

COBRE

Cássio Barbosa

Engenheiro Metalúrgico (UFRJ),
M.Sc. e D.Sc. (COPPE/UFRJ)

História do Cobre

O cobre foi o primeiro metal usado pelo homem. Acredita-se que por volta de 13.000 a.C. ele foi encontrado na superfície da Terra em forma de cobre nativo, um metal puro em seu estado metálico. Usado inicialmente para substituir a pedra como ferramenta de trabalho e na confecção de armas e objeto de decoração, o cobre foi uma descoberta fundamental na história da evolução humana.

Os historiadores concordam que as primeiras descobertas importantes do cobre foram na área compreendida entre os rios Tigre e Eufrates, ao Norte do Golfo Pérsico. Nesta área, considerada como o lugar da primeira civilização do mundo, foram encontrados objetos de cobre de mais de 6.500 anos.



O cobre sempre desempenhou um papel predominante na evolução da humanidade, sendo utilizado em todas as fases das revoluções tecnológicas pelas quais o ser humano já passou. O fato de se ter encontrado objetos de cobre tão antigos em diversos lugares do mundo é prova da importância das propriedades do metal: durabilidade, resistência à corrosão, maleabilidade, ductibilidade e facilidade de manejo. Os

Romanos designaram o cobre com o nome de "Aes Cyprium" (o metal de Cyprus), já que a Ilha de Cyprus (Chipre) foi uma das primeiras fontes do metal. Com o tempo, o nome se transformou em Cyprium e depois em Cuprum, originando o símbolo químico "Cu". Já o símbolo gráfico que identifica o cobre é uma forma modificada do antigo hieróglifo Ankh, usado pelos egípcios para representar a vida eterna.

As minas de cobre mais importantes do mundo, estão localizadas no Chile, Estados Unidos, Canadá, Rússia e Zâmbia. No Brasil sua história comercial não é muito antiga mas está em desenvolvimento. Em 1874, foi descoberta a mina Caraíba, no sertão da Bahia. Somente após 70 anos é que foram iniciados os trabalhos de prospecção. Em 1969, 25 anos mais tarde, o empresário brasileiro, sob a liderança do Grupo Pignatari, estabeleceu uma planta de metalurgia em Dias D'Ávila (Bahia) para a produção de cobre eletrolítico, que começou a produção no início da década de 80. No final da década, em 1988, ocorreu o desmembramento entre a mina e a planta de metalurgia, com a privatização desta última, que adotou o nome de Caraíba Metais.



Propriedades Básicas

O cobre é um elemento metálico com número atômico 29 e peso atômico de 63,57. O seu símbolo químico é Cu, e suas valências são +1 e +2.

Não é magnético e pode ser utilizado puro ou em ligas com outros metais que lhe conferem excelentes propriedades químicas e físicas.

Densidade: 8,96 g / cm³ (20°C)
Ponto de fusão: 1083°C
Ponto de ebulição: 2595°C
Coeficiente de dilatação térmica linear: 16,5 x 10⁻⁶ cm/cm/°C (20°C)
Resistividade elétrica: 1,673 x 10⁻⁶ ohm.cm (20°C)
Pressão de vapor: 101 mm Hg à 20°C
Condutividade elétrica: 101 % IACS à 20 °C
Calor latente de fusão: 50,6 cal/g
Calor específico: 0,0912 cal/g/°C (20°C)
Forma cristalina: cúbica de faces centradas

Mineração e Metalurgia

As minas de cobre são classificadas de acordo com o sistema de exploração. As minas à céu aberto são aquelas cujo mineral se encontra próximo da superfície e as minas subterrâneas são aquelas em que o mineral se encontra em profundidade, necessitando de explosivos para sua extração.



Da mina sai o minério contendo de 1% a 2% de cobre. Depois de extraído, britado e moído, o minério passa por células de flotação que separam a sua parte rica em cobre do material inerte e converte-se num concentrado, cujo teor médio de cobre é de 30%. Este concentrado é fundido em um forno onde ocorre a oxidação do ferro e do enxofre, chegando-se a um produto intermediário chamado matte, com 60% de cobre.

O matte líquido passa por um conversor e, por meio de um processo de oxidação (insufla oxigênio para a purificação do metal), é transformado em cobre blister, com 98,5% de cobre, que contém ainda impurezas (como resíduos de enxofre, ferro e metais preciosos). O cobre blister, ainda no estado líquido, passa por processo de refino e é moldado, chegando ao ânodo com 99,5% de cobre.

Após resfriados, os ânodos são colocados em células de eletrólise. São então intercalados por finas chapas de cobre eletrolítico, denominadas chapas de partida. Aplicando-se uma corrente elétrica, o cobre se separa do ânodo e viaja através do eletrólito até depositar-se nas placas iniciadoras, constituindo-se o cátodo de cobre, com pureza superior a 99,99%. Este cátodo é moldado em suas diferentes formas comerciais para ser processado e transformado em fios, barras e perfis, chapas, tiras, tubos e outras aplicações da indústria.



Normalmente, o produto final originário dos produtores de cobre (mineiros) são os cátodos refinados e os vergalhões de cobre, cuja produção é vendida quase que inteiramente para a indústria de transformação do cobre. Os cátodos ou os vergalhões passam por processos de laminação, extrusão, forjagem, fundição e metalurgia do pó dando origem a uma larga variedade de produtos tais como fios e cabos elétricos, chapas, tiras, tubos e barras que são usados nos mais diversos segmentos da indústria.

PRINCIPAIS MINERAIS		
MINERAL	COMPOSIÇÃO	%Cu
Cobre nativo	Cu	100
Cuprita	Cu ₂ O	88.8
Tenorita	CuO	79.8
Malaquita	CuCO ₃ .Cu(OH) ₂	57.3
Azurita	Cu ₃ (CO ₃) ₂ (OH) ₂	55.1
Crisocola	CuSiO ₃ .2H ₂ O	36
Antlerita	Cu ₃ SO ₄ (OH) ₄	54
Brocantita	Cu ₄ SO ₄ (OH) ₆	56.2
Atacamita	CuCl ₂ Cu(OH) ₂	59.4
Calcopirita	CuFeS ₂	34.5
Bornita	Cu ₅ FeS ₄	63.3
Calcocita	Cu ₂ S	79.8
Covelita	CuS	66.4

Custo X Benefício

Existem alguns fatores que contribuem para a redução de custos em componentes de cobre.

Tolerâncias pequenas (apertadas) podem ser empregadas durante a manufatura, minimizando o custo final do produto.

Custos com ferramentas podem ser significativamente mais baixos que para outros materiais e processos.

A facilidade em se trabalhar com o metal pode minimizar os custos de produção.

A boa resistência à corrosão pode garantir custos com acabamentos para proteção menores que para muitos outros materiais.

O alto valor residual (sucata) também pode ser usado para reduzir os custos de produção.

A longa vida útil de um componente de cobre bem projetado diminui os custos com manutenção.

Cobre comercialmente puro e cobre ligado (Série C 1XX)

O cobre é possivelmente o metal há mais tempo utilizado pela humanidade. Registros históricos citam a utilização do bronze (liga cobre-estanho) nos primórdios da civilização, anterior mesmo à descoberta e ao uso do ferro. Entretanto, atualmente o cobre é apenas o terceiro metal mais usado, atrás do ferro e do alumínio, sendo que este último ultrapassou o cobre somente nas últimas décadas, após a Segunda Guerra Mundial. Diversos fatores podem explicar esse fenômeno, mas provavelmente o mais consistente está relacionado com o custo, uma vez que o cobre está presente na crosta terrestre em quantidades muito menores do que os dois metais mais utilizados. Entretanto, para determinadas aplicações, o cobre comercialmente puro e as ligas de cobre ainda são insuperáveis, devido às suas características físicas e químicas muito peculiares.

O cobre puro é um metal de transição cuja densidade (massa específica) é 8,96 g/cm³, o que permite dizer que é um metal ainda mais “pesado” do que o ferro e muito mais denso que o alumínio. Seu ponto de fusão é de 1083 °C, mais baixo do que o do ferro e mais alto do que o do alumínio. Mas sua propriedade física mais importante é, sem dúvida, sua elevada condutibilidade elétrica, que é tomada como referência e estabelecida como sendo 100 % IACS (International Annealed Copper Standard), uma vez que o cobre puro, no estado recozido, tem uma resistividade elétrica de apenas 0,15328 ohm.g/m² a 20 °C. Esse valor é bem mais alto do que o do alumínio comercialmente puro no mesmo estado e incomparavelmente mais alto do que o ferro puro no mesmo estado. Dentre os metais conhecidos, somente a prata poderia superar a condutibilidade elétrica do cobre, porém seu elevado custo comercial inviabiliza seu uso industrial na mesma escala em que o cobre é atualmente usado.

O sistema da Copper Development Association (CDA), também adotado pela ASTM, divide as ligas de cobre segundo a seguinte classificação:

Série CDA/ASTM	Tipo de liga
C 1XX	Cobre comercialmente puro e cobre ligado
C 2XX	Latão binário (cobre-zinco)
C 3XX	Latão com chumbo (Cu-Zn-Pb)
C 4XX	Latão com estanho (Cu-Zn-Sn)
C 5XX	Bronzes (cobre-estanho, com e sem fósforo)
C 6XX	Cobre-alumínio, cobre silício
C 7XX	Cuproníquel e alpaca

Obs.: as séries 8XX e 9XX são reservadas às ligas fundidas.

Neste sistema pode-se identificar, por exemplo, a liga C 110 como um cobre comercialmente puro, mais especificamente o cobre eletrolítico ETP, a liga 260 como o latão para cartucho (70 % de cobre e 30 % de zinco), a liga 521 como um bronze fosforoso (8 % de estanho) e a liga 757 como uma alpaca (65 % Cu – 23 % Zn – 12 % Ni), entre outros. O primeiro algarismo identifica o grupo da liga, enquanto os demais identificam uma determinada liga especificamente. Uma variação deste sistema admite até 5 algarismos de identificação, ao invés de 3. Neste caso, a liga C 260 é conhecida como C 26000, podendo variar os dois últimos algarismos devido a uma pequena alteração de composição química. Entretanto, vale ressaltar que comercialmente o mais utilizado é o sistema de 3 algarismos, devido à sua maior praticidade.

a) Cobre comercialmente puro

Para ser considerado como cobre, e não liga de cobre, o metal deve conter 99,3 % ou mais do elemento cobre, incluindo-se nesse total o teor de prata, geralmente proveniente do minério, ao qual não se adiciona nenhum outro tipo de elemento, exceto o que tenha sido adicionado para fins de desoxidação [1].

