

# **Resumo de Materiais Metálicos**

<b>MATÉRIA</b>	<b>5</b>
<b>PROPRIEDADES</b>	<b>7</b>
MECÂNICAS	7
TÉRMICAS	7
FÍSICAS	7
ELÉTRICAS	7
PREÇO	8
<b>TERMOS</b>	<b>10</b>
CURVA DO ENSAIO DE TRAÇÃO GENÉRICA	10
DUREZA	10
RESILIÊNCIA	10
TENACIDADE	11
DEFORMAÇÃO ELÁSTICA E PLÁSTICA	11
RESISTÊNCIA À FADIGA	11
ENCRUAMENTO	11
MAQUINABILIDADE	11
VAZAMENTO	12
VISCOELASTICIDADE	12
GRÃO VS CRISTAL	13
LIMITES DE GRÃO	13
MATERIAL AMORFO	13
TRANSIÇÃO VÍTREA	14
LIGA BINÁRIA	14
LIGA TERNÁRIA	14
ENDURECIMENTO POR PRECIPITAÇÃO	14
AÇOS DE CORTE FÁCIL	15
AÇOS PARA FERRAMENTAS	15
AÇOS RÁPIDOS	15
CORROSÃO	15
ELETRONEGATIVIDADE:	15
COLABILIDADE	15
INOCULAÇÃO	15
ENDURECIMENTO SECUNDÁRIO NO REVENIDO	16
ENVELHECIMENTO	16
<b>CEMENTAÇÃO</b>	<b>18</b>
<b>NITRURAÇÃO</b>	<b>19</b>
<b>CARBONITRURAÇÃO</b>	<b>19</b>

<b>AÇOS DE CONSTRUÇÃO</b>	<b>20</b>
<b>AÇOS PARA FERRAMENTAS</b>	<b>21</b>
<b>NORMAS AISI-SAE:</b>	<b>21</b>
<b>AÇOS RÁPIDOS</b>	<b>22</b>
<b>SOBRE A RESISTENCIA AO REVENIDO:</b>	<b>23</b>
<b>AÇOS INOX</b>	<b>24</b>
<b>TIPOS DE AÇOS INOX</b>	<b>24</b>
<b>TIPOS DE CORROSÃO NOS INOX</b>	<b>25</b>
<b>AÇOS MARAGING</b>	<b>28</b>
<b>FERROS FUNDIDOS</b>	<b>30</b>
<b>FERROS FUNDIDOS BRANCOS</b>	<b>31</b>
<b>FF GRAFÍTICOS</b>	<b>31</b>
<b>TRATAMENTO DE NODULARIZAÇÃO</b>	<b>32</b>
<b>LIGAS DE ALUMÍNIO</b>	<b>34</b>
<b>PROPRIEDADES:</b>	<b>34</b>
<b>CLASSIFICAÇÃO DAS LIGAS DE ALUMÍNIO</b>	<b>34</b>
<b>TRATAMENTO TÉRMICO</b>	<b>36</b>
<b>ALUMÍNIO ANODIZADO</b>	<b>36</b>
<b>LIGAS DE COBRE</b>	<b>37</b>
<b>COBRE PURO</b>	<b>37</b>
<b>LATÕES (Cu e 5-50% Zn).</b>	<b>37</b>
<b>DEZINFICAÇÃO</b>	<b>38</b>
<b>CORROSÃO MICRO GALVÂNICA</b>	<b>38</b>
<b>BRONZES (Cu + 1 a 10%Sn)</b>	<b>38</b>
<b>LIGAS DE MAGNÉSIO</b>	<b>40</b>
<b>LIGAS DE ZINCO</b>	<b>40</b>
<b>TITÂNIO</b>	<b>41</b>
<b>PURO</b>	<b>41</b>
<b>LIGAS DE TITÂNIO</b>	<b>41</b>



## Matéria

### 1 - Diagrama de Equilíbrio das Ligas Fe-C

- 1.1 Variedades alotrópicas do Ferro
- 1.2 Fases e constituintes do diagrama Fe-C
- 1.3 Influência dos elementos de liga nos domínios ferrítico e austenítico

### 2 - Diagramas de transformação da austenite

- 2.1 Influência dos elementos de liga
- 2.2 Influência das condições de austenitização

### 3 - Transformações martensíticas. Noção de temperabilidade

### 4 - Tratamentos térmicos das ligas Fe-C

### 5 - Aços de construção

- 5.1 Aços de construção ao carbono. Características mecânicas. Tratamentos térmicos
- 5.2 Aços de construção de liga. Características mecânicas. Tratamentos térmicos
- 5.3 Algumas classificações dos aços de construção
  - i) Composição química
  - ii) Utilização
- 5.4 Tratamentos termoquímicos: cementação, nitruração e carbonitruração.

### 6 - Aços de Ferramentas

- 6.1 A classificação dos aços de ferramentas segundo a norma AISI-SAE
- 6.2 A dureza e a temperabilidade nos aços de ferramentas
- 6.3 A temperatura de austenitização nos aços de ferramentas
- 6.4 Aço de ferramentas de trabalho a frio. Aço de ferramentas de trabalho a quente e aços indeformáveis
- 6.5 Aços rápidos. Tratamentos térmicos. Desestabilização da austenite no revenido

### 7 - Aços Inoxidáveis

- 7.1 Tipos estruturais; aços ferríticos, austeníticos e martensíticos
- 7.2 Oxidação. Corrosão. Tipos de corrosão. A corrosão intergranular nos aços inoxidáveis
- 7.3 Tratamentos térmicos dos aços inoxidáveis
- 7.4 Características mecânicas nos aços inoxidáveis

### 8 - Aços de Precipitação Estrutural: os aços maraging

- 8.1 Tratamentos térmicos
- 8.2 Características mecânicas. Vantagens e limitações da sua utilização

### 9 - Ferros fundidos. Generalidades. Tipos

- 9.1 Fatores que influenciam a formação de grafite no estado sólido e no estado líquido.
- 9.2 Os ferros fundidos cinzentos. A inoculação. Propriedades mecânicas. Efeitos da matriz e do tipo de grafite.
- 9.3 Os ferros fundidos dúcteis. O tratamento de nodularização. Propriedades mecânicas.
- 9.4 Os ferros fundidos maleáveis. Tratamentos térmicos. Propriedades mecânicas e tecnológicas.

---

## LIGAS NÃO FERROSAS

### 10 - Ligas de Cobre

10.1 O Cobre puro, propriedades

10.2 As ligas Cobre-Zinco: os latões. Tipologia e propriedades mecânicas.

i) Ligas monofásicas

ii) Ligas bifásicas

10.3 Problemas específicos de corrosão nos latões

10.4 As ligas Cobre-Estanho (bronzes)

i) Tipos de bronzes

ii) Os bronzes como materiais antifricção

### 11 - Ligas de Alumínio

11.1 Alumínios tratáveis e não tratáveis termicamente

11.2 Processos de endurecimento por precipitação estrutural: os duralumínios

11.3 Os alumínios de fundição. Características e propriedades mecânicas.

12 - Ligas de Zinco. Ligas de Magnésio. Tipos. Características mecânicas. Tratamentos Térmicos.

13 - Ligas de Titânio. Tipos. Características mecânicas. Tratamentos Térmicos. Ligas com memória de forma

## Propriedades

### Mecânicas

- Ductilidade;
- Dureza;
- Limite de resistência a tração;
- Limite de escoamento;
- Módulo de Elasticidade;
- Resiliência e Tenacidade;
- Resistência à Fadiga;
- Resistência ao Impacto;
- Resistência à Fluência.

### Térmicas

- Calor Específico;
- Calor Latente de Fusão;
- Condutividade Térmica;
- Expansão Térmica;
- Ponto de Fusão.

### Físicas

- Densidade
- etc.

### Elétricas

- Condutividade
- Resistividade
- Etc.

## Preço

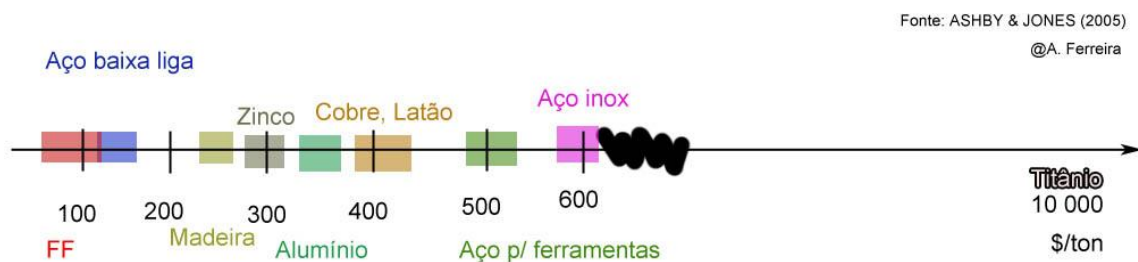
Tabela 1 Preços relativos aproximados por tonelada (continua)

<b>Material</b>	<b>Preço relativo US\$</b>
Diamante	200 milhões
Platina	5 milhões
Ouro	2 milhões
Prata	150.000
CFPR (mat. 70% do custo; fabr. 30% do custo)	20.000
Cobalto/cermets de carbeto de tungstênio	15.000
Tungstênio	5.000
Ligas de cobalto	7.000
Ligas de titânio	10.000
Ligas de Níquel	20.000
Polímidas	8.000
Carbeto de silício (cerâmica fina)	7.000
Ligas de magnésio	1.000
Náilon 66	1.500
Policarbonato	1.000
Polimetilmetacrilato	700
Magnésia, MgO (cerâmica fina)	3.000
Alumina, Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> (cerâmica fina)	3.000
Aço-ferramenta	500
Polímero reforçado com fibra de vidro – GFPR (mat. 60% do custo; fabr. 40% do custo)	1.000
Aços inoxidáveis	600
Cobre, usinado (chapas finas, tubos, barras)	400
Cobre, lingotes	400
Ligas de alumínio, usinadas (chapas finas, barras)	400
Lingotes de alumínio	300
Latão, usinado (chapas finas, tubos, barras)	400
Latão, lingotes	400
Epóxi	1.000

Tabela 1 (conclusão)

<b>Materiais</b>	<b>Preço relativo US\$</b>
Poliéster	500
Vidro	400
Polímeros espumosos	1.000
Zinco, usinado (chapas finas, tubos, barras)	400
Zinco, lingotes	350
Chumbo, usinado (chapas finas, tubos, barras)	250
Chumbo, lingotes	200
Borracha natural	300
Polipropileno (PP)	200
Poliétileno (PE), alta densidade	200
Poliestireno (PS)	250
Madeiras duras	250
Poliétileno (PEDB), baixa densidade	200
Cloreto de Polivinila ou polivinilcloreto (PVC)	300
Compensado	200
Aços de baixa liga	130
Aço doce, usinado (cantoneiras, chapa, barras)	100
Ferro fundido	90
Ferro, lingotes	70
Madeiras macias	70
Concreto, armado (vigas, colunas, lajes)	50
Óleo combustível	50
Cimento	20
Carvão	20

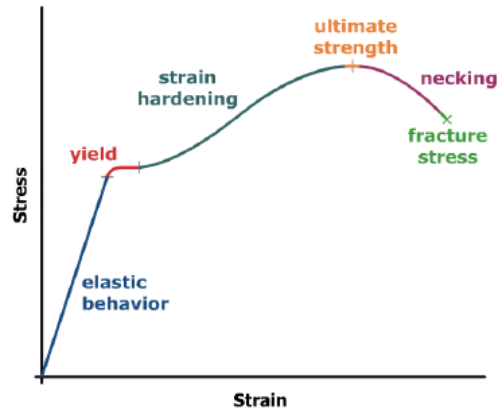
Fonte: ASHBY & JONES (2005).



