes mais quentes do sistema de escapamento (perto da saída de gases do motor). Esses materiais não são somente utilizados como tubos, mas também em outras peças do sistema, como o corpo do catalisador e do silencioso. O 439, devido as suas boas propriedades para estampagem e boa resistência à corrosão, é encontrado também em aplicações fora da indústria automobilística, em tanques de máquinas de lavar roupa, em fornos microondas e no revestimento interno de equipamentos de aço-carbono na indústria açucareira.

Outro ferrítico estabilizado, fabricado pela ArcelorMittal Inox Brasil, é o 444. A resistência à corrosão por pites e por frestas é muito boa, consequência de sua composição química: 18% de cromo e 2% de molibdênio. Em muitas aplicações,

este aço possui resistência à corrosão equivalente ao 316. Entre as principais aplicações, temos caixas de água e tanques residenciais para aquecimento de água. O 444 pode também ser utilizado em revestimentos internos de equipamentos fabricados em aço-carbono. Devemos lembrar que, se estes equipamentos trabalham em altas temperaturas, o revestimento não pode ser feito com inoxidáveis austeníticos porque a dilatação térmica dos inoxidáveis austeníticos é muito diferente do aço-carbono. Não é o caso dos inoxidáveis ferríticos que possuem coeficientes de dilatação muito parecidos com os do aço-carbono.

Tubos de 439 e de 444 constituem também uma alternativa interessante para trocadores de calor e condensadores, já que a troca de calor com tubos ferríticos é melhor que com tubos austeníticos. Por outro lado, como já foi mencionado, os inoxidáveis ferríticos são imunes à corrosão sob tensão. A utilização, em chapas e tubos, dos aços inoxidáveis 439 e 444 nas usinas de açúcar é hoje uma realidade no Brasil.

O aço P410D, com teor de Cr aproximadamente de 11% é uma boa alternativa para enfrentar problemas de abrasão.

Nos martensíticos, as duas variedades de 420 indicadas são utilizadas na fabricação de facas e discos para corte. Naturalmente, o 420 com teores mais altos de carbono atinge durezas mais elevadas na têmpera. O 420 tem também aplicação em peças que precisam ter ótima resistência ao desgaste, como por exemplo os discos de freio das motos. O P498V (ou EN 1.4116) possui uso exclusivo em facas de corte profissional, por ter dureza mais alta depois da têmpera.

Os cuidados necessários na especificação, no projeto e na fabricação.

Os aços inoxidáveis, seus diferentes acabamentos, suas principais características e aplicações já foram apresentados. Tentaremos agora dar informações, resumidas, de alguns aspectos que não podem ser ignorados tanto na especificação dos mesmos como na fabricação de equipamentos e outros objetos com estes materiais.

Logicamente, é impossível abordar neste texto todos os cuidados necessários. Mas podemos tratar de alguns aspectos, que por nossa experiência, merecem destaque especial. Falhas na utilização dos aços inoxidáveis são, muitas vezes, consequência direta da falta de conhecimentos específicos sobre os mesmos. Às vezes, o conhecimento existe, mas não recebe a importância que merece. Um exemplo típico é o da contaminação dos aços inoxidáveis com aço-carbono, um assunto amplamente conhecido, mas que continua sendo o responsável por um grande número de problemas de corrosão.

Os assuntos que pretendemos tratar agora são variados e incluem informações relacionadas com corrosão, acabamentos, propriedades mecânicas e operações a que os aços inoxidáveis são submetidos. Podem carecer de uma seqüência organizada, mas são os assuntos que tratamos no dia-a-dia e nos quais sabemos que existem problemas.

OS AÇOS INOXIDÁVEIS E OS MEIOS ÁCIDOS:

Nos meios ácidos, existe uma diferença fundamental no comportamento dos aços inoxidáveis. Por um lado, os meios ácidos oxidantes ajudam a formar (ou a conservar) o filme passivo, como é o caso dos ácidos nítrico e fosfórico, este último com algumas limitações que dependem da concentração e da temperatura (ver figuras 18 e 19). Por outro lado, os meios ácidos redutores não permitem a formação do mesmo (ou o destroem). Como exemplo deste último caso, podemos mencionar os ácidos clorídrico e fluorídrico, para os quais nunca podem ser especificados os aços inoxidáveis.

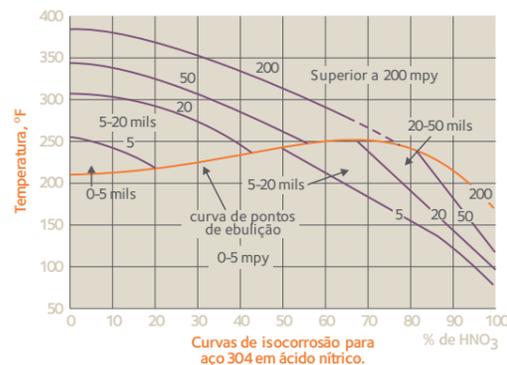


Fig. 18

Ácido Fosfórico

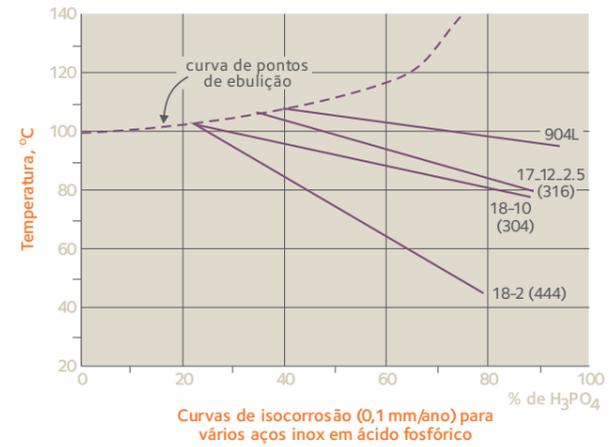


Fig. 19

Em ácido sulfúrico, um ácido bastante redutor, aços inoxidáveis como o 304 e o 316 resistem somente em soluções muito diluídas ou muito concentradas e em baixas temperaturas (figura 20).