Tipos de cobre comercialmente puro:

- Cobre eletrolítico (ETP ou 110): é o cobre inicialmente fundido (em placas ou tarugos) tendo como matéria-prima o cobre eletrolítico geralmente produzido sob a forma de anodos (chapas grossas), com um teor mínimo de cobre de 99,90 % (e prata contida até 0,1 %), contendo um certo teor (admitido, porém controlado) de oxigênio) com o objetivo de se conseguir no molde uma superfície plana. A norma ASTM B 224 estabelece um teor de oxigênio entre 0,02 e 0,07 %, que também depende do teor de enxofre presente, sendo o restante cobre (99,95 %), exceto um teor residual de impurezas de cerca de 0,01 % [1].

O cobre eletrolítico tem assim a estabilidade das suas fases indicada pelo diagrama Cu-O. No intervalo desse diagrama que corresponde ao interessa comercial a liga sofre uma reação eutética a 1066 °C (para um teor de oxigênio de 0,39 %), formando, com o resfriamento, as fases alfa (cobre praticamente isento de oxigênio) e Cu₂O. No estado sólido a solubilidade do oxigênio no cobre é muito baixa, praticamente nula, de modo que praticamente todo o oxigênio está contido na fase óxido. A estrutura fundida do cobre eletrolítico é constituída basicamente por dendritas de fase alfa (matriz) com segregação do eutético de cobre e Cu₂O nos contornos da matriz. Entretanto, após intensa deformação plástica resultante de processos de fabricação, como extrusão, trefilação e laminação, a microestrutura se modifica bastante, aparecendo então os óxidos como partículas isoladas distribuídas aleatoriamente na matriz. O efeito dessas inclusões de óxidos sobre as propriedades mecânicas da matriz é relativamente pequeno, pelo menos em comparação com outros tipos de cobre comercialmente puro, como o “oxygen free high conductivity” (OFHC ou C 102).

A presença de oxigênio pouco afeta a tenacidade do cobre eletrolítico, mas o teor de oxigênio deve ser baixo o suficiente para garantir boa trabalhabilidade durante os processo de fabricação/conformação. O teor de oxigênio depende do grau de refino do cobre durante a fundição. Pode ser reduzido mediante o uso de fósforo como desoxidante, caso do cobre com fósforo (C122 e C 123) ou de fornos de fusão a vácuo (C102). Além da restrição quanto à trabalhabilidade, o cobre com oxigênio não pode ser utilizado em atmosferas que contenham gases redutores em alta temperatura, que modificariam a microestrutura do material [2].

- Oxygen free high conductivity copper (OFHC ou C 102): é o cobre eletrolítico que não apresenta partículas de óxido, porém produzido sem o uso de agentes químicos desoxidantes [3]. Também não apresenta em sua composição química resíduos de agentes desoxidantes, como o fósforo [1]. Seu teor mínimo de cobre é de 99,95 a 99,99 %.
- Cobre desoxidado com fósforo, com baixo teor de fósforo (DLP ou C 122): é o cobre fundido e vazado em molde, que não contém óxido cuproso (Cu₂O) e que é obtido através do uso do fósforo com desoxidante não metálico (metalóide), com um teor mínimo de cobre (e prata) de 99,90 % e teores residuais de fósforo entre 0,004 e 10,12 %. Com esses teores de fósforo o decréscimo de condutividade elétrica é ainda muito pequeno.
- Cobre desoxidado com fósforo, com alto teor de fósforo (DHP ou C 123), obtido pelo mesmo processo empregado para a fabricação do DLP, porém com um teor residual de fósforo bem mais alto, entre 0,015 e 0,040 %. O teor mínimo de cobre (e prata) está entre 99,80 e 99,90 % [1]. Estes teores do fósforo já acarretam uma queda de condutividade elétrica mais significativa [3].

Existem outros tipos de cobre comercialmente puro, como o refinado a fogo (FRHC) e o refinado a fogo tenaz (FRTP), entretanto os que foram mencionados anteriormente representam a parcela mais significativa dos tipos de cobre comercialmente puros utilizados na indústria em geral.

Aplicações dos diferentes tipos de cobre comercialmente puro:

Além da sua principal aplicação, em fios e cabos condutores de transmissão de energia elétrica, o cobre comercialmente puro pode ser usado na condução de energia térmica,

condução de fluidos e na construção civil. Suas principais características são as altas condutividade térmica e elétrica, elevada resistência à corrosão, alta trabalhabilidade (podem atingir 90 % de deformação sem recozimentos intermediários) e aspecto adequado para aplicações arquitetônicas e decorativas. O cobre com alto grau de pureza é o mais indicado para aplicações na transmissão de energia elétrica e calor, enquanto o cobre que contém teores residuais de fósforo é mais indicado para a fabricação de tubos para a condução de fluidos e de um modo geral na construção civil.

O cobre eletrolítico (ETP ou C 110) é utilizado na fabricação de: cabos condutores para estradas de ferro e linhas telefônicas, motores geradores, transformadores, bobinas de instrumentos, fios esmaltados, barras coletoras, contatos elétricos, fios para instalações domésticas e industriais, peças de aparelhos de rádio e televisão, interruptores, peças para trocadores de calor, radiadores de automóveis, equipamentos de indústrias de processamento químico (caldeiras, destiladores e alambiques), equipamentos para processamento de alimentos, construção civil e arquitetura (telhados, fachadas, calhas, pára-raios, painéis e revestimentos).

O cobre isento de oxigênio (OFHC ou C 102) é usado na fabricação de componentes para aparelhos eletro-eletrônicos em geral, e na fabricação de peças para serviço em elevadas temperaturas e atmosferas redutoras.

O cobre desoxidado com fósforo com baixo teor de fósforo (DLP) é usado para a fabricação de tubos (para água quente e fria e para líquidos e gases pouco corrosivos), de chapas e em geral de peças soldadas, de um modo geral para a fabricação de equipamentos que conduzem fluidos, trocadores de calor, construção mecânica, equipamentos de uso na indústria química (destiladores, caldeiras e autoclaves), tanques e reservatórios. Suas aplicações elétricas restringem-se a lonas coletoras devido à sua condutividade relativamente baixa (85 a 98 % IACS).

O cobre desoxidado com fósforo, com alto teor de fósforo (DHP) pode ter aplicações semelhantes às do DLP (construção mecânica, indústria química, construção civil e arquitetura), mas no que se refere às aplicações elétricas é ainda mais limitado, restringindo-se aos anodos de eletrodeposição e eletroconformação a partir de banhos com solução ácida de sulfato [1].

b) Cobre ligados

É a denominação que se aplica às ligas de cobre com baixo teor de liga, ou seja, aquelas nas quais os teores de todos os elementos de liga somados não ultrapassam 1 %. A função desses elementos, como o cádmio e o cromo, é aumentar a resistência mecânica do cobre sem reduzir muito sua condutividade elétrica. Em alguns casos são necessários tratamentos térmicos para aumentar a resistência mecânica dos cobs ligados.

Podem ser divididos em três grupos: a) cobs ligados de alta condutividade térmica e elétrica, b) cobs ligados de alta resistência mecânica, c) cobs ligados de alta usinabilidade. No primeiro grupo (a) encontra-se o cobre-prata tenaz (Cu-Ag IP) e o cobre-prata isento de oxigênio (Cu-Ag OF). O **cobre-prata tenaz** contém de 0,02 a 0,12 % de prata, que pode ser adicionada intencionalmente ou estar naturalmente contida na matéria-prima, e possui uma estrutura homogênea, já que para esses teores a prata permanece totalmente solubilizada no cobre. Este cobre ligado possui resistência mecânica e à fluência (em temperaturas relativamente elevadas) mais altas do que a maioria dos cobs de alta condutividade (90 a 100 % IACS). A adição de prata não afeta a condutividade elétrica e assim, na construção elétrica, na qual além de boa condutividade, exige-se alta resistência ao amolecimento pelo aquecimento e também a manutenção em altas temperaturas da resistência mecânica obtida pelo encruamento, pois essas temperaturas elevadas podem ser atingidas tanto devido às condições de funcionamento da peça, como devido à aplicação de processos de soldagem. Devido a essas características esse cobre ligado pode ser usado na construção mecânica, especificamente na fabricação de aletas de radiadores de automóveis e outros trocadores de calor. Já o **cobre-prata isento de oxigênio** possui características muito semelhantes às do cobre-prata tenaz, com a diferença de que pode ser aquecido em ambientes com atmosferas

redutoras sem sofrer fragilização pelo hidrogênio. Esse tipo de cobre ligado é produzido por um processo de fusão específico que elimina a possibilidade da presença de óxidos e desoxidantes.

