

## O COBRE E SUAS LIGAS NA CONSTRUÇÃO AERONÁUTICA (1)

Eng<sup>o</sup> Ettore Bresciani F<sup>o</sup> (2)Introdução

A finalidade dêste trabalho é abordar, em linhas gerais, as características dos diversos tipos de cobre e suas principais ligas utilizados na construção aeronáutica.

O cobre e a maioria de suas ligas, em estado não trabalhado, são caracterizados por uma moderada resistência mecânica, associada a uma alta ductilidade; estas características são particularmente adequadas à fabricação de semi-manufaturados na forma de chapas, tiras ou arames.

Todo tratamento mecânico de deformação a frio provoca o aumento de resistência do material com perda de ductilidade, tornando mais difíceis novas operações de deformação. Para muitas aplicações êste estado é desejável, porém a ductilidade pode ser prontamente restabelecida através de um tratamento térmico (recozimento).

Em outros casos, é possível a obtenção de aumento de resistência por tratamentos térmicos adequados (solubilização e precipitação).

O cobre e suas ligas nas formas trabalhadas a quente (estampadas, forjadas e seções extrudadas) são muito utilizadas, principalmente na fabricação de peças por operações de usinagem, onde a usinabilidade do material é uma característica muito desejável.

Devido também à facilidade de fabricação, resistência e tenacidade obtidas, as peças fundidas em cobre e suas ligas têm sido utilizadas desde há muitos séculos.

---

(1) - Trabalho apresentado no Simpósio sobre Metais Não-Ferrosos  
Dez. 1967 - Centro Técnico de Aeronáutica - S. José dos Campos

(2) - Docente da E.P.U.S.P. e Consultor do CEBRACO .

Outras qualidades adicionais e muito importantes para certas aplicações são:

- alta condutibilidade elétrica
- alta condutibilidade térmica
- alta resistência à corrosão e ao desgaste
- características físicas não magnéticas

O cobre e suas principais ligas têm aplicação na construção aeronáutica em certas peças e equipamentos particularmente importantes.

Desde o início até o término do vôo, o funcionamento adequado de uma aeronave moderna depende de um complexo sistema elétrico e eletrônico e de circuitos, que exigem alguns milhares de metros de fios de cobre e o auxílio de um grande número de conexões de cobre ou ligas de cobre.

Por sua vez, os sistemas hidráulicos para operações de acionamento dos trens de aterragem, flapes e freios, devem satisfazer as condições severas de funcionamento, tanto no que se refere às pressões como às temperaturas de serviço; para tanto os tubos de cobre e suas ligas têm se prestado excelentemente para a construção de partes desses sistemas.

Por outro lado, não se deve esquecer a aplicação do cobre e suas ligas nos permutadores de calor, utilizados nos sistemas de refrigeração dos motores a pistão convencionais.

Além disso, existem ainda as aplicações na construção de instrumentos e mecanismos de navegação aérea e outras mais especiais.

CARACTERÍSTICAS DO COBRE E SUAS PRINCIPAIS LIGAS DE  
EMPREGO NA CONSTRUÇÃO AERONÁUTICA

Cobre e baixas ligas de cobre

Utilização em tubulações - As tubulações de cobre são muito utilizadas para as linhas condutoras de óleo, combustível e água. Os tubos são fornecidos na forma recozida e são do tipo sem costura. Quando endurecidos por tratamentos mecânicos, podem ser recozidos para readquirir a sua ductilidade. O tipo de cobre indicado para estas construções é o cobre desoxidado com fósforo com conteúdo residual deste elemento em torno de 0,02 a 0,08%; este cobre é particularmente adequado às operações de soldagem por maçarico ou brasagem, devido à ausência de oxigênio na sua composição.

Para as tubulações sujeitas a pressões maiores, pode-se utilizar tubos de liga cobre-silício com 1 a 1,5% de silício, devido à maior resistência oferecida por este material.

Na construção desses sistemas, é importante notar a ductilidade exigida do material para a conformação dos intrincados percursos das tubulações; o cobre possui esta característica mecânica.

