

TECNOLOGIA

NAVAL

**2003 - 2004**

Parte - III

**MATERIAIS METÁLICOS**

## **INDICE**

1	Metais ferrosos	1
1.1	Introdução	1
1.1.1	Generalidades	1
1.1.2	Composição e Estrutura	1
1.1.3	Elementos de liga e seus efeitos	6
1.2	Ferros Fundidos	6
1.2.1	Generalidades	6
1.2.2	Classificação dos ferros fundidos	8
1.2.3	Aplicações em Engenharia Naval	12
1.3	Aço - Classificação e Propriedades	13
1.3.1	Classificação dos aços	13
1.3.2	Método de desoxidação e controle do tamanho do grão	15
1.4	Aços não ligados (aços sem liga)	16
1.5	Aços Ligados	23
1.5.1	Composição Química dos Aços Ligados	23
1.5.2	Microestrutura dos Aços Ligados	34
1.6	Tratamentos dos Aços	44
1.6.1	Tratamentos mecânicos	45
1.6.2	Tratamentos Térmicos	45
1.6.3	Tratamentos Termoquímicos	47
1.6.4	Tratamentos termomecânicos	47
1.6.5	Tratamentos Superficiais (Revestimentos)	47
1.7	Tecnologia de Processamento dos Aços	48
1.7.1	Soldabilidade dos Aços	48
1.7.2	Efeitos dos Diversos Elementos Químicos na Soldabilidade dos Aços	49
1.7.3	Alguns aspectos em soldadura de materiais ferrosos	51
1.8	Aços para aplicação em Engenharia Naval	52

1.8.1	Aços correntes de aplicação estrutural	52
1.8.2	Aços estruturais de baixa liga	58
1.8.3	Aços de alta resistência	58
1.8.4	Aços vazados	58
1.8.5	Aços forjados	60
1.8.6	Aços para tubos, permutadores de calor e reservatórios sob pressão	62
1.8.7	Aço para aplicação em baixas temperaturas	63
2	Alumínio e suas ligas	65
2.1	Generalidades	65
2.2	Características e Propriedades Principais	65
2.3	Classificação das ligas de alumínio	69
2.4	Considerações sobre o Projecto Estrutural em Alumínio	72
2.5	Aplicações navais do alumínio e suas ligas	74
2.6	Produção de alumínio	81
3	Cobre e suas ligas	84
3.1	Generalidades	84
3.2	Características e Propriedades Principais	84
3.2.1	Propriedades físicas	84
3.2.2	Propriedades mecânicas (a 20°C)	85
3.2.3	Propriedades químicas	85
3.2.4	Características gerais	85
3.3	Aplicações	85
3.4	Bronzes	86
3.4.1	Ligas binárias de Cobre e Estanho (Cu-Sn)	86
3.4.2	Classificação dos bronzes	88
3.5	Latões	90
3.5.1	Ligas binárias de cobre e zinco (Cu-Zn)	90
3.5.2	Latões Comuns	92

3.5.3	Latões especiais	94
3.5.4	Aplicações gerais	95
3.6	Ligas de Cuproníquel	95
3.7	Soldadura e Brazagem	97
3.7.1	Corrosão nas Juntas de União	97
3.7.2	Soldadura	98
3.7.3	Brazagem - Soldadura Branda	99
3.8	Ligas de cobre de fundição para acessórios de sistemas marítimos	100
3.9	Requisitos dos materiais para hélices	108
3.9.1	Propriedades do Material	108
3.9.2	Fabrico	108
4	Zinco e suas ligas	113
4.1	Generalidades	113
4.2	Aplicações do Zinco	113
5	Titânio e suas ligas	116
5.1	Generalidades	116
5.2	Metalurgia, Características e Propriedades Principais	116
5.3	Formas de Comercialização e Tecnologia de Fabrico	119
5.4	Ligas de Titânio	119
5.5	Aplicações do Titânio e suas Ligas	119
6	Níquel e suas ligas	121
6.1	Generalidades	121
6.2	Características e Propriedades Principais	121
6.3	Aplicações do Níquel e das suas Ligas mais usadas	123
6.4	Tratamentos e Soldabilidade	123

# 1 Metais ferrosos

## 1.1 Introdução

### 1.1.1 Generalidades

Apesar do rápido aumento na utilização das ligas metálicas leves e dos polímeros, as ligas ferrosas, particularmente os aços, continuam a ser o material estrutural predominante com uma produção mundial que constitui um índice fundamental para avaliação do estado do sistema económico global.

A principal razão para a predominância do uso dos metais ferrosos foi a relativa abundância da matéria prima e o desenvolvimento da sua tecnologia de processamento, que permitiu a produção de diferentes ligas e qualidades, alcançando uma gama de características tão diversificada que não é coberta por qualquer outra família de materiais.

A tensão de rotura dos aços vai de 330MPa nos aços de construção correntes a 3300MPa em ligas de muito alta resistência; existem aços que oxidam rapidamente na atmosfera, e outros que resistem ao ataque dos ácidos mais agressivos; alguns aços são duros e frágeis enquanto outros são plasticamente conformáveis e as suas propriedades podem ser alteradas por tratamentos térmicos, mecânicos e químicos.

### 1.1.2 Composição e Estrutura

Os materiais ferrosos são, em essência, ligas de ferro e de carbono, em que aparecem associados outros elementos. O ferro puro tem uma densidade de 7,87 e um ponto de fusão de 1536°C.

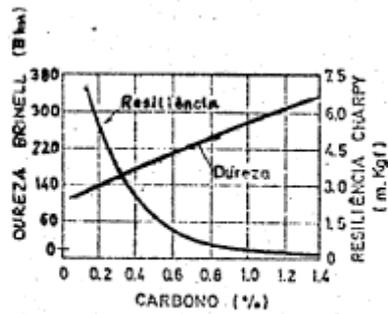
O ferro comercialmente puro contém pequenas quantidades de carbono, manganês, fósforo, enxofre e silício; tem um uso limitado, em comparação com outros materiais ferrosos; o ferro comercialmente puro é muito dúctil, tem boa resistência à corrosão atmosférica, elevada permeabilidade magnética e uma resistividade relativamente baixa.

Com excepção do ferro comercialmente puro, todos os outros metais ferrosos - aços e ferros - são considerados primordialmente ligas binárias de ferro e carbono, a despeito de ser frequente, os restantes elementos de liga terem teores superiores ao carbono, contudo este é o factor predominante no desenvolvimento e controle da maioria das propriedades mecânicas (Figura 1).

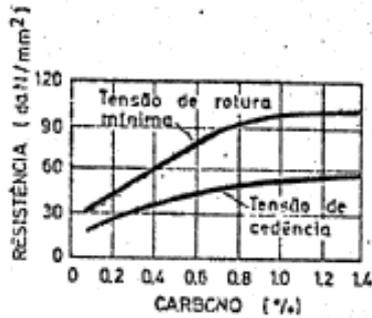
O ferro puro é alotrópico, existindo no estado sólido em duas redes cristalinas diferentes (fig. 2.2); desde as temperaturas inferiores a zero até 911° C, tem uma estrutura cúbica de corpo centrado (ccc) - ferro  $\alpha$  (Figura 2). De 911° C até 1392° C, a rede cristalina é cúbica de faces centradas (cfc) ferro  $\gamma$ .

Acima de 1392° C e até à fusão a 1536° C, a estrutura volta a ser c.c.c. (ferro  $\delta$ ), mas não tem uso prático. Na década de 1920, foi possível, através da difracção de raios x demonstrar que esta estrutura cristalina era da forma  $\alpha$ , apenas modificada pela elevação de temperatura. A mudança de fase  $\alpha$ /fase  $\gamma$  é reversível.

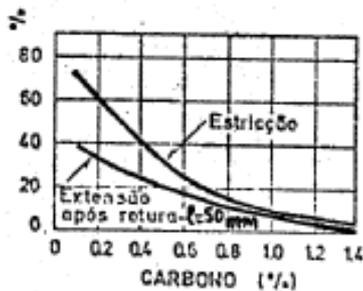
As alterações no arranjo cristalino correspondem a uma transformação de fase.



(a)



(b)



(c)

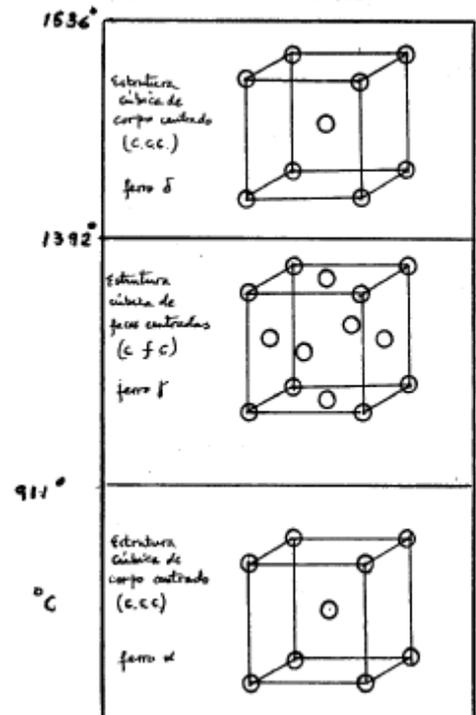
**Figura 1 Influência do teor de carbono nas propriedades mecânicas**

Quando o ferro se combina com o carbono ou com outros elementos, as temperaturas das transformações de fase alteram-se em função dessa composição.

O elemento carbono pode estar presente em qualquer das fases; uma vez que os átomos de C são mais pequenos que os de Fe, eles podem entrar na estrutura cristalina e produzir soluções intersticiais.

A solubilidade do C no Fe é limitada. Na fase  $\gamma$  o máximo é de cerca de 2.1%. Na fase  $\alpha$ , apenas 0.005% de C é solúvel na estrutura c.c.c. Para além do C solúvel, ele pode aparecer como carboneto de ferro  $Fe_3C$  (cementite) ou como carbono isolado na forma de flocos ou módulos de grafite.

A distinção entre o aço e o ferro fundido é feita na base das formas sob as quais o carbono está combinado com o peso. Nos ferros fundidos, pelo menos algum C aparece isolado, como grafite. No aço, o C aparece em soluções sólidas intimamente combinado com o Fe,

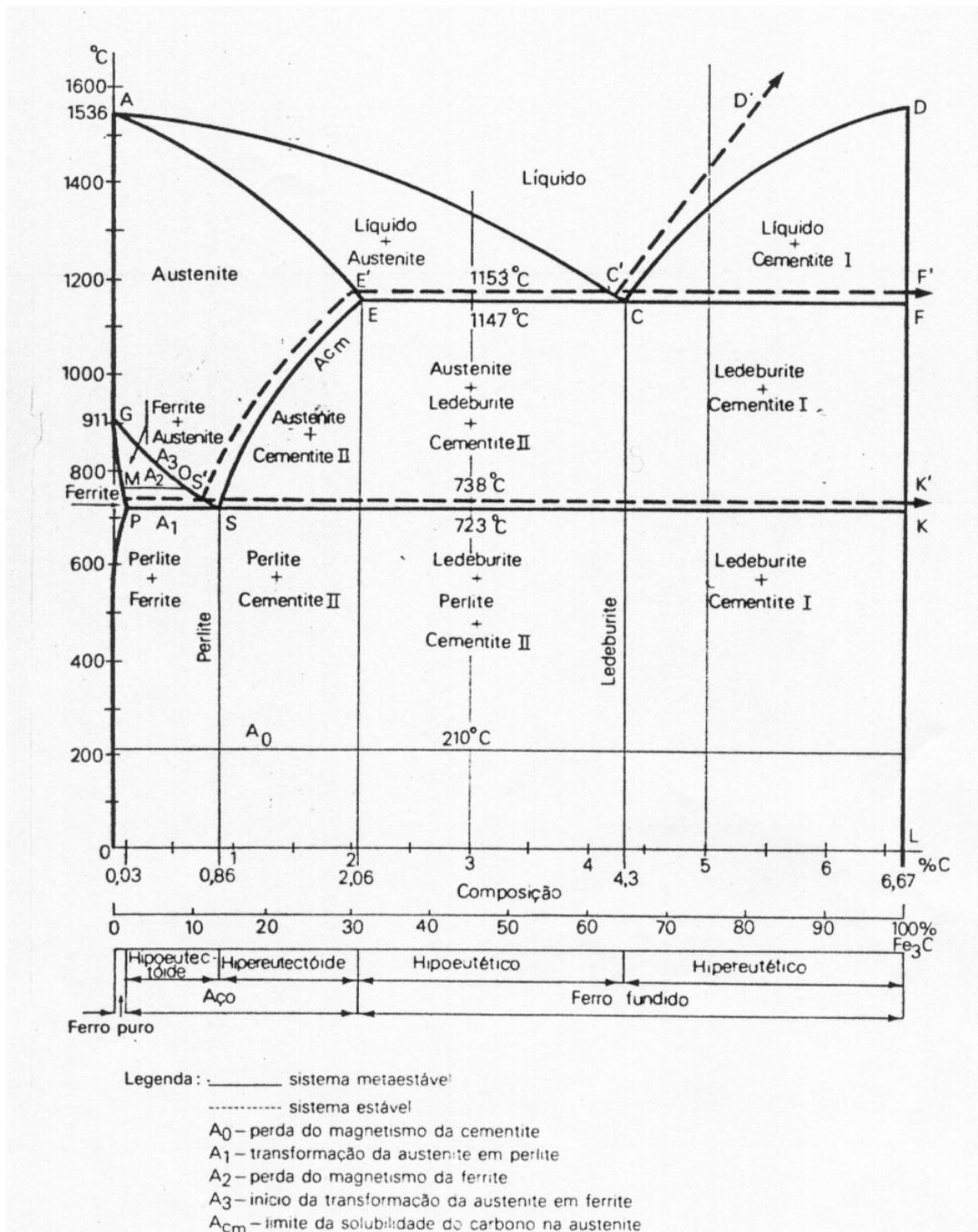


**Figura 2 Transformação alotrópica do ferro**

normalmente na solução sólida ferrite e aparece como carboneto de ferro ( $\text{Fe}_3\text{C}$ ), metalograficamente conhecida por cementite.

Os aços são ligas de ferro e carbono, cujo teor de carbono varia entre 0.03 a 2.06% (sendo normalmente inferior a 1%); os aços podem possuir elementos de liga (aços de liga) variando o teor de carbono dentro daqueles limites. Há casos onde os aços poderão atingir um teor de 2.5%; são os chamados aços ledeburíticos.

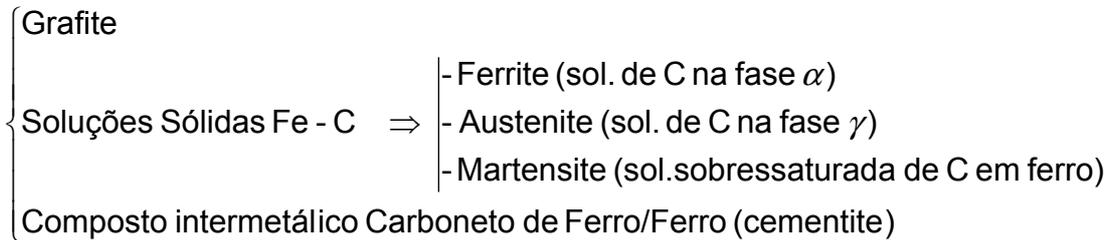
Uma propriedade característica dos aços é a possibilidade de serem plasticamente conformáveis (forjabilidade).



**Figura 3 Diagrama de equilíbrio das ligas ferro-carbono**

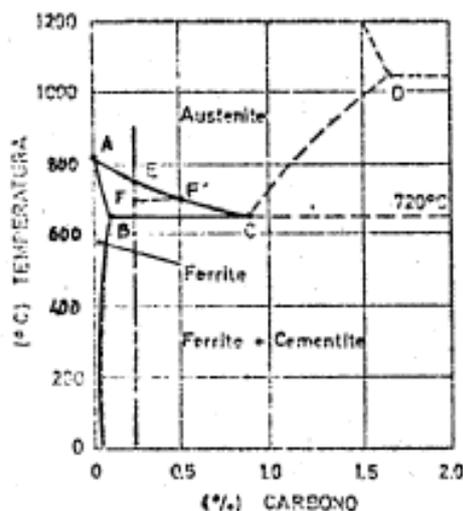
As ligas ferro-carbono com o teor de C superior a 2.06% são designadas por ferro fundido. O máximo teor de carbono é de 6.67%, que corresponde à cementite pura. Em geral, as fundições de ferro não são forjáveis.

As fases básicas das ligas ferrosas são:



As ligas ferrosas podem formar as seguintes microestruturas resultantes das transformações de fase:

- Perlite - constituída por 88% de ferrite e 12% de carboneto de ferro em lamelas alternadas (contém 0,86% C) é o eutectoíde do sistema metaestável.
- Martenite Revenida - estrutura de carbonetos esferoidais em ferrite.
- Bainite - dispersão de carbonetos de ferro com ferrite (é um produto intermediário entre a martensite e a perlite).
- Ledeburite - mistura de austenite e cementite que ocorre principalmente em ferros fundidos com C > 2%; este constituinte é duro e frágil, devido à cementite ser cerca de 50%; é o eutético do sistema metaestável (C=4.3%).



**Figura 4 Diagrama de equilíbrio Fe-C**

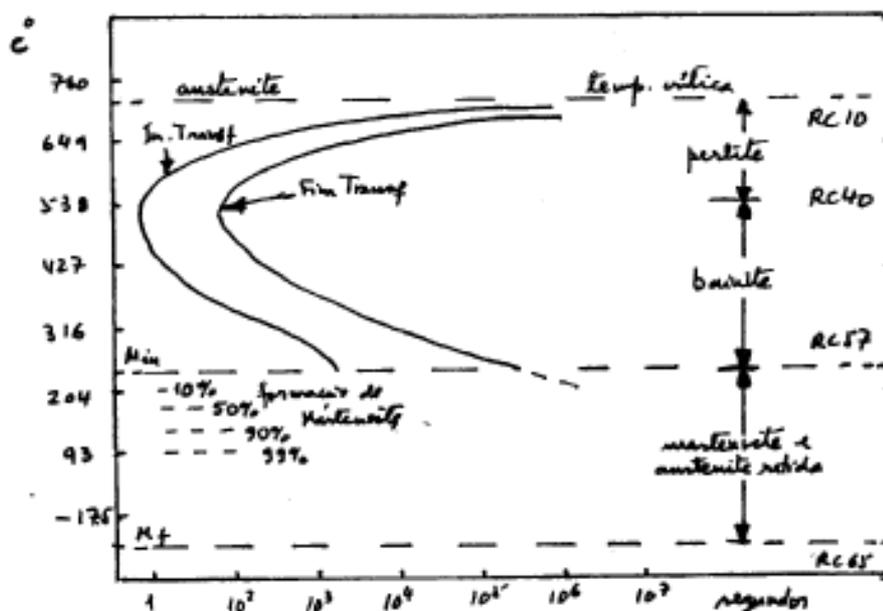
Para ilustrar como se podem processar as transformações tomemos como exemplo (figura 4) um aço de baixo teor de carbono - 0,2% - e vejamos o que se passa num arrefecimento lento na zona de transformação. A transformação para este aço começa à temperatura de 845° C. A parte do metal que primeiro atinge esta temperatura transforma-se em ferrite (ccc) e expela o carbono intersticial para as outras regiões de austenite. À medida que o metal

arrefece maior quantidade de ferrite se vai formando, menos austenite existe, mas cada vez mais rica em carbono. Assim, por exemplo, no ponto F da figura o diagrama mostra que a austenite restante contém 0,5% de carbono (ponto F).

A cerca de 780° C, o limite inferior da zona de transformação para este aço, a restante austenite tenta transformar-se a despeito das elevadas concentrações de carbono. Então dois factos se passam: o carbono combina-se com os átomos de ferro disponíveis para formar Fe<sub>3</sub>C - cementite que se precipita como uma estrutura discreta; a restante austenite transforma-se em ferrite. Daqui resulta uma estrutura que na sua forma final apresenta camadas alternadas de ferrite e cementite; obviamente as partes que primeiro se transformaram em ferrite aparecem com grandes ilhas de ferrite pura. Esta estrutura em camadas formada na fase final de transformação designa-se por perlite. A estrutura combinada de ferrite e perlite é macia, dúctil e pode representar o aço na sua forma de menos resistência. A transformação, abaixo de 720° C, termina e esta estrutura combinada mantém-se até à temperatura ambiente.

Pelo contrário, quando se arrefecem rapidamente as ligas de ferro-carbono, isto é, quando se efectua uma "têmpera" os átomos de carbono expelidos não têm tempo de se afastar da ferrite o aço torna-se tão rígido que, antes que os átomos de carbono tenham possibilidade de mover, são apanhados na estrutura à medida que os átomos de ferro se vão tentando transformar numa estrutura (c.c.c.). Daqui resulta uma estrutura tetragonal de corpo centrado em que o átomo de carbono é um elemento intersticial. O aço que sofreu este tipo de transformação diz-se martensítico. É evidente que a martensite não está em estado de equilíbrio, e deve muito da resistência e da sua dureza à sua estrutura distorcida que fica com tensões internas; daí a sua baixa ductilidade.

De notar que esta transformação já não pode ser analisada com o recurso ao diagrama de equilíbrio, havendo portanto que recorrer a outros diagramas como os diagramas de transformação isotérmica TTT, (Figura 5).



**Figura 5 Diagrama de transformação isotérmica para um aço eutectoide (diagrama TTT - Tempo, Temperatura, Transformação)**

Para modificar a estrutura de um aço existem variados tratamentos térmicos.

Como exemplo, citaremos o caso da martensite revenida - aquecimento abaixo da temperatura A3; algumas das tensões internas são aliviadas, resultando uma estrutura mais dúctil que a estrutura inicial temperada.

Outros tratamentos térmicos modificam as proporções de perlite e martensite; alguns fixam a martensite à temperatura ambiente.

Alguns tratamentos alteram ou reduzem o tamanho dos grãos ou faces das estruturas com vista a aumentar a resistência ou tenacidade. Quando são adicionados outros elementos à liga ferro carbono, como por exemplo boro, níquel, cromo, manganês, silício, vanádio, o comportamento de ligas ferrosas, quando se transforma uma estrutura noutra estrutura, é bastante complexo. Devido à estrutura dos aços, poderemos alterar de tantas maneiras as suas propriedades mecânicas que a gama de opções é variada; convém recordar que não importam apenas as propriedades mecânicas, mas igualmente a resistência à corrosão, condutividade térmica e eléctrica, etc.

### **1.1.3 Elementos de liga e seus efeitos**

Como se disse, além do C, diversos elementos estão presentes em aços e ferros. Alguns, como o P, o Mn, o Si estão inevitavelmente presentes em pequenas quantidades podendo ser ou não vantajosos. São as impurezas e os elementos desoxidantes. Outros são intencionalmente adicionados para alterar a estrutura, propriedades e modo de processamento.

Tal como o C, alguns elementos de liga são solúveis no ferro  $\alpha$  e assim formam soluções sólidas com o ferro produzindo ligas com melhor resistência à tracção, ductibilidade e tenacidade. Também o C, além de formar um composto intermetálico com o ferro, combina-se com muitos elementos de liga, incluindo o Mo, Cr, V, B, Ti e W. Estes carbonetos de liga são tal como o  $C_3Fe$  extremamente duros e sem tenacidade.

Alguns elementos de liga são adicionados para prevenir o crescimento do grão, formando óxidos ou carbonetos que produzem uma rede nos limites dos grãos da austenite, inibindo o crescimento do grão. O Al é o elemento mais efectivo para tal efeito; outros são o Z, V, Cr e Ti.

Estruturalmente, a adição dos elementos de liga quase sempre alteram a temperatura da transformação fase  $\gamma$ /fase  $\alpha$ , como já referido anteriormente.

Outro efeito dos elementos de liga é a melhoria da dureza, por mudança na transformação austenite-ferrite.

## **1.2 Ferros Fundidos**

### **1.2.1 Generalidades**

Os ferros fundidos são ligas quaternárias de ferro, carbono, silício e manganês, que podem ainda ter outros elementos de liga destinados a melhorar determinadas propriedades. O teor de carbono varia entre 2.06 e 6.67% (mais correntemente entre 3 e 4%). Têm um baixo ponto de fusão.

São materiais bastante usados, sobretudo onde é necessário executar peças de formas complexas, onde a construção mecanossoldada não é possível ou não é económica.

As características de resistência ao desgaste, abrasão e calor, tomam estes materiais adequados para diversos fins onde estas propriedades são significativas.

São materiais relativamente baratos e de tecnologia acessível, embora tenham alguns inconvenientes no que se refere à sua especificação e controle de propriedades mecânicas. Ao contrário dos metais forjados, os ferros fundidos têm propriedades mecânicas que dependem não só da composição da liga e microestrutura, como também da velocidade de arrefecimento da fundição, das dimensões e configuração das peças.

A especificação dos ferros fundidos faz-se ou pela correlação entre a dureza superficial e a resistência à tracção ou pela aferição do comportamento de provetes testemunho, agregados às fundições ou obtidos entre elas, nas mesmas condições. Não é, portanto, vulgar especificar ferros fundidos não ligados pela sua composição.

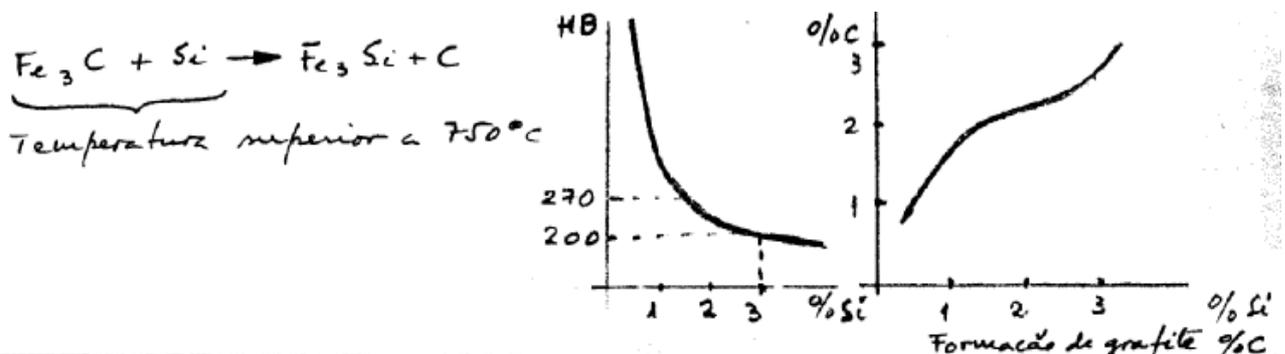
O carbono, como elemento de liga principal, está presente sob duas formas - grafite ou carbono livre e carboneto de ferro ou cementite.

Um elevado teor de carbono faz o ferro em estado líquido muito fluído com uma boa moldabilidade.

A precipitação do carbono como grafite, durante a solidificação, contraria a tendência para a contracção do metal com o arrefecimento, produzindo fundições de boa qualidade.

A grafite também permite uma excelente maquinabilidade, boa absorção de vibrações e actua como lubrificante nas superfícies de desgaste.

O silício é outro elemento de liga do ferro fundido, existindo em teores que vão de 0.5 a 3.5%. A sua função principal é a de promover a formação da grafite (inibindo a formação de cementite) e de determinadas microestruturas. Na Figura 6 mostra-se o efeito do teor de Si na dureza e na formação de grafite.



**Figura 6** Efeito do teor de Si na dureza e na formação de grafite

São elementos **grafitizantes** (inibidores da formação da cementite) os seguintes: Si, Al, Ti e Cu.

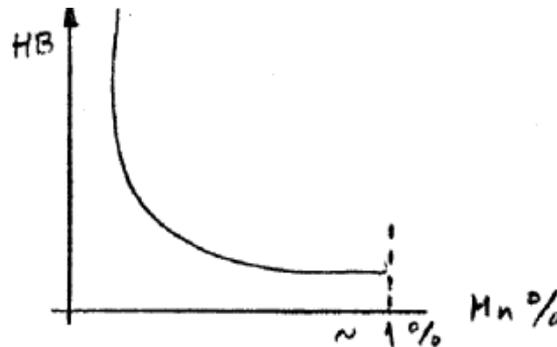
São elementos **anti-grafitizantes** (favorecem a formação de cementite) os seguintes: Mo, Mn, Cr e V.

O Mn tem um efeito dessulfurante, sendo, por isso, um elemento necessário; no entanto, a sua presença deve ser limitada nos ferros fundidos cinzentos, por ser anti-grafitizante ( $0.5 < \text{Mn} < 1.5\%$ ).

A Figura 7 apresenta a relação entre a dureza e o teor de Mn.

O fósforo aumenta a fluidez a quente e baixa a temperatura de fusão; melhora a moldabilidade, mas aumenta a fragilidade a frio. O teor máximo de P deverá ser de 1.5%, mas normalmente não ultrapassa os 0.35%.

O enxofre tende a combinar-se com o ferro, formando um sulfureto que se deposita nas fronteiras do grão, diminuindo a resistência mecânica, o seu teor deve ser inferior a 0.02%.



**Figura 7 Efeito do teor de Manganês na dureza**

A equivalência do efeito dos elementos de liga Si, P e Mn, relativamente ao C, pode ser avaliada através de uma fórmula empírica que nos dá o "Carbono Equivalente".

$$C_{eq} = \% C_{total} + 0.312 (\% Si) + 0.33 (\% P) - 0.66 (\% Mn)$$

O efeito do fósforo na dureza pode ser calculado pela seguinte fórmula empírica

$$HB_{real} (c/ \text{fósforo}) = HB_{corrigido} (s/ \text{fósforo}) + 30 (\% P)$$

A Tabela 1 apresenta o efeito dos elementos constituintes do ferro fundido nas suas propriedades.

**Tabela 1 Efeito dos constituintes nas propriedades dos ferros fundidos**

Constituinte	Dureza	Resistência	Contração	Enxofre	Cementite	Grafite
Cementite	+	+	+			-
Grafite	-	-	-		-	
Silício	-	-	-	-	-	+
Manganês	-	+		-	+	-
Enxofre	+	-	+		+	-
Fósforo	+	-	+		+	-

### 1.2.2 Classificação dos ferros fundidos

(1) **O ferro fundido cinzento** é utilizado no estado vazado, para numerosos fins. As lamelas de grafite, que do ponto de vista mecânico actuam como se fossem pequenas fissuras,

conferem ao metal uma boa maquinabilidade, uma vez que as aparas se desprendem com facilidade. Da mesma forma as lamelas de grafite conferem uma elevada capacidade de amortecimento, o que é importante na absorção das vibrações.

O ferro fundido cinzento tem reduzida resistência mecânica e ductilidade.

A resistência à corrosão na presença de água salgada é superior à dos restantes ferros fundidos, porque as lamelas de grafite criam uma barreira à libertação dos produtos da corrosão, e por conseguinte, limitam a deterioração do material. Devido a existência da grafite, os ferros fundidos cinzentos têm propriedades "autolubrificantes" com interesse em algumas aplicações, onde o baixo coeficiente de atrito é importante, como é o caso de transmissões por engrenagens.

A norma DIN 1691 especifica estes ferros fundidos, pela designação GG, seguida de um número que representa a tensão de rotura mínima em  $\text{Kg/mm}^2$  : ex. **GG18** corresponde  $\sigma_r \geq 18\text{Kg/mm}^2$  ; de notar que a tensão de rotura se reduz com o aumento da espessura.

O ferro fundido cinzento é o ferro fundido mais barato e de uso mais generalizado.

A superfície de fractura é frágil, de aparência cinzenta baça.

A tensão de rotura à compressão é muito superior à tensão de rotura à tracção, suplantando até os aços de baixa liga, quando normalizados.

Mantém as propriedades de resistência entre os  $184^\circ\text{C}$  e os  $426^\circ\text{C}$ .

Ao contrário da maioria dos metais ferrosos, o módulo de elasticidade dos ferros fundidos cinzentos não é constante, reduzindo-se com o aumento do alongamento, indo de  $8450\text{Kg/mm}^2$  a  $14085\text{Kg/mm}^2$ .

A sua utilização é muito variada, indo dos blocos de motores a êmbolos, corpos de válvulas, volantes, prensas, tambores de travões, transmissões por engrenagens, corpos de bombas e de maquinaria do convés, etc.

(2) **Os ferros fundidos nodulares ou esferoidais** têm uma estrutura obtida directamente da fundição de ferro fundido cinzento, adicionando uma pequena quantidade de magnésio e cério, elementos que fazem precipitar módulos de grafite que nascem na direcção radial, com o arrefecimento; esta tendência é contrariada pela presença de MnS.

Estes materiais são cada vez mais utilizados e têm boas propriedades mecânicas e óptimas propriedades de fundição e maquinagem.

A norma DIN 1693, especifica estes materiais através das letras **GGG-42** (referindo o número, a tensão de rotura mínima em  $\text{Kg/mm}^2$ )

Estes materiais, com boa resistência ao desgaste, elevado módulo de elasticidade, elevada maquinabilidade e resistência à fadiga, apresentam também melhor resistência aos choques e aos esforços estáticos que o ferro fundido cinzento; em contrapartida, apresenta menor capacidade de amortecimento de vibrações e menor condutibilidade térmica.

Podem atingir tensões de rotura superiores a  $800\text{N/mm}^2$ .

São usados em corpos de válvulas e de bombas, caixas reductoras, etc.

**(3) O ferro fundido branco** é obtido por arrefecimento rápido (regelamento), originando a cementite; é demasiado duro para ser maquinado pelo que tem de ser obtido na sua forma final; tem boa resistência ao desgaste e à abrasão, pelo que são vulgares as aplicações em maquinaria de construção civil, agrícola, etc.

Este material tem uma superfície de fractura frágil, de aparência branca.

**(4) Os ferros fundidos maleáveis** são obtidos a partir de ferro fundido branco, sujeito a tratamento térmico após vazamento (800 a 1000° C) para eliminação de cementite (este ferro fundido contém cerca de 0.6% a 1% de Si, para promover a decomposição da cementite durante o tratamento térmico, mas insuficiente para originar lamelas de grafite durante a solidificação). Aplica-se a norma DIN 1692 (**GT\_**).

O ferro fundido maleável de núcleo (ou coração) branco (**GTW**) é obtido por aquecimento da peça vazada em atmosfera oxidante para descarbonizar as camadas superficiais (redução do teor de carbono).

O ferro fundido maleável de núcleo negro (**GTS**) é obtido por aquecimento da peça a cerca de 900° C em ambiente neutro, durante horas, afim de decompor a cementite em módulos de grafite em forma de rosetas, que não têm o efeito prejudicial da fissuração das lamelas de grafite. Uma vez que este ferro fundido consegue apresentar propriedades semelhantes às do aço de construção, é muito aplicado em engenharia em geral e em máquinas agrícolas em particular tem uma elevada tenacidade, boas propriedades de fundição e excelente maquinabilidade.

### **Ferros Fundidos Especiais**

Num ferro fundido normal, os elementos fundamentais são o ferro e o carbono, aparecendo outros elementos como o silício, manganês, fósforo e enxofre em percentagens reduzidas, constituindo, em alguns casos, impurezas.

Nos ferros fundidos especiais, adicionamos *intencionalmente elementos* como o níquel, crómio, molibdénio ou outros, em quantidades apreciáveis com o fim de obter uma melhoria das suas propriedades.

Podemos considerar como ferro fundido especial aquele que contenha um ou vários destes elementos em percentagens superiores às abaixo indicadas.

**Tabela 2 Elementos dos ferros fundidos especiais**

<b>Ni</b>	<b>Cr</b>	<b>Cu</b>	<b>Ti</b>	<b>V</b>
0.30%	0.20%	0.35%	0.10	0.10%
<b>Mo</b>	<b>Al</b>	<b>Si</b>	<b>Mn</b>	
0.10%	0.10%	0.10%	1.5%	

O silício e o manganês são elementos que estão sempre presentes, mas só se consideram como elementos de liga, quando presentes acima das percentagens atrás indicadas.

Existem ferros fundidos especiais que além de apresentarem elevada percentagem de elementos de liga, são submetidos a tratamentos térmicos e químicos adequados à obtenção de determinadas propriedades.

O grande interesse na utilização destes ferros fundidos reside no facto de se conseguir obter muitas características iguais ou superiores às dos aços, permitindo o seu uso na obtenção de peças por fundição.

De entre as características que se conseguem melhorar, refira-se:

- Resistência mecânica a quente;
- Resistência à oxidação e estabilidade a temperaturas elevadas;
- Resistência à corrosão.

A título de exemplo, vamos citar dois tipos de ferros fundidos especiais.

#### *(1) Ferros Fundidos Resistentes ao Calor e à Corrosão.*

São ferros em que a percentagem de silício varia entre 4 e 10%, o que faz com que a grafite se distribua uniformemente, formando uma estrutura fina que assegura uma elevada resistência à penetração dos gases

O silício, quando em percentagens elevadas, torna o ferro quebradiço não devendo por isso, ultrapassar os 6%.

Quando as exigências são mais elevadas, podemos recorrer a ferros com 1,4 a 4% de crómio associado a 12 ou 14% de níquel, ou então, introduzir apenas crómio em percentagens de 28 a 36%.

Os ferros de crómio e níquel denominam-se austeníticos. Resistem bem a variações de temperatura, mesmo da ordem dos 1000°C, e são amagnéticos. São também resistentes à corrosão porque constituem uma estrutura densa e compacta, livre de inclusões não metálicas.

Estes ferros aplicam-se em grelhas e cadinhos de fornos, moldes para a indústria vidreira, suportes de sobre-aquecedores, cubas. etc.

#### *(2) Ferros Fundidos Resistentes ao Desgaste*

Existem dois tipos fundamentais:

- Os que resistem ao desgaste por abrasão;
- Os que resistem ao desgaste por choque.

Os primeiros contêm níquel, crómio e molibdénio, o que permite a obtenção de uma estrutura muito dura e de alta resistência (estrutura martensítica ou sorbítica).

Os segundos contêm crómio e alumínio e são submetidos a um tratamento termoquímico a 525°C numa atmosfera de amoníaco. No final obtemos um ferro de dureza elevada, da ordem dos 350 HB.

Estes ferros aplicam-se em corpos de britadeiras, parafusos de transmissão, bombas, camisas de motores de camião, motores de competição.

**Tabela 3 Ferro Fundido Especial**

Elementos (%)		C	Si	Mn	S	P	Ni	Cr	Al	$\sigma_t$ (Mpa)	HB
Resistente ao calor e à corrosão	Elevada % de Si	2.70	5.5 6.5	0.3 0.5	$\leq 0.1$	$\leq 0.1$				160 180	180 300
	Elevada % de Cr	$\leq 1.5$	$\leq 1.7$	$< 1.0$	$\leq 0.1$	$\leq 0.1$		28 32		320 360	
	Ni + Cr Austeníticos	2.6 3	1.5 2.7	1.0 2.0	$< 0.1$	$\leq 0.2$	14	1.5 4	6	220 250	130 160
Elementos (%)		C	Si	Mn	S	P	Ni	Cr	Mo	HB	
Resistentes ao desgaste por abrasão		3	0.5	0.5	$< 0.1$	$\leq 0.1$	2	0.5	2	$> 450$	
		4	1.5	1.5			6	2.5			
Resistentes ao desgaste por choque		2.6	2.4	0.9	$< 0.1$	$\leq 0.1$		1.5		320	
		2.9	2.7	1.1				2		350	

### 1.2.3 Aplicações em Engenharia Naval

Os ferros fundidos são bastante aplicados em componentes mecânicos e em peças de aprestamento.

A variedade de utilização mais comum é o ferro fundido cinzento; para determinadas aplicações usam-se o ferro fundido modular ou esferoidal e também o ferro fundido maleável.

Das aplicações mais correntes salientamos as seguintes:

- Corpos de bombas, de válvulas e de maquinaria diversa
- Blocos de motores de combustão interna de pequena dimensão, cabeças e êmbolos de motores
- Colectores de evacuação e permutadores de calor de pequena dimensão
- Cabeços, buzinas, castanhas e demais peças de aprestamento naval
- Veios de manivelas de motores Diesel e de compressores frigoríficos

As Sociedades de Classificação estabelecem requisitos para ferros fundidos cinzentos e ferros fundidos nodular ou esferoidal. A Soc. Class. LRS refere que, com excepção dos veios de manivelas, os ferros fundidos cinzentos devem ter uma tensão de rotura entre 200 e 350 MPa; no caso dos veios de manivelas o valor mínimo será de 250 MPa. Indica ainda que nos ensaios de tracção as superfícies de fractura devem ser granulares e com aparência cinzenta e que as peças deverão ser isentas de defeitos.

No caso do ferro fundido nodular, que é admitido poder ter uma tensão de rotura de 900 MPa, já são apresentados valores de controle para a tensão de cedência, extensão após rotura, dureza e microestrutura. A exigência e controle é portanto maior que os ferros fundidos cinzentos.

A forma de especificação mais corrente para ferros fundidos está de acordo com as normas DIN anteriormente referidas.

Dadas as características de fragilidade dos ferros fundidos, é importante que para aplicações de responsabilidade existam verificações de qualidade muito precisas, para detectar fissuras ou outros defeitos, que poderiam constituir o início de uma rotura frágil.

De notar que não é permitido o uso de componentes de ferro fundido em sistemas de encanamentos, directamente ligados ao casco, por razões relacionadas com a fragilidade desse material.

A resistência à corrosão destes materiais, na presença da água do mar é relativamente reduzida, isto é, os ferros fundidos cinzentos deterioram-se segundo um modo de corrosão em que o ferro é oxidado e entra em solução ficando o carbono sob a forma de grafite. Esta forma de corrosão selectiva designa-se por grafitagem e mostra a importância do carbono livre, quando em percentagens significativas, na corrosão do ferro.

Nos ferros fundidos cinzentos, o carbono vai funcionar como cátodo, acelerando a corrosão do ferro, que funciona como ânodo; no início o processo corrosivo é mais intenso que no caso dos aços macios; no entanto, numa fase posterior, se a grafite for uniformemente distribuída em lamelas como é corrente neste tipo de material, dará lugar a uma rede que retém os produtos da corrosão do ferro, opondo-se a uma posterior difusão, cessando ou reduzindo a corrosão a taxas baixas. Esta acção é tanto mais intensa e as camadas mais impermeáveis quanto mais finas forem as lamelas de grafite. De notar que o que superficialmente aparenta serem lamelas é na verdade uma estrutura tridimensional em que a grafite aparece com a configuração de rosetas.