Entre os cobses ligados de alta resistência mecânica (b) encontram-se o cobre-arsênio desoxidado com fósforo (Cu-As DHP), o cobre-cromo e o cobre-zircônio (Cu-Zr). O **cobre-arsênio** contém arsênio em teores de 0,013 a 0,050 %, que tanto pode ser adicionado intencionalmente como estar presente como impureza proveniente da matéria-prima. A presença do arsênio favorece o aumento da resistência mecânica em temperaturas elevadas, como também aumenta a resistência à corrosão em determinados ambientes. É utilizado na construção química, para a fabricação de equipamentos e tubulações industriais que estão em contato com líquidos e gases relativamente pouco corrosivos e a temperaturas não muito elevadas. Na construção mecânica é usado em trocadores de calor, entretanto, sua baixa condutividade elétrica (35 a 45 % IACS) inviabiliza seu uso na construção elétrica. O **cobre-cádmio** (Cu-Cd) contém teores de cádmio de 0,6 a 1,0 %, o qual fica totalmente solubilizado no cobre. É usado nas aplicações nas quais se deseja que um condutor elétrico possua também boa resistência mecânica em geral, e particularmente ao desgaste e à fadiga. Embora sua resistência ao amolecimento durante aquecimento seja elevada, por outro lado sua condutividade elétrica é de cerca de 80 % IACS. Sendo assim, é usado na construção elétrica, na fabricação de cabos condutores aéreos sujeitos a esforços mecânicos, molas de contato, linhas de transmissão de alta resistência mecânica, conectores e componentes de chaves elétricas e outras aplicações como lamelas de coletores e eletrodos de soldagem elétrica. O cobre cádmio possui uma variante que é o **cobre-cádmio-estanho** (Cu-Cd-Sn), com cerca de 0,8 % de cádmio e 0,6 % de estanho e que possui características de fabricação muito semelhantes às do Cu-Cd, sendo usado na construção elétrica, na fabricação de molas e contatos elétricos, cabos condutores aéreos e eletrodos para soldagem elétrica. O **cobre cromo** (Cu-Cr), com teor de cromo por volta de 0,8 %, pode ter suas propriedades mecânicas melhoradas por tratamento térmico de solubilização e envelhecimento, endurecendo por precipitação. Apesar disso, sua condutividade elétrica é relativamente elevada, entre 80 e 85 % IACS, possuindo resistência ao amolecimento quando sujeito a temperaturas de até 400 °C. É usado na construção elétrica em eletrodos de soldagem por resistência elétrica, chaves comutadoras e conectores. Na construção mecânica é usado na fabricação de moldes e em geral em aplicações nas quais se exige resistência mecânica e condutividade elétrica. O tratamento térmico de solubilização e envelhecimento pode ainda ser combinado com deformação plástica (encruamento): são os chamados tratamentos termomecânicos, que permitem a obtenção de dureza e resistência mecânica ainda mais elevadas do que as obtidas com o tratamento térmico tradicional sem deformação. No cobre-cromo semimanufaturado aquecido por 15 minutos a 1000 °C e resfriado em água, assim solubilizado pode se aplicar a deformação plástica a frio (encruamento). Posteriormente realiza-se o envelhecimento mediante aquecimento entre 400 e 500 °C, por tempos que dependem da temperatura (para 470 °C, por exemplo, o tempo ideal é de cerca de 4 horas) de tal modo que o cromo se precipita em pequenas partículas finamente dispersas pela matriz de cobre. O **cobre-zircônio** (Cu-Zr) contém de 0,1 a 0,25 % de zircônio, sendo isento de oxigênio e, portanto, não suscetível à fragilização pelo hidrogênio. Este cobre ligado possui propriedades semelhantes às do Cu-Cr, porém níveis de resistência mecânica mais elevados, particularmente no que diz respeito à resistência ao amolecimento e à fluência. O limite de solubilidade do zircônio no cobre chega a 0,24 %, sendo possível a aplicação do tratamento térmico de solubilização e envelhecimento, que proporciona o chamado endurecimento por precipitação. A solubilização é realizada em temperaturas da ordem de 900 a 980 °C e, após resfriamento rápido, o envelhecimento é realizado em temperaturas de 400 a 450 °C em tempos de 1 a 2 horas, sendo que entre a solubilização e o envelhecimento pode ser realizada a deformação a frio em níveis de até 90% de redução em área ou em espessura. O tratamento térmico aumenta a condutividade elétrica do Cu-As, que neste caso pode atingir 90 % IACS. Na construção elétrica este tipo de cobre ligado é usado na fabricação de lamelas de comutadores sujeitas a solicitações severas, enrolamentos de motores elétricos severamente solicitados, bases de diodos, chaves comutadoras e eletrodos para soldagem elétrica.

Entre os cobses ligados de alta usinabilidade (c), podem ser relacionados o cobre-telúrio (Cu-Te), o cobre-enxofre (Cu-S) e o cobre-chumbo (Cu-Pb). O **cobre-telúrio**, assim como o cobre-enxofre e o cobre-selênio (Cu-Se), combina alta condutividade elétrica com boa usinabilidade.

O telúrio, assim como o enxofre e o selênio, forma com o cobre compostos estáveis, que ficam distribuídos na matriz de cobre como partículas finamente dispersas. A presença destas partículas não provoca aumento acentuado de dureza e nem a diminuição sensível da condutividade elétrica, porém facilita muito a usinagem do cobre, na medida em que as partículas dispersas de telureto de cobre (Cu₂Te) na matriz de cobre favorecem a quebra do cavaco durante o corte do metal, reduzindo o atrito entre o cavaco e a ferramenta. O telúrio é adicionado em teores de 0,30 a 0,80 % ao cobre tenaz ou desoxidado com fósforo. O cobre-telúrio tenaz apresenta condutividade elétrica de 96 a 98 % IACS, enquanto no cobre-telúrio desoxidado com fósforo a condutividade elétrica atinge entre 92 e 94 % IACS. Por causa de uma limitada dissolução do telúrio no cobre ocorre um aumento de resistência ao amolecimento em temperaturas da ordem de 250 °C no máximo. Na construção elétrica o Cu-Te é usado na fabricação de terminais de transformadores e de interruptores, contatos, conexões e em geral peças de circuitos que precisam simultaneamente de elevada condutividade elétrica e alta usinabilidade. O cobre é um metal de difícil usinagem, mas a adição de telúrio permite a fabricação de peças usinadas em tornos automáticos. Na construção mecânica em geral o Cu-Te pode ser usado na fabricação de parafusos, porcas e pinos, entre outros tipos de peças fabricadas em máquinas automáticas. O **cobre-selênio** (Cu-Se) possui características muito semelhantes às do cobre telúrio. O **cobre-enxofre** (Cu-S) contém de 0,20 a 0,50 % d enxofre e suas aplicações são semelhantes às do cobre-telúrio. A condutividade elétrica do Cu-S é da ordem de 93 a 95 % IACS e o índice de usinabilidade é de 85. O **cobre-chumbo** (Cu-Pb) apresenta teores de chumbo entre 0,8 e 1,2 % com o objetivo de aumentar a usinabilidade do cobre, pois além de favorecer a fácil quebra dos cavacos, as partículas de chumbo distribuídas no cobre possuem a capacidade de atuar como lubrificantes entre o cavaco e a ferramenta, reduzindo o desgaste da ferramenta por atrito. Este cobre ligado possui alta conformabilidade a frio, porém baixa conformabilidade a quente. Este material é usado na fabricação de componentes da construção elétrica que necessitam de elevada condutividade elétrica conjugada com alta usinabilidade como conectores, componentes de chaves e motores, parafusos e outros componentes usinados de alta condutividade elétrica [1].

Latão: binário, com chumbo e com estanho

As ligas de cobre mais utilizadas na indústria e em aplicações comerciais são os chamados latões, denominação tradicionalmente aplicada às ligas do sistema cobre-zinco. Neste tipo de liga os teores de zinco variam entre 5 (latão C 210) e 40 % (latão C 280), sendo que uma simples regra permite identificar o teor de zinco da liga: dividindo-se por 2 a dezena do número da liga, chega-se ao teor de zinco da mesma: no caso da liga 260 (o chamado latão para cartuchos de munição), por exemplo, $60 : 2 = 30$, o que significa dizer que o latão 260 contém 30 % de zinco. Além dos latões binários (cobre-zinco) cuja numeração (centena) começa por 2, existem também os latões ternários cobre-chumbo-zinco, cuja numeração começa por 3 (como o caso do latão com chumbo 360) e os latões ternários cobre-zinco-estanho, cuja numeração começa por 4 (como o 436, por exemplo). Entretanto, inicialmente neste item aborda-se somente os latões binários (Cu-Zn), relatando-se então, posteriormente, os demais tipos de latão (Cu-Zn-Pb e Cu-Zn-Sn).

a) Latões binários (Cu-Zn)

Os latões binários são ligas cobre-zinco nas quais os demais elementos somente estão presentes em teores muito baixos, sendo considerados como impurezas. São ligas que apresentam razoável resistência á corrosão (em ambientes não muito agressivos) e boa conformabilidade, porém simultaneamente possuem resistência mecânica e dureza bem mais elevadas do que a dos cobsres comercialmente puros e cobsres ligados. Como o zinco possui reticulado cristalino hexagonal compacto, ao contrário do cobre, que possui reticulado cristalino cúbico de face centrada, a solubilidade do zinco no cobre é limitada, porém como a diferença entre os diâmetros dos átomos de cobre e de zinco é relativamente pequena, de cerca de 4 %, existe uma certa solubilidade, chegando a 35 % na temperatura de 20 °C e atingindo 38 %, seu valor máximo, a uma temperatura de 456 °C. Enquanto grandes diferenças entre os diâmetros dos átomos dos elementos solvente e soluto favorecem o endurecimento, por outro lado

reduzem a solubilidade. Assim sendo, o endurecimento por solução sólida é favorecido quando essa diferença é pequena, ao passo que grandes diferenças favorecem outros mecanismos de endurecimento, como o que ocorre por precipitação, ou pela restrição à recristalização e ao crescimento de grão devido à formação de partículas de intermetálicos. E exceto o ouro, que é muito caro, o zinco é o metal que apresenta a melhor combinação entre solubilidade e diferença de diâmetros atômicos no que se refere ao cobre. O efeito de endurecimento por solução sólida do zinco não é tão significativo como o de outros elementos solutos no cobre, mas sua elevada solubilidade permite que o endurecimento seja considerável em teores da ordem de 30 % [2].

Um dos principais usos do cobre está na fabricação de peças com formato complexo por deformação mecânica, como no assim chamado processo de embutimento. O latão alia a vantagem de ser facilmente deformado com uma resistência mecânica mais alta do que a do cobre comercialmente puro. Aliás, o latão com teores de zinco entre 20 e 30 % apresentam maior ductilidade (alongamento) do que o cobre comercialmente puro e do que os latões com teores de zinco mais baixos. Embora os latões sejam mais duros que o cobre comercialmente puro, são ligas que endurecem por deformação a uma taxa muito mais baixa do que o cobre comercialmente puro, e assim o chamado "empescoçamento" (redução de seção reta causada pela deformação) somente ocorre para uma deformação bem maior. Deste modo, ao se deformar uma dessas ligas numa matriz, a mesma pode se deformar consideravelmente antes que ocorra o empescoçamento, o qual leva a uma mudança dimensional indesejada e finalmente à fratura. As ligas que mais mantêm essa característica para maiores graus de deformação a frio são os latões que contêm de 20 a 30 % de zinco, bem mais do que os latões com menores teores de zinco, embora de um modo geral ocorra perda de ductilidade em todos os latões com o aumento da deformação a frio. Outro aspecto importante dos latões é a grande influência do tamanho de grão inicial sobre as características de deformação durante os processos de fabricação. Quando o grão é grosseiro o suficiente para igualar, ou mesmo exceder, a espessura da chapa (ou do corpo-de-prova de ensaio de tração) então praticamente quase não há contornos de grão para inibir o deslizamento e contribuir para o encruamento, e à medida que o grão cresce o latão apresenta menor alongamento até a fratura. Sendo assim, o controle do tamanho de grão antes da deformação a frio é muito importante, e os recozimentos anteriores devem ser rigorosamente controlados, quanto ao tempo e à temperatura, para produzir grãos finos [2].