A construção aeronáutica moderna tem exigido destas tubulações, além das facilidades de conformação e junção, características de resistência mecânica especiais - pois a pressão dentro dos tubos pode atingir  $300 \text{ kg/cm}^2$  e esta, associada a um movimento de vibração, pode ocasionar a fadiga - além de melhores características de resistência à corrosão e manutenção da resistência mecânica em baixas temperaturas. Para tanto, algumas ligas especiais de cobre-zinco-alumínio-níquel-silício têm preenchido os requisitos exigidos, atingindo, na condição recozida, resistência à tração de  $49 \text{ kg/mm}^2$ , limite de escoamento (0,1%) de  $26 \text{ kg/mm}^2$  e alongamento (em 50mm) de 48%

Utilização em instalações e equipamentos eletro-eletrônicos - O cobre e algumas de suas ligas com pequenos teores de elementos de liga (prata, cádmio, cromo e telúrio, principalmente) são usados em todos os aparelhos e equipamentos elétricos e eletrônicos, tanto da aeronave como dos serviços auxiliares em terra, de controle de vôo ou manutenção. O rádio, o radar, os dispositivos indicadores e de alarme, os servo-contrôles, os cir

cuitos de aquecimento podem ser mencionados como equipamentos indispensáveis. Além dêsse, outros campos de utilização mais recentes têm aberto novas possibilidades para o cobre, como por exemplo:

- os circuitos impressos (laminados de plástico coberto com cobre) para os contrôles usuais e circuitos de potência;
- cabos condutores de fita (diversos condutores em fita, isolados por plásticos transparentes) adaptáveis a qualquer superfície da aeronave, onde se verificam economia de pêsso e facilidade de manuseio e montagem.

Nestas aplicações, a principal característica exigida do material utilizado como condutor de eletricidade é, evidentemente, a alta condutibilidade elétrica. O cobre possui esta característica física, sendo superado em alta condutibilidade, somente pela prata.

Para a condução de eletricidade em condições normais é indicado o cobre tenaz de alta condutibilidade, refinado a fogo ou eletroliticamente. Este material também é o mais indicado para os enrolamentos dos geradores de corrente das aeronaves, onde o espaço disponível e pêsso, além da condutibilidade elétrica, devem ser considerados.

Além disso, alguns dispositivos na construção do equipamento exigem certas propriedades particulares do material como: resistênciã ao desgaste, manutenção da resistênciã mecânica em temperaturas maiores que a ambiente, usinabilidade, alta resistividade elétrica associada à resistênciã à oxidação, alto limite de elasticidade. O cobre, com baixos teores de outros elementos, pode atender a uma ou mais das características acima mencionadas.

- Cobre-prata Cu Ag com aproximadamente 0,08% Ag, é utilizado na construção de elementos de máquinas elétricas que devem manter as condições iniciais de resistênciã mecânica após o aquecimento que sofrem nos processos de soldagem (fraca) usuais na montagem do equipamento; o efeito da prata na condutibilidade é negligenciável;
- Cobre-cádmio Cu Cd com aproximadamente 0,6 a 1,0% Cd, apresenta as mesmas características básicas que a liga cobre - prata, porém com melhor comportamento em condições sujeitas a solicitações cíclicas, que podem provocar, conseqüentemente, o fenômeno da fadiga; o cobre-cádmio recozido na forma de fios, tem sido indicado para a construção das fiações elétricas das aeronaves, devido combinar as propriedades

de flexibilidade com resistência a efeitos da vibração (fadiga);

- Cobre-cromo Cu Cr com aproximadamente 0,5% Cr, associa a boa condutibilidade elétrica com a manutenção das propriedades mecânicas (obtidas por tratamento térmico ou mecânico) em temperaturas até 450°C;

- Cobre-telúrio Cu Te com aproximadamente 0,5% Te, tem o seu principal emprêgo na fabricação de peças de alta condutibilidade elétrica por meio de processo de usinagem em máquinas automáticas, onde uma outra importante propriedade exigida é a alta usinabilidade; o aumento de usinabilidade, conseguido com a adição de telúrio ao cobre, é muito grande, com pequena diminuição na condutibilidade elétrica.

