

MÓDULOS DE TREINAMENTO

CONHECENDO OS AÇOS INOXIDÁVEIS

Coordenação:

ABINOX

Por:

Eng. Ronaldo Claret Ribeiro da Silva

7

**SELEÇÃO DOS
AÇOS INOXIDÁVEIS**



MÓDULOS DE TREINAMENTO

CONHECENDO OS AÇOS INOXIDÁVEIS

Professor:

Ronaldo Claret Ribeiro da Silva

Engenheiro Mecânico, Mestre em Engenharia Metalúrgica pela UFMG.

Experiência Profissional: 40 anos na Aperam South America nas áreas de Produção, Metalurgia e Pesquisa, tendo ocupado as posições de Pesquisador (processos a quente e a frio dos aços Inox), Gerente Executivo de Metalurgia do Inox, Gerente Executivo do Centro de Pesquisa. Larga experiência internacional. Autor e coautor de inúmeros artigos técnicos e de várias patentes de produtos e processos.

Organizado por:

ABINOX

AS FAMÍLIAS DOS AÇOS INOX

Os aços inox são fundamentalmente ligas ferro-cromo, às quais podem ser acrescentados outros elementos tais como níquel e molibdênio. A combinação destas adições gera os inúmeros tipos de aço inox, e o seu balanço leva a diferentes estruturas metalúrgicas que darão origem a 5 diferentes famílias: Ferríticos; Martensíticos; Austeníticos; Duplex; Endurecíveis por Precipitação, tabela I.

Família	Aço	Composição Química (%)						
		Cr	Ni	Mo	C	Mn	N	Outros
Austeníticos	304	18,1	8,1	0,1	0,04	1,1	0,05	-
	304L	18,2	8,1	0,1	0,02	1,2	0,05	-
	316/L	16,5	10,1	2,1	0,02	1,4	0,05	-
	310	25,2	19,1	0,1	0,05	1,4	0,05	-
	200 (*)	15,4	1,0	0,1	0,10	9,0	0,10	Cu = 1,6
Ferríticos	409	11,2	0,1	0,1	0,01	0,2	0,01	Ti = 0,2
	430	16,2	0,1	0,1	0,05	0,4	0,05	-
	430DDQ	16,2	0,1	0,1	0,02	0,2	0,02	Nb = 0,4
	439	17,2	0,1	0,1	0,01	0,2	0,01	(Ti+Nb) = 0,4
	444	17,7	0,1	1,8	0,01	0,2	0,01	(Ti+Nb) = 0,3
Martensíticos	420	16,2	0,1	0,1	0,32	0,2	0,02	-
	498 (**)	14,3	0,1	0,5	0,46	0,3	0,03	-
Duplex	2304	22,3	3,9	0,3	0,02	1,5	0,11	-
	2305	22,6	5,4	2,7	0,02	1,9	0,15	-
PH	17-4	16,5	4,3	0,1	0,05	0,8	0,03	Cu=4 Nb=0,3
	17-7	16,5	7,5	0,1	0,05	0,8	0,03	Al = 1,1
	15-5	14,5	4,0	0,1	0,05	0,08	0,03	Cu=4 Nb=0,3

(*) 1%Ni – Não normatizado – Há casos de Cr < 14% e sem adição de Cu; (**) Aperam

Tabela 1: Composição química típica de alguns aços inox (%)

SELEÇÃO PELA RESISTÊNCIA À CORROSÃO

A seleção do aço com melhor custo-benefício para um ambiente corrosivo específico é uma tarefa complexa. Um dos principais fatores na seleção do material é a vida útil esperada do metal, face as propriedades de resistência à corrosão e o ambiente no qual o material será usado.

Corrosão Uniforme:

Normalmente, o aço inoxidável não corrói uniformemente como os aços carbono, porém, em certos ambientes, como os ácidos fortes e algumas soluções alcalinas, a corrosão geral uniforme é o principal mecanismo, figura 1. Existem tabelas que indicam a taxa de corrosão dos aços em diversos meios. Com elas os aços podem ser comparados e selecionados conforme o ambiente. Mas alguns cuidados devem ser tomados, pois pequenas diferenças entre ambientes semelhantes podem fazer uma grande diferença nas taxas de corrosão. Mesmo traços de cloreto, por exemplo, podem ser muito prejudiciais.



Figura 1. Corrosão generalizada em um tubo de vapor em aço inox exposto ao ácido sulfúrico

A corrosão geral pode ser reduzida ou mesmo evitada pela seleção adequada de um aço resistente ao ambiente corrosivo. Os elementos Cr, Mo e Ni tornam a liga mais resistente a diferentes meios, tabela 2:

- O Cromo aumenta a resistência a ácidos oxidantes, como os ácidos nítrico e cítrico. Quanto mais cromo, melhor. O cromo também melhora a resistência à oxidação em altas temperaturas;
- O Molibdênio melhora a resistência aos íons haletos e aos ácidos redutores, como o ácido clorídrico.
- O Níquel oferece resistência aos ácidos redutores e produz um filme de óxido fortemente aderente na oxidação em alta temperatura.