Nos latões com teores de zinco mais elevados, acima de 35 % e chegando até 40 %, ocorre a presença de fase beta, ou seja, ao contrário dos latões com menos de 35 % de zinco, que são monofásicos (contêm somente a fase alfa), os latões com teores de zinco mais elevados são bifásicos (contêm fases alfa e beta). Estes latões bifásicos apresentam transformações de fase mais complexas, que dão origem a uma maior variedade de microestruturas e, conseqüentemente, de propriedades. Esse tipo de liga é utilizado industrialmente basicamente devido à sua excelente trabalhabilidade a quente e excelente usinabilidade. Dentre estas ligas sobressai-se o latão com 40 % de zinco, também conhecido comercialmente como metal de Muntz. A fase beta é conhecida como um composto intermetálico com estequiometria aproximada de CuZn, ou seja, proporção entre os números de átomos de cobre e zinco em torno de 50% cada, ao contrário da fase alfa, que possui estrutura cúbica de face centrada na qual parte dos átomos de cobre é substituída por átomos de zinco. Entretanto, a faixa de variação da composição da fase beta depende da temperatura. A fase beta é cúbica de corpo centrado e acima de 470 °C torna-se desordenada, com átomos de zinco e cobre ocupando posições aleatórias, devido à vibração dos átomos associada à energia térmica. Em baixa temperatura essa vibração não existe e o conseqüente ordenamento leva à formação da chamada fase beta linha. Essa fase ordenada reduz a ductilidade do latão bifásico a temperaturas relativamente baixas (abaixo de 470 °C), sendo responsável por esse característica de menor ductilidade a frio do que a quente (temperaturas na qual só se forma a fase beta desordenada). Por este motivo os latões bifásicos são indicados para extrusão (a quente), porém não são recomendados para laminação a frio. A fase beta linha pode ter sua dureza aumentada mediante tratamento térmico de envelhecimento em temperaturas da ordem de 200 a 500 °C. A coexistência das fases alfa e beta garante uma ductilidade reduzida à temperatura ambiente, mas nem mesmo esta seria possível se a microestrutura fosse constituída totalmente por faz beta. E o trabalho a quente da liga bifásica (alfa e beta) é fácil nas temperaturas altas o suficiente para que a fase beta desordenada substitua a fase beta

linha ordenada. Uma das poucas vantagens da liga bifásica com 40 % de zinco sobre a liga monofásica com 30 % é a sua melhor usinabilidade, devido à presença da fase beta linha frágil [2].

A numeração dos latões binários na classificação CDA-ASTM começa pelo algarismo 2, como por exemplo o latão C 260, que contém cerca de 70 % de cobre e 30 % de zinco.

b) Latões com chumbo (Cu-Zn-Pb)

Os latões com chumbo são ligas cobre-zinco-chumbo nas quais o chumbo é adicionado com o propósito principal de aumentar a usinabilidade. O chumbo não se combina com o cobre, nem com o zinco, nem com qualquer elemento de liga secundário e está presente nessas ligas sobre a forma de partículas (glóbulos) que se distribuem aleatoriamente na microestrutura do latão. Essas partículas de chumbo lubrificam a ferramenta de corte durante a usinagem e ao promoverem uma fragilização localizada, favorecem a retirada do cavaco.

Nos latões com chumbo em geral o teor de zinco é superior a 35 %, fazendo com que, do ponto de vista microestrutural, estas ligas sejam bifásicas (alfa e beta) nas quais, adicionalmente, as partículas de chumbo se distribuem. Entretanto, estas mesmas partículas de chumbo causam problemas quanto à deformação plástica [4]. Por este motivo, os latões com chumbo são mais empregados para a fabricação de parafusos e peças usinadas a partir de barras e perfis extrudados, e não são usados para processos de deformação plástica considerável a frio. O teor de chumbo varia entre 0,3 e 3,5 % para os chamados latões de corte fácil. Os latões com chumbo na classificação CDA-ASTM são designados por números iniciados pelo algarismo 3, como a liga C 360 (61 % de cobre, 36 % de zinco e 3 % de chumbo) por exemplo.

Uma alternativa ao uso do chumbo para melhorar a usinabilidade dos latões é o uso do selênio e do telúrio, que não prejudicam tanto as propriedades de deformação plástica do latão, mas por outro lado são elementos mais caros e de menor disponibilidade. Além dos latões bifásicos, algumas outras ligas de cobre como o latão monofásico, a alpaca (Cu-Zn-Ni) e o cobre em si podem conter consideráveis teores de chumbo, mas seu uso não é tão difundido quanto o do latão bifásico com chumbo [4].

c) Latão com estanho (Cu-Zn-Sn)

Os latões com estanho são latões nos quais uma pequena parte do zinco é substituída pelo estanho, ou seja, são ligas cobre-zinco-estanho. O objetivo da utilização do estanho neste tipo de latão é melhorar a resistência à corrosão em ambientes particularmente agressivos, como água do mar e ambientes contendo cloretos e m geral [1]. Entre os latões com estanho encontram-se exatamente o latão do almirantado (70 % de cobre, 29 % de zinco e 1 % de estanho) e o latão naval (60 % de cobre, 39 % de zinco e 1 %) ambos para aplicações na construção naval [4]. A numeração dos latões com estanho na classificação CDA-ASTM inicia pelo algarismo 4, como por exemplo a liga C 464 (61 % de cobre, 38 % de zinco e 1 % de estanho).

d) Aplicações dos latões

Os latões são aplicados na indústria para os mais diversos fins, dependendo de sua composição química. A seguir faz-se uma breve descrição das principais aplicações de alguns tipos de latões mais utilizados.

Latão C 210 (95 % de cobre e 5 % de zinco) – Esta liga, que não é suscetível à dezincificação, tipo de corrosão mais freqüente nos latões com maiores teores de zinco, na qual o zinco é atacado preferencialmente e eliminado da liga, é muito utilizada na fabricação de moedas, medalhas, emblemas, jóias e placas, sendo também usada como base para aplicação de ouro e de esmaltes vítreos.

Latão C 220 (90 % de cobre e 10 % de zinco) – Possui características bem semelhantes à do C 210, sendo usada em arquitetura (ferragens, condutos e peças ornamentais) e na fabricação de objetos decorativos. Além disso, é usada em algumas aplicações específicas na fabricação de munição, porém em escala muito inferior ao freqüente uso do latão C 260 (30 % de zinco) para a fabricação desse tipo de produto.

Latão C 230 (85 % de cobre e 15 % de zinco) – Juntamente com os latões C 210, C 220 e C240, constitui o chamado grupo dos latões vermelhos (também conhecido como “tombacks”), ligas monofásicas (fase alfa) que possuem características muito semelhantes entre si, marcadamente sua elevada resistência à corrosão e à dezincificação em particular, tendo porém como desvantagem seu maior custo, associado ao maior consumo de cobre, metal bem mais caro do que o zinco, na sua fabricação. Provavelmente sua mais freqüente aplicação é a fabricação de zíper para vestimentas, muito embora também seja utilizado na fabricação de bijuteria e de alguns componentes eletro-eletrônicos.

Latão C 240 (80 % de cobre e 20 % de zinco) – Como os demais latões vermelhos não, apresenta dezincificação e possui elevada resistência à corrosão sob tensão. Sua principal aplicação consiste na fabricação de objetos decorativos (estojos e componentes de relógios) obtidos pelos processos de conformação mecânica e brasagem.

Latão C 260 (70 % de cobre e 30 % de zinco) – Ainda é uma liga monofásica, mas já possui características bem diferentes dos latões vermelhos, começando por sua coloração amarelada. Pode apresentar problemas de dezincificação, dependendo do ambiente na qual está sendo utilizada, mas em compensação apresenta a mais favorável combinação de resistência mecânica e ductilidade (elevadas) entre todos os latões, razão pela qual é muito indicada para processos de conformação em geral, particularmente a estampagem e o embutimento profundo. Sua principal aplicação está na fabricação de cartuchos para munição (esta liga é popularmente conhecida como “latão para cartucho”), mas também pode ser utilizada para as mais diversas aplicações, como tubos de trocadores de calor para água não poluída, evaporadores e aquecedores de produtos alimentícios, cápsulas e roscas de lâmpadas, instrumentos musicais de sopro, radiadores de automóveis, metais sanitários, extintores de incêndio, rebites, pinos e parafusos.

Latão C 268 (66 a 67 % de cobre, 33 a 34 % de zinco) – Esta liga possui propriedades mecânicas ligeiramente inferior às do latão C 260, porém seu custo de fabricação é menor, sendo utilizada como alternativa ao uso daquela liga, em aplicações nas quais os requisitos de propriedades mecânicas não são tão importantes e o custo de fabricação é um fator determinante.

Latão C 272 (63 a 64 % de cobre, 36 a 37 % de zinco) – Esta liga já pode apresentar uma pequena quantidade de fase beta. Não pode ser usada em ambientes corrosivos. Pode ser trabalhada a frio e a quente, porém sua ductilidade é um tanto inferior à das ligas C 260 e C 268, embora suporte condições de conformação mecânica relativamente severas. É utilizada para fabricação de peças por estampagem não profunda como componentes de lâmpadas e chaves elétricas, recipientes para instrumentos, componentes de radiadores, rebites, pinos e parafusos.