No caso dos ferros fundidos brancos, em que a pilha electroquímica é constituída por ferro e cementite, a diferença de potencial é inicialmente menor mas, como não se forma a "rede protectora" inerente aos ferros fundidos cinzentos, torna-se mais grave do ponto de vista da corrosão.

Por serem mais resistentes à corrosão em águas com sulfuretos, os ferros fundidos empregam-se em circunstâncias onde existam águas poluídas ou com enxofre.

Por resistirem à oxidação a temperaturas elevadas, usam-se em colectores de escape de motores e em placas de fogões.

## **1.3 Aço - Classificação e Propriedades**

### **1.3.1 Classificação dos aços**

O grande desenvolvimento da indústria dos aços e a variada gama de aplicações que se tornaram possíveis, originou um conjunto de classificações das quais se destacam:

- Processo de elaboração
- Processo de desoxigenação
- Microestrutura
- Teor de carbono
- Composição química
- Resistência mecânica
- Aplicações
- Forma de comercialização

#### **1.3.1.1 *Processo de elaboração (método de produção)***

Siemens Martin

SM

Convertedor Bessemer	B
Fusão por arco eléctrico	
Fusão em fomo de indução de alta frequência	E
Convertedor de Thomas	T
Fusão em cadinho	TI
Processo LD (Linz-Doravitz) - Oxiconvertedores	LD

**1.3.1.2 Processo de desoxigenação (desoxidação) U**

- Efervescente
- Semi-calmado
- Calmado R
- Especialmente calmados RR

**1.3.1.3 Microestrutura (composição básica da estrutura cristalina)**

- Ferríticos
- Perlíticos
- Austeníticos
- Martensíticos
- Ledeburíticos

**1.3.1.4 Teor de carbono**

(a) Teor real de carbono

- Baixo teor de carbono (C < 0.3%)
- Médio teor de carbono (0.3 < C < 0.7%)
- Elevado teor de carbono (C > 0.7%)

Para um aço não ligado com  $0.15 < C < 0.25\%$  é corrente usar-se a designação de "aço macio"

(b) Teor de carbono relativamente ao eutectoide

- Hipoeutectoide C < 0.86%
- Eutectoide C = 0.86%
- Hipereutectoide C > 0.86%

**1.3.1.5 Composição química**

(a) Aço sem liga (aço não ligado)

Frequentemente conhecido pela designação imprópria de aço carbono

(b) Aço de liga

- aço de baixa liga (fracamente ligado) (qualquer elemento de liga < 5%)
- aço de alta liga (fortemente ligado) (qualquer elemento de liga > 5%)

**1.3.1.6 Resistência mecânica**

- Aços correntes
- Aços de alta resistência (T<sub>02</sub> > 600 MPa)

- Aços de muito alta resistência 1000 <math>\sigma\_{02}</math> < 1800 MPa
- Aços de ultra alta resistência  $\sigma_{02} > 1800 \text{ N/mm}^2$

\*De notar que esta classificação é pouco significativa pois um mesmo material pode estarem duas classes, devido a tratamentos térmicos ou mecânicos diferenciados, a que esteja sujeito. Trata-se normalmente de aços de liga.

### **1.3.1.7 Aplicações (utilização)**

- Aços de caldeiras, flanges e caixas de fumos (aços que podem ser trabalhados a frio sem fissurar)
- Aços de endurecimento superficial
- Aços resistentes à corrosão e ao calor
- Aços para estampagem e prensagem (automóveis, frigoríficos, fogões)
- Aços para electricidade (com elevador de Si)
- Aço forjado (para trabalho a quente)
- Aço de fácil maquinagem (parafusos, porcas e outras peças de série)
- Aços de construção (para máquinas)
- Aço soldável para tubos (muito macio - baixo teor de C)
- Aço de caminho de ferro (carris)
- Aço para chapa fina (para manufacturar folha de Flandres)
- Aço de molas
- Aço estrutural (navios, edifícios, pontes, aparelhos de carga)
- Aço de ferramentas
- Aço de pequena variação dimensional
- Aços especiais (para ímans, refractários, etc.)

### **1.3.1.8 Forma de comercialização**

- Vazado
- De conformação plástica:
  - Perfilados - barras, cantoneiras, perfis, varões, vergalhões
  - Chapas
  - Produtos estirados - barras, perfis e tubos (de dimensão bastante rigorosa)
  - Produtos de trefilados - fios e arames

O interesse numa melhor compreensão de algumas destas propriedades justifica a sua abordagem mais detalhada.

### **1.3.2 Método de desoxidação e controle do tamanho do grão**

O aço, quando em banho de fusão contém oxigénio dissolvido, o qual é um elemento importante no fabrico do aço. O modo como este oxigénio é libertado à medida que o metal solidifica, é determinante de algumas características do aço.

Em aços de baixo teor de carbono, na ausência de desoxidantes, a reacção de carbono com oxigénio produz monóxido de carbono durante a solidificação do lingote. Como resultado, este lingote tem a camada exterior isenta de cavidades e a zona interior com porosidade, devida à contracção e aos gases que não foram libertados. Não há uniformidade nas características e composição química da massa do metal.

Os aços que não sofrem desoxigenação são identificados como aços efervescentes. A sua superfície exterior é praticamente isenta de carbono e muito dúctil. São especificados para estampagem a frio, por a camada exterior apresentar boa ductilidade; dada a sua falta de homogeneidade não são apropriados para forjamento a quente, não o sendo também para aplicações estruturais, sobretudo para espessuras elevadas e para outras aplicações onde seja necessário proceder à soldadura.

Os aços que sofrem um processo de desoxigenação designam-se por especialmente calmados, calmados e semi-calmados, consoante o nível de desoxigenação.

Os aços semi-calmados derivam de lingotes parcialmente desoxidados, sendo usados em aplicações estruturais. Os aços calmados são completamente desoxidados pela adição de fortes agentes oxidantes como o silício e o alumínio. São melhores que os outros já citados porque têm uma elevada uniformidade na composição química e nas propriedades da massa do metal. Em adição à desoxigenação, o processamento de fabrico dos aços pode ser completado com o refinamento do grão.

O refinamento do grão é conseguido pela adição de elementos como o alumínio, o nióbio ou o vanádio, para limitar o crescimento do grão durante o período de formação do mesmo. Este procedimento pode ser melhorado através do tratamento de normalização que também visa homogenizar e refinar a estrutura do grão.

#### 1.4 Aços não ligados (aços sem liga)

Designa-se por aço não ligado ou aço-carbono o aço que deve as suas propriedades essencialmente ao teor de carbono e em que além dos elementos de elaboração e das impurezas, não contem nenhum elemento de liga em quantidade superior aos mínimos indicados para o aço ligado e que são:

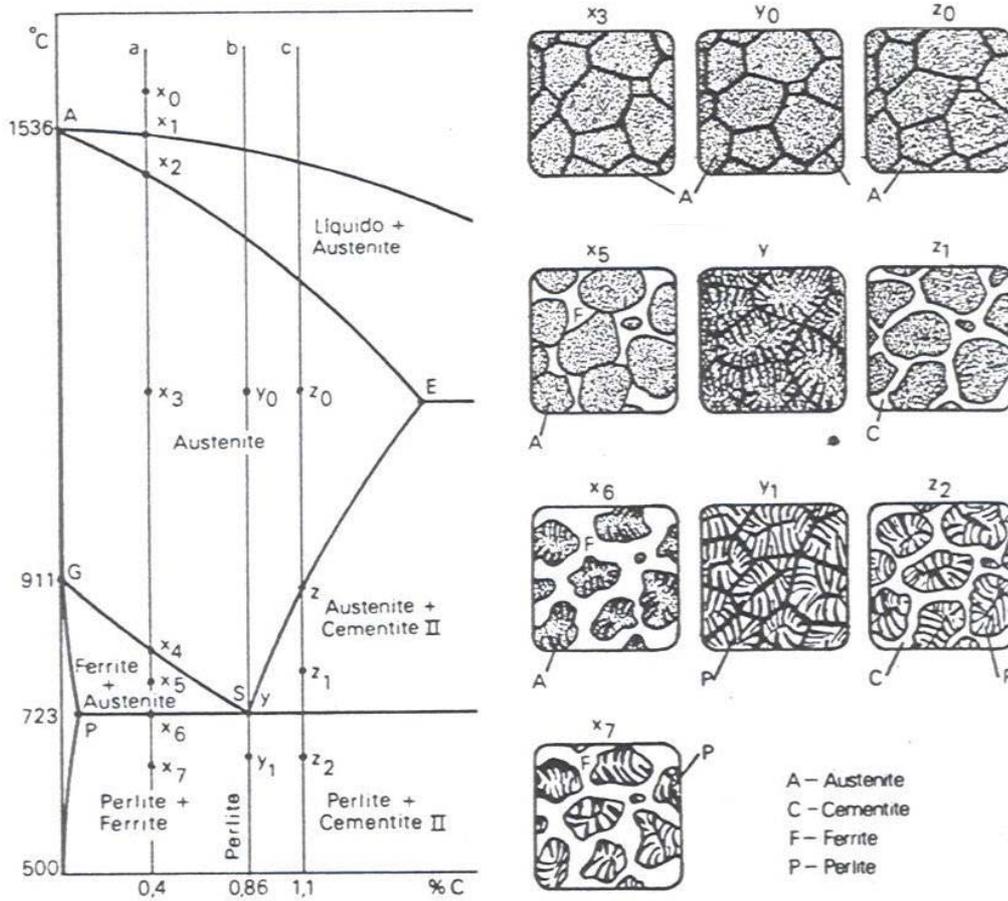
**Tabela 4**

Al - 0.10%	Cu - 0.40	Ni - 0.30	Te-0.10
Bi - 0.10	Lantanídeos - 0.05	Nb - 0.06	Ti - 0.05
B - 0.0008	Mn - 1.65	Pb - 0.40	W - 0.01
Cr - 0.30	Mo - 0.08	Se-0.10	V - 0,10
Co-0.10	Outros el. excepto C, S, P, N - 0.05	Si - 0.50	Zr - 0.05

A Figura 8 mostra a parte do programa diagrama de equilíbrio que interessa aos aços e apresenta um esboço das diversas microestruturas devido às transformações alotrópicas de um aço com 0.4% C. De notar que estas transformações apenas ocorrem segundo o diagrama de equilíbrio, se forem efectuadas lentamente; de outra forma, se o arrefecimento

for brusco ou rápido, haverá que usar o diagrama de transformação isotérmica (diagrama TTT) ou o diagrama de arrefecimento contínuo para estudar as transformações.

Dos elementos existentes nos aços não ligados alguns, como o Si, o Mn e o Al são elementos benéficos visando a desoxigenação, controlo do tamanho do grão, etc.; outros elementos como o enxofre, o fósforo, o oxigénio e o hidrogénio são em geral indesejáveis, constituindo impurezas que devem ser removidas para se obter aços de qualidade.



**Figura 8 Zona do diagrama metaestável correspondente aos aços.**

Por definição, os aços sem liga são aqueles que contêm até cerca de 1% de carbono, de menos de 1.65% manganês, 0.60% silício e quantidades residuais de outros elementos tal como o enxofre, (0.05% no máximo) e fósforo (0.04% no máximo). De notar que nos EUA os aços não ligados possuem teores de ~ 0.60% Cu, devido ao fabrico que usa sucatas ricas em cobre.

Nestes aços, o carbono é o elemento principal e determinante das diversas propriedades mecânicas. Como se viu anteriormente - Figura 1 - o aumento de resistência à tracção e um aumento da dureza simultaneamente provoca um decréscimo no alongamento e na ductilidade. O teor de carbono também altera as propriedades físicas e a resistência à corrosão; o seu aumento provoca uma redução na condutibilidade térmica e eléctrica, bem como na permeabilidade magnética e a resistência à corrosão e reduzida.

Como já referimos são geralmente divididos em três grupos

- Baixo teor de carbono (C < 0.30%)
- Médio teor de carbono (0.30 < C < 0.70%)

➤ Elevado teor de carbono

(0.70 < C < 1.00%)

O aço de baixo teor de carbono, muitas vezes referido como aço macio é caracterizado pela baixa tensão de rotura e elevada ductilidade; não é endurecível por tratamento térmico excepto pelo processo de endurecimento superficial.

Pela sua boa ductilidade, os aços macios permitem uma fácil conformação plástica. O trabalho a frio aumenta a resistência e reduz a ductilidade, que pode ser recuperada por recozimento. Estes aços são facilmente soldáveis sem perigo de encruamento ou fragilização na zona da soldadura.

Embora não sejam sensíveis a tratamentos térmicos, estes aços podem ser endurecidos superficialmente por tratamentos termoquímicos, que provocam a difusão do carbono na superfície. Quando temperado, obtém-se uma superfície dura, resistente ao desgaste.

Os aços macios para baixas temperaturas, usados sobretudo em reservatórios de pressão, têm a seguinte composição média: 0.20 < C < 0.30%; 0.70 < Mn < 1.60%; 0.15 < Si < 0.60. Estes aços têm uma estrutura granular fina com uma dispersão de carboneto uniforme. Mantêm uma moderada resistência com aceitável tenacidade até -45° C.

Os aços com médio teor de carbono são sensíveis ao tratamento térmico, em peças com secções finas, ou nas camadas superficiais das secções espessas. A tensão de rotura e a dureza podem ser aumentadas por têmpera e revenido, podendo ser ainda elevadas por trabalho a frio. A dureza mais elevada que praticamente se pode obter é de HB 550 (HRC 55). Em virtude das suas características esses aços são muito aplicados em estruturas.

Os aços de elevado teor de carbono atingem uma elevada dureza (HB 710); são aços particularmente aplicáveis a peças resistentes ao desgaste.

Os aços de corte fácil ou de fácil maquinagem são aços de baixo e médio teor de carbono com adições ou de enxofre (0.08 a 0.13%) ou combinações de enxofre e fósforo e/ou chumbo, para permitir uma maior maquinabilidade. A adição destes elementos provoca uma redução da maioria das propriedades mecânicas, soldabilidade conformação plástica a frio, etc.

A Tabela 5 apresenta um resumo da composição química, características e aplicações dos aços sem liga.

A Tabela 6 apresenta um resumo de aspectos relevantes da existência de elementos de elaboração e de impurezas em aços não ligados.

**Tabela 5**

AÇOS DE BAIXO TEOR DE ACRBONO	COMPOSIÇÃO GENÉRICA	FORMA DE COMERCIALIZAÇÃO	CARACTERÍSTICAS E PROCESSOS TECNOLÓGICOS DE FABRICO	APLICAÇÕES
	$0.07 < C < 0.15\%$ $Mn \approx 0.5\%$	Laminado a quente, recozido ou normalizado	Baixa resistência e elevada ductilidade Excelente aptidão para fabrico por forjagem, estacopagem, laminagem, extrusão e soldadura Podem ser cementados	Correspondem à maior quantidade (cerca de 90%) da produção de aço; incluem os chamados aços estruturais. Construção de pontes, edifícios, navios, veículo, caldeiras, etc
	se $0.6 < Mn < 1\%$ $Pb \approx 0.18\%$	} ----->	aços de fácil maquinagem (free cutting steel)	
	Pormenorizando, por tomada em consideração do processo de desoxigenação: <u>Aços efervescentes</u> $C < 0.07\%$			fios e barras condutores da electricidade
	$0.07 < C < 0.15$ <u>Aços semicalmados</u> $0.06 < C < 0.15\%$ $Si \sim 0.1\%$ <u>Aços calmados</u> $0.07 < C < 0.15\%$ $Si \sim 0.1\%$ $Mn \sim 0.5\%$	Varão arame para pregos, rebites, fitas, cabos; varão para betão armado, bandas laminadas a quente, tubos chapa estanhada	aços de acabamento brilhante e fácil maquinagem  aços para desformação a frio tubos sem costura	corresponde à gama mais importante

	COMPOSIÇÃO GENÉRICA	FORMA DE COMERCIALIZAÇÃO	CARACTERÍSTICAS E PROCESSOS TECNOLÓGICOS DE FABRICO	APLICAÇÕES
AÇOS DE MÉDIO TEOR DE ACRBONO	0.3 < C < 0.5%		São aços destinados a tratamento térmicos de têmpera e revenido a temperatura relativamente elevada – 350 a 550°C de modo a obter boa resistência e tenacidade por globulização dos carbonetos.	Construção mecânica, peças estampadas a quente, ferramentas agrícolas, veios, tubos de alta resistência, arames, rotores, blocos, engrenagens etc
	0.5 < C < 0.65%		Podem alcançar elevada resistência e boa ductilidade se forem submetidos a tratamentos termomecânicos em fase austenítica  Têm fraca soldabilidade, requerendo pré-aquecimento	Carris de caminho de ferro, grandes matrizes de forjagem, martelos pneumáticos rodas, cabos molas lâminas
AÇOS DE ALTO TEOR DE ACRBONO	0.65 < C < 0.75%		São aços destinados a tratamento térmicos de têmpera e revenido, com um alto limite de elasticidade ou elevada dureza para possibilitar resistência ao desgaste; o revenido, após têmpera, é efectuado a temperaturas relativamente baixas  A tenacidade é inferior à dos aços de médio teor de carbono.  Tem fraca temperabilidade para secções reduzidas, havendo também o perigo de fissurar na têmpera em água.  Tem um rápido amaciamento para temperaturas superiores a 350°C, o que inibe a utilização em ferramentas de corte a alta velocidade.	Serras, mandris, blocos, barras de torção chaves, camisas de cilindro, varão para betão pré esforçado, etc
	0.75 < C < 0.85%			molas, matrizes pequenas para forjagens;  matrizes grandes para prensas a frio, lâminas de corte, amortecedores
	0.85 < C < 0.95%			pequenas tesouras para corte a frio, lâminas de corte, punções
	0.95 < C < 1.1%			veios, punções, matrizes de parafusos, picaretas, fresas
	1.1 < C < 1.4%			lâminas, medidores, brocas, ferramentas para madeira, espetos mandris, ferramentas de torneiro e aplinar

**Tabela 6 PROVENIÊNCIA, FORMA DE APRESENTAÇÃO E CONTRIBUIÇÃO PARA AS PROPRIEDADES DOS AÇOS NÃO LIGADOS, DOS ELEMENTOS DE ELABORAÇÃO E IMPUREZAS**

Elemento	PROVENIÊNCIA	FORMA DE APRESENTAÇÃO	CONTRIBUIÇÃO PARA AS PROPRIEDADES
Si	<ul style="list-style-type: none"> <li>• introdução na gusa pela escória</li> <li>• adição como agente desoxidante</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• solução sólida com a ferrite em teores de 0.3 a 0.5%</li> <li>• inclusões como silicatos</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• aumenta ligeiramente a dureza e a resistência sem efectuar a ductilidade</li> <li>• reduz a soldabilidade, devendo ter um teor inferior a 0.2% em aços soldáveis</li> <li>• reduz a aptidão para a zincagem a quente pois favorece a formação dum liga Fe Zn em detrimento da camada superficial de Zn</li> </ul>
Mn	<ul style="list-style-type: none"> <li>• redução dos óxidos de manganês no alto forno</li> <li>• Adição para afinação comportando-se como agente desoxidante e dessulfurante, segundo as reacções:  <math>Fe S + Mn O \rightleftharpoons Mn S + Fe O</math>  <math>Mn + Fe S \rightleftharpoons Mn S + Fe</math> </li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Solução sólida na ferrite</li> <li>• Carbonetos (<math>Mn_3 C</math>) associado à cementite, tornando-a mais estável</li> <li>• Inclusões de <math>Mn S</math></li> <li>• Inclusões de <math>Mn O</math></li> <li>• Inclusões de silicatos de Manganês</li> <li>• Os teores mais correntes variam entre 0.2 e 0.9%, devendo ser pelo menos 4 vezes superior ao valor teoricamente necessário para se combinar com o S.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Para baixos teores de C dissolve-se na ferrite e aumenta a dureza e a resistência à tracção, diminuindo a ductilidade</li> <li>• Com teores mais elevados associa-se à cementite melhorando a dureza e a resistência por afinação da perleite</li> <li>• Melhora a temperabilidade se <math>Mn &lt; 0.5\%</math></li> <li>• Em teores adequados permite por formação de <math>Mn S</math> por transformação do <math>Fe S</math> evitando defeitos na forjagem e fessuração a quente na soldadura</li> </ul>
Al	<ul style="list-style-type: none"> <li>• adição como agente desoxidante mais eficaz que Si</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• apresenta-se sob a forma de partículas muito finas de alumina (<math>Al_2 O_3</math>) impede o engrossamento do grão fino</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• dificulta a operação de forjagem</li> <li>• mesmo em muito pequenas quantidades (0.01%) tem incidência sobre as propriedades do aço</li> </ul>

	PROVENIÊNCIA	FORMA DE APRESENTAÇÃO	CONTRIBUIÇÃO PARA AS PROPRIEDADES
S	<ul style="list-style-type: none"> <li>• introdução pelo coque</li> <li>• introdução rara pelos minérios eliminado durante a elaboração da gusa passado à escória (4 a 10% é eliminado sob a forma de <math>SO_2</math> nos produtos de combustão e o restante é temperatura pelo Mn em Mn S).</li> <li>• O teor de S deve ser inferior a 0.07%, reduzindo-se para 0.01% para aços de elevada qualidade</li> </ul>		<ul style="list-style-type: none"> <li>• é uma impureza indesejável na maioria das aplicações</li> <li>• provoca fragilização a quente para temperaturas superiores a <math>900^{\circ}C</math> se a quantidade de Mn para formar Mn S for insuficiente e se <math>S &gt; 0.02\%</math></li> <li>• estabiliza a cementite a temperaturas da ordem dos <math>700-750^{\circ}C</math>, mesmo se <math>S \approx 0.1\%</math></li> <li>• para aços de fácil maquinagem (corte fácil) usa-se aços com <math>S \approx 0.2\%</math>, <math>Mu \approx 1.5\%</math> e baixo teor de fósforo, que produzem grande fragmentação de aparas.</li> <li>• diminui a forjabilidade e a soldabilidade</li> <li>• enfraquece a resistência ao choque</li> <li>• afecta a estrição</li> <li>• reduz a resiliência</li> </ul>
P	<ul style="list-style-type: none"> <li>• introdução pelos minérios</li> <li>• introdução eventual pelo coque</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• fíos terras em solução sólida no ferro x e no ferro y</li> <li>• na presença de C a precipitação do eutético Fe – <math>Fe_3P</math> dá-se a partir de teores superiores a 0.07% e provoca a segregação do P com efeitos desfavoráveis nas propriedades mecânicas</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• é uma impureza indesejável na maioria das aplicações</li> <li>• favorece o crescimento do grão</li> <li>• eleva um pouco a dureza e a resistência mas torna o aço frágil pois aumenta a temperatura de transição</li> <li>• em alguns casos melhora a resistência à corrosão</li> <li>• em chapas estanhadas, um teor de 0.08% P evita a colagem das chapas</li> </ul>

## 1.5 Aços Ligados

As limitações apresentadas pelos aços sem liga para satisfazerem determinadas aplicações além de dificuldades inerentes ao processo de fabrico como garantia de homogeneidade e isotropia sobretudo em tratamentos térmicos levaram à produção dos aços ligados.

Estes aços são fabricados quase exclusivamente em forno Martin e eléctrico por processos análogos aos dos aços não ligados, sendo o elemento de liga adicionado no final da operação.

O uso de aços ligados visa a melhoria das propriedades dos materiais, sobretudo as características mecânicas. Citam-se algumas dessas propriedades e características que se pretendem melhorar com o recurso a aços ligados:

- resistência ao desgaste
- resistência à corrosão
- resistência à fadiga
- resistência ao calor
- propriedades eléctricas
- propriedades magnéticas
- propriedades térmicas
- resistência à tracção
- limite da elasticidade
- dureza
- tenacidade à fractura
- resistência à fluência
- elevação da taxa resistência/peso
- elevação da taxa  $\sigma_{02}/\sigma_r$ , etc.

Designou-se por aços de liga, os aços que contêm o teor de pelo menos um elemento da liga de valor superior ao convencionado, e que consta da fracção.

O aço será fracamente ligado ou de baixa liga se nenhum elemento atingir o teor 5%.

O aço será fortemente ligado se pelo menos um dos elementos de liga existir numa percentagem superior a 5%.

Nalguns casos a proporção dos elementos de liga é de tal modo elevada que se torna duvidosa a designação do produto como aço (todo o produto ferroso cujos constituintes são idênticos aos dos aços ligados, isto é contêm austenite e/ou constituintes no domínio perlítico, bainítico, martensítico e fases intermédias como carbonetos).

### 1.5.1 Composição Química dos Aços Ligados

Além dos elementos existentes nos aços não ligados- além do ferro e do carbono os elementos de elaboração e as impurezas, os aços ligados incluem elementos de liga propositadamente adicionados para atingir diversos objectivos.

Estes elementos podem ser agrupados como elementos alfa-géneos e elementos gama-géneos.

**Elementos alfa-géneos** – tornam a austenite instável e reduzem o domínio  $\gamma$ , isto é baixam  $A_4$  e elevam a  $A_3$ .

Cr Mo W Ti Si Al S P Nb B

**Elementos gamagêneos** – alargam o domínio austenítico, baixando o ponto  $A_3$  e elevam o ponto  $A_4$

Au Pt Zn H N Cn Mn Ni

Vejamos agora com que finalidade são adicionados aos aços os diversos elementos de liga.

- para aumentar a resistência à tracção: C, Mn, Cr, Ni;
- para melhorar a maquinabilidade: S, Se;
- para aumentar a resistência ao desgaste: Cr, W, Mo, Mn;
- para aumentar a penetração de têmpera: C, Mn, Ni, Mo, Cr;
- para tornar os aços aptos para a têmpera no óleo ou no ar: Ni, Mn, Cr, Mo;
- para diminuir a fragilidade no revenido: Mo, V;
- para aumentar a resistência ao revenido: W, Mo, V, Co;
- para aumentar a resistência a temperaturas elevadas: W, Mo, V, Co, Cr;
- para aumentar a resistência ao desgaste a quente: W, Mo, V, Cr;
- para aumentar a dureza a temperaturas elevadas e a duração de corte: W, Mo, V, Cr,
- para aumentar a resistência à corrosão: Cr, Ni, Mo, Cu, Si;
- para obter e manter estruturas específicas tais como austenite ou ferrite: Ni, Cr, Al, N;
- para obter propriedades físicas particulares como as requeridos pelos ímans, aços amagnéticos, aços para aplicações nucleares: Mn, N, Co, Cr, Al, B;

Devemos notar que teores elevados em elementos de liga podem alargar ou reduzir a zona na qual os aços se encontram no estado austenítico. Deste modo, obtêm-se aços que não se transformam e por isso são insensíveis a qualquer tratamento térmico. Os aços que conservam a sua estrutura austenítica através de toda a gama de temperaturas quando arrefecidos desde cerca de  $1000^{\circ}\text{C}$  até às mais baixas temperaturas chamam-se aços austeníticos. Por outro lado, chamam-se aços ferríticos aqueles que conservam a sua estrutura ferrítica através de toda a gama de temperaturas.

Vamos indicar em seguida a influência de cada um dos elementos de liga nas propriedades dos aços.

Convém notar que os elementos de liga quando usados em conjunto com outros podem originar nos aços propriedades ligeiramente diferentes das que lhe dariam se usados isoladamente. Além disso, parece que os elementos de liga se tomam mais eficazes quando utilizados juntamente com outros, embora também surjam combinações em que os elementos actuam em sentidos opostos.

### (1) CARBONO - C

Este elemento é o mais importante elemento de liga nos aços. Aumenta a dureza e a resistência dos aços no estado recozido uma vez que em conjunto com ferro forma carbonetos duros e resistentes ao desgaste.

Nos aços temperados, o carbono está presente em solução na martensite e provoca as tensões internas que são responsáveis pela dureza da estrutura.

### (2) SILÍCIO-Si

Este metalóide é usado essencialmente como desoxidante. No entanto, é frequentemente usado como elemento de liga. Assim, é usado: nos aços para molas uma vez que aumenta o

limite elástico; nos aços de tratamento térmico (Si Mn) uma vez que aumenta a resistência à tracção e ao desgaste; nos aços refractários, mas dada a sua dificuldade de maquinagem. tanto a quente como a frio a sua adição é limitada (no máximo cerca de 3%). Teores de 12% de silício permitem a obtenção de resistência aos ácidos. No entanto tais peças só podem ser realizadas em fundição (dura e muito frágil) cuja rectificação não pode ir além da rectificação à mó.

O silício favorece a formação de grafite e restringe o domínio do ferro  $\gamma$ .

Uma vez que a sua presença diminui a condutividade eléctrica, a força coerciva e as perdas devidas ao efeito das correntes de Foucault é usado nos aços para chapas para máquinas eléctricas.

### (3) MANGANÊS - Mn

O manganês é também um desoxidante. Combinando-se com o enxofre para formar sulfuretos de manganês compensa a influência desfavorável dos sulfuretos de ferro, facto muito importante nos aços de fácil maquinagem para tornos automáticos dado que diminui a possibilidade de formação de fissuras a quente.

Este elemento não forma carbonetos, encontrando-se dissolvido na matriz à qual confere um aumento de resistência. O manganês baixa os pontos de transformação  $A_{r3}$  e  $A_{r1}$  e diminui consideravelmente a velocidade crítica de têmpera, facilitando assim bastante a penetração de têmpera. Aumenta o limite elástico e a resistência à tracção.

Teores superiores a 4% Mn originam a formação. de martensite frágil mesmo com arrefecimento lento. Por outro lado, aços com teores superiores a 12% de Mn juntamente com 1% de carbono permanecem no estado austenítico mesmo quando arrefecidos na água a partir de 1000° C pois o manganês aumenta a zona  $\gamma$ . Estes aços apresentam uma grande tendência para o encruamento por efeito de choque pelo que adquirem grande dureza superficial mantendo a tenacidade do núcleo. Por isso têm grande resistência ao desgaste por choque. Não se usam teores em manganês entre 4 e 12% dada a formação da martensite frágil.

Os aços com mais de 18% de manganês são amagnéticos mesmo após forte encruamento. O manganês aumenta o coeficiente de dilatação térmica, diminuindo a condutibilidade térmica e a resistividade eléctrica.

### (4) CRÓMIO - Cr

Uma parte do teor deste elemento é dissolvida na matriz enquanto outra parte se combina com o carbono para formar carbonetos. Os carbonetos de crómio aumentam o poder de corte e a resistência ao desgaste.

O crómio torna o aço apto para ser temperado no ar ou no óleo. Diminuindo a velocidade crítica de têmpera aumenta a penetração de têmpera enfraquecendo, no entanto, a tenacidade.

O crómio favorece a resistência à acção do hidrogénio sob pressão. Para teores elevados aumenta a resistência à formação de calamina. Nos aços inoxidáveis é o crómio que protege o ferro contra a corrosão, no entanto, apenas a parte do crómio, dissolvida na matriz tem este efeito. Para ser inoxidável o aço terá de possuir um teor em crómio dissolvido na matriz de 13%, no mínimo. O crómio diminui o domínio do ferro  $\gamma$  e aumenta a zona ferrítica. Nos

aços austeníticos Cr Mn e Cr Ni o crómio estabiliza a austenite. Este elemento diminui a condutibilidade térmica e a condutibilidade eléctrica assim como a dilatação térmica.

Juntamente com teores elevados em carbono a presença do crómio em teores até 3% aumenta a reminiscência e a força coerciva.

#### (5) NÍQUEL-Ni

Tal como o manganês este elemento não forma carbonetos, encontrando-se dissolvido na matriz tanto no estado recozido como no temperado.

O níquel aumenta a penetração de têmpera e a tenacidade dos aços.

Este elemento provoca o abaixamento dos pontos de transformação  $A_1$  e  $A_3$ . Para teores superiores a 7% alarga fortemente a zona  $\gamma$  conferindo aos aços inoxidáveis com teor elevado em crómio uma estrutura austenítica que se mantém mesmo para temperaturas bastante inferiores à temperatura ambiente. Os aços com teores em níquel de 30% conservam a sua estrutura austenítica mesmo após arrefecimento lento. O níquel apenas torna o aço semi-inoxidável mesmo para teores elevados. Nos aços inoxidáveis austeníticos Cr Ni o níquel aumenta a resistência aos ataques dos agentes químicos redutores enquanto o crómio aumenta aquela resistência à acção dos agentes oxidantes.

Para temperaturas superiores a  $600^\circ\text{C}$  os aços austeníticos possuem boa resistência a quente em consequência da sua elevada temperatura de recristalização. Praticamente não são magnetizáveis.

O níquel diminui a condutibilidade térmica e a condutibilidade eléctrica. Teores elevados em níquel entram na composição de aços com coeficiente de dilatação térmica insignificante (tipos INVAR).

#### (6) MOLIBDÉNIO - Mo

Este elemento é um forte formador de carbonetos, entrando na composição dos aços geralmente combinado com outros elementos (Cr, Mn, Ni, Co, W, V). Diminui a zona  $\gamma$ .

Diminui a velocidade crítica de têmpera melhorando a temperabilidade dos aços. Reduz a fragilidade por revenido nos aços Cr Ni e nos aços ao Mn e contribui para o afinamento do grão. Aumenta o limite elástico, a resistência à tracção e a resistência a quente. Melhora as propriedades de corte dos aços rápidos podendo substituir o tungsténio (um dado teor em Mo exerce a mesma influência que o dobro desse teor em W).

O molibedénio é usado nos aços inoxidáveis para aumentar a resistência à corrosão e ao ataque pelo ácido sulfúrico. Diminui a resistência à oxidação a quente.

#### (7) VANÁDIO - V

O vanádio tem grande tendência a formar carbonetos, que são muito finos. Por esse motivo aumenta a resistência ao desgaste, a resistência a quente e o tempo de duração de corte, entrando na composição dos aços rápidos, de trabalho a quente e refractários.

Aumenta a estabilidade do revenido e a insensibilidade ao sobre aquecimento.

O vanádio torna a estrutura do aço mais fina. Dado que aumenta o limite elástico é por vezes adicionado em aços para molas. A formação de carbonetos aumenta a resistência à acção do hidrogénio sob pressão.

O vanádio diminui a zona  $\gamma$  e eleva o ponto de transformação de fase.

#### (8) TUNGSTÉNIO - W (VOLFRÁMIO)

O tungsténio exerce sobre as propriedades dos aços uma acção muito semelhante à do vanádio. Assim, forma carbonetos muito duros e diminui a zona  $\gamma$ . Melhora a tenacidade, as resistências a quente e ao revenido e aumenta o tempo de duração de corte. Por isso entra na composição dos aços rápidos, de trabalho a quente e de dureza máxima.

O tungsténio opõe-se ao aumento do tamanho do grão.

Aumenta bastante a força coerciva pelo que é elemento de liga importante nos aços para ímans.

O tungsténio diminui a resistência à oxidação a quente.

O seu elevado peso específico explica o aumento do peso específico dos aços rápidos e dos aços para trabalhar a quente, em cuja composição entra, relativamente ao peso específico dos outros aços.

#### (9) COBALTO - Co

O cobalto não forma carbonetos. Favorece a formação de grafite.

Opõe-se fortemente ao aumento do tamanho do grão a temperaturas elevadas, melhora a estabilidade do revenido e a resistência a quente pelo que entra na constituição dos aços rápidos, para trabalho a quente e refractários.

Em teores elevados aumenta a remanência, a força coerciva e a condutibilidade térmica pelo que é usado nos aços para ímans permanentes de alta qualidade.

Pela irradiação de neutrões, transforma-se em isótopo radioactivo ( $^{60}\text{Co}$ ) de longo período pelo que tem que se evitar a sua presença, mesmo como impureza, nos aços utilizados nos reactores nucleares.

Vamos referir seguidamente algumas características de outros elementos que embora menos frequentemente, também surgem na composição dos aços. Como se verá, a maior parte são desoxidantes mas podem em certos casos beneficiar certas características dos aços assim como muitas vezes as podem prejudicar. Normalmente não aparecem nos aços para ferramentas.

#### (10) ALUMÍNIO - Al

É o desoxidante mais poderoso e de utilização mais corrente.

Fixando o azoto evita grandemente a sensibilidade ao envelhecimento. Em pequenos teores afina a grão. Dada a sua grande tendência para formar nitretos, que são muito duros, o alumínio é utilizado em aços de nitruração. Entra por vezes na composição de aços refractários dado que confere uma certa resistência à oxidação.

Reduz a zona  $\gamma$ . Como aumenta a força coerciva é usado nas ligas Fe-Ni-Co-Al para ímãs permanentes.

#### (11) AZOTO-N

A acção deste elemento tem aspectos úteis e prejudiciais. Como elemento de liga (acção benéfica) aumenta a zona  $\gamma$  e estabiliza a austenite. Nos aços austeníticos aumenta-lhes a resistência, o limite elástico e as características mecânicas a quente. Pela formação de nitretos pode obter-se uma película superficial dura e resistente ao desgaste (nitruração).

Como impureza (acção prejudicial) diminui a tenacidade em consequência de precipitações, provocando a sensibilidade ao envelhecimento e a fragilidade conhecida por doença de Krupp que se produz a 350-550° C. Nos aços sem liga ou de pequena liga provoca a corrosão intergranular, que origina fissuras.

#### (12) BERÍLIO-Be

Desoxidante enérgico, tem grande afinidade com o enxofre. Reduz fortemente a zona  $\gamma$ . É utilizado com o fim de se obter a têmpera estrutural (endurecimento por precipitação), diminuindo no entanto a tenacidade.

Raramente entra na composição dos aços.

#### (13) BORO - B

Este metalóide usa-se como elemento de adição nos aços para dispositivos de controle e de protecção de pilhas atómicas dado que tem uma larga secção eficaz de absorção de neutrões.

Melhora extraordinariamente a temperabilidade dos aços. Usa-se em aços com teores em carbono entre 0,30 e 0,50%. Para teores superiores a 0,60% de carbono não se recomenda a sua adição dado que a sua acção é inversamente proporcional ao teor em carbono. A sua influência no aumento da temperabilidade, para um aço com 0,40% de carbono é de 75 vezes a do Cr, 150 vezes a do Mn e 400 vezes a do Ni.

Embora a sua acção se dirija no sentido duma intensificação da acção dos outros elementos componentes do aço prefere-se usar teores mínimos em Boro e elevar-se o teor dos outros elementos.

#### (14) CÁLCIO - Ca

Usa-se como desoxidante juntamente com o Si. É também um dessulfurante. Melhora a resistência à oxidação a quente dos materiais condutores de calor.

#### (15) CÉRIO-Ce

Forte desoxidante, é também um dessulfurante e diminui o conteúdo em microinclusões.

Normalmente utiliza-se conjuntamente com as terras raras (lantano, neodímio, praseodímio). Em certos aços de muita liga melhora a sua aptidão para a deformação a quente e aumenta a resistência à oxidação a quente nos aços refractários.

#### (16) CHUMBO - Pb

É adicionado aos aços de fácil mecanização para tornos automáticos em teores de 0,2 a 0,5% uma vez que não se dissolvendo no aço se apresenta em suspensão fina o que permite a obtenção de uma peça curta e superfícies de corte perfeitas; melhora a maquinabilidade.

Deve notar-se que os teores acima indicados não exercem qualquer efeito sobre as características mecânicas dos aços.

#### (17) COBRE-Cu

Aumenta o domínio  $\gamma$ . Aumenta o limite elástico e a relação  $\frac{\sigma_s}{\sigma_b} = \frac{\text{limite elástico}}{\text{resistência à tração}}$ .

Para teores superiores a 0,3% pode causar endurecimento por precipitação. Aumenta a penetração de têmpera.

Nos aços inoxidáveis de muita liga adições superiores a 1% de cobre melhoram a resistência aos ácidos clorídrico e sulfúrico.

Só raramente entra na composição dos aços dado que o seu teor debaixo da película de calamina se enriquece e, penetrando nas juntas dos grãos, torna a superfície frágil aquando de uma deformação a quente.

Portanto, é acima de tudo um elemento prejudicial aos aços.

#### (18) ENXOFRE-S

De todas as impurezas é o enxofre aquela que origina as mais fortes segregações. O sulfureto de ferro provoca fissuras a quente uma vez que o seu eutético, que tem baixo ponto de fusão, envolve os grãos como se fosse uma rede reduzindo consideravelmente a sua coesão de tal modo que as juntas dos grãos tendem a separar-se aquando do forjamento. Esta situação agrava-se ainda mais pela acção do oxigénio. Por isso se procura fixar o enxofre pela adição de outros elementos, sobretudo do manganês, uma vez que o sulfureto de manganês tem o ponto de fusão elevado e reparte-se pelas juntas dos grãos em forma de pontos e não de rede; o sulfureto de manganês é a menos prejudicial de todas as inclusões.

O enxofre é incluído nos aços de fácil mecanização para tornos automáticos dado que os sulfuretos finamente dispersos rompem a coesão metálica e facilitam a maquinagem não só porque originam peças curtas mas também porque actuam como lubrificantes no gume cortante da ferramenta diminuindo a fricção entre a ferramenta e a peça a maquinar.

O enxofre aumenta a tendência à fissuração durante a soldadura.

#### (19) FÓSFORO-P

Na maioria dos casos é considerado com impureza prejudicial ao aço uma vez que tem tendência a formar segregações primárias durante a solidificação do lingote e, posteriormente, a originar segregações secundárias no estado sólido em virtude de reduzir a zona  $\gamma$ . Possuindo uma pequena velocidade de difusão nas zonas  $\alpha$  e  $\gamma$ , estas segregações são difíceis de eliminar. Como uma repartição homogénea do fósforo não é possível, prefere-se reduzir ao mínimo a sua presença nos aços.

Mesmo em teores pequenos o fósforo aumenta a sensibilidade à fragilidade por revenido. A fragilização aumenta com o teor em carbono, com a elevação da temperatura, de têmpera e com aumento do tamanho do grão donde resulta a fragilidade a frio e a sensibilidade ao efeito dos choques.

Nos aços de construção de pequena liga com teor em carbono de cerca. de 0,1 % o fósforo aumenta a resistência à tracção e à oxidação por acção atmosférica, especialmente em união com o cobre.

Nos aços austeníticos, adições de fósforo podem melhorar o limite elástico e produzir efeitos de precipitação.

