

Relatório TP5 – Endurecimento por solução sólida e aparecimento de uma segunda fase

André Ferreira, João Galante.

8 de Novembro de 2012

Resumo: Foram ensaiados dois provetes à tração, um de cobre puro, outro de latão com 37% Zn, ambos no estado recozido. Determinaram-se as suas propriedades mecânicas e visualizou-se a sua microestrutura via microscopia óptica. Finalmente, foram relacionadas as propriedades mecânicas dos dois materiais com a sua microestrutura e fez-se uma breve síntese das aplicações das ligas de cobre usadas na construção mecânica.

0 – Introdução

Em construção mecânica, require-se muitas vezes que o material possua elevada resistência mecânica combinada com propriedades mais específicas a adaptar à aplicação. O cobre é um material muito interessante em termos de propriedades gerais, mas que padece, no entanto, em termos da resistência mecânica. Assim, é muito frequente o uso de ligas de cobre, as quais mantêm algumas das propriedades características do cobre, mas com melhorada resistência mecânica. De seguida se apresentam brevemente algumas dessas ligas, e as suas aplicações na área da construção mecânica.

1 – Composição química, constituição e propriedades mecânicas das ligas de cobre usadas em construção mecânica

As ligas de cobre usadas em construção mecânica subdividem-se em baixo e alto teor de liga:

1.1 Ligas de cobre de baixo teor de liga

1.1.1 Cu-Be (0.6-2%Be)

São ligas endurecíveis por precipitação, que podem ser tratadas ternicamente e deformadas a frio, para se obterem resistências à tração muito elevadas, na ordem dos 1400 MPa, que são as resistências mais elevadas das ligas de cobre comerciais⁶. A boa resistência à fadiga, à corrosão e mecânica, são o motivo da sua aplicação em molas, engrenagens diafragmas e válvulas. Têm, contudo, a desvantagem de serem materiais relativamente caros.

1.1.2 Cu-As (0.013-0.050%As)

Boas propriedades mecânicas acima da temperatura ambiente e boa resistência à corrosão. Empregue em tubos de condensadores, caldeiras, autoclaves. Pode ser encruado para aumentar a resistência mecânica.

1.1.3 Cu-Ag (0.02-0.12%Ag)

A prata confere maior resistência mecânica e à fluência. Devido à alta condutibilidade térmica e maior resistência ao amolecimento por calor, é empregue no fabrico de permutadores de calor, brasagem, máquinas elétricas e estanagem.

1.1.4 Cu-Te (0.3-0.8%Te) e Cu-S (0.2-0.5%S)

Boa resistência mecânica e maquinabilidade superior. Os cobsres com enxofre, selénio e chumbo têm as mesmas propriedades. O Cu-Te é aplicado na confeção de parafusos, porcas, pinos, e peças similares a serem produzidas em máquinas automáticas.

1.2 Ligas de cobre de alto teor de liga

1.2.1 Latões: Cu-Zn (5-50%Zn)

O cobre forma soluções sólidas substitucionais monofásicas com o zinco, até um teor de 35% de zinco. Quando se atingem teores de aproximadamente 40% zinco, formam-se ligas com duas fases, alfa e beta. Estas ligas têm resistências médias (234 a 374 MPa) no estado recozido, mas podem ser deformadas a frio, de modo a aumentar a sua resistência mecânica.

- Latões α (monofásicos / vermelhos): %Zn < 35%

Possuem melhorada ductilidade e conformabilidade a frio. Exemplos:

“Bronze comercial” (10% Zn) e “Latões vermelhos” (15% Zn) – de cor dourada, usados em ornamentos e ferragens. Possuem boa resistência à corrosão.

“Latão para cartuchos” (30% Zn). Possuem boa resistência mecânica mantendo excelente ductilidade. Usados em componentes de munições, tubos, permutadores de calor, acessórios de canalização e rebites.

- Latões $\alpha+\beta$ (bifásicos / amarelos) 35% < %Zn < 45

Vêm a sua conformabilidade a quente e maquinabilidade melhoradas. Exemplo:

“Metal Muntz” (40% Zn), que é usado em componentes forjados, permutadores de calor, porcas e parafusos grandes e placas de condensação.

Tabela 1 - Resumo comparativo, propriedades latões α e $\alpha+\beta$.