### Metais relativos à disciplina

## Termos

### Curva do ensaio de tração genérica



Yield: limite elástico

Strain hardening: encruamento

Ultimate tensile strength (UTS): tensão de rotura

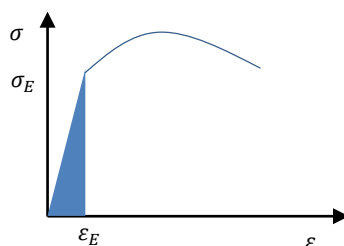
necking: estrição

### Dureza

A propriedade de dureza expressa apenas uma propriedade superficial do corpo de prova devido à natureza de sua concepção. É, na realidade, uma medida de resistência à penetração de uma ponta (esférica, cônica ou piramidal constituída de material duro) oferecida pelo material do corpo de prova. Essa propriedade é de particular interesse para:

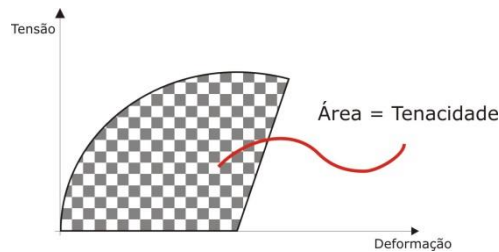
- Se avaliar a resistência ao desgaste do material (que é uma propriedade dependente da superfície do corpo);
- Para se medir o grau de endurecimento superficial por tratamento térmico;
- Para estimar aproximadamente a resistência mecânica em geral do material do corpo de prova na medida em que as características mecânicas de sua superfície são representativas também das características de todo o material do corpo

**Resiliência** é a propriedade que um material que absorva muita energia por unidade de volume em regime elástico tem. Particularmente importante para elementos elásticos.



$$U_E = \frac{\sigma_E^2}{2E} \quad [J/m^3]$$

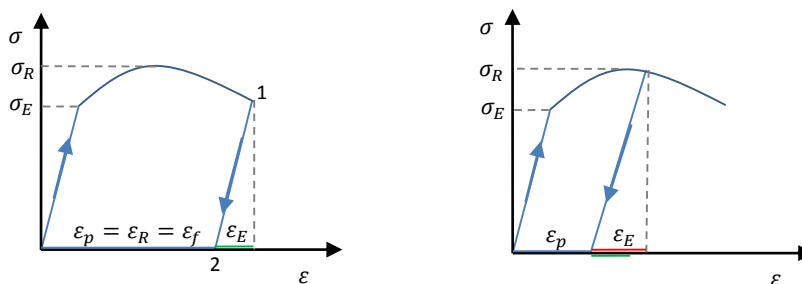
**Tenacidade** é a energia total por unidade de volume de material necessária para provocar a sua fratura.



$$U_P = \frac{\sigma_E + \sigma_R}{2} \cdot \varepsilon_f \quad [J/m^3]$$

### Deformação elástica e plástica

Imaginar um ensaio de tração. Ao parar o ensaio ou quando o provete rompe (1) ele volta ligeiramente para a forma original (2), reduzindo  $\varepsilon_E$ , e ficando com  $\varepsilon_p$  como deformação permanente, plástica. Notar que se o ensaio tivesse sido parado a meio, por exemplo, na tensão de rotura,  $\sigma_E$  seria maior. Quando o material rompe, a deformação plástica com que ele fica, dá-se o nome de extensão após rotura  $\varepsilon_R$ , ou deformação final  $\varepsilon_f$ .



### Resistência à Fadiga

As falhas de componentes metálicos em serviço decorrem, na maioria das vezes, devido à fadiga provocada pelas solicitações cíclicas. A fratura por fadiga apresenta características frágeis e é influenciada por diversos fatores como:

- Pontos de concentração de tensões;
- Temperatura;
- Presença de meios corrosivos;
- Tensões residuais e outros que dependem das condições de projeto e de fabricação da peça e do meio ambiente. Os resultados dos ensaios de fadiga realizados em corpo de prova constituem apenas uma indicação do comportamento em serviço do material desse corpo que depende também de muitos fatores não representados nos ensaios de flexão-rotativa, flexão alternada e tração-compressão.

**Encruamento** é o sendo o seu endurecimento por deformação plástica.

### Maquinabilidade

A maquinabilidade de um material é uma grandeza tecnológica com uma influência determinante sobre a produtividade. É determinada, normalmente, como a aptidão que um material tem para ser processado por uma ferramenta de corte. Algumas das características mais importantes do material a cortar com o efeito

decisivo sobre o processo de corte, são: propriedades da tensão e deformação, grau de encruamento (endurecimento), a microestrutura, a dureza, a abrasividade, a composição química, a condutibilidade térmica, o coeficiente de atrito, a homogeneidade e a isotropia. O grande número de indicadores, reflete bem que nenhum deles é totalmente satisfatório, o que é consequência da complexidade do fenómeno. Alguns dos indicadores de maquinabilidade a considerar incluem a vida da ferramenta, a rugosidade e integridade das superfícies maquinadas, a produtividade, a força e potência necessária ao corte e a maquinabilidade relativa. A maquinabilidade de um material é difícil de quantificar, sendo que a maior ou menor aptidão do mesmo para ser maquinado reflete-se no acabamento superficial da peça, na duração da ferramenta de corte, na velocidade e força exercida para maquinar, e também a capacidade de recolha/separação das limalhas resultantes do corte da peça. É essencial o conhecimento do material a maquinar para se obter sucesso numa operação de maquinação. Quando numa liga de aço o teor de carbono sobe, a maquinabilidade desce.

Quanto mais liga tiver o aço, mais difícil é de maquiná-lo com as ferramentas de corte

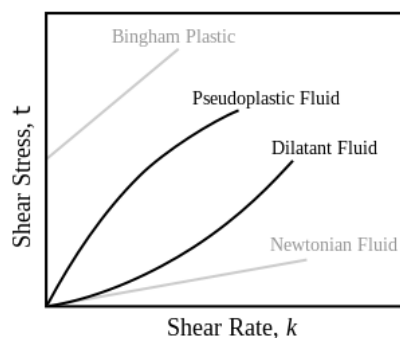
A mesma relação prevalece para a dureza e a maquinabilidade. Quando a dureza sobe a maquinabilidade desce. Para aumentar a maquinabilidade desses materiais, o teor de enxofre pode ser aumentado no material, resultando em maior maquinabilidade do mesmo. Entretanto, o enxofre reduz as propriedades mecânicas nos aços, por exemplo a tenacidade (capacidade de se deformar sem rotura). Outra desvantagem do enxofre está relacionada com o acabamento superficial.

Aços trabalhados a frio têm frequentemente ligas de carbono, cromo e vanádio para que os carbonetos nesses aços fiquem duros e resistentes à abrasão. Os carbonetos duros reduzirão, porém, a maquinabilidade do aço, gerando um alto desgaste da ferramenta de corte. Selecionar a classe de aço não é tarefa fácil, a seleção da classe do aço é normalmente feita no estágio do projeto do molde, para que o material possa estar em stock e pronto aquando o projeto estiver finalizado. Em muitos casos, a escolha é um compromisso entre aquele que projeta e aquele que o maquina.

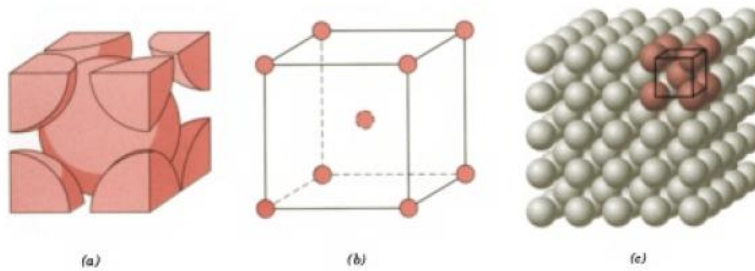
**Vazamento** é o enchimento do molde com metal líquido.

A **fluência** (*creep*) é a tendência para um material sujeito a uma tensões inferiores a  $\sigma_E$  se ir deformando ao longo do tempo. Ocorre como resultado da exposição prolongada a tensões. A velocidade de fluência geralmente aumenta com o aumento da tensão e da temperatura a que está o material. Este efeito geralmente torna-se notável para  $T^a > 30\%T^af$  para metais e  $> 40-50\% T^af$  para cerâmicos. Relacionado com a propriedade de **viscoelasticidade**.

**Viscoelasticidade** é a propriedade de materiais que exibem comportamento viscoso e elástico ao sofrerem deformação. Portanto um material viscoelástico é como uma mistura de mel e borracha. Ao ser deformado as moléculas arrastam-se umas sobre as outras como as de um fluido, com o tempo, mas ao ser libertado, elas voltam um pouco para trás como se o mel possuísse alguma elasticidade.

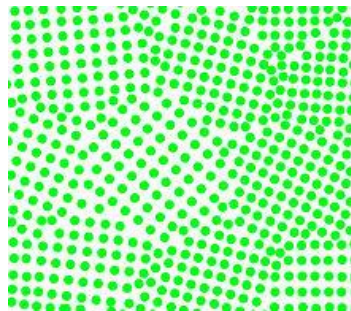


**Grão vs Cristal.** O termo grão é mais usado em metalurgia enquanto o termo cristal é mais usado na área físico-química. No entanto, há também quem diga que o cristal é a estrutura unitária a partir do qual os grãos são formados.

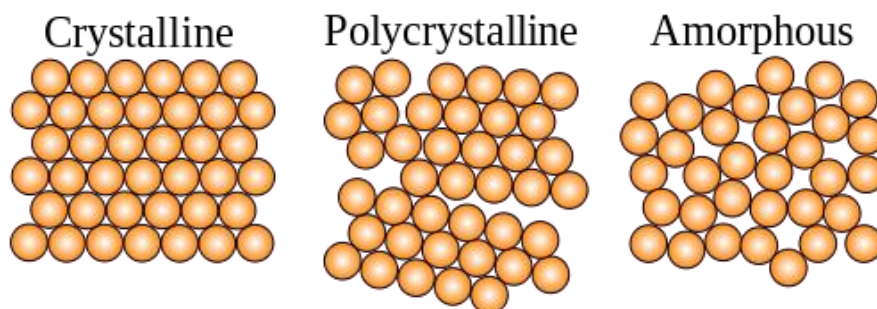


O cristal seria o cubo da imagem c) e o grão todo o cubo cinzento, conjunto de cristais. A estrutura cristalina é, assim, a organização espacial dos átomos de um cristal.

**Limites de grão** são defeitos na estrutura cristalina de um material de um material policristalino. Um material monocristalino só tem 1 grão ou 1 cristal, e portanto não tem limites de grão.



**Material amorfo** é um material no qual os átomos não se encontram organizados. Se os carros fossem átomos, um parque de carros era um material policristalino e um ferro velho em princípio seria um material amorfo.



**Transição vítrea** (*glass transition*) é a temperatura à qual um material amorfo, ou regiões amorfas de um material semicristalino passa de duro e relativamente frágil para maleável ou vice-versa na qual este sofre uma variação da sua viscosidade.  $T_g \approx \frac{T_f}{3}$ . Na verdade esta transição não ocorre numa única temperatura mas numa faixa de temperaturas à volta de  $T_g$ .