Ácido Sulfúrico

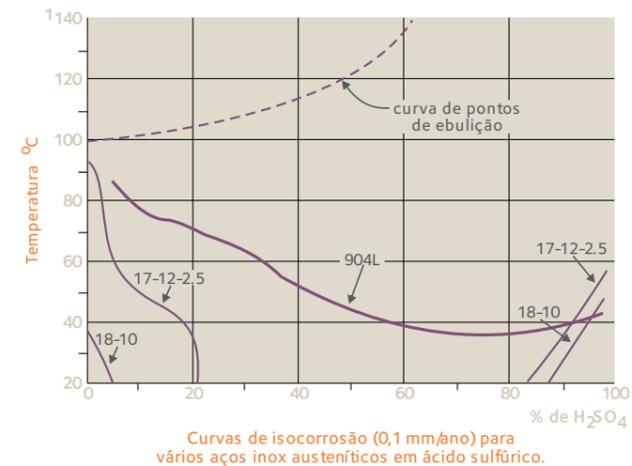


Fig. 20

A corrosão dos aços inoxidáveis nos meios ácidos redutores apresenta sempre um caráter generalizado, uniforme. Se o aço inoxidável já possuía um filme passivo, o ataque provocará lacunas de oxigênio no filme, como pode ser notado no esquema da figura 21.

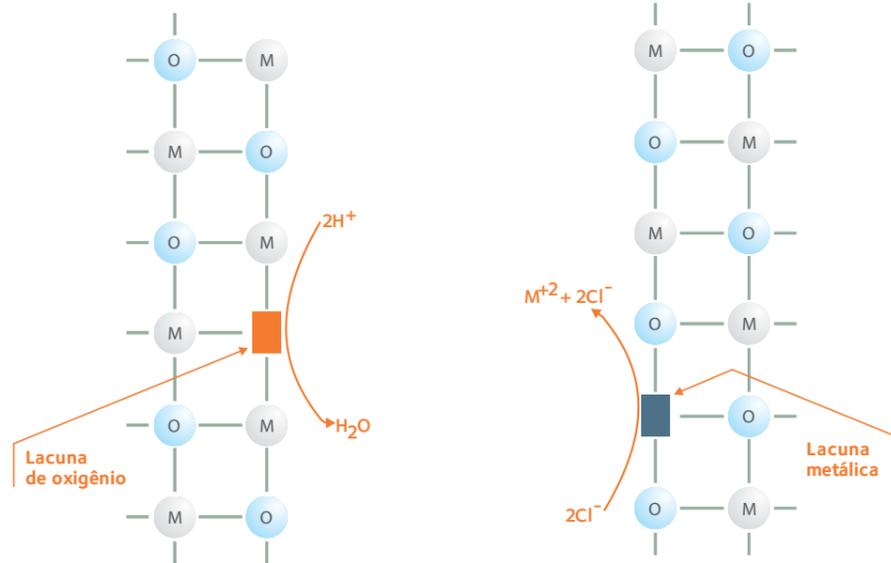


Fig. 21

Fig. 22

OS AÇOS INOXIDÁVEIS E OS MEIOS QUE CONTÊM CLORETOS:

Em meios que contêm ânion cloreto, os aços inoxidáveis correm o risco de sofrer formas localizadas de corrosão (como as corrosões por pites e em frestas). Já foi comentado que nestes meios existe também o risco da corrosão sob tensão, mas agora estamos nos referindo somente às formas mencionadas.

Neste caso, o ataque provocará lacunas metálicas no filme passivo, como pode ser visto na figura 22.

A velocidade de criação de lacunas aumenta com a concentração de cloretos no meio. O metal base migra ocupando essas lacunas, eliminando-as. A concentração de lacunas metálicas dependerá das velocidades de criação e de eliminação das mesmas. Se é predominante a velocidade de criação de lacunas, o filme passivo perde coesão e acaba sofrendo rupturas localizadas.

OS AÇOS INOXIDÁVEIS E OS MEIOS ÁCIDOS REDUTORES QUE CONTÊM CLORETOS:

A combinação entre os dois assuntos tratados anteriormente, nos leva a elaborar o quadro da figura 23, que pode ser considerado auto-explicativo.

Risco de corrosão	Soluções neutras	Ácidos redutores
Ausência de cloretos	Não	Possível corrosão uniforme
Presença de cloretos	Possível corrosão localizada	PERIGO!

Fig. 23

OS AÇOS INOXIDÁVEIS E O POTENCIAL DE PITE:

Em uma solução com cloretos, o potencial que é necessário atingir para que o metal colocado nessa solução apresente corrosão por pites é conhecido como potencial de pite.

Quanto mais nobre é o potencial de pite, mais alto é seu valor e melhor é a resistência do material à corrosão por pites no meio considerado. Logicamente, a acidificação do meio (diminuição do pH), o aumento da temperatura e o aumento da concentração de cloretos, favorecem a corrosão por pites (o potencial de pite passa a ser menor, mais ativo).

Na figura 24, apresentamos os potenciais de pite de vários aços inoxidáveis medidos em uma solução de cloreto de sódio 0,02M, pH=6,6.

É necessário observar nesta figura o importante efeito do cromo e, principalmente, do molibdênio na resistência à corrosão por pite. O titânio, como já foi comentado, tem também um papel destacado porque a formação de inclusões de sulfeto de titânio não permite que se formem as de sulfeto de manganês (que são as inclusões onde, quase sempre, começa a corrosão por pites).

De todos os aços mostrados, o 409 (11 Cr-Ti) possui o potencial mais ativo ou, em outras palavras, é o menos resistente à corrosão por pites. Embora não tenha titânio, o 430 (16,50% Cr) tem um potencial bastante mais nobre, o que é facilmente explicado pela diferença que existe nos teores desses dois aços. Comparando o 439 (17 Cr-Ti) com o 430, observa-se o papel do titânio na resistência à corrosão por pites.

O 434 (17 Cr-1 Mo), mostra que a adição de somente 1% de molibdênio nas ferritas com esses teores de cromo, mesmo que melhore o potencial de pite (comparar o 434 e o 430), não leva a uma diferença significativa (o potencial é inferior ao do 439). O 436 (17 Cr-1 Mo-Ti) mostra o efeito combinado de adições de molibdênio e titânio e possui um potencial superior aos aços 439.

