

MÓDULOS DE TREINAMENTO

CONHECENDO

OS AÇOS INOXIDÁVEIS

Coordenação:

ABINOX

Por:

Eng. Ronaldo Claret Ribeiro da Silva

2

**PROPRIEDADES MECÂNICAS
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

INTRODUÇÃO

Os aços inoxidáveis são frequentemente selecionados por sua resistência à corrosão, mas são, ao mesmo tempo conformados, como no segmento de utilidades domésticas, usado como elemento estruturais, e utilizados em diversas condições ambientais. Há aplicações que exigem elevadas propriedades mecânicas, como óleo e gás, em outras o mais importante são as propriedades em temperaturas criogênicas.

Os diferentes tipos de aços inox podem apresentar uma variada gama de propriedades mecânicas. Por exemplo, o Limite de Resistência pode variar de 500 até 1800 Mpa. Portanto as propriedades mecânicas, como o limite de resistência, a resistência em altas temperaturas, ductilidade e tenacidade, também são importantes.

PROPRIEDADES MECÂNICAS NA TEMPERATURA AMBIENTE

A diferença nas propriedades mecânicas de diferentes aços inoxidáveis é vista nas curvas tensão x deformação, figura 1.

No apêndice 1 são apresentadas definições de propriedades mecânicas obtidas pelo ensaio de tração.

O alto limite de escoamento e resistências à tração, mas baixa ductilidade dos aços martensíticos é evidente, assim como o baixo limite de escoamento e excelente ductilidade dos aços austeníticos. Os aços ferrítico-austeníticos (duplex) e ferríticos situam-se entre esses dois extremos.

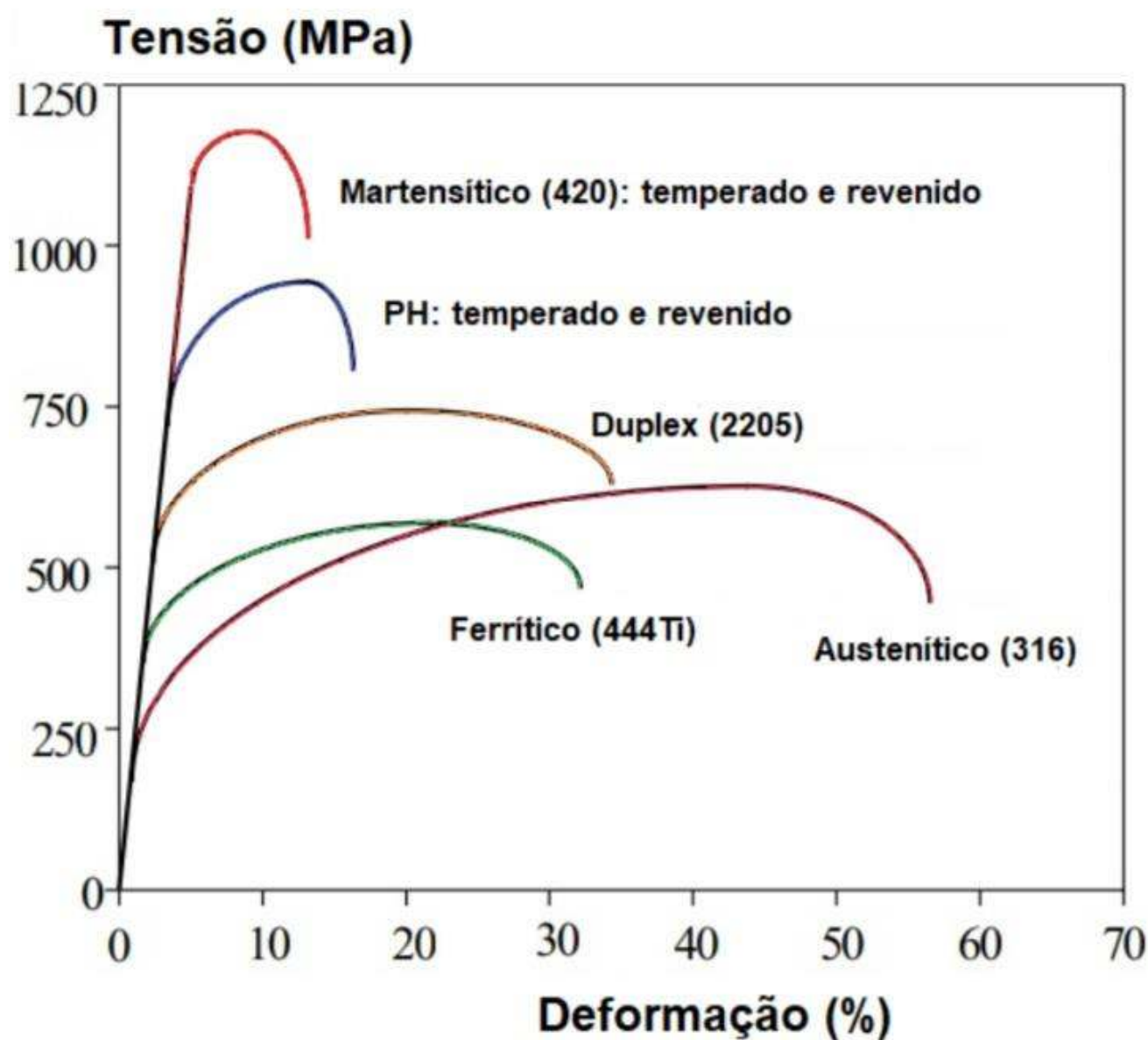


Figura 1: Curva tensão deformação para alguns aços inoxidáveis.

Há uma gama de aplicações onde o conhecimento das propriedades mecânicas é importante para a seleção do aço e para o projeto do equipamento onde será utilizado: estruturas arquiteturais, estruturas de ônibus e vagões, tanques de estocagem (indústria alimentícia, setor de óleo & gás), tubulações, etc.

Os aços ferríticos geralmente têm um limite de escoamento um pouco mais alto do que os aços austeníticos, enquanto os aços duplex têm um limite de escoamento consideravelmente maior do que os aços austeníticos e ferríticos. A ductilidade dos aços ferríticos e duplex são da mesma ordem de grandeza, mesmo que os últimos sejam um tanto superiores neste aspecto.