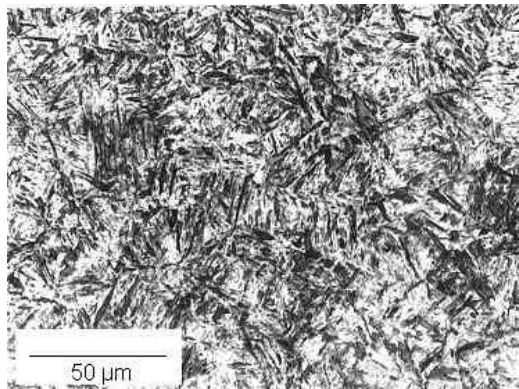
**Liga binária** é uma liga com 2 materiais (ex: aço inox (Fe+Cr) – notar qe a percentagem dos elementos tem de ser superior ao valor tabelado para poder ser considerado elemento de liga)

**Liga ternária** é uma liga com 3 materiais (ex: aço inox + níquel)

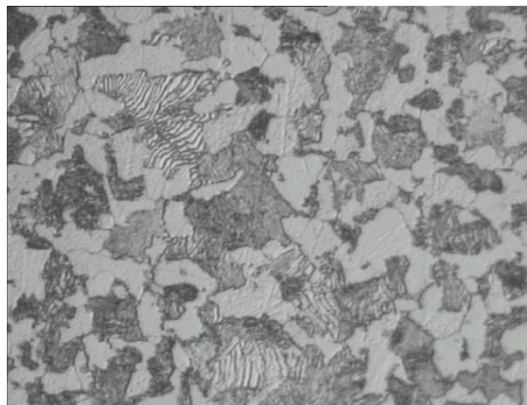
**Endurecimento por precipitação** - com a diminuição da temperatura a solubilidade de um dos elementos no outro diminuiu e precipitam. Essas partículas de precipitados atuam como obstáculos ao movimento das deslocações, e como consequência, aumentam a resistência mecânica da liga tratada termicamente.

O **Revenido** é um tratamento que consiste no alívio das tensões internas produzidas pela têmpera, responsáveis por dureza excessiva e fragilidade do material. O material depois de revenido fica com melhor ductilidade e tenacidade. Secundariamente o revenido pode provocar endurecimento. O tratamento consiste num aquecimento abaixo de A1 seguido de um arrefecimento lento ao ar ou em banho de óleo.

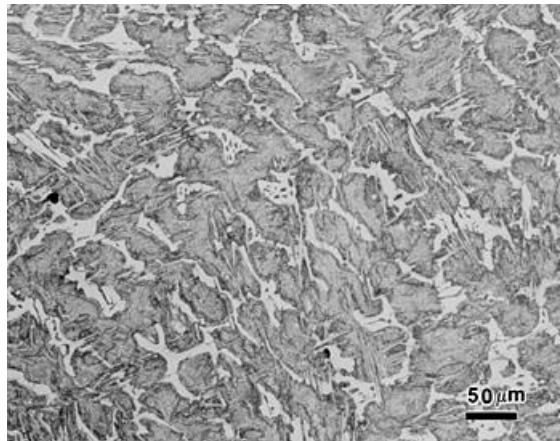
### Martensite



**Aço hipo** – notar a perlite: riscas alternadas de ferrite + cementite



**Aço hiper:** notar na mesma a perlite, mas aqui nos contornos de grão há cementite (branco) em vez de ferrite como na imagem anterior.



**Aços de corte fácil** ou aços de construção são aços de baixa dureza e alta ductilidade, fáceis de serem trabalhados e moldados. São aços de aplicações gerais, permitem bom acabamento e elevadas velocidades de corte.

**Aços para ferramentas** são quaisquer aços usados para fabricar ferramentas de corte, conformação ou qualquer outro artefacto capaz de dar forma a um material transformando-o numa peça. Caracterizam-se por terem elevada dureza e resistência à abrasão. A grande maioria é de média e alta liga → temperam ao ar, logo não dá para fazer recozido normalização.

**Aços rápidos** são aços cuja principal aplicação são ferramentas de corte tais como brocas, bisturis, serras (incluem-se nos aços para ferramentas). O seu desenvolvimento permitiram velocidades de corte mais rápidas, daí o nome. Oferecem alta dureza em temperaturas até 500°C e alta resistência ao desgaste, graças a elementos de liga como Tungstênio, Molibdênio, Vanádio e Crómio, que são capazes de formar carbonetos.

**Corrosão** é a destruição progressiva de um metal por ação de um agente exterior.

**Eletronegatividade:** O metal mais nobre é o ouro e o menos nobre o magnésio.

**Colabilidade** (fluidez) é a capacidade de preencher vazios

**Inoculação** consiste na adição de pós de silício, cálcio e ou ferro antes de vaziar o FF para germinar grafite.

- Quanto mais homogênea a austenite (+ tempo em temp. de austenitização), mais facilmente se tempera.
- Quanto maior o tamanho de grão mais para a direita se deslocam as curvas de TI e TC. No entanto o aumento do tamanho de grão também prejudica as propriedades do aço.

**Endurecimento secundário no revenido** – Ou têmpera secundária ou endurecimento por envelhecimento é um

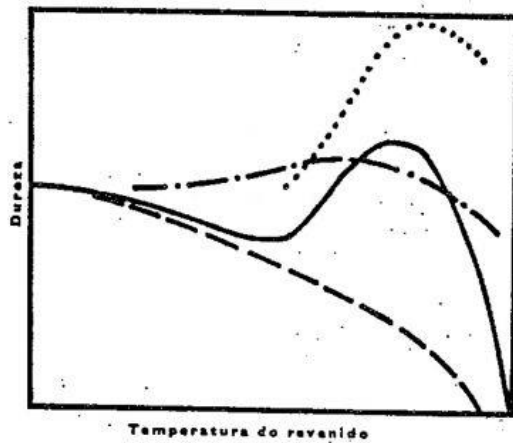


Fig.5 - Influências parciais de vários factores no comportamento ao revenido de um aço rápido.

- — — martensite revenida
- . - . - precipitação de carbonetos
- ..... austenite residual - martensite
- resposta total ao revenido

endurecimento que ocorre, num revenido, devido à transformação da austenite residual em martensite e à precipitação de carbonetos endurecedores, sendo que o primeiro tem mais peso neste processo.

**Envelhecimento** é um tratamento térmico de endurecimento e aumento de resistência aplicado a certas ligas metálicas (geralmente não ferrosas) consistindo em provocar o aparecimento de um fino precipitado de uma segunda fase no seio dos grãos da primeira fase, constituindo barreiras que dificultam o movimento das deslocações e conseqüentemente aumentando a resistência da liga. Exemplo Al+Cu.

Velocidades infinitamente lentas:

Não há formação de cementite. Forma-se grafite → boa maquinabilidade e vazabilidade, detriora as propriedades mecânicas.

Os elementos de liga deslocam o ponto eutectóide para a esquerda (ver o meu trabalho)

Os elementos de liga pertencem a 2 de 4 grupos:

**Alfagenos** (no caso do aço, estabilizadores da ferrite)

- + tenacidade, promovem fase alfa
- exemplos: Crómio, Molibdénio Vanádio, Titânio, Tungsténio (W) , Silício (Si)

**Gamagenos** (no caso do aço, estabilizadores da austenite)

- - tenacidade
- exemplos Níquel, Manganês e Cobre.

**Carborígenos:**

- formam carbonetos de Fe, C e E.L.
- globulizam a cementite (+ maquinabilidade, + tenacidade)
- exemplos: Crómio, Molibdénio, Vanádio, W, Ti, Mn. Manganês é no entanto muito bom estabilizador de carbonetos.

**Não Carborígenos**

- dissolvem-se na ferrite (alfa) (+ dureza da fase alfa)
- exemplos: Níquel, Silício, Cu, Co

No estado recozido a ferrite endurece pela distorção da malha provocada pela inserção de E.L. não carborígenos. Contudo, a ferrite continua com dureza muito inferior à cementite.

O qe dá a dureza no estado recozido é a quantidade de carbono, que aumenta a percentagem de cementite.

Com E.L. podemos controlar a transição alfa – gama:

- Obtenção de aços gama à Tamb:
  - Macios
  - Não há transf. Martensítica
  - Alta amplitude térmica de funcionamento
  - Amagnéticos
- Obtenção de aços alfa à T. amb:
  - Coeficiente de dilatação térmica baixo usados em revestimentos;
  - Frágeis a baixa temperatura

Melhoram a temperabilidade	Não melhoram a temperabilidade
Silício	
Crómio	
Tungsténio	
Manganês	
Níquel	
Alumínio	
Vanádio	
Molibdénio	
Carbono	
Cobre	
	Cobalto
	
	by A. D. Ferreira

## Cementação

- Hoje em dia o mais comum é usar-se cimento gasoso.
- Camada cementada até 2mm. Deixa de se considerar camada cementada quando o teor em carbono desce para 40% do da superfície. Geralmente à superfície tem entre 0.9 e 1.1%C.
- Usada para aços com muito baixo teor em carbono <0.2%
- Necessário efetuar têmpera após a cementação. À superfície dever-se-á obter aproximadamente 66HRC que corresponde à dureza de martensite de um aço com 1%C.
- A têmpera pode ser direta, a partir da temperatura de cementação, ou indireta, feita posteriormente.
- Temperatura de estágio da cementação entre 870-930°C.
- Na cementação sólida ou em caixa há grande variação dimensional (na ordem dos 0.2mm) da camada cementada.
- O tempo de estágio depende da camada a cementar.

Efeito do tempo na profundidade de camada cementada (cementação sólida) a 925°C

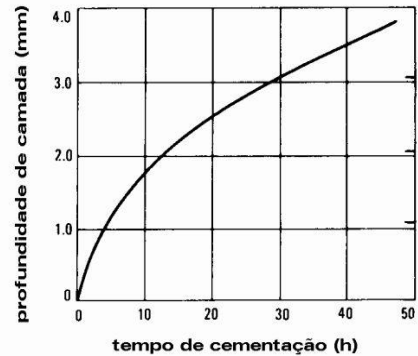
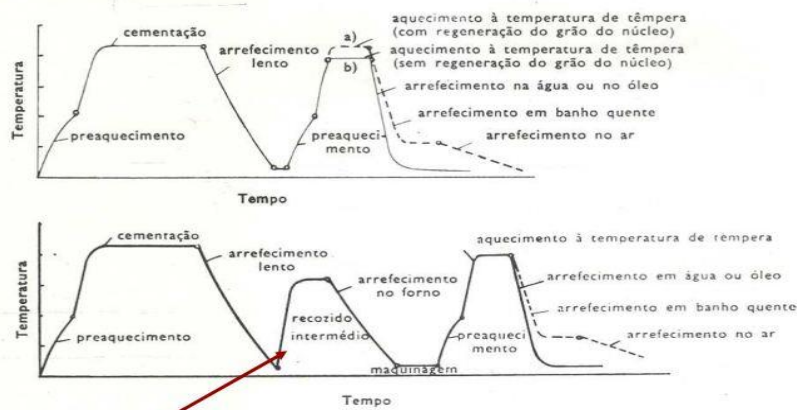


Fig. 72 — 3 hipóteses de tratamento por têmpera simples de peças cementadas.

- a) Com regeneração do grão do núcleo.
- b) Sem regeneração do grão do núcleo.
- c) Com recozido intermédio.