No aço 441 (17 Cr-Ti-Nb) vemos que um excesso de nióbio não muda muito a

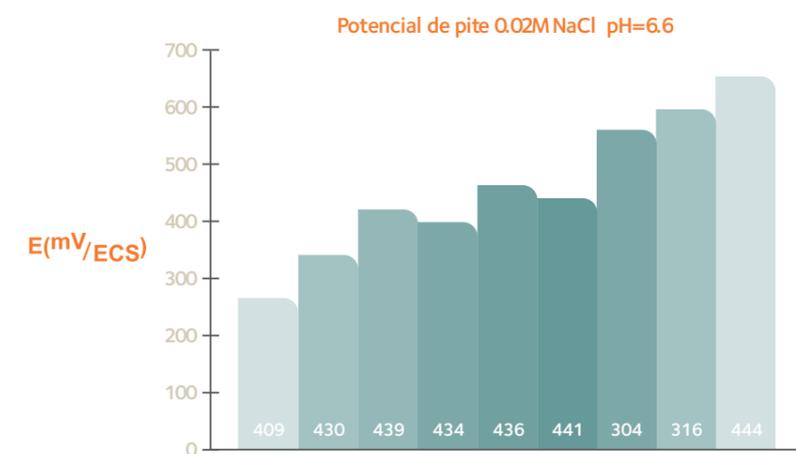


Fig. 24

situação (comparar com o 439). O salto no sentido nobre no potencial de pite que vemos no 304 (18 Cr-8 Ni) pode ser explicado pela mudança de estrutura (de ferrítica para austenítica) e pela maior capacidade de repassivação das ligas inoxidáveis que contêm níquel. O 316 (16 Cr-10 Ni-2 Mo), mostra novamente o efeito do molibdênio (o potencial de pite do 316 é bem mais nobre que o do 304). Por último, o 444 (18 Cr-2 Mo-Ti-Nb) parece surpreender ao superar o potencial de pite do 316 (no meio em que foi realizado o teste).

O conhecimento do potencial de pite de diversos materiais é de grande utilidade na escolha e especificação de um aço inoxidável quando se corre o risco de corrosão por pites.

O pH DE DEPASSIVAÇÃO NOS AÇOS INOXIDÁVEIS:

Na corrosão por frestas, no interstício provocado por um erro de projeto ou pelo depósito de sólidos nas paredes de um equipamento de aço inoxidável, ocorre uma forte e localizada mudança do meio agressivo. Uma vez começado um processo corrosivo em um interstício, devido à sua natureza autocatalítica, ocorre um aumento localizado da concentração de cloretos e da acidez.

O pH de depassivação é o pH abaixo do qual não há possibilidades de conservar o filme passivo.

Desta maneira, na corrosão por frestas, um dos mecanismos seguintes dará continuidade ao ataque: a elevação da concentração de cloretos (e portanto interessa-nos o potencial de pite do material, quanto mais alto melhor) ou o aumento da acidez do meio (e por isso é importante o pH de depassivação, quanto mais baixo melhor).

Na figura 25 podem ser observados os pH de depassivação de vários aços inoxidáveis em solução 2 M de cloreto de sódio.

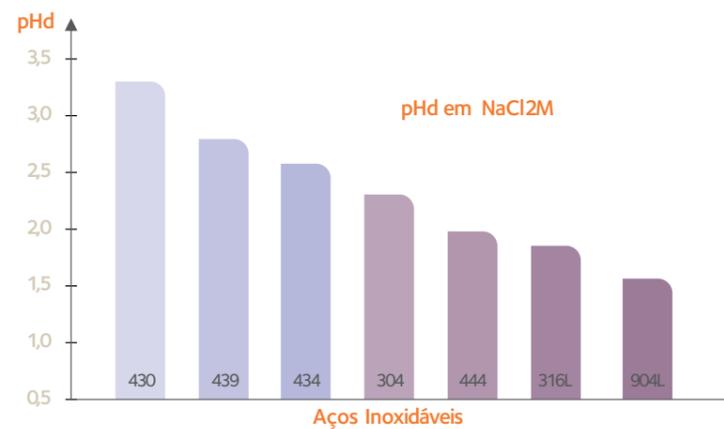


Fig. 25

Pelo que foi visto nestes últimos dois assuntos tratados, na corrosão por pite, o conhecimento do potencial de pite é fundamental para quem faz uma especificação do material. E na corrosão por frestas, além do potencial de pite, é também importante o pH de depassivação.

OS ACABAMENTOS E A RESISTÊNCIA À CORROSÃO:

O mesmo aço inoxidável, em um determinado meio, pode se comportar de diferentes maneiras em função do acabamento que foi dado ao mesmo.

Entre os aços lixados, o que tem menor rugosidade é mais resistente à corrosão, principalmente se considerarmos a corrosão por pites (figura 26). As medições de potenciais de pite em aços inoxidáveis com diferentes acabamentos lixados (granos de 120 e 600 mesh) demonstram grandes diferenças, que podem levar um deles (o mais rugoso) a não resistir, enquanto o outro resiste.

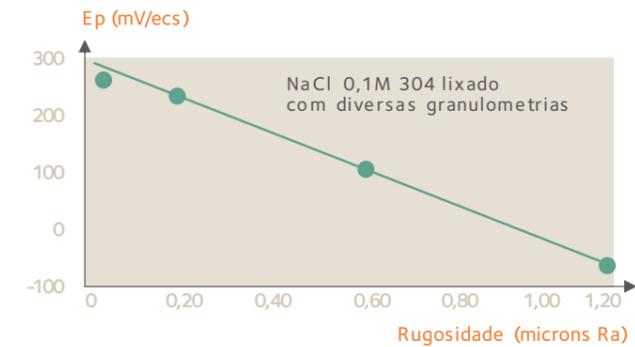


Fig. 26

A permanência em ácido nítrico (ácido usado em banhos de decapagem) melhora muito a resistência à corrosão. Em geral, quanto mais tempo permanece o material em uma solução de ácido nítrico, mais resistente é o mesmo (ver figura 27). Com certeza, o filme passivo que se forma, é muito superior ao que existe em um aço inoxidável que não foi tratado com ácido nítrico.

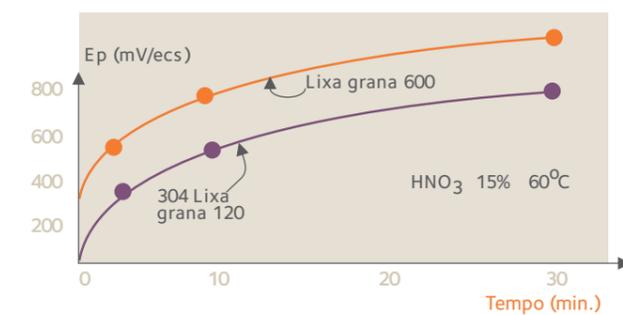


Fig. 27

Em uma operação de lixamento, o filme passivo é removido. Considerando que este filme é formado pela reação entre a liga e a água, entendemos que o mesmo volta a se formar pela condensação da umidade do ar sobre a superfície metálica que é sempre considerada uma superfície fria onde ocorre a condensação. Mas o filme é formado se as condições ambientais o permitem. A água ataca a superfície metálica e dois mecanismos diferentes podem ocorrer: formação do filme passivo ou (dependendo do meio ambiente e dos contaminantes) dissolução pela água, com corrosão.