#### (20) MAGNÉSIO - Mg

É um desoxidante e um dessulfurante. Este elemento é utilizado para obtenção de fundição esferoidal (com grafite esferoidal).

#### (21) NIÓBIO - Nb e TÂNTALO -Ta

Estes dois elementos apresentam-se sempre associados sendo utilizados em comum dado a dificuldade em os separar.

Aumentam o domínio  $\alpha$  e reduzem o domínio  $\gamma$ .

São fortes formadores de carbonetos pelo que são utilizados como estabilizadores nos aços resistentes aos ácidos, inibindo a corrosão intergranular.

Como o Nb aumenta a resistência a quente é adicionado nos aços refractários austeníticos.

O tântalo tem uma larga secção de absorção de neutrões pelo que se adiciona aos aços para reactores nucleares apenas o nióbio empobrecido em tântalo.

#### (22) SELÉNIO - Se

Este metalóide melhora a maquinabilidade dos aços de fácil mecanização para tornos automáticos ainda mais que o enxofre. Contrariamente, diminui menos que o enxofre a resistência à corrosão.

#### (23) TITÂNIO - Ti

Reduz fortemente a zona -1. Contribui para o afinamento do grão.

Em face da sua grande afinidade com o O, o N, o S e o C este elemento é um forte desoxidante, combinando-se também com o enxofre.

Sendo um grande formador de carbonetos é adicionado nos aços inoxidáveis para evitar a corrosão intergranular

Em teores elevados origina precipitações. É adicionado nas ligas para ímans permanentes dado que aumenta a força coerciva.

Tem grande tendência à formação de segregações e de estruturas em banda.

#### (24) ZIRCÓNIO - Zr

Diminui o domínio  $\gamma$ . Este elemento forma carbonetos. É um desoxidante, um desnitrurante e um dessulfurante. Nos aços com enxofre calçados de fácil mecanização para tornos automáticos são usadas adições de zircônio por terem um efeito favorável na formação de sulfuretos, evitando a fissuração a quente.

Finalmente vamos dar algumas características dos elementos considerados impurezas e cuja acção é sempre prejudicial às características dos aços.

#### (25) ANTIMÓNIO - Sb

Impureza prejudicial que diminui a tenacidade. Diminui o domínio  $\gamma$ .

#### (26) ARSÉNIO - As

Este elemento diminui a zona  $\gamma$ . Tal como o fósforo tem tendência a formar segregações cuja eliminação por recozido de difusão é muito

Aumenta a fragilidade por revenido, diminui a tenacidade e a soldabilidade. Não se usa como elemento de adição.

#### (27) ESTANHO - Sn

Impureza prejudicial. Diminui o domínio  $\gamma$ . Tem tendência a formar segregações. Tal como o Cu enriquece-se debaixo da camada de calamina e, penetrando nas juntas dos grãos, provoca fissuras e fracturas de soldadura.

#### (28) HIDROGÉNIO-H

Diminui o alongamento e a estricção, favorece a fragilização sem todavia aumentar o limite elástico e a resistência à tracção.

É o responsável pela formação de «flocos» e de linhas de segregações. O hidrogénio atómico produzido na decapagem introduz-se no aço e provoca chochos. A temperaturas elevadas descarboniza o aço.

#### (29) OXIGÉNIO - O

A sua influência específica depende do tipo e da forma dos seus compostos assim como da sua repartição no aço.

Diminui as características mecânicas sobretudo a resiliência, especialmente no sentido transversal. Aumenta a tendência para a fragilização por envelhecimento e favorece a fissuração a quente.

#### (30) INFLUÊNCIA DOS ELEMENTOS DE LIGA NOS PONTOS CRÍTICOS DO DIAGRAMA DE EQUILÍBRIO Fe-C

Como se disse, cada um dos elementos de liga tem uma influência particular no deslocamento dos pontos críticos. As figuras seguintes pretendem mostrar essa influência.

Assim a Figura 9 mostra a influência de alguns elementos no deslocamento do ponto  $A_1$ . Por sua vez a Figura 10 mostra a influência do teor de vários elementos de liga sobre o teor em carbono correspondente à composição eutectóide dos aços.

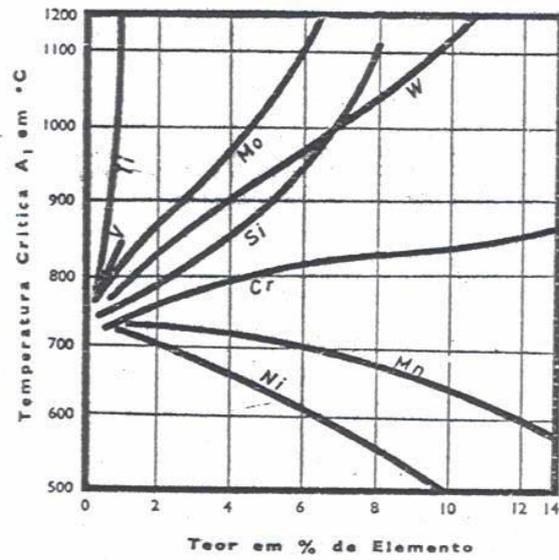


Figura 9

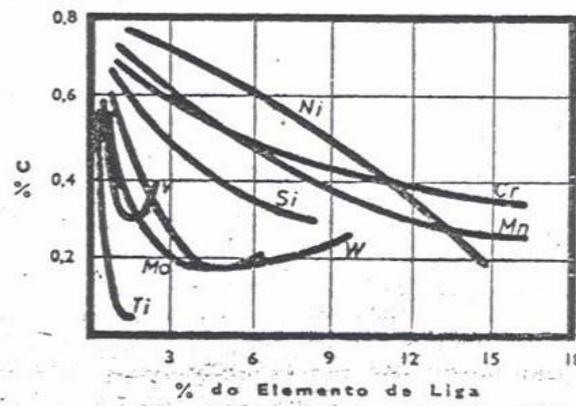


Figura 10

A Tabela 7 resume o efeito dos elementos de liga nas propriedades dos aços.

Elemento de liga	Características mecânicas							Várias flechas = maior influência													
	Dureza	Resistência	Limite elástico	Alongamento	Estricção	Resiliência	Elasticidade	Resist. mecânica a temper. elevadas	Velocidade de arrefecimento	Formação de carbureto	Resistência ao desgaste	Fabricabilidade	Maquinação	Calaminação	Nitrabilidade	Resistência à corrosão	Histerese	Permeabilidade	Força coercitiva	Remanescência	Perda de Watt
Silício	↑	↑	↑	?	?	↑	↑	↑	↑	↑	↑	↑	↑	↑	↑	↑	↑	↑	↑	↑	↑
Manganês nos aços perliticos	↑	↑	↑	?	?	↑	↑	?	↑	↑	↑	↑	↑	↑	↑	↑	↑	↑	↑	↑	↑
Manganês nos aços austeniticos	↑	↑	↑	↑	↑	↑	↑	↑	↑	↑	↑	↑	↑	↑	↑	↑	↑	↑	↑	↑	↑
Crômio	↑	↑	↑	↑	↑	↑	↑	↑	↑	↑	↑	↑	↑	↑	↑	↑	↑	↑	↑	↑	↑
Níquel (em aços perliticos)	↑	↑	↑	?	?	↑	↑	↑	↑	↑	↑	↑	↑	↑	↑	↑	↑	↑	↑	↑	↑
Níquel (em aços austeniticos)	↑	↑	↑	↑	↑	↑	↑	↑	↑	↑	↑	↑	↑	↑	↑	↑	↑	↑	↑	↑	↑
Alumínio	↑	↑	↑	↑	↑	↑	↑	↑	↑	↑	↑	↑	↑	↑	↑	↑	↑	↑	↑	↑	↑
Tungstênio	↑	↑	↑	↑	↑	↑	↑	↑	↑	↑	↑	↑	↑	↑	↑	↑	↑	↑	↑	↑	↑
Vanádio	↑	↑	↑	↑	↑	↑	↑	↑	↑	↑	↑	↑	↑	↑	↑	↑	↑	↑	↑	↑	↑
Cobalto	↑	↑	↑	↑	↑	↑	↑	↑	↑	↑	↑	↑	↑	↑	↑	↑	↑	↑	↑	↑	↑
Molibdênio	↑	↑	↑	↑	↑	↑	↑	↑	↑	↑	↑	↑	↑	↑	↑	↑	↑	↑	↑	↑	↑
Cobre	↑	↑	↑	↑	↑	↑	↑	↑	↑	↑	↑	↑	↑	↑	↑	↑	↑	↑	↑	↑	↑
Enxofre	↑	↑	↑	↑	↑	↑	↑	↑	↑	↑	↑	↑	↑	↑	↑	↑	↑	↑	↑	↑	↑
Fósforo	↑	↑	↑	↑	↑	↑	↑	↑	↑	↑	↑	↑	↑	↑	↑	↑	↑	↑	↑	↑	↑

Tabela 7 Efeito dos elementos de liga nas propriedades dos aços

## **1.5.2 Microestrutura dos Aços Ligados**

Os microconstituintes que podem estar presentes nas estruturas dos aços ligados são os mesmos dos aços não ligados, isto é, ferrite, cementite, perlite, bainite martensite, austenite, carbonetos mais ou menos complexos e em certos aços fortemente ligados, o eutético ledebúritico. A formação e permanência de um ou de outro destes constituintes ou de mais de um dependerá da natureza e do teor dos elementos presentes e da sujeição ou não a tratamentos térmicos.

Embora seja difícil prever a microestrutura fundamental de um aço em função do elemento de liga, é possível fazer uma previsão aproximada com recurso aos diagramas de Guillet, que mostram a microestrutura de aços ligados deixados arrefecer em ar calmo após austenização, em função do teor de carbono e do teor do elemento de liga. A figura apresenta alguns desses diagramas; as zonas a tracejados apresentam faixas de difícil definição entre os microconstituintes contíguos ou zonas de aparecimento de produtos intermediários.

Quando o elemento de liga é um elemento carborígeno, a área dos carbonetos aparece na região superior direita do domínio austenítico, podendo também invadir o domínio de outros constituintes, aparecendo então os carbonetos precipitados numa matriz cuja estrutura será um destes constituintes.

### **1.5.2.1 Aços Perlíticos**

São aços em que a fase perlítica é predominante. Pertencem a este grupo de aços os seguintes:

- Aços com Si
- Aços com Ni até 10% e baixo teor de C
- Aços com Mn até 5% e baixo teor de C
- Aços com Cr ~2 a 6% com elevado teor de C

Estes aços com Cr ~2 a 6% são extremamente sensíveis à velocidade de arrefecimento e à temperatura de austenização antes da têmpera. Esta sensibilidade resulta do aumento de solubilidade de carbonetos na austenite, com a temperatura; O Cr dissolvido eleva  $A_c$  e  $A_r$ , mas com velocidades rápidas de arrefecimento abaixa  $A_r$ , mas com velocidades rápidas de arrefecimento com o conseqüente endurecimento do aço. A percentagem de carbono na perlite destas ligas é inferior à existente nos aços de carbono (o eutectoide está deslocado para a esquerda), havendo uma maior quantidade de cementite livre nos aços de elevado teor de carbono, o que quando o aço é correctamente tratado, faz com que a cementite apareça globulizada.

### **1.5.2.2 Aços Ferríticos**

São aços em que a fase ferrítica é predominante como resultado da presença de elevados percentagens de elementos alfa-géneos como o Cr e o Si e baixo teor de C. Estes aços não são temperáveis porque o ferro não sofre transformação alotrópica por arrefecimento.

Pertencem a este grupo de aços os seguintes:

#### **Aços com elevados teores de Si**

Nestes aços o Si provoca um endurecimento da ferrite

### Aços com Cr

- Cr ~ 13%
- Cr ~ 17%
- Cr ~ 25 a 30% (o aço com Cr conhecido é o de teor Cr ~25%)

São resistentes a corrosão em diversos meios agressivos sob tensão, como por exemplo na presença de íões  $\text{Ce}^-$ .

Para teores de  $22 < \% \text{Cr} < 30$  com Si e Al formam-se um importante grupo de aços refractários.

Os aços de Cr ~25 a 30% Cr são usados em altas temperaturas resistindo a compostos de enxofre.

Estes aços têm tendência para um crescimento excessivo do grão, o que pode ser impedido pela adição Nb e Mo. São aços de elevada resistência à fluência.

#### **1.5.2.3 Aços Martensíticos**

São aços que por arrefecimento no ar calmo dão lugar à estrutura martensítica não apresentado o perigo de fissuras de têmpera. São designados por aços autotemperantes. Os grupos mais significativos de aços são:

Aços com Mn: Mn ~ 6 a 12% com baixo teor de C

Aços com Ni: Ni ~13 a 25% com baixo teor de C

Neste grupo incluem os aços de envelhecimento martensítico (“aços maraging”) – 18 a 25% Ni, C <0.03% e adições de pelo menos dois elementos de entre os seguintes: Al, Ti, Co, Mo. Estes aços de envelhecimento martensítico são usados depois da estrutura martensítica de estrutura CCC, de dureza relativamente baixa ser sujeita a um tratamento de envelhecimento a 480° C durante 3h, conseguindo-se boa ductilidade associada a elevada resistência. Têm uma elevada tenacidade à rotura devido à combinação de um grão fino de martensite com uma elevada densidade de deslocações que conduz, no envelhecimento, a uma precipitação fina. Ni ~ 5% com elevados teores de C.

#### Aços com Cr

- $0.2\% < \text{Cr} < 8\%$  com baixo teor de C
- $10\% < \text{Cr} < 20\%$  com elevado teor de C

#### Aços com Ni e Cr

- $4\% < \text{Ni} < 6\%$                        $1.5\% < \text{Cr} < 3\%$                        $0.1\% < \text{Cr} < 0.4\%$

#### **1.5.2.4 Aços ledebúriticos**

São ligas complexas devidas à adição de W, Mo, Cr, Co, V em elevadas percentagens e de forma mais rara outros elementos como Ti e Nb. Os objectivos destas ligações são:

- Estabilizar e endurecer a martensite
- Impedir o crescimento do grão austenítico

Os elementos de liga encontram-se essencialmente sob a forma de carbonetos ou compostos intermetálicos.

Estes aços são frágeis, mas muito resistentes ao desgaste. O quadro mostra algumas composições de aços ledeburíticos usados em ferramentas de corte e maquinaria a alta velocidade e por arranque de apara, com buris, brocas, fresas, etc.

**Tabela 8 Composição química de alguns aços ledeburíticos**

%	C	W	Cr	V	Mo
	0.75	18	4	1.5	1
	0.75	12	4	2	2
	0.75	6	4	1.5	6
	0.85	2	4	1.5	8
	1.20	11	4.5	3	0.5

As propriedades destes aços designadamente a dureza são melhoradas por tratamentos térmicos.

A designação destes aços provem do facto de durante o fabrico a partir dos lingotes, o complexo eutético de carbonetos e austenite tornar estes aços assimiláveis ao ferro fundido branco.

#### **1.5.2.5 Aços de baixa liga**

Os aços de baixa liga, são grosseiramente definidos como aços cujos os elementos da liga têm teores inferiores a 5%.

Os elementos de liga mais correntes são o Ni, Cr e Mo. As propriedades mais procuradas em aços de baixa liga são a dureza e a resistência à tracção, o que se consegue por tratamentos térmicos e por variação do teor de carbono.

Tal como nos aços não ligados, o carbono tem um papel fundamental pois combinando-se com os restantes elementos de liga forma carbonetos metálicos finamente divididos, que melhoram as propriedades mecânicas dos materiais.

De notar que a aplicação de tratamentos térmicos de endurecimento prejudica a tenacidade a fractura, o que poderá ser inconveniente. Existem aços de liga para aplicações de baixa temperatura (reservatórios de pressão e tanques), com um teor de carbono de 0.12 a 0.20% e teores de Ni de 2.25, 3.50 ou 9% (este último já fora da classificação arbitrária de baixa liga).

Também justificam uma referência aços com 0.5 a 4.5 Si, designados como aços para electricidade, com boas propriedades magnéticas (elevada permeabilidade magnética), elevada resistência eléctrica e baixa perda por histeresis e por correntes de Foucault (aplicável em transformadores, motores e geradores).

#### **1.5.2.6 Aços Vazados**

A natureza geral e característica dos aços vazados é comparável à dos aços de caso formação plástica; aços vazados e forjados de composição química equivalente respondem de maneira semelhante ao tratamento térmico e têm propriedades semelhantes; à maior

diferença é que o aço vazado tende para uma maior isotropia, isto é, tende para uma maior uniformidade nas propriedades, que no caso das ligas forjadas dependem da direcção ou orientação do trabalho a frio ou a quente.

Embora sejam divididos como aços vazados de baixo, médio e elevado teor de carbono, a sua especificação faz-se através das propriedades mecânicas, principalmente a tensões de rotura à tracção.

Uma das formas mais correntes de especificar aços vazados, é a norma DEN 1681, em que os aços são designados por **GSxx**, sendo a indicação numérica correspondente ao valor mínimo da tensão da rotura.

### **1.5.2.7 Aços de alta resistência**

Esta classificação arbitrária compreende os aços de baixa liga e alta resistência (BLAR), os aços temperados e revenidos de alta resistência e os aços extra resistentes. As tensões de rotura vão de 480N/mm<sup>2</sup> mas BLAR a 2700 N/mm<sup>2</sup> nos aços extra resistentes.

#### **1.5.2.7.1 Aços BLAR**

Em geral contêm 0.05 a 0.33%C e 0.2 a 1.65% de Mas além de pequenas adições de outros elementos como Cr, Co, Cu, Mo e Ni, que se dissolveram numa estrutura ferrítica, que permite uma elevada tensão de rotura à tracção e elevada resistência à corrosão, pelo menos pelos agentes atmosféricos. Também têm uma elevada tensão de cedência, e boa soldabilidade

#### **1.5.2.7.2 Aços Temperados e Revenidos de Alta Resistência**

Estes aços têm um baixo teor de carbono, até 0.2% com uma tensão de cedência de 552 N/mm<sup>2</sup> a 860N/ mm<sup>2</sup>.

Como a designação indica, são fornecidos com tratamentos térmicos, o que limita o posterior trabalho a frio, e a soldadura.

Estes aços são ainda bastante recentes, existindo pouca informação disponível sobre eles.

As propriedades mecânicas são significativamente influenciadas pela área e configuração da secção resistente. A dureza é controlada pelos elementos de liga. De uma forma grosseira podemos dizer que um aumento no teor dos elementos de liga, compensam o aumento da secção, referente à tensão de rotura e tenacidade.

#### **1.5.2.7.3 Aços extra Resistentes**

São aços com a mais elevada tensão de rotura, que pode exceder 1400 N/mm<sup>2</sup>, atingindo 2700 MPa, foram inicialmente desenvolvidos para a indústria aeroespacial e têm uma elevada razão resistência/ peso.

Existem mais de 100 variedades, algumas diferindo bastante entre si em composição e no modo porque essa resistência elevada é obtida.

Alguns destes aços derivaram dos aços de baixa liga com médio teor de carbono, como os aços Cr Mo (AISI 4130) e Cr Ni Mo (AISI 4340). São bastante usados onde sejam pretendidas secções espessas, porque têm boas características mecânicas, com preços relativamente baixos.

Alguns aços inoxidáveis são também capazes de elevadas tensões de rotura – superiores a 1400 MPa – dentro dos aços martensíticos (AISI 410, 420, 431), austeníticos laminados a frio e semiausteníticos.

Os aços de envelhecimento martensítico ou “maraging”, com teores de Ni até 25% mais Co e Mo e muito baixo teor de C (< 0.03%) são martensíticos na condição de recozido, mas ainda assim são conformáveis, maquináveis e soldáveis (Tabela 9).

Por um simples tratamento de envelhecimento a 480° C durante 3 h podem-se obter tensões de cedência de mais de 2200 MPa, embora com baixa ductilidade, contudo, sem características frágeis. Este tratamento permite a precipitação de Ni<sub>3</sub> Mo e de compostos intermetálicos com o Al e o Ti; por ser um tratamento a baixa temperatura quase não provoca distorções e alterações dimensionais em peças de precisão, pelo que estes aços são adequados para peças de grandes dimensões, forjadas, maquinadas com tolerâncias apertadas que exijam ser soldadas. O aço 18 Ni oferece ainda uma excelente resistência à corrosão pela água do mar.

O trabalho de chapas mais espessas torna-se difícil porque a parte central é dura. Os aços de envelhecimento martensítico são usados em indústrias de ponta, estruturas, matrizes, etc.

Outros aços extra resistentes, como por exemplo o aço Cr Ni Mo designado Astrolloy, com 0.24%C, é endurecido ao ar atingido uma tensão de cedência de 1250 MPa em secções espessas, quando normalizado e revenido a 260° C. Outra liga, Cr Mo Co, por ser endurecido por precipitação e envelhecimento, atingido níveis de tensão de cedência de 1700 MPa.

Finalmente, outros aços temperados e revenidos também adquirem elevadas tensões de tracção: o aço 9 Ni 4Co e com 0.20 a 0.30% C atinge uma tensão de cedência de 2070 MPa e uma tensão de rotura de 2400 MPa.

Por curiosidade, menciona-se que o aço de maior tensão de rotura (4140 MPa), aplica-se em arame para instrumentos musicais, tem uma composição que inclui W, Mo, Cr, V, Co e 0.5% C e a sua elevada ductilidade é obtida por controle no nível dos carbonetos.

Tabela 9

Propriedades mecânicas do aço maraging 18% Ni  
depois dos tratamentos térmicos

Tensão de cedência nominal $\sigma_c$ (daN/mm <sup>2</sup> )	140 (a)		175		210 (b)	
Barra	480°C, 3 h (c)		480°C, 3 h (c)		480°C, 3 h	
			vazado ao ar	vazado no vácuo	(directamente envelhecidos)	
$\sigma_c$ (daN/mm <sup>2</sup> )	135/150		170/190		209/215	
$\sigma_r$ ( " )	140/156		177/195		211/217	
$\epsilon$ (%)	14/16		10/12		12	
K (m Kgf) :						
20°C	8,4/15,4		2,5/3,6		3,5/4,2	
- 195°C	4,2/8,4		1,7/2,1		-	
$\sigma_D$ (daN/mm <sup>2</sup> ) (fadiga)	67		67/160		-	
	480°C	50% TF	480°C	50% TF +	480°C	50% TF
Chapa fina (d)	3 h (c)	+ 480°C, 3 h (c)	3 h (c)	480°C, 3 h (c)	3 h (c)	+ 480°C 3 h (c)
$\sigma_c$ (daN/mm <sup>2</sup> )						
20°C	144	173	178	202/205	198/205	212/219
- 195°C	202	211	-	-	-	-
$\sigma_r$ (daN/mm <sup>2</sup> )						
20°C	159	174	185	205/207	205/208	212/221
- 195°C	202	215	-	-	-	-
$G_c$ (mm Kgf/mm <sup>2</sup> )						
20°C	33,6	30	35,8	22,2/30,2	27/30,5	19,7/32,2
- 195°C	48,7	32,2	-	-	-	-

(a) vazado ao ar;

(b) vazado no vácuo;

(c) recozido 1 h, 815°C ; trabalhado a frio, envelhecido como indicado;

(d) todos os vazamentos no vácuo; dados baseados em provetes entalhados de 25 mm, NASA, esp. = 15 mm, raio na raiz do entalhe = 0,0127 mm,  $K_t > 20$ .

TF = trabalho a frio (como se vê o TF não afecta muito as propriedades mecânicas).

### **1.5.2.8 Aços Inoxidáveis**

Os aços inoxidáveis constituem uma grande família de ligas Fe Cr, especialmente conhecidas pela sua resistência à corrosão motivada pela acção dos agentes atmosféricos e agentes químicos; são também identificados por não apresentarem o vulgar tipo de "ferrugem". Esta capacidade de resistência à corrosão é atribuível à formação de um filme superficial de óxido de cromo que se forma na presença de oxigénio; este filme é essencialmente insolúvel, auto-regenerado e não é poroso. A formação do filme de óxido de cromo requer que a liga contenha pelo menos 12% de Cr. O teor de Cr pode ir até 30%, dependendo das aplicações. Os outros elementos usados nestas ligas são o Ni, Mo, Si, Al, Cu, Co, Nb, Ta, Ti, N, etc.

Estas ligas são também resistentes aos efeitos do calor, mantendo as propriedades mecânicas a temperaturas mais elevadas que outros aços.

Quanto à microestrutura, os aços inoxidáveis classificam-se em: austeníticos, ferríticos e martensíticos endurecidos por precipitação.

De notar que a designação corrente de "aço inoxidável" não é totalmente correcta, pois o grau de oxidação é largamente dependente do ambiente ou fluido em presença; toma-se assim mais adequado falar em "aços resistentes à corrosão".

As classificações mais correntes destes aços, são as da AISI e as constantes da norma DIN 17440; a Tabela 10 apresenta alguns elementos sobre aços inoxidáveis mais correntes em aplicações navais.

#### **1.5.2.8.1 Resistência à corrosão**

Uma vez que os aços inoxidáveis devem a sua resistência à corrosão, à presença de uma camada de óxido, que torna os aços passivos, é importante saber os factores que promovem a sua formação: como já foi dito anteriormente, o Cr contribui definitivamente para as propriedades anticorrosivas; o mesmo acontece com o Al, o Si e o Ni em teores de 6 a 8%, que alargam a gama de ambientes possíveis (além de compensarem as propriedades degradadas pelo cromo). O Mo é benéfico nas qualidades dos aços austeníticos e martensíticos, aumentando a resistência à corrosão por picadas na presença de água salgada.

Quando o teor de carbono é elevado (próximo dos 0.20%) produz precipitação de carbonetos nas fronteiras dos grãos, se a liga for aquecida durante longos intervalos de tempo entre os 425 e os 870° C; esta precipitação reduz a resistência à corrosão a temperaturas ordinárias.

A resistência à corrosão em ambientes quimicamente agressivos depende da presença de condições oxidantes. Têm boa resistência aos ácidos nítrico e cromo, mas não são atacados pelos ácidos hidrocloreto e hidrófluorico, que são redutores por natureza. Alguns são atacados por ácido sulfúrico, outros não. Os aços inoxidáveis são atacados por sais halogenados - cloretos, brometos, fluoretos e iodetos.

Como se disse anteriormente, a manutenção das boas qualidades em serviço exige a preservação da camada de óxido, por conseguinte as superfícies devem ser limpas, macias, livres de contaminação por substâncias estranhas como sujidade, gordura e partículas metálicas provenientes de operações de fabrico.

### 1.5.2.8.2 Função dos principais elementos de liga nos aços inoxidáveis

#### (a) Crómio

O Cr desempenha um papel fulcral nos aços inoxidáveis. Como se disse, é necessário um teor de 12% Cr para que o aço adquira superficialmente um carácter passivo, tornando-o resistente ao ataque de diversos meios. À medida que aumenta o teor de Cr, aumenta a sua resistência à corrosão; teores de 25% de Cr conferem ao aço resistência à oxidação a alta temperatura.

O Cr é um elemento alfacéneo e portanto tende a suprimir a reacção  $\alpha - \delta$  (ferrite - austenite), conforme se pode verificar na Figura 11

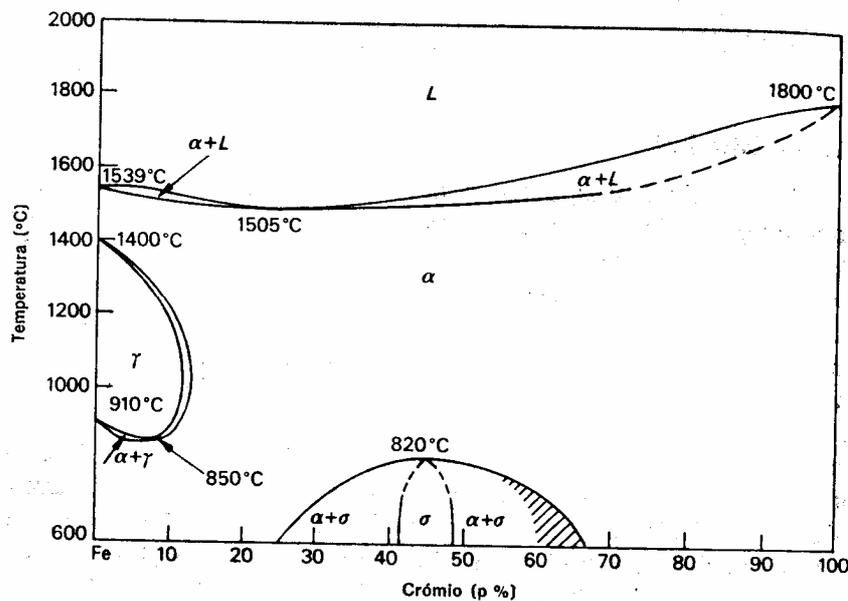


Figura 11

#### (b) Carbono

O carbono é um elemento gamageneo, provocando um alargamento do domínio austenítico e originando a formação de diversos tipos de carbonetos.

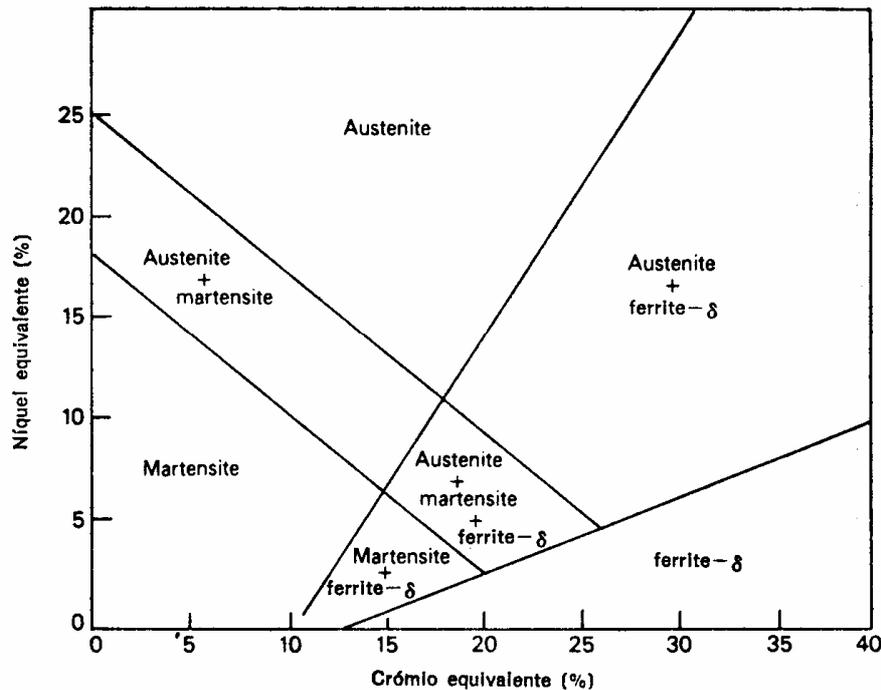
#### (c) Níquel

O Ni, como o carbono é um elemento estabilizador do domínio austenítico, aumentando temperabilidade do aço.

A existência de Ni e Cr nos aços provoca estruturas diferentes consoante os respectivos teores, bem como o teor de C.

Uma forma de apresentar a relação dos teores de Ni, Cr e teores equivalentes de outros elementos, é a correspondente microestrutura é o diagrama de Schaeffler (Figura 12)

O níquel aumenta a resistência à corrosão.



**Figura 12 Diagrama de Schaeffer**  
 $Cr\ eq = \%Cr + \%Mo + 1,5x\%Si + 0,5x\%Co$   
 $Ni\ eq = \%Ni + 30x\%C + 0,5xMn$

(d) Molibdénio

O molibdénio é um elemento alfacéneo desempenhando um papel semelhante ao do Cr. O Mo é particularmente efectivo em meios contendo  $Cl^-$  ou ácidos redutores, em relação aos quais a sua passividade é mais elevada do que o crómio.

O Mo aparece nos aços inoxidáveis austeníticos; contribui para um aumento da ductilidade da austenite a temperatura elevada, reduzindo a susceptibilidade do aço à fissuração a quente, durante a operação de soldadura.

(e) Outros

Mn - aumenta a estabilidade da austenite nos aços Ni Cr

Si - aumenta a resistência à oxidação a temperaturas elevadas mas reduz a soldabilidade

Al - semelhante ao Si

Ti - é um forte formador de carbonetos; evita a formação de carbonetos de crómio de precipitação indesejável nas fronteiras dos grãos. Aumenta portanto a soldabilidade dos aços inoxidáveis

Cb, Nb - acção semelhante ao Ti

### 1.5.2.8.3 Propriedades dos Aços Inoxidáveis

Além das já referidas propriedades de resistência à corrosão, os aços inoxidáveis oferecem uma larga gama de propriedades mecânicas quer na condição de recozido, quer na condição de encruado ou de temperado.

Os aços inoxidáveis austeníticos com teores de C inferiores a 0.15% e teores de Cr superiores a 16% apresentam um excelente comportamento a temperaturas, sendo suplantados pelas superligas e pelos metais refractários. Deve-se notar que devido aos elevados coeficientes de expansão e à baixa condutibilidade térmica, a ductilidade a temperaturas elevadas e a resistência ao choque térmico, são fracos.

Os aços austeníticos têm elevada ductilidade na condição de recozido e mantêm boa ductilidade e tenacidade à fractura a baixas temperaturas até  $-195^{\circ}\text{C}$ . Em geral não são magnéticos, podendo nalguns casos ter algum magnetismo; tornam-se mais magnéticos após trabalho a frio intenso.

Os aços inoxidáveis são conformáveis a frio sendo usados em estampagem; não sofrem transformação quando aquecidos ou arrefecidos logo não são temperáveis, isto é, a sua estrutura austenítica não pode ser transformada por tratamento térmico.

A deformação a frio provoca encruamento.

As peças devem ser usadas com bom acabamento, com superfície brilhante polida, ou equivalente.

Os aços inoxidáveis ferríticos têm teores de Cr compreendidos entre 10.5 e 27%; tem baixos teores de carbono, não são endurecidos nem revenidos por tratamento térmico e são apenas moderadamente endurecidos por trabalho a frio. São magnéticos, mantêm a sua microestrutura básica até ao ponto de fusão e mantêm um nível de propriedades mecânicas aceitáveis até  $-40^{\circ}\text{C}$ . Têm uma tensão de rotura à tracção relativamente elevada.

Os aços inoxidáveis ferríticos também devem ser usados polidos.

Os aços inoxidáveis martensíticos contem 11.5 a 18% de Cr, além de pequenas percentagens de outros elementos. São aços magnéticos a sua estrutura pode ser transformada, logo podem ser temperados e revenidos por tratamento térmico e têm elevada resistência, boa tenacidade e dureza, quando temperados e revenidos; na situação de recozidos podem ser forjados; mantêm boas propriedades mecânicas até  $-40^{\circ}\text{C}$ .

São aços menos resistentes à corrosão que os ferríticos e os austeníticos. Estes aços inoxidáveis também devem ter acabamento polido ou esmerilado.

Os aços inoxidáveis endurecidos por precipitação, de conformação plástica têm uma elevada resistência, obtida por tratamentos térmicos e com temperaturas relativamente baixas, o que favorece a ausência de distorções em peças de precisão.

A composição destes aços permite a têmpera por dois mecanismos diferentes; transformação da austenite em martensite ou tratamento de envelhecimento que precipita os componentes intermetálicos duros, fazendo simultaneamente um revenido à martensite.

Dum modo geral todas as qualidades de aços inoxidáveis são maquináveis, mas os martensíticos são os melhores.

Os aços vazados com igual composição, têm propriedades mecânicas idênticas aos de conformação plástica.

A Tabela 10. apresenta a composição química e as propriedades mecânicas de alguns aços inoxidáveis mais correntes em engenharia naval.

**Tabela 10 Aços Inoxidáveis - Composição química e propriedades mecânicas (alguns aços adequados para aplicações navais)**

DESIGNAÇÃO		COMPOSIÇÃO QUÍMICA								$\sigma_r$ (y)	$\sigma_p$ (0.2%)	$E_r$ % (50mm)	Redução de Área %	Hr	$\sigma_D$	$\sigma_f$ (h)	$\sigma_r$ -185°C	Resil. [m.N] 20°C	Izod -185°C
AISI	DIN 17440	max C	$C_r$	$N_i$	max $M_n$	$M_o$	max $S_i$	max P	max S										
304 (a) (x)	X5CrNi 18/9	0,08	19-20	8-12	2		1	0.045	0.03	483-621	172-276	50-60	60-75	B 80	250	140	155	152	152
304L (a) (x)		0,03	18-20	8-12	2		1	0.045	0.03	483-621	172-276	50-60	60-75	B 76	250	140	155	152	152
316 (a) (x) (b)	X5CrNiMo 18/10 X5CrNiMo 18/12	0,08	16-18	11-14	2	2-3	0.75	0.03	0.03	552-655 2000 (f)	207-310	40-60	55-70	B 80	280	180	1170	152	
316 L (x)	X2CrNiMo 18/10	0,03	16-18	11-14	2		1	0.04		552-655	207-310	45-66	55-70	B 76	280	180	1170	152	
302 (a) (c) (b)	X12CrNiMo 18/8	0,15	17-19	8-10	2		1			586-621 760	255 500	50-60 10-20	65 -	B 80 B 240	240	140	155	152	152
321 (a) (x)	X10CrNiTi 18/9	0,08	17-19	9-12	2		1		(d)	600	240	55	65	B 80					
347 (a) (x)	X10CrNiNb 18/9	0,08	17-19	9-12	2		1		(e)	635	240	50	65	B 84	280	230	1400	152	132
430 (a) (y)		0,12	16-18		1		1	0.04	0.03	460	320	30	60	B 82	280	60	630	49	3
431 (a) (z)		0,20	16-19	1.25-2.0	1		1	0.04	0.03	862	655	20	60	C 24					

Observações:  $\sigma_r$ ,  $\sigma_p$ ,  $\sigma_{T1}$ ,  $\sigma_f$  [Mpa] (d) %  $T_1 = 5 \times \% C$  min (g) À temperatura ambiente (x) Austenítico  
 Todos os aços desta tabela têm ~ 200 Mpa (e) %  $N_b = 8 \times \% C$  min (h) 0,0001% a 540°C (y) ferrítico  
 (a) Recozido (b) Encruado (c) Vulgarmente designado por 18-8 (f) arame e barra (l)  $A_3$  (z) Martensítico

**Tabela 11 Aços inoxidáveis - Algumas propriedades**

Classificação	302	304	304L	321	316	316L	430	431
AISI	302	304	304L	321	316	316L	430	431
Calor específico cal gr/°C (a)	0.125	0.123	0.123	0.126	0.120	0.120	0.126	0.122
Cond. térmica unid cgr a 100°C	0.038	0.034	0.034	0.039	0.038	0.038	0.056	0.049
Cond. térmica unid cgr a 500°C	0.051	0.048	0.048	0.051	0.055	0.055	0.061	0.062
Coef dilatação linear (/°C) (a)		18	18	17.5	17.3	17.3	10.6	10.9
Resistividade $\mu$ /cm <sup>3</sup> a 20°C	70	73	73	70	75	75	58	69
Coef de resist c/a temp 20a 100°C	0.0012	0.0011	0.011	0.0013	0.0011	0.0011	0.0016	0.0011
Temp. forjamento	1150 a 1200	1150 a 1200	1150 a 1200	1100 a 1150	< 1150	<1150	1050 a 1150	1150 a 1200
Temp acab. <sup>to</sup> forj. <sup>to</sup>			900	900	900	900	700	950
Amaciamentos	1000 a 1100	1050 a 1100	1050 a 1100	1000 a 1100	1000 a 1100	1000 a 1100	750 a 800	640 a 660
(a) entre 20 e 200°C								

## 1.6 Tratamentos dos Aços

Os tratamentos das ligas metálicas em geral e dos aços em particular, destinam-se a melhorar determinadas propriedades desses materiais ou a corrigir a degradação das propriedades resultantes dos processos de fabrico, como por exemplo a soldadura ou a deformação plástica.

Convém referir que, numa forma geral, a melhoria de determinadas propriedades corresponde à redução de outras.

Os tratamentos podem dividir-se da seguinte forma, em função da técnica de execução:

- Tratamentos mecânicos
- Tratamentos térmicos
- Tratamentos termomecânicos
- Tratamentos termoquímicos
- Tratamentos superficiais

### **1.6.1 Tratamentos mecânicos**

Correspondem a processos tecnológicos em que o material é sujeito a acções mecânicas normalmente aplicadas à superfície que provocam deformação plástica ou aumento de tensões. Podem-se dividir os tratamentos mecânicos nos seguintes grupos:

Com alteração da forma:

- a frio (por exemplo a estiragem)
- a quente (por exemplo o forjamento, estampagem e laminagem)

Os tratamentos mecânicos a frio são feitos abaixo da temperatura de recristalização. Temperatura de recristalização é a menor temperatura em que se forma núcleos de cristalização do material deformado permitindo o agrupamento de fragmentos dos grãos deformados, permitindo o rearranjo da microestrutura do aço.