Aço	Adições	Água doce	Atmosfera			Produtos Químicos		
			Urbana	Industrial	Marinha	Leves	Oxidantes	Redutores
410	11Cr	X	X	-	-	X	-	-
200	15Cr1Ni9Mn	X	X	-	-	X	-	-
430	16Cr	X	X	X	-	X	X	-
304	18Cr8Ni	X	X	X	X	X	X	-
316	16Cr10Ni2Mo	X	X	X	X	X	X	X

Tabela 2: Efeito da adição de elementos de liga na adequação ao ambiente.

Corrosão localizada:

A corrosão localizada é o mecanismo mais frequente pelo qual os aços inoxidáveis sofrem corrosão: a corrosão por pites e a corrosão por frestas, figura 2. Estas dependem da presença de cloretos no meio ambiente, e são agravadas pela temperatura elevada. A resistência de um determinado grau de aço inoxidável à corrosão por pite e por frestas é indicada por seu PREN, “Pitting Resistance Equivalent Number”. O PREN é uma maneira de se correlacionar a composição química com a resistência à corrosão por pites, figura 3.



Figura 2: Corrosão por Pites em um tubo (a) e Corrosão por Frestas em uma flange (b)

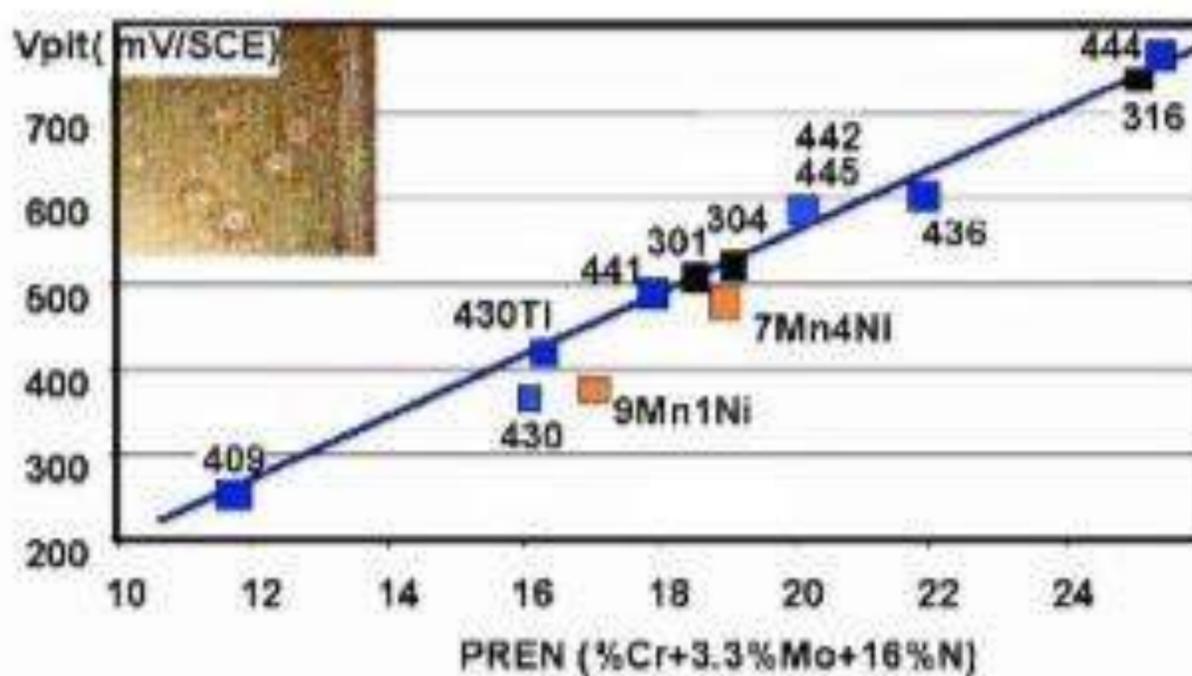


Figura 3: Potencial de Pite para vários aços inox (0,02M NaCl, 23 oC, pH=6,6)

Nota-se claramente que aços com Cromo, Molibdênio e Nitrogênio mais altos são mais resistentes. Esta é a razão para o uso do aço 316 (2% Mo) como o padrão para acessórios marinhos, e também explica a seleção do aço duplex 2205 com 3% de Mo e 0,15% de N para resistência a cloretos mais elevados em temperaturas mais altas (o PREN do 2205 é 34). Em condições mais extremas pode-se utilizar os “super austeníticos” e os “super duplex”, com até 6% de Mo e PREN 43. Para os aços da série 200 há um efeito nocivo do Mn que pode reduzir o PREN em até 3 pontos.

No gráfico da figura 4 observa-se como o pH, o teor de cloretos e o PREN se correlacionam com a resistência a corrosão por pites.