Deformação mínima

Quando se pretende um máximo de tenacidade e dureza

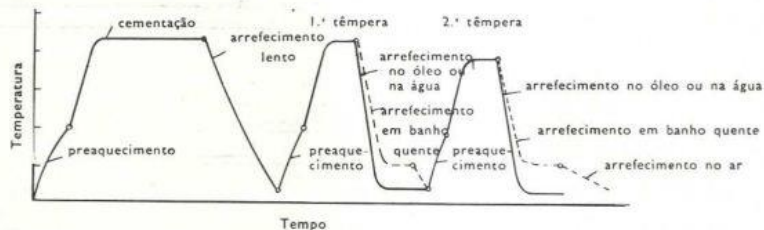
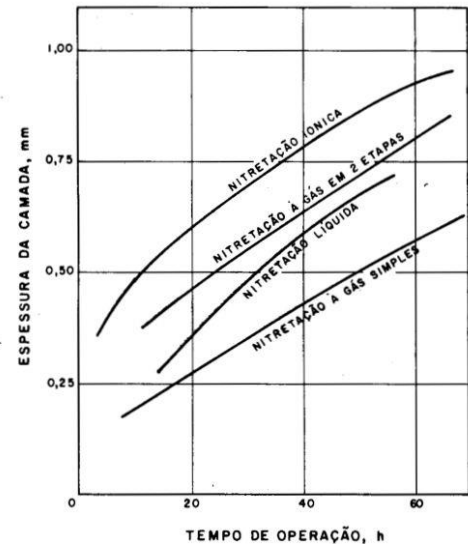


Fig. 74 — Têmpera dupla com regeneração do grão do núcleo.

## Nitruração:

- Camada superficial até 1mm (geral 0.8mm), mas regular
- Muito mais dura qe a da cementação (1000 HV)
- Não é necessário nenhum tratamento térmico posterior
- Aumenta consideravelmente a resistência à fadiga, qe vem do facto de a camada nitrurada se expandir causando tensões de compressão na matriz.
- Temperatura de estágio 500-580°C
- Arrefecimento no forno / ar
- Camada superficial por ser muito fina tem pouca tenacidade
- É necessária têmpera e revenido antes da nitruração



## Carbonitruração

- Tratamento termoquímico em que se promove o enriquecimento superficial simultâneo com carbono e nitrogênio. Utiliza-se para peças que necessitem de alta dureza superficial, alta resistência à fadiga de contato e submetidas a cargas superficiais moderadas.
- Para camadas superficiais muito duras com cerca de 0.1 mm
- Pode ser aplicada a qualquer aço

## Aços de construção (mecânica)

Para usar na construção de peças ou órgãos de máquinas.

### Aços de tratamento térmico

- Não-ligados / ao carbono
  - Peças de pequena dimensão submetidas a esforços pouco elevados
  - 0.1-0.6%C
- Ligados
  - Quase todos contém Crómio.
  - Costumam vir no estado tratado (temperado + revenido)
  - Peças médias ou grandes, sujeitas a esforços elevados
    - Usados na indústria automóvel e aeronáutica
  - Estes aços apresentam as seguintes vantagens:
    - Maior temperabilidade, o que dá a possibilidade de temperar peças grandes até ao núcleo
    - Têmpera já pode ser feita ao ar ou óleo em vez de água
    - Gama de temperaturas dos tratamentos mais larga, permitindo aquecimentos com menos possibilidades de sobreaquecimento.

Nota: Aços sem Molibdénio tornam-se frágeis por revenido pelo que se torna necessário fazer arrefecimento rápido a seguir ao estágio do revenido e evitar T<sup>a</sup> estágio acima de 400°C

Há também que ter em atenção o acabamento superficial já que rugosidades originais fendas com muita mais facilidade

### Aços para têmpera superficial

#### Aços para cementação

- 0.1-0.25%C
- Ao carbono
  - Peças de pequenas dimensões, mecânica geral
- Ligados
  - Peças de maiores dimensões, esforços mais elevados
  - + resistência ao desgaste, + tenacidade (engrenagens, rodas de velocidade, etc.)

### Aços para molas

- Aços de grande elasticidade
- Necessário sigma e para boa resistência à fadiga
- Têmpera ao óleo ou água
- Em molas que trabalham a quente → aços resistentes a altas temperaturas

## Aços para Ferramentas

### Tratamentos

Não são normalizáveis os que temperam ao ar (a maior parte, pois a maior parte também tem muitos E.L.), já que a normalização implica tal arrefecimento.

### Normas AISI-SAE:

#### Série W (temperados em 'water')

- 0.6-1.4%C
- Pode-se adicionar
  - Crómio + temperabilidade + resistência ao desgaste
  - Vanádio + tenacidade (grão + fino)

#### Série O (para trabalho a frio, temperados em 'oil')

- 0.9-1.1%C
- Derivados da série W, com pequenas adições de elementos de liga (Cr, Mo, V, W que são carborígenos e alfaenos) adição essa que permite que sejam temperados em óleo
- Menos distorções e fissuras

#### Série A (para trabalho a frio, temperados ao 'air' ( ++ E.L. ) )

- 0.9-1.1%C
- Resistência ao desgaste assegurada por ++%C

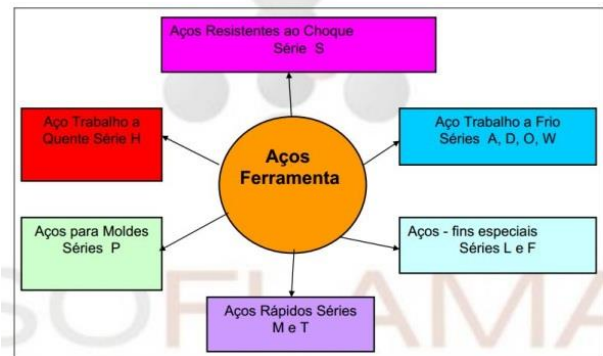
#### Série S (resistentes ao 'shock')

- 0.5 %C → resistência ao desgaste moderada
- Principais E.L. Silício, Crómio, Tungsténio
- Pode-se adicionar para + temperabilidade – Crómio ou Molibdénio
- excelente tenacidade + resistência à fadiga
- Temperabilidade moderada

#### Série D (para trabalho a frio, boa precisão Dimensional)

- 1.5-2% Carbono
  - 10-12% Crómio
- ++ temperabilidade e resistência ao desgaste
- Temperáveis ao ar, endurecimento secundário no revenido
  - Usar atmosfera controlada p/ não descarbonizar
  - São necessários 2 ou 3 revenidos

### Classificação dos Aços Ferramenta



### Série H (hot)

- Aprox 0.5%C, aprox 4%Cr, algum W ou Mo
- Destinam-se a ferramentas que atinjam temp. na ordem dos 550°C. Para tal precisam de Crómio, Tungsténio, ou Molibdénio (os mesmos usados nos rápidos)
- Sem problemas de fluência
- boa maquinabilidade

Decrescem: resistência ao choque e usinabilidade  
 Crescem: profundidade de têmpera, custo, indeformabilidade na têmpera, resistência ao amolecimento pelo calor

	Deformação normal, trabalho a frio Coluna 1	Baixa deformação, trabalho a frio Coluna 2	Baixa deformação, trabalho a quente Coluna 3
Ferramentas de alta abrasividade Fila 1	F2 W1, W2 (1,1 a 1,3% C)	D2 D3 D6	M3 T5 T8
Ferramentas de média abrasividade Fila 2	W1, W2 (1,0 a 1,1% C)	A2 O7	M1 M2 T1
Ferramentas de baixa abrasividade Fila 3	W1, W2 (0,8 a 1,0% C)	O1 O2 L6	H21
Ferramentas resistentes a esforços bruscos Fila 4	S1	S5	H11 H12 H13

### Aços rápidos

#### Série T (tungsténio)

- 18% W (Tungsténio) que forma muitos carbonetos de difícil dissolução, e que são os principais endurecedores carborígenos
- 4%Cr
- Elevada resistência ao revenido
- Podem conter Vanádio que fomenta a formação dos ditos carbonetos

#### Série M

- 8% Molibdénio como elemento endurecedor
- 4% Cr
- Correspondem a 80% dos aços rápidos, série T só a 20%.
- + 30% mais baratos que série T
- + Ligeiramente mais tenazes

- Descarbonizam facilmente, pelo qe o tratamento térmico tem de levar isso em conta
- Temperaturas de funcionamento mais apertadas

**Propriedades importantes dos aços rápidos:**

- Dureza (resistência ao desgaste, bom poder de corte)
- Resistência ao revenido ?
- Podem trabalhar a 500-600°C sem queda apreciável de dureza
- Temperam ao ar
- São fornecidos no estado recozido macio
- Temperatura de têmpera o mais alto possível para se dissolver + carbono e o teor de E.L. mas para qe o grão não cresça em demasia qe comprometa a tenacidade e aumento de austenite residual.

**Sobre a resistência ao revenido:** Durante o trabalho, as superfícies das matrizes de conformação a quente são submetidas a altas temperaturas, em que as reações de revenido voltam a ocorrer. Portanto, para promover melhoria da resistência a quente, estes fenómenos devem ser retardados e, assim, a resistência ao revenido torna-se fundamental.

## Aços Inox

- Crómio > 12% e Carbono < 1%, para não formar carbonetos (e por conseguinte diminuir o efeito do crómio).
- O Crómio é o elemento de liga que maior influência tem na resistência à oxidação e corrosão pois é ele que forma a película de óxido de crómio que protege o interior impedindo a progressão da oxidação e corrosão. Pode ser adicionado Níquel para melhorar a resistência à corrosão pois este fomenta a formação da película de óxido de Crómio e dá-lhe mais estabilidade.

Em ambientes sem oxigénio, quando a película de  $\text{Cr}_2\text{O}_3$  é danificada não se volta a formar, portanto a resistência à corrosão fica a cargo de outros elementos (Ni, Mo, Cu, Si).

### Tipos de aços inox

#### Segundo a sua composição química:

- Com Crómio
- Crómio + Níquel
- Crómio + Níquel + Molibdénio
- Ligas especiais

#### Segundo a sua estrutura:

- **Ferríticos (série 400):**
  - Max 0.2 %C
  - Crómio até 18 (max 30)%
  - + Boa resistência à corrosão e boa conformabilidade plástica
  - Essencialmente usados em revestimentos já que possuem coeficiente de dilatação = ao dos aços normais
  - Não são endurecíveis por tratamento térmico (devido ao baixo teor em carbono têm dificuldade em temperar)
  - Más propriedades de soldadura
- **Austeníticos (série 300):**
  - Máx 0.1 %C
  - 15-26% Crómio + 7-25% Níquel (liga ternária, + Ferro)
  - + Os melhores inox em termos de resistência à corrosão
  - + Os melhores inox para soldar, porque se pode redissolver o crómio após a corrosão causada pela soldadura.
  - Amagnéticos
  - Não são endurecíveis por tratamento térmico (não temperam, sendo usados no estado hipertemperado)
  - 18/10 ou 18/8 em facas etc é % de Crómio e Níquel respetivamente. Esta (18/8) é, aliás, a composição mais típica.

- **Martensíticos (série 400):**
  - 0.15-1 %C em função do teor de Crómio (até 17%) para se obter estrutura martensítica por têmpera
  - + São endurecíveis por tratamento térmico
  - + Bom compromisso entre resistência mecânica e resistência à corrosão
  - Usados em brocas e bisturis
  - Revenido diminui resistência à corrosão
  - Tratamentos térmicos: **Recozido** 1-2h aprox 800°C, **têmpera** a ar geralmente alguns a óleo, revenido:
    - 200 – 350°C, quando se desejar elevada resistência mecânica ou apenas aliviar tensões; ou
    - 600 – 700°C, quando se desejar elevadas ductilidade e tenacidade, em detrimento da resistência mecânica.

## Tipos de corrosão nos Inox

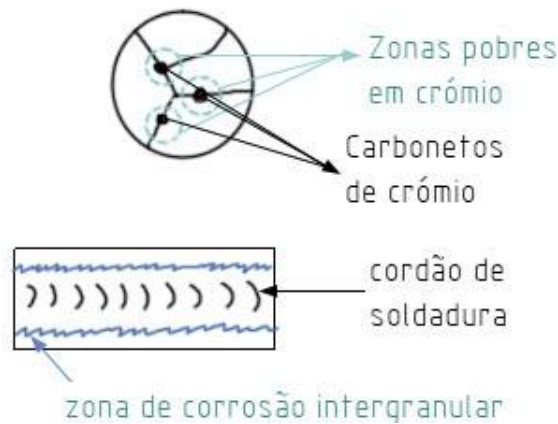
Água salgada pode causar formação de ferrugem nos aços inox simples (sem níquel). Mesmo os aços Cr-Ni mais nobres podem oxidar, mesmo que mais lentamente. Há aços que resistem a este tipo de ambiente melhor.