O jateamento, por exercer um efeito de compressão, melhora a resistência à corrosão sob tensão dos aços inoxidáveis austeníticos mas, ao mesmo tempo, ao aumentar a rugosidade da superfície, faz com que a resistência à corrosão por pites diminua.

Os materiais lixados e também alguns acabamentos polidos possuem uma maior tendência à oxidação que os materiais com acabamento 2B, particularmente em aplicações com temperaturas superiores a 200 °C.

A CONTAMINAÇÃO NOS AÇOS INOXIDÁVEIS:

O contato físico entre os aços inoxidáveis e os aços-carbono, o lixamento com lixas não adequadas (como as que contêm abrasivos de óxido de ferro) ou com lixas adequadas mas que foram usadas antes para lixar aços comuns, o corte e a conformação de aços inoxidáveis em equipamentos que são também utilizados para trabalhar com aços-carbono e o lixamento de aços inoxidáveis, em ambientes que contêm partículas de ferro sólidas em suspensão, provocam a contaminação dos aços inoxidáveis. Pequenas partículas ficam aderidas ou incrustadas na superfície dos aços inoxidáveis. E essas partículas, por serem de aço-carbono, não resistem à corrosão atmosférica. A situação dessas partículas é mais grave ainda: elas estão em contato com um material mais nobre (o aço inoxidável) e estão formando um par galvânico. Por isso, tendem a corroer mais rapidamente (se estivessem sós, demorariam mais para corroer).

De fato, uma superfície de aço inoxidável contaminado apresentará pontos com ferrugem. Não é o aço inoxidável o que está sofrendo a corrosão, mas a imagem transmitida é a de uma superfície com corrosão. Como o produto da corrosão do aço-carbono contém cátion férrico, $Fe(+3)$, um cátion muito oxidante, o problema pode passar para o aço inoxidável, começando a corroer.

Do que foi comentado, depreende-se que a contaminação é um problema que deve ser evitado. No caso da contaminação ser inevitável, a solução é tratar o aço inoxidável com um produto que dissolva as partículas de aço comum e que não ataque o aço inoxidável. Ou, em outras palavras, um tratamento com uma solução de ácido nítrico elimina a contaminação (além de reforçar o filme passivo).

Para saber se um aço inoxidável está contaminado, são utilizadas soluções que contêm ácido nítrico e ferricianeto de potássio. Pulveriza-se esta solução na superfície do material e, se aparecerem pontos azuis, estará confirmada a contaminação. Os pontos azuis (muito intensos) são o resultado da formação de ferrocianeto férrico, também chamado de azul de Prússia.

AS PROPRIEDADES MECÂNICAS DOS AÇOS INOXIDÁVEIS E A RESISTÊNCIA À OXIDAÇÃO EM ALTAS TEMPERATURAS:

Tanto os aços-carbono como os aços inoxidáveis sofrem uma diminuição nos valores de suas propriedades mecânicas quando trabalham em altas temperaturas. Esta é, na realidade, uma característica dos metais e das

diversas ligas metálicas. Nos aços comuns, a perda nas propriedades mecânicas é mais significativa que nos aços inoxidáveis austeníticos o que explica a preferência na escolha destes materiais para aplicações em altas temperaturas. O projeto de equipamentos tem que considerar este aspecto, que nunca pode ser esquecido no momento de se fazer uma especificação.

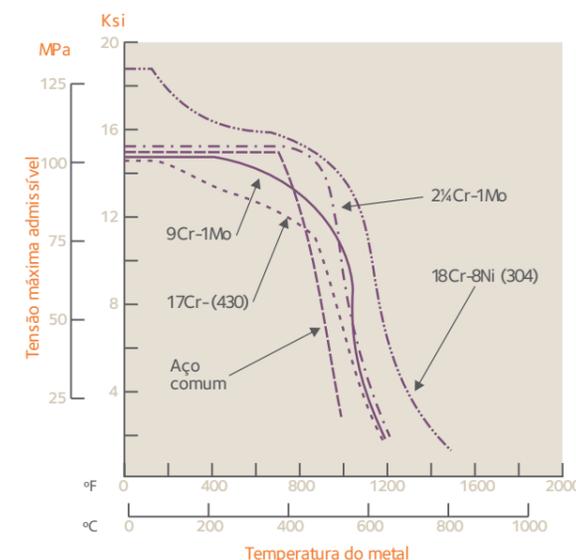


Fig. 28

Na figura 28, podemos comparar os diferentes comportamentos dos aços inoxidáveis 304 e o 430 e do aço-carbono, especialmente quando trabalham em temperaturas superiores a 425 C. As vantagens do aço 304 são evidentes.

A partir dessa temperatura, os materiais sofrem uma deformação plástica gradual e permanente quando está aplicada uma certa carga ou tensão nos mesmos. A deformação que ocorre com o tempo (e que depende do mesmo) é conhecida como "creep". As figuras 29 e 30 mostram as temperaturas e tensões necessárias para provocar a ruptura de vários aços inoxidáveis em tempos de 10.000 e 100.000 horas. As temperaturas e tensões, que provocam "creep" com uma taxa de 1% em 10.000 e 100.000 horas, são mostradas nas figuras 31 e 32.