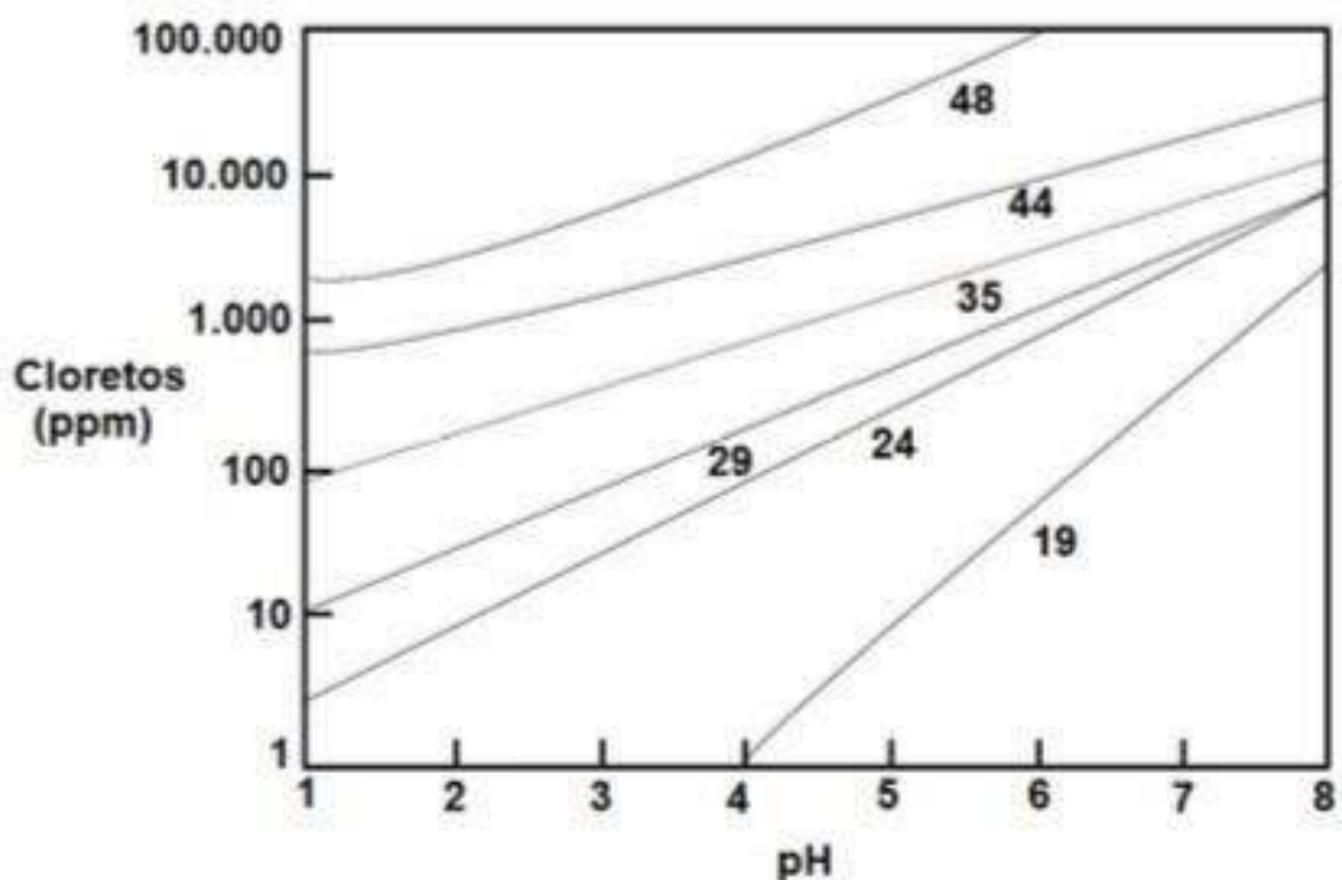


Figura 4: Correlação da corrosão por pites com o PREN, com o teor de cloretos e com o pH para aços austeníticos. Temperatura de 65 a 80oC. A falha ocorre acima das linhas.

Outro fenômeno é o "Tea staining". Trata-se de uma descoloração da superfície do aço inox, uma forma particular de corrosão localizada observada em itens de aço inoxidável, como corrimãos e acessórios, expostos à atmosfera marinha, figura 5. É um problema cosmético que não afeta a integridade estrutural ou a vida útil do material. Aços com valores mais elevados de PREN resistem melhor a este problema. Mas a qualidade do acabamento, métodos de fabricação e instalação e extensão da manutenção contínua são todos altamente relevantes. Seleção de um aço com PREN mais baixo e, portanto, de custo mais baixo, pode ser compensado com um maior esforço no acabamento e maior manutenção.



Figura 5: “Tea Staining” em um aço inox

Corrosão Intergranular

A corrosão intergranular está relacionada com a precipitação de carbonetos de cromo nos contornos de grão, que reduz a resistência à corrosão nesta região. Diz-se que o aço está sensibilizado. Esta forma de corrosão é comum nas regiões termicamente afetadas pelas soldas.

No gráfico apresentado na figura 6a observa-se como ocorre esta precipitação em função dos teores de C, da temperatura e do tempo. Para um elevado teor de C, superior a 0,08%, a sensibilização se dá em temperaturas mais elevadas e em um tempo muito curto, menos de 1 minuto. Já para carbono mais baixo, inferior a 0,030%, a temperatura de sensibilização é mais baixa, e o tempo é bem longo, mais de 10 horas. Na figura 6b ilustra-se como se dá a precipitação de Carbonetos de Cromo nos contornos de grão. As regiões vizinhas a estes precipitados ficam empobrecidas em Cr, reduzindo sua resistência à corrosão, possibilitando a ocorrência da corrosão intergranular.