**As corrosões nos aços resistentes à corrosão só se formam se:**

- A camada passiva não se formar (corrosão de contacto)
  - A camada passiva for danificada (corrosão intergranular, uniforme, alveolar, galvânica)
- **Contacto** (à qem inclua a corrosão eletrolítica aqui)
  - **Uniforme**
    - ataque uniforme em toda a superfície da peça
  - **Alveolar**
    - Formação de crateras / picadas na superfície do aço
    - Frequente em ambientes ricos em cloretos (água do mar)
    - É difícil de detetar: só com fuga de líquido
    - **Molibdénio** é mto bom para evitar corrosão alveolar pq ajuda a reparar a película protetora. Mesmo assim às vezes não chega e é necessário recorrer a outros elementos com o Titânio.
  - **Galvânica ou eletrolítica**
    - A corrosão de galvânica surge quando diferentes materiais metálicos entram em contacto, estando impregnados com um eletrólito. O material menos nobre é atacado e entra em solução. Os aços resistentes à corrosão são nobres em comparação com a maior parte dos outros materiais metálicos.
    - Como evitar?
      - Usar o mesmo material
      - Isolar os materiais diferentes de modo a evitar esse contacto
  - **Intergranular** (ocorrem nos contornos de grão)
    - Resultam da precipitação dos carbonetos de crómio nos contornos de grão quando o aço passa pela zona crítica de 500-600°C. A zona imediatamente à volta fica empobrecida em crómio e suscetível de sofrer corrosão.
    - Corrosão típica das soldaduras

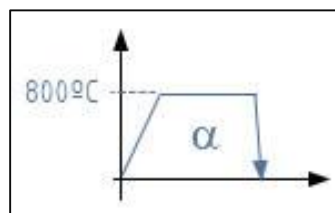
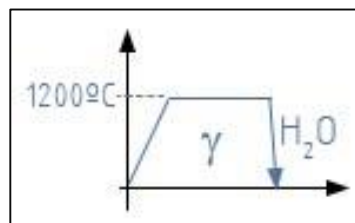


- - Na soldadura é possível ver a precipitação de carbonetos de Crómio pela sua cor acastanhada.



### Soluções

- **Profiláticas** (à priori)
  - Usar aços extra low carbon (ELC)
    - Metade da %C dos inox normal (0.03máx) (menos carbono, menos probabilidade de se formarem carbonetos)
    - -  $\sigma_E$  qe se resolve com encruamento
    - São + caros
    - + fissuras a quente
  - Aços estabilizados com Nióbio ou Titânio
    - O Ti e o Nb são + carborígenos (i.e. tem mais afinidade pelo Carbono qe o Crómio), não deixando o Crómio formar tantos carbonetos
    - + + baratos qe os ELC
- **Curativas** (à posteriori)
  - Para **aços austeníticos** fazer têmpera a 1200°C (hipertêmpera) para redissolver o Crómio no aço. O arrefecimento rápido evita a precipitação de Crómio (o qe causaria distorções na malha)



- Para **aços ferríticos** não se pode por a  $T^a$  tao alta (e por conseguinte redissolver o Crómio no aço, só se consegue difundir). Por isso no final só conseguimos qe o aço fique semi inox. Por esse motivo os aços austeníticos são os melhores para soldar. Fazer têmpera a

- **Corrosão sob tensão** (fenómeno de deterioração de materiais causada pela ação conjunta de tensões mecânicas (residuais ou aplicadas) e meio corrosivo)
  - Surgem devido a tensões internas/externas no material, podendo a corrosão avançar para o interior do material.
  - Quando o aço está sob tensão se houver fissuras nas camadas superficiais (ou seja na camada protetora) as tensões promovem uma propagação das fissuras mais rapidamente.
  
- **Corrosão-erosão**
  - Trata-se do desgaste da película protetora que expõe o aço a uma nova corrosão
  - Frequente em superfícies de apoio e tubagens com fluidos a altas velocidades
  - Soluções:
    - Oxigenar o fluido artificialmente
    - Adicionar + Crómio
    - Modificar a forma do tubo
    - Diminuir o caudal

## Aços Maraging

Na verdade não são aços, são ligas de Ferro-Níquel (entre 15 e 25%). O Carbono é visto como uma impureza (<0.03%) .

### Tipos de maraging + comuns:

- Aprox 18 % Níquel: Martensíticas
- Aprox 20% Níquel: Martensíticas
- Aprox 25% Níquel: Austeníticas à temp ambiente

### Características:

- Muito tenazes porqe apesar de terem uma estrutura martensítica têm muito pouco carbono
- Têm alta tensão limite de elasticidade
- Pouco densos

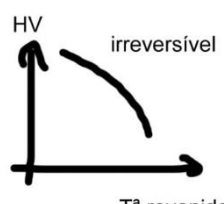
### Fabrico:

Primeiro, o aço é aquecido até homogenização dos elementos de liga e formação de austenite (geralmente 800°C). Seguido de (têmpera) arrefecimento rápido até 200 °C para formação da estrutura martensítica. Neste ponto, as peças costumam ser maquinadas e soldadas, pois é onde se obtém as melhores condições para tais processos. Então é feito tratamento de envelhecimento, qe consiste num revenido entre 425º e 510°C e é quando ocorre o endurecimento por precipitação e consequente aumento da resistência mecânica.

A martensite dos *maraging* é obtida naturalmente ao contrário dos aços qe se tem de arrefecer rapidamente.

- Boa resistência
- Boa resiliência
- Boa tenacidade
- Usados no fabrico de peças qe exijam boas caraterísticas mecânicas, em qe haja interesse qe tenham pouco peso (peças móveis, baixar E. cinética)
- Também usadas em peças qe devam ser soldadas (os com 18% são os melhores neste aspeto) e qe devam ter características mecânicas excelentes e estabilidade dimensional.

Comparação da martensite de aços e a de *maraging*.

Fe-Ni	Fe-C
- Martensite natural <b>porquê?</b> - isotérmico (banho de sais) CCC -dureza baixa, alta tenacidade - Revenido: aumenta a dureza pq os outros elementos de liga precipitam c Ni; o revenido é reversível	- Martensite artificial - martensite atérmica ? TCC -dureza geralmente alta, ductilidade baixa, baixa tenacidade (depende %C) - 

Endurecimento da martensite leva a precipitação estrutural, i.e., é nas zonas de instabilidade ( $MS \rightarrow Mf$ ) que se provoca a precipitação de compostos Fe-Ni + E.L., incoerentes com a matriz.

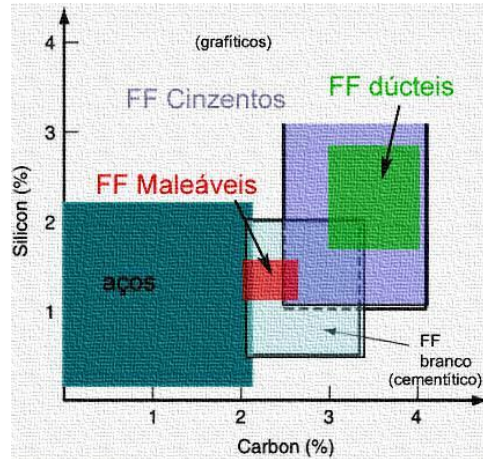
### Tratamentos térmicos

- **Recozido de solução / homogenização / difusão**
  - A uma temperatura acima da linha Af (fim da transformação da martensite em austenite durante o aquecimento). Pretende-se homogeneizar a liga, toda na fase austenítica, e dissolver homogeneamente todas os elementos endurecedores.
  - A maquinação é feita sempre depois deste tratamento térmico, já que a dureza é baixa até ser feito o revenido estrutural (a dureza da martensite só depende da %C que é muito baixa, logo a dureza também é muito baixa)
- **Tratamento de transformação austenite em martensite** (só p ligas c 25% Ni em que tenhamos austenite à temp ambiente)
  - a 700°C, estágio +- 4h, precipitam carbonetos de Níquel diminuindo a quantidade de Níquel na matriz, conseqüentemente subindo Ms e Mf, sendo então possível obter martensite à temp ambiente
  - No final fazer tratamento sub-zero ou encruamento
  - Permitem trabalho a quente
  - Permitem endurecimento superficial, dão se bem com a nitruração
- **Revenido estrutural** – tem como finalidade o **endurecimento** da estrutura **por precipitação**, e realiza-se à volta dos 470°C. A velocidade de arrefecimento não tem influência.
  - A precipitação de compostos ocorre sem deformação na estrutura: boa precisão dimensional



## Ferros Fundidos

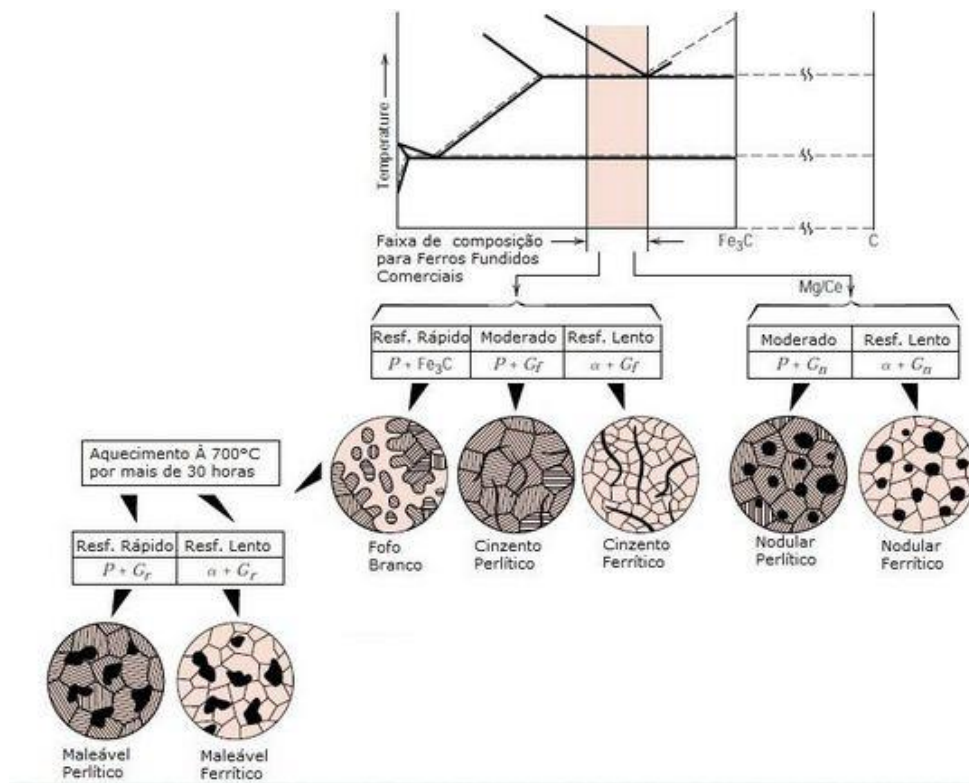
- 2.01-6.67 %Carbono, 1-3 %Silício  
Ver Smith, texto está bom.