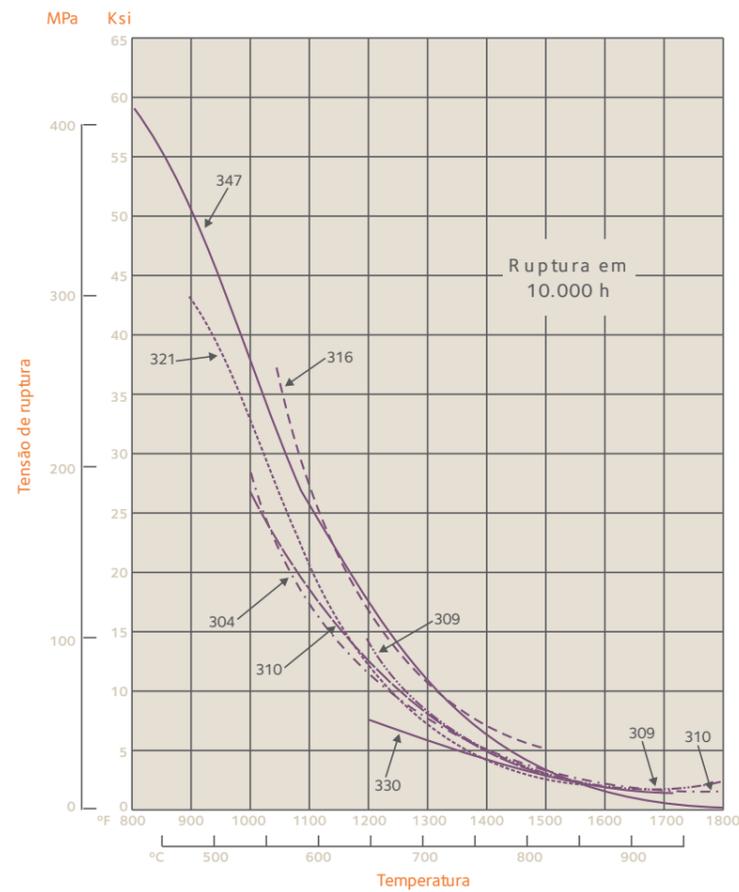


Fig. 29

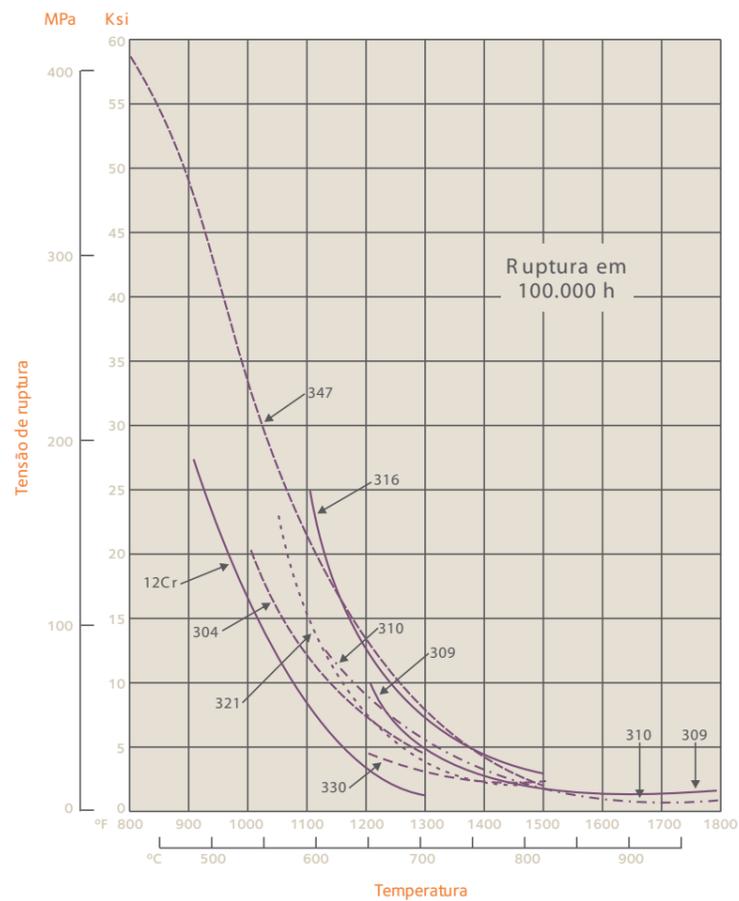


Fig. 30

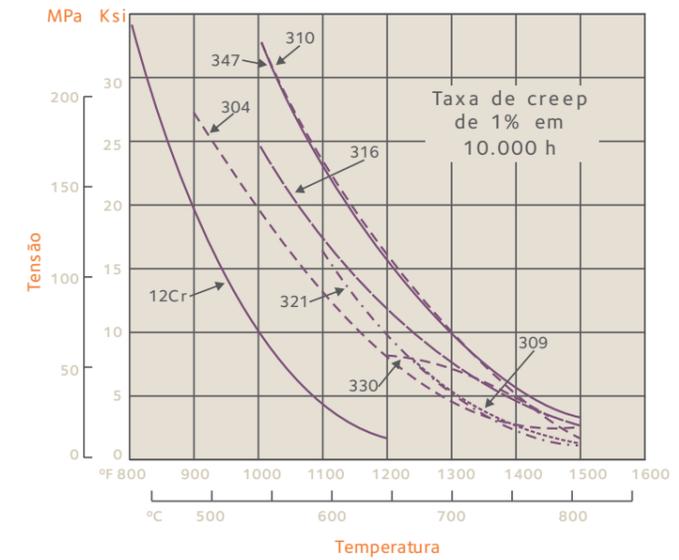


Fig. 31

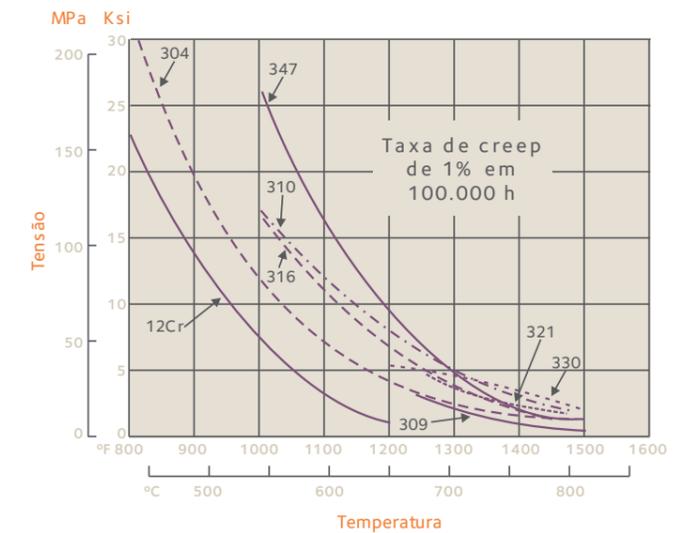


Fig. 32

Em altas temperaturas, a resistência à oxidação é, normalmente, o aspecto mais importante na escolha de um material (e o comportamento dos aços inoxidáveis em altas temperaturas já foi comentado neste texto). Os aços inoxidáveis são superiores ao aço-carbono em altas temperaturas considerando tanto a resistência à oxidação como as propriedades mecânicas.

Isso pode ser notado na figura 33 onde o aço 430 e vários inoxidáveis austeníticos são comparados com o aço-carbono e com outros aços ligados (mas não inoxidáveis).