Em termos de propriedades mecânicas, 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, ferrítico, duplex e austenítico. A tabela 1 fornece 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 1: Propriedades mecânicas típicas para alguns aços inox na temperatura ambiente

Os aços martensíticos e PH são caracterizados pela alta resistência e pelo fato de a resistência ser fortemente afetada pelo tratamento térmico. Os aços martensíticos são geralmente usados na condição temperada e revenida. Nesta condição, a resistência aumenta com o teor de carbono.

Aços com mais de 13% de cromo e um teor de carbono acima de 0,15% são completamente martensíticos após a têmpera. Uma diminuição no teor de carbono causa um aumento no teor de ferrita e, portanto, uma diminuição na resistência.

A ductilidade dos aços martensíticos é relativamente baixa. Os aços PH apresentam alta resistência na condição temperada e revenida, apesar de seu teor de carbono relativamente baixo e boa ductilidade. Eles também possuem excelente temperabilidade: mesmo seções grossas podem ser totalmente endurecidas e, assim, esses aços irão manter suas boas propriedades mecânicas mesmo em seções grossas.

Os aços ferríticos têm limite de escoamento relativamente baixo e o endurecimento por trabalho é limitado. A resistência aumenta com o aumento do teor de carbono, mas o efeito do teor de cromo é insignificante. No entanto, a ductilidade diminui em níveis elevados de cromo e uma boa ductilidade requer níveis muito baixos de carbono e nitrogênio. O menor alongamento dos aços 430 não é um impedimento à sua conformação; como esta característica é garantida pela sua textura cristalográfica, estes aços podem apresentar excelente desempenho.

Os aços duplex apresentam um alto limite de escoamento, que aumenta com maiores teores de carbono e nitrogênio. Um maior teor de ferrita, dentro de certos limites, também aumentará a resistência dos aços duplex. Sua ductilidade é boa e apresentam forte endurecimento por trabalho a frio.

Os aços austeníticos geralmente têm um limite de escoamento relativamente baixo e são caracterizados por um forte endurecimento por trabalho a frio.

A resistência dos aços austeníticos aumenta com o aumento dos níveis de carbono, nitrogênio e, até certo ponto, também com o molibdênio. O efeito prejudicial do carbono na resistência à corrosão significa que este elemento não pode ser usado para aumentar a resistência. Os aços austeníticos apresentam uma ductilidade muito elevada: têm um alongamento elevado e são muito tenazes.

Alguns aços inoxidáveis austeníticos com baixo teor total de elementos de liga, por exemplo os tipos 301 e 304, podem ser metaestáveis e podem formar martensita devido ao resfriamento abaixo da temperatura ambiente ou por meio de deformação a frio (ou uma combinação de ambos). A formação de martensita causará um aumento considerável na resistência, conforme ilustrado na figura 2. A temperatura abaixo da qual a martensita α' se formará é chamada de temperatura Md. A estabilidade da austenita depende da composição química, quanto maior o teor de elementos de liga, mais estável será. Uma equação comum para relacionar a estabilidade da austenita e a composição da liga é o Md30, que é definido como a temperatura na qual a martensita se formará a uma deformação de 30% (10)

$$\text{Md}_{30} = 551 - 462(\text{C} + \text{N}) - 9,2\text{Si} - 8,1\text{Mn} - 13,7\text{Cr} - 29(\text{Ni} + \text{Cu}) - 18,5\text{Mo} - 68\text{Nb} - 1,42(\text{GS} - 8,0)$$

onde GS = tamanho de grão (número ASTM), Md(30) em °C.

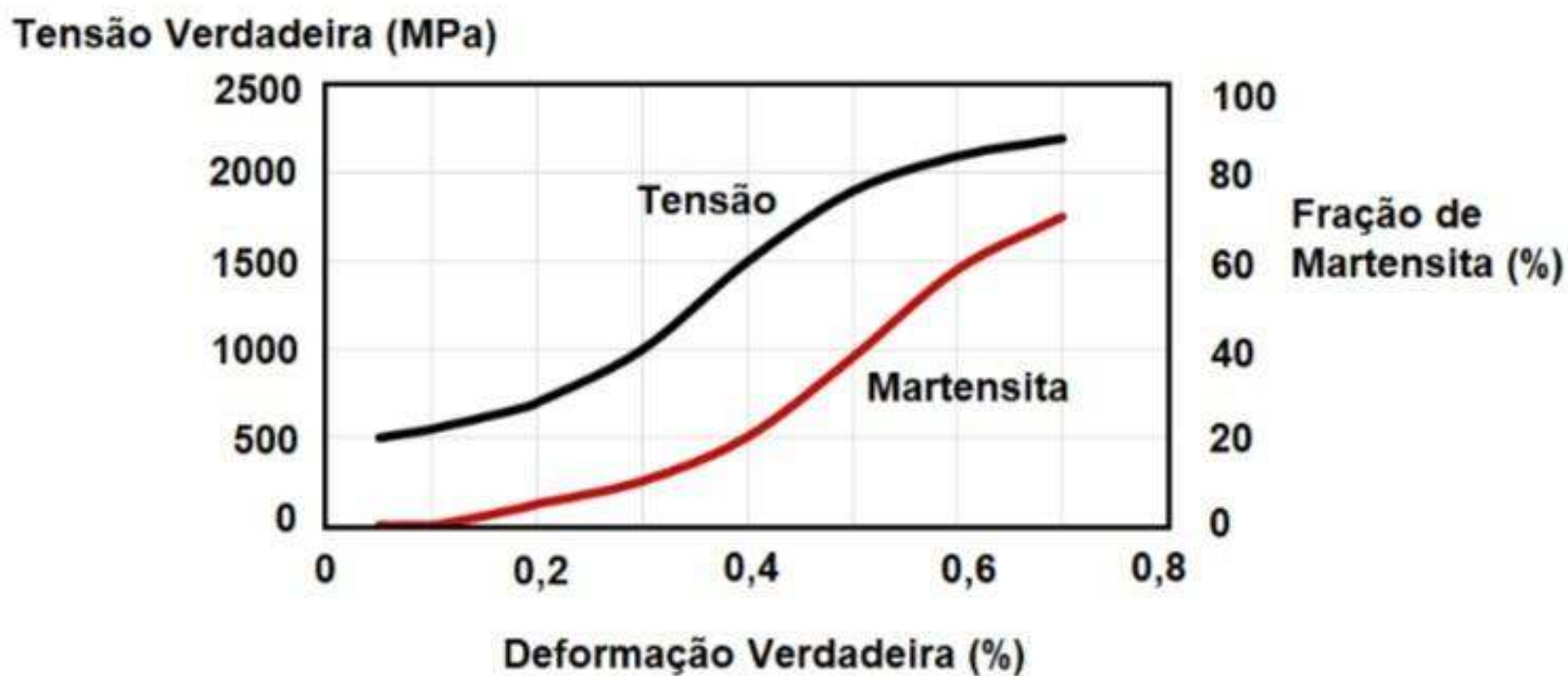


Figura 2: Efeito da deformação na transformação martensítica e no limite de escoamento para um aço 301. (5)