- Brancos
- Grafiticos
  - Cinzentos
  - Dúcteis
  - Maleáveis (obtidos através de tratamento térmico dos ferros fundidos brancos)
    - De núcleo branco
    - De núcleo negro

Fatores que influenciam a formação de grafite (**grafitizantes**) ou cementite (**carborígenos**):

	Grafite	Cementite
Composição química	Si, C, Al	Cr, Mo, V, W
V. Arrefecimento	Lento	Rápido
	Inoculação: adição de pós de Fe, Si, Ca, que favorecem a grafite	Raramente se favorece a cementite, é mto dura e fragiliza



### Ferros fundidos Brancos

- Carbono precipita sob a forma de cementite.
- Muito duros e frágeis, baixa tenacidade e ductilidade
- Raramente usados, são materiais de passagem (usados para produzir FF maleáveis)

### FF Grafíticos

- Fase rica em carbono: grafite
- Boa vazabilidade – a grafite dilata no arrefecimento, o qe contraria as contrações do material no molde
- Comportam-se de maneira diferente à tração e compressão, a grafite funciona como micro vazio,  $\sigma_E(\text{compressão}) = 3 \text{ a } 5x \text{ maior qe } \sigma_E(\text{tração})$
- Podem conter quantidades mínimas de cementite (aquela qe precipita da ferrite)

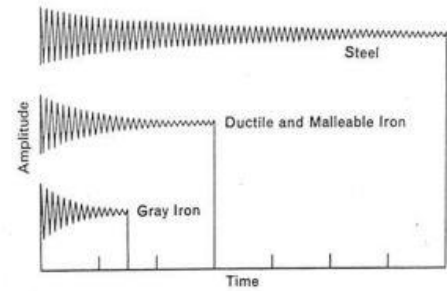
A **inoculação** consiste na introdução no FF líquido pouco antes do vazamento de certas adições tais como granulados Fe-Si, Si-Ca. Este granulados propiciam o poder germinador do banho para a grafite.

**2.1 FF Cinzentos** – forma-se quando o teor em carbono da liga supera a quantidade qe se dissolve na austenite, precipitando sob a forma de lamelas de grafite.



- Silício de 1 a 3% para promover a formação de grafite.
- Barato
- Boa maquinabilidade, bons níveis de dureza qe permitem boa resistência ao desgaste e capacidade de amortecimento de vibrações.
- Muita grafite (lamelar) → más propriedades mecânicas tais como baixa ductilidade,  $\sigma_E$  e  $\sigma_R$  são baixos

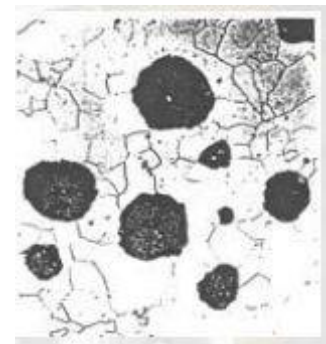
- Influência da velocidade de arrefecimento na formação da matriz
  - Se se arrefecer moderadamente forma-se matriz perlítica.
  - A velocidades intermédias forma-se uma mistura dos dois.
  - Se se arrefecer lentamente forma-se matriz ferrítica.



- Não podem ser conformados plasticamente, devem ser fundidos e maquinados
- Classes
  - 10 (100MPa tensão de rotura) – hiper, muita grafite.
  - ...
  - 40 (400MPa) – hipo, pouca grafite

## 2.2 FF Dúcteis

- Grafite esferoidal ou nodular – melhora a ductilidade (a grafite lamelar possui um fator de superior o qe aumenta o risco de fissuras)
- Boa vazabilidade, maquinabilidade, resistência ao desgaste, resistência mecânica, ductilidade, deformabilidade a quente e temperabilidade.
- Admitem têmperas bainíticas ou até têmperas martensíticas
- São os únicos FF capazes de competir com os aços



**Tratamento de nodularização** (qe permite obter a grafite sob a forma nodular / esferoidal)

- Adição de **elementos nodularizantes** (ex: Magnésio) ao FF líquido, qe reduzem os níveis de Enxofre e Oxigénio, os quais são impedimentos à formação de nódulos esféricos.
- Depois da nodularização há tendência para se formar cementite → fazer **inoculação** para impedir

Tipos de FF dúcteis

- Perlíticos: adição de Cu, Ni, Sn
- Ferríticos: obtidos apenas por tratamento térmico
- Ferrítico – perlítico

Menos comum

- Austeníticos
- Aciculares
  - Bainíticos
  - Martensíticos

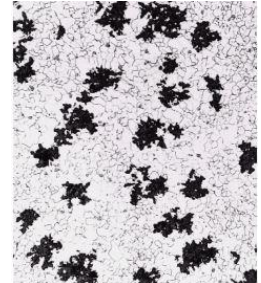
Nota: FF dúcteis aciculares

- Boa resistência ao desgaste
- Normalmente contêm Ni, Mo, Cu
- Não se pretende estruturas 100% Mart

- Bainite e martensite obtidas diretamente por fundição
  - Podemos realizar tratamentos térmicos mas corremos o risco de formar micro fissuras

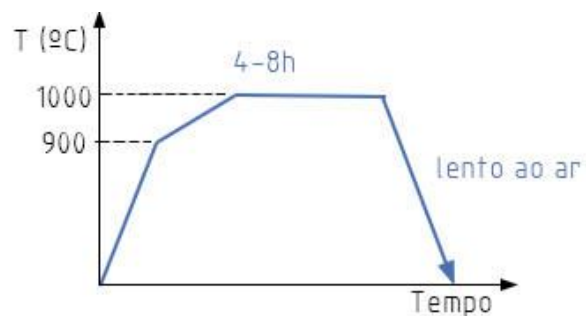
### 2.3 FF maleáveis – obtidos dos FF brancos pelo processo de maleabilização

- $\sigma_E$  entre 200 e 500MPa
- A **maleabilização** é um tratamento térmico que consiste em 2 passos
  - 1 – **grafitização**, em que as peças fundidas são aquecidas acima da temperatura eutectóide ficando em estágio 2- 20h, transformando-se a cementite do FF branco em austenite e grafite.
  - 2 – **arrefecimento**, em que a austenite se transforma numa de 3 matrizes possíveis dependendo da velocidade de arrefecimento: ferrítica (no forno), perlítica (ao ar) ou martensítica (em óleo).



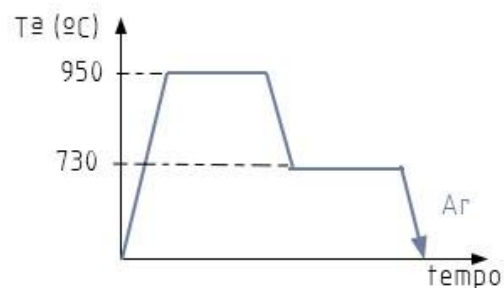
#### Maleabilização por descarbonização / europeia:

- Eliminação da cementite por descarbonização (eliminação do teor de carbono do FF branco)
  - Cor branca, devido à composição essencialmente ferrítica
  - peças são colocadas em caixas com meio oxidante (minério de ferro)
  - descarbonização ocorre + à superfície
    - em peças pequenas só ocorre descarbonização
    - em peças grandes ocorre grafitização no interior



#### Maleabilização por grafitização / americana:

- Transformação da cementite em grafite
- Formam-se nódulos de grafite (cor negra) de forma variável (ver imagem) numa matriz ferrítica
  - caixas com atmosfera neutra
  - utilização de boro, temperaturas mais elevadas, e estágios mais curto
  - não aparece perlite
  - 1º estágio,  $Fe_3C(\gamma) \rightarrow$  Grafite
  - 2º estágio,  $Fe_3C(P) \rightarrow$  Grafite



## Ligas de Alumínio

### Propriedades:

- Baixa densidade
- 2º metal mais maleável (1º é o ouro)
- Não tóxico
- Boa ductilidade (estrutura CFC)
- Boa resistência à corrosão (devido ao  $\text{Al}_2\text{O}_3$  que é um óxido muito estável)
- Elemento metálico mais abundante na crosta terrestre
- $\sigma_E$  entre 20MPa (puro) e 600MPa (ligas)
- Boa condutibilidade térmica e elétrica
- Amagnético
- Baixa rigidez  $E_{\text{Aço}} = 3 \cdot E_{\text{Al}}$
- Temp fusão  $\approx 600^\circ\text{C}$  (pode causar probs de fluência) (ou pode ser positivo porqz torna a fundição fácil)

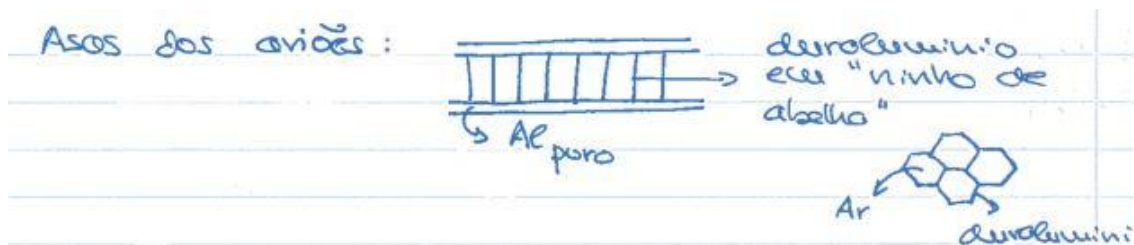


### Parâmetros específicos:

$\frac{E}{\text{densidade}}$  (rigidez específica) semelhante ao aço

$\frac{\sigma E}{\text{densidade}}$  (resistência específica) muito superior ao aço

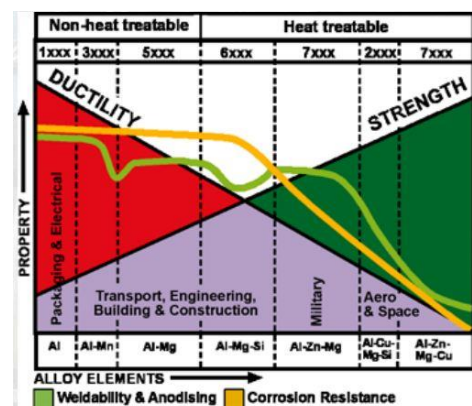
Como as ligas de Alumínio não são tão resistentes à corrosão como o Alumínio puro pode-se contornar esse problema revestindo-as por capas de Alumínio puro.



## Classificação das ligas de Alumínio

### Fundição

- Binárias
  - Alumínio + Cobre (resistência mec e maquinabilidade) ou + Silício (resistência à corrosão) ou + Magnésio (combinação dos 2)
  - A maioria não são tratáveis termicamente
- Complexas
  - Principalmente combinações desses elementos



## Trabalhadas

- **Não tratáveis termicamente:**
  - São ligas menos densas que o aço mas a rigidez é pior.
  - Geralmente são endurecidas por precipitação
  - Apresentam boa soldabilidade
  - **séries são de acordo com o E.L. predominante:**
    - 1000: Al (99%)
    - 3000: Mn (aumenta resistência mecânica por endurecimento por solução sólida)
    - 4000: Si, para fundição (boa vazabilidade)
    - 5000: Mg (promove endurecimento por solução sólida, bom para soldadura, ligas leves)
- **Tratáveis termicamente**
  - Através do endurecimento por precipitação podemos ter a resistência dos aços macios (baixo C) mas com 1/3 da densidade.
  - Séries:
    - 2000: Cu, resistência aumenta por solução sólida e precipitação.
    - 6000: Si, Mg, faz endurecer por precipitação (Duralumínio)
    - 7000: Zn faz endurecer por precipitação (Duralumínio)

## Duralumínio

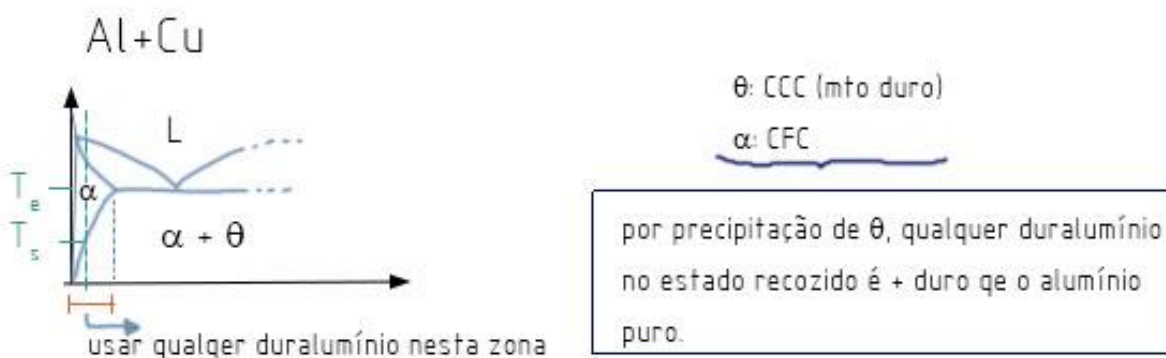
- (Pertence à classe das trabalhadas)
- Liga mais antiga e mais usada
- 4% Cobre, 0.7% Manganês, 0.4% Magnésio
- Resistência à tração comparável à do aço doce (baixo C)

Notar que algumas destas séries também se encontram na classe dos fundidos.