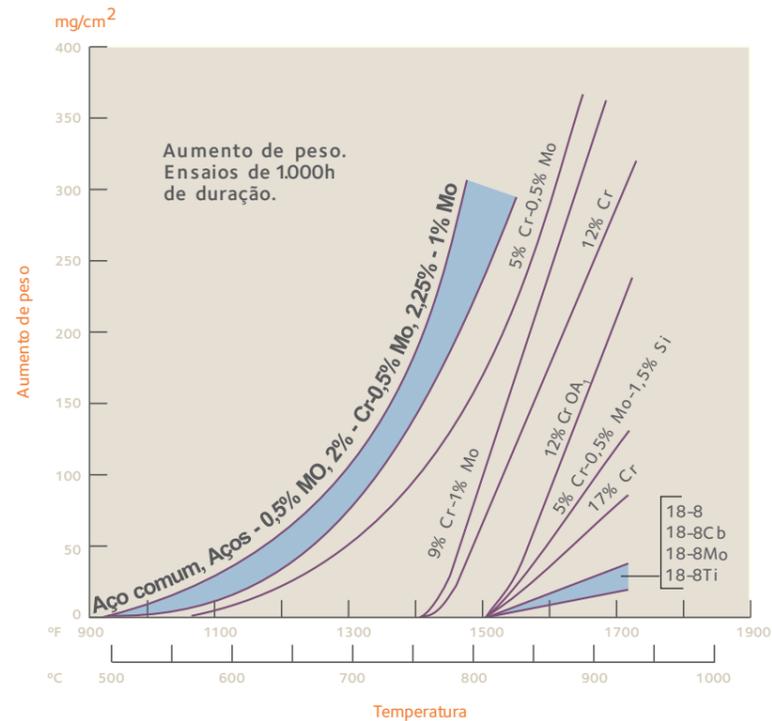


Fig. 33

OS PARES GALVÂNICOS E OS AÇOS INOXIDÁVEIS:

Entre os metais (ou ligas) diferentes que estão em contato em um determinado eletrólito, existe sempre uma diferença de potencial que provoca uma migração de elétrons desde o mais ativo dos metais até o mais nobre. A corrosão ocorre sempre no mais ativo (chamado ânodo) dos elementos do par galvânico, ficando o elemento mais nobre (cátodo) protegido.

Na figura 34, mostra-se uma Série Galvânica de diferentes metais e ligas em água do mar. Para evitar problemas de corrosão galvânica, sempre que for necessário utilizar materiais diferentes em um determinado projeto, os materiais devem ser escolhidos de maneira que fiquem muito perto uns dos outros na série galvânica mostrada. Na figura, os materiais que se encontram dentro do mesmo colchete não formam pares galvânicos capazes de provocar corrosão galvânica (ou muito dificilmente a provocarão). Particularmente, aços inoxidáveis diferentes, como os indicados na série galvânica, se estão em contato, não provocam problemas de corrosão galvânica. A importância da passividade está também destacada nessa figura (ver as diferentes posições dos aços inoxidáveis nas condições de passivos e ativos na figura 34).

Série Galvânica em água de mar

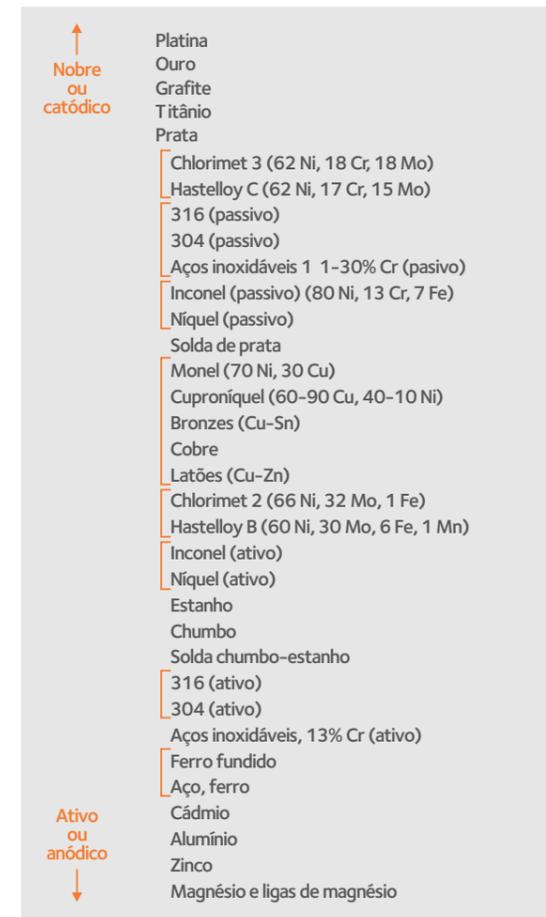


Fig. 34

A RESISTÊNCIA DOS AÇOS INOXIDÁVEIS À CORROSÃO NA ÁGUA:

A figura 35 relaciona as temperaturas e as concentrações de cloreto aceitáveis para o uso dos aços 304 e 316. Como em todos os gráficos sobre corrosão, devemos comentar que os mesmos podem mudar (e muito) em função de outros contaminantes presentes no meio. A adição de oxidantes para controlar as bactérias deve ser feita sempre com muito cuidado. Para soluções que possuem uma quantidade de cloro livre entre 3 e 5 ppm, recomenda-se o 316/316L, para que seja evitada a corrosão por frestas.

A adição de hipoclorito de cálcio pode provocar corrosão por pites devido à lenta dissolução deste sal na água e ao depósito da mesma como um sólido na superfície do aço inoxidável. Por isso, a dissolução do hipoclorito de cálcio deve ser feita antes. Outra forma de evitar este problema é usar uma solução de hipoclorito de sódio. Mas sempre é bom lembrar que existem limites para a utilização de hipocloritos, um ânion que, como o cloreto, pode provocar corrosão por pites e por frestas.

O ozônio é também um oxidante poderoso e sua utilização não cria compostos agressivos para os aços inoxidáveis. O aço 316 é o material utilizado na fabricação de ozônio.