Latão C 280 (60 % de cobre e 40 % de zinco) – Esta é uma típica liga bifásica (alfa e beta) com excelente trabalhabilidade a quente, relacionada com a presença da fase beta, que por outro lado dificulta a conformação a frio. Suas aplicações também estão limitadas a ambientes não muito corrosivos. Possui melhores propriedades de conformação a frio e de soldagem do que as do latão C 370 (61 % de cobre, 38 % de zinco e 1 % de chumbo), porém usinabilidade inferior. É usado na fabricação de placas, barras e perfis, na arquitetura em seções estruturadas e painéis espessos, na indústria química em placas de tubos de condensadores e trocadores de calor e componentes mecânicos fabricados por forjamento.

Latão C 340 (65 % de cobre, 34 % de zinco e 1 % de chumbo) – Possui partículas de chumbo dispersas em uma matriz de fase alfa, podendo no entanto conter uma pequena quantidade de fase beta. Apresenta elevada usinabilidade e pode ser conformada para a fabricação de parafusos, rebites, porcas, componentes de instrumentos e de relógios.

Latão C 353 (62 % de cobre, 36 % de zinco e 2 % de chumbo) – Apresenta uma estrutura bifásica (fases alfa e beta) e com partículas dispersas de chumbo. Possui aplicações semelhantes à do latão C 340, porém apresenta menor trabalhabilidade. É utilizada para a fabricação de terminais de baterias elétricas e de velas de ignição de motores, e de peças gravadas mecanicamente.

Latão C 360 (61 % de cobre, 36 % de zinco e 3 % de chumbo) – Apresenta microestrutura muito semelhante à do latão C 353. É conhecido como latão de usinagem fácil (“free cutting brass”). É muito utilizada sob a forma de barras extrudadas que são posteriormente usinadas para a fabricação de diversos produtos, entre os quais porcas, parafusos, pinos, buchas, mancais, afastadores e peças tubulares com extremidades abertas ou fechadas.

Latão C 370 (61 % de cobre, 38 % de zinco e 1 % de chumbo) – Apresenta o mesmo tipo de microestrutura presente nas ligas anteriormente citadas, porém além da elevada usinabilidade, possui boa trabalhabilidade a quente. É fornecida geralmente sob a forma de tubos usados para a fabricação de peças tubulares em máquinas operatrizes de usinagem.

Latão C 442 (71 % de cobre, 28 % de zinco e 1 % de estanho) – Esta liga monofásica (fase alfa) contém, além de estanho uma pequena adição de arsênio para aumentar a resistência à dezincificação. O estanho é adicionado com o objetivo de proporcionar boa resistência à corrosão em água de rios e mares não poluída, paradas ou em movimento de baixa velocidade (até cerca de 2m/s). É muito usada na fabricação de tubos e placas para equipamentos de trocadores de calor, principalmente de refinarias de petróleo e de centrais de produção de energia.

Latão C 464 (61 % de cobre, 38 % de zinco e 1 % de estanho) – Esta liga, entre as últimas da série dos latões, possui uma microestrutura bifásica (alfa e beta), mas contém estanho e até mesmo chumbo em pequenos teores para aumentar a usinabilidade. É usada na forma de placas, chapas e barras utilizadas na fabricação de placas de condensadores, parafusos, porcas, peças forjadas e usinadas para uso em locais submersos em água ou equipamentos usados na construção naval. Esta liga pode conter inibidores contra corrosão, como o arsênio, o antimônio e o fósforo, porém limitados em teores de 0,02 a 0,10 % [1].

E) Propriedades mecânicas dos latões

A tabela 2.1 apresenta algumas propriedades mecânicas de alguns latões [1].

Liga (ASTM)	Composição Química	Limite de resistência à tração (MPa)	Limite de escoamento (MPa)	Alongamento (%)	Dureza Brinell (HB)	Limite de resistência à fadiga (MPa)
C210	95Cu 5Zn	270-550	100-380	45-3	65-120	-
C220	90Cu 10 Zn	270-570	90-420	50-4	55-125	70-160
C230	85Cu 15Zn	310-600	100-420	50-4	60-135	105-170
C240	80Cu 20Zn	310-640	120-480	52-3	65-155	100-185
C260	70Cu30Zn	330-850	120-540	62-3	65-160	75-200
C268, C270	66Cu 34 Zn 65Cu35Zn	340-860	130-550	60-3	65-165	85-155
C272	64Cu 36Zn	340-860	130-550	56-5	65-165	95-210
C280	60Cu 40Zn	380-600	160-450	40-4	85-145	110-130
C340	65Cu34Zn1Pb	330-550	120-460	45-8	65-135	-
C353	62Cu36Zn2Pb	340-700	150-460	45-2	70-125	100-195
C360	61Cu36Zn3Pb	360-520	150-450	40-12	75-135	140
C370	61Cu38Zn1Pb	380-580	180-520	40-8	80-150	-
C442	71Cu28Zn1Sn	340-400	130-180	65-50	65-85	160-185
C464	61Cu38Zn1Sn	395	160-390	40-20	90-145	150-230

Bronze: com estanho e fosforoso

a) Microestrutura dos bronzes

Os bronzes, ligas cobre-estanho, são as ligas metálicas utilizadas há mais tempo pela humanidade, pois a chamada Idade do Bronze antecede a Idade do Ferro. Entretanto, ao longo do tempo foram substituídas em muitas de suas antigas aplicações por outras ligas metálicas de menor custo, e atualmente, mesmo entre as ligas e cobre, são menos utilizadas do que os latões, por exemplo. Mesmo assim, para determinados tipos de aplicações continuam sendo os materiais mais adequados, o que garante sua permanência no grupo dos materiais de engenharia mais utilizados na indústria.

Os átomos de estanho são relativamente grandes em comparação com os átomos de cobre, mas apesar disso possuem solubilidade relativamente elevada no cobre, e esses fatores conjugados proporcionam considerável resistência mecânica e dureza às ligas cobre-estanho, muito superior às dos latões com baixo teor de zinco. E mesmo o latão com 30 % de zinco (C 260) possui resistência mecânica e dureza inferiores às do bronze com 8 % de estanho (C 521). Por outro lado, ao contrário da resistência mecânica, a ductilidade (alongamento em tração) diminui com o aumento do teor de estanho, e embora o bronze com 8 % de estanho seja bastante dútil, não apresenta trabalhabilidade comparável à do latão com 30 % de zinco.

A solubilidade do estanho no cobre cai acentuadamente com o decréscimo da temperatura, mas abaixo de cerca de 300 °C a taxa de precipitação da fase épsilon é lenta, de modo que ligas que contêm até 10 % de estanho serão monofásicas (fase alfa) após homogeneização adequada e resfriamento até 25 °C. Termodinamicamente estas ligas poderiam ser endurecíveis por precipitação, já que a fase delta possui elevada dureza, porém a cinética de precipitação é muito lenta, o que faz com que o tempo necessário para atingir um valor de dureza seja excessivamente longo, inviabilizando a aplicação industrial deste tratamento térmico para estas ligas. Por exemplo, o envelhecimento do bronze com 10 % de estanho a 315 °C por 5 h não produz aumento significativo de dureza e resistência à tração.

O amplo intervalo entre as temperaturas liquidus e solidus fazem essas ligas susceptíveis à segregação durante a solidificação, mesmo as ligas com teores de estanho tão baixos como 8 %, que contêm fase delta como consequência da capacidade da região imediatamente externa às dendritas de fase alfa (matriz) conterem até cerca de 13,5 %. A fase alfa reage com a fase líquida para formar uma certa quantidade de fase beta através de uma reação peritética. A fase beta assim formada decompõe-se por uma reação eutetóide em fase alfa e fase gama. Por sua vez a fase gama decompõe-se em fase alfa e fase delta. Esta seqüência pode ser bastante complexa e depende da taxa de resfriamento.

Os bronzes com 10 % ou mais de estanho são usados em aplicações para mancais, que exigem elevada resistência mecânica para poder suportar pesadas cargas e o desgaste mecânico, o que só é possível devido ao significativo efeito de endurecimento por solução sólida (resistência mecânica) e à presença da fase delta, muito dura (resistência ao desgaste). Frequentemente estas ligas são usadas na condição fundida, sem tratamento térmico subsequente, para a fabricação de mancais, de modo que as propriedades iniciais dependem do desenvolvimento da fase delta durante o processo de solidificação. Se a liga for utilizada na condição fundida, as propriedades obtidas resultam unicamente das condições do processo de fundição. O fator principal é o tamanho do grão de fase alfa primária e a distribuição da fase delta na microestrutura da liga. Este tamanho de grão da fase alfa primária pode ser reduzido através do aumento da taxa de nucleação na fase líquida, tanto por inoculação como pelo controle adequado da taxa de resfriamento. Quanto mais rápido o resfriamento, mais finas serão as dendritas de fase delta [2].

b) Propriedades dos bronzes

Os bronzes mais utilizados na indústria possuem teores de estanho variando entre 2 e 10 % para as ligas trabalhadas e entre 5 e 11 % para as ligas fundidas. À medida que o teor de estanho aumenta, também aumenta a resistência mecânica da liga até 15 % de estanho, porém a ductilidade diminui sensivelmente, principalmente a partir de 5 % de estanho. Entretanto, as propriedades mecânicas podem ser melhoradas com a adição de até 0,4 % de fósforo, o qual também atua como desoxidante, originando o chamado bronze fosforoso.

A microestrutura do bronze que contém até entre 8 e 16 % de estanho (dependendo das condições de resfriamento), é monofásica (fase alfa) e assim constituída por uma solução sólida de estanho em cobre. Acima desses teores inicia-se a precipitação de uma fase intermetálica, denominada delta, a qual é rica em estanho e possui dureza elevada. A associação desta fase delta com uma matriz alfa dútil resulta em um material com excelentes propriedades antifricção, o qual é muito usado para a fabricação de mancais.

Outra propriedade importante dos bronzes é a sua elevada resistência à corrosão, o que faz com que muitas de suas aplicações baseiem-se nesta propriedade. Em teores limitados o chumbo pode ser adicionado para melhorar as propriedades antifricção, a usinabilidade e a estanqueidade no caso de peças fundidas, enquanto a adição do zinco é importante para desoxidação (também no caso de peças fundidas) e para melhorar a resistência mecânica.