## Alumínio + Cobre

Nota sobre o Cobre como E.L. do Alumínio

O Cobre é o principal elemento de liga do Alumínio. É usado em percentagens até 4%, em ligas de conformação plástica e até 8%, em ligas de fundição; nestas percentagens a melhoria das propriedades mecânicas deve-se à precipitação da fase  $\theta$  ( $\text{Cu Al}_2$ ) da solução sólida. O Cobre reduz a contração e permite o endurecimento por envelhecimento da liga; a resistência a corrosão destas ligas é muito fraca.

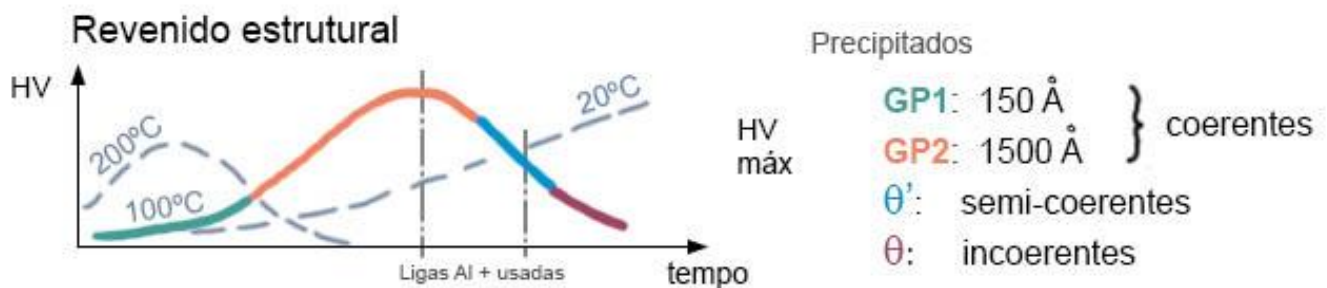
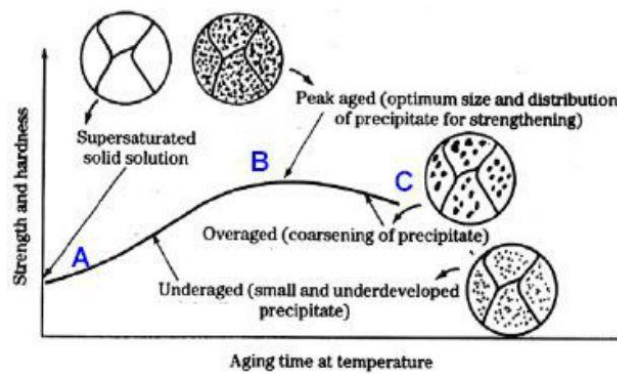
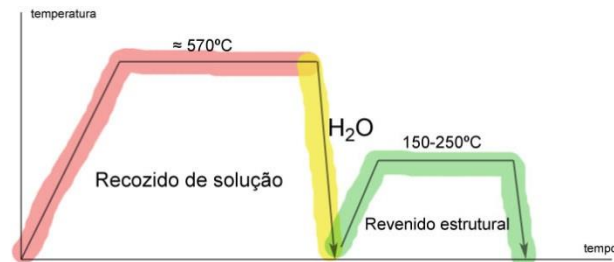


## Tratamento térmico

**1º passo** – Recozido de solução (para dissolver homogeneamente o Cobre)

**2º passo** – Têmpera

**3º passo** – Envelhecimento ou revenido estrutural. É necessário efetuar este último passo para que se possam formar os precipitados, finamente dispersos na matriz. O envelhecimento pode ser natural (2 dias à temperatura ambiente) ou artificial (algumas horas a temperaturas mais elevadas).

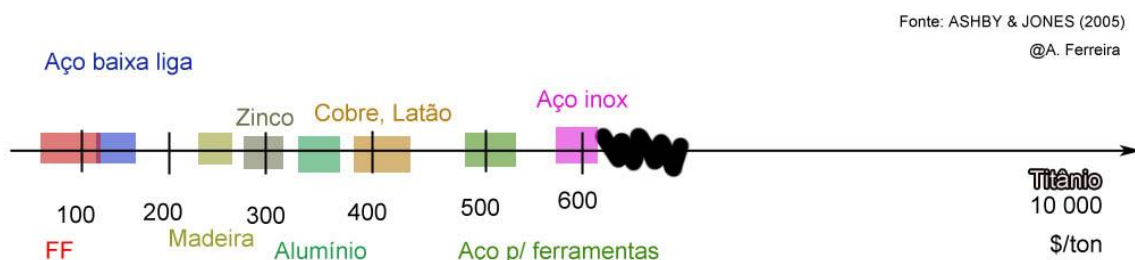
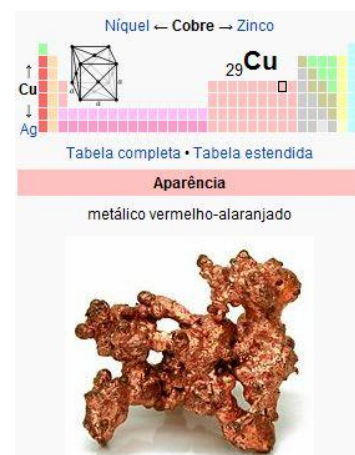


**Alumínio anodizado** – Sofreu o processo de anodização, isto é, foi mergulhado num eletrólito e ligado ao pólo positivo, enquanto que outro material não reativo ao pólo negativo, com o objetivo de formar uma camada superficial de óxido, bastante mais espessa que a que se forma naturalmente por oxidação.

## Ligas de Cobre

### Cobre Puro

- Excelente condutividade térmica e elétrica, muito usado na indústria elétrica.
- Resistente à corrosão (forma película de óxido)
- CFC, logo boa ductilidade (50-60% alongamento) o que, juntamente com a alta condutividade que provoca microsoldaduras entre a ferramenta e o material, causa má maquinabilidade (mau acabamento).
- $\sigma_E$  baixa (40-50 MPa)
- Para endurecer e diminuir a condutividade: adicionar pequenas quantidades de elementos de liga tais como Níquel e Zinco
- Temperaturas de serviço mais altas (e de fusão: aprox 1000°C) que o Al e Mg (principais competidores), pelo que será preferível em termos de fluência.
- Caro €€
  - Resistência à corrosão razoavelmente boa



**Latões (Cu e 5-50% Zn).** Até 3% de chumbo para melhorar maquinabilidade. Tanto estes como os bronzes fazem parte da classe de Cobre com muita liga. A adição de Zinco tem dois efeitos gerais que têm como efeito conjunto a melhora da maquinabilidade dos latões relativamente ao Cobre puro:

- $\sigma_E =$  aprox 150Mpa  $\rightarrow$  facilita arranque da apanha
- redução da condutividade  $\rightarrow$  melhora o problema das microsoldaduras

O latão é bom para brasagens (soldaduras em que o material a juntar não se mistura com o metal adicionado). Podemos brasar aços com latão (latão beta é o ideal).

- latões  $\alpha$  (monofásicos / vermelhos)
  - Zn < 35%
  - + dúctil, + conformabilidade a frio
  - Ex:
    - “Bronze comercial” 10% Zn – cor dourada, ornamentos, ferragens
    - “Latões vermelhos” 15% - idem
    - “Latão para cartuchos” 30%. Boa resistência mecânica + excelente ductilidade, tubos, permutadores de calor

- latões  $\alpha+\beta$  (bifásicos / amarelos)
  - Zn entre 35-45%
  - + conformabilidade a quente
  - Grande vantagem reside na maquinabilidade
  - “Metal Muntz”, 40%, usado em construção mecânica, bom p/ componentes forjados, permutadores de calor
- latões  $\beta$ 
  - Zn 45-50%
  - Usados p brasagem
  - Não são importantes para construção mec

Comparação	Latões monofásicos	Latões bifásicos
Ductilidade	+	- (boa ductilidade só a quente)
Resistência mecânica	-	+ $\beta$ fase mais dura
Vazabilidade	-	+
Maquinabilidade	- (mau acabamento)	+
Resistência à corrosão	-	- corrosão micro galvânica

**Dezincificação** dos latões (perda de zinco): Como as fases alfa e beta têm electronegatividades diferentes, o zinco sendo menos nobre perde massa, e ocorre a dezincificação. Nota-se pelas manchas vermelhas de Cobre puro.

**Solução:** acrescentar Arsénio (em solução sólida não é tóxico) em pequenas quantidades, <0,1%, ajuda a resistir à corrosão dezincificada. Al e Sn também poderão ajudar.

**Corrosão micro galvânica:** duas ligas em contacto eléctrico com grau de nobreza diferente. A liga menos nobre sofre perdas de massa devido à presença da outra.

Nos latões pode ocorrer esse tipo de corrosão na presença de **águas sulfurosas** e **atmosfera com pouco Oxigénio**. A solução é usar latões monofásicos ou juntar menos de 0.1% de Arsénio, Alumínio ou Estanho.

## Bronzes (Cu + 1 a 10%Sn)

### Características gerais do Bronze:

- excelente resistência à corrosão atmosférica e marinha
- ótima vazabilidade
- boa resistência ao desgaste, dureza moderada
- boa soldabilidade
- boa ductilidade quer a frio (alfa) quer a quente (beta), fases gama e delta têm pior ductilidade e alongamento.

Os bronzes delta têm capacidades antifricção e anti gripagem, pelo qe são utilizados em chumaceiras e apoios de veios em rotação lubrificados.