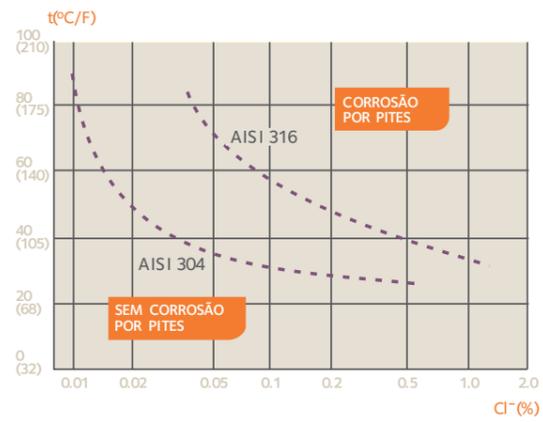


Fig. 35

O PROJETO DE EQUIPAMENTOS DE AÇO INOXIDÁVEL:

Além das recomendações feitas, considerando as temperaturas de trabalho e as composições químicas de diversos meios, no projeto do equipamento devem ser considerados outros aspectos, que vão desde a resistência mecânica dos materiais até a forma dos equipamentos. Aspectos relacionados com as soldagens não são considerados neste texto porque já existe material específico sobre o mesmo (Soldagem dos aços inoxidáveis, Programa de Capacitação da Cadeia Produtiva, ArcelorMittal Inox Brasil). Na soldagem (assim como em outras operações realizadas) são introduzidas tensões. O cuidado que deve ser tomado é muito grande e deve-se tentar sempre introduzir a menor quantidade de tensões, já que tratamentos térmicos para aliviar tensões nem sempre são possíveis (pela forma e o tamanho dos produtos fabricados).

A forma dos equipamentos tem uma grande importância no comportamento do material frente à corrosão. Condições com pouco movimento de fluidos, com baixas velocidades são, em particular, prejudiciais para os aços inoxidáveis, porque favorecem formas localizadas de corrosão, como a corrosão por pites e por frestas (neste último caso, as baixas velocidades dos fluidos ou fluidos estagnados provocam com maior facilidade depósitos sobre a superfície dos materiais). Em outros casos, o projeto pode favorecer formas de corrosão associadas a processos de cavitação e erosão.

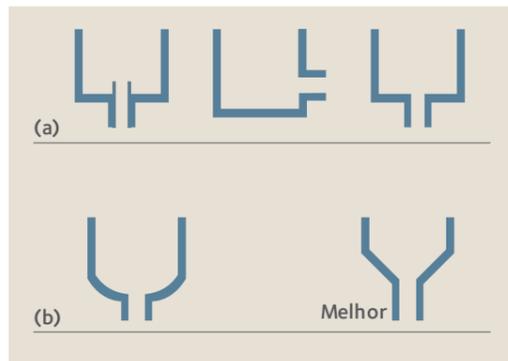


Fig. 36

Na figura 36, podem ser notadas algumas formas não adequadas (a) e outras adequadas (b) de recipientes que contêm líquidos, soluções ou líquidos com sólidos em suspensão. A facilidade de drenagem, a forma dos cantos dos recipientes e os espaços mortos são aspectos que merecem atenção. Nos recipientes com a forma indicada por (a), depósitos podem provocar corrosão em frestas.

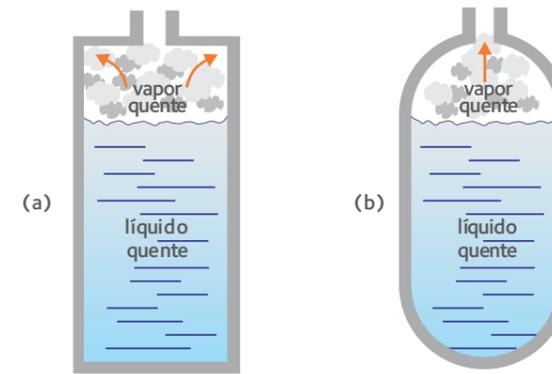


Fig. 37

Dois recipientes diferentes para conter um líquido quente e seu vapor são mostrados na figura 37. Em um dos casos, os cantos fechados da parte superior do recipiente atuam como armadilhas que não permitem a saída dos vapores quentes.

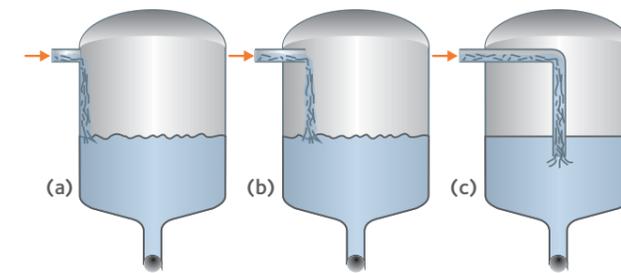


Fig. 38

Na figura 38 são mostrados três recipientes que recebem um líquido corrosivo. Em dois deles (a) e (b), o líquido corre pela parede do tanque ou cai numa região perto da parede, respingando na mesma. A forma correta é a (c).

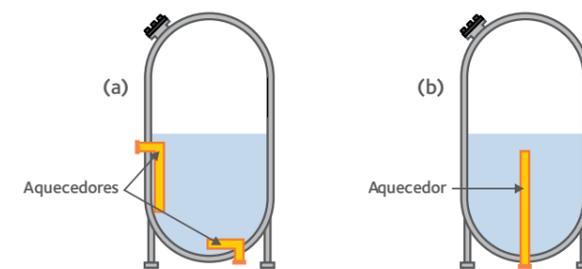


Fig. 39

A forma de aquecer uma solução dentro de um recipiente possui também importância. Na figura 39, a maneira como foram colocados os dispositivos para aquecimento pode produzir ebulição na parte inferior do recipiente (a), o que não ocorre em (b).

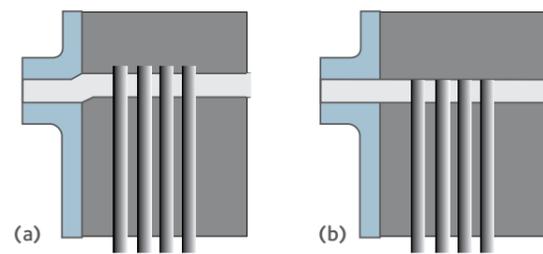


Fig. 40

Na figura 40, são mostradas formas incorretas (a) e corretas (b) de colocar os tubos em um trocador de calor. A forma (a) favorece a formação de depósitos.

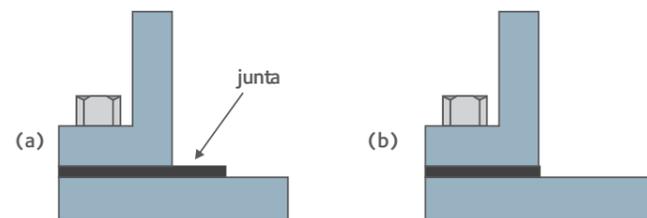


Fig. 41

Algumas vezes, são utilizadas juntas dielétricas (teflon, neopreno) para separar dois materiais metálicos diferentes. Na figura 41, em (a), o dielétrico cria condições que favorecem a corrosão em frestas, situação bem diferente da mostrada em (b), que é a correta.