Além desses, os cobsres com pequenos teores de estanho (0,5 a 1% de estanho) são muito utilizados para a fabricação de cabos, devido à alta flexibilidade e resistência mecânica conseguidas.

TABELA I

Propriedades Elétricas e Térmicas

M e t a l	Cond.elétrica a 20°C-% IACS	Cond. térmica cal/cm <sup>2</sup> /cm/seg/°C
Cobre tenaz de alta condutibilidade - Cu <u>TPHC</u>	100 - 102	0,92 - 0,94
Cobre-telúrio - Cu Te	94 - 98	0,85
Cobre-cádmio - Cu Cd	80 - 85	0,9
Cobre desoxidado com fósforo (0,04% P) - Cu <u>DHP</u>	80	0,75
Cobre-cromo - Cu Cr (trat. térmico)	80	0,75
Cobre-cromo - Cu Cr (antes do trat.)	45	0,4
Cobre com estanho para condução de eletricidade (0,5 a 1% Sn)	55 - 75	0,55 - 0,70
Cobre-zinco (latão) Cu Zn 70-30 (para permutadores de calor)	27	0,29
Cobre-berílio - Cu Be (Bel, 7% - Co 0,3% (trat.térmico)	25 - 35	0,25

Utilização em permutadores de calor e aquecedores - A associação de alta condutibilidade térmica com a facilidade de conformação e soldagem tornam o cobre e algumas de suas ligas altamente utilizáveis nos permutadores de calor e demais equipamentos condutores de calor.

Nos motores convencionais a pistão das aeronaves, os permutadores de calor ocupam um lugar importante. O cobre tenaz desoxidado com fósforo - devido à facilidade de soldagem - e algumas de suas baixas ligas (como cobre-prata, cobre-cromo, por exemplo) por possuírem maior resistência ao amolecimento em temperaturas moderadamente elevadas, são os materiais mais apropriados para a construção desses equipamentos.

Na dissipação e condução rápida do calor, obtida com o cobre devido à sua alta condutibilidade térmica, baseiam-se algumas de suas aplicações mais especiais, tais como:

- permutadores de calor para fluidos refrigerantes dos mancais dos motores a turbina;
- sapatas de freios de trens de aterragem;
- sistemas indicadores de velocidade (onde é necessário o aquecimento para a remoção do gelo formado).

#### Ligas de cobre

Diversas ligas de cobre são utilizadas para a construção aeronáutica, quer na forma trabalhada quer na forma fundida. O tipo de liga e as condições de manuseio e emprêgo seguem as mesmas indicações recomendadas para a construção mecânica usual. Dentre estas inúmeras ligas, pode-se mencionar as seguintes:

- liga cobre-zinco (latão 60-40) (60% de cobre e 40% de zinco) - é particularmente usada na forma trabalhada e tratada termicamente (solubilização) para a fabricação de diversos componentes, como: porcas e parafusos, onde se requer maior resistência à corrosão da água do mar; é também utilizada na forma fundida;
- liga de cobre-zinco com estanho (latão 60-40 estanho 1) contendo de 0,5 a 1,5% de estanho pode ser usada na forma forjada, extrudada e laminada; para a construção aeronáutica é mais comum o seu uso na fabricação de peças por usi-

nagem, partindo-se de barras; êste material é caracterizado pela alta resistência mecânica, associada à resistência à corrosão (com boas propriedades para a fabricação de mancais sujeitos a cargas pesadas);

- liga cobre-estanho, fósforo (bronze fosforoso) liga de cobre com estanho desoxidada com fósforo, contendo aproximadamente 94% de cobre, 3,5% de estanho e de 0,05 a 0,50% de fósforo; é usada na forma de barras, chapas e arames para a fabricação de parafusos, discos de válvulas, contatos elétricos e pequenas molas. Possui boas características de resistência à corrosão associadas a um elevado limite de elasticidade;

- liga cobre-estanho, fósforo (bronze fosforoso) para fundição contém 10% de estanho e aproximadamente 0,5% de fósforo, é usada na fabricação de mancais, buchas e engrenagens; como no caso anterior, possui boa resistência à corrosão e mecânica;