O efeito da deformação a frio

As propriedades mecânicas dos aços inoxidáveis são fortemente afetadas pelo trabalho a frio. Em particular, o endurecimento por trabalho a frio dos aços austeníticos causa alterações consideráveis nas propriedades, como por exemplo nas operações de estampagem. O efeito geral do trabalho a frio é aumentar o limite de escoamento e a resistência à tração e, ao mesmo tempo, diminuir o alongamento. As Figura 3 e 4 mostram as curvas de trabalho a frio para alguns aços inoxidáveis.

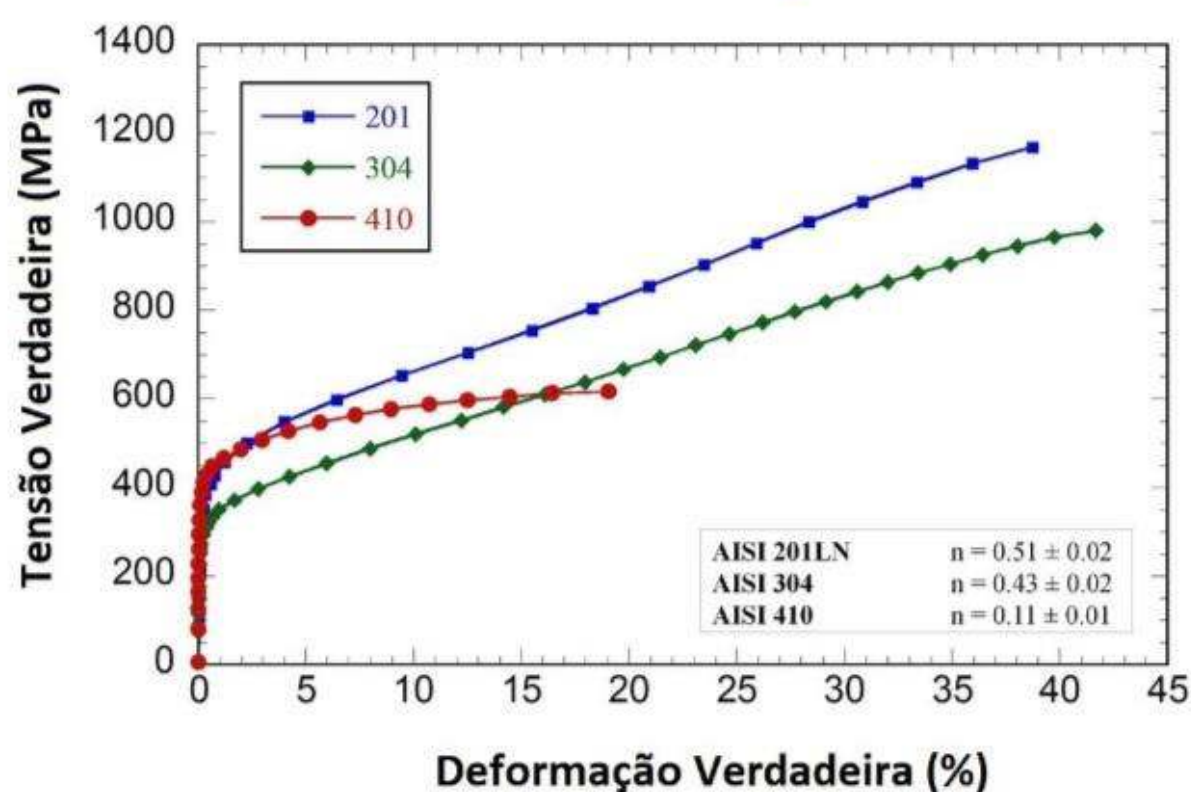


Figura 3 – Curva tensão x deformação para alguns aços inox.