No próximo segmento será feita uma análise individual das propriedades e aplicações dos bronzes mais utilizados industrialmente [1].

c) Aplicações dos bronzes

Bronzes trabalhados (dúteis)

Bronze C 505 (98 % de cobre e 2 % de estanho) – É uma liga monofásica (alfa) que contém pequenos teores de fósforo, sendo a primeira liga da série dos bronzes na classificação CDA-ASTM. Esta liga possui uma condutividade elétrica relativamente alta (cerca de 40 % IACS), principalmente quando os teores de estanho e fósforo estão próximos aos limites inferiores da especificação. Possui resistência mecânica ligeiramente superior à do cobre, porém mantém uma boa trabalhabilidade a frio. Apresenta boa resistência à corrosão em geral e particularmente à corrosão sob tensão. Esta liga é muito utilizada em aplicações elétricas, como contatos de aparelhos de telecomunicações, molas condutoras, e na construção mecânica em tubos flexíveis, parafusos encabeçados por recalque a frio, rebites e varetas de soldagem.

Bronze C 511 (96 % de cobre e 4 % de estanho) – Mantém a estrutura monofásica alfa e também contém pequenos teores de fósforo, apresentando uma boa combinação de trabalhabilidade a frio e resistência mecânica e dureza. Apresenta boa resistência à corrosão, inclusive corrosão sob tensão. É utilizado em aplicações arquitetônicas como ganchos de chapas de revestimento, em aplicações elétricas como molas, componentes de interruptores, chaves, contatos e tomadas, e na construção mecânica como molas, diafragmas, parafusos encabeçados por recalque a frio, rebites, porcas e escovas metálicas.

Bronze C 510 (95 % de cobre e 5 % de estanho) – Possui microestrutura e propriedades bem semelhantes às das duas ligas anteriores, apresentando, porém, uma resistência mecânica ligeiramente superior à do bronze C 511. É produzido sob a forma de barras, chapas e fios, sendo usada na fabricação de ganchos de chapas de revestimento, tubos para condução de águas ácidas, componentes para a indústria têxtil, química e de papel, molas condutoras e componentes de interruptores e tomadas, molas e diafragmas, parafusos, rebites, porcas, escovas, tubos de manômetros, varetas e eletrodos de soldagem.

Bronze C 519 (94 % de estanho e 6 % de bronze) – Esta liga ainda possui microestrutura monofásica e pequenos teores de fósforo, mas possui maior resistência à fadiga e ao desgaste

do que os bronzes mencionados anteriormente. Possui propriedades mecânicas, trabalhabilidade e resistência à corrosão muito elevadas. É produzida sob a forma de chapas, barras, fios e tubos. Na indústria química é utilizada e usada na fabricação de tubos de condução de águas ácidas, componentes para as indústrias química, têxtil e de papel, na construção elétrica para molas condutoras e componentes de interruptores, e na construção mecânica em molas e membranas, escovas, tubos de manômetros, engrenagens, componentes de bombas e eletrodos de soldagem.

Bronze C 521 (92 % de cobre e 8 % de estanho) – É uma liga monofásica (fase alfa), que contém, dependendo das condições de fabricação, pequenas quantidades de fase delta. Como possui elevados teores de estanho e de fósforo, apresenta elevada resistência à fadiga e ao desgaste e propriedades antifricção, além de boa resistência à corrosão. Este bronze é produzido sob a forma de chapas, barras, fios e tubos. Na indústria química é destinado ao mesmo tipo de aplicação que o bronze C519, do mesmo modo que nas aplicações elétricas e na construção mecânica, mas no caso de molas, é uma liga mais adequada para condições de solicitações mais severas, além de ser muito apropriada para a fabricação de discos de fricção.

Bronze C 524 (90 % de cobre e 10 % de estanho) – É uma liga bifásica (contém as fases alfa e delta), que possui elevada resistência à fadiga e ao desgaste, o que recomenda seu uso como material antifricção. Entre os bronzes trabalhados é o que apresenta maior resistência mecânica e dureza, sendo produzido sob a forma de chapas e fios. Suas principais aplicações estão na construção de instalações da indústria de papel e na fabricação de molas para serviços pesados.

Bronzes fundidos

Cu 89 – Sn 11 – Usado para a fabricação de engrenagens diversas.

Cu 88 – Sn 10 – Zn 2 – Utilizado em conexões de tubos grandes, engrenagens, parafusos, válvulas e flanges.

Cu 88 – Sn 6 – Zn 4,5 – Pb 1,5 – Usado em válvulas para temperaturas de até 290 °C, bombas de óleo e engrenagens.

Cu 87 – Sn 11 – Pb 1 – Ni 1 – Usado em buchas e engrenagens diversas.

Cu 85 – Sn 5 – Pb 9 – Zn 1 – É uma liga usada em mancais e buchas pequenas.

Cu 80 – Sn 10 – Pb 10 – Bronze usado na fabricação de mancais para altas velocidades e grandes pressões e mancais para laminadores.

Cu 78 – Sn 7 – Pb 15 – Bronze aplicado na fabricação de mancais para pressões médias e mancais para automóveis.

Cu 70 – Sn 5 – Pb 25 – Usado em mancais para altas velocidades e pequenas pressões.

Cu 85 – Sn 5 Pb 5 – Zn 5 – É uma liga especial que apresenta alta fundibilidade, sendo utilizada na fabricação de peças de resistência média, mas com boa estanqueidade e usinabilidade. É usada em geral na fabricação de válvulas para pequenas pressões e engrenagens de pequeno tamanho, entre outras aplicações [1].

d) Propriedades dos bronzes

A seguir é apresentado um resumo de faixas de valores típicos das principais propriedades de alguns bronzes mais utilizados na indústria [1].

Tabela 3.1 – Propriedades mecânicas dos bronzes trabalhados

Liga (ASTM)	Composição	Limite de resistência à tração (MPa)	Limite de escoamento (MPa)	Alongamento (%)	Dureza Brinell (HB)	Limite de resistência à fadiga (MPa)
505	Cu98 Sn2	280-650	110-500	45-2	60-150	115-225
511	Cu96 Sn4	330-900	130-580	50-2	70-195	210-540
510	Cu95 Sn5	350-950	130-620	55-2	75-205	85-265
519	Cu94 Sn6	370-1000	150-760	60-2	80-225	195-210
521	Cu92 Sn8	420-1050	170-820	65-2	85-240	120-230
524	Cu90 Sn10	440-1000	190-850	65-3	95-245	120-225

Tabela 3.2 – Propriedades mecânicas dos bronzes fundidos

Liga (Composição)	Limite de resistência à tração(MPa)	Alongamento (%)	Dureza Brinell (HB)
Cu 89 Sn 11	200	8	80
Cu 88 Sn 10 Zn 2	220	16	76
Cu 88 Sn 6 Zn 4,5 Pb 1,5	240	17	68
Cu 87 Sn 8 Zn 4 Pb 1	210	14	70
Cu 87 Sn 11 Pb 1 Ni 1	200	8	78
Cu 85 Sn 5 Pb 9 Zn 1	170	25	63
Cu 80 Sn 10 Pb 10	180	28	69
Cu 78 Sn 7 Pb 15	170	24	57
Cu 70 Sn 5 Pb 25	100	15	50
Cu 85 Sn 5 Pb 9 Zn 1	200	16	62

Cobre-alumínio, cobre-silício e cobre-berílio

a) Ligas cobre-alumínio

Essas ligas também são conhecidas como bronzes de alumínio, entretanto neste texto evitamos a denominação “bronze” para evitar confusões com as ligas cobre-estanho, que são conhecidas como bronzes desde a chamada Antiguidade.

O diagrama de fases Cu-Al de um modo geral apresenta muitas semelhanças com o diagrama Cu-Zn. A solubilidade do alumínio no cobre é relativamente alta e para teores mais elevados de alumínio se formam diversos tipos de compostos intermetálicos, alguns dos quais possuem a mesma estrutura cristalina e estequiometria de alguns compostos intermetálicos do sistema Cu-Zn. Como a diferença entre os tamanhos dos átomos é grande e a solubilidade máxima do alumínio no cobre é relativamente alta, espera-se boa resistência mecânica para as ligas Cu-Al mesmo como soluções sólidas. De fato o alumínio é um eficiente agente de endurecimento e existem duas ligas comerciais, com teores de 5 e 8 % de alumínio, que são soluções sólidas, então seu tratamento térmico resume-se à homogeneização convencional da liga fundida e o recozimento da liga trabalhada.

No sistema Cu-Al as fases estáveis a 500 °C são praticamente as mesmas presentes em temperaturas mais baixas, a não ser que tempos de recozimentos extremamente longos sejam empregados. As ligas com teor de alumínio acima de 8 % em temperatura relativamente alta

apresentam a formação de fase beta, que durante o resfriamento lento sofre uma transformação eutetóide para formar uma mistura de fases alfa e gama 2. Por esse motivo a seguir será dada uma certa ênfase a essa transformação eutetóide.

A fase beta das ligas Cu-Al é cúbica de corpo centrado (CCC) como a fase beta do sistema Cu-Zn, enquanto a fase gama 2 é semelhante à fase gama. A composição química do ponto eutetóide corresponde a um teor de alumínio de 11,8 %, e durante o resfriamento lento (50 °C/h, por exemplo) da liga com essa composição, após homogeneização adequada (por exemplo 1h a 800 °C), as fases alfa e gama 2 formam-se em camadas alternadas, de forma semelhante à perlita das ligas ferrosas, sendo que o mesmo termo (estrutura perlítica) pode ser aplicado a essa microestrutura eutetóide das ligas Cu-Al.

O resfriamento rápido a partir do campo monofásico beta deveria suprimir a reação eutetóide e resultar em fase beta retida à temperatura ambiente. Essa fase se decomporia muito lentamente e praticamente seria estável a essa temperatura, de modo que as propriedades da fase beta poderiam ser utilizadas para o desenvolvimento dessas ligas. Entretanto, do mesmo modo que nas ligas ferrosas, na prática a fase beta sofre uma transformação de não equilíbrio para uma outra fase (beta'), mesmo quando o resfriamento é extremamente rápido. Essa fase, que não é de equilíbrio e, portanto, não aparece no diagrama de fases, possui uma estrutura cristalina hexagonal (HCP) e é ordenada. Do mesmo modo que ocorre com os aços, a fase beta' se forma por uma transformação martensítica, com a decomposição da fase beta em longas agulhas. Durante o resfriamento rápido, ao se atingir uma temperatura da ordem de 380 °C (temperatura de início da transformação martensítica, também conhecida como MS), as agulhas começam a aparecer em grande velocidade na fase beta e à medida que o resfriamento até a temperatura ambiente prossegue, a fase beta remanescente se decompõe nessas finas agulhas.