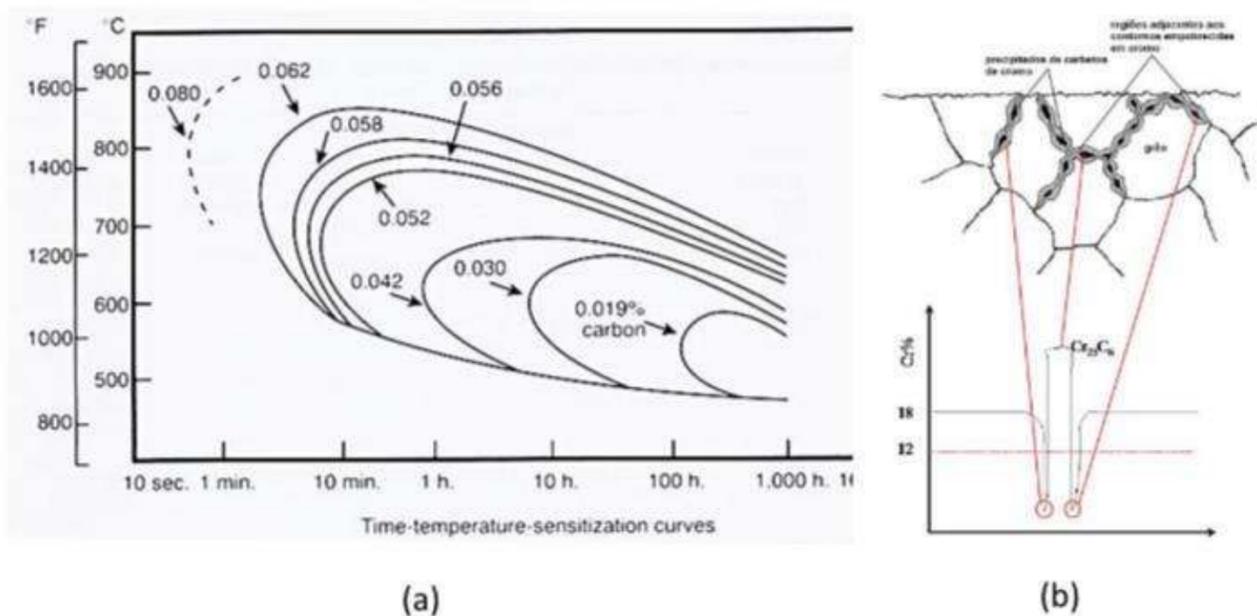


Figura 6. Diagramas Tempo-Temperatura-Sensitização para um aço 304 (a); Precipitação de Carbonetos de Cromo nos contornos de grão (b)

Para evitar a sensitização, ou a corrosão intergranular, há duas maneiras: a utilização de aços com baixo teor de C, como o 304L, ou a utilização de aços

estabilizados, como o 321. Nos aços estabilizados o carbono está todo combinado com Ti, ou Nb, evitando-se assim a sua combinação com o Cr. No caso de chapas mais finas, inferiores a 1,0 mm, a utilização de carbono inferior a 0,05% já é suficiente para evitar a sensitização.

Corrosão sob-tensão:

Um problema particular para os aços austeníticos comuns (por exemplo, 304 e 316) é a corrosão sob tensão (SCC), figura 7. Como a corrosão por pite, ela ocorre em ambientes com cloreto, é possível ocorrer a SCC com apenas vestígios de cloretos, desde que a temperatura esteja acima de cerca de 60°C, e desde que haja tensão de tração no aço, o que é muito comum. Os aços ferríticos são virtualmente imunes a esta forma de ataque, e os aços duplex são altamente resistentes. Se a SCC for um problema provável, é prudente especificar aços ferríticos, ou duplex.



Figura 7. Corrosão sob tensão

A seguir é apresentado um passo-a-passo para a seleção da melhor liga:

1. Conheça bem a natureza do ambiente com relação à composição química, temperatura, pH, velocidade, etc. Use as tabelas da taxa de corrosão para determinar as opções de aço inox com a melhor resistência à corrosão uniforme.
2. Determine se há cloretos presentes. Se sim, e geralmente há, selecione o aço em função do pH e do teor de cloretos, usando gráficos como o da figura 4.
3. Verifique se há possibilidade de ocorrer corrosão intergranular e então escolha faixa de carbono para evitá-la, ou use um aço com baixo teor de carbono, ou estabilizado.
4. Finalmente, verifique se as condições de trabalho propiciam a ocorrência de corrosão sob tensão. Neste caso escolha um aço imune a este fenômeno.

SELEÇÃO PELAS PROPRIEDADES MECÂNICAS

As propriedades mecânicas são, geralmente, o segundo critério de seleção, após a resistência à corrosão. Muitas vezes se encontra alta resistência mecânica e alta resistência à corrosão em um mesmo aço, como nos aços duplex.