Sem alteração da forma:

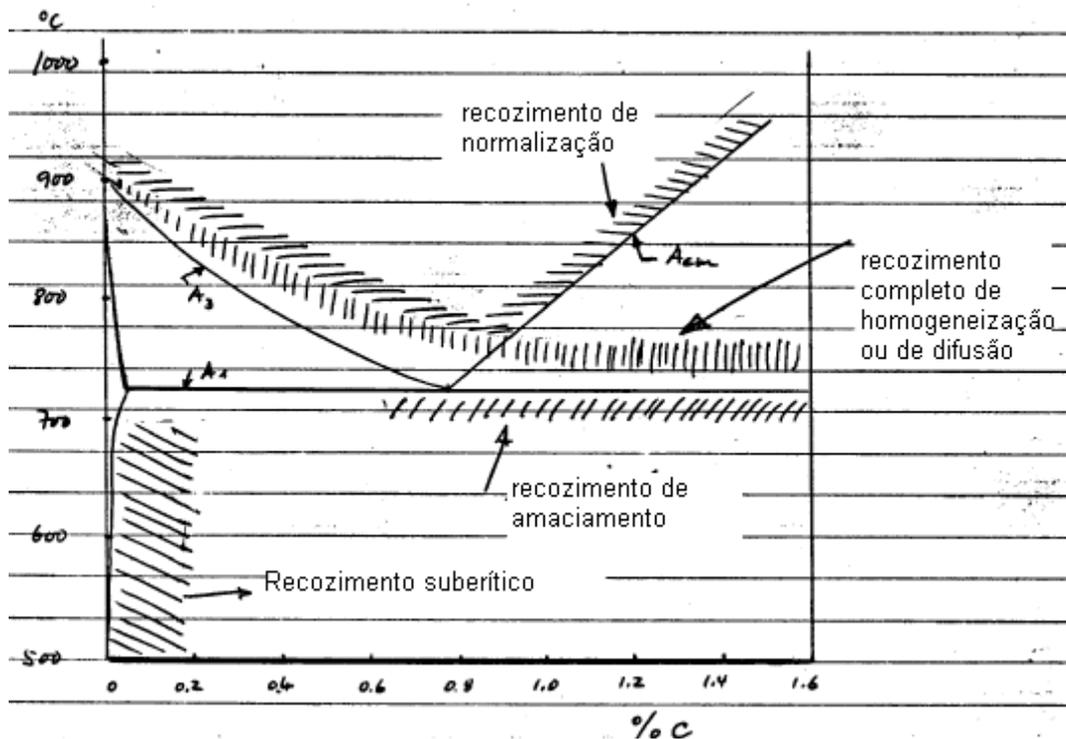
- martelagem
- grenalhagem
- “galetage” (compressão superficial com rolos)
- “overstressing”
- “understressing”

Os tratamentos mecânicos sem alteração de forma, são os tratamentos mecânicos por excelência e têm como objectivo fundamental a eliminação de tensões superficiais de tracção ou a imposição de tensões superficiais de tracção ou a imposição de tensões superficiais de compressão com grande interesse no aumento da resistência à fadiga do material.

### **1.6.2 Tratamentos Térmicos**

São processos em que o material, no estado sólido é sujeito a um ou mais ciclos de aquecimento e arrefecimento controlados.

Estes tratamentos provocam alteração da microestrutura, sem alterar a composição química do material. Os tratamentos térmicos permitem alterações de características mecânicas, mais significativas em materiais como os aços, porque o elemento Fe apresenta-se com diferentes formas cristalinas, consoante a temperatura, formas estas que podem ser retidas à temperatura ambiente, desde que o material seja sujeito a um adequado ciclo térmico.



**Figura 13 Diagrama esquemático dos tratamentos térmicos de recozimento em aços**

Os tratamentos térmicos mais vulgares são o recozimento, a tempera e o revenido.

**Recozimento** – consiste no aquecimento do material e manutenção de uma temperatura determinada (Temperatura de recozimento) seguido de arrefecimento lento (a uma velocidade prescrita) através do domínio da transformação perlítica. Existem diversas formas de recozimento que constam da figura e respectiva descrição.

**Têmpera** – consiste no aquecimento do material à temperatura de austenização (cerca de 50° superior a  $A_{C3}$  para os aços hipoeutectoides), seguido de um arrefecimento a uma velocidade igual ou superior à velocidade crítica da têmpera. Obtém-se estruturas bainíticas ou martensíticas.

**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  $A_1$  seguido de um arrefecimento lento ao ar ou em banho de óleo.

Existem outros tratamentos térmicos dos quais se destacam o melhoramento, que é um tratamento utilizado para os aços de construção e consiste numa temperatura seguida dum revenido a alta temperatura de modo a conseguir um aumento controlado de  $E_r$  e do coeficiente de estrição à custa dum abaixamento de tensão limite de elasticidade e da tensão de rotura.

**Recozido de difusão** – dá aos aços uma estrutura mais homogénea através duma repartição mais regular dos componentes solúveis, por difusão. A temperatura de recozimento é de cerca de 1050 a 1200° C (acima de  $A_{C3}$ )

**Recozido de normalização** – tem por fim a obtenção duma estrutura homogénea ou a regeneração do grão que ficou demasiado grande, criando assim uma estrutura preparatória favorável à têmpera.

**Recozido de amaciamento** – tem por fim dar ao aço uma estrutura globular que é mais conveniente para a maquinação com ou sem levantamento da apara.

**Recozido de distensão** – as peças difíceis de temperar ou que tenham tendência para se deformar na têmpera deverão ser submetidas, após o desgaste ou mediatamente antes do acabamento e um recozido de distensão a fim de eliminar as tensões desviadas trabalhos a quente ou a frio, à maquinação ou ao desempenho eventuais.

**Recozido intermédio** – tem por fim melhorar a maquinabilidade das peças cementadas, pela globalização da cementite.

**Recozido para aumentar o tamanho do grão** - consiste num aquecimento a uma temperatura superior a  $A_{c3}$ , com estágio mais ou menos longo a esta temperatura e arrefecimento lento para a obtenção dum grão grosseiro (normalmente a entrar por ter fraca tenacidade).

### **1.6.3 Tratamentos Termoquímicos**

São processos em que além dos ciclos de aquecimento e arrefecimento, tal como nos tratamentos térmicos, consistem também em modificar a composição química duma película superficial da peça. A alteração da composição química superficial é levada a cabo pela exposição da peça a uma atmosfera rica no elemento a combinar ou a difundir em conjunto com o aquecimento do material a uma temperatura conveniente. Os principais tratamentos termoquímicos são:

- Cementação
- Nitruração
- Carbonitruração (cementação + nitruração)
- Sulforização

Os três primeiros aumentava a dureza superficial; o último aumenta a resistência ao desgaste sem provocar aumento de dureza superficial. Em qualquer dos casos o núcleo da peça mantém a ductilidade inicial.

### **1.6.4 Tratamentos termomecânicos**

São combinações de tratamentos térmicos e mecânicos a que os aços se submetem numa determinada fase da sua produção, com o objectivo de elevar consideravelmente a sua resistência mecânica. Compreendem os seguintes tratamentos

- Ausforming
- Marsforming
- Marstraining

### **1.6.5 Tratamentos Superficiais (Revestimentos)**

São processos que têm por fim melhorar as qualidades das superfícies das peças através de um depósito de outro material ou através da alteração da composição superficial por formação de compostos químicos a baixas temperaturas.

Referem-se alguns dos tratamentos superficiais:

- Metalização
- Electrodeposição (zincagem, estanhagem, niquelagem, cadmiagem, cobragem, cromagem a cromoduro)
- Combinação química (fosfotização)

## 1.7 Tecnologia de Processamento dos Aços

### 1.7.1 Soldabilidade dos Aços

A soldabilidade mede a aptidão dos materiais e respectivas soluções de função por soldadura para a ocorrência de ligações eficientes e de qualidade. Tem dois aspectos distintos:

- Facilidade de executar uma junta eficaz, livre de anomalias como fissuras ou possibilidades
- Capacidade de executar soldaduras num material, com adequadas propriedades para a aplicação que se pretende

#### 1.7.1.1 Soldabilidade metalúrgica

Conceito do carbono equivalente (referente a aspectos metalúrgicos)

$$C_e = \% C + \frac{Mn}{6} + \frac{Cr + Mo + V}{5} + \frac{Cu + Ni}{15}$$

- Se  $CE < 0.40$  → aços soldáveis a frio
- Se  $CE > 0.40$  → requerem preaquecimento
- Se  $CE > 0.70$  → Aços dificilmente soldáveis, mesmo com preaquecimento

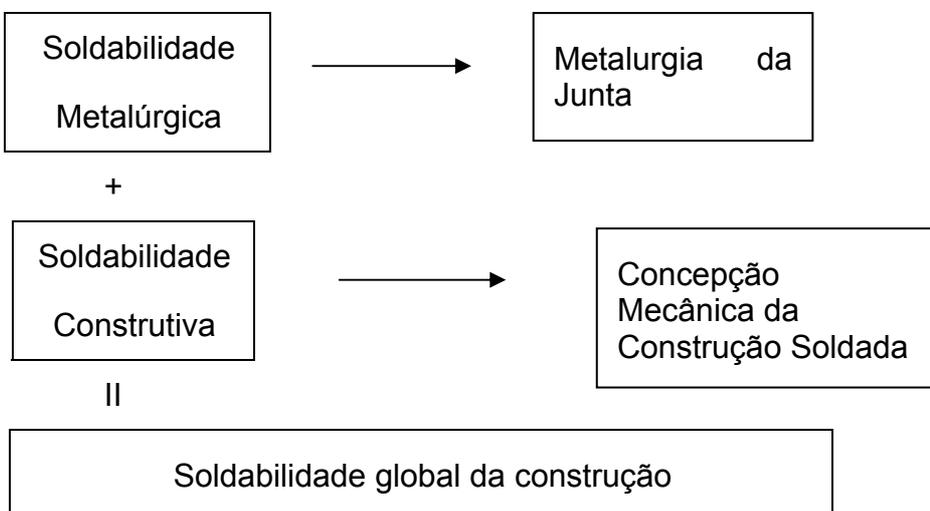
Conceito do carbono equivalente (compensado no que se refere à espessura)

$$CE = CE + 0.0025e \quad e = \text{espessura em mm}$$

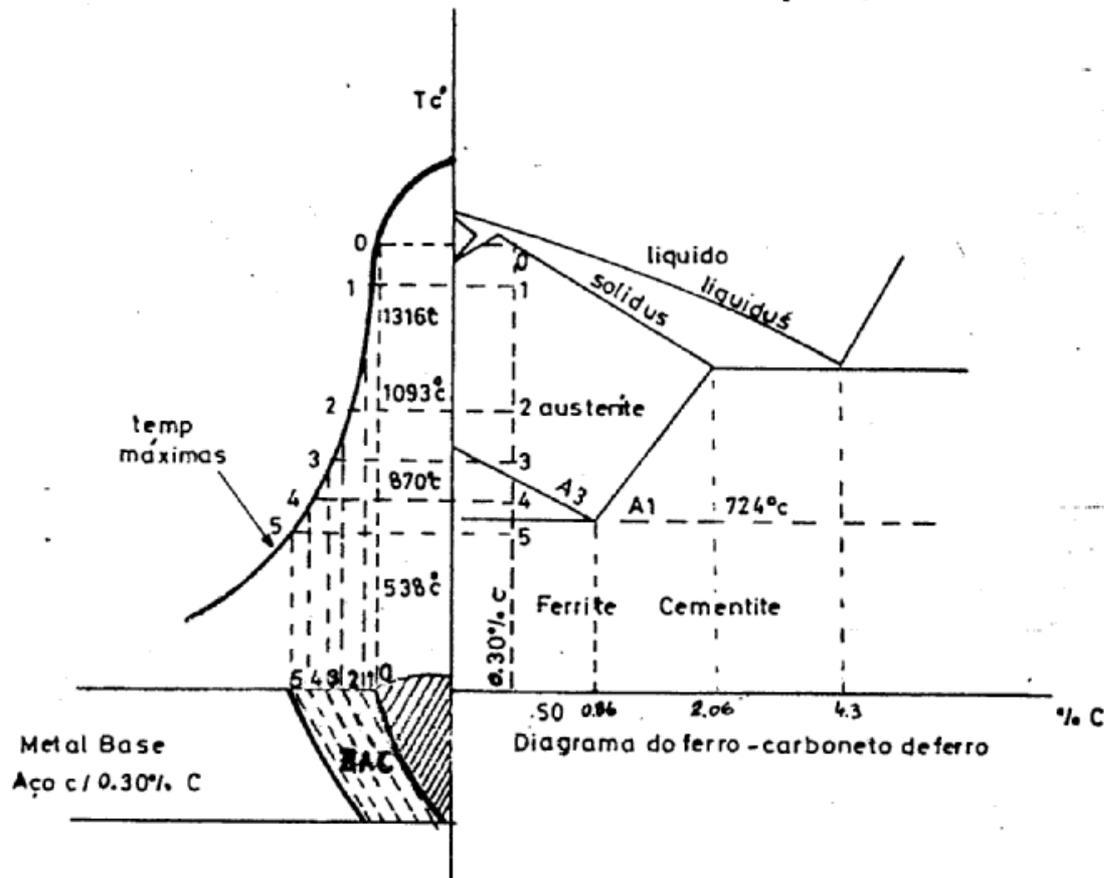
Se  $CEC > 0.50$  é difícil definir a qualidade da soldadura

#### 1.7.1.2 Soldabilidade Construtiva

Refere-se à concepção mecânica da construção soldada.



## A ZONA AFECTADA PELO CALOR (ZAC)



Relação entre as temperaturas nas várias regiões de soldadura e o diagrama de fase Ferro / carbono (exemplo)

- Ponto 0. Temperatura muito próxima da linha *solidus*. Zonas de fusão dispersas.
- Ponto 1. Aquecimento acima de 1300°C. A austenite formada tem grãos grosseiros, porque há um crescimento dos grãos a esta temperatura.
- Ponto 2. Aquecimento a mais de 900°C e completamente transformado em austenite. Não há crescimento dos grãos, pelo contrário há um refinamento.
- Ponto 3. Aquecimento um pouco acima de A<sub>3</sub>, o que não é suficientemente para homogeneizar completamente a austenite.
- Ponto 4. Esta área foi aquecida aproximadamente a 800°C, (entre A<sub>3</sub> e A<sub>1</sub>), sendo parte da estrutura convertida a austenite, sendo a mistura resultante durante o arrefecimento, pobre em resiliência e outras propriedades mecânicas.
- Ponto 5. Aquecimento a cerca de 700°C (abaixo de A<sub>1</sub>). O metal base é recosido. Nesta zona demarca-se a ZAC da zona não afectada pelo calor da soldadura

**Figura 14 Efeito do calor durante a soldadura**

### 1.7.2 Efeitos dos Diversos Elementos Químicos na Soldabilidade dos Aços

- Carbono - um aumento do teor de C, a despeito da melhoria das propriedades mecânicas e de proporcionar uma melhor resposta a tratamentos térmicos, reduz a soldabilidade.
- Enxofre - é uma impureza indesejável tendendo a causar não só fragilidade, como também tende a reduzir a soldabilidade.

- Fósforo - tende a reduzir a soldabilidade, sendo também uma impureza indesejável.
- Silício - usado como desoxidante, não apresenta problemas no que se refere à soldabilidade.
- Alumínio - como o Si
- Manganês - é um elemento usado como redutor do S; para valores superiores a 1% reduz a soldabilidade
- Crómio - em valores elevados reduz a soldabilidade
- Molibdénio - idem
- Níquel - idem
- Cobre - idem
- Gases (H<sub>2</sub>, O<sub>2</sub>, N<sub>2</sub>, etc) - além de terem tendência a criar fragilidade a sua presença durante a soldadura não é desejada a não ser quando façam parte de atmosferas gasosas de protecção da junção (casos de CO<sub>2</sub>, He, Ar etc)
- Oxigénio - possibilita a formação de porosidade, redução do alongamento e resiliência a promove a fragilidade a temperaturas elevadas; a produção do oxigénio em soldadura consegue-se adicionando redutores(deoxidizers) tais como o Mn, Si ou Al no fluxo ou na alma do eléctrodo.
- Azoto - os valores típicos de azoto em aços (em peso) são da ordem de 0.01%; um aumento de azoto no metal soldado aumenta a tensão de ruptura, mas reduz o alongamento e a resiliência.
- Hidrogénio - é o elemento gasoso mais indesejável na soldadura dos aços, pelo que será referido com maior detalhe. A evolução do hidrogénio no material, sobretudo junto às soldaduras é nefasta, porque há uma forte tendência para a absorção do hidrogénio a quente; um dos aspectos que merecem consideração é a necessidade de não efectuar soldaduras sobre peças húmidas para evitar a formação de poros e a libertação de hidrogénio (e oxigénio). Outro facto que origina a existência de hidrogénio junto à soldadura é a atmosfera em redor do arco (atmosfera gasosa ou de fluxo; cita-se que os eléctrodos de revestimento celuloso depositam metal que pode conter até 70 cm<sup>3</sup> de H por cada 100 gramas; por outro lado, o metal depositado com eléctrodos básicos é pobre em hidrogénio (se não contiver humidade).

Os aços de alta resistência requerem eléctrodos de baixo teor de hidrogénio, com métodos de soldadura onde a difusão do hidrogénio não seja facilitada.

O hidrogénio pode originar o seguinte:

- Ocorrência de poros (redução da secção útil e redução da resistência à fadiga).
- Redução das características mecânicas (especialmente a resiliência e a capacidade de deformação a frio - verificado no ensaio de dobragem) –

ocorre por um mecanismo de fissuração a frio que tem lugar a temperaturas inferiores a 200° C durante a fase de arrefecimento

### **1.7.3 Alguns aspectos em soldadura de materiais ferrosos**

#### **1.7.3.1 Aços Inoxidáveis Austeníticos**

Os aços inoxidáveis austeníticos, que são mais usados em navios, têm algumas particularidades que condicionam a sua soldabilidade.

Como estes aços têm elevado coeficiente de expansão e uma relativamente baixa condutibilidade calorífica, a distorção é um problema e os eléctrodos devem ser curtos para evitar sobreaquecimento.

Verificou-se que o aço 18-8 é susceptível de corrosão intergranular, quando soldado, porque existe uma precipitação de carboneto de crómio e sua migração para as fronteiras dos cristais na gama de temperatura entre 450°C e 850°C, o que se traduz numa redução de crómio na liga junto a estas fronteiras, reduzindo a resistência à corrosão.

Este fenómeno designa-se por deterioração por soldadura ou sensibilização do aço inoxidável e pode ser minimizado usando aços inox estabilizados com formadores de carbonetos mais fortes que o crómio como o titânio e o nióbio. Outros processos de evitar a decomposição são reduzir o teor de carbono da liga ou elevar a temperatura da peça a 1100°C e arrefece-la rapidamente, o que produz uma redissolução dos carbonetos sem possibilidade de reprecipitação (impossível de utilizar em grandes estruturas). Para além da deterioração por soldadura no (18/8) a distorção constitui, como já dissemos, o principal problema da soldadura de aços inoxidáveis.

A sensibilidade à humidade é grande, pelo que os eléctrodos para aços inoxidáveis devem ser estufados antes de serem utilizados.

#### **1.7.3.2 Ferro Fundido**

Embora haja relutância em soldar ferro fundido, pelos resultados obtidos, é um facto que com os cuidados devidos ferro fundido pode ser soldado quando necessário em soldadura de reparação.

Primeiro é necessário saber qual a espécie de ferro fundido, antes de seleccionar o procedimento.

A penetração do metal de adição no metal base deve ser a menor a fim de evitar alterar a estrutura da liga. Normalmente é requerido um preaquecimento de 260 a 650°C - para soldadura com eléctrodo revestido e de 480 a 650° C para soldadura oxiacetilénica. Em caso nenhum o preaquecimento deve exceder 750° C. Este preaquecimento deve ser feito na maior extensão e o mais uniformemente possível e o arrefecimento deve ser sempre lento, (usando materiais isolantes para retardar o arrefecimento da peça).

No caso de uma soldadura não poder ser feita com pré-aquecimento, por motivo de dimensões ou outros, deve ser feita com soldadura por arco com eléctrodo revestido e usando soluções que incluam inclusões mecânicas, como pernos, grampos, etc., a fim de reduzir a possibilidade de fractura e tentando reduzir a introdução de calor na peça.

## 1.8 Aços para aplicação em Engenharia Naval

A utilização dos aços em engenharia naval é superior a 90% do total dos materiais usados em aplicações marítimas.

Do ponto de vista de aplicação podem ser agrupados como se segue:

### aplicações estruturais:

- aços correntes não ligados
- aços estruturais de baixa liga
- aços de alta resistência
- aços vazados
- aços para baixas temperaturas

### aplicações não estruturais:

- aços resistentes à corrosão e à temperatura (aços inoxidáveis)
- aços para hélices
- aços para tubos, permutadores e reservatórios sob pressão
- aços para veios
- aços para âncoras e amarras
- aços para cabos

(de notar que esta classificação não é exaustiva)

### 1.8.1 Aços correntes de aplicação estrutural

Os aços para aplicação estrutural, na quase totalidade aços para construção naval soldada, constituem um grupo de materiais, que além das suas propriedades mecânicas correntes, têm boas características de tenacidade à fractura e têm boa soldabilidade; são laminados a quente.

Estes aços, obtidos pelo processo de soleira aberta (Siemens Martin), oxigénio básico ou por forno eléctrico, são comercializados segundo especificações das Sociedades de Classificação, que estabelecem, além do processo de manufactura, o método de desoxigenação, a composição química, o tratamento térmico, e os valores mínimos da tensão de rotura, tensão de cedência, extensão após rotura e resistência ao choque (Charpy V notch CVN), que os materiais devem satisfazer.

Os requisitos de níveis de tenacidade à fractura, expressos pelos ensaios de choque, recebeu uma especial atenção, de certa forma associada às catástrofes que ocorreram a inúmeros navios, na generalidade americanos, da classe "Liberty", que durante a 2ª Guerra Mundial se fracturaram ou sofreram grandes danos estruturais. Estes desastres, ocorreram sob temperaturas baixas, presença de defeitos de concepção e de fabrico por os materiais exibirem características frágeis, com rápida propagação de fissuras a partir de um local de concentração de tensões ou onde existam defeitos. A acrescentar a estes aspectos refere-se que a transição da construção cravada (com rebites) para o uso extensivo da construção soldada, durante o esforço de guerra, levou a que as situações de catástrofe estrutural fossem mais relevantes não só porque a continuidade estrutural admitida pela soldadura permitia a propagação de fissuras (a construção rebitada funcionava como limitador da propagação) como também a tecnologia da soldadura, ainda incipiente, introduzia defeitos originadores dos danos.

Os aços correntes são designados por letras que identificam os graus, correspondendo a materiais com diferente microestrutura e composição química. Estes aços são aços não ligados ou aços C-Mn com baixo teor de carbono.

As letras A, B, D, e E são comuns à maioria das Sociedades de Classificação.

A especificação do aço para as diversas estruturas do navio é estabelecida face ao local/função e face à espessura, isto é, o aço a usar depende da concepção e dimensionamento estrutural (ver Figura 15).

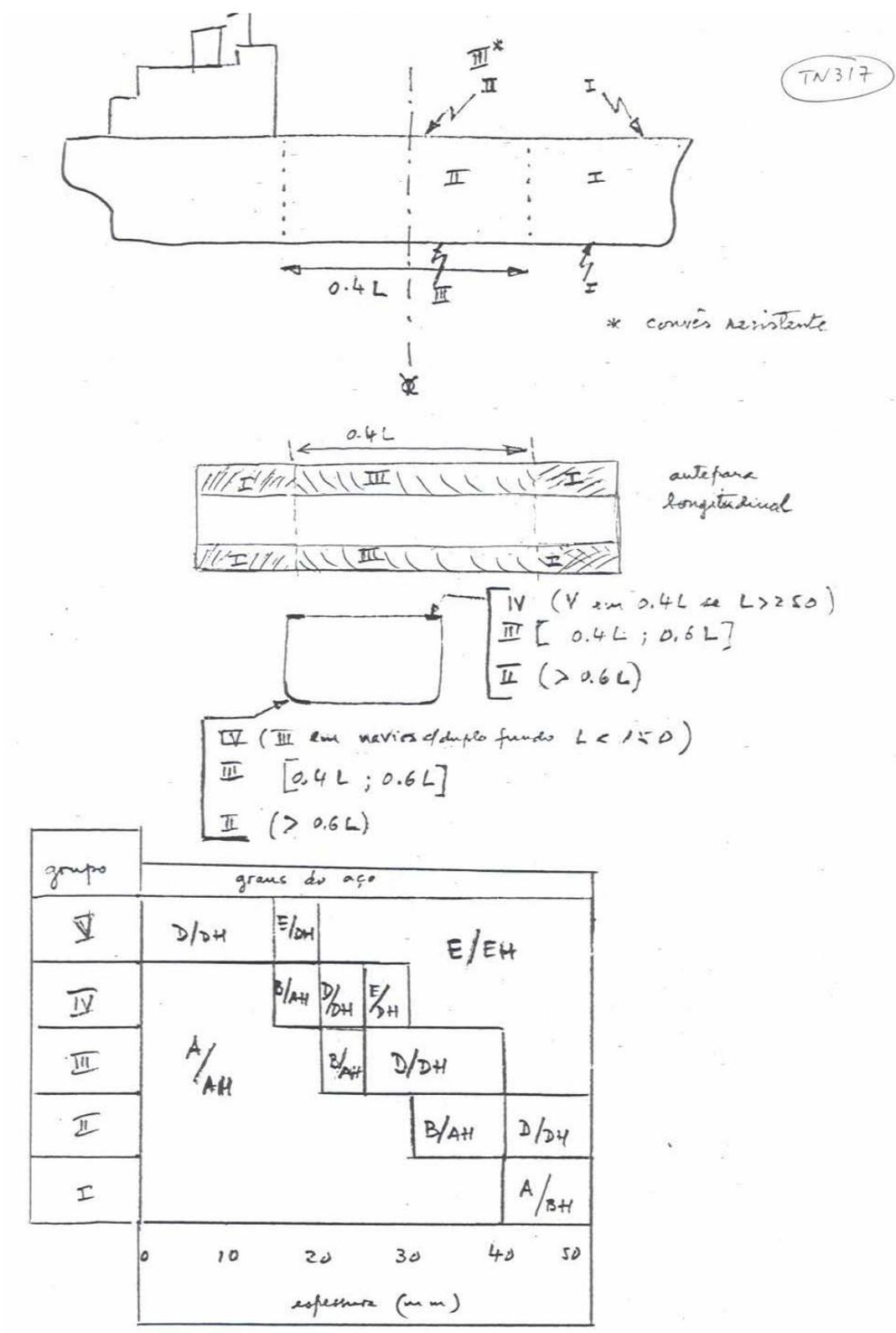
O aço grau A é o mais usado, até espessuras de 1/2" (12.5mm), não sendo exigido o controle dos requisitos da tenacidade à fractura, isto é, não são exigidos ensaios de choque. Para espessuras superiores a 12.5mm o teor de Mn é controlado, devendo ser superior a  $2.5\%C$ .

Os aços A, B, C, D, e E têm propriedades mecânicas - tensão de rotura, tensão de cedência e extensão após rotura, idênticas, variando a sua capacidade de absorção de energia (ensaio de choque), na presença de entalhes; esta propriedade é aferida no ensaio pela necessidade do provete absorver uma determinada energia (27J/20J) a uma determinada temperatura (0°, -10° ou -40° C).

Esta variação é conseguida pela acção conjugada do controlo da composição química, designadamente da relação C-Mn (ou do teor de Mn), do método de desoxigenação e de refinamento do grão e pelo tratamento térmico de normalização.

Esta especificação de aços aplica-se a chapas, barras e perfis, embora para os perfis grau A se aceite um desvio no valor máximo do teor de carbono, além de não se considerar o controlo do Mn.

De notar que o controlo das impurezas (S e P) é fundamental e é mantido a valores baixos, tendo efeitos imediatos na soldabilidade, forjabilidade, ductilidade e tenacidade destes aços.



De notar que a zona está associada à solicitação.

**Figura 15** Especificação do material face à espessura e à zona do navio

Os aços são classificados com base na tensão de cedência mínima  $R_{eH}$  (N/mm<sup>2</sup>), em aço normal ( $R_{eH}=235$ ) e de alta resistência (32:  $R_{eH}=315$  - 36:  $R_{eH}=355$  - 40:  $R_{eH} = 390$ ).

Os aços normais são divididos em quatro categorias A, B, D e E. Para os aços normais as letras A, B, D e E significam propriedades de impacto a +20, 0, -20 e -40°C, respectivamente.

Os aços de alta resistência estão divididos em quatro categorias identificadas pelas letras AH, DH, EH e FH seguidas por um número relacionado com a tensão de cedência. Para os aços de alta resistência AH, DH, EH e FH representam as propriedades de impacto a 0, -20, -40 e -60°C, respectivamente.

**Tabela 12 Aço normal - Composição química e desoxidação (BV)**

Steel grade	A	B	D	E
Deoxidation practice for thickness t (mm)	t < 50 mm: any method except rimmed (1) t > 50 mm: killed	t < 50 mm: any method except rimmed t > 50 mm: killed	t < 25 mm: killed t > 25 mm: killed and fine grain treated	killed and fine grain treated
Chemical composition (%) (2) (3) (4)				
C max (5)	0,21 (6)	0,21	0,21	0,18
Mn min (5)	2,5 x C	0,80 (7)	0,60	0,70
Si max	0,50	0,35	0,35	0,35
P max	0,035	0,035	0,035	0,035
S max	0,035	0,035	0,035	0,035
Al (acid soluble) min			0,015 (8) (9)	0,015 (9)

(1) For sections up to a thickness of 12,5 mm, rimmed steel may be accepted subject to the special approval of the Society.

(2) When any grade of steel is supplied in the thermo-mechanically rolled condition, variations in the specified chemical composition may be allowed or required by the Society and are to be stated at the approval.

(3) The Society may limit the amount of residual elements which may have an adverse effect on the working and use of the steel, e.g. copper and tin.

(4) Where additions of any other element have been made as part of the steelmaking practice, the content is to be indicated in the ladle analysis certificate.

(5) C + 1/6 Mn is not to exceed 0,40%.

(6) Max. 0,23% for sections.

(7) When Grade B steel is impact tested, the minimum manganese content may be reduced to 0,60%.

(8) Al is required for thickness greater than 25 mm.

(9) The total aluminum content may be determined instead of acid soluble content. In such cases the total aluminum content is to be not less than 0,020%. Other suitable grain refining elements may be used subject to the special approval of the Society.

**Tabela 13 Aço normal - Propriedades mecânicas**

Steel grade	Yield stress $R_{eH}$ (N/mm) min.	Tensile strength $R_m$ (N/mm)	El. $A_5$ (%) min (1)	Average impact energy (J) min KVL longitudinal - KVT transverse - t = thickness (mm)						
				Test temp (°C)	t < 50		50 < t < 70		70 < t < 100	
					KVL	KVT	KVL	KVT	KVL	KVT
A	235	400/520 (2)	22	+20			34	24	41	27
B	235	400/520	22	0	27	20	34	24	41	27

Steel grade	Yield stress $R_{eH}$ (N/mm) min.	Tensile strength $R_m$ (N/mm)	El. $A_5$ (%) min <a href="#">(1)</a>	Average impact energy (J) min KVL longitudinal - KVT transverse - t = thickness (mm)						
				Test temp (°C)	t < 50		50 < t < 70		70 < t < 100	
					KVL	KVT	KVL	KVT	KVL	KVT
D	235	400/520	22	-20	27	20	34	24	41	27
E	235	400/520	22	-40	27	20	34	24	41	27

(1) El. : elongation. For full thickness flat tensile test specimens with a width of 25 mm and a gauge length of 200mm, the elongation is to comply with the minimum values given for strength level 32 in Tabela 17.  
(2) For sections in grade A of all thicknesses, the upper limit for the specified tensile stress range may be exceeded up to a maximum of 540 N/mm<sup>2</sup>.

**Tabela 14 Condições de fornecimento e testes de impacto**

Steel grade	Condition of supply <a href="#">(1)</a> Batch for impact tests in tons ( ) for thickness t (mm) <a href="#">(2)</a>		
	t < 25	25 < t < 35	35 < t < 50
A	A (-)		
B	<a href="#">(3)</a> A (-)	A (50)	
D	A (50)		N(50) NR(50) TM(50) AR*(25)
E	N(25) TM(25) AR*(15) NR*(15)		

(1) Abbreviations:  
A : Any  
N : Normalised Condition (heat treatment)  
NR : Normalising Rolled Condition as an alternative to Normalising  
TM : Thermo-Mechanical Rolling  
AR\* : As Rolled Condition subject to the special approval of the Society  
NR\* : Normalising Rolled Condition subject to the special approval of the Society.  
(2) One set of impact tests is to be taken from each batch of the weight in tons specified in brackets ( ) or fraction thereof. When impact tests are not required, the indication is (-).  
(3) Charpy V-notch impact tests are generally not required for Grade B steel with thickness of 25 mm or less.

**Tabela 15 Aços de alta resistência - Composição química e desoxidação (BV)**

Steel grade	AH32, DH32, EH32 AH36, DH36, EH36 AH40, DH40, EH40	FH32, FH36, FH40
Deoxidation practice	killed and fine grain treated	killed and fine grain treated
Chemical composition (%) <a href="#">(1)</a> <a href="#">(5)</a>		

Steel grade	AH32, DH32, EH32 AH36, DH36, EH36 AH40, DH40, EH40	FH32, FH36, FH40
C max.	0,18	0,16
Mn	0,90 - 1,60 (2)	0,90 - 1,60
Si max.	0,50	0,50
P max.	0,035	0,025
S max.	0,035	0,025
Al (acid soluble) min (3) (4)	0,015	0,015
Nb (4)	0,02 - 0,05	0,02 - 0,05
V (4)	0,05 - 0,10	0,05 - 0,10
Ti max. (4)	0,02	0,02
Cu max.	0,35	0,35
Cr max.	0,20	0,20
Ni max.	0,40	0,80
Mo max.	0,08	0,08
N max.		0,009 (0,012 if Al is present)

(1) Alloying elements other than those listed above or exceeding the specified limits may be accepted by the Society when proposed by the steelmaker at the time of approval and their content is to be indicated in the ladle analysis.

(2) Up to a thickness of 12,5 mm, the minimum manganese content may be reduced to 0,70.

(3) The total aluminium content may be determined instead of the acid soluble content. In such cases the total aluminium content is to be not less than 0,020 %.

(4) The steel is to contain aluminium, niobium, vanadium or other suitable grain refining elements, either singly or in any combination. When used singly, the steel is to contain the specified minimum content of the grain refining element. When used in combination, the specified minimum content of at least one grain refining element is applicable; the sum of Nb+V+Ti is not to exceed 0,12%.

(5) When any grade of higher strength steel is supplied in the thermo-mechanically rolled condition, variations in the specified chemical composition may be allowed or required by the Society and are to be stated at the approval.

**Tabela 16 Aços de alta resistência - Resistência e testes de impacto**

Steel grade	Yield stress $R_{eH}$ (N/mm) min.	Tensile strength $R_m$ (N/mm)	Elong. $A_5$ (%) min.(1)	Average impact energy (J) min. for thickness t (mm)						
				Test temp. (°C)	t < 50		50 < t < 70		70 < t < 100	
					KVL	KVT	KVL	KVT	KVL	KVT
AH32	315	440/590	22	0	31	22	38	26	46	31
DH32				- 20	31	22	38	26	46	31
EH32				- 40	31	22	38	26	46	31
FH32				- 60	31	22	38	26	46	31
AH36	355	490/620	21	0	34	24	41	27	50	34
DH36				- 20	34	24	41	27	50	34
EH36				- 40	34	24	41	27	50	34
FH36				- 60	34	24	41	27	50	34
AH40	390	510/650	20	0	39	26	46	31	55	37
DH40				- 20	39	26	46	31	55	37
EH40				- 40	39	26	46	31	55	37
FH40				- 60	39	26	46	31	55	37

(1) For full thickness flat tensile test specimens with a width of 25 mm and a gauge length of 200 mm, the elongation is to comply with the minimum values given Tabela 17

**Tabela 17 Elongation (%) on a gauge length of 200 mm for thickness t (mm)**

Strength	$t \leq 5$	$5 < t \leq 10$	$10 < t \leq 15$	$15 < t \leq 20$	$20 < t \leq 25$	$25 < t \leq 30$	$30 < t \leq 40$	$40 < t \leq 50$
32	14	16	17	18	19	20	21	22
36	13	15	16	17	18	19	20	21
40	12	14	15	16	17	18	19	20

### **1.8.2 Aços estruturais de baixa liga**

Além dos aços de construção naval soldada, correntes, as Sociedades de Classificação especificam aços de baixa liga com melhores propriedades mecânicas e níveis mais elevados de resistência à fractura.

Também para estes aços, para cada nível de tensão de rotura, existem diversos (três) níveis de tenacidade a fractura, como se pode apreciar na tabela que se segue.

### **1.8.3 Aços de alta resistência**

Os aços de alta resistência, com tensões de cedência superiores a 415 MPa, são agrupados em aços de baixa liga, aços temperados e revenidos e aços de envelhecimento martensítico (aços maraging); não são objecto de especificação pelas Sociedades classificadoras, pelo que se deve recorrer à especificação a partir de outras fontes.

Estes aços destinam-se a aplicações especiais - estruturas oceânicas, submarinos e outras e requerem um elevado controlo de qualidade na construção, designadamente de soldaduras, porque as suas características de resistência mecânica e de tenacidade à fractura podem ser degradadas pelos métodos de fabrico; em alguns casos os materiais têm propriedades obtidas à custa de tratamentos térmicos e mecânicos complexos sendo difícil obter materiais de adição e processos de soldadura que permitam, manter a continuidade das propriedades mecânicas do metal soldado, relativamente ao metal base.

### **1.8.4 Aços vazados**

Os aços vazados são usados na manufactura de componentes estruturais pesados, com formas complexas, como acontece na estrutura da proa e dos lemes e cadastres dos navios, bem como em hélices. As Sociedades de Classificação exigem que o aço seja produzido pelo processo da soleira aberta oxigénio básico ou em forno eléctrico.

Existem inúmeras aplicações não estruturais onde os aços vazados são aplicados em navios e outras estruturas marítimas.

As fundições devem ser controladas com extremo cuidado assegurando homogeneidade na estrutura e ausência de defeitos como fissuras, porosidades, inclusões e contracção interna. O controlo da integridade da peça é garantido através de ensaios não destrutivos e as reparações devem ser executadas com extremo cuidado.

As propriedades mecânicas e a soldabilidade são controladas através da determinação das impurezas e do teor de carbono do material. O controle é efectuado através de ensaios laboratoriais destrutivos e ensaios não destrutivos.

A estrutura vazada é sujeita a tratamento térmico para se atingir o nível de propriedades desejado.

As Sociedades de Classificação classificam dois grupos de aços vazados: aços normais e aços especiais. Além destes, estabelecem os requisitos para os aços para hélices, e para aplicações e baixas temperaturas e para amarras.

A Tabela 18 apresenta algumas propriedades mecânicas dos aços vazados de aplicação naval. A tabela seguinte apresenta elementos sobre aços para hélices.

**Tabela 18 Aços Vazados: propriedades mecânicas**

b)	$\sigma_r$	$\sigma_c$	Extensão após rotura	Estricção	KCU	Ensaio de Dobragem
	(N/mm <sup>2</sup> )	(N/mm <sup>2</sup> )	A <sub>5</sub> %	Z %	J c)	
Aço Vazado Ordinário	400-430	50% de $\sigma_r$	20			120
	430-470		20			120
	470-510		18			120
	510-550		16			90
	550-590		14			90
	>590		12			90
Aço Vazado para requisitos especiais	430-470	50% de $\sigma_r$	26	45	27	
	470-510		24	40	25	
	510-550		22	40	20	
	550-590		20	35	20	
	>590		18	35	17	

a) Ensaio de dobragem (19 x 25 mm); mandril com diâmetro 38 mm. O valor indicado corresponde ao ângulo de dobragem no momento da rotura - o valor entre parêntesis representa a secção do provete

b) Os valores da tabela são valores mínimos, salvo em casos indicados em contrário

c) Ensaio efectuado à temperatura ambiente

**Tabela 19 Aços Vazados para baixas temperaturas**

	Aços Vazados para baixas temperaturas	Tratamento Térmico	Temp. de Projecto Admissível	Temperatura a que se exerce o ens. choque
	Aço C Mn propriedades iguais aço vazado requisitos especiais	Normalizado ou temperado e revenido	$\geq -55^\circ\text{C}$	5° abaixo da temperatura de projecto mas $T \leq -20^\circ\text{C}$ (d)
Propriedades a aprovar caso a caso	Aço 2 ¼ % Ni	Normalizado; Norm. e temperado ou temp. e revenido	$\geq -70^\circ\text{C}$	10°C abaixo da temp. de proj. mas $T \leq -70^\circ\text{C}$
	Aço 3 ½ % Ni		$\geq -105^\circ\text{C}$	10°C abaixo da temp. de proj. mas $T \leq -95^\circ\text{C}$
	Aço Austenítico Cr Ni	Tratamento de Solubilização	$\geq -196^\circ\text{C}$	-196°C (e)

d) se a temperatura de projecto for superior a 0°C o ensaio será a 0°C se  $t \leq 20\text{mm}$  e a -20°C se  $t > 20\text{mm}$

e) apenas é necessário se a temperatura de projecto for inferior a -105°C

### **1.8.5 Aços forjados**

São aplicados onde a estrutura é relativamente simples (tal como âncoras e manchas do leme), mas não suficientemente simples para se usarem produtos laminados.

A homogeneidade é superior à das fundições. Os aços usados são de baixo teor de carbono (inferior a 0.35%), soldáveis, com propriedades idênticas à das chapas e perfis para usos estruturais, com composição química idêntica.