Entretanto, enquanto nos aços a martenista é a estrutura mais dura, muito mais do que a perlita, nas ligas Cu-Al acontece fenômeno inverso, já que a fase beta' martensítica (70 HRB) sensivelmente mais macia do que a mistura alfa e gama 2 perlítica (80 HRB). Essa diferença de dureza reflete a influência da fase gama 2 muito dura, que confere maior dureza à estrutura perlítica.

Também de forma surpreendente, em comparação com os aços, o aquecimento da fase beta' martensítica a uma temperatura inferior à temperatura eutetóide (565 °C), leva ao endurecimento da liga, ao contrário do que ocorre durante o revenimento dos aços. O aquecimento a 500 °C por 30 minutos, por exemplo, aumenta a dureza da fase beta' de 70 HRB para 90 HRB.

No caso da liga Cu-Al com 10 % de alumínio, o aquecimento a uma temperatura superior a 850 °C resulta numa microestrutura constituída unicamente por fase beta, e o resfriamento rápido leva à formação de uma microestrutura totalmente martensítica, com dureza Brinell de cerca de 250. Ao ser mantida a uma temperatura inferior a 850 °C essa liga passa a conter crescentes quantidades de fase alfa coexistindo com a fase beta, e como a fase alfa é menos dura, a dureza Brinell da liga cai para valores em torno de 120. Se em vez do resfriamento rápido for feito um resfriamento lento (em forno, por exemplo) na mesma liga Cu-10Al, uma grande quantidade (cerca de 50 %) de fase alfa primária se forma, e o restante da microestrutura é constituída por perlita eutetóide. Embora no caso dessas ligas a microestrutura perlítica proporcione maior dureza do que a microestrutura martensítica, a grande quantidade de fase alfa presente faz com que a liga seja relativamente macia nesse caso. Ou seja, à medida que o resfriamento torna-se mais lento, aumenta a presença de fase alfa macia e diminui a presença da martenista dura, fazendo com que se reduza a dureza da liga. O revenimento da liga Cu-10Al temperada resulta em aumento de dureza se esse tratamento for feito em temperaturas em torno de 350 °C, mas resulta em decréscimo de dureza quando é feito em temperaturas mais elevadas. O aumento de dureza se deve à formação de uma fina dispersão de fase gama 2 dura na fase alfa mais macia. Porém, quando a temperatura é suficientemente alta (ou seja, acima de 400 °), o tempo de revenimento é suficiente para promover o coalescimento das partículas de fase gama 2, promovendo o decréscimo de dureza.

A dureza dessas ligas Cu-Al é máxima quando se forma a microestrutura alfa + gama 2 dispersa ou quando se forma a martensita pelo resfriamento rápido. Entretanto, ainda não foi esclarecido o motivo que leva à redução da formação da martensita quando o teor de alumínio da liga aumenta. De qualquer modo, a dureza da liga é máxima quando se minimiza a presença da fase alfa macia e se maximiza a presença da martensita. É necessário tomar cuidado quanto à fragilização que pode resultar do recozimento dessas ligas, levando a uma queda de tenacidade considerável. Para evitar esse problema, a liga Cu-10 Al deve ser recozida à temperatura de 650 °C, e de um modo geral as ligas Cu-Al devem ser recozidas a uma temperatura igual ou superior a 570 °C, sendo que também deve ser evitado o resfriamento muito lento a partir da temperatura de recozimento. As propriedades mecânicas das ligas Cu-Al que contêm fase alfa dependem muito da forma e do tamanho dos grãos de fase alfa., que por sua vez dependem muito das condições de resfriamento. Do mesmo modo, as condições de resfriamento influem muito na decomposição da fase beta. Evidentemente, quanto mais finos os grãos de fase alfa, maior a resistência mecânica e a ductilidade, embora a dureza seja menos afetada. O resfriamento lento também favorece a decomposição da fase beta em uma mistura de alfa e gama 2, que embora dura, também é frágil [2].

Aplicação das ligas cobre-alumínio

- Liga 95 cobre – 5 alumínio – É uma liga com microestrutura monofásica (fase alfa), que contém pequenos teores de arsênio, níquel ou manganês, que são adicionados com o objetivo de melhorar a resistência à corrosão e a resistência mecânica. É uma liga que apresenta boa resistência à corrosão, mesmo em ambientes agressivos, além de boa conformabilidade a frio. Em geral é produzida sob a forma de semimanufaturados planos e também tubos. É utilizada na indústria química, em peças que estão em contato com água, ácidos e soluções salinas, em tubos de condensadores, evaporadores e trocadores de calor, componentes de equipamentos usados na indústria de papel, em caixas d'água e reservatórios.
- Liga 92 cobre – 8 alumínio – Esta liga é bifásica e pode conter pequenas adições de níquel, ferro ou manganês. Possui boa resistência à oxidação e boa conformabilidade a quente. É utilizada na forma de produtos planos e barras em aplicações na indústria química, semelhantes às da liga 95-5, e, além disso, em recipientes para a indústria química, em autoclaves, instalações criogênicas, recipientes e ganchos para instalações de decapagem, componentes de torres de resfriamento, em instalações para tratamento de esgoto urbano, sendo também usada para a fabricação de moedas e medalhas, eletrodos de soldagem, em componentes usados na indústria naval, como instrumentos não magnéticos para bússolas girostáticas, em revestimentos protetores e em tubulações para água do mar.
- Liga 89 cobre – 8 alumínio – 3 ferro – Possui a mesma microestrutura bifásica, porém o ferro é adicionado para inibir o crescimento de grão, melhorando a resistência mecânica da liga. Pode conter pequenas adições de níquel ou de manganês. É uma liga que apresenta alta resistência à corrosão e boa conformabilidade a quente, sendo produzida em geral sob a forma de chapas e barras. É utilizada em placas de tubos de condensadores, evaporadores e trocadores de calor nas indústrias química e naval, em instalações criogênicas e de decapagem e em ferramental antifaiscante para a indústria de gás, de petróleo, de carvão e de explosivos.
- Liga 89 cobre – 9 alumínio – 2 manganês – É uma liga bifásica (fases alfa e beta) que contém manganês para aumentar a trabalhabilidade a quente e também a soldabilidade. Pode conter também pequenos teores de ferro ou níquel. É usada na forma de produtos planos, barras e forjados, sendo utilizada em instalações criogênicas, filtros e placas perfuradas, componentes de máquinas da indústria alimentícia, engrenagens helicoidais, elementos de fixação de máquinas e ferramentas de conformação de plásticos.
- Liga 87 cobre – 10 alumínio – 3 ferro – Esta liga apresenta microestrutura bifásica, sendo o ferro adicionado para inibir o crescimento de grão e melhorar a resistência,

contendo também níquel ou manganês. Possui alta resistência à corrosão e à oxidação, mantendo a resistência mecânica à temperatura ambiente a temperaturas relativamente altas. Sob a forma de barras, perfis e forjados é usada em instalações criogênicas e de decapagem, como componentes de bombas, acessórios e elementos de fixação na construção naval, em ferramentas antifaiscantes, engrenagens, peças resistentes ao desgaste, peças forjadas para máquinas, peças forjadas para máquinas e linhas elétricas, ferramentas de conformação de plásticos e diversos componentes conformados.

- Liga 80 cobre – 10 alumínio – 5 ferro – 3 níquel – Esta liga quaternária também possui estrutura bifásica (fases alfa e kappa), podendo adicionalmente conter pequenos teores de manganês. A presença de níquel e de ferro confere à liga uma boa combinação de resistência à corrosão e à oxidação, resistência mecânica, à fadiga e ao desgaste. Além disso, possui boa conformabilidade a quente e mantém a resistência mecânica a temperaturas razoavelmente altas. Produzida sob a forma de barras e forjados, é usada em componentes de equipamentos trocadores de calor, de decapagem, de tratamento de águas, esgotos e ácidos, na construção naval, em ferramentas antifaiscantes e em acessórios mecânicos diversos.
- Liga 82 cobre – 9 alumínio – 6 níquel – 3 ferro – Possui microestrutura bifásica (fases alfa e kappa), contendo pequenos teores de manganês, sendo assim uma alternativa para aplicações semelhantes às da liga 80-10-5-3 anterior.
- Ligas cobre-alumínio para fundição: são fundidas em areia e usadas em cestos de decapagem, sapatas de laminador, engrenagens internas, bombas resistentes a álcalis, assentos de válvulas, hastes, hélices navais, mancais, buchas e peças em geral que necessitam de boa resistência à corrosão [1].

Propriedades mecânicas de algumas ligas cobre-alumínio:

A tabela 4.1 apresenta valores de algumas propriedades mecânicas de algumas ligas cobre-alumínio [1]

Liga (ASTM)	Composição química	Limite de resistência à tração (MPa)	Limite de escoamento (MPa)	Alongamento (%)	Dureza Brinell (HB)	Limite de resistência à fadiga (MPa)
606	95Cu5Al	380-530	150-450	55-15	85-140	110-135
-	92Cu8Al	420-580	170-430	45-15	90-160	170
614	89Cu8Al3Fe	480-650	250-470	40-20	115-165	150-210
-	89Cu9Al2Mn	500-650	200-400	35-15	120-160	-
623	87Cu10Al3Fe	620-700	300-450	18-10	160-180	200-245
632	80Cu10Al5Fe5Ni	750-800	420-500	15-12	180-215	-
628	82Cu9Al6Ni3Fe	600-750	320-500	15-8	160-200	175-295

b) Ligas cobre-silício

Também conhecidas como bronzes de silício, as ligas Cu-Si de interesse industrial contêm de 1 a 4 % de silício e pequenos teores de outros elementos de liga, como o estanho, o zinco, o manganês, o níquel e o ferro. A solubilidade máxima do silício no cobre é de cerca de 4 % à temperatura ambiente e sendo assim essas ligas são monofásicas (apresentam em sua microestrutura somente a fase alfa), de modo que só podem ter sua resistência mecânica elevada por meio de encruamento. A liga Cu-Si com cerca de 1 % de silício e 2 % de estanho possui elevada utilidade e mantém boa utilidade mesmo após trabalho mecânico (encruamento, deformação) severo, o que faz com que seja um material adequado para a fabricação de parafusos e porcas, uma vez que suportam bem a estampagem e usinagem mesmo encruado, não exigindo, portanto, tratamentos térmicos de recozimento antes ou após

a deformação, mantendo assim a resistência mecânica obtida no material deformado [4]. Além disso, a adição de silício aumenta a resistência a corrosão, particularmente em meios ácidos, e também melhora a soldabilidade, por permitir a desoxidação do metal fundido durante a operação de soldagem. As ligas trabalhadas contêm até 3 % de silício, podendo conter cerca de 1 % de manganês, enquanto as ligas fundidas contêm de 4 a 5 % de silício, podendo conter também pequenos teores de zinco, ferro e manganês. As principais aplicações das ligas Cu-Si trabalhadas ou fundidas estão na construção de instalações de indústria química e de papel, em tanques, tubulações e cestos de decapagem; na construção mecânica em eletrodos de soldagem, parafusos, porcas, rebites, buchas e ganchos; na construção naval em eixos de hélices e na construção aeronáutica em linhas hidráulicas e de pressão [1].