As condições de trabalho do aço irão guiar sua seleção. A primeira delas é a temperatura, pois nem todos aços inox se aplicam em criogenia e em temperaturas elevadas. Em seguir vem a espessura provável do material, pois alguns aços inox perdem tenacidade em espessuras mais grossas.

Propriedades Mecânicas na temperatura ambiente

Os aços inoxidáveis podem ser divididos em quatro grupos com propriedades semelhantes dentro de cada grupo (que de certa forma correspondem às famílias de aços inox): martensítico e PH, ferríticos, duplex e austeníticos. Na tabela 3 encontram-se as propriedades mecânicas típicas na temperatura ambiente para uma série de aços inoxidáveis:

Aço	LE (Kg/mm ²)	LR (kg/mm ²)	Al (%)
304	290	579	55
316	290	558	50
430	345	517	25
420	780	980	16
PH	790	930	18
2205	620	840	29

Tabela 3: Propriedades mecânicas típicas para alguns aços inox na temperatura ambiente

As propriedades mecânicas dos aços inoxidáveis austeníticos são fortemente afetadas pelo trabalho a frio. Seu efeito geral é aumentar o limite de escoamento a resistência à tração e, ao mesmo tempo, diminuir o alongamento. Se utiliza este fenômeno deliberadamente para aumentar a resistência de alguns aços austeníticos, como no caso dos aços 301, tabela 4:

301LN	LE (kg/mm ²)	LR (kg/mm ²)	AI (%)	HRC
Recozido	335	900	45	88
D2 (1/8)	570	910	37	21
D3 (1/4)	653	947	36	25
D4 (1/2)	806	961	25	31

Tabela 4: Propriedades Mecânicas típicas do aço 301LN recozido e com diferentes graus de encruamento.

Tenacidade – Aplicações em Criogenia – A influência da espessura

A tenacidade dos diferentes aços inox mostra uma variação considerável, indo desde excelente tenacidade em todas as temperaturas para os aços austeníticos até o comportamento frágil dos aços martensíticos. Na figura 8 mostra-se a tenacidade ao impacto para as famílias de aço inox.

Esta propriedade é importante quando se vai utilizar o aço em baixas temperaturas, tais como: tanques, aquecedores, evaporadores e outros equipamentos para manuseio de gases condensados, como nitrogênio líquido. Ou mesmo quando o ambiente externo estiver em temperaturas sub-zero.

Os aços martensíticos, ferríticos e duplex são caracterizados por uma transição na tenacidade, do comportamento tenaz (dútil) para o quebradiço (frágil), a uma determinada temperatura, a temperatura de transição.

Para o aço ferrítico, a temperatura de transição está em torno de 0° C, mas aumenta com a espessura, ou seja, materiais mais espessos tornam-se quebradiços mesmo em temperaturas mais altas, o que limita o uso deste aço em espessuras até 6,0 mm.

Já os aços austeníticos não apresentam uma transição de tenacidade como os outros tipos de aço, apresentando excelente tenacidade em todas as temperaturas. Os aços austeníticos são, portanto, preferíveis para aplicações de baixa temperatura.