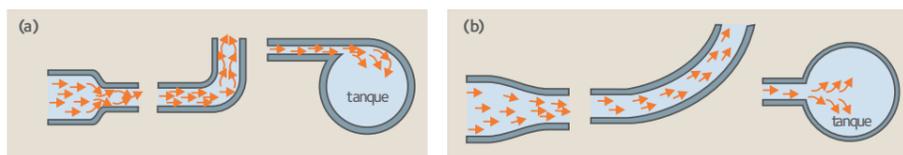


Fig. 42

As últimas figuras que estamos mostrando estão relacionadas com tubos e fluidos em movimento. Na figura 42, em (a), a rápida redução do diâmetro de um tubo ou o ângulo de dobramento provocam turbulência, o que pode ocasionar um maior desgaste do material. Também em (a), a forma de transportar o fluido por um tubo até um tanque não é adequada porque ele chega diretamente em uma das paredes favorecendo a erosão. Nas mesmas situações, em (b), temos as formas mais corretas para evitar os problemas mencionados.

Na figura 43, em (b), são mostrados desenhos mais adequados que os mostrados em (a) para que seja evitada uma turbulência excessiva.

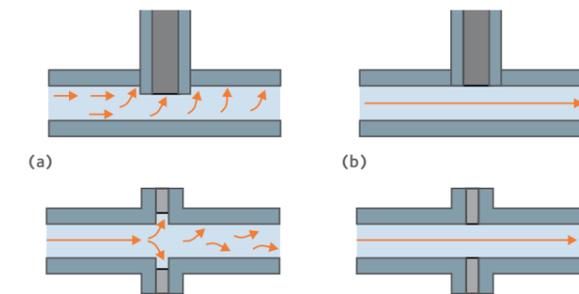


Fig. 43

Considerações finais.

Os temas tratados nestes texto merecem discussões específicas que não pertencem ao objetivo do mesmo.

Em particular, os comentários feitos sobre especificação de materiais devem ser considerados somente como uma orientação e cada caso deve ser tratado com mais profundidade. Pequenas alterações na composição de um determinado meio, o efeito de contaminantes presentes (as vezes em proporções muito pequenas), variações de temperatura, etc. Podem causar uma grande mudança no comportamento de um material frente à corrosão.

Por este motivo deixamos uma recomendação final: em cada caso é sempre conveniente consultar um especialista.

As figuras mostradas foram retiradas da bibliografia mencionada.

Bibliografia e materiais consultados:

- ASM Specialty Handbook. Stainless Steels. Ed. J.R. Davis.
- Corrosion Engineering. Mars G. Fontana and Norbert D. Greene. Ed. McGraw-Hill Book Company.
- Corrosion and Corrosion Control. Herbert H. Uhlig. Ed. John Wiley and Sons Inc.
- Corrosion and Passivity. Bernard Baroux. Fifth Seminar on Stainless Steels. USINOR.
- Methods. Eric Chauveau and Grégory Berthomé. Fifth Seminar on Stainless Steels. USINOR.
- The role of Stainless Steels in Petroleum Refining. American Iron and Steel Institute. Committee of Stainless Steel Producers.
- Corrosion Handbook. Stainless Steels. Sandvik Steel.
- Stainless Steels and their use in Water Treatment and Distribution. Carol Powell and Steve Lamb. Stainless Steel World.
- Acabamento Superficial em Aço Inoxidável: Processo, Caracterização e Aplicação. Isabel Noemi Gonçalves. Seminário Inox 2000. ACESITA.
- Catálogo de Produtos Inox da Acesita. Marco Antônio Nunes. Seminário Inox 2000. ACESITA.
- Aços Inox. Características e Propriedades de Uso. José Antonio Nunes de Carvalho. Seminário Inox 2000. ACESITA.
- Aços Inoxidáveis. Acabamentos. Valdir Luís Fodra Filho. ACESITA.
- Aços Inoxidáveis: Desenvolvimento e Aplicações. Héctor Mario Carbó. ACESITA.
- O Acabamento nos Aços Inox.

Figura 1: José Antonio Nunes de Carvalho. Aços Inox - Características e propriedades de uso. Seminário Inox 2000. ACESITA

Figuras 2, 4, 5, 8, 9, 10, 11, 12, 18 e 34: Fontana & Greene. Corrosion Engineering. McGraw-Hill Book Company.

Figuras 13 e 14: Isabel Noemi Gonçalves. Acabamento superficial em aço inoxidável: processo, caracterização e aplicação. Seminário Inox 2000. ACESITA

Figuras 17, 28, 29, 30, 31, 32 e 33: American Iron and Steel Institute. Committee of Stainless Steel Producers. The role of stainless steels in petroleum refining.

Figuras 19, 20 e 35: Sandvik Steel Corrosion Handbook. Stainless Steels.

Figuras 21, 22 e 23: Bernard Baroux. Corrosion and passivity. Fifth Seminar on Stainless Steels. USINOR

Figuras 24 e 25: Eric Chauveau, Grégory Berthomé. Methods. Fifth Seminar on Stainless Steels. USINOR

Figuras 26 e 27: Héctor Mario Carbó. Corrosão por pites. Seminário Inox 2000. ACESITA

Figuras 36, 37, 39, 40 e 43: ASM Specialty Handbook. Stainless Steels.

As informações contidas nesta publicação foram obtidas de resultados de ensaios de laboratórios e de referências bibliográficas tradicionais e respeitáveis.

O comportamento dos aços inoxidáveis pode sofrer alterações devido a mudanças de temperatura, pH, teores de contaminantes e também devido ao estado de conservação de equipamentos utilizados na soldagem e na conformação.

Por estas razões, as informações desta publicação devem ser utilizadas como uma referência inicial para ensaios ou para uma especificação final por parte do comprador. O Núcleo Inox, a ArcelorMittal Inox Brasil e o autor do presente trabalho não se responsabilizam por perdas ou prejuízos que sejam consequência do uso não adequado das informações apresentadas.

ArcelorMittal Inox Brasil

Escritório Comercial

Av. Brigadeiro Faria Lima, 1.355 - 20º andar
CEP 01452-919 - São Paulo - SP - Brasil
Tel. Geral (11) 3818 1700
Tel. Construção Civil (11) 3818 1960 / 3818 1811
Fax (11) 3816 1812

www.arcelormittalinoxbrasil.com.br