- ligas de cobre-estanho com zinco com teores de cobre entre 86 e 89%, estanho de 9 a 11% e zinco de 1 a 3%, possui boas propriedades tecnológicas, como: fundibilidade e usinabilidade, sendo portanto usada para a fabricação, na forma fundida, de engrenagens e mancais para trabalhos em condições severas;

- ligas cobre-estanho-chumbo-zinco com 84-86% de cobre, 4-6% de chumbo, 4-6% de zinco e 4-6% de estanho, são usadas, na forma fundida, para a fabricação de acessórios para canalizações de combustível e óleo, devido à boa fundibilidade e usinabilidade possuídas por estas ligas;

- ligas cobre-alumínio combinam a alta resistência mecânica com a resistência à corrosão principalmente à água do mar e resistência à oxidação. São usadas na forma forjada ou de barras e chapas. Na construção aeronáutica são usadas para a fabricação de acessórios, conexões e luvas de acoplamento de condutores de fluidos. As ligas usuais possuem a seguinte faixa de composição: 6,5 a 11% de alumínio, 2,0% de manganês, 4,0% de ferro, 0,6% de estanho, podendo ainda conter 5,5% de níquel e 2,3% de silício.

Estas ligas, na forma fundida, são sujeitas a tratamentos térmicos; com a composição: 10,5 a 12% de alumínio, 2,0 a 5,0% de ferro, 5,0% de man

ganês, 5,0% de níquel e 2,0% de estanho, são usadas para a construção de engrenagens, mancais, rede de válvulas e cubos de hélices.

Por outro lado, as ligas cobre-estanho (bronzes) são comumente usadas para a fabricação de buchas auto-lubrificantes, obtidas pelos processos de metalurgia do pó. Estas buchas são usadas para locais de difícil lubrificação e onde as cargas presentes são elevadas.

Inúmeras outras ligas de cobre são utilizadas na construção aeronáutica, seguindo as mesmas recomendações que para a construção mecânica, porém, convém realçar o papel do cobre-berílio, com aproximadamente 2% de berílio, que devido à alta resistência (limite de elasticidade) obtida após tratamento térmico de solubilização e precipitação, associada à propriedade não magnética, permite a sua aplicação em molas, diafragmas e juntas de expansão utilizadas na construção de instrumentos. Esta liga combina também excelentes propriedades mecânicas, com razoável condutibilidade elétrica, podendo atuar, por exemplo, como mola e condutor de eletricidade. É comumente fabricada na forma de tiras e fios.

Outras ligas usuais na construção mecânica e que são utilizadas na construção aeronáutica são: cobre-níquel com pequenos teores de níquel (aproximadamente 3%); o níquel, juntamente com pequenos teores de silício ou alumínio, tem a finalidade de melhorar as propriedades mecânicas do cobre, quando utilizado para fins estruturais ou de construção de elementos de máquina. Maiores teores de níquel são adicionados com a finalidade de conferir melhor resistência à corrosão.

A liga cobre-chumbo, com teores de até 30% de chumbo, é utilizada para a fabricação de mancais de motores aeronáuticos. A liga é depositada em fina camada sobre suportes de aço. A principal característica da liga é a sua propriedade de metal anti-fricção.

TABELA II: Cobre e suas Ligas de Emprego Corrente na Construção Aeronáutica (Segundo Normas Aeronáuticas Francesas - AIR 3370)