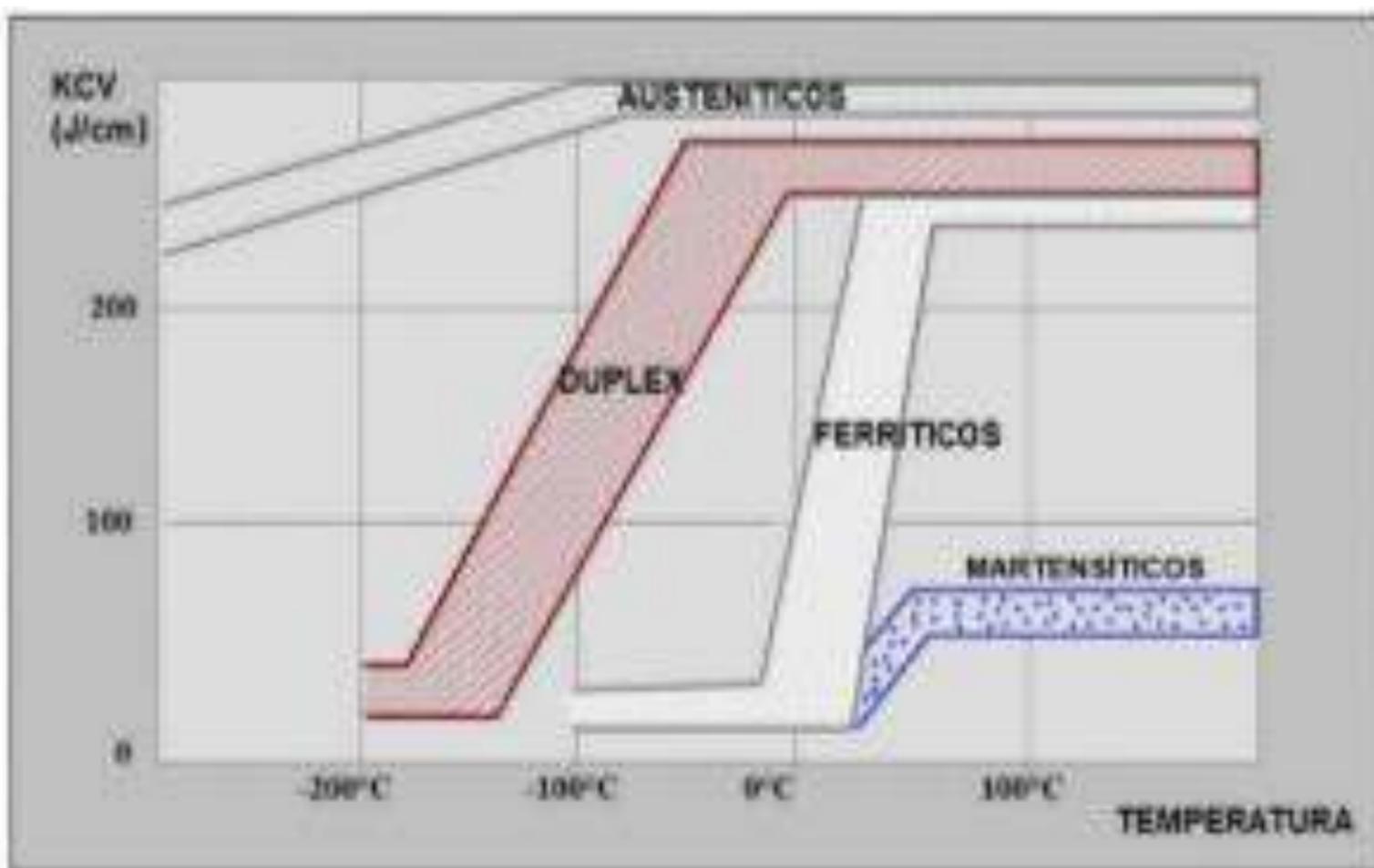


Figura 8 - Tenacidade ao impacto para diferentes tipos de aços inoxidáveis (Ensaio Charpy).

Propriedades Mecânicas em temperaturas elevadas

A resistência a altas temperaturas de vários tipos de aço inox é ilustrada na figura 9. Acima de 500°C deve-se utilizar os conceitos de fluência, ou creep, para selecionar o aço inox.

Aplicações típicas em temperaturas elevadas são: componentes de fornos, muflas, cadinhos, chaminés, recuperadores, ciclones e correias transportadoras trabalhando em altas temperaturas. E também nos escapamentos de veículos automotivos.