	Latões α	Latões $\alpha+\beta$
Ductilidade	+	- (a frio)
Resistência mecânica	-	+ (β fase mais dura)
Vazabilidade	-	+
Maquinabilidade	-	+
Resistência à corrosão	-	- (micro galvânica)

1.2.2 Bronzes: Cu-Sn (1-10%Sn)

São ligas endurecidas por solução sólida com maior resistência que os latões, especialmente no estado deformado a frio, e melhor resistência à corrosão sendo, no entanto, mais caros. As ligas bronze para fundição contêm até cerca de 16% de estanho e são usadas para rolamentos e peças para engrenagens de alta resistência mecânica. Quantidades elevadas de estanho (5 a 10%) são adicionadas para obter boa lubrificação em superfícies de rolamentos. As suas características gerais incluem: ótima vazabilidade, soldabilidade, ductilidade, e resistência à

corrosão atmosférica e marinha. Exemplos:

Bronzes de construção Mecânica - Gun Metal (8-10%Sn)

Usados em engrenagens e rolamentos.

Bronze universal (5%Sn, 5%Zn, 5%Pb)

A presença de duas fases diferentes leva a que se criem finas camadas de óleo nas zonas alfa, mais macias, o que ajuda a evitar a gripagem (adesão de uma peça a outra). É usado em válvulas, encaixes de tubagens, peças para canalização, bombas vazadas, rotores e caixas de bombas de água, peças ornamentais.

Bronzes fosforosos (6-14%Sn, 0.1-0.6% de Fósforo).

Os melhores para resistir à água salgada. Equilíbrio entre maquinabilidade e vazabilidade. Usados também para fundição

1.2.3 Cupro-Alumínios (4-14%)

Têm elevada resistência à corrosão marinha, corrosão sob tensão, corrosão em fadiga e excelentes características mecânicas.

1.2.4 Cupro-níqueis (5-45%)

Boa resistência à corrosão da água do mar. Usados em tubos, chapas, placas e discos para permutadores.

2 – Determinação das propriedades mecânicas dos dois materiais em estudo

2.1 Cobre puro:

Como tem a zona elástica muito pequena, seria necessário traçar uma tangente à curva no ponto zero. No entanto, se sobrepusermos os dois ensaios de tração, e visto que estão na mesma escala de forças e ampliação de deformações, é possível verificar que na parte elástica, a inclinação da curva é visivelmente a mesma para ambos os gráficos. Então, o valor do módulo de elasticidade será semelhante ao retirado do cálculo no latão.

Designação	Sigla	Composição %	Propriedades mecânicas			
			Límite de resistência à tração kgf/mm ²	Límite de escoamento kgf/mm ²	Alongamento %	Dureza Brinell
Cobre-zinco 95-5	CuZn5	Cu-94,0/96,0 Zn - restante	27 – 55	10 – 38	45 – 3	65 – 120
Cobre-zinco 90-10	CuZn10	Cu-89,0/91,0 Zn - restante	27 – 57	9 – 42	50 – 4	55 – 125
Cobre-zinco 85-15	CuZn15	Cu-84,0/86,0 Zn - restante	31 – 60	10 – 42	50 – 4	60 – 135
Cobre-zinco 80-20	CuZn20	Cu-78,5/81,5 Zn - restante	31 – 64	12 – 48	52 – 3	65 – 155
Cobre-zinco 70-30	CuZn30	Cu-68,5/71,5 Zn - restante	33 – 85	12 – 54	62 – 3	65 – 160
Cobre-zinco 67-33	CuZn33	Cu-65,5/68,5 Zn - restante	34 – 86	13 – 55	60 – 3	65 – 165
Cobre-zinco 63-37	CuZn37	Cu-62,0/65,5 Zn - restante	34 – 86	13 – 55	56 – 5	65 – 165
Cobre-zinco 60-40	CuZn40	Cu-59,0/62,0 Zn - restante	38 – 60	16 – 45	40 – 4	85 – 145

Designação	Sigla	Composição %	Propriedades mecânicas			
			Límite de resist. à tração kgf/mm ²	Límite de escoamento kgf/mm ²	Alongamento %	Dureza Brinell
Cobre-estanho 98-2	CuSn2	Sn-1,0/2,5 P-0,02/0,30 Cu - restante	28–65	11–50	45–2	60–150
Cobre-estanho 96-4	CuSn4	Sn-3,0/4,5 P-0,02/0,40 Cu - restante	33–90	13–58	50–2	70–195
Cobre-estanho 95-5	CuSn5	Sn-4,4/5,5 P-0,02/0,40 Cu - restante	35–95	13–62	55–2	75–205
Cobre-estanho 94-6	CuSn6	Sn-5,5/7,5 P-0,02/0,40 Cu - restante	37–100	15–76	60–2	80–225
Cobre-estanho 92-8	CuSn8	Sn-7,5/9,0 P-0,02/0,40 Cu - restante	42–105	17–82	65–2	85–240
Cobre-estanho 90-10	CuSn10	Sn-9,0/11,0 P-0,02/0,04 Cu - restante	44–100	19–85	65–3	95–245