### Fases do Bronze:

- fase alfa (CFC), até 7% Sn - trabalho a frio
- fase beta e gama, >7%Sn - trabalho a quente

- fase delta, 5-10% Sn, antifricção e antigripagem

#### Características Gerais:

- Cobre é caro, o estanho ainda mais
- Excelente resistência à corrosão incluindo água salgada
- Melhores resistência mecânica que os latões
- Usados em esculturas pois para além das excelente propriedades anti corrosão, ao arrefecerem expandem-se levemente preenchendo todos os detalhes da escultura.
- À medida que a %Estanho aumenta também a dureza e propriedades associadas à resistência mecânica sem queda apreciável de ductilidade. Além disso pode ser trabalhado a frio p/ aumentar ainda mais a dureza.
- Chumbo proporciona propriedades de auto-lubrificação / antifricção ao bronze, mas já não é tanto usado por questões ambientais.
- Ótima vazabilidade, soldabilidade e ductilidade
- **Bronzes de construção Mecânica (Gun Metal) 8-10% Sn**
  - Eram utilizados nos canhões, na atualidade são usados em engrenagens e rolamentos. Não são indicados para água salgada, resistem mas não muito bem.
- **Bronze universal: 5% Estanho, 5% Zinco, 5% Chumbo**
  - A presença de duas fases diferentes leva a que se criam finas camadas de óleo nas zonas alfa, mais macias, o que ajuda a evitar a gripagem (adesão de uma peça a outra).
- **Bronzes fosforosos (Estanho entre 6% e 14% + 0.1% e 0.6% de Fósforo).** Os melhores para resistir à água salgada. Equilíbrio entre maquinabilidade e vazabilidade.
  - Usados tb p/ fundição
- Bronzes de alto teor em chumbo, entre 4 e 5%. Usados para válvulas
- Bronzes de alto teor de estanho (aprox 30%)
  - Elevada heterogeneidade estrutural
  - Segregações
  - Más propriedades mecânicas
  - Bom timbre, usados p/ sinos

#### Nota sobre o estanho:

Por apresentar resistência mecânica relativamente baixa, o estanho não pode ser utilizado como material de construção mecânica ou como componente de estruturas em geral mas, como elemento de liga no cobre, aumenta a resistência mecânica e a resistência à corrosão, formando os chamados bronzes de estanho. Devido à marcante característica antifricção das ligas que contêm estanho (chumbo-estanho, cobre-estanho e alumínio-estanho, estes materiais são muito utilizados em mancais de deslizamento (sistemas bimetálicos e trimetálicos). Por ser um metal de custo relativamente elevado, o estanho somente é utilizado em condições nas quais suas características mais relevantes, como alta resistência à corrosão, elevada ductilidade e baixo ponto de fusão, possam ser melhor aproveitada

## Ligas de Magnésio

- + Muito leve: densidade próxima dos compósitos, disputa com o Alumínio a utilização em aplicações qe requerem metais de baixa densidade. (ver p. 560 Smith) → aeronáutica, máquinas têxteis c/ partes qe se mexem a alta velocidade.
- Propriedades pirofóbicas: fogo de artifício, etc
- Mg é mto eletronegativo (grau de nobreza mto baixo) o qe leva a qe seja vítima de corrosão galvânica (na presença de ouro, desaparece).
- Para aumentar a resistência mec costuma-se adicionar Alumínio e Zinco qe endurecem por solução sólida.
- Fraca resistência à corrosão, não pode ser vazado senão queima-se
- Baixa ductilidade (HC) e resistência mec. (dureza, fadiga, fluência)
  - Necessita processos de fabrico especiais
  - Têm de ser trabalhadas a quente para se ativarem + planos de deslizamento



## Ligas de Zinco

- Temp de fusão é aprox 420°C
- Estrutura HC logo plasticidade limitada à temp. ambiente
- Recristaliza à temp ambiente, pelo q não pode ser endurecido por encruamento
- Densidade próxima da do aço
- Aplicações
  - prendem-se com resistência à corrosão (camada de óxido de Zinco, como acontece com o Alumínio, apesar de ser mto eletronegativo). Camadas de zinco sobre outros metais, conferindo ao conjunto efeito de anti corrosão.
  - Galvanização do aço: o zinco cobre o aço e protege-o da corrosão
  - Industriais: Ligas Zamac (4% Al qe fornece ao Zinco boa colabilidade)
  - Excelente precisão dimensional



# Titânio

## Puro

- Temp fusão = 1700°C, Temp serviço até 500°C sem problemas de fluência
- Comparação entre o aço, o Titânio e o Alumínio

	E (MPa)	$\sigma_E$ (MPa)	Densidade
Aço	210	600 aço macio	8
Titânio	140	1600	4.3
Alumínio	70	600	2.7



### Parâmetros específicos:

$\frac{E}{densidade}$  (rigidez específica) superior à do aço

$\frac{\sigma E}{densidade}$  (resistência específica) muito superior à do aço (e até à do Alumínio)

Titânio: muita afinidade com o Oxigénio, pelo qe forma óxido rapidamente

- Boa resistência à corrosão, mesmo a gente em particular em ambientes oxidantes
- Boa resistência a cloretos mas má resistência a ácidos não oxidantes
- Óxido fragiliza o material, qualquer pancada faz soltar o óxido, expondo-o a nova corrosão.
- A rápida formação de óxidos traz problemas à soldadura, pelo qe é necessário usar soldadura sem oxigénio (proteção com Árgon)

### Aplicações

- Estruturas com resistências específicas críticas
- Ambientes corrosivos severos
- Resistência fadiga-corrosão: os dois processos facilitam-se entre si
- Aplicações não magnéticas
- 60% das ligas são usadas em eng aeronáutica e aeroespacial.

### Estrutura:

- 20°C é HC fase  $\alpha$
- 883°C sofre transformação alotrópica: CCC fase  $\beta$

### Ligas de titânio

- Elementos alfa genos: Al, Sn, O (Oxigénio para <0.1% fica em solução solida, +  $\sigma_E$ )
- Elementos beta genos: Fe, Cr, V

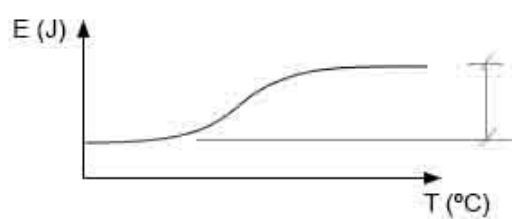
**Ligas monofásicas**

- Boa soldabilidade (sem oxigénio)
- Boa ductilidade

**Ligas bifásicas**

- + resistentes
- - dúcteis
- Pouco soldáveis

As ligas de Titânio apresentam transição de dúctil-frágil mas menos acentuadas qe nos aços:



Patamares dúctil frágil bastante próximos

## Ligas com memória de forma

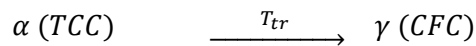
Possuem uma transformação martensítica reversível de caráter termoelástico.

- 50% Titânio, 50% Níquel
- Cobre / Zinco / Níquel ou Alumínio (próxima dos latões)

O efeito de memória pode ser

- Simples
  - Deformação mecânica no estado martensítico
  - Ao ir para o estado austenítico volta à forma inicial
- Reversível

Temperatura transformação reversível entre -110°C e 110°C



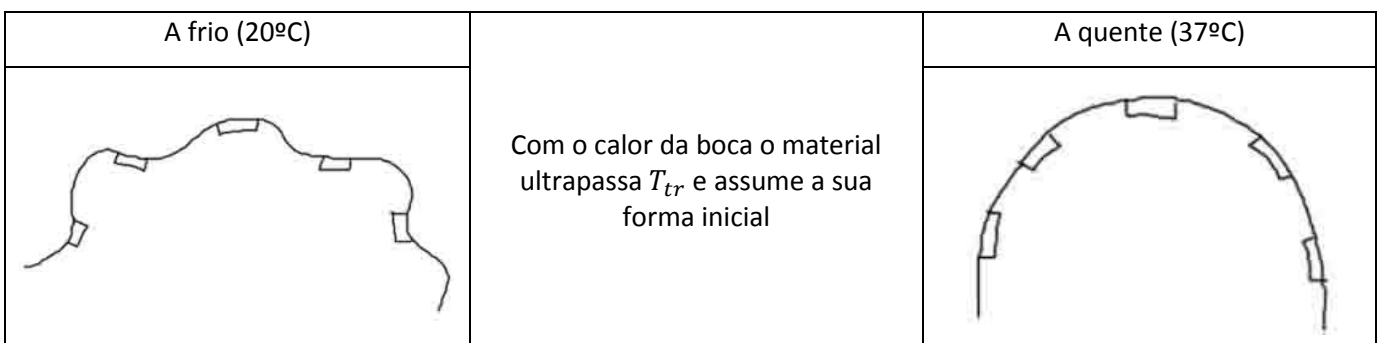
Martensite natural:

- \* Baixa rigidez
- \* Baixa resistência

A frio ( $T < T_{transição}$ ) : a liga assume forma transitória (podemos moldá-la)

A quente ( $T > T_{transição}$ ) a liga retorna à sua forma original

Lembrar o aparelho dos dentes, Nitinol, qe tem excelente biocompatibilidade



### Aplicações

- Revestimentos de forma (desdobramentos de antenas)
- De forma e de esforços (articulações de robots)

## Referências

- [1] Antunes, Viriato (2000) *Aços para Ferramentas*.
- [2] Chiaverini, Vicente (1988) *Aços e Ferros Fundidos*, 6ª Ed., São Paulo: ABM.
- [3] Soares, Pinto (1992) *Aços Características Tratamentos*, 5ª Ed., Porto: Publindustria.
- [4] Smith, William F. (1998) *Princípios de Ciência e Engenharia dos Materiais*, 3ª Ed., Lisboa: McGraw-Hill Inc. de Portugal, L.da.
- [5] Silva, Arlindo, *Disciplina de Materiais II* [Apresentações Powerpoint], ISTL.
- [6] D'Oliveira, A.S., *Disciplina de Materiais* [Apresentações Powerpoint], Universidade Federal do Paraná.
- [7] Silva, Lucas da, (2012) *Disciplina de Materiais de Construção Mecânica 1* [Apresentações Powerpoint], FEUP.
- [8] Lino, Jorge (2012) *Disciplina de Materiais de Construção Mecânica 1* [Apresentações Powerpoint], FEUP.
- [9] Amorim, R.C., *Metalurgia Mecânica I, Resumo da Matéria*.
- [10] Raquel, *Resumo MCM1*.
- [11] Wikipédia.
- [12] <http://www.cienciadosmateriais.org/>

Influência na Propriedade	Elemento									
	C	Mn	P	S	Si	Ni	Cr	Mo	V	Al
Aumento da Resistência	●	●	●		●				●	
Aumento da Dureza	●	●	●		●					
Aumento da Resistência ao Impacto						●				
Redução da ductilidade	●		●	●						
Aumento da Resistência em altas temperaturas								●		
Aumento da Temperabilidade							●	●		
Ação Desoxidante		●			●					●
Aumento da Resistência à Corrosão							●			
Aumento da Resistência à Abrasão							●			
Redução da Soldabilidade	●									

## Classificação dos Aços

Número SAE - AISI	Classificação
1XXX	Aço Carbono Aço Baixo Carbono: 0 to 0.25 % C Aço Médio Carbono: 0.25 to 0.55 % C Aço Alto Carbono: acima de 0.55 % C
2XXX	Aço ao Níquel (Ni) 5 % Nickel incrementa a resistência a tração sem redução da ductilidade 8 to 12 % Nickel incrementa a resistência e reduz a temperatura de impacto 15 to 25 % Nickel (com Al, Cu e Co) desenvolve altas propriedades magnéticas. 25 to 35 % Nickel incrementa resistência a corrosão em altas temperaturas
3XXX	Aços Níquel-Cromo. Aços que combinam tenacidade, ductilidade, resistência a desgaste, ductilidade e resistência a corrosão.
4XXX	Aços Molibdênio Mo é forte formador de carbonetos. Tem forte efeito na temperabilidade e alta resistência a redução de dureza à temperatura. Incrementa também a resistência à tração de aços baixo carbono.
5XXX	Aços Cromo. Cromo é um endurecedor da ferrita de aços baixo carbono. Incrementa a tenacidade e a resistência ao desgaste de camadas cementadas.
86XX 87XX 93XX 94XX 97XX 98XX	Aços triplos em liga (Ni, Cr e Mo) Esses aços apresentam alta resistência mecânica (tração, fadiga) e boa resistência a corrosão.

[www.estudomec.info](http://www.estudomec.info)