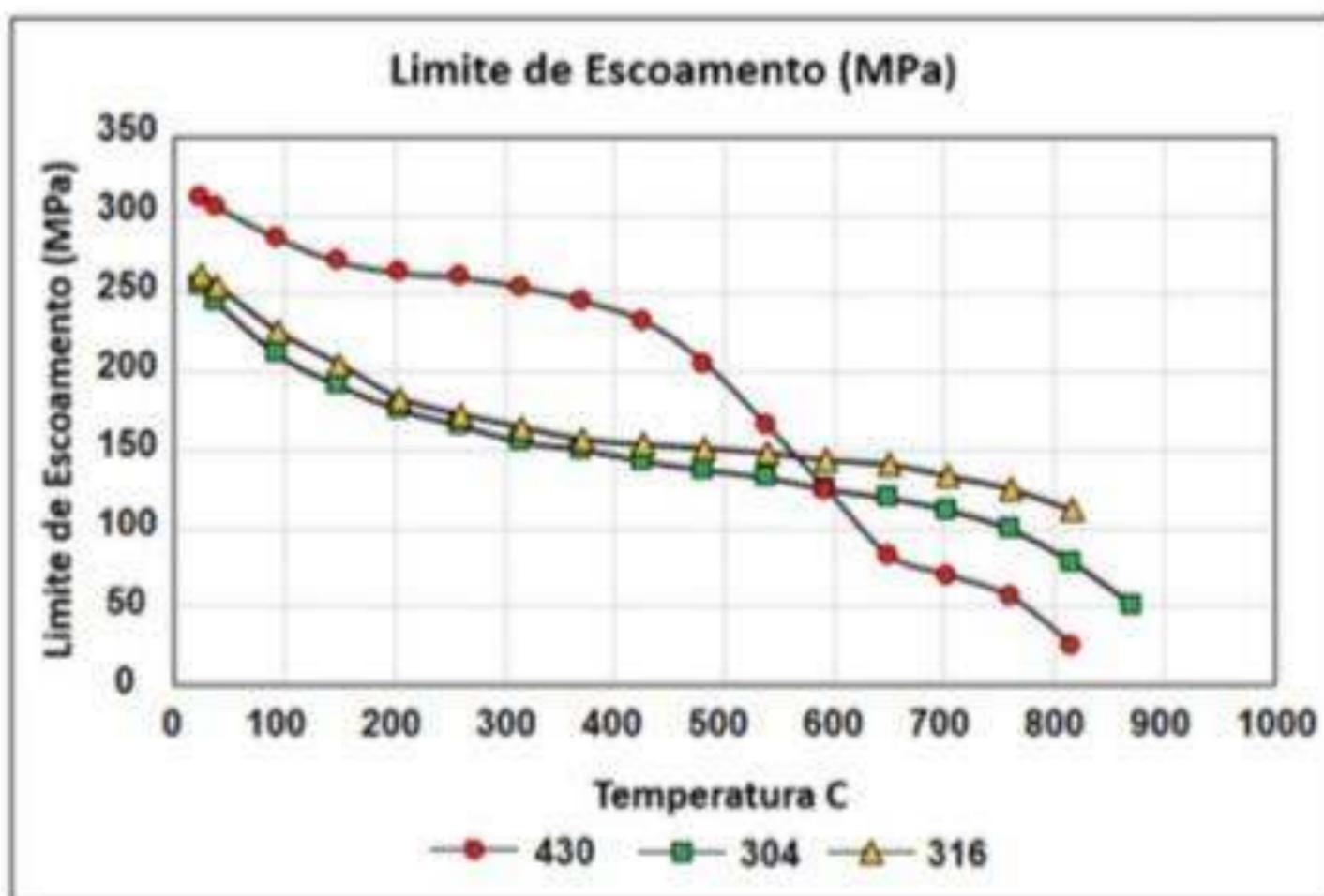


Figura 9 – Limite de Escoamento de alguns aços inox em várias temperaturas

A resistência à fluência é definida como a tensão a uma determinada temperatura que produz uma taxa mínima de fluência de por exemplo 0,0001 por cento/hora ou 0,001 por cento/hora. A resistência à ruptura refere-se à tensão a uma determinada temperatura que produz uma vida até a ruptura de 100, 1000 ou 10000 horas.

Aço	Tensão (Mpa) – Temperatura (°C)				
	538°C	593°C	649°C	704°C	816°C
304	138	83	52	28	10
316	172	120	80	52	17
310	228	159	103	69	21

Tabela 5 - Tensão (Mpa) para produzir 1% de alongamento em 10.000 horas

Aços martensíticos e PH na condição temperada e revenida exibem boa resistência a altas temperaturas em temperaturas moderadamente elevadas. No entanto, a temperatura de serviço é limitada pelo risco de super-revenido e fragilização. A resistência à fluência é baixa. Este tipo de aço inoxidável não é normalmente usado acima de 300°C.

Os aços ferríticos têm resistência relativamente alta até 500°C. A resistência à fluência, que geralmente é o fator determinante em temperaturas acima de 500°C, é baixa. O limite superior normal de temperatura de serviço é definido pelo risco de fragilização em temperaturas acima de 350°C. No entanto, devido à boa resistência dos aços ao cromo à sulfetação e oxidação em altas temperaturas, alguns aços elevados de cromo são usados na faixa de fluência. Nestes casos, deve-se tomar cuidado especial para garantir que a carga seja reduzida ao mínimo.

Os aços duplex se comportam da mesma forma que os aços ferríticos, mas apresentam maior resistência. A resistência à fluência é baixa. O limite superior da temperatura de serviço é normalmente 350°C devido ao risco de fragilização em temperaturas mais altas.

A maioria dos aços austeníticos tem menor resistência do que os outros tipos de aços inoxidáveis na faixa de temperatura de até cerca de 500oC. Uma maior resistência em temperaturas elevadas é obtida com adições de nitrogênio, titânio ou nióbio. Em termos de resistência à fluência, os aços inoxidáveis austeníticos são superiores a todos os outros tipos de aço inoxidável.

SELEÇÃO PELAS OPERAÇÕES DE FABRICAÇÃO

Novamente é bom frisar que o aço é selecionado inicialmente pela sua resistência à corrosão e propriedades mecânicas. Em seguida, considera-se como o produto pode ser fabricado. Aqui se considera a conformabilidade, a soldabilidade e a usinabilidade.

Na tabela 6 apresenta-se um quadro comparando as características de fabricação para alguns aços inox. Arbitrou-se um escala de 1 a 10, com 10 indicando excelente fabricação pelo método específico.

Aço	Conformação	Usinagem	Solda
303	1	8	1
304	8	5	8
316	8	5	8
416	1	10	1
430	4	6	2
2205	5	4	5
3CR12	5	6	6

Tabela 6: Características de fabricação de alguns aços inox

CONCLUSÕES

Foi visto que ao selecionar um tipo de aço inoxidável, é essencial considerar a resistência à corrosão, mas que também é importante considerar propriedades secundárias, como as propriedades mecânicas e a facilidade de fabricação. A escolha correta irá ser recompensada não apenas por uma vida longa e sem problemas, mas também por fabricação e instalação com custo reduzido.

Finalmente deve considerar se a ênfase é em performance, ou em custo. Isto se dá em função da aplicação. Por exemplo, em aplicações na indústria aeroespacial a ênfase é performance. No outro extremo, tem-se as utilidades domésticas, onde a ênfase é custo.