**Tabela 20**

Material	Composição Química (%)								Propriedades Mecânicas						Tratamentos térmicos correntemente usados
	C	S <sub>i</sub>	M <sub>n</sub>	S (max)	P (max)	C <sub>r</sub>	N <sub>i</sub>	M <sub>o</sub> (1)	σ <sub>c</sub> (N/mm <sup>2</sup> )	σ <sub>r</sub> (N/mm <sup>2</sup> )	Along° A 5%	ExtracçãoZ %	R. imp. J/cm <sup>2</sup> , KCU	Dureza BRN	
Aço Carbono 1	.20	.40	.80	.035	.035				50% de σ <sub>r</sub>	430	26	45	54	140	Recozimento total e/ou normalização
Aço Liga Baixa 2	.22	.40	.80	.035	.035		.5a 2.0		345	540	20	45	59	155	Recozimento total e/ou normalização possivelmente seguido de revenido
Aço Inoxidável Martensítico / Ferrítico 13/1 3	.12	.50	.80	.03	0.3	13	1	.5a 1.0	390	590	18	40	34	180	Têmpera e revenido
Aço Inoxidável Martensítico / Austenítico 13/4-6 4	.05	.05	.80	.03	.03	13	3.5a 6.0	.5a 2.0	590	735	15	45	69	230	idem
Aço Inoxidável Martensítico / Austenítico 16/5 5	0.05	.50	.80	.03	.03	16	5	.5a 1.0	590	785	15	45	69	240	idem
Aço Inoxidável (2) Ferrítico / Austenítico 25/5 6	.10	.50	.80	.03	.03	25	5	1.5	370	590	18	45	34	200	Recozimento (solution annealing) e têmpera
Aço Inoxidável Austenítico 18/8 7	.06	.50	.80	.03	.03	18	10	1.0a 3.0	175	440	35	50	88	155	idem

(1) Pode não estar presente

(2) Podem ocorrer variações no C, C<sub>r</sub> e N<sub>i</sub>

### 1.8.6 Aços para tubos, permutadores de calor e reservatórios sob pressão

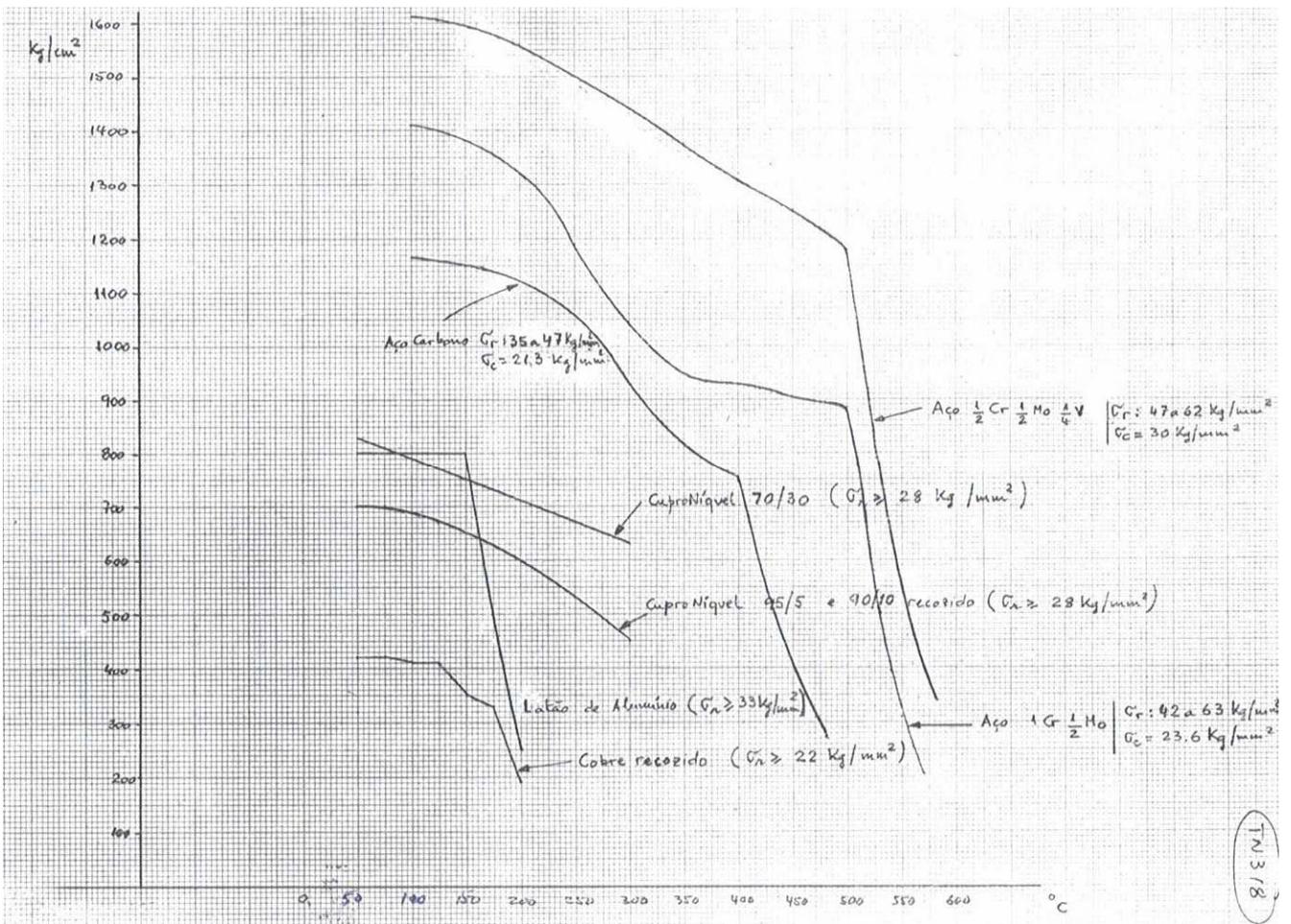
Os aços para tubos, permutadores, reservatórios sob pressão (incluindo caldeiras) e outros elementos sujeitos a temperaturas e esforços elevado, são também definidos pelas Sociedades de Classificação, de forma idêntica aos aços estruturais, mas com requisitos de tensão de fluência, que relacionam as tensões de rotura à tracção com temperaturas e com taxas de deformação que aumentam com o tempo.

Usam-se essencialmente aços mais ligados e aços C Mn com percentagens de C inferiores a 0.23 % e tensões de rotura, variáveis com o grau de aço, entre 360 e 610 MPa.

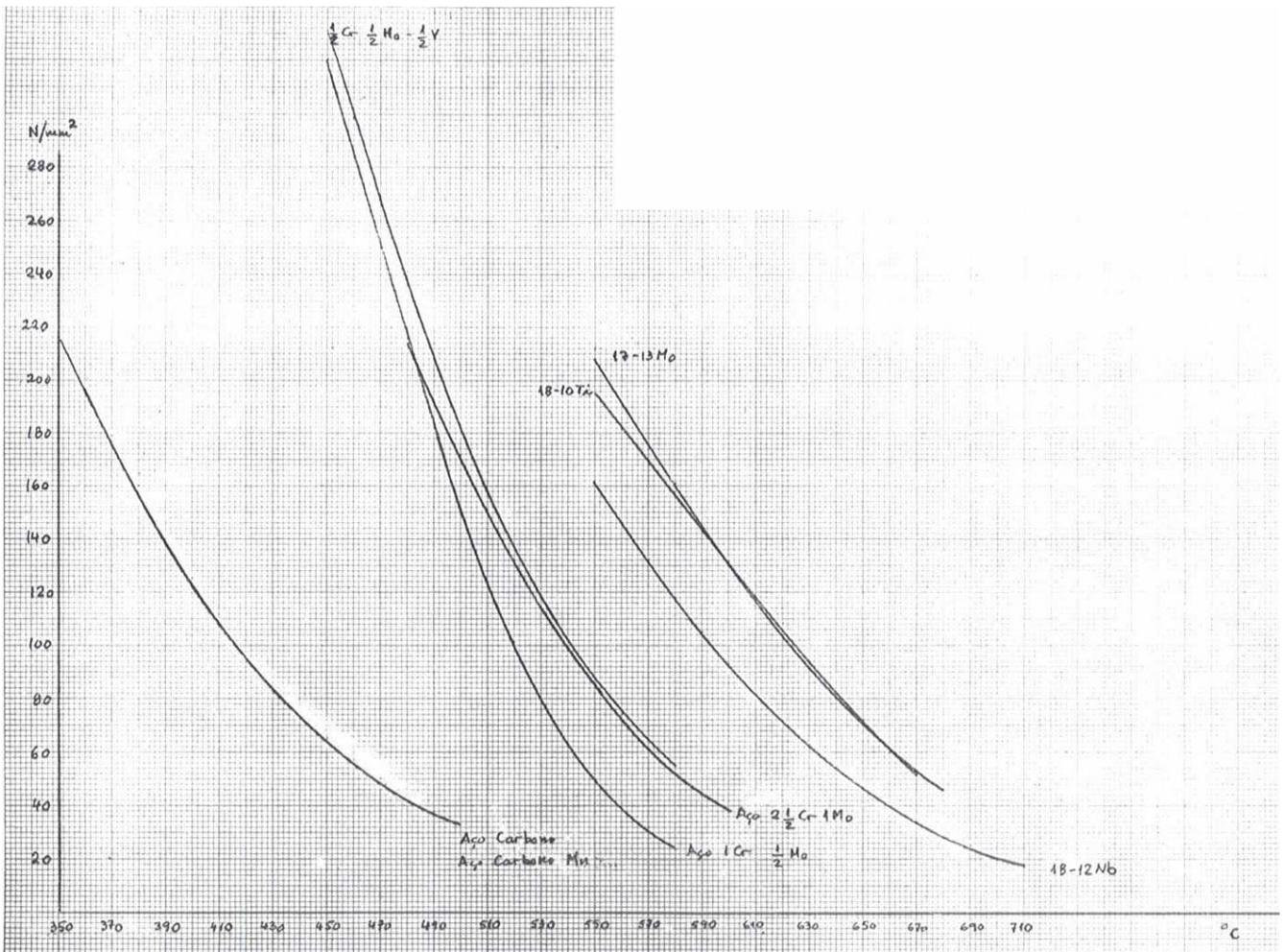
Também são especificadas aços de baixa liga Cr Mo e Cr Mo C com tensões de rotura entre 470 e 630 MPa.

Em qualquer caso, são estabelecidas as tensões admissíveis em função da temperatura do projecto, aspecto directamente relacionado com a fluência.

É usual especificar tubos para encanamentos a usar em navios com recurso às normas DIN. Enquanto para uso estrutural é possível usar tubos com costura (tubos manufacturados por soldadura) em redes de fluídos usam-se tubos sem costura.



**Figura 16** Tensões admissíveis em função da temperatura para aços e ligas de cobre (LRS, 1974)



**Figura 17 Aços: Tensão de ruptura à fluência (LRS 1974). Aplicações: Caldeiras, reservatórios, máquinas, tubos e acessórios**

### 1.8.7 Aço para aplicação em baixas temperaturas

As sociedades classificadoras também especificam os aços C Mn, os aços Ni e os aços inoxidáveis austeníticos destinados a reservatórios de pressão de gases liquefeitos e componentes afins, ou para casos onde a temperatura dos componentes estruturais não é moderada pelo oceano. A ênfase na ductilidade e tenacidade à fratura, é garantida pelo método de desoxigenação, refinamento do grão, composição química, tratamento térmico e controle da resistência ao choque, por ensaios “Charpy” (CNV).

Apresentam-se em seguida alguns elementos sobre estes materiais, conforme recomendação das Sociedades Classificadoras.

**Tabela 21 Materiais para navios de aço para carga frigorífica (ABS)**

Temperatura (°C)	5	-1	-12	-23	-29
Grau do aço	B	B	D, DS, DH	DN, DHN	CS, E, EH

**Tabela 22 Materiais para navios LNG (gás natural liquefeito) – (ABS)**

Temperatura da estrutura (°C)	Material	Espessura (mm)	Temperatura do ensaio de choque (°C)
>0	Escolha normal	-	-
>-10	B (a)	≤12,5	-
>-25	D (b)	≤12,5	-
>-60	Aço 1,5Ni, normalizado	≤20 (f)	-65
>-65	Aço 2,5 Ni (c)	≤20 (f)	-70
>-90	Aço 3,5 Ni (c)	≤20 (f)	-95
>-105	Aço 5,0 Ni (c)	≤20 (f)	-110
>-165	Aço 9 Ni (d)	≤20 (f)	-170
	Aços inoxidáveis austeníticos (e)	≤20 (f)	-196
	Liga Al 5083	≤20 (f)	-
	Aço 36 Ni	≤20 (f)	-

Notas:

- (a) também: D para  $12,5 < t < 25,5$  e E para  $t > 25,5$
- (b) também: E para  $t > 12,5$
- (c) normalizado ou normalizado e temperado
- (d) dupla normalização e tempera ou revenido e temperado
- (e) aços AISI 304, 304L, 316, 316L, 321, 327, 347, tratamento de solubilização
- (f) não aplicável a chapas e perfis do casco

**Tabela 23 Composição química de aços para baixas temperaturas**

**ACERO DEBILMENTE ALEADO AL NIQUEL PARA SERVICIOS A BAJAS TEMPERATURAS**  
**LOW Ni ALLOY STEELS, FOR LOW TEMPERATURE SERVICES**

SOCIEDAD CLASIFICADORA / CLASSIFICATION SOCIETY	CALIDAD / QUALITY	COMPOSICION QUIMICA / CHEMICAL COMPOSITION %						CARACTERISTICAS MECANICAS / MECHANICAL PROPERTIES						
		C máx.	Mn máx.	Si máx.	P máx.	S máx.	Ni máx.	ReH min. N/mm <sup>2</sup>		Rm N/mm <sup>2</sup>	A min. %	RESILIENCIA TRANSVERSAL / CROSS IMPACT TEST		
								e < 30	30 < e < 50			°C	Media	Min.
BUREAU VERITAS	0.5Ni A (1)	0.14	1.50	0.30	0.03	0.025	0.30/0.80	275	265	410/490	25	-55	27	18
	0.5Ni B (1)	0.16	1.60	0.30	0.03	0.025	0.30/0.80	345	335	490/590	22	-55	27	10
LLOYD'S REGISTER OF SHIPPING	LT 60-460	0.16	0.70/1.60	0.10/0.50	0.025	0.020	0.30/0.80	245	(2)	360/480	24	-60	27	18
	LT 60-410	0.16	0.70/1.60	0.10/0.50	0.025	0.020	0.30/0.80	285	(2)	410/530	24	-60	27	18
	LT 60-490	0.16	0.70/1.60	0.10/0.50	0.025	0.020	0.30/0.80	355	(2)	490/610	22	-60	27	18
AMERICAN BUREAU	V-060-41	0.12	1.30/1.65	0.10/0.50	0.040	0.040	0.80 máx.	275	275	402/539	22	-55	27	18
	V-060-49	0.12	1.30/1.65	0.10/0.50	0.040	0.040	0.80 máx.	345	345	480/617	22	-55	27	18
NORSKE VERITAS	NV 2-4	0.14	0.70/1.60	0.15/0.50	0.035	0.035	0.80 máx.	255 (3)	245	400/490	24	-55	27	18
	NV 4-4	0.15	0.70/1.60	0.15/0.50	0.035	0.035	0.80 máx.	325 (4)	315	490/570	21	-55	27	18

(1): Elementos de adición por acuerdo: Al, Nb y V  
 (2): Por acuerdo.  
 (3): 265 N/mm<sup>2</sup> para e < 16.  
 (4): 335 N/mm<sup>2</sup> para e < 16.

(1) Addition elements by agreement: Al, Nb and V  
 (2) By agreement  
 (3): 265 N/mm<sup>2</sup> for e < 16.  
 (4): 335 N/mm<sup>2</sup> for e < 16.

## 2 Alumínio e suas ligas

### 2.1 Generalidades

O alumínio é um elemento muito abundante na crosta terrestre, onde aparece sob variadas formas, sendo as bauxites (óxidos hidratados de alumínio,  $\text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 2 \text{H}_2\text{O}$ ), os minérios mais utilizados na sua produção industrial.

Estes minérios contam cerca de 40 a 60% de óxido de alumínio (alumina), sendo a parte restante formada por impurezas, tais como óxidos de ferro, de silício, de cálcio e de titânio.

O alumínio, metal já conhecido na antiguidade egípcia, só no século XX passou a ser utilizado industrialmente com grande escala.

Este atraso deveu-se à grande afinidade deste elemento com o oxigénio, o que tornava impraticável a redução dos seus óxidos pelo carbono.

A recuperação do alumínio, do seu minério, faz-se através dum processo electroquímico em que a alumina é dissolvida num electrólito de fusão e em seguida é estabelecido um circuito eléctrico em que a corrente passa pelo electrólito, promovendo a deposição e solidificação do alumínio metálico no cátodo (Figura 23).

### 2.2 Características e Propriedades Principais

O alumínio e as suas ligas, tal como a maioria dos metais dúcteis, têm uma estrutura cristalina, constituída por uma rede cúbica de fases centradas.

O alumínio tecnicamente puro, é um metal leve, de cor branca, pouco duro, muito deformável, com elevada condutibilidade eléctrica e térmica e com baixo ponto de fusão. Não é tóxico, não produz ignição e não é magnético. Os valores das principais propriedades são referidas no Tabela 24

Devido ao seu elevado poder redutor, oxida-se ao ar, formando exteriormente uma finíssima camada de alumina, que o protege contra a corrosão, nomeadamente da água destilada, do ácido nítrico, do ácido carbónico, dos compostos de enxofre e de muitos hidrocarbonetos, óleos e substâncias orgânicas. No entanto, é atacado pela água do mar e pelas bases alcalinas (sódio e potássio) e por alguns óxidos como o ácido clorídrico e o fluorídrico.

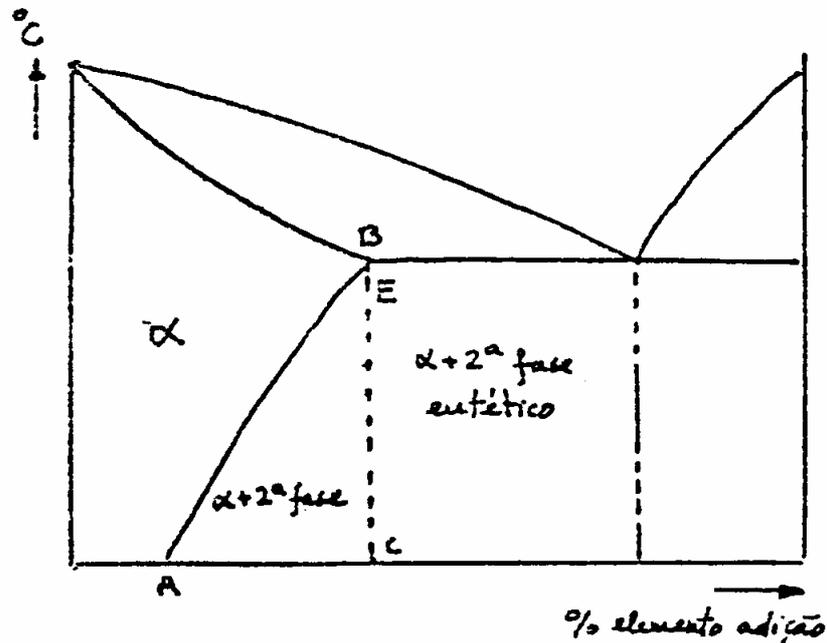
Dum modo geral, as aplicações industriais do alumínio puro são restritas.

**Tabela 24 Propriedades do Alumínio**

Densidade.....	2.7		
Cor.....	Branca-prateada		
PROPRIEDADES TÉRMICAS:			
Ponto de fusão.....	659°C		
Calor de fusão.....	92,4 Kcal/Kg°C		
Condutibilidade térmica.....	0,5 cal/cm°C.seg.		
Coeficiente de dilatação linear.....	24x10 <sup>-6</sup> /°C		
PROPRIEDADES TÉRMICAS:	Fundido	Conformado	
		Mola	Duro
Resistência à tracção (Kgf/mm <sup>2</sup> )....	9-12	7-11	13-23
Limite de elasticidade (Kgf/mm <sup>2</sup> )....	3-4	2-4	12-20
Alongamento (%).....	18-25	30-45	2-8
Estricção (%).....	40-55	89-95	60-85
Dureza Brinell (Kgf/mm <sup>2</sup> )	24-32	15-25	35-40
Módulo de elasticidade.....	=70000 MPa		
PROPRIEDADES ELÉCTRICAS:			
Condutibilidade eléctrica (20W).....	33-36,5 m / m / Ω.mm <sup>2</sup>		
(aproximadamente 60% da do cobre)			
Condutibilidade eléctrica (20W) para			
Alumínio puríssimo (99,99%).....	37,5 m / Ω.mm <sup>2</sup>		
Resistividade eléctrica.....	0,0275-0,03 Ω.mm <sup>2</sup>		
Propriedades magnéticas Paramagnético (não ferro-magnético)			

O alumínio forma ligas principalmente com o cobre, com o silício, com o magnésio, com o manganês e ocasionalmente com o zinco, níquel e cobre. O diagrama genérico da solidificação destas ligas está representado na Figura 18.

As ligas que se formam à esquerda do ponto B, são ligas para a conformação plástica, e as que se formam à direita são destinadas à fundição. Este diagrama, embora se mantenha sensivelmente do mesmo tipo, terá para cada elemento de liga uma configuração específica.



**Figura 18** Diagrama de equilíbrio genérico das ligas de Alumínio

De qualquer forma, pode dizer-se que:

- à esquerda da liga AB, existe apenas uma solução sólida ( $\alpha$ ) de alumínio e do elemento de liga; uma liga nestas condições apresenta boas qualidades de maquinabilidade e boa plasticidade a frio e a quente, sendo o seu endurecimento conseguido por conformação a frio.

- entre AB e BC, as ligas são constituídas por uma solução sólida e por uma pequena percentagem do elemento de liga precipitado, que constitui a 2ª fase. Uma liga nestas condições tem características idênticas às anteriores, só que o endurecimento se faz por tratamento térmico e posterior envelhecimento (estágio longo). O tratamento térmico consiste no aquecimento a uma temperatura superior à linha AB, o que vai provocar o aparecimento de uma só fase (solução sólida); segue-se o envelhecimento após o que se procede ao arrefecimento, o que origina que a fase sobranse solidifique de forma dispersa.

- à direita de E existe, além da solução sólida e da fase sobranse, o eutético de composição E; estas ligas destinam-se à fundição e apresentam boas características de moldabilidade, boa resistência a corrosão e grande plasticidade.

Na generalidade, a adição de metais ao alumínio, visa o aumento da resistência à tracção, tensão de cedência e dureza, a correspondente redução do alongamento e a melhoria das propriedades anti-corrosivas. Nas fundições de alumínio os elementos de liga visam também a facilidade de moldação.

A melhoria das propriedades mecânicas pode também ser levada a cabo por tratamentos térmicos e mecânicos.

Analisemos agora a contribuição dos diversos elementos de liga, com ajuda dos diagramas de equilíbrio apresentados na Figura 19.

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 contracção e permite o encruamento por envelhecimento da liga; a resistência a corrosão destas ligas é muito fraca.

O silício é também bastante usado, principalmente em ligas para fundição, pois reduz a contracção e aumenta a fluidez; aumenta também a resistência à corrosão, tem um menor coeficiente de expansão térmica e elevada condutibilidade térmica; apresenta também uma elevada tenacidade. O silício raramente excede o teor de 14% na liga, é também usado como elemento de liga secundário nas ligas AlMg, permitindo a precipitação do silicato de Magnésio ( $\text{MgSi}$ ), como agente endurecedor.

O magnésio, é ligado ao alumínio em teores de 1 a 10%; torna a liga mais leve que o alumínio isolado; permite boas propriedades mecânicas, boa resistência à corrosão e é facilmente maquinável. O Mg tem a máxima solubilidade a 14.9% a 452°C, reduzindo-se até cerca de 2% a temperatura ambiente.

O encruamento por envelhecimento, é possível pela precipitação da fase  $\beta$  (Al Mg), deixando a solução sólida  $\alpha$ .

Além das ligas de alumínio binárias, existem ligas ternárias e quaternárias. Todas elas poderão ser interpretadas de forma semelhante, admitindo que se tratam de ligas com alguns elementos, a que se junta um outro.

Finalmente, refere-se que o alumínio e as suas ligas têm uma extensiva utilização em utensílios domésticos, tintas, indústria automóvel, construção civil, indústria naval, indústria aeronáutica, electricidade, etc., e são comercializados nas formas correntes de chapas, perfis, tubos, arame, etc., bem como em fundição. Nalgumas ligas de alumínio, a tenacidade e a resistência à tracção mantêm-se ou aumentam com o abaixamento de temperatura (para valores até  $-195^\circ\text{C}$ ); este facto torna-as adaptáveis para aplicações em criogenia.

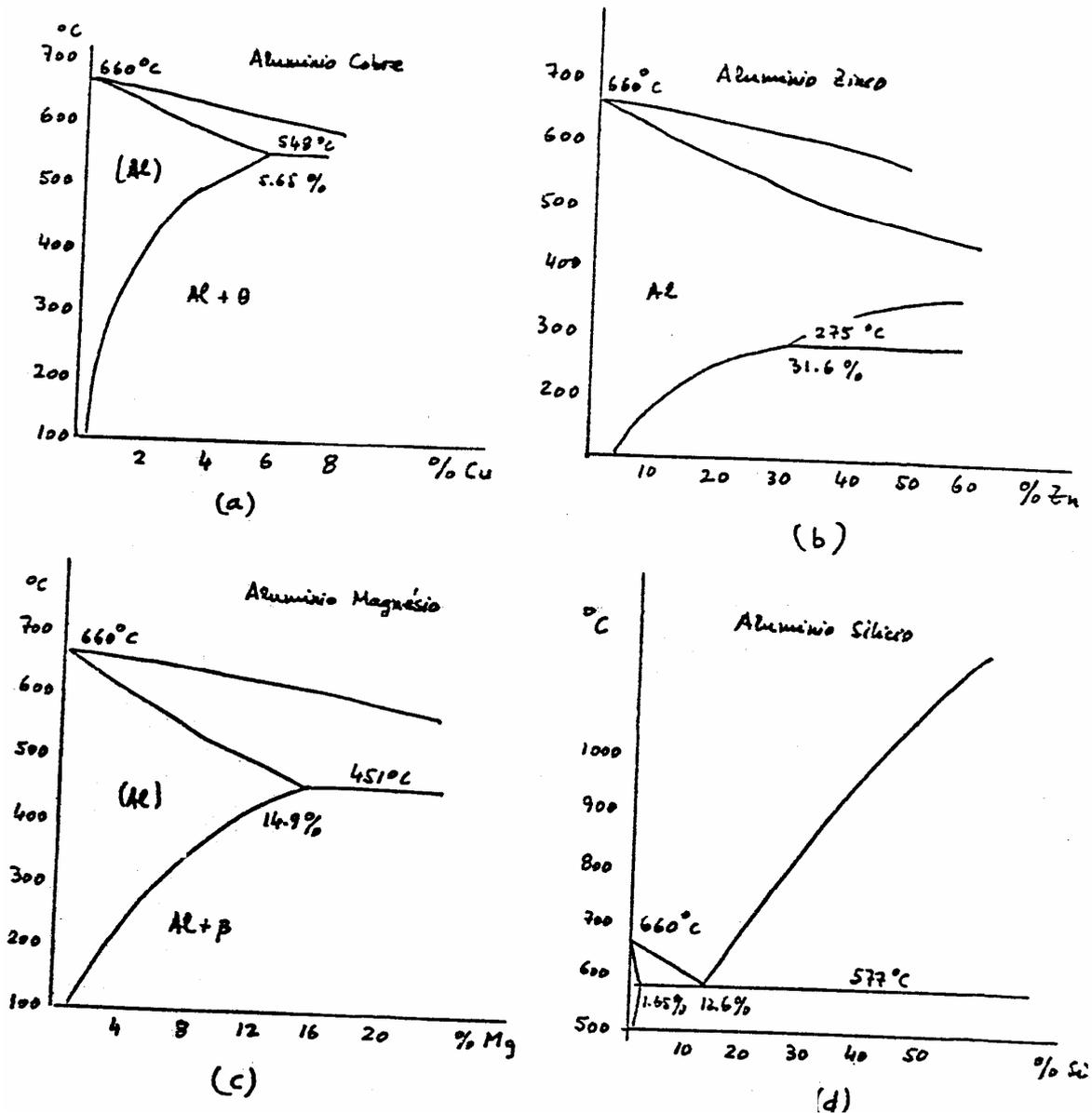


Figura 19 Diagramas de equilíbrio das ligas de Alumínio  
(a) Al Cu (b) Al Zn (c) Al Mg (d) Al Si

## 2.3 Classificação das ligas de alumínio

As ligas de alumínio são classificadas em três diferentes aspectos:

Por composição - São divididas em "alumínio comercialmente puro e em "ligas de alumínio".

Pelo tratamento - São divididas ligas sensíveis ao tratamento térmico e ligas insensíveis ao tratamento térmico.

Pelo método de produção - São divididas em ligas forjáveis (ou de conformação plástica) e ligas fundidas.

As ligas de conformação plástica são classificadas segundo um sistema de numeração desenvolvido pela “Aluminium Association” dos E.U.A.. A Tabela 25 apresenta um resumo desse sistema de classificação que é o mais corrente.

As ligas das séries 1, 3 e 5 são insensíveis ao tratamento térmico, mas as suas propriedades mecânicas podem ser melhoradas por trabalho a frio, devendo tais características à composição de Mn e Mg.

As ligas das séries 2, 6 e 7 são sensíveis ao tratamento térmico; as ligas da série 4 embora também o sejam vêm o seu uso restringido a metal de adição em soldadura.

As ligas de fundição têm outro sistema de classificação, sendo as mais usadas industrialmente, as seguintes:

- Alumínio Silício
- Alumínio Cobre Silício
- Alumínio Magnésio Silício
- Alumínio Zinco Magnésio
- Alumínio Estanho

Estas ligas de fundição, consoante a sua composição, podem ou não ser sensíveis aos tratamentos térmicos; em geral, têm propriedades mecânicas inferiores às ligas de conformação plástica.

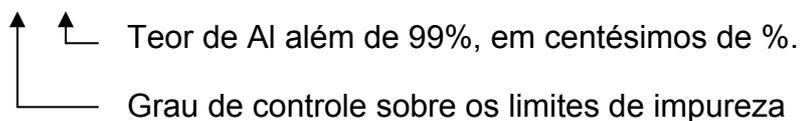
**Tabela 25 Designação Numérica de Lisas de alumínio de Conformação Plástica (Forjados), segundo a Aluminium Association**

	Principal Elemento de Liga
1 x x x	Alumínio Comercial Puro (Al 99.0%)
2 x x x	Cobre
3 x x x	Manganês
4 x x x	Silício
5 x x x	Magnésio
6 x x x	Magnésio e Silício
7 x x x	Zinco
8 x x x	Outros elementos de liga
9 x x x	Fora de uso (disponível)

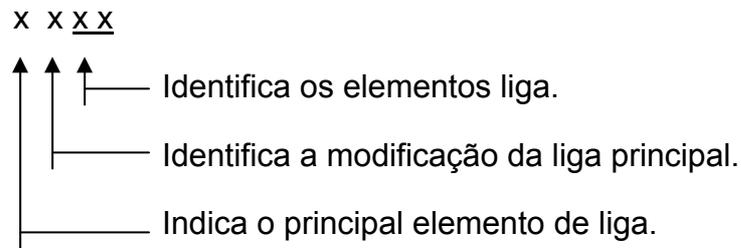
## 2. Interpretação da Designação Numérica

### a. Alumínio Comercial Puro

1 x xx



### b. Outras Ligas de Alumínio



### 3. Indicação do Tratamento da Liga

(a) Ligas sensíveis a tratamento térmico (não usadas em Eng<sup>a</sup> Naval)

2 x x x  
 6 x x x  
 7 x x x

(b) Ligas insensíveis a tratamento térmico (podem ser sujeitas a tratamento mecânico de encruamento).

1 x x x  
 3 x x x  
 5 x x x

Notas:

- a serie 4 x x x, embora sensível ao tratamento térmico é usada principalmente para folha de brazagem e arame de soldadura;
- existe um alumínio comercial designado simplesmente por EC, que é usado como condutor, eléctrico e em outras aplicações eléctricas;
- além das designações citadas, existem ainda designações referentes aos acabamentos superficiais (mecânicos, químicos e revestimentos), que não são aqui apresentados.

c. Designações que indicam o tratamento e respectivo grau de intensidade.

(1) Sufixos (indicação que se segue à designação numérica).

- F - Como produzido, sem propriedades garantidas.
- O - recozido, recristalizado (apenas para produtos forjados).
- H - Tratamento mecânica (encruamento) (apenas para produtos forjados).
- H1 - Encruado (endurecimento por deformação).
- H2 - Encruado e parcialmente recozido.
- H3 - Encruado e estabilizado.
- Hxx - O segundo (ou terceiro) dígito indicam o grau de endurecimento (ou revenido) sendo: O – totalmente recozido; 2 – 1/4 duro; 4 – 1/2 duro; 8 – duro
- T - Tratamento térmico com ou sem encruamento suplementar
- T2 - Recozido (produtos de fundição)
- T3 - Tratamento de solubilização e em seguida trabalhado a frio com envelhecimento natural (exclusivamente para forjados).
- T4 - Tratamento de solubilização seguido de envelhecimento natural de estabilização.
- T5 - Envelhecimento artificial sem tratamento de solubilização.
- T6 - Tratamento de solubilização seguido de envelhecimento artificial.
- T8 - Tratamento de solubilização, seguido de trabalho a frio e envelhecimento

artificial.

T9 - Tratamento de solubilização, seguido de envelhecimento artificial e de trabalho a frio.

W - Tratado termicamente (instável) — liga sujeita a envelhecimento natural, à temperatura ambiente após tratamento térmico.

(2) Prefixos (indicação que precede a designação numérica).

X - Indica que se trata duma liga experimental, o prefixo será retirado logo que a liga se torne definitiva (exº X 5083 — H2).

## 2.4 Considerações sobre o Projecto Estrutural em Alumínio

Como as propriedades mecânicas de alumínio e suas ligas são diferentes das do aço, o cálculo estrutural deve tomar esse facto em conta.

A decisão de efectuar uma estrutura em liga de alumínio deve tomar em conta os diversos factores em jogo, designadamente:

- Tensão de Ruptura
- Tensão de Cedência
- Módulo de Elasticidade
- Massa Volúmica
- Soldabilidade
- Conformabilidade
- Resistência à Corrosão
- Tenacidade à Fractura, etc.

Sob o ponto de vista de resistência à tracção, as ligas de alumínio usadas: em engenharia são comparáveis ao aço de baixo teor de carbono (Figura 20).

A relação resistência/peso é favorável ao alumínio.

Uma vez que o módulo de elasticidade do alumínio é cerca de um terço do módulo de elasticidade do aço, torna as colunas de alumínio e as peças sujeitas à compressão menos resistentes à encurvadura e ao enfundamento (instabilidade). No entanto, um menor E, é favorável no que se refere às junções de estruturas Aço-Al e também no que se refere à resistência no choque.

Verifica-se que quando sujeito a tensões de flexão o alumínio se deforma mais que aço ou, por outro lado, requer que para uma mesma deformação e para uma mesma carga, o momento de inércia seja maior.

O alumínio, devido ao facto de ter uma estrutura cúbica de faces centradas, com maior número de placas de escorregamento, é dúctil mesmo a baixas temperaturas. (Figura 21).

No que se refere à tenacidade e fractura, e porque se mantém dúctil, a energia de choque absorvida para ruptura não varia drasticamente com a temperatura, como sucede com o aço; no entanto, a capacidade de absorção de energia é inferior à demonstrada pelos aços quando comparados em temperaturas em que este é dúctil.

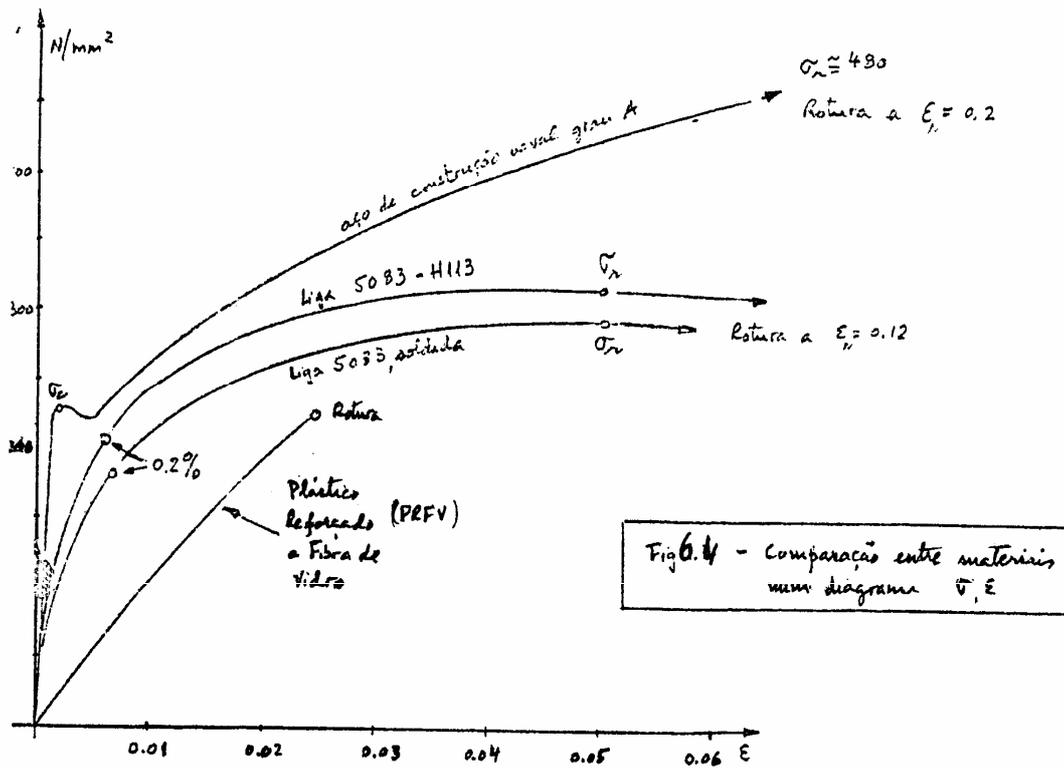


Figura 20 Comparação entre materiais num diagrama  $\sigma, \epsilon$

A resistência do alumínio diminui com o aumento do valor das tensões de ruptura à tracção. Os alumínio da série 5000 são os que apresentam maior resiliência. (Figura 22)

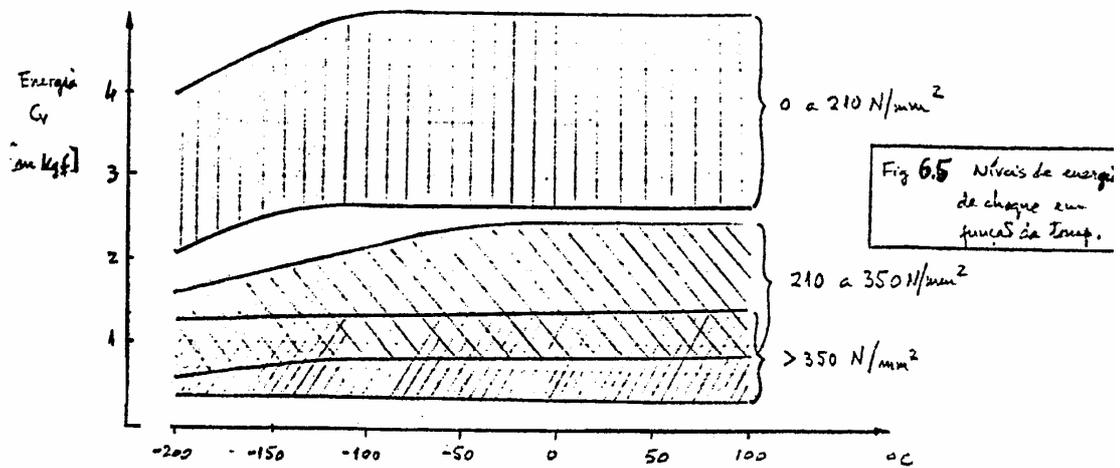
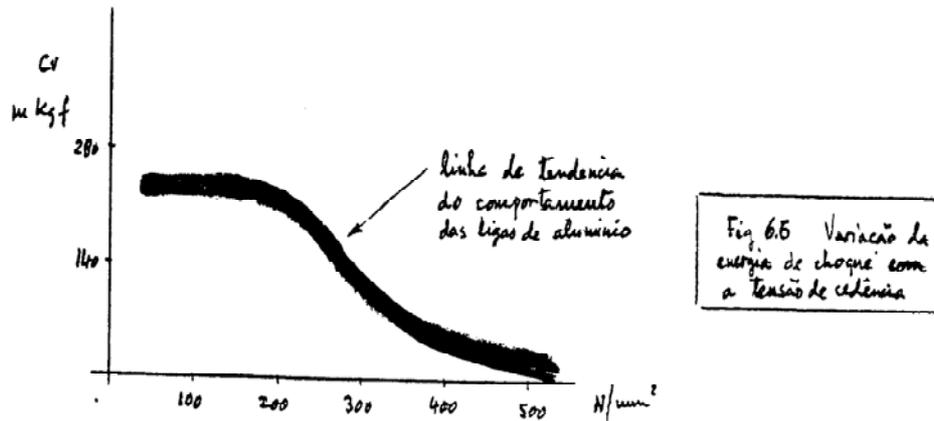


Figura 21 Níveis de energia de choque em função da temperatura



**Figura 22** Variação da energia de choque com a tensão de cedência

## 2.5 Aplicações navais do alumínio e suas ligas

Tanto quanto se sabe, o alumínio foi aplicado em embarcações desde 1890. Primeiro casco oceânico fabricado de alumínio foi o iate francês Mignon, de 13 metros.

Em 1894 a expedição polar de Walter Wellman usou embarcações de Alumínio de 18 pés, que pesavam 375 libras, com grande redução relativamente às 1700 libras que as embarcações de madeira com a mesma dimensão, pesavam; acresce que as embarcações de alumínio permitiam um excelente serviço, porque tinham uma maior resistência ao gelo que as de madeira.

Nestas primeiras aplicações utilizava-se o alumínio puro, que não tem nem adequada resistência à corrosão, nem à resistência mecânica requerida para o serviço marítimo.

Apenas em 1930 começaram a usar-se ligas contendo magnésio e manganês, que satisfaziam os requisitos de aplicações estruturais em construção naval.

As ligas de alumínio são aplicadas na indústria naval onde os seus atributos são valorizados, quando confrontados com outros materiais. Alguns desses atributos são: baixa densidade, elevada relação resistência à tracção/peso, resistência à corrosão em determinados ambientes e retenção da tenacidade a baixas temperaturas, nalguns casos, o valor relativamente baixo do módulo de elasticidade é também um factor importante. O desenvolvimento e o uso de ligas de alumínio em estruturas navais está também muito relacionado com o desenvolvimento da soldadura em atmosfera inerte (\*MGAW), algumas vezes designada impropriamente por "soldadura semi-automática".

As ligas de alumínio são frequentemente usadas em superestruturas de grandes navios ou de navios militares e também em cascos de alguns navios e embarcações, incluindo a actividade oceânica (offshore).

Como já se referiu, a baixa densidade do alumínio e das suas ligas, toma-os particularmente atractivas para aplicações onde se permite uma elevada resistência a tracção, relativamente ao peso, como embarcações rápidas, navios de efeito de superfície (aerobarcos) ou hydrofoils. uma vez que as ligas de alumínio não reduzem a resistência e mantém a tenacidade á medida que a temperatura se reduz têm sido aplicadas em serviços de

criogenia, tal como em contentores (reservatórios) de gás natural liquefeito (LNG's). A especificação de algumas ligas de alumínio constam das tabelas 1.1, 1.2 e 1.3.