Material			Composição Química (%)								Condição e Tratamento	Caract. Mecânicas Mínimas				Outras Características	Formas (disponíveis)
Cobre ou Liga de cobre	Símbolo N. Franc.	Equivalente ISO	Zn	Sn	Ni	Si	Al	Outras	Impurezas	t kg/mm <sup>2</sup>		e kg/mm <sup>2</sup>	%	DB kg/mm <sup>2</sup>			
Cobre	U-6 c	Cu FRTP								0,2	Trab. a quente, recozido	20		30		Soldável	Chapas, tiras, discos, tubos(p/pressões normais)
	U-9 d	Cu OFHC								0,5 isento	Trab. a quente, encruado 1/2 duro	25		10		Soldável Cond. elétrica	
Cobre-zinco (latão)	U-Z 33	Cu Zn33	31,5 34,5							0,5	Trab. a quente, recozido Trab. a quente. encr. 1/2 duro	30 40		53 10		Estampável	Chapas e tubos
	U-Z39Pb2	Cu Zn39Pb2	37,5						Pb:2-3	0,2	Trab. a quente, estirado, encruado 1/4 duro	39		15		Usinável	Barras calibradas
	U-Z15 NS	Cu Zn15NiS	10 16		0,8 1,4	0,8 1,3	0,7 1,2			Fe 0,25 Tot 0,5	Trab. a quente, recozido	42		45			Tubos (para altas pressões)
	UZ19 A6	Cu Zn19Al8	16 24				6 10		Fe:Mn: : 7-11		Trab. a quente recoz. de Fundido estab.	85-95 75-85	60-65 55-65	10-15 8-15	240-290 230-260		Barras, peças forjadas. E.P.F. peças fundidas.
	U-Z23 A4	Cu Zn23Al4	20 27				3,5 6		Ni+Fe+Mn :4,5-8,5		Trab. a quente recoz. de Fundido estab.	60-70 50-60	28-35 25-30	15-25 8-15	170-210 160-190		Barras, peças forjadas. E.P.F. peças fundidas.
	U-Z36 N3	CuZn36Ni3	33 40		2 5				Al+Fe+Mn :2-5		Trab. a quente, est. recozido Trab. a quente, recozido	55-58 48-55	25-30 20-25	15-18 22-35	150-200 115-140		Barras calibradas. Barras, peças forjadas
Cobre-Estanho (bronze)	U-E3 S	CuSn3Sb2	2 5	2 5		1 3			Ni+Fe+Pb :2-4		Fundido, tratado				85-100	Anti-fricção Resist. ao desgaste	C.P.F. peças fundidas
	U-E9	CuSn9 P		7 10					P 0,3  (incl. Zn)		Trab. a quente, recozido Trab. a quente, encr. 1/2 duro	40 45-55	17 28-45	50 30-50	80-120 95-170	Anti-fricção Gravável	Chapas, tiras, barras, tubos
	U-E12 P	CuSn12 P		10,5 13,5					P 0,1	3	Fundido sem tratamento	25		10	80	Anti-fricção	C.P.F., peças fundidas
Cobre-Níquel	U-N 35	CuNi 35			2 3	0,5 1					Trab. a quente, tratado Fundido, tratado	60-70 50-60	50-60 40-50	8-15 5-10	170-200 160-200	Anti-fricção	Barras, peças forjadas C.P.E. peças fundidas
	U-N14 A	CuNi14Al 2,5			13 16		2 3				Trab. a quente, tratado	80-90	60-70	10-15	230-290	Resist. ao desgaste	Barras, peças forjadas
Cobre-Alumínio	U-A 10 N	CuAl10 Ni					9 11		Ni+Fe+Mn :6-10 Fe 3 Ni Fe		Trab. a quente, tratado Fundido, tratado	70-78 65	33-40 30	13-20 10	170-210 170-210		Barras, peças forjadas Peças fundidas
	U-A 11 N	Cu Al11 Ni					10 12		Ni+Fe+Mn : 8-12 Fe 3 Ni Fe		Trabalhado a quente, tratado	75-82	40-45	8-16	200-250	Trabalhável a quente	Barras, peças forjadas
Cobre-berílio	U-Be2	Cu Be2							Be:2,25		Trab. a quente, tratado	90-130	80	2	270-360		Chapas, barras, fios
Cobre-Chumbo	U-Pb8	Cu Pb8			8			6-10		1	Fundido, tratado						
	U-Pb20	Cu Pb20			5			18-24		1	Fundido, tratado						



BIBLIOGRAFIA

1. "Copper and its Alloys in Engineering and Technology" - C.D.A. nº 43 - Copper Development Association - Inglaterra.
2. "O cobre no ar e no espaço" - Boletim Técnico nº 30 - Publicação do CEBRACO.
3. "Tableau des Cuivres et Alliages de Cuivre d'emploi courant en Construction Aéronautique" - Norme AIR 3370 - Ministério da Defesa Nacional (Air) - França.
4. "Aircraft Materials and Process" - George F. Titterton - Pitman Pub. Co.