Apêndice 1 : Aplicações típicas do aços inox mais usuais

304/L	Talheres, baixelas, panelas, bules, cubas e pias, fogões, fornos (elétricos e micro-ondas), máquinas de lavar roupa, e muitos outros utensílios domésticos e eletrodomésticos. Elevadores, revestimento de edifícios (interno e externo). Vasta aplicação em equipamentos industriais (tubos, tanques, reatores, colunas de destilação, trocadores de calor, condensadores etc.) de todos os setores: açúcar e álcool, sucos, cerveja, vinho, leite e laticínios, indústrias químicas, farmacêuticas, cosméticos, papel & celulose, petróleo, petroquímica, têxtil. Nas indústrias aeronáutica, ferroviária e naval. Em frigoríficos, na indústria hospitalar. Em tanques para transporte e estocagem de alimentos e produtos químicos. Uso em criogenia.
316L	Tem as mesmas aplicações industriais do 304. Deve ser selecionado quando a presença de cloretos, o pH e a temperatura potencializarem a corrosão por pites.
410(*)	Containers, vagões de mineração, usinas de açúcar, betoneiras, tambores, colunas, estrutura de ônibus
430 (**)	Talheres, baixelas, pias e cubas, fogões, coifas, máquinas de lavar roupas, lava louças, geladeiras, fornos micro-ondas, moedas, fundo das panelas em inox. Revestimentos de balcões, painéis elétricos e gabinetes. Escadas rolantes, elevadores, telhas de galpões. Frisos, acabamentos decorativos e calotas (automóveis e caminhões) Parafusos, fixadores, fitas e cintas

439	Tanques de máquinas de lavar roupa, fornos micro-ondas. Revestimento de edifícios (interno e externo). Elevadores, telhas, postes de iluminação. Indústria automobilística (sistema de exaustão). Tubos para trocadores de calor (refinarias, Indústrias químicas); tubos ornamentais, guarda corpo.
441	Partes mais quentes do sistema de escapamento, catalizadores Revestimentos e Elevadores. Portas e molduras. Tubos para trocadores de calor.
444	Tubos para trocadores de calor, condensadores, chaminés. Industria naval, Industria de processamento de alimentos, Tanques de água quente, aquecedor solar. Reservatórios de água Revestimentos de edifícios e telhas em ambiente marinho
420	Disco de freios motocicletas Cutelaria, Tesouras, Instrumentos cirúrgicos, válvulas, eixos e molas.

(*) 410S, 410B, 3Cr12, Endur300 etc.; (**) Série 200: Aplicações semelhantes às do 430

Apêndice 2: Principais acabamentos superficiais dos aços inox

ASTM	Descrição
Nº 1	Laminado a quente, recozido e decapado
2D	Laminado a frio, recozido e decapado
2B	Laminado a frio, recozido, decapado e processado no laminador de encruamento com cilindro brilhante
BA	Laminado a frio, recozido em fornos com atmosfera controlada e processado no laminador de encruamento
TR	Laminado a frio 2D, encruado para obtenção de maior resistência mecânica: 1/16 Duro, 1/4 Duro, 1/2 Duro, 3/4 Duro e 7/8 Duro
Nº 3	Laminado a frio 2B ou 2D, ou laminado a quente Nº1, lixado em uma face para rugosidade máxima de 1,0 µm Ra.
Nº 4	Laminado a frio 2B ou 2D, ou laminado a quente Nº1, lixado em uma face para rugosidade máxima de 0,6 µm Ra.
Nº 6	Acetinado – Laminado a frio 2B ou BA, lixamento acetinado para rugosidade de 0,06 a 0,20 µm Ra.
Nº 7 e 8	Brilhante – Laminado a frio 2B ou BA, com polimento final.
Nº 5	Acabamentos arquitetônicos – são uma categoria separada, existem muitas técnicas e variações de acabamento. São negociados entre comprador e fornecedor.

(*) Acabamentos não normatizados: laminado rugoso, texturizado, corrugado e colorido

Apêndice 3: Comparativo entre as famílias de aço inox

Característica	Família de aço Inox				
	Ferríticos	Martensíticos	Austeníticos	Duplex	PH
Resistência à Corrosão	Elevada	Boa	Elevada (*)	Excelente	Elevada
Formabilidade	Boa	Baixa	Excelente	Boa	Regular
Soldabilidade	Boa	Baixa	Excelente	Boa	Regular
Endurecíveis?	Não	Sim, por tratamento térmico	Sim, por deformação a frio	Não	Sim, por tratamento térmico
Resistência Mecânica	Boa	Elevada após tempera	Boa	Elevada	Excelente após envelhecimento
Magnéticos	Sim	Sim	Não	Sim	Sim

MÓDULOS DE TREINAMENTO

CONHECENDO

OS AÇOS INOXIDÁVEIS

Coordenação:

ABINOX

Por:

Eng. Ronaldo Claret Ribeiro da Silva

**ENVIE SUAS DÚVIDAS OU
COMENTÁRIOS PARA O
ESPECIALISTA DA ABINOX:**

 www.abinox.org.br  [/abinox](https://www.linkedin.com/company/abinox)

 (11) 963405604

 [/associação.abinox](https://www.facebook.com/associação.abinox)

 [@abinox.oficial](https://www.instagram.com/abinox.oficial)

 [@abinox](https://www.youtube.com/@abinox)