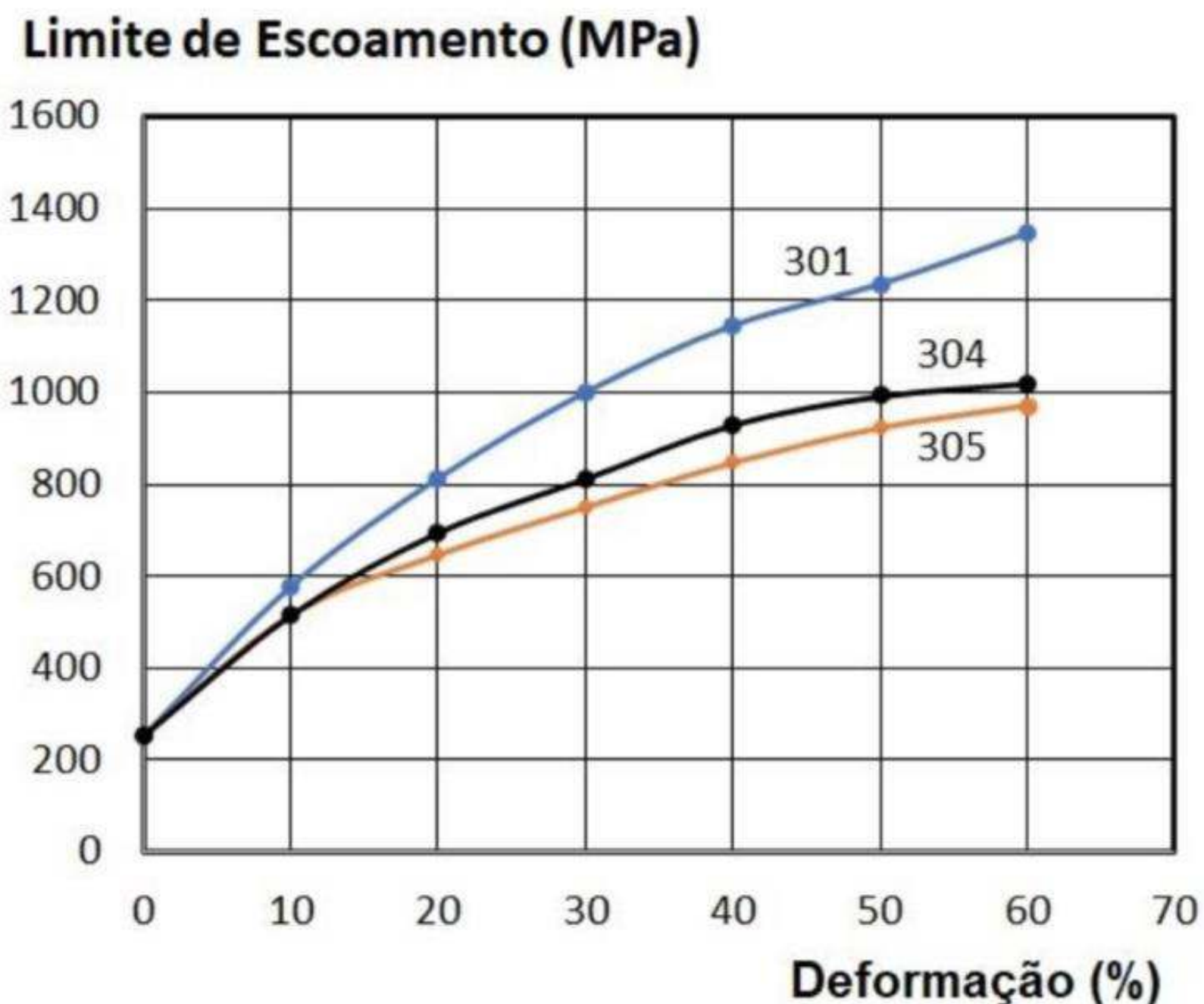


Figura 4 – Efeito da deformação na tensão de escoamento de alguns aços austeníticos.

O endurecimento por trabalho é maior para aços austeníticos do que para aços ferríticos. O forte endurecimento por trabalho dos aços austeníticos significa que grandes forças são necessárias para as operações de conformação, embora a resistência ao escoamento seja baixa.

O endurecimento por trabalho a frio pode, no entanto, também ser usado deliberadamente para aumentar a resistência dos aços austeníticos, como no caso dos aços 301, tabela 2:

301LN	LE (kg/mm ²)	LR (kg/mm ²)	Al (%)	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 2: Propriedades Mecânicas típicas do aço 301LN recozido e com diferentes graus de encruamento.

Tenacidade – Temperaturas Criogênicas

A tenacidade dos diferentes tipos de aços inoxidáveis mostra uma variação considerável, indo desde excelente tenacidade em todas as temperaturas para os aços austeníticos até o comportamento relativamente frágil dos aços martensíticos. A resistência depende da temperatura e geralmente aumenta com o aumento da temperatura.

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.

Uma medida de tenacidade é a tenacidade ao impacto, ou seja, a tenacidade medida em carregamento rápido, como no Ensaio Charpy, apêndice 2.

A figura 5 mostra a tenacidade ao impacto para diferentes categorias de aço inoxidável em temperaturas de -200 a +100°C. É evidente a partir do diagrama que há uma diferença fundamental em baixas temperaturas entre os aços austeníticos e martensíticos, ferríticos e ferrítico-austeníticos.

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

Os aços inoxidáveis martensíticos têm temperaturas de transição em torno ou ligeiramente abaixo da temperatura ambiente.

Para o aço ferrítico, a temperatura de transição está em torno de 0°C, mas aumenta com o aumento do teor de carbono e nitrogênio, e também com a espessura, ou seja, o aço torna-se quebradiço a temperaturas sucessivamente mais altas, e em materiais mais espessos.