As ligas de alumínio com magnésio (da série 5xxx), de elevada resistência mecânica são as mais largamente usadas em estruturas marítimas, sendo as que contém 4.5%, 4% e 5% de Mg, as mais comuns adquirindo uma resistência adicional por conformação plástica a frio e não por tratamento térmico. As ligas mais usadas são as 5086, 5083, 5456 e 5454; os perfis estendidos são dessas mesmas ligas e da liga 6061; a liga 5454 pode ser aplicada em temperaturas superiores à temperatura ambiente (superior a 65°C).

Estas ligas, que têm uma boa soldabilidade, são geralmente usadas na condição "1/4 duro", por conformação plástica a frio, proporcionando a conveniente resistência à corrosão e resistência estática (à tracção); tensões de cedência mais elevadas podem ser obtidas por trabalho a frio adicional. O aumento do teor do magnésio para mais de 5%, que faria aumentar a resistência não é normalmente usado, devido à susceptibilidade à corrosão sob tensão.

Em casos onde se preveja forte acção corrosiva, como zonas de águas estagnadas em porões, as ligas poderão ser fornecidas em têmperas especiais (5083 - H116, 5086 - H117 e 5454 - H116) que são bastante resistentes a esfoliação, que é uma forma especial de corrosão intergranular que produz delaminação. Uma vez que a construção naval é essencialmente uma construção soldada, é importante analisar o comportamento das zonas soldadas e zonas contíguas (zonas afectadas pelo calor - ZAC); Em geral, o metal base na vizinhança dos tratáveis termicamente (tal como as ligas da série 5xxx) é transformado na condição de recozido, pelo calor desenvolvido na soldadura. Há assim uma redução das propriedades relacionadas com a resistência à tracção até ao valor correspondente à condição de recozido.

Este facto deve ser tomado em consideração em projecto.

A liga 6061-T6, susceptível de tratamento térmico, desenvolve a sua resistência através dum aquecimento à temperatura de recozimento, seguido de têmpera em água e depois de reaquecimento a uma temperatura inferior para atingir uma precipitação controlada de compostos intermetálicos. Esta liga é usada em aplicações marítimas, devido à maior facilidade com que é estendida, relativamente às ligas de Al Mg e por ter boa resistência à corrosão em ambiente salino.

A liga 6061-T6, embora de mais elevada tensão de rotura, é severamente degradada na sua resistência, ductilidade e resistência à corrosão, por acção do calor desenvolvido em soldadura, desaconselhando totalmente este processo de fabrico. É igualmente fixada por cravação.

As ligas de alumínio, em geral, não são susceptíveis de excessiva corrosão, em condições normais; contudo podem corroer-se em elevado grau quando estão em contacto com metais diferentes.

Este facto pode ocorrer entre cascos de alumínio e encanamentos de outros materiais ou entre anteparas ou pavimentos de alumínio e componentes de passagem ou de junção de outros materiais.

Em tais casos, o alumínio deve ser isolado do outro metal por fitas, revestimentos ou juntas, que não absorvam água, ou por acessórios e suspensões especiais.

A importância destes aspectos é tal, que o uso do alumínio é regulamentado, em alguns aspectos, na Convenção SOLAS 1974.

Da mesma forma, o alumínio, em contacto com madeira, materiais isolantes ou com cimento deve ser protegido contra efeitos corrosivos resultantes de impurezas existentes nestes materiais, através do uso de adequados revestimentos ou coberturas.

A corrosão generalizada do alumínio pode ser evitada pela protecção catódica.

A resistência à corrosão de algumas ligas de alumínio pode ser reforçada através de um tratamento superficial designado por anodização, que será referido noutra local.

Em comparação com o aço, as ligas de alumínio têm baixos pontos de fusão (cerca de 600°C) e tendem a perder resistência muito rapidamente, quando expostas a temperaturas elevadas.

O uso de alumínio em aplicações estruturais importantes e susceptíveis de se incendiarem deve ser objecto de protecções especiais de entre as quais se refere a aplicação de uma protecção, por isolamento, que crie uma barreira à fonte de calor, estas protecções, além do seu custo ser elevado, traduzem-se em aumento de peso, o que é contrário a um dos objectivos do uso do alumínio, que é tirar partido do seu baixo peso específico.

A armazenagem e manuseamento das chapas e demais material, em alumínio e suas ligas, deve ser executado de forma muito mais cuidadosa que o aço, de preferência em armazéns cobertos com suportes feitos de madeira ou alumínio e mantidos separados do aço e de outros metais. Deve ser manuseado com grampos macios ou com dispositivos de vácuo.

A enformação do alumínio pode ser executada recorrendo às máquinas e ferramentas de uso convencional na construção naval, no entanto, a necessidade de produzir grandes deformações (dobragem ou quinagem) deve levar ao uso de chapas macias, recozidas ou 1/4 duro.

O uso de calor pode ser feito duma forma moderada, geralmente de 200 a 260°C, com um rígido controle de temperaturas e com prévia aprovação ou certificação que tal temperatura é aceitável para o material considerado; de notar que o alumínio não apresenta alteração de cor superficial com o aumento de temperatura, pelo que o controle desta deve ser feito com termopares, ou com lápis térmico.

Quando deformado, o alumínio sofre encruamento (ou endurecimento) pelo que deverá ser posteriormente recozido.

Uma vez que o alumínio é bastante macio, as ferramentas e equipamento de enformação devem ser macias e isentas de resíduos duros.

A preparação de juntas para soldadura pode ser feita por meios mecânicos como a serra, a guilhotina e a plaina e por corte por arco plasma ou laser, especialmente em grandes espessuras. O arco plasma é também usado para chanfrar e para limpeza da zona de junção para permitir o cordão de reverso (back gouging).

No caso de chanfros em U e I, é usual a maquinagem.

O corte por tesoura não é recomendado para a preparação de juntas porque a rugosidade das arestas cortadas encobrem gordura e sujidade.

A limpeza das zonas a soldar pode ser feita por solventes e/ou usando escovas de aço inoxidável. Os produtos químicos devem ser próprios para alumínio; a soldadura deve ser feita logo após a limpeza, antes da camada de óxido se formar de novo. O alumínio anodizado não pode ser soldado a não ser que a camada superficial seja retirada.

A soldadura do alumínio e das suas ligas faz-se como já se disse, segundo o processo de soldadura eléctrica em atmosfera de gás inerte - MGA (MIG) ou ATG (TIG), sendo o primeiro o mais corrente. As sequências de soldadura a executar são semelhantes às usadas para o aço, no entanto as elevadas condutibilidade térmica, dilatação, coeficiente de expansão e as características mecânicas do alumínio e suas ligas tomam-no muito susceptível à deformação, quando soldado, requerendo cuidados especiais no constrangimento, parâmetros de soldadura, etc.

De notar que o alumínio anodizado não se pode soldar sem previamente destruir a camada superficial de óxido duro.

As soldaduras das ligas de alumínio para usos navais não necessitam de pré aquecimento, excepto quando se pretende uma redução nas deformações ou quando as peças tiverem grandes espessuras, sob grandes restrições mecânicas; também se deverá usar o pré aquecimento quando a humidade ambiente for elevada ou quando a temperatura for inferior a 0°C. No caso concreto das ligas da série 5000 deve ser evitado o pré aquecimento ou a exposição exagerada à temperatura de 65°C a 200°C, uma vez que se poderá deteriorar a liga, por corrosão.

Os metais de adição apropriados para soldadura constam da Tabela 28

Também existem ligas de alumínio para fundição, podendo ser sensíveis ou não a tratamentos térmicos. Em geral têm propriedades mecânicas inferiores às ligas forjadas (de conformação plástica). As fundições de alumínio (que têm uma identificação diferente das ligas forjáveis) mais usadas, são as ligas Al Si, que têm uma boa moldabilidade e são muito resistentes à água do mar e às atmosferas salinas; as ligas Al Cu Si, têm boa resistência à tracção, elevada dureza e apresentam uma elevada maquinabilidade e boa moldabilidade.

As ligas de fundição Al Mg Si são as que têm maior resistência à corrosão, mas são difíceis de moldar.

As ligas Al Zn Mg, têm boas características à temperatura ambiente, mas não são adequadas para temperaturas elevadas.

As fundições Al Sn, desenvolvidas principalmente como ligas para chumaceiras, têm uma elevada capacidade de carga e de resistência à fadiga, sendo usadas em tirantes e chumaceiras de apoio.

**Tabela 26 Composição química**

Grade	Al %	Si %	Fe %	Cu %	Mn %	Mg %	Cr %	Zn %	Ti %	Miscellaneous
5083	remainder	<0,40	<0,40	<0,10	0,40-1,0	4,0-4,9	0,05-0,25	<0,25	<0,15	
5383	remainder	<0,25	<0,25	<0,20	0,70-1,0	4,0-5,2	<0,25	<0,40	<0,15	

Grade	Al %	Si %	Fe %	Cu %	Mn %	Mg %	Cr %	Zn %	Ti %	Miscellaneous
5086	remainder	<0,40	<0,50	<0,10	0,20-0,70	3,5-4,5	0,05-0,25	<0,25	<0,15	
5754	remainder	<0,40	<0,40	<0,10	<0,50	2,6-3,6	<0,30	<0,20	<0,15	0,10<Mn+Cr<0,50
6005-A	remainder	0,50-0,90	<0,35	<0,30	<0,50	0,04-0,7	<0,30	<0,20	<0,10	0,12<Mn+Cr<0,50
6061	remainder	0,40-0,80	<0,70	0,15-0,40	<0,15	0,8-1,2	0,04-0,35	<0,25	<0,15	
6082	remainder	0,70-1,30	<0,50	<0,10	0,40-1,0	0,6-1,2	<0,25	<0,20	<0,10	

**Note 1:** Impurities not mentioned in this Table : single 0,05 max ; total 0,15 max.

**Note 2:** Slight variations in the content of some elements compared with the values indicated in this Table may be accepted with the Society's agreement.

**Note 3:** Other metallic elements are considered as impurities; the limits stated in Note 1 apply to them in general but need not be checked.

**Tabela 27 Propriedades mecânicas de produtos laminados**

Alloys	Temper condition <a href="#">(1)</a>	Yield strength $R_{p0,2}$ min (N/mm)	Tensile strength $R_m$ (N/mm)	Elongation min (%)	
				$A_{50mm}$ $t < 12,5$ mm	$A_{5d}$ $t \geq 12,5$ mm
5083	0/H111	125	275 - 350	16	15
5083	H112	125	> 275	12	10
5083	H116	215	> 305	12 10 if $t < 6$ mm	10
5083	H32/H321	215	305 - 380	10	9
5383	0/H111	145	290		17
5383	H116/H321	220	305		10
5383	H34	270	340		5
5086	0/H111	100	240 - 310	17	16
5086	H112	125 105	> 250 > 240	8	9
5086	H116	195	> 275	10	9
5086	H32/H321	185	275 - 335	10 8 if $t < 6$ mm	9
5754	0/H111	85	190 - 240	18	17

**Note 1:** The values are applicable for both longitudinal and transverse tensile test specimens.

**(1)** The following temper designations are in accordance with the Aluminium Association.

**Tabela 28 Metal de Adição Recomendado para a soldadura de ligas de Alumínio de conformação plástica (1)**

MATERIAIS A SOLDAR	5083	5086	5454(2)	5456	6061
5083	5183	5356	5356	5183	5356
5086	5356	5356	5356	5356	5356
5454 (2)	5356	5356	5554	5356	5356
5456	5183	5356	5356	5356	5356
6061	5356	5356	5356 (3)	5356	4043 (3)(4)

(1) Notar que as ligas de adição 5183, 5356 e 5556 são intermutáveis desde que a resistência, ductilidade e resistência à corrosão desde adequados para as condições de serviço.

(2) As ligas 5454, soldadas com o metal de adição 5554 são recomendadas para usos em temperaturas acima de 65°C, tal como chaminés e coberturas em casas de máquinas.

(3) Poderá usar o 5138

(4) A liga 4043 é um metal de adição de “uso geral”

Tabela 29

LIGAS DE ALUMÍNIO DE CONFORMAÇÃO PLÁSTICA – COMPOSIÇÃO E PROPRIEDADES MECÂNICAS

LIGAS INSENSÍVEIS AO TRATAMENTO TÉRMICO (a)	DESIGNAÇÃO DA LIGA		PROPRIEDADES MECÂNICAS					σ <sub>B</sub> [N/mm <sup>2</sup> ] - valores mínimos - máx	σ <sub>C</sub> [N/mm <sup>2</sup> ] - valores mínimos
	Alumínio Associação	ISO	BS 1470-77	σ <sub>T</sub>	E <sub>r</sub>	Alongamento	σ <sub>B</sub>		
(a)	5052 - 0	Al Mg 2.5	N4	182-214	66	20	50	110	Ev - Estreitas após 20 a 50 mm [%] Natureza Dureza [H18] - 500 kg com esp. de 10 mm σ <sub>B</sub> [N/mm <sup>2</sup> ] - 5x10 <sup>8</sup> cilindros com máquina flexão rotativa (a) Todas as ligas insensíveis ao Tratamento Térmico, que se aplicarem no estado recozido, foram aquecidas a 345°C (Ligas com o símbolo - 0) (b) Recozido por aquecimento a 415°C durante 2 a 3 horas (c) Tratamento de solubilização a 520°C (d) Tratamento de precipitação a 160°C durante 16 a 20 horas ou a 176°C durante 6 a 10 horas (e) E = 70 a 72 GPa
	5052 - H32			214-262	159	10	60	115	
	5083 - 0	Al Mg 4.5 Mn	N8	270-350	120	16	75		
	5083 - H116			303-386	214	12			
	5086 - 0	Al Mg 4		241-303	97	17	65	150	
	5086 - H112			241-	110	10	68		
	5454 - 0	Al Mg 3 Mn	N51	214-285	83	18	55		
	5454 - H32			248-303	179	10			
	5456 - 0			290-360	127	16	75		
	5456 - H117			317-386	220	12			
5154 - 0	Al Mg 3.5 Al Mg 3	N5	241 -	96		38	115		
(b)	6063 - 0	Al Mg Si	N9	90	48	22	25	55	
	6351	Al Si 1 Mg	H30	309	270				
	6061 - 0			120	55	20	30	65	
	6061 - T4			207	110	16	65	95	
(c)	6061 - T6		290	241	10	95	95		

Tabela 30

**TABELA DE EQUIVALÊNCIA DE DIVERSAS LIGAS DE ALUMÍNIO,  
SEGUNDO NORMAS E ESPECIFICAÇÕES CORRENTES**

GERMANY		U.S.A.		GREAT BRITAIN		CANADA		ITALY		FRANCE	SWITZERLAND
DIN		ASTM (AA)	B.S.	DTD	Symbol	UNI	AFNOR Symbol	VSM			
			Symbol								
Al 99	3 0205	1 100	IC		2S	P.AIP 99,0	3 567	A4			
		1 100						A 45			
Al 99,5	3 0255	1 050	1B		1S	P.AIP 99,5	4 507	A5		Al 99,5	
Al 99,7	3 0275	1 070	2L48		99,7	P.AIP 99,7	4 508	A7			
Al 99,8	3 0285	1 080	1A		99,80	P.AIP 99,8	4 509	A8			
Al 99,98R	3 0385	1 099	I		99,99			A99		R Al	
AlMn	3 0515	3 003	N3		3S	P.AIMn 1,2	3 568	A-M1		Al-Mn	
		3 005						A-MG			
		3 004			4S			A-M1G		(Al-1Mg)	
AlMg1	3 3515	5 005			B57S			A-G06		(Al-1Mg)	
(AlMg1)	(3 3515)	5 050			A57S-6071	P.AIMg 1,5	3 573	A-G1		Al-1,5Mg	
					(B57S) J57S						
AlMg3	3 3535	5154 e (5254)	N5	180C	53S, 54S	(P.AIMg 3,5)	(3 575)	A-G3		Al-3Mg	
(AlMg5)	(3 3555)	5 086	N5/6		B54S			A-G4MC		Al-4Mg	
AlMg4,5Mn		5 083	N8		D54S						
AlMg5	3 3555	5 056	N6		(56S)-A56S	P.AIMg5	3 576	A-G5		Al-5Mg	
AlMgSi0,5	3 3206	6 063	H9	372B	50S	P.AISi 0,4 Mg	3 569	A-GS		Al-Mg-Si	
						P.AISi 0,5 Mg	3 570				
AlMgSi1		(6061)-(6051)	H19		51S			A-SG			
AlMgSi1	3 2315		H30	346A - 5080	B51S	P.AISi1 MgMn	3 571	A-SGM		Al-Mg-Si	
AlCuMg0,5	3 1305	2 117	L69		16S	P.AICu2,5MgSi	3 577	A-U2G			
AlCuMg1	3 1325	2 017	H14	150A	17S	P.AICu4MgMn	3 579	A-U4G		Al-4Cu-1Mg	
		2 014	H15	5010-5020	B26S-26S	P.AICu 4,4 SiMnMg	3 581	A-U4SG		(Al-4Cu-1Mg)	
				710A-746B							
				5030-5040							
AlCuMg2	3 1335	2 024			24S	P.AICu 4,5 MgMn	3 583	A-U4G1			
AlCuMgPb	3 1645	(2 011)			(28S)			A-U4Pb			
		2 618			42S			A-U2GN			
			H18	717-724							
				731-745							
				5014-5070A							
				5 084							
(AlZnMg3)	(3 4355)							A-Z3G2			
AlZnMgCu0,5	3 4345	7 079						A-Z4GU			
AlZnMgCu1,5	4 3485	7 075						A-Z5GU		Al-Zn-Mg-Cu	
				5074-617A	M75S-75S	P.AIZn 5,8 MgCu	3 735				
				5050A-5060A							
				5 074	(C77S)	P.AIZn 7,8 MgCu	3 737	A-Z8GU			
				324A	38S	P.AISi 12 MgCuNi	3 572	A-S12UN			
		7001-(7178)									
		4 032									

## 2.6 Produção de alumínio

A produção de alumínio é um processo com duas fases.

Numa primeira fase são produzidas 2 t de alumina ( $Al_2O_3$ ) a partir de 4 t de bauxite; na segunda fase, as 2 t de alumina em conjunto com 1/2 t de carbono (ânodo) e usando cerca de 15000 kwh de electricidade produzem 1 t de alumínio.

A metalurgia\* do alumínio produz semi-acabados sob a forma de "slabs" para laminagem e "bilhetes" para extrusão.

O processo de produção do alumínio desenrola-se segundo as seguintes operações:

### 1. Moagem

O minério de alumínio (bauxite) triturado é moído e misturado com soda cáustica e em seguida introduzido em grandes autoclaves.

## 2.Cozedura em autoclave\*\*

Nesta operação, que se efectua sob pressão elevada e sob calor, a soda cáustica dissolve o óxido de alumínio existente na bauxite, originando o aluminato de sódio.

## 3.Sedimentação

O óxido de ferro e outra matéria sólida sedimenta no fundo dum tanque de sedimentação, sob a forma de resíduo vermelho, e o aluminato de sódio permanece na solução.

## 4. Precipitação

Nesta operação o aluminato de sódio líquido é arrefecido. Os cristais de hidróxido de alumínio formam-se e separam-se da solução que é recirculada.

## 5.Calcinação

Os cristais de hidróxido de alumínio são aquecidos a mais de 1000 C, tornando-se em alumina. Esta operação decorre no forno de calcinação. A alumina apresenta-se sob a forma pulvewteft-frt de cor branca, sendo cerca de metade de alumínio e metade de oxigénio.

## 6. Redução

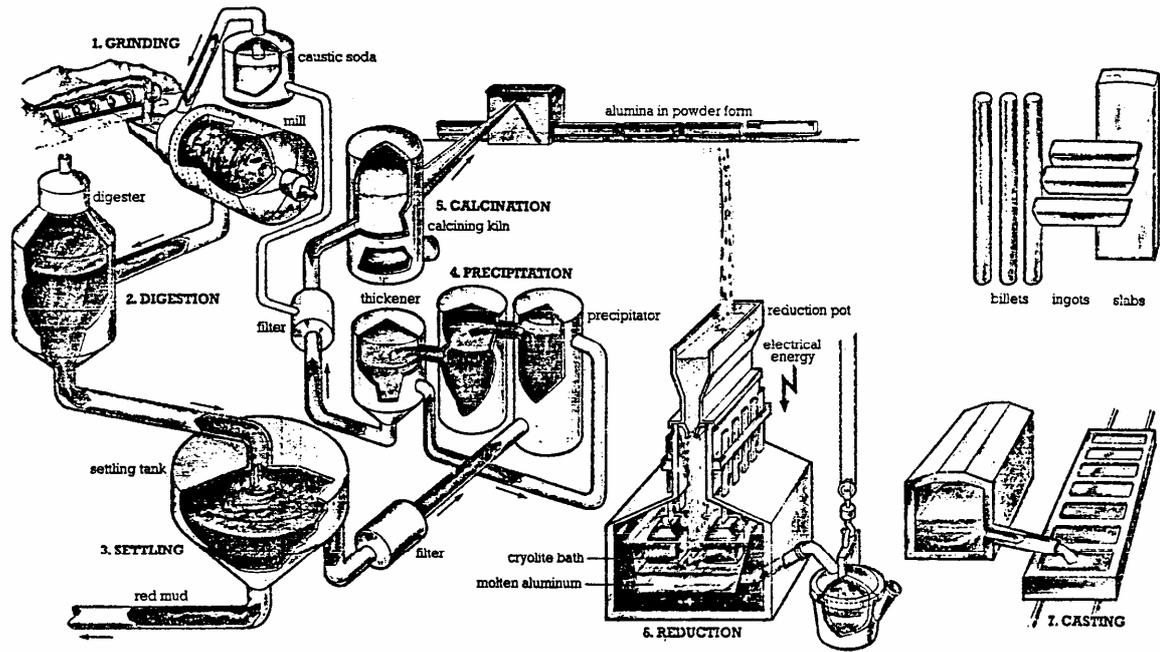
A alumina é dissolvida num electrólito (criolite); por um processo electroquímico a

Neste processo o oxigénio é depositado no ânodo de carbono (-) e o alumínio adere ao cátodo.

## 7. Fundição

O alumínio fundido é vazado em diversas formas; biletas, lingotes e “slabs” que serão posteriormente usadas para processamento de produtos acabados.

\* Smetter      \*\* digestion



The normal production of aluminum is a two-stage process. From roughly four tons of bauxite two tons of aluminum are extracted in a first stage, and these with about half a ton of carbon (anode) by the use of approximately 15,000 kilo-

watt-hours of electricity deliver one ton of aluminum. The smelter supplies the rolling and extrusion plants with rolling slabs and extrusion billets to process semi-finished products.

Up from this stage the metal is subjected to functional application i.e. its properties are selectively utilized: light weight, high strength, chemical stability, good reflection properties, high conductivity, non-toxic, excellent workability.

These admirable characteristics are employed in numerous fields, for example: transportation and traffic, civil engineering, packaging, mechanical and apparatus engineering, electrical engineering, electronics, household, furniture.

**1 Grinding**

Crushed aluminum ore (bauxite) is ground and mixed with caustic soda, then pumped into large digesters.

**2 Digestion**

Under high pressure and heat, the caustic soda dissolves aluminum oxide out of the bauxite to form sodium aluminate.

**3 Settling**

Iron oxide and other solid matter drop to the bottom of the settling tank as red mud, the sodium aluminate remains in the solution.

**4 Precipitation**

The liquid sodium aluminate is cooled. Aluminum hydroxide crystals are formed and separated from the solution which is recirculated.

**5 Calcination**

The aluminum hydroxide crystals are roasted at more than 1,000 °C (1,800 °F) to alumina in the calcining kiln. The powdery white alumina is about half aluminum and half oxygen.

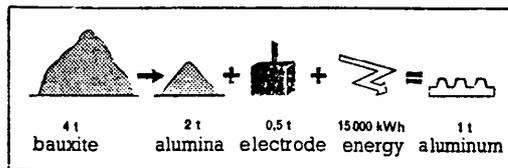
**6 Reduction**

The alumina is dissolved in the electrolyte. Electric current reduces the alumina to aluminum. The oxygen is deposited on the carbon anode (-), the

metal settles on the cathode (+).

**7 Casting**

The molten aluminum is cast into various shapes.



*16.00/kwh ↔ 2t x 1000/kg (só em energia electrica)*

**Figura 23 Esquema de obtenção do alumínio**

## 3 Cobre e suas ligas

### 3.1 Generalidades

O cobre foi provavelmente o primeiro metal a ser descoberto. Foi usado ao longo de séculos tanto como material de engenharia, como material para execução de peças artísticas.

O cobre, na natureza, pode encontrar-se puro, no entanto, mais correntemente apresenta-se sob a forma de compostos - sulfuretos e óxidos, sendo os seus minerais mais importantes a calcopirite ( $\text{Cu}_2\text{Fe}_2\text{S}_3$ ), a covelite ( $\text{CuS}$ ), a calcosite ( $\text{Cu}_2\text{S}$ ), a cuprite ( $\text{Cu}_2\text{O}$ ), a malaquite ( $\text{CuCO}_3, \text{Cu}(\text{OH})_2$ ) e a azurite ( $2\text{CuCO}_3 \text{Cu}(\text{OH})_2$ ).

Na maioria das concentrações minerais, a percentagem de cobre é baixa (1 a 15%), mas como os processos de obtenção são relativamente simples, essas concentrações tornam-se economicamente interessantes.

São dois os processos para a extração:

**a via seca:** o minério é submetido a fusões e operações de afinação a temperaturas elevadas

**a via húmida:** o minério é solubilizado através de lixiviação com ácido sulfúrico, sendo o cobre obtido após tratamento das suas soluções por processos electrolíticos.

### 3.2 Características e Propriedades Principais

O cobre puro apresenta uma cor avermelhada, característica.

O cobre tem uma estrutura cristalina de rede cúbica de faces centradas, que lhe assegura uma resistência moderada e uma boa ductilidade.

O cobre é um material largamente utilizado em electricidade devido à sua excelente condutibilidade eléctrica, que apenas é excedida pela prata. Esta condutibilidade é drasticamente reduzida, quando o cobre contém impurezas.

As aplicações mecânicas derivam da sua boa resistência à corrosão e facilidade de enformação e acabamento; através de tratamento mecânico a sua dureza e resistência aumentam, mas naturalmente, a sua ductilidade é reduzida. Outras propriedades a assinalar são a elevada condutibilidade térmica e as propriedades não magnéticas.

Ligando o cobre a outros elementos, obtêm-se materiais com melhores propriedades, designadamente melhores propriedades mecânicas.

As propriedades do cobre puro estão indicadas.

#### 3.2.1 Propriedades físicas

- Densidade 8.91
- Cor castanha avermelhada
- Ponto de fusão 1083° C
- Calor de fusão 205.000 J/Kg

- Ponto de ebulição 2325 ° C
- Condutibilidade térmica 3,98 w/cm C
- Calor específico médio no estado sólido 384 J/Kg °C
- Coe de dilatação linear  $16.6 \times 10^{-6} \text{ } ^\circ \text{C}$
- Condutibilidade eléctrica a 20° C: 620000 S/cm<sup>3</sup> (Siemens/cm<sup>3</sup>)
- Resistividade eléctrica  $1.72 \times 10^{-8} \text{ } \Omega \text{ m}$
- Propriedades eléctricas: diamagnético

### 3.2.2 Propriedades mecânicas (a 20°C)

Propriedades	Unidades	Electrolítico	Laminado a frio	Recozido
Tensão de rotura	kgf/rnm <sup>2</sup>	15	39	23
Tensão proporcional	kgf/mm <sup>2</sup>	4	28	3
Extensão após rotura	%	35	10	50
Dureza Brinnell	HB	40	190	40
Módulo de elasticidade	kgf/mm <sup>2</sup>		12650	

### 3.2.3 Propriedades químicas

Oxida ao ar para temperaturas superiores a 500° C.

Não é atacado pela água para velocidades de escoamento elevadas.

É atacado pelos ácidos sobretudo na presença conjunta de ar húmido e dióxido de enxofre (SO<sub>2</sub>) ou de ácido sulfídrico, (SH<sub>2</sub>), formando-se óxido de cobre, vulgarmente designado por verdete.

### 3.2.4 Características gerais

Quando puro, é o segundo melhor condutor eléctrico (o melhor é a prata),

Após polimento apresenta brilho intenso.

Apresenta elevada ductilidade e maleabilidade.

As suas características de resistência mecânica melhoram após tratamentos mecânicos.

## 3.3 Aplicações

Existem algumas aplicações do cobre puro em engenharia, quer em condutores e demais material eléctrico, quer em chapa laminada e em tubagens diversas, no entanto, a tendência nos casos de aplicações mecânicas e nas redes de fluídos, é para a redução da sua utilização em benefício de ligas de cobre com melhores propriedades.

O cobre ordinário é 99.9% puro; 0.05% de oxigénio é distribuído pelo metal sob a forma de óxido de cobre. Este óxido tem um ponto de fusão inferior ao do cobre, e durante a soldadura tende a migrar para as fronteiras dos grãos, resultando uma redução da ductilidade. O cobre mais puro (99.98%) é obtido por via electrolítica.

A temperaturas acima de 700° C, o cobre absorve CO e H<sub>2</sub> que reagem com o óxido de cobre e libertam CO<sub>2</sub> e vapor de água, que são solúveis no cobre e que, entre os grãos, exercem pressão suficiente para causar fissuras internas e fragilidade, tornando difícil a execução de soldaduras.

Também o dióxido de enxofre se dissolve a temperaturas elevadas, igualmente contribuindo para o aumento de fragilidade. Por essas razões o recozimento deve fazer-se por arrefecimento rápido, para evitar a fragilização por migração de compostos para as fronteiras dos grãos.

O cobre é largamente utilizado através das ligas de cobre, que têm grande interesse na generalidade da indústria.

Em comparação com o cobre puro, de um modo geral as ligas de cobre são:

- mais resistentes
- possuem melhores características para obtenção de peças de fundição
- são mais tenazes e menos duras, o que as torna mais aptas ao trabalho mecânico
- resistem melhor à corrosão
- possuem maior elasticidade

O cobre forma ligas com variadíssimos elementos, nomeadamente com o estanho, zinco, alumínio, berílio, silício e níquel.

As ligas binárias de cobre e estanho designam-se por bronze.

As ligas de cobre com o Al, Si, Be, etc., designam-se por "bronze" seguido do nome do(s) elemento(s) da liga (Bronze Al, Bronze Si).

As ligas de cobre com zinco designam-se por latões.

As ligas de cobre, que além de zinco têm um segundo elemento de liga, designam-se por latões especiais.

As ligas de cobre que além do zinco, têm mais do que um elemento de liga, designam-se por latões complexos.

A norma NP 861-1971 descreve a terminologia e simbologia das ligas de cobre de utilização corrente, bem como a equivalência em inglês, francês e alemão.

## **3.4 Bronzes**

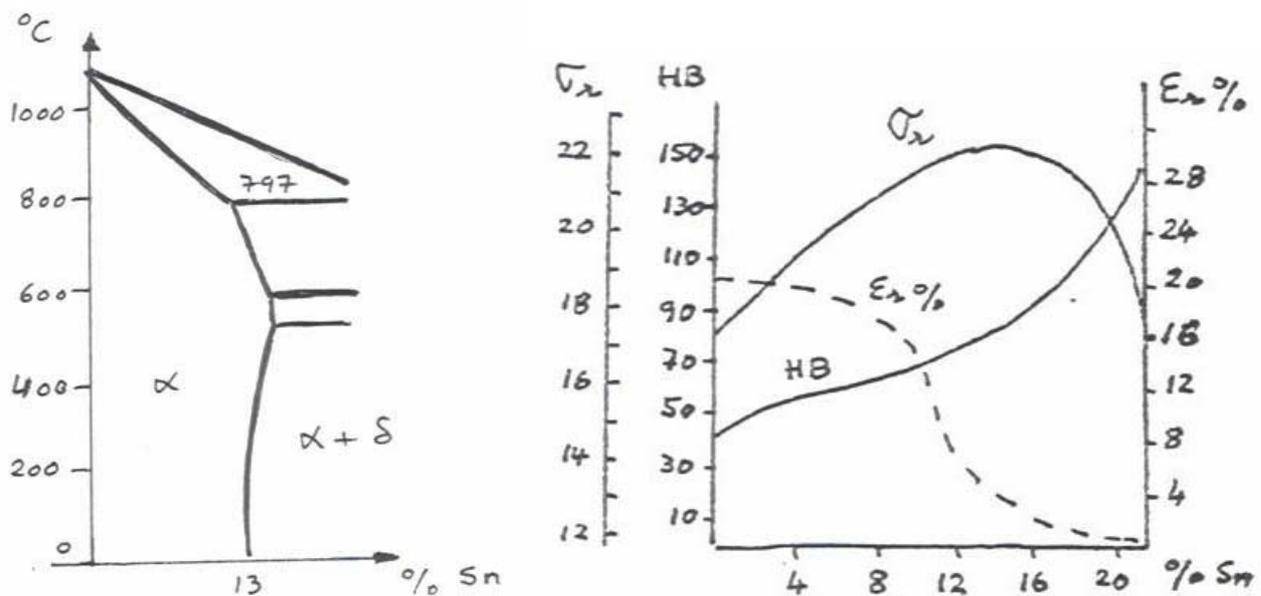
### **3.4.1 Ligas binárias de Cobre e Estanho (Cu-Sn)**

As ligas binárias de cobre e estanho só têm interesse industrial se contiverem entre 5 e 25% de estanho, dado que as suas características apresentam valores muito desfavoráveis fora destes limites.

A Figura 24 representa o diagrama (parcial) de solidificação destas ligas.

Para as condições normais de arrefecimento (diagrama metaestável) podemos considerar os bronzes constituídos.

1. Até 13% de Sn, por uma única fase formando uma solução sólida de substituição do estanho no cobre, fase  $\alpha$ , constituindo uma estrutura formada por uma malha cúbica de faces centradas. Esta estrutura tem elevada maleabilidade, tanto a quente como a frio
2. De 13 a 25% de Sn, por duas fases  $\alpha+\delta$ , sendo  $\delta$  uma solução sólida de composição química  $\text{Cu}_4\text{Sn}$ . Esta estrutura apresenta uma dureza mais elevada e uma maleabilidade muito menor, o que já não permite a deformação plástica a frio salvo após recozimento e têmpera.



**Figura 24**

Pela Figura 24 poderemos verificar a variação de valor das principais características mecânicas estas ligas em função da percentagem de estanho. Pelo diagrama, constata-se que a dureza se mantém sensivelmente de 5 a 14% de Sn, aumentando a partir daí; a cerca dos 13% de Sn, diminuindo depois; o alongamento mantém-se elevado entre 5 e 14% descendo depois rapidamente, atingindo um valor próximo de zero, cerca dos 17% de Sn.

Por esta análise se poderá perceber que:

- Os bronzes até 13% de Sn são maleáveis a quente e a frio, sendo por isso utilizados em trabalhos de conformação plástica.
- Os bronzes com mais de 13%, como têm dureza elevada e são frágeis, só podem deformar-se a quente. Quando deformados, são geralmente sujeitos a um recozimento para distensão de tensões.

Este tratamento também se aplica nas peças fundidas.

A estes bronzes podemos aplicar a têmpera de forma semelhante à dos aços.

A cor destas ligas depende do teor em estanho, variando de avermelhado para 5% de Sn até amarelo-claro a partir de 15% de Sn.

É usual adicionarem-se aos bronzes pequenas quantidades de outros elementos, como o chumbo, o zinco e o fósforo com o objectivo de melhorar algumas das suas características, o que permite ampliar o seu campo de aplicação.

Assim, por exemplo:

- o chumbo até 4% melhora a maquinabilidade.
- o fósforo desoxida evitando a formação do óxido de estanho nas fronteiras dos grãos, causador de perda de ductilidade e moldabilidade; também eleva as propriedades anti fricção (dureza e tenacidade).
- o zinco melhora a resistência ao desgaste.

### **3.4.2 Classificação dos bronzes**

Os bronzes podem dividir-se em três grandes grupos:

- os bronzes comuns;
- os bronzes fosforosos;
- os bronzes especiais.

#### **3.4.2.1 Bronzes comuns**

Os bronzes comuns são ligas binárias de Cu e Sn, com percentagens de Outros elementos considerados como impurezas.

Podemos dividi-los, de acordo com a percentagem de estanho, em:

- macios
- duros
- extra duros

**Bronzes macios** - correspondem às ligas monofásicas e aplicam-se em peças de decoração, torneiras, pequenas chumaceiras, etc.

**Bronzes duros** - correspondem às ligas bifásicas até 17% de Sn. Aplicam-se na confecção de casquilhos, bronzes de chumaceiras, placas de escorregamento, juntas e, duma maneira geral, em peças sujeitas a forte atrito.

**Bronzes extra-duros** - são bronzes com percentagem de estanho elevada, geralmente superior a 20%, que se aplicam essencialmente na fabricação de instrumentos musicais, devido à sua sonoridade típica, como é o caso dos sinos, sinetas, etc.

#### **3.4.2.2 Bronzes fosforosos**

São ligas de cobre e estanho, que foram submetidas a um processo de desoxidação pelo fósforo (0.3 a 1%), e cuja percentagem de Sn está compreendida entre 4 e 13%. Como o fósforo é apenas usado como desoxidante, não é normalmente retido na liga.

Estas ligas aplicam-se em fundição, devido às boas características de fluidez. Utilizam-se frequentemente na fundição de mangas por centrifugação, obtendo-se um material com boas características mecânicas e isento de porosidade.

Têm também boas propriedades para trabalho a frio, um baixo coeficiente de atrito e uma boa resistência á corrosão (superior ao cobre), pelo que se usam em órgãos de máquinas como rodas dentadas e redes de válvulas.

Os bronzes fosforosos com chumbo têm uma maquinabilidade elevada.

### **3.4.2.3 Bronzes especiais**

Designa-se por bronzes especiais uma série de ligas de cobre alumínio, cobre silício, cobre berílio, etc., às quais por vezes se encontram associados outros elementos.

#### **3.4.2.3.1 Bronzes de alumínio (Cupro-alumínio)**

São ligas formadas por cobre e alumínio, nas quais a percentagem de alumínio não ultrapassa normalmente os 11%.

Estas ligas têm uma elevada resistência à tracção (atinge 35 kgf/mm<sup>2</sup> para 10% de Al) e apresentam um alongamento máximo para 7% de Al.

As características mecânicas podem ser melhoradas utilizando tratamentos térmicos, ou adicionando pequenas quantidades de outros elementos como:

- Ferro, que aumenta a resiliência e melhora a resistência à corrosão pelos ácidos acético e sulfúrico.
- Níquel que aumenta a resistência à rotura, a dureza, a resistência à corrosão pela água do mar e reduz a fluidez; de notar que em aplicações onde o material esteja em contacto com a água salgada é necessária a existência de, pelo menos, 4% Ni, para evitar a corrosão selectiva do bronze, por desagregação do alumínio (dealuminificação).
- Manganês, que actua como desoxidante, melhorando a resistência à tracção, o limite elástico, a dureza, elimina os pontos duros e diminui o alongamento.
- Magnésio que melhora a resistência à corrosão e actua como dessulfurante. Dá às ligas uma cor parecida com o ouro.

Dada a grande variedade destas ligas e as suas boas características mecânicas, têm um amplo campo de aplicação, normalmente em bombas, turbinas, vigas para sistemas de transportes, hélices, tubos de condensadores, etc.

A sua resistência à corrosão na presença da água do mar é elevada, mesmo quando estão presentes esforços variáveis que produzem danos por fadiga.

#### **3.4.2.3.2 Bronzes de silício**

São ligas de cobre e silício, cuja percentagem deste elemento pode variar de 0,02 a 30%. As ligas mais conhecidas contêm 3 a 4% de Si e apresentam elevada tenacidade e resistência à rotura ( $Tr = 50 \text{ kgf/mm}^2$ )

Empregam-se na fundição de peças de formas complicadas.

#### **3.4.2.3.3 Outros Bronzes especiais**

Existe uma grande variedade de outros bronzes especiais, de que são exemplo, os bronzes de manganês, os bronzes de berílio, os bronzes complexos formados por níquel, alumínio e manganês, que não referiremos dado o limitado âmbito desta disciplina.

Refere-se que o bronze de manganês é uma alternativa ao Metal Müntz (60 Cu +40 Zn), com melhor resistência mecânica e melhor resistência à corrosão.

### 3.5 Latões

Os latões são ligas binárias de cobre e zinco, aos quais, geralmente, se encontram associados outros elementos considerados como impurezas, mas que em alguns casos permitem melhorar algumas das suas características.

Os latões, consoante o teor de Zn e a respectiva estrutura cristalina, classificam-se do seguinte modo:

-Latões $\alpha$	Zn<38%
-Latões $\alpha+\beta$	38<Zn<45%
-Latões $\beta$	45<Zn<50%

A percentagem de Zn nos latões, nunca ultrapassa os 50%.

Como regra podemos dizer que a introdução do zinco nos latões promove as seguintes diferenças relativamente ao cobre puro:

- - aumenta a resistência mecânica da liga (Tr)
- - aumenta a dureza
- - aumenta a ductilidade (até aproximadamente 30% de Zn)
- - aumenta o coeficiente de dilatação térmica
- - aumenta o encruamento
- - baixa o ponto de fusão
- - diminui a resistência à corrosão
- - diminui a condutibilidade eléctrica e térmica
- - diminui a densidade
- - diminui o preço

#### 3.5.1 Ligas binárias de cobre e zinco (Cu-Zn)

O diagrama de solidificação destas ligas encontra-se representado na Figura 25.

1. As ligas com percentagens de zinco até 30% solidificam numa só fase, formando uma solução sólida, designada por fase  $\alpha$ , de elevada ductilidade e resistência e constituída por uma malha cúbica de faces centradas. Estas ligas são conformáveis por trabalho a frio; têm boa resistência à corrosão, mas inferior condutibilidade eléctrica.

2. As ligas com percentagens de zinco entre 38 e 50% são constituídas por duas fases  $\alpha$  e  $\beta$ , sendo esta última uma solução sólida de malha cúbica centrada muito mais dura e resistente que a  $\alpha$ , mas menos dúctil. É de difícil trabalho a frio, mas pode ser trabalhado a quente porque a ductilidade melhora a temperaturas elevadas. Estas ligas apenas são usadas em fundição.