Fig. 1 - Propriedades mecânicas de alguns latões (esquerda) e de alguns bronzes (direita).³

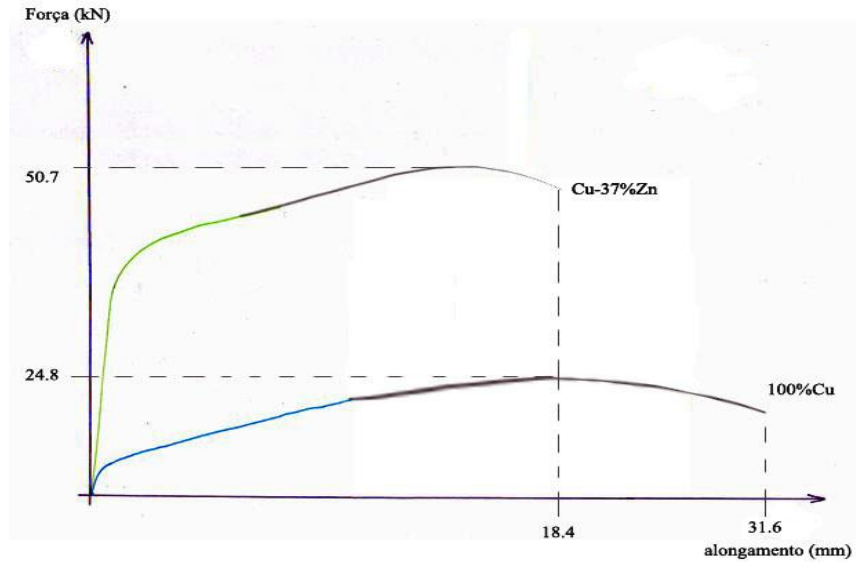


Fig. 2 - Esquema representativo dos ensaios de tração completos dos provetes de Cu e Cu-37%Zn

$$E = \frac{\sigma}{\varepsilon} = \frac{\frac{F}{A_i}}{\frac{\Delta l}{l_i}} = \frac{F l_i}{A_i \Delta l} \therefore E = \frac{5.8 \cdot 300 \cdot 9.8 \cdot 60}{112.2 \cdot 0.1} = 91 \text{ GPa}$$

Como o cobre puro praticamente não tem zona linear, nestes casos define-se a tensão de limite de elasticidade como a tensão que produz uma deformação de 0.005. Então,

$$\varepsilon_{0.5} = \frac{l - 60}{60} = 0.005 \therefore l = 60.3$$

Para este comprimento, que corresponde a um Δl de 0.3mm, retira-se o valor da força e daí calcula-se a tensão pretendida:

$$\sigma_e = \frac{1.4 \cdot 300 \cdot 9.8}{112.2} = 36.7 \text{ MPa}$$

$$\varepsilon_r = \frac{l_f - l_i}{l_i} \cdot 100 \therefore \varepsilon_r = \frac{91.6 - 60}{60} \cdot 100 = 52.7\%$$

$$\varphi = \frac{A_i - A_f}{A_i} \cdot 100 \therefore \varphi = \frac{112.2 - 25.1}{112.2} \cdot 100 = 77.65\%$$

$$\sigma_r = \frac{F_{\max}}{A_i} \therefore \sigma_r = \frac{2535 \cdot 9.8}{112.2} = 221.5 \text{ MPa}$$

2.2 Latão (37%Zn):

$$E = 91 \text{ GPa}$$

Como não existe um ponto na curva delimitando o fim da deformação elástica, e início da plástica, mas como a zona da curva linear é suficientemente comprida, determina-se a tensão como a tensão de limite convencional de proporcionalidade a 0.2%. Assim,

$$\varepsilon_{0.2} = \frac{l - 60}{60} = 0.002 \therefore l = 60.1$$

Para este comprimento, que corresponde a um Δl de 0.1mm, retira-se o valor da força, traçando uma tangente à curva no ponto de 0.1mm e daí calcula-se a tensão pretendida:

$$\sigma_e = \sigma_{0.2} = \frac{9.4 \cdot 300 \cdot 9.8}{110.3} = 250.5 \text{ MPa}$$

$$\varepsilon_R = \frac{78.4 - 60}{60} \cdot 100 = 30.6\%$$

$$\varphi = \frac{110.3 - 70.9}{110.3} \cdot 100 = 35.7\%$$

$$\sigma_R = \frac{5175 \cdot 9.8}{110.3} = 459.8 \text{ MPa}$$

3 – Diagrama esquemático das curvas de tração

Com os valores obtidos nos ensaios de tração dos dois provetes, esquematizou-se, assim, duas possíveis curvas completas dos ensaios de tração dos mesmos (fig. 2).