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

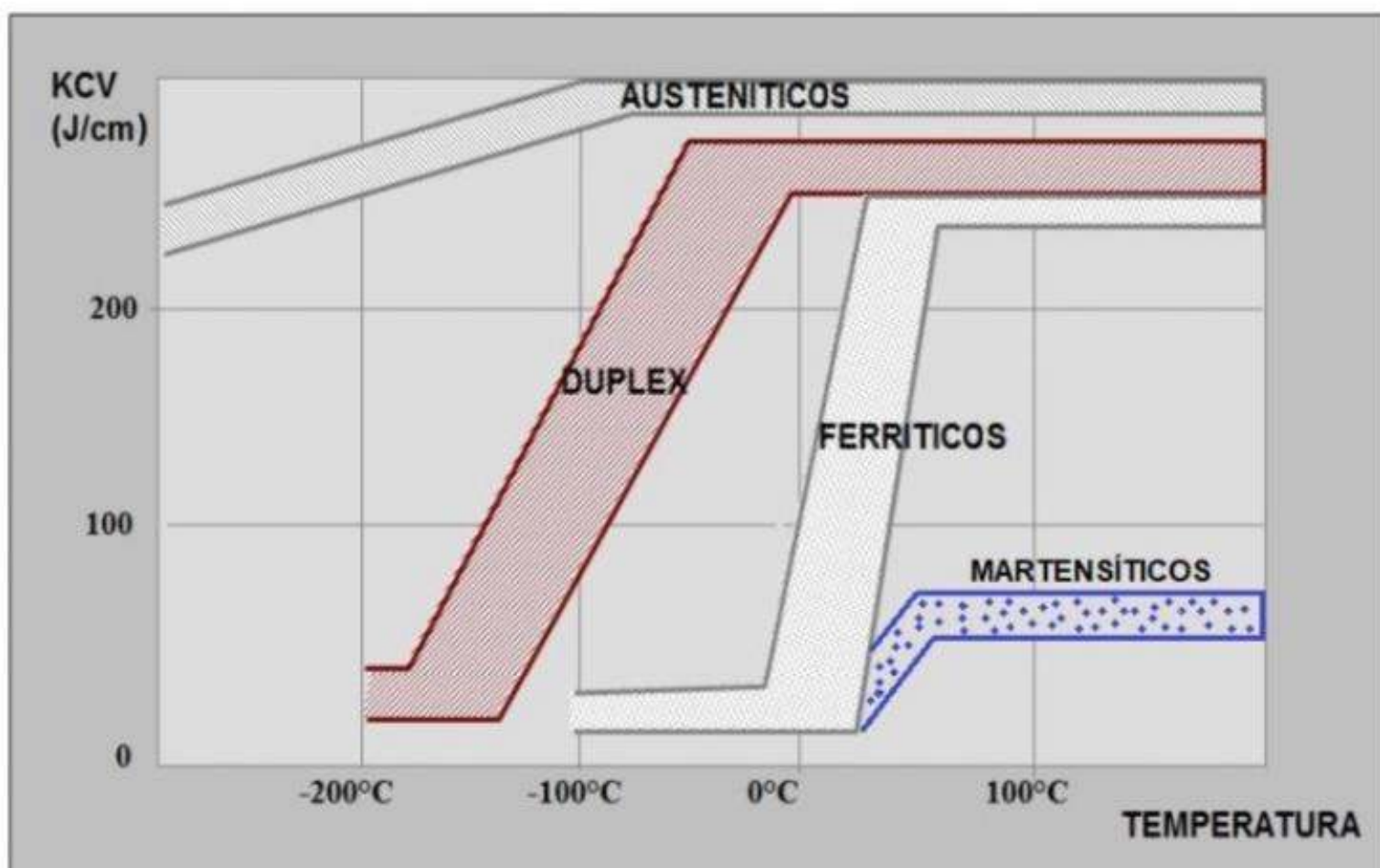


Figura 5 - Tenacidade ao impacto para diferentes tipos de aços inoxidáveis (Ensaio Charpy).

Tenacidade – Temperaturas Criogênicas

Durante o carregamento cíclico, os aços inoxidáveis, como outros materiais, falharão em níveis de tensão consideravelmente mais baixos do que a resistência à tração. O número de ciclos de carga que o material pode suportar depende da amplitude da tensão.

O tempo de vida, ou seja, o número de ciclos até a falha, aumenta com a diminuição da amplitude da carga até que uma certa amplitude seja atingida, abaixo da qual nenhuma falha ocorre (Figura 26). Esse nível de estresse é chamado de limite de fadiga.

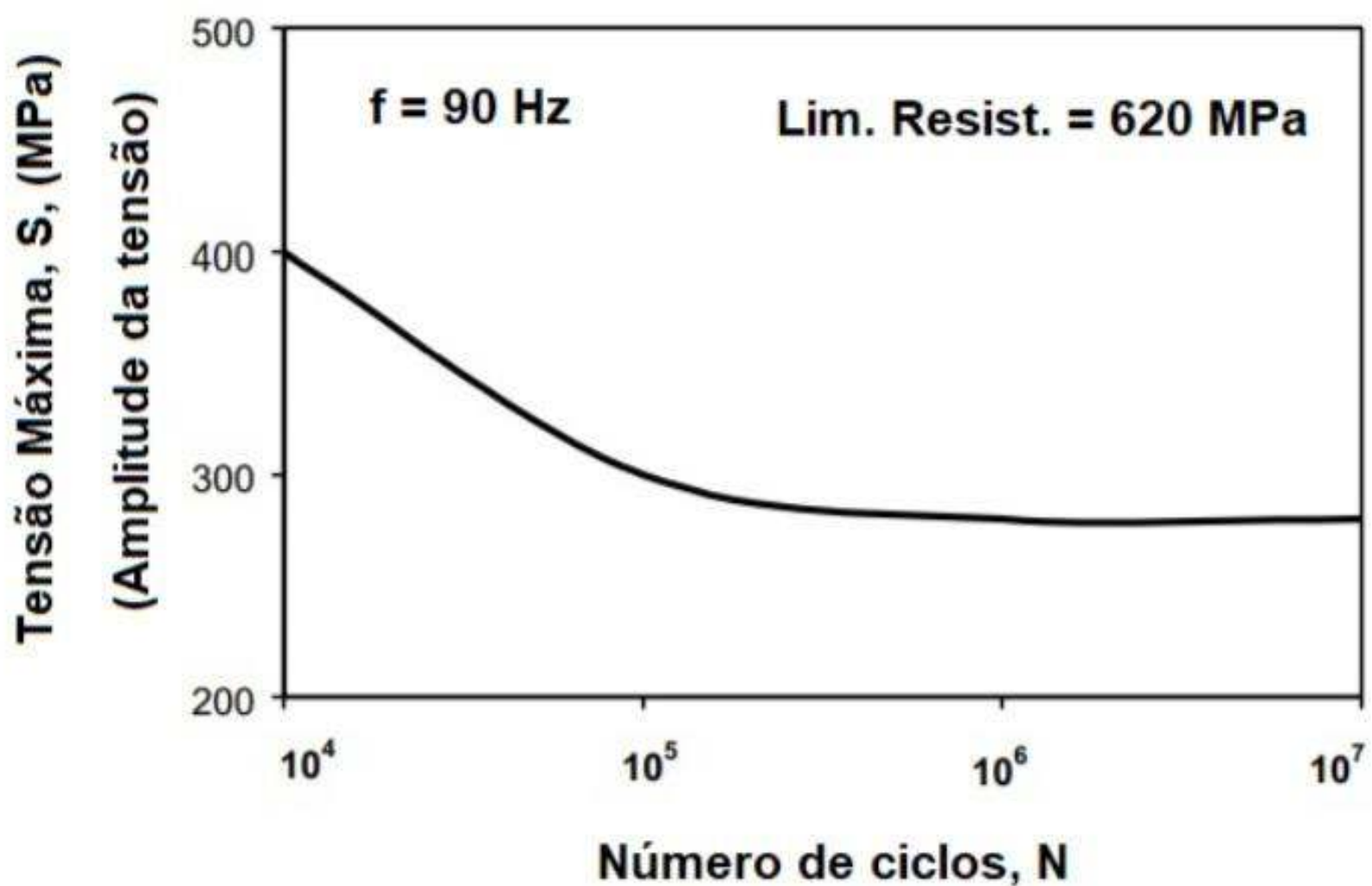


Figura 6. Curva S-N (curva Wohler) para um aço inoxidável austenítico do Tipo 316 ao ar.

A alta resistência do aço duplex também resulta em alta resistência à fadiga. O aço duplex 2205 e o 316L foram testados sob tensões de flexão reversa à temperatura ambiente e o limite de fadiga ficou próximo do limite de escoamento, que é cerca de duas vezes mais alto para 2205.

Em muitas aplicações, a fadiga interage com a corrosão, que diminui a resistência à fadiga. Nesses casos, o duplex também oferece vantagens consideráveis sobre o aço-carbono e o aço inoxidável convencional.

Estes conceitos são importantes nas uniões, solda por exemplo, onde imperfeições microscópicas podem dar origem às falhas por fadiga.