3. A partir de 50% de zinco, forma-se um constituinte não metálico denominado fase  $\gamma$ , duro e frágil, o qual impede a aplicação industrial destas ligas, não tendo uso prático.

Pelo gráfico da Figura 25 poderemos verificar que a resistência à tracção melhora até 45% de Zn e a ductilidade até 30%, verificando-se depois uma diminuição das duas características, primeiro lenta e depois acentuadamente.

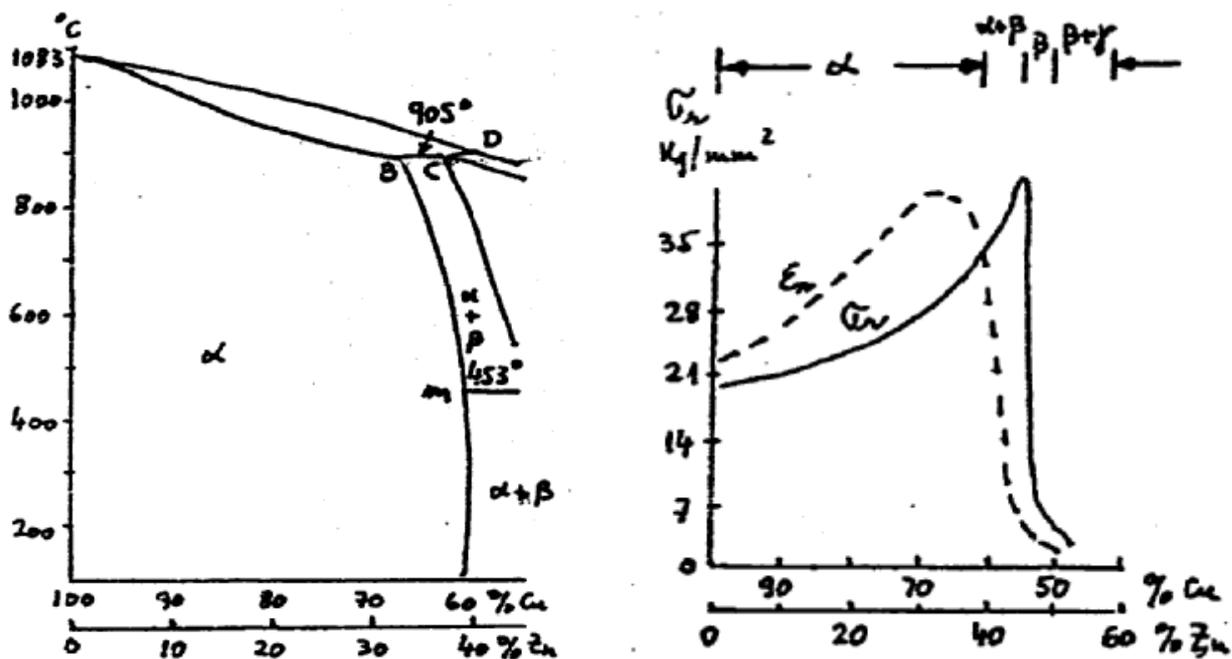


Figura 25

Estas variações explicam-se pela formação da fase  $\beta$  menos dúctil, pela coexistência de  $\alpha + \beta$  até 45% de Zn, posteriormente pela existência isolada da fase  $\beta$  entre 45 e 49% de Zn, e depois pelo aparecimento do constituinte  $\gamma$ .

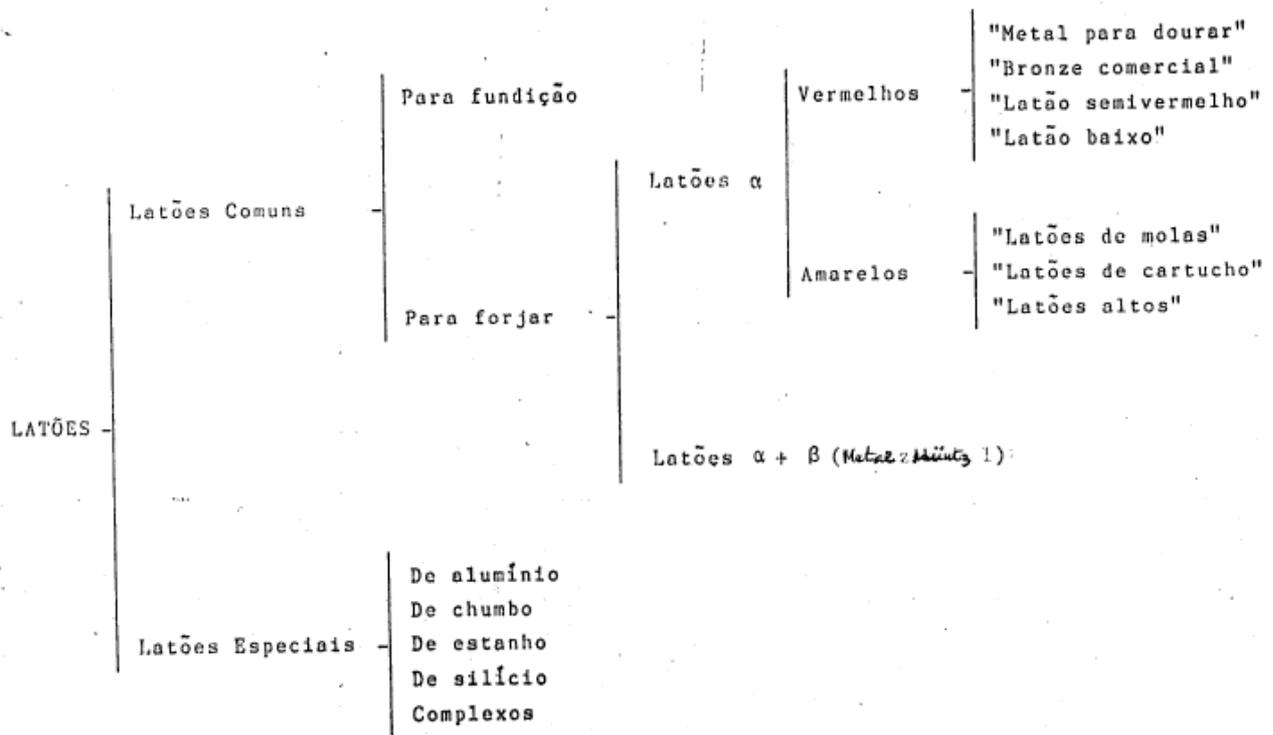
As propriedades mecânicas dos latões variam bastante. A resistência e a dureza variam com a liga ou com o trabalho mecânico a que o material foi sujeito. As tensões de rotura das ligas recozidas podem ser de cerca de 21 kg/mm<sup>2</sup>, no entanto, nos revenidos duros pode-se obter 63 kg/mm<sup>2</sup>.

Embora os latões tenham, em geral, boa resistência à corrosão, existem ligas com problemas de ataque corrosivo quando na presença de determinados ambientes. No caso de latões com o teor de Zn superior a 15%, pode ocorrer dezinficação, que é uma forma de corrosão selectiva, que deteriora a liga; evita-se esta deterioração pela inclusão na liga de pequenas quantidades de Sb, P ou As, em pequenas quantidades (0.02 a 0.05%). Algumas ligas são sujeitas à corrosão sob tensão, sendo em alguns casos as tensões internas resultantes do encruamento que ocorre durante o fabrico suficientes para provocar fissuras (season cracking); nestes casos, as ligas após trabalho mecânico devem ser sujeitas a um recozimento.

A dezinficação causa a destruição da liga, sendo substituída por uma massa de cobre poroso com reduzida resistência mecânica, embora, mantenha a forma original. Desde a década de 1920 que se tem evitado a dezinficação pelo uso de 0.04% de As, eficaz em latões com zinco até 30% (monofásicos).

A fissuração "sazonal" (season cracking) provoca roturas, que se orientam longitudinalmente, em tubos, quando o material se sujeita a ambientes específicos como é o caso da amónia ou do dióxido de enxofre (anidrido sulfuroso).

As roturas devidas à corrosão sob tensão são normalmente intergranulares, salvo algumas excepções como é o caso dos latões de alumínio.



**Figura 26 Classificação dos latões**

Os latões dividem-se geralmente em dois grandes grupos: os latões comuns e os latões especiais.

### 3.5.2 Latões Comuns

Os latões comuns são constituídos por cobre e zinco, considerando-se como impurezas todos os outros elementos que eventualmente existam na liga.

Estes latões costumam dividir-se em dois grupos:

os latões para fundição

os latões para forjar

- Latões para fundição - são latões com pequenas percentagens de outros elementos que aumentam a fusibilidade e moldabilidade das ligas.

Exemplo: Liga 63% Cu; 35% Zn; 2% Pb

$Tr = 20 \text{ daN/cm}^2$

$E = 10 \text{ daN/mm}^2$

$\varepsilon_f = 20\%$

$HB=60$

Saliente-se que o latão amarelo para fundição, com 38 Zn + 1 Sn + 1 Pb, possui boa maquinabilidade.

- Latões para forjar — Estes latões classificam-se de acordo com o tipo de constituintes em latões  $\alpha$  e latões  $\alpha + \beta$ .

### **3.5.2.1 Latões- $\alpha$**

Os latões constituídos pela fase  $\alpha$  têm uma percentagem de zinco variável entre os 5 e os 35%.

Até 20% de Zn apresentam uma cor avermelhada e a partir daí uma cor amarelada; por isso é usual dividi-los em dois grandes grupos:

- latões vermelhos
- latões amarelados

#### **3.5.2.1.1 Latões vermelhos:**

1. Latões com 5% de zinco, designados por “metal para dourar”, que se utilizam em joalharia como imitação do ouro.
2. Latões com 10% de zinco, designados por “bronze comercial” e que se utilizam como imitação de ligas de bronze em joalharia.
3. Latões com 15% de zinco, designados por “latões semi vermelhos”; utilizam-se na fabricação de radiadores para automóveis.
4. Latões com 20% de zinco, designados por “latões baixos”, utilizam-se na fabricação de tubos flexíveis.

#### **3.5.2.1.2 Latões amarelos**

1. Latões com 25% de zinco, designados por “latões de molas”, empregam-se no fabrico de molas.
2. Latões com 30%-de zinco, designados por “latões da cartucho”, utilizam-se em trabalhos de estampagem a frio, dada a sua elevada ductilidade.
3. Latões com 35% de zinco, designados por “latões altos”, utilizam-se no fabrico de agulhas de croma.

### **3.5.2.2 Latões $\alpha + \beta$ (Muntz Metal)**

Latões com percentagem de zinco entre 38 e 42%, designados por Muntz Metal, são menos dúcteis do que os do grupo  $\alpha$ , pelo que não podem ser forjados a frio, mas são facilmente maquináveis, pelo que se empregam na obtenção de peças por arranque da apara.

A sua tensão de tracção varia entre 35 e 42 Kgf/mm<sup>2</sup> e o alongamento de 15 e 30%, valores semelhantes aos de um aço macio ao carbono.

Vejamos resumidamente quais são os principais tipos de latões especiais.

### **3.5.3 Latões especiais**

Os latões especiais são ligas ternárias de cobre e zinco com um terceiro elemento de liga que pode ser alumínio, níquel, chumbo, silício, berílio, etc.

Estas ligas têm propriedades semelhantes aos latões comuns, geralmente de custos mais reduzidos e apresentam características particulares, próprias do metal adicionado. Em acréscimo à melhoria das propriedades específicas, muito dos elementos que se adicionam modificam a microestrutura do latão base tal como se tratasse de zinco com excepção do níquel que tem efeito contrário.

O equivalente de zinco a adoptar poderá ser o seguinte:

$$\text{Eq. Zinco} = \text{Zn} + 10\text{Si} + 6\text{Al} + 2(\text{Sn} + \text{Mg}) + \text{Pb} + 0.5(\text{Fe} + \text{Mn}) - 1.2\text{Ni}$$

#### **3.5.3.1 Latões com Alumínio**

A adição de alumínio eleva a resistência a tracção, o limite de elasticidade e melhora a resistência à oxidação pela formação de uma película de alumina impermeável; reduz ainda a perda de zinco por evaporação e aumenta a resistência a corrosão. Estas ligas têm uma boa aptidão para a extrusão, forjagem, estampagem, laminagem e fundição.

A liga conhecida por “yorcalbro” (22 Zn + 2 Al + 0.04 As) é muito utilizada em canalizações para água salgada na indústria de construção naval.

#### **3.5.3.2 Latões com Chumbo**

O chumbo é insolúvel no cobre, permanecendo nos latões em forma de pequenas bolsas. A sua presença melhora a maquinabilidade pelo seu efeito lubrificante, embora diminua ligeiramente a resistência mecânica.

Utilizam-se na fabricação de peças sujeitas a atrito.

#### **3.5.3.3 Latões com Estanho**

O estanho aumenta a resistência a tracção, o módulo de elasticidade e melhora a resistência a corrosão, especialmente pela água do mar. Não deve empregar-se em percentagem superior a 10% por dar origem à precipitação da fase  $\gamma$ .

As variedades mais utilizadas na indústria de construção naval são o “Admiral Bronze” (71% Cu; 28% Zn; 0,9 a 1,2 de Sn; 0,75 Pb; 0,06% Fe) e o “Naval Brass” (60% Cu; 39,25% Zn; 0,75% Sn); o primeiro emprega-se em tubos de condensadores e o segundo utiliza-se na substituição do Muntz Metal nos casos em que é necessário melhorar a resistência a corrosão.

#### **3.5.3.4 Latões com Silício**

O silício aumenta a fluidez do banho em fusão, e a resistência a tracção e ao choque.

O latão de silício mais conhecido é o “Bronzil” ou “Silicon Bronze” (85% Cu; 10% Zn; 5% Si) que se emprega no fabrico de válvulas, bombas, engrenagens, etc.

### 3.5.3.5 Latões complexos

Existem latões especiais, designados por latões complexos, constituídos por mais do que um elemento de liga adicional e que revelam elevada resistência a corrosão.

Entre os constituintes mais comuns distinguem-se:

O manganês, que melhora a resistência à tracção, o módulo de elasticidade, o alongamento, e actua como desoxidante.

O ferro, que afina o grão, aumenta a resistência à tracção e o módulo de elasticidade.

O chumbo, o alumínio, cuja acção específica é semelhante a referida para os latões especiais.

Estas ligas empregam-se frequentemente em construção naval.

### 3.5.4 Aplicações gerais

Podemos dizer que, para além das aplicações específicas já referidas, os latões

- Ricos em cobre, aplicam-se em joalharia e adornos.
- Amarelos, dada a sua ductilidade, aplicam-se no fabrico de peças embutidas e estampadas.
- Os latões especiais, dada a sua resistência a corrosão, aplicam-se na indústria de construção naval.

## 3.6 Ligas de Cuproníquel

São ligas binárias de cobre e níquel com o teor de níquel entre 2.5 e 45% Ni. As ligas com 10 e 30% de Ni são as mais vulgares; a sua resistência a corrosão é muito elevada, em particular no que se refere aos efeitos corrosivos e de erosão da água salgada.

Estas ligas têm uma dureza moderada, mas são tenazes e dúcteis.

O cuproníquel 70-30, a despeito do seu preço, é o material corrente mais adequado para sistemas de encanamentos, tubagem de permutadores e condensadores, etc.; esta liga, de solução sólida de uma fase, têm a adição de cerca de 0,5% de ferro, para melhorar a sua resistência a corrosão por erosão.

O Cu Ni 70-30 pode ser endurecido por trabalho a frio, não o devendo ser quando sujeito a soldadura ou brassagem

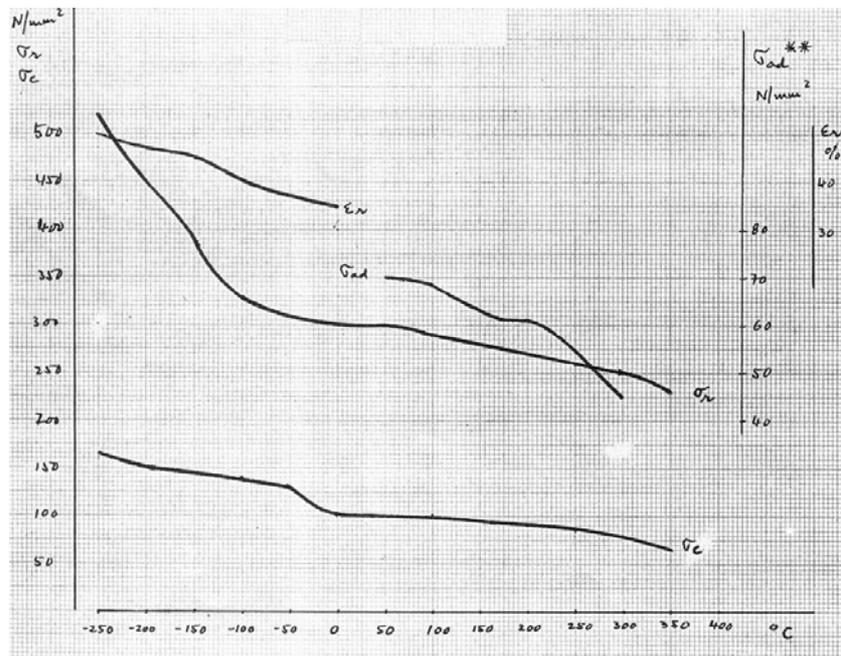
A liga CA 706 (90/10 Cu Ni) foi usada na construção do Copper Mariner, embarcação de pesca de 67 ft, em 1971, com o objectivo principal de ensaiar estes tipos de materiais em casos a determinar a sua resistência a corrosão e o efeito na aderência ao casco de animais e espécies vegetais marinhas. Esses materiais que permitem uma grande economia na exploração por evitarem pintura anticorrosiva e antivegetativa, constituem um agravamento do preço de aquisição.

A liga com 45% Ni é designada por Constantan e é muito usada em electricidade, especialmente em termopares devido às suas características de resistividade.

A já referida liga CUNIFER 90/10 é bastante usada em encanamentos de água salgada e experimentalmente na placagem, revestimento superficial com folha de CUNIFER 90/10) de aço, em componentes sujeitos à acção do mar, como carenas de navios, onde a par da resistência à corrosão e erosão, apresenta também resistência às aderências biológicas.

**Tabela 31 LIGA DE CUPRO NIQUEL 90/10**

Composição química		% Cu: restante	Ni: 9 a 11	Fe: 1 a 2	Mn: 0.5 a 1
<u>Propriedades físicas:</u>			<u>Características mecânicas 20°C</u>		
Massa volúmica= 8.9 Kg / dm <sup>3</sup>			□ <sub>r</sub> >300MPa		
Coef. de exp. linear 20° a 200°C= 0.0171 mm / m / °C			□ <sub>c</sub> >100MPa		
Condutividade térmica a 20°C= 50 W/m°K			□ <sub>r</sub> >35% (a)		
Resistividade eléctrica a 20°C= 0.19 Ωmm <sup>2</sup> / m			HVS>70		
Módulo de elasticidade E= 126 GPa			(na condição de recozido, recristalizado com grão refinado)		
Temperatura de recozimento= 760 a 800°C			(a) L <sub>0</sub> = 5.65 S <sub>0</sub>		
Intervalo de fusão= 1100 a 1150°C					
Tensões máximas admissíveis à temperatura ambiente °C					
BV	68.6 MPa				
LRS	68.6 MPa				
DNV	70.0 MPa				
BS 3351	73.3 MPa				
BS 1306	72.0 MPa				
DIN 86007	68.6 MPa				



\*\* tensão admissível de acordo com as temperaturas de serviço conforme ASME, Code Section VIII, 1971

**Tabela 32 APLICAÇÃO: FUNDIÇÕES PARA VÁLVULAS E ACESSÓRIOS**

Composição Típica:				
Liga	Cu	Sn	Zn	Pb
* Cu Pb 5 Sn 5 Zn 5	85	5	5	5
**Cu Sn 7 Pb 6 Zn 4	83	7	4	6
* Liga LG2 segundo BS1400 (Gunmetal) equivalente ao Rg 5 segundo DIN 1705 ** Equivalente ao Rg 7 segundo DIN 1705				

### Propriedades Mecânicas

Devem estar em conformidade com a especificação do material, no entanto, deverá ser no mínimo:

$$\sigma_r \geq 230 \text{ N/mm}^2 \text{ e } \sigma_{0.2} \geq 90 \text{ N/mm}^2$$

Alongamento  $A_5$  min 15%

Dureza HB 10/1000 min 60

**Tabela 33 EQUIVALÊNCIAS**

ISO	BS 1400 - 1985	
Cu Pb 5 Sn 5 Zn 5	LG2	Gunmetals (bronzes de estanho e chumbo)
Cu Sn 7 Pb 3 Zn 3	LG4	
Cu Al 10 Fe 5 Ni 5	AB2	Bronzes de alumínio
Cu Al 6 Si 2 Fe	AB3	
Cu Mn13 Al 8 Fe 3 Ni 3	CMA1	
Cu Zn 35 Al Fe Mn	HTB1	Latão de alta resistência
Cu Ni 30 Cr	CN1	Cuproníqueis 70/30
Cu Ni 30 Nb	CN2	

## **3.7 Soldadura e Brazagem**

### **3.7.1 Corrosão nas Juntas de União**

A deposição do metal de adição nas juntas das peças a soldar, introduz alterações estruturais (micro e macro-estrutura, condições superficiais, etc.) na zona de junção - zona da soldadura e zona afectada termicamente (ZAC).

A junção térmica pode portanto influenciar a resistência a corrosão do circuito de encanamentos e causar ataques selectivos de corrosão nas juntas. Num caso em que uma pequena junta seja anódica relativamente à maior extensão do metal base (cátodo), teremos, em água do mar (solução salina), uma acelerada corrosão galvânica das juntas.

### **3.7.2 Soldadura**

Devido a inexistência ou existência em menor quantidade de zinco, os bronzes têm, em geral, melhor soldabilidade que o latão. Ambas as ligas podem ser soldadas satisfatoriamente com eléctrodos revestidos, desde que a escoria seja cuidadosamente retirada, entre cordões. Usando processos de soldadura em atmosfera inerte (MIG, TIG) eliminam-se as dificuldades inerentes a escória.

As ligas deste género mais usadas em construção naval são bronze, alumínio, latão de alumínio e cuproníquel.

Citam-se em seguida alguns aspectos pontuais no que se refere à soldadura destes materiais.

#### **3.7.2.1 Latão de Alumínio**

Processo de soldadura recomendado MIG ou TIG: no caso do último usa-se eléctrodo de tungsténio puro.

Metal de adição: o uso de arame ou vareta de Bronze-Alumínio Alfa, é conveniente, pois reduz consideravelmente o problema dos fumos.

Posição de trabalho: é recomendada a soldadura ao baixo; as soldaduras vertical e ao tecto tornam-se muito difíceis.

Pré e pós tratamento: os encanamentos de latão de alumínio devem ser sujeitos a alívio de tensões antes da soldadura. Se os encanamentos forem trabalhados a frio (curvados), as zonas trabalhadas devem ser sujeitas a alívio de tensões, a aproximadamente 400°C. O alívio ou relaxamento de tensões é também aconselhado quando há risco de corrosão sob tensão.

Diversos: A limpeza das juntas antes da soldadura é de importância primordial. Para obter uma boa penetração e evitar sub-fendas deve-se aplicar uma ligeira camada de fluxo para brazagem com bronze alumínio. Neste caso o fluxo garante boa penetração e o uso da atmosfera inerte de argon serve para prevenir oxidação adicional.

#### **3.7.2.2 Bronze de Alumínio**

Para a soldadura desta liga usa-se soldadura manual com eléctrodos revestidos ou soldadura MIG. O processo TIG deve ser usado com precaução, devido à elevada concentração térmica que lhe é inerente.

Há diversos metais de adição disponíveis a sua escolha deverá seguir as sugestões do fabricante dos metais de adição. A posição de soldadura mais conveniente é ao baixo.

Os chanfros devem ser mantidos secos e limpos. Os eléctrodos revestidos devem ser estufados antes da soldadura. O pré aquecimento e o alívio de tensões deve ser executado de acordo com o requerido pela liga em questão.

A soldabilidade destas ligas constitui um factor vantajoso do seu uso.

### **3.7.2.3 Ligas Cupro Níquel**

Estas ligas permitem a utilização de praticamente todas as técnicas de soldadura. Utilizam-se eléctrodos de 70/30 (Cu/Ni) na soldadura de todas as ligas.

As soldaduras verticais e ao tecto são admissíveis mediante determinação dos ajustamentos a forma como a soldadura ao baixo é executada.

Não é necessário pré aquecimento.

Algumas ligas de cuproníquel são tratáveis termicamente; por isso, pode ser necessário efectuar um tratamento térmico após a soldadura, devido ao envelhecimento e hiperenvelhecimento ocorrido durante a soldadura.

### **3.7.3 Brazagem - Soldadura Branda**

A soldadura branda não é discutida aqui, porque este método de junção tem uma aplicação limitada nos materiais e nas aplicações em questão.

Ao contrário, a brazagem é um meio efectivo de juntar peças feitas de ligas de cobre. Para este efeito são usados metais de adição, de base de prata (soldas de prata), com temperaturas de brazagem de 620 a 870°C. A estas ligas aplicam-se procedimentos correntes em brazagem.

Como regra geral recomenda-se que a liga para a solda a prata deve ter, pelo menos, 49% de Ag. O uso de ligas de brazagem CuZn, não é admissível.

#### **3.7.3.1 Latão de Alumínio**

Todas as superfícies a unir devem ser limpas cuidadosamente, por meios mecânicos ou outros, antes da junção.

Para garantir uma adequada resistência a corrosão pela água do mar, o metal de adição deve conter no mínimo 49% Ag, contudo, alguns fabricantes indicam que 43% Ag é suficiente. Deve-se evitar sobre aquecer ou esforçar as partes a unir enquanto a brazagem tem lugar. Após a brazagem o remanescente do fluxo deve ser cuidadosamente removido, pois os seus resíduos podem ser corrosivos.

#### **3.7.3.2 Bronze Alumínio**

Pode ser sujeito a brazagem com metais de adição com prata, e com um fluxo apropriado, por exemplo, o AWS tipo 4. O que foi dito para o latão de alumínio aplica-se na generalidade para o latão de alumínio.

#### **3.7.3.3 Ligas de Cuproníquel**

Podem ser sujeitas a brazagem com ligas B Ag e B Cu P. Contudo, o metal de adição B Cu P não é recomendado para ligas com mais de 10% Ni, porque se forma um fosforeto frágil. Também o serviço em atmosferas sulfurosas acima da temperatura ambiente não é recomendado para ligas de brazagem B Cu P.

O metal base deve ser isento de enxofre ou chumbo. Para efectuar a limpeza e decapagem pode usar-se solventes normais ou desengordurantes alcalinos. O fluxo AWS tipo 3 é adequado para a maioria das aplicações. Todos os remanescentes do fluxo de brazagem devem ser removidos.

As ligas de Cu Ni são susceptíveis à penetração intergranular pelo metal de adição fundido, na condição de esforçado (stressed) pelo que deve ser sujeito a alívio de tensões antes da brazagem, para evitar a fissuração.

### 3.8 Ligas de cobre de fundição para acessórios de sistemas marítimos

As aplicações em acessórios fundidos de sistemas marítimos, situam-se principalmente nos seguintes grupos:

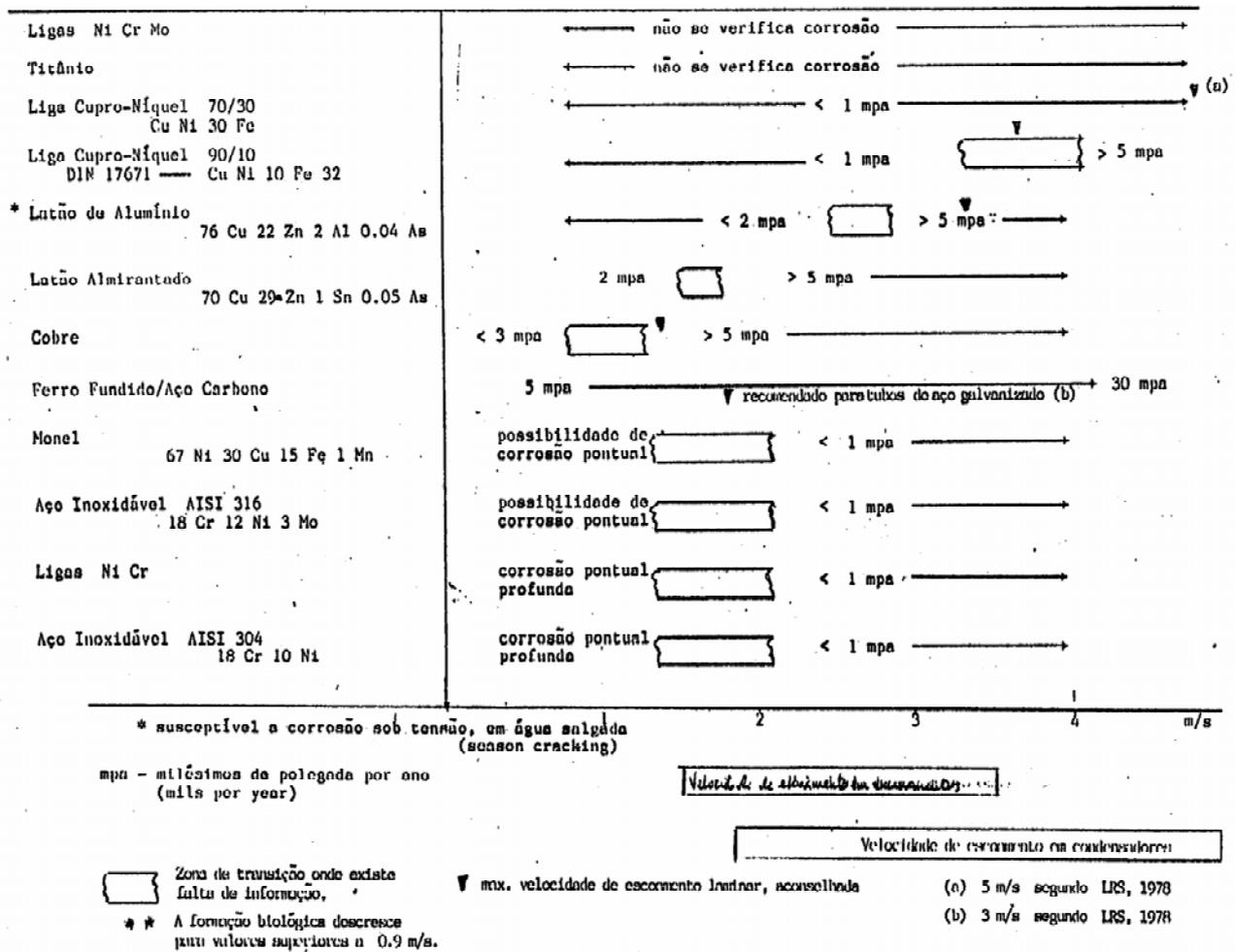
- bronzes de estanho e bronzes de estanho com zinco (gun metais)
- bronzes de alumínio
- latões de alta resistência
- ligas de cuproníquel

**Embora apresentando bom comportamento de resistência à corrosão, salvo se as velocidades de escoamento forem elevadas (ver os limites de utilização nas Tabela 37**

Espessura (mm)	$\sigma_r$ (MPa)	$\epsilon_r$ (%)
5	708	29
8	662	26
19	631	21
76	569	18
152	538	18

Na Tabela 35 e Tabela 36 existem diversos aspectos que diferenciam as ligas e que convêm mencionar.

**Tabela 34 Efeito da velocidade de circulação da água do mar na taxa de corrosão em encanamentos e tubulares**



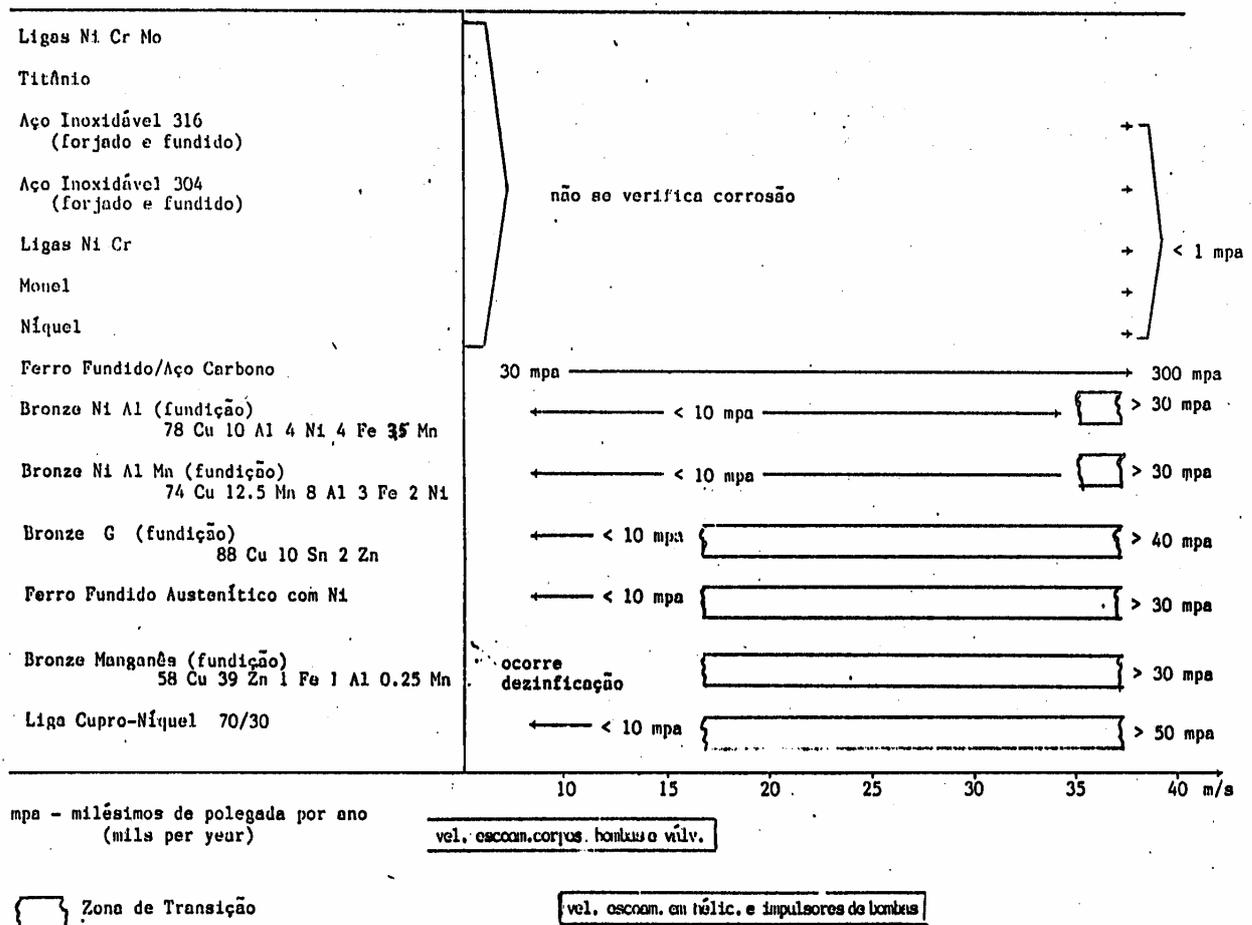
Do ponto de vista da resistência mecânica, os bronzes de alumínio são os que apresentam maior tensão de rotura; associando este facto à menor densidade apresentam condições vantajosas para órgãos rotativos como os impulsores de bombas. A tenacidade à fractura de alguns bronzes de alumínio e das ligas de cuproníquel é superior às restantes ligas.

Na Tabela 36 apresentam-se valores de tensão limite de fadiga para uma liga de bronze de alumínio e para uma liga de cuproníquel; estes valores permitem caracterizar a resistência à fadiga (no ar) e a corrosão com fadiga (água salgada), podendo-se também verificar a influência da frequência da variação dos esforços. A resistência à corrosão com fadiga é importante em hélices e outras peças rotativas, no ambiente marítimo.

A fundição em areia, dada a sua versatilidade, permite o fabrico de formas complexas. A maquinabilidade, necessária para o acabamento é também uma aptidão de fabrico importante.

Duas ligas mais correntemente usadas são a LG2 e a LG4 (BS 1400). Estas ligas solidificam numa grande amplitude de temperaturas e, salvo se a velocidade de arrefecimento é rápida, o material fundido passará por um estado pastoso durante a solidificação; isto poderá criar microporosidades, que sendo em pouca extensão não afectam as propriedades do material, salvo se a maquinagem for profunda.

**Tabela 35 Efeito da velocidade de circulação da água do mar na taxa de corrosão em bombas e propulsores**



A porosidade aumenta bastante, quando a soma do estanho com o zinco ultrapassa os 12%, em peças até espessuras de 25mm. Em maiores espessuras este aumento é menos significativo.

A estanqueidade do material é função do teor de chumbo que deve ser no mínimo 3%.

Das duas ligas mencionadas, LG2 e LG4, esta última é mais vantajosa para espessuras superiores a 25mm e quando as velocidades de circulação são elevadas. De notar nestas ligas que a microporosidade se concentra no núcleo das secções (parte central) convindo por isso que a maquinagem não seja excessivamente profunda, o que aliás já foi referido.

Os bronzes de alumínio apresentam melhores características de resistência mecânica e de resistência à corrosão que os bronzes atrás mencionados. Convém mencionar que a resistência à corrosão é devida à formação de uma camada superficial de óxido de alumínio que deve ter condições para ser refeita; verifica-se assim que estes materiais não são adequados em situações de elevada abrasão superficial e onde falte oxigénio dissolvido na água, como é o caso de águas poluídas ou lodosas. A liga deste grupo mais usada é a liga AB2; como se referiu anteriormente têm larga aplicação em peças extremamente solicitadas como impulsor de bombas, hélices e válvulas. A liga AB3 embora tenha menor resistência, apresenta uma baixa permeabilidade magnética que é útil em algumas aplicações. A liga CMA, idêntica à AB2 tem bastante aplicação em hélices.

**Tabela 36 Ligas de cobre aplicadas em fundição de acessórios marítimos**

		LG2	LG4	G1	AB2	AB3	CMA1	HTB 1	CN1	CN2
<b>Resistência à fadiga **</b>	Tensão de rotura (MPa)	220	160		670	480	690	565	510	585
	$\sigma_{02}$ MPa	100-140	130-160		250-310	180-190	280-370	170-280	300-320	300-320
	Extensão após rotura Er %	21	25		17	25	56	34	21	25
	Dureza HB	65-95	70-95		140-180		160-210	100-150	170-200	170-200
	Impacto (J)	26	26		24	38	41	26	45	45
	% Cu	85	87.5		85		73			
	Sn	5	7.5							
	Zn	5	2.0							
	Pb	5	3.0							
	Fe				5		3			
	Al				5		8			
	Ni				5		3			
	* V max m/s	5	6.5	6.5	4.5		3	10		
	(1) $\sigma_D$ ar $10^6$ (MPa)				228					
	(1) $10^8$ ciclos				190					
(2) Ag. salg $10^6$				238						
(2) $10^8$				195						
(3) $10^6$				205						
(3) $10^8$				134						
(4) air $10^6$									135	
(4) $10^8$									69	
(5) Ag. salg $10^6$									190	
(5) $10^8$									111	
(3) $10^6$									207	
(3) $10^8$									132	
<p>As ligas LG2, LG4, G1, CT1, AB2, CMA1, HTB1, CN1 e CN2 são definidas na norma BS 1400 "Copper Alloys Ingots &amp; Copper Alloys &amp; High Conductivity Copper Castings"</p> <p>* Máxima velocidade da água do mar, recomendável na circulação pelos acessórios de sistemas de encanamentos (notar que localmente estes valores são frequentemente excedidos, como é o caso de velocidades periféricas em impulsores de bombas centrífugas sendo admissível 15 a 20m/s para o bronze de estanho com zinco e chumbo e 30 a 45 m/s para bronze de alumínio AB2</p> <p>(1) 180000 ciclos/h    (4) 400000 ciclos/h    Liga AB1(Cu, Al10, Fe3)</p> <p>(2) 620 ciclos/h    (5) 1000 ciclos/h    Liga AB3(Cu, Al6, Si2)</p> <p>(3) 10 ciclos/h</p> <p>** Os ensaios de resistência à fadiga foram efectuados com uma máq. de flexão rotativa R=-1</p>										

No que se refere à fundição, os bronzes de alumínio solidificam segundo uma reduzida amplitude temperaturas permitindo fundições de boa qualidade.

Nota-se nestas ligas uma redução da resistência mecânica com o aumento da espessura, como se pode verificar para a liga AB2, nos valores seguintes:

**Tabela 37**

<b>Espessura (mm)</b>	<b><math>\sigma_r</math> (MPa)</b>	<b><math>\varepsilon_r</math> (%)</b>
5	708	29
8	662	26
19	631	21
76	569	18
152	538	18

Os bronzes de alumínio têm uma aptidão para a maquinagem inferior aos bronzes de estanho, mas ainda assim satisfatória.

Dos latões, refere-se que correntemente as aplicações em sistemas marítimos se cingem a poucas ligas como o latão de alta resistência como HTB1 e o latão com baixo teor de zinco (com arsénio) como o SCB6 (muito usada no fabrico de flanges para encanamentos, pela facilidade com que permite a brazagem e pela resistência generalizada à corrosão).

A resistência mecânica do HTB1 é intermédia entre os dois grupos anteriormente mencionados. Foi muito usada em hélices, mas está a ser substituída nesta aplicação por bronzes de alumínio que são mais resistentes mecânica e electroquimicamente. O HTB1 embora tenha uma boa resistência à corrosão pela água salgada é susceptível de dezinficação da fase  $\beta$  em caso de danos superficiais ou de porosidade superficial; as zonas dezinficadas são susceptíveis de erosão.

Embora todos os latões sejam susceptíveis de corrosão sob tensão, os latões de alta resistência não apresentam problemas especiais nesta área salvo quando tenham sido sujeitos a reparações por soldadura onde toda a zona afectada termicamente tende a ter uma estrutura que sofre de ataque intergranular.

Os latões de alta resistência têm boa aptidão para a fundição, com menos exigências tecnológicas no respectivo processo e com preços inferiores ao bronze de alumínio.