4 – Esquema representativo das microestruturas

Após preparação do material para poder ser corretamente visualizado em microscópio óptico, e sua observação no mesmo, foi possível captar a informação essencial dessa visualização, que se encontra esquematizada na fig. 3.

5 – Relação das propriedades mecânicas com a microestrutura.

O cobre possui uma estrutura cúbica de faces centradas da qual resulta diretamente uma boa ductilidade. Além disso, por estar no estado puro, e o tamanho de grão ser elevado, as discordâncias movem-se facilmente, no que resulta uma baixa resistência mecânica, tensão de rotura e elevadas deformações.

Já as principais propriedades do latão resultam das propriedades do seu material base – o cobre – da presença

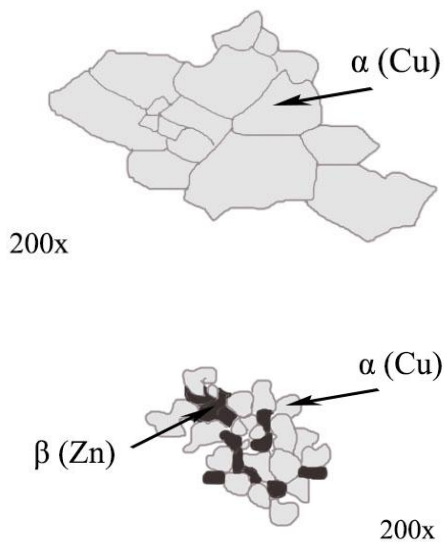


Fig. 3 - Esquema representativo da vista microscópica de cobre puro (cima) e latão com 37% de zinco (baixo).

do elemento endurecedor por solução sólida – o zinco – e o tipo de malha resultante.

Assim, por ter havido a precipitação de uma fase mais dura – zinco – garante-se a saturação da fase α do latão o que implica um endurecimento máximo desta fase. Além disso, ambos os provetes foram fornecidos com alguma deformação plástica, pelo que como o recozido se deu a temperatura acima da de recristalização para ambos os materiais ($100^{\circ}\text{C} < T_{\text{rec}} \text{ Cu}$ e $\text{ligas Cu-Zn} < 400^{\circ}\text{C}$), sabe-se que houve germinação de grão. Como a precipitação de uma segunda fase é um impedimento ao crescimento de grão, é natural que na liga Cu-Zn devido ao menor

tamanho de grão resultante, se tenham formado um maior número de grãos, e mais pequenos.

Assim, tendo em conta a lei de Petch-Hall,

$$\sigma_e = \sigma_i + \frac{k}{\sqrt{d}}$$

tendo o latão menor tamanho de grão que o do cobre puro, tira-se diretamente da fórmula que tem σ_e superior visto o segundo fator a adicionar ao σ_i do cobre puro ser maior que zero. Com efeito, a existência de maior superfície de limites de grão no caso do latão, funciona, à temperatura ambiente, como barreira superior ao movimento das discordâncias o que causa um aumento da resistência mecânica.

Relativamente ao módulo de elasticidade, não se terá alterado significativamente, uma vez que, apesar da falta de rigor inerente a este método de determinação de E, os valores serão, no máximo, ainda bastante semelhantes.

Finalmente, o latão apresenta menores deformações relativamente ao cobre puro uma vez que o movimento das discordâncias está dificultado pela existência dos átomos de zinco extra na malha do cobre. Esse impedimento de movimento das discordâncias torna mais difícil a ocorrência de deformações e daí se ter obtido menor ϵ_r e ϕ menor no caso do latão. Esse mesmo motivo será a causa do aumento de σ_r relativamente ao cobre puro.

Estão então comentadas as propriedades mais relevantes em construção mecânica dos dois materiais, a sua relação com as informações que nos foram fornecidas, e assim se conclui o relatório.

Bibliografia:

- 1 Antunes, V. (1992) “Ligas não ferrosas”. Porto, FEUP.
- 2 Barralis, J., Maeder, G. (1997) “Prontuário de Metalurgia” Traduzido por L.F.M. da Silva. Lisboa:Fundação Calouste Gulbenkian.
- 3 Chiaverini, V. (1988) “Aços e Ferros Fundidos”, 6ª Ed., São Paulo: ABM.
- 4 Ferreira, A. (2012) “Resumo de MCM1”. pp:35-38. Disponível online em: www.estudomec.info/files/ResumoMCM1.pdf
- 5 Silva, L.F.M. da., Duarte, T.M. P., Antunes, V. T. (2008) “Problemas e trabalhos práticos de metalurgia”. Porto:FEUP Edições. 1ª ed.
- 6 Smith, W. F. (1996) “Princípios de ciência e engenharia dos materiais”. Lisboa:McGraw-Hill, Inc.