Propriedades Mecânicas em Temperaturas Elevadas

A resistência a altas temperaturas de vários tipos de aço inox é ilustrada pelas curvas do limite de escoamento, figura 6. Acima de 500oC 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.

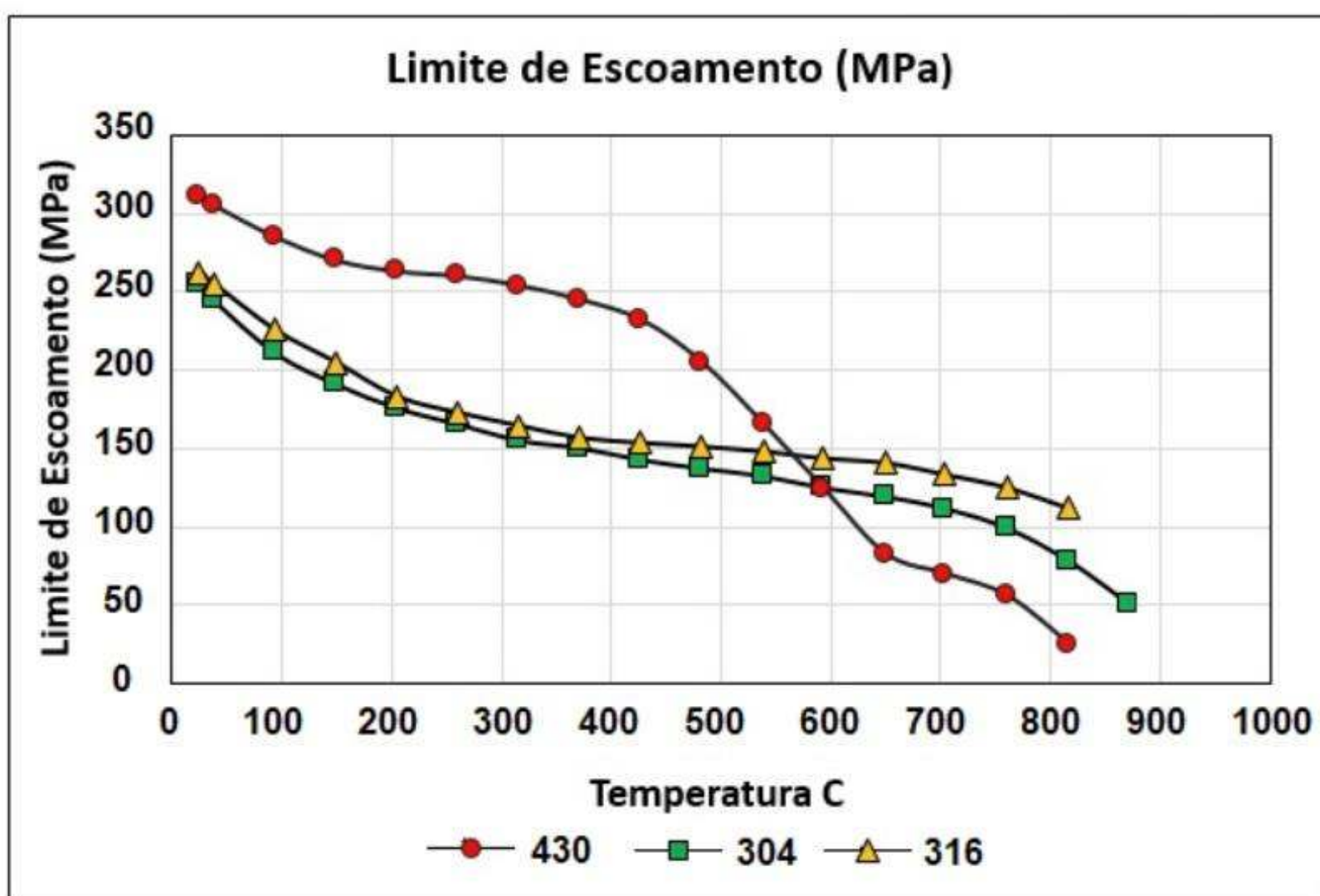


Figura 6 – Limite de Escoamento de alguns aços inox em várias temperaturas

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.

	Tensão (MPa) - Temperatura (oC)				
Aço	538	593	649	704	816
304	138	83	52	28	10
316	172	120	80	52	17
310	228	159	103	69	21

Tabela 3 - Tensão (Mpa) para produzir 1% de alongamento em 10.000 horas

A resistência à fluência é baixa. Este tipo de aço inoxidável não é normalmente usado acima de 300°C, mas há classes especiais são usadas em temperaturas mais altas

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 com teores 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 500°C. 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.

CONCLUSÕES:

Algumas conclusões podem ser tiradas:

Os aços inox austeníticos apresentam boas propriedades mecânicas em todas as faixas de temperatura, não apresentam a transição dúctil-frágil, possuem elevado alongamento e alta taxa de encruamento, permitindo explorar esta característica em aplicações estruturais. O controle da taxa de encruamento também permite uma gama de características para as mais diversas operações de conformação e estampagem.

Os ferríticos apresentam boas propriedades mecânicas e seu menor alongamento não é um impedimento à sua conformação, já que esta característica é compensada pela sua textura cristalográfica. Há limitações para aplicações em criogenia, e em temperaturas superiores a 500°C. Materiais espessos também requerem atenção devido a transição dúctil- frágil.

Os aços duplex apresentam excelentes propriedades mecânicas, e em uma ampla faixa de temperatura, de -50°C a 300°C.

Aços martensíticos e PH também apresentam excelente resistência mecânica. No entanto tem limitações em criogenia e em temperaturas superiores a 300°C.