A fundição de ligas de cuproníquel esta a iniciar a expansão, no sentido de acompanhar o desenvolvimento das restantes formas de comercialização do Cu Ni, já referidas na alínea anterior. Estes materiais apresentam a característica de endurecerem por precipitação durante o vazamento no molde, não sendo necessário tratamento térmico posterior. No caso da liga

CN1 (BS 1400) são adicionadas à liga pequenas percentagens de Cr e Si que endurecem a liga, na liga CN2 usa-se para o mesmo fim Nb e Si. O Si também melhora a fusibilidade, a resistência mecânica e a resistência à corrosão. Estes materiais são mais caros que os bronzes alumínio e estão ainda em fase inicial de utilização.

**Tabela 38 Ligas de cobre para tubos, sem costura, para condensadores, permutadores de calor e sistemas de encanamentos pressurizados**

Aplicação: tubos de cobre e de liga de cobre, sem costura, para uso em condensadores, permutadores de calor e sistemas de encanamentos pressurizados.

DESIGNAÇÃO	PROPRIEDADES MECÂNICAS *			COMPOSIÇÃO QUÍMICA									
	$\sigma_{0.2}$ %	$\sigma_f$	Along <sup>to</sup> %	$\Delta$ %	Cu	As	P	Fe	Pb	Ni	Al	Mn	Zn
Cobre desoxidado com P; sem As	100	220	35	30	> 99.8		0.013 -0.050						
Cobre desoxidado com P e As	100	220	35	30	> 99.2	0.30- -0.50	0.013- -0.050						
Latão de Alumínio	110	320	35	30	76-79	0.02- -0.06		< 0.06	< 0.07		1.8-2.5		Restante
Cu Ni Fe 90/10	100	270	30	30	Restante			1.0-2.0		9-11			0.5-1.0
Cu Ni Fe 70/30	120	360	30	30	Restante			0.4-1.00		29.33			0.5-1.5

- Todo o material deve ser fornecido na situação de recozido,

- Os tubos de latão de alumínio podem adicionalmente ser sujeitos a um tratamento térmico de alívio de tensões, quando forem sujeitos a uma operação de desempenho a frio após recozimento.

$\sigma_f$  - tensão de rotura.

Along<sup>to</sup> - %  $5.65 \sqrt{S_0}$

$\Delta$  Drift expansion test %

\* Valores mínimos para efeitos de aceitação.

Tabela 39

## Ligas de cobre para tubos

MATERIAL (c) (d)	CONDIÇÃO DE FORNECIMENTO	PROPRIEDADES MECÂNICAS (min)			dim. grão (max) (µm)	COMPOSIÇÃO QUÍMICA %								
		$\sigma_T$ (N/mm <sup>2</sup> )	$\sigma_C$ (N/mm <sup>2</sup> )	$\delta_5$ %		Cu	Fe	Ni	Zn	As	Al	Mn		
Cobre (e)	recozido meio duro *	220 250	65 155	40 20		> 99,05 (u)	-	-	-	-	-	-	-	-
Latão de Alumínio (e) (g)	recozido	330	155	35	45 (b)	76 a 79	-	-	restante	0.02 a 0.035 (j)	1.8 a 2.3	-	-	-
Cu Ni 10 Fe Cupro Níquel 90/10 (f) (h)	recozido	290	100	30		restante	1.0 a 1.8	9.0 a 11.0						
Cu Ni 30 Fe Cupro Níquel 70/30 (f) (i)	recozido	360	120	30		restante	0.4 a 1.0	30.0 a 32.0						

(e) inclui Cu+Ag. (b) completamente recristalizado; dimensão do grão calculada de acordo com ISO 2624.

(c) os tubos de cobre devem ser isentos de oxigênio; os elementos residuais (impurezas) devem estar em conformidade com as normas correntes.

(d) tensões admissíveis segundo LRS (1974); ver *Tabela 2.1*

(e) temperatura limite 200°C - os tubos de sistemas de água solgada devem ser isentos de dobras ou vincos.

(f) temperatura limite 300°C.

(g) deve ser recozido à temperatura de 600-650°C, após trabalho a frio.

(h) a designação comercial mais conhecida é KUNIFER 10.

(i) " " " " " KUNIFER 30.

(j) a introdução de 0.02% ou mais, de Arsênio elimina a dezinfecção em latões α.

A soldadura de tubos de cobre e de cuproníquel pode ser levada a cabo pelo processo TIG e para grandes espessuras pelo processo MIG ou por outros processos eventualmente aprovados.

Os tubos de cobre e de cuproníquel podem ser sujeitos à brazagem, devendo as folgas entre as superfícies a unir, ser inferiores ao necessário.

Os tubos de cobre e de cuproníquel podem ser fabricados por rotulagem da metalurgia.

Tabela 40

Bronze de fundição (DIN 1705)

GRUPO	DESIGNAÇÃO	COMPOSIÇÃO APROXIMADA (impurezas admissíveis)	PROPRIEDADES MECÂNICAS (valores mínimos)				A P L I C A Ç Õ E S
			$\sigma_f$	$\sigma_c$	A <sub>5</sub> %	HB	
Bronzes Fosforosos (DIN 1705)	Bronze Fundido G Sn Bz 14	Impurezas admissíveis: 86 Cu - 14 Sn 1 Ni 0.25 Sb 1 Pb 0.5 Zn 0.2 Fe 0.4 P 0.02 S No total: 1.0 (excepto Ni, Sb e P)	20	14	3	85	Fundição moldada. Material duro, resistente à água do mar. Adequado para chumaceiras com pressão de 600 kg/cm <sup>2</sup> .
	Bronze Fundido G Sn Bz 12		24	13	8	80	Fundições moldadas com boa resistência ao desgaste, resistente à água do mar. Adequado para acoplamentos de elevada solicitação, componentes resistentes ao desgaste e peças de construção mecânica com grandes cargas.
	Bronze Fundido G Sn Bz 12	90 Cu - 10 Sn	25	12	15	60	G Sn Bz 10 é resistente à cavitação e corrosão por água do mar, sendo adequada para válvulas, corpos de bombas de elevada solicitação e para impulsores de bombas e turbinas.
Bronzes Ordinários (DIN 1705)	Bronze 10 Rg 10	Impurezas admissíveis: 88Cu-9Sn-2Zn 2 Ni 0.35 Sb 0.25 Fe 0.05 P 0.1S No total: 0.5 (excepto Ni e Sb)	25	12	12	65	Material duro, resistente à água do mar. Adequado para chumaceiras com cargas até 500 kg/cm <sup>2</sup> ; bujins de mangas; utilização geral em construção de máquinas. Resiste a águas poluídas com sulfuretos.
	Bronze 7 Rg 7	84Cu 7Sn 4Zn 6Pb	22	10	12	60	Como Rg 10, excepto cargas 400 kg/cm <sup>2</sup> .
	Bronze 5 Rg 5	85Cu 5Sn 5Zn 5Pb	20	8	12	60	Material semi-duro com boas características de maquinagem, soldável resistente à água do mar pura. Recomendado para casquilhos de rolamento e de fricção.

OBSERVAÇÕES:

 $\sigma_f, \sigma_c$  (kg/mm<sup>2</sup>) - valores mínimos. Dureza HB, (kg/mm<sup>2</sup>) para HB 10 - esfera de 10 mm e carga P = 10<sup>2</sup> D (HB 10).

Os valores indicados para as propriedades mecânicas referem-se a fundições moldadas (estáticas); as fundições contínuas ou centrifugadas, com a mesma composição, apresentam melhores propriedades.

## 3.9 Requisitos dos materiais para hélices

### 3.9.1 Propriedades do Material

Resistência à tracção: um material com elevada tensão de cedência permitirá o projecto de hélices cujas pás são mais finas e conseqüentemente mais eficientes e ainda com redução do peso do hélice.

Dureza: a dureza do material relaciona-se com a resistência à cavitação e também com a maquinabilidade.

Peso específico: o material com um baixo peso específico é desejável para reduzir o peso do hélice.

Rigidez: o material com um elevado módulo de elasticidade, permite uma menor deflexão sob solicitação.

Tenacidade: as pás do hélice devem resistir às solicitações de impacto sem fractura; é preferível que a pá se deforme por flexão, do que se parta.

Resistência à fadiga com corrosão: o material deve garantir que as solicitações variáveis (cíclicas) possam ocorrer durante toda a vida do hélice sem ruína.

Resistência à corrosão: os materiais devem ser virtualmente imunes à corrosão por água salgada, quer de forma intrínseca, quer por meio de protecção anticorrosiva.

Resistência à erosão, cavitação e outras formas de ataque: o material deve reter a sua resistência a elevadas velocidades, quando actuam simultaneamente efeitos mecânicos e corrosivos.

Corrosão sob tensão: o material não deve fracturar sob o campo de tensões aplicadas, nem sob o campo de tensões residuais originadas em reparações.

### 3.9.2 Fabrico

Gama de fusão: com o aumento da temperatura de fusão aumenta o custo e a dificuldade em fundir um grande hélice.

Fundição: os materiais devem ser facilmente fusíveis e de preço razoável; uma vez que os materiais de elevada resistência são mais difíceis de trabalhar, devem ser fundidos com tolerâncias mais restritas.

Maquinabilidade: o material deve ser maquinado e desbastado para alcançar a precisão do projecto e o acabamento superficial desejado.

Facilidade de reparação: os materiais que não podem ser soldados não satisfazem, porque as avarias em hélices são inevitáveis; os materiais que requerem especiais técnicas de soldadura; ou tratamentos térmicos complexos inibem a execução de reparações de emergência.

Tratamento térmico: materiais que requerem tratamento térmico para atingir elevada resistência inibem a precisão em grandes hélices, devido a distorções.

Do ponto de vista da qualidade do fabrico é também importante verificar que as propriedades mecânicas não são reduzidas com a espessura da fundição, sobretudo nas zonas mais espessas.



**Tabela 41 HÉLICES MANUFACTURADAS EM FUNDIÇÃO DE LIGAS DE COBRE**

MATERIAL	COMPOSIÇÃO %							PROPRIEDADES MECÂNICAS					Temp. °C Recom. para desempe no a quente	REPARAÇÃO POR SOLDADURA		TEMPERATURAS °C	
	Cu	Zn	Fe	Al	Mn	Ni	Sw	$\sigma'$ N/mm <sup>2</sup>	$\sigma_c$ N/mm <sup>2</sup>	Along <sup>to</sup> %	Estricção %	Impacto KCU**		Processo	Metal adição	Pré Aq <sup>to</sup>	Alivio tensão
Bronze Mn*	58	38	1	1	1	0.5	0.5	440		20			500 a 800	SMA/ MIG/ TIG → TIG/ oxidrico →	Bronze Bronze Mn	150- 250	350- 550
Bronze MnNi*	56	34	1.5	1.5	1.5	3.5	0.5	520		18			500 a 800	SMA/ MIG/ TIG → TIG/ oxidrico →	Bronze Al Bronze Mn Ni	150- 250	350- 550
Bronze NiAl	79.5	-	4.5	4.5	9	4.5	-	590		15			700 a 900	SMA/ MIG/ TIG → Al	Br. Al/ Br Nial/ Br Mn	50- 150	-
Bronze Mn	75	-	3	3	8	2	-	620		20			700 a 850	SMA/ MIG/ TIG →	Bronze MnAl	100- 250	450- 600

Os Bronze Mn e Bronze Ni Mn têm propriedades importantes no referente aos hélices tais como a durabilidade e a resistência à corrosão com a fadiga que é fortemente influenciada pelas proporções relativas das fases  $\alpha$  e  $\beta$  que são os constituintes principais de microestruturas destes materiais. Uma percentagem demasiado elevada da fase  $\beta$ , prejudicará as referidas propriedades, devendo ser evitada. Para uma melhor apreciação quantitativa destas proporções usa-se o conceito do “equivalente de Zn” que quantifica o efeito das vários elementos químicos na tendência para a formação da fase  $\beta$  na estrutura cristalina.

$$Zn \text{ eq. } \% = 100 - \frac{100x\%Cu}{100 + A} \leq 4,5\%$$

$$A = \%Sn + 5x\%Al - 0,5x\%Mn - 0.1x\%Fe - 2.3x\%Ni$$

A contribuição negativa dos elementos Mn, Fe e Ni indica que estes elementos tendem a reduzir o quantitativo da fase  $\beta$ .

SMA= Eléctrodo Manual Revestido

\*\* J/cm<sup>2</sup> mínimo

\* Embora com a designação de bronzes, são latões de alta tensão

**Tabela 42 COBRE E LIGAS DE COBRE, APLICAÇÃO HÉLICES FUNDIDOS (a)**

	PROPRIEDADES MECÂNICAS (MIN)			COMPOSIÇÃO QUÍMICA %								
	$\sigma_r$ [N/mm <sup>2</sup> ]	Alongamento A5 %		Cu	Al	Fe	Ni	Mn	Si	Sn	Zn	Outros
Bronze Mn (latão)	440	20		55 a 62	0.5 a 2.0	0.4 a 2.2	< 1.5	< 2.0		< 1.0	Restante	
Bronze MnNi (latão)	520	18		54 a 57	< 2.0	1.0 a 2.5	2.5 a 4.0	2.5 a 4.0		< 1.0	Restante	
Bronze NiAl	590	15		> 78	8.0 a 11.0	3.0 a 6.5	3.0 a 6.5	< 3.0				< 0.5
Bronze MiAl	620	20		>71	6.5 a 9.0	2.0 a 6.0	1.5 a 3.0	8.0 a 14.0	< 0.1			< 0.5

(a) A sociedade de classificação DNV exige, no mínimo um ensaio de tracção por hélice e exame por líquidos penetrantes da pá (lado sujeito à pressão) num raio de 0.4R e na zona do encastramento das pás.

## 4 Zinco e suas ligas

### 4.1 Generalidades

O zinco é um metal que se obtém industrialmente a partir do seu principal minério, a blenda, que é um sulfureto de zinco e que geralmente aparece acompanhado de galena (S Pb) e de sulfureto de cádmio. É principalmente obtido por via electrolítica.

O zinco tem uma estrutura cristalina hexagonal compacta.

As propriedades principais do zinco puro figuram na Tabela 43. As propriedades mecânicas são bastante dependentes no grau de pureza.

**Tabela 43 PROPRIEDADES Físicas E MECÂNICA DOS ZINCO PURO**

Ponto de Fusão = 420°C	Limite Elástico = 70 MPa
Massa Volúmica = 7.1 Kg/dm <sup>3</sup>	Tensão de Rotura = 140 MPa (à tracção)
Condutibilidade Térmica = 0.25 cal/cm °C s.	Alongamento à Rotura = 50%
Coefficiente de Dilatação Térmica = 30 x 10 <sup>-6</sup> mm/mm °C	Módulo de Elasticidade = 100 GPa
Calor Específico = 0.09 cal/g	Resistividade Eléctrica = 5.8x10 <sup>-8</sup> Ω m

O zinco puro é pouco empregado como material de construção, em virtude das suas modestas propriedades mecânicas e da sua fraca propensão ao encruamento, o que significa que ligeiras solicitações mecânicas a temperatura ambiente provocam deformações permanentes; também sofre de fluência a temperaturas ambiente.

A aplicação do zinco na industria é sensivelmente dividida nos seguintes grupos:

Revestimentos (imersão e galvanização)	40
Fabrico de latões	18
Zinco laminado	12
Fundição de peças	26
Outras aplicações	4

### 4.2 Aplicações do Zinco

As principais aplicações do zinco em engenharia são:

- Revestimentos superficiais para protecção anticorrosiva de componentes de ferro e aços (zincagens por imersão a quente ou galvanização por via electrolítica).
- Componentes fundidos para a indústria automóvel (como carburadores) e outros produtos de consumo geral.

- Componente de ligas, sobretudo de ligas de cobre (latões).
- Componente de tintas anticorrosivas.
- Ânodos consumíveis (ânodos sacrificiais ) para protecção catódica para cascos de navios, “pipelines” e outras aplicações.

Nesta última aplicação, é necessário que o zinco tenha uma pureza elevada, requerendo processos de fundição especiais, em que após a solidificação não haja contaminação de zinco com o material dos moldes.

A norma MIL-A-19001 <sup>H</sup>- é a que mais correntemente se refere na especificação do nível de pureza do zinco dos ânodos de protecção catódica. Segundo esta norma, os ânodos deverão conter:

Pb < 0.006%	Fe < 0.0014%	Cu < 0.06%
Cu < 0.005%	0.1% < Al < 0.3%	Zn = restante

\* o ferro poderá ir a 0.003% quando Cd = 0.025%

A ligas de zinco mais usadas são ligas de fundição Zn Al com alguns outros elementos em pequenas percentagens.

Conquanto a importância destas ligas seja baixa, relativamente às aplicações já mencionadas, convém ter algum conhecimento sobre as suas características e aplicabilidade.

As ligas de fundição ZA 8, ZA 12 e ZA 27 são frequentemente mencionadas pela sua popularidade em alguns aplicações, onde apresentam características melhores que outras de cobre ou mesmo que ferros fundido.

Estas ligas, cuja composição nominal se refere na tabela seguinte, apresentam melhores características de resistência à fluência que outras ligas de Zn cuja ocorrência de fluência a temperaturas acima de 120°C é uma desvantagem.

Não são susceptíveis de provocar faíscas, o que é vantajoso em atmosferas potencialmente inflamáveis.

Aplicam-se bastante em chumaceiras por terem baixo coeficiente de atrito, boa fusibilidade e custo baixo, este último associado às baixas temperaturas de fusão.

A fundição pode ser em areia ou em coquilha.

**Tabela 44 Ligas de Zinco**

	ZA 8	ZA 12	ZA 27
% Al	8-8.8	10.5-11.5	25-28
Cu	0.8-1.3	0.5-1.25	2-2.5
Mn	0.015-0.03	0.015-0.03	0.01-0.2
Zn	Resto	Resto	Resto
Dureza BHV	82-89	90-110	110-120
$\sigma_e$ (MPa)	250	275	400
$\sigma_r$ (MPa)			
E (GPa)	85	83	75
$\epsilon_f$ %	1-2	1-2	3-6
$\rho$ g/dm <sup>3</sup>	6.3	6.0	5.0
Temp. fusão	375-404	380-430	380-430

Valores para fundição de areia.

## 5 Titânio e suas ligas

### 5.1 Generalidades

O titânio é um material de recente aplicação, comercialmente disponível desde 1952, que existe na Terra com certa abundância: estima-se que corresponde a cerca de 0,6% da crosta terrestre e apenas o ferro, o alumínio e o magnésio são mais abundantes; julga-se que o titânio existe na Terra em maior quantidade que o crómio, o cobre, o níquel, o chumbo e o zinco, juntos.

Encontra-se nos minérios de ilmenite ( $\text{TiO}_2 - \text{FeO}$ ) e rutilo ( $\text{TiO}_2$ ).

Devido às suas boas características de utilização considerado um metal estratégico, com aplicações em veículos espaciais e submarinos, armamento e instalações industriais especiais.

O aproveitamento do titânio a partir dos seus minérios é muito difícil e dispendioso o que em parte contraria a abundância do minério; a sua afinidade para o oxigénio, azoto e hidrogénio, exigem que seja obtido em vácuo ou em atmosferas inertes.

A produção mundial em 1952 foi de 1000 tons e em 1970 foi de 20000 tons. Actualmente estima-se a produção em 75000 tons, da qual um terço é destinado à indústria aeronáutica. Como curiosidade cita-se que um Boeing 747 contém 13 tons de Ti.

O titânio usado em meios corrosivos ou quando se deseja tirar partido das suas propriedades não magnéticas de relativamente baixo preço e da elevada resistência/peso. Embora haja muitas ligas, a maior produção refere-se ao titânio puro e às ligas de titânio com 0,2% de paládio e de alta resistência Ti-Al-V-Cr (tipo alfabeta).

### 5.2 Metalurgia, Características e Propriedades Principais

O titânio puro é um dos poucos metais alotrópicos (o ferro é outro); à temperatura ambiente tem uma rede hexagonal compacta (fase  $\alpha$ ); a  $880^\circ$  dá-se uma transformação alotrópica e o titânio passa a ter uma rede cúbica de corpo centrado (fase  $\beta$ ). Durante esta transformação há uma variação de volume de apenas 0,1%. A fase  $\beta$  é estável até à temperatura de fusão (cerca de  $1700^\circ\text{C}$ ).

O titânio puro não pode ser tratado termicamente visto que a transformação da fase  $\beta$  para a fase  $\alpha$ , no arrefecimento a partir de  $880^\circ\text{C}$ , não pode ser suprimido por velocidades elevadas de arrefecimento. Diferentes velocidades dão origem a diferentes estruturas internas de fase  $\alpha$ . O arrefecimento rápido dá origem a uma estrutura “acicular”, semelhante à que aparece na estrutura do aço martensítico. O arrefecimento lento dá origem a uma fase  $\alpha$  “equiaxiada”, semelhante à que aparece nos aços recozidos de baixo teor de carbono.

O Ti puro tem uma tensão de rotura baixa ( $10 \text{ kg/mm}^2$ ) e um elevado alongamento (40 a 60%); a sua utilização requer que seja ligado com pequenas quantidades de outros elementos, para lhe aumentar a resistência, o que já é conseguido no Ti comercial.

A classificação das ligas de titânio nos tipos alfa, alfabeta e beta depende das fases predominantes na microestrutura. O tipo de estrutura existente a temperatura ambiente diz-

nos se a liga pode ser termicamente tratada, e ainda se é sensível à fragilidade térmica que prejudica a soldabilidade.

Os elementos de liga promovem a formação de uma ou outra fase. O alumínio, por exemplo, estabiliza a fase  $\alpha$ , isto é, faz reter esta fase em temperaturas superiores à temperatura de transformação da fase  $\beta$ . São também estabilizadores da fase  $\alpha$  o C, N e O.

Os estabilizadores  $\beta$ , como o Cu, Cr, Fe, Mo e V, baixam a temperatura de estabilização  $\beta$ , nalguns casos reterendo a fase  $\beta$  à temperatura ambiente.

As propriedades mecânicas do Ti e suas ligas estão estreitamente relacionadas com as fases alotrópicas. A fase  $\beta$  é mais resistente embora mais frágil, que a fase  $\alpha$ .

O Ti como material de engenharia é muito atractivo, porque:

- a combinação de peso moderado e elevada resistência, permite a mais elevada taxa de resistência/peso (cerca de 50% superior às ligas de alumínio e ao aço). Para reforçar a importância desta característica, menciona-se que ela se pode manter numa elevada gama de temperaturas de -250°C a 500°C.
- tem uma elevada resistência à corrosão, como resultado da presença de uma fina camada superficial de óxido, resistente ao ambiente atmosférico e marítimo, bem como a grande gama de produtos químicos incluindo cloretos e compostos organoclorados.
- tem um elevado ponto de fusão (1700°C), baixa condutibilidade térmica, baixo coeficiente de expansão e elevada resistividade eléctrica.

O titânio e as ligas de titânio são sensíveis ao entalhe, podendo a sensibilidade ser avaliada pelos ensaios de choque clássicos. Na Figura 27 indicam-se as relações energia de choque/temperatura, para os diferentes níveis de tensão de cedência. À medida que a resistência aumenta, a tenacidade ao entalhe diminui. Em comparação com os aços, as ligas de titânio não apresentam propriamente uma temperatura de transição e apenas se nota uma variação gradual numa zona relativamente grande das temperaturas. Na Figura 28 indicam-se os valores da tenacidade à fractura para os diferentes tipos de liga de titânio, segundo três escalas: energia dada pelo ensaio Charpy V, energia dada pelo ensaio dinâmico e factor crítico de intensidade de tensões  $K_{IC}$ . Os valores referem-se a material como vem da laminagem, para espessuras de 25 mm, e para uma variedade de processos e de tratamentos térmicos. A curva superior - CTMO (curva de tendência do material óptimo) está relacionada com os valores de tenacidade de fractura na direcção mais “fraca” determinados para o correspondente nível de tensão de cedência. A curva CTMO de esperança normal relaciona o nível da tenacidade à fractura que se pode esperar com razoável confiança se a composição química, o processo de fabrico e o tratamento térmico são especificados da melhor maneira. A zona de tenacidade à fractura indicada para um dado nível de tensão de cedência depende das variáveis atrás citadas, composição química, processo e tratamento térmico e ainda das impurezas (C, O, N, H), as quais fazem piorar a tenacidade. O H é especialmente perigoso abaixo de 90°C, devendo exigir-se um nível de H abaixo de 200 ppm. Este facto é devido à precipitação de plaquetas de hidrato de titânio. De um modo geral a tenacidade diminui com o aumento da resistência.

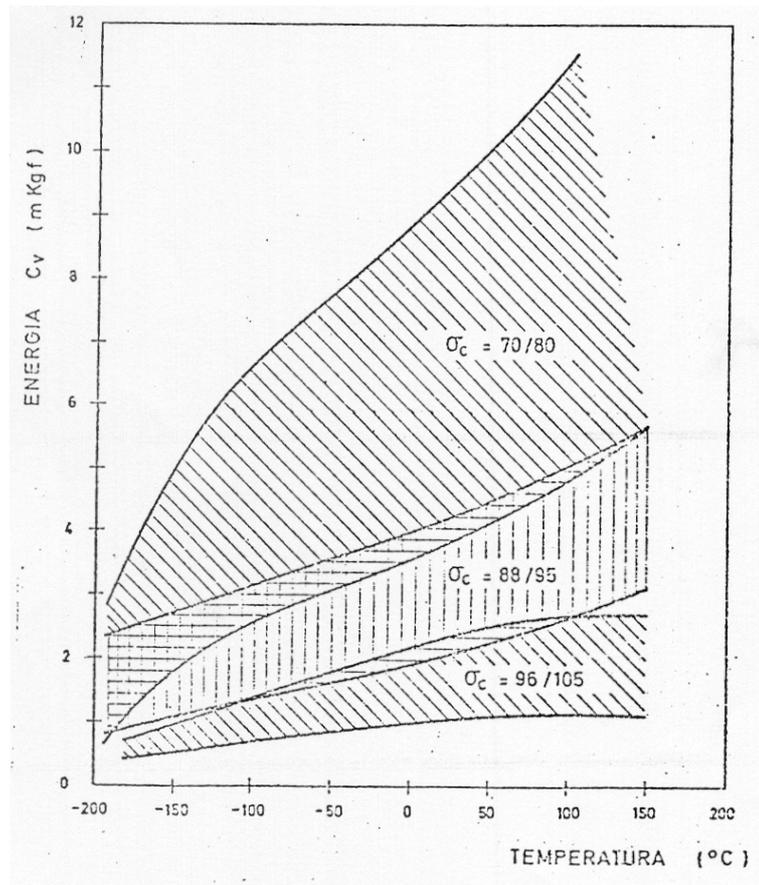


Figura 27 Titânio - Tenacidade

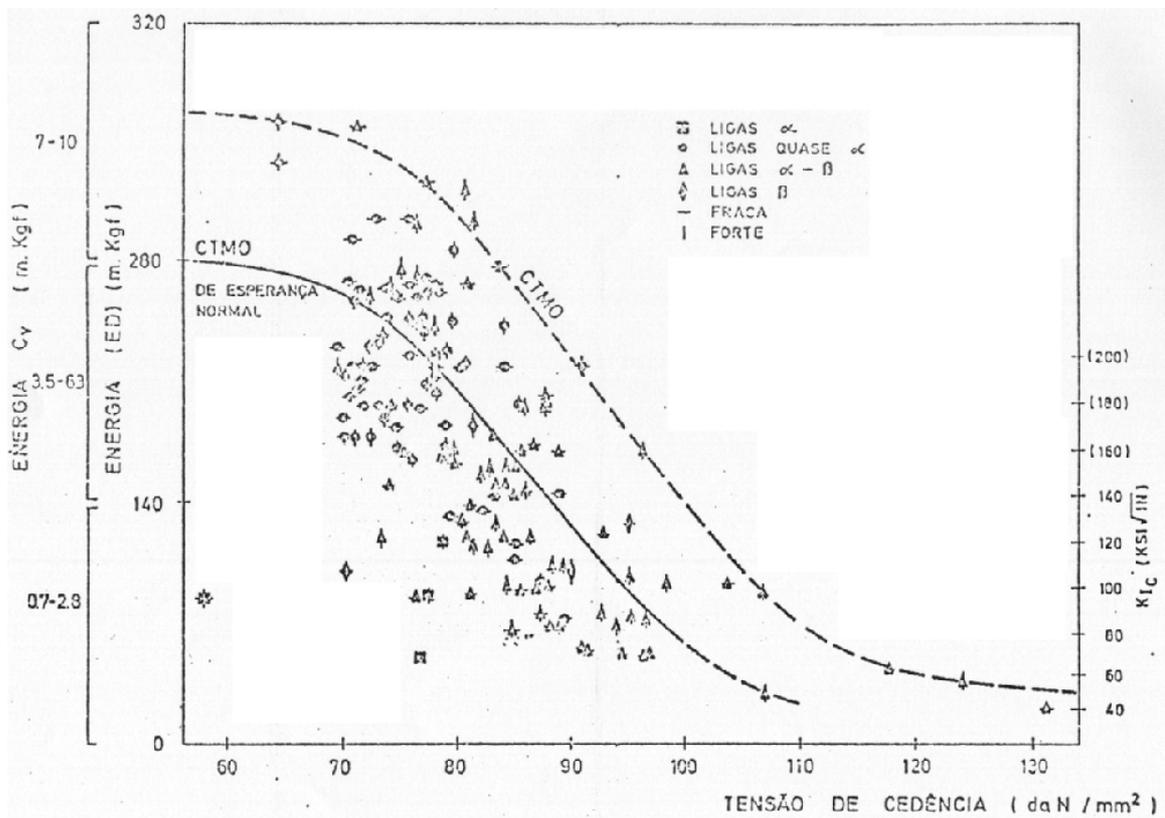


Figura 28 Titânio - Ensaios Charpy

### 5.3 Formas de Comercialização e Tecnologia de Fabrico

O Ti e a maioria das suas ligas, são comercializadas como produtos laminados, estirados e extrudidos nas formas correntes - chapas, folha, tubo, arame, perfis e forjados.

Também são produzidas fundições para fins especiais.

### 5.4 Ligas de Titânio

Existem diversas variedades ("grades") de Ti comercialmente puro, com teores de 98.9 a 99.5%. São consideradas ligas  $\alpha$  e têm tensões de rotura que vão dos 2820 aos 7040 kg/cm<sup>2</sup>.

Existe uma variedade com 0.15 a 0.20% de paladium (Pd), que tem uma elevada resistência a corrosão em meios redutores como os ácidos sulfúrico e hidrolórico.

As ligas  $\alpha$  propriamente ditas, contêm elementos como o Sn, Co, Zr, V e Mo em quantidades de 1 a 10%. Não são sensíveis a tratamentos térmicos, têm boa estabilidade entre -250°C e 450°C. Têm uma boa combinação de soldabilidade, resistência e tenacidade.

A liga com 5% Al e 2.5% Sn é talvez a mais usada liga  $\alpha$ , sobretudo em aplicações aeroespaciais e aeronáuticas e tem uma resistência à temperatura ambiente, de 8450 kg/cm<sup>2</sup>, tem uma ductilidade aceitável, boa resistência à oxidação, boa soldabilidade e formabilidade, mantendo as suas propriedades até 425°C - 540°C.

As ligas  $\alpha\beta$ , são as de uso mais divulgado. São sensíveis ao tratamento térmico, utilizáveis em temperaturas até 425°C, com melhor formabilidade que as ligas  $\alpha$ , ligas com menor tenacidade e de soldadura mais difícil. A liga  $\alpha\beta$  mais usada tem 6% Al e 4% V sendo a liga de titânio mais usada. Pode ser tratada até obter 11970 kg/cm<sup>2</sup>, tem boa resistência à fadiga e ao impacto e é soldável. A liga com 6% Al, 6% V e 2% Sn é a que adquire maior tensão de rotura (até 13400 kg/cm<sup>2</sup>).

As ligas  $\beta$ , embora tenham uma elevada resistência ( $\sigma_r > 140$  kg/mm<sup>2</sup>) têm uma fraca tenacidade e reduzida resistência à fadiga, pelo que o seu uso é limitado. Tornam-se frágeis a -70°C e a sua resistência à tracção fica bastante reduzida para temperaturas superiores a 315°C.

### 5.5 Aplicações do Titânio e suas Ligas

Com base nas suas características o uso do titânio e as suas ligas é mais significativo nas seguintes áreas de aplicação:

- (1) Em estruturas em que a relação  $\sigma_r/\gamma$  é crítica; exemplos: casos de submersíveis de profundidade, exemplos estruturais de navios de superfície de alta velocidade (hydrofoils) aviões e veículos espaciais.
- (2) Em superfícies em que a corrosão é crítica e não podem ser protegidas por pintura, ou por outro modo; exemplo: válvulas esféricas para água do mar; permutadores de calor em centrais nucleares e em estações desalinizadoras.

- (3) Em estruturas ou órgãos de máquinas que devam ter grande resistência à fadiga - corrosão; exemplos: pás de hélices, estruturas de mastros de navios de alta velocidade.
- (4) Quando forem necessárias as propriedades não magnéticas (caso muito importante dos submarinos).
- (5) Quando for necessário ter resistência a soluções quentes de salmoura ou a gases de evacuação de motores.
- (6) Quando for necessário resistência aos fenômenos de cativação produzidos pela alta velocidade da água salgada e outros agentes corrosivos.

Recentemente o titânio começou a aparecer em aplicações correntes, correndo com outras ligas, em aplicações comercialmente competitivas; referem-se sobretudo os permutadores de calor do tipo de placa.

**Tabela 45** Quadro comparativo de um aço de alta resistência usado em submarinos com uma liga de titânio

	Aço	L. Titânio
	HY80	Ti-5Al-2.5Sn
Densidade	7.8	4.5
$\sigma_r$ (MPa)	560	800
$\varepsilon_r$ (%)	20	11
$E_r$ (GPa)	210	112
$\nu$	0.3	0.5
Coeficiente expansão ( $^{\circ}\text{C}^{-1}$ )	$11.5 \times 10^{-6}$	$8.2 \times 10^{-6}$
Cond. Term (Kcal/mh $^{\circ}\text{C}$ )	45	14.4
Calor específico (Kcal/k $^{\circ}\text{C}$ )	0.117	0.139

## 6 Níquel e suas ligas

### 6.1 Generalidades

O níquel é um dos materiais mais importantes em engenharia figurando em 10º no consumo mundial de metais.

O níquel puro tem boa resistência à corrosão em determinados ambientes agressivos. Usa-se extensivamente como subcapa na electrodeposição por crômio. Usa-se também como placante do aço em tanques destinados a produtos químicos.

O maior uso do níquel é como elemento de liga melhorando as propriedades de aços, ligas de cobre, etc.

Estima-se que a produção do níquel se reparte pelas seguintes aplicações:

- em aços inoxidáveis 29%
- ligas com elevado teor de Si 16%
- electrodeposição
- ligas de Ni 15%
- aços 12%
- ligas de cobre 4%
- outros 9%

### 6.2 Características e Propriedades Principais

O níquel tem uma estrutura cristalina com uma rede cúbica de faces centradas. Tem uma cor branca prateada, com uma fundição amarelada.

É magnético até 360°C e funde a cerca de 1453°C. Tem uma densidade de 8.85.

As ligas de níquel em geral, são mais resistentes e tenazes que a maioria das ligas não ferrosas e que bastantes aços. Têm um módulo de elasticidade idêntico ao do aço. Têm também importantes propriedades eléctricas e magnéticas e de resistência à corrosão; algumas ligas têm uma excelente resistência, tenacidade e ductilidade a baixas temperaturas, que as torna aplicáveis em criogenia. Por outro lado, existem ligas com elevada resistência em temperaturas até 1200°C e elevada resistência à oxidação a temperaturas elevadas. Algumas das ligas de níquel, pelas suas propriedades, são designadas por superligas.

Como medida de precaução as ligas de níquel não devem ser sujeitas a temperaturas elevadas, na presença de enxofre, para evitar a formação de sulfureto de níquel na microestrutura, o que degrada as propriedades mecânicas.

A Tabela 46 sintetiza algumas propriedades das ligas de níquel que têm aplicação mais corrente.

Tabela 46 Ligas de Níquel

GRUPO	DESIGNAÇÃO DA LIGA	COMPOSIÇÃO NOMINAL %	$\sigma_r$ kg/mm <sup>2</sup>	$\sigma_c$ kg/mm <sup>2</sup>	Along <sup>ty</sup> em 2"	E kg/cm <sup>2</sup>	Dureza HB (HR) (L)	$\sigma_D$ kg/mm <sup>2</sup>	Magnet. à temp. amb.
Ligas com elevado Ni	Níquel "A" Duraníquel Níquel "Z"	99.4 Ni + Co 95 Ni + 4.5 Al	35 a 56 (a) 112 a 126 (b)	7 a 21 (a) 84.5 a 100 (b)	50 a 35 20 a 10	2.11 x 10 <sup>6</sup>	90 a 120 300 a 350	36,6 (a 10 <sup>8</sup> ciclos)	Forte Ligeirte quando enve- lha por envelhe- ta
Ligas Ni Cu	Monel	67Ni+30Cu+1.5Fe+1Mn	49 a 60 (a)	17.5 a 32 (a)	50 a 30	1.83 x 10 <sup>6</sup>	(B 60 a 75) (C 25 a 32)	21,8 a 25,4 (a 10 <sup>8</sup> ciclos) 31,7 a 37,3 (a 10 <sup>8</sup> ciclos)	Médio Não
Liga Ni Cr	Inconel	66 Ni + 29 Cu + 3 Al 76 Ni + 16 Cr + 8 Fe	99 a 112,5 (b) 70 a 99 (c)	70 a 88 29,5	30 a 20 40 a 20	2.18 x 10 <sup>6</sup>	(B 85 a 100)	27 a 36 (a 10 <sup>8</sup> ciclos)	Não
Ligas Ni Mo Cr Fe	Hastelloy B <i>Hastelloy C</i>	62 Ni + 28 Mo + 5 Fe 56Ni+16Cr+16Mo+6Fe+4W	50 a 100 82.4	28,2 38,7	40 a 20 54	2.04 x 10 <sup>6</sup> ?			Ligete ?
Ligas Ni Cr Mo Cu	Illium B	50Ni+28Cr+8.5Mo+5.5Cu (2.5 a 4.5 % Si)	43 a 47	35 a 43	1 a 4.5		200 a 240		

- (a) Chapa laminada a quente/recozida. (f) Níquel comercialmente puro. (k) Fraca resistência ao ataque pelo enxofre. Pode ser substituído pelo Níquel "D", que tem resistência ao ataque pelo enxofre até uma temperatura de 540°C.
- (b) Barra laminada a quente e endurecida por envelhecimento. (g) Resistente ao ácido sulfúrico e hidrocloreico. Não deve ser usado com ácidos e sais extremamente oxidantes. (l) Níquel "D" + 95 Ni + 4.5 Mn

- (c) Laminado a quente. (h) Resistente à oxidação a temperaturas elevadas. (m) Dureza escala Brinell

- (d) Não deve ser usado em atmosferas com compostos de enxofre, acima de 350°C. (n) Fundição. (o) Dureza Rockwell

- (e) Não deve ser usado em atmosferas com compostos de enxofre, acima de 815°C. (p) Altamente resistente à corrosão e à erosão. Resistente ao ácido sulfúrico concentrado, quente

TN 382

### 6.3 Aplicações do Níquel e das suas Ligas mais usadas

O níquel e a maioria das suas ligas são comercializadas nas formas correntes por que se apresentam os produtos forjados e também podem ser produzidas por fundição.

As ligas de níquel são classificadas em diversos grupos:

- Ligas de alto teor de Ni
- Ligas de Ni-Cu
- Ligas de Ni-Cr
- Ligas de Ni-Cr-Co
- Ligas de Ni-Mo
- Ligas de Ni-Cr-Mo, etc.

Das ligas de níquel, as mais conhecidas, são as ligas Ni-Cu, da família “Monel”, com cerca de 67% Ni e 30% Cu, além de pequenas percentagens de Fe e Mn; estas ligas Monel são particularmente resistentes a ácidos, alcalis, salmouras, água e alimentos, além de serem bastante resistentes à tracção e de serem conformáveis plasticamente.

Outras ligas como o Inconel e o Hastelloy têm elevada resistência à corrosão e às temperaturas elevadas (resistência à oxidação).

O uso das ligas de níquel em aplicações marítimas, advém do facto de serem resistentes aos efeitos da turbulência e velocidade na água do mar; entre as aplicações mais vulgares, contam-se as ligas Ni Cu para os componentes móveis de válvulas de bronze para água salgada e de impulsores e anéis de desgaste em bombas para água salgada. A resistência à erosão e à corrosão das ligas de níquel está associada à sua capacidade de permanecerem passivas e inertes a velocidades em que as ligas de cobre ficam com as camadas protectoras danificadas; em contrapartida, em situações de água salgada estagnada (menos de 1 m/seg.), podem ocorrer situações em que o filme passivante (óxido) seja localmente destruído, originando corrosão pontual (pitting), ou até corrosão generalizada.

Tem-se verificado que a adição do Mo e do Cr, às ligas de Ni, contribui fortemente para o aumento da resistência à corrosão na situação de baixas velocidades de escoamento.

### 6.4 Tratamentos e Soldabilidade

Os Ni, Monel e Inconel não são endurecíveis por tratamento térmico; as tensões mais elevadas são obtidas por laminagem, prensagem ou outros tipos de trabalho a frio. Podem ser recozidos por aquecimento até à temperatura de cristalização. A velocidade de arrefecimento a partir da temperatura de recozimento não tem efeito na dureza.

O níquel e as ligas citadas são soldados virtualmente por todos os métodos correntes. As soldaduras feitas com metal de adição da mesma composição química que o metal base têm, em princípio, propriedades equivalente às do material recozido. O calor da soldadura não tem efeito apreciável nas propriedades do metal base, junto à soldadura (ZAC).

As ligas Monel "K", Níquel "Z" e as ligas do grupo Hastelloy contêm Al e Mo, sendo endurecidas pelo aquecimento, dentro da gama de 600°C a 870°C e em seguida arrefecidas lentamente. Não é necessário um tratamento prévio de têmpera.

Estas ligas são soldadas por MIG, TIG ou oxídrico. A soldadura MIG é preferível nalguns casos para reduzir o envelhecimento do metal base.

O recozimento do metal base assegurará uma dureza uniforme e dará à soldadura e à zona afectada pelo calor a máxima resistência à corrosão.