Algumas aplicações:

Vasos de pressão e criogenia (aço 304)



Campânulas para fornos (aço 310)



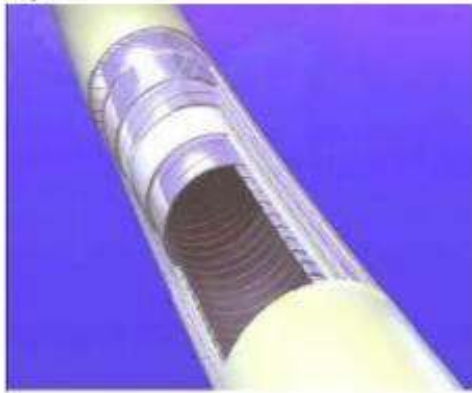
Tanques de Estocagem (aço 304)



Transporte (aço 301)



Tubos Flexíveis (Oil & Gas) (Aço Duplex):



Utilidades Domésticas (aço 430):



Pias (aço 430):

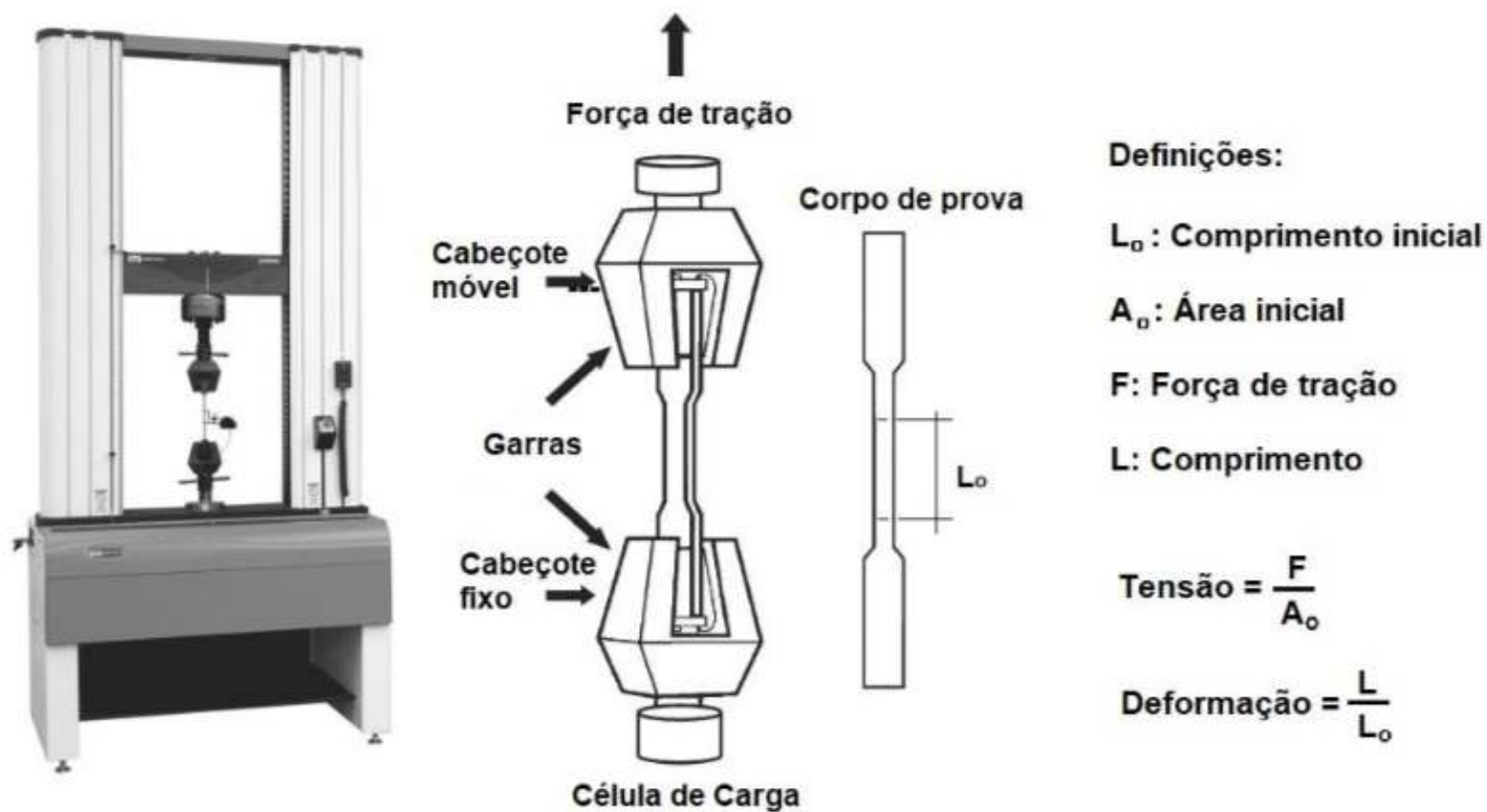


Cutelaria (Aço 420):

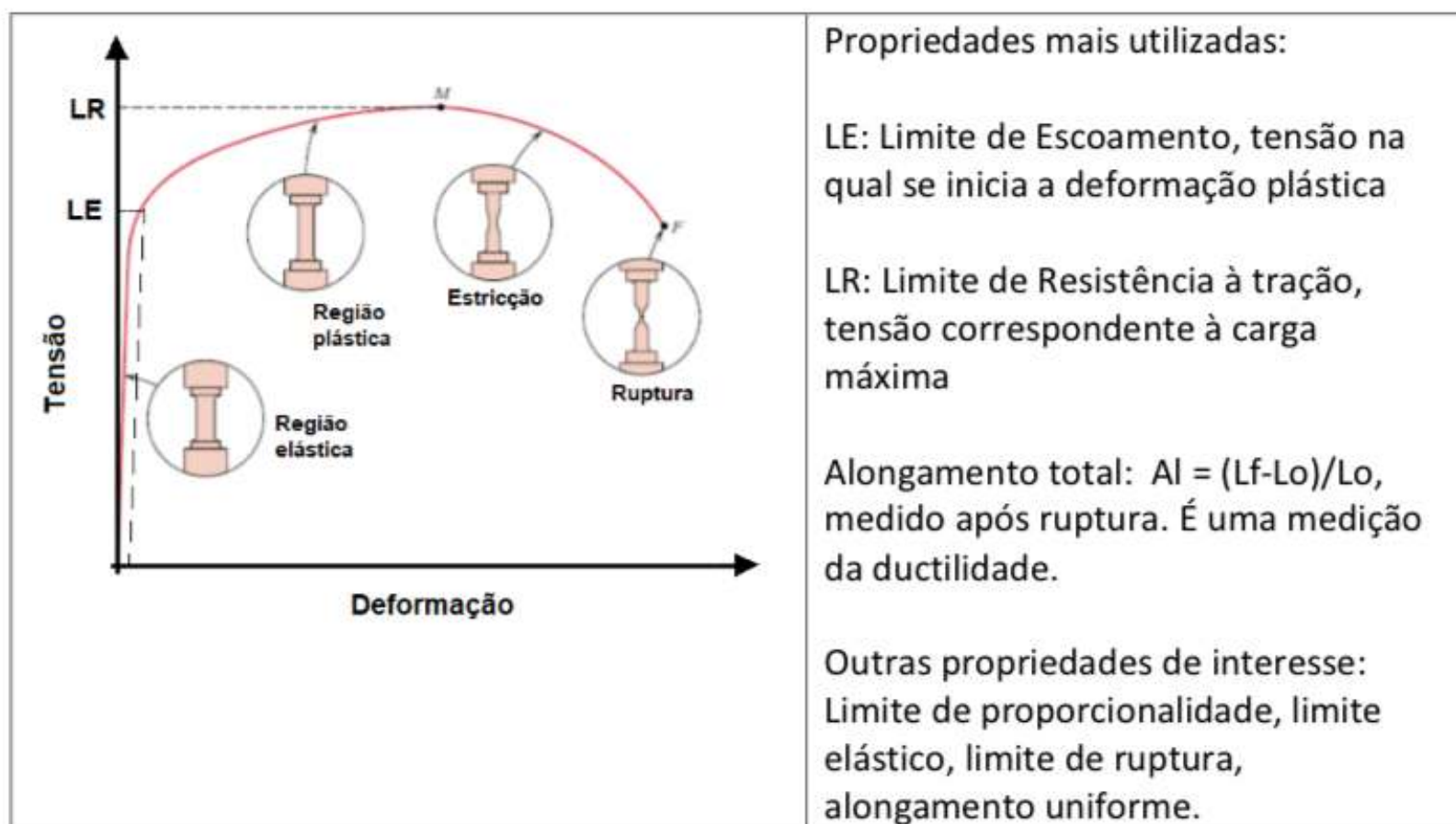


Apêndice 1: O ensaio de tração

Neste ensaio, um corpo de prova com dimensões padronizadas é submetido a um esforço crescente que o deforma até a ruptura:



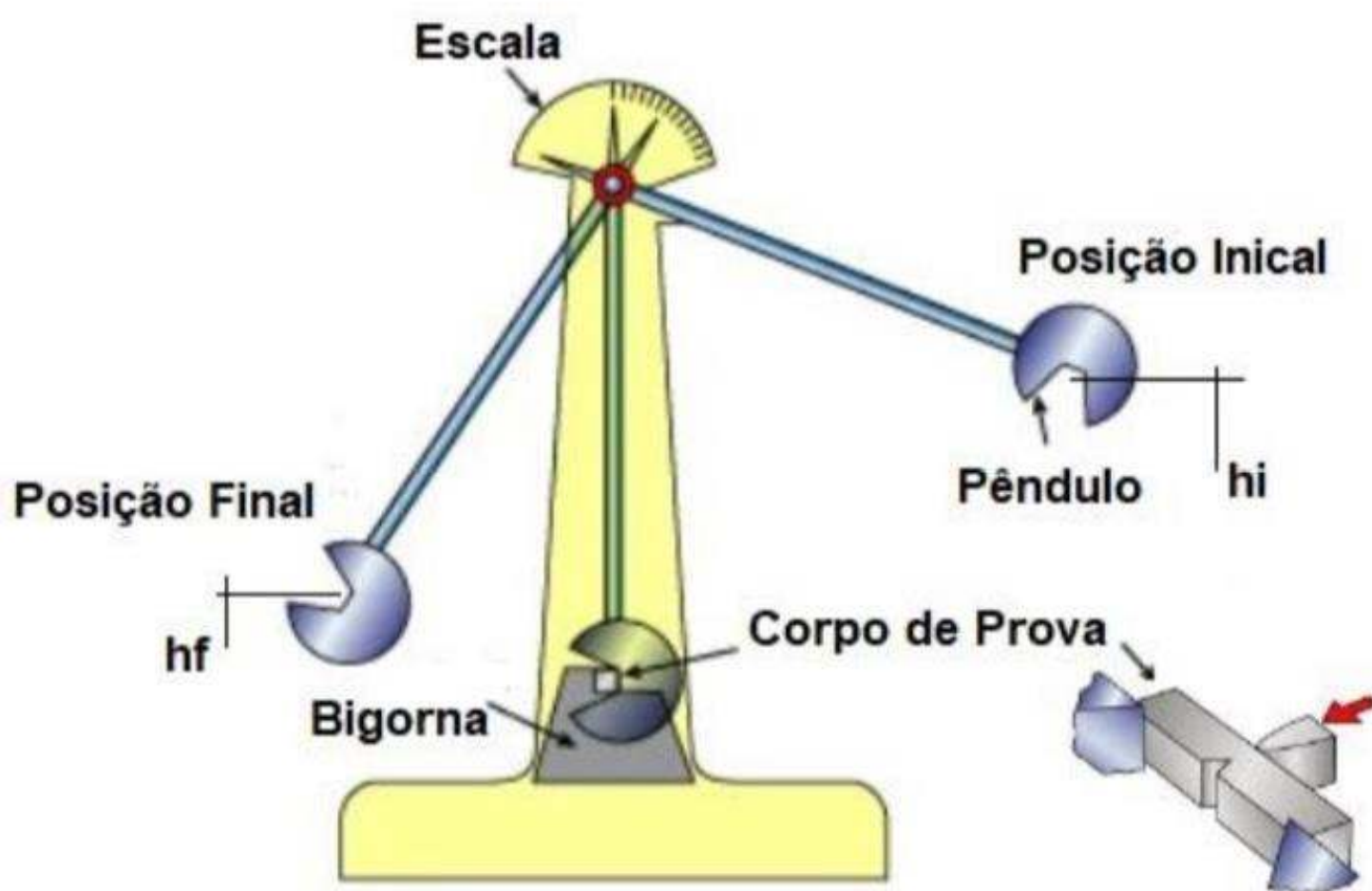
Curva típica e informações obtidas neste ensaio:



Apêndice 2: O ensaio Charpy

O Ensaio Charpy é utilizado para medição da tenacidade do material, e para conhecer suas características dúctil/frágil em diferentes temperaturas.

Nele uma carga é aplicada rapidamente através de um pêndulo que cai sobre um corpo de prova entalhado, a função do entalhe no corpo de prova é agir como um concentrador de tensões. A energia absorvida é proporcional a diferença de altura do pêndulo antes e depois do impacto. Ela é expressa em de energia absorvida por unidade de espessura (J/mm) ou unidade de área (J/mm²).



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](https://api.whatsapp.com/send?phone=5511963405604)



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



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



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