A resistência à tração das ligas Cu-Si trabalhadas pode variar de 370 a 700 MPa, a resistência ao escoamento de 270 a 390 MPa, e o alongamento (em 50 mm) de 45 a 6 %.

c) Ligas cobre-berílio

A diferença entre o diâmetro atômico dos átomos de cobre e de berílio é comparável à que existe entre os átomos de cobre e alumínio ou entre os átomos de cobre e de estanho. A solubilidade do berílio no cobre é muito limitada, reduzindo-se de 2,1 % a 864 °C para menos de 0,25 % à temperatura ambiente, o que faz com que o efeito de endurecimento por solução sólida seja pouco eficiente. Entretanto, o efeito de endurecimento por solução sólida é significativo, já que à temperatura de 800 °C uma liga com cerca de 1,5 % de berílio é praticamente monofásica (fase alfa) e uma temperatura mais baixa bifásica (alfa + beta), de modo que a fase beta se precipita a partir da fase alfa, sendo que a temperaturas ainda mais baixas (abaixo de 575 °C), se precipita a fase gama. O endurecimento por precipitação é considerável e permite a esta liga atingir 40 unidades Rockwell C, um valor de dureza compatível com o de muitos aços.

As ligas Cu-Be apresentam comportamento de endurecimento por precipitação semelhante ao que se observa para as ligas Cu-Al. Para que se atinja a dureza mais alta possível, o teor de berílio deve ser da ordem de 1,8 a 2,0 %, a temperatura de envelhecimento deve ser da ordem de 350 °C e o tempo de 3 a 5 horas, permitindo se obter valores de dureza de 40 a 45 Rockwell C. Como ocorre no processo de precipitação de muitas ligas, a formação do precipitado de equilíbrio gama é precedida pela formação de uma fase metaestável e o endurecimento ocorre devido à formação de precipitados extremamente finos e dispersos de fase gama, que possuem a forma de discos com cerca de 200 a 400 átomos de diâmetro e cerca de 50 átomos de espessura, todos muito próximos. Com o prolongamento do envelhecimento a liga sofre superenvelhecimento e os precipitados tornam-se grosseiros, atingindo o equilíbrio.

A temperatura de recristalização dessas ligas é igual ou superior a 500 °C, mas se essas ligas forem solubilizadas e trabalhadas a frio antes do envelhecimento na faixa de 300 a 385 °C, a precipitação ocorre antes da recristalização (e assim o amolecimento) possa ocorrer. A dureza do material submetido a este ciclo não é muito diferente da dureza do material envelhecido sem trabalho mecânico prévio, mas o efeito do trabalho mecânico sobre a resistência mecânica e sobre a resistência ao escoamento é bem mais pronunciado (maior ganho de resistência). Por outro lado, na condição envelhecida a liga Cu-Be apresenta ductilidade muito menor, tanto com ou sem trabalho mecânico. Além do berílio estas ligas contêm outros elementos, como o cobalto que forma um composto insolúvel Be-Co, o qual inibe o crescimento de grão durante a solubilização, o que também pode ser obtido com a adição de outros elementos de liga. Durante a solubilização deve ser evitada uma temperatura muito alta (acima de 800 °C) que possa causar fusão parcial, além de favorecer a formação de fase beta que dificilmente se dissolve no recozimento posterior. Por outro lado, a temperatura de solubilização não deve ser muito baixa (abaixo de 760 °C) justamente para evitar a formação de fase beta, já que com isso reduz-se o teor de berílio da fase alfa, reduzindo o efeito de endurecimento. Além disso, o resfriamento deve ser rápido o suficiente para evitar a formação de fase beta, usando-se água para o resfriamento rápido [2].

A liga mais comum é a CuBe₂ que contém 1,60 a 2,05 % de berílio, níquel e/ou cobalto (no mínimo 0,20 % cada) e/ou ferro (máximo de 0,60). O limite de resistência à tração desta liga é

da ordem de 1230 a 1490 MPa, o limite de resistência ao escoamento vai de 1090 a 1370 MPa, o alongamento varia de 6 a 1 %, a dureza Brinell está entre 38 e 41 HB, ao passo que a resistência à fadiga atinge valores entre 250 e 310 MPa, quando a liga está tratada termicamente. As ligas Cu-Be, com boa resistência mecânica, e à fadiga em particular, além de boa condutividade elétrica e térmica, são usadas, na forma de tiras, arames, tubos e barras e também peças fundidas para a fabricação de molas de instrumentos, diafragmas e cabos flexíveis, componentes de chaves elétricas, de relês, de bombas e de máquinas de soldagem por resistência elétrica. Ferramentas anitfaiscantes são bons exemplos de aplicação de peças fundidas.

Cuproníquel e alpaca

a) Cuproníquel

A denominação de cuproníquel aplica-se às ligas constituídas essencialmente por cobre e níquel. Essas ligas se caracterizam por apresentarem, em qualquer temperatura solubilidade sólida total, ou seja, em qualquer temperatura o níquel é completamente solúvel no cobre, tanto no estado sólido como no estado líquido e a variação do teor de níquel apenas acarreta modificação no valor das temperaturas solidus (abaixo da qual a liga é totalmente sólida) e liquidus (acima da qual a liga é totalmente líquida), havendo no diagrama de fases tão somente um campo bifásico sólido (alfa) + líquido. Essa peculiaridade se deve entre, outros fatores, à proximidade do diâmetro atômico do cobre e do níquel como também de seus números atômicos (29 e 28, respectivamente).

As propriedades mecânicas dessas ligas atingem seu valor máximo para cerca de 65 % de níquel, enquanto a resistividade elétrica atinge seu valor máximo para cerca de 55 % de níquel. Embora tanto o cobre como o níquel apresentem elevado coeficiente de aumento da resistividade elétrica com o aumento da temperatura, a liga Cu-Ni que contém 45 % de níquel possui a particularidade de ter esse coeficiente praticamente nulo, e, sendo assim, conhecida pelo nome comercial de constantan é largamente utilizada para a fabricação de resistências elétricas, termopares elétricos e instrumentos elétricos em geral.

Embora os teores de níquel das ligas Cu-Ni variem entre 2,5 e 30 %, na prática industrial são mais usadas as que contêm de 20 a 30 % de níquel. Como tanto o cobre como o níquel são dois elementos que se caracterizam por apresentarem alta resistência à corrosão, os cuproníqueis também apresentam essa característica, sendo que a adição de níquel ainda melhora essa propriedade. Tanto a liga com 20 % de níquel como a liga com 30 % de níquel resistem bem a qualquer tipo de atmosfera, a águas industriais e salgadas, assim como a muitos ácidos minerais e orgânicos. A liga com 20 % de níquel pode ser usadas em lâminas de turbina e em geral em peças que necessitem de boa resistência à corrosão e à abrasão. Quando o ambiente corrosivo for ainda mais agressivo, passa a ser recomendável o uso da liga com 30 % de níquel, que é usada em aplicações marítimas e em tubos de condensadores, além de possuir a característica de impedir na água salgada o crescimento de fungos e organismos marinhos em geral, sendo que essa característica estende bastante o seu uso na construção naval [4].

Aplicação dos cuproníqueis

Ligas Trabalhadas

- Liga (C 704) 95 % de cobre e 5 % de níquel (contendo ainda ferro e manganês) – É constituída unicamente pela fase alfa. A adição de ferro e manganês tem a finalidade de aumentar a resistência à corrosão-erosão pela ação do fluxo lento da água do mar não poluída. Possui razoável resistência à corrosão sob tensão e boas propriedades para conformação a frio e a quente. É produzida na forma de placas, chapas e tubos. Na construção naval é usada em tubos condutores de água do mar para mangueiras

dos equipamentos de prevenção de incêndio, circuitos de refrigeração a água e serviços sanitários nos navios.

- Liga (C 706) 90 % de cobre e 10 % de níquel (contendo ainda ferro e manganês) – Também apresenta microestrutura monofásica (fase alfa), contendo pequenos teores de ferro e manganês para melhorar a resistência à corrosão-erosão pela ação de águas, inclusive a água do mar. É uma liga que possui boa resistência à corrosão sob tensão, boa conformabilidade a frio e a quente e boa soldabilidade. É produzida geralmente na forma de placas, chapas e tubos. Na indústria química é usada em tubos e placas de tubos para condensadores em serviços leves, aquecedores e evaporadores de sistemas de alimentação de água de usinas de energia, de açúcar e de dessalinização de água do mar. Na construção naval esta liga é usada em aplicações bem semelhantes às da liga mencionada anteriormente e na construção mecânica tem como aplicação mais comum a fabricação de cabos de tubos usados em linhas hidráulicas e pneumáticas.
- Liga 80 % de cobre e 20 % de níquel: Também é uma liga monofásica (fase alfa) que possui boa resistência à corrosão erosão pela ação de água a baixa velocidade. Possui boa resistência à corrosão sob tensão, elevada conformabilidade a frio e a quente, além de ser ter ótima soldabilidade. É fabricada como chapas e tiras e usada na construção elétrica, resistores, recipientes de transistores, guias de onda de radar, na construção mecânica em recipientes resistentes à corrosão e conformados por estampagem profunda ou por repuxamento, em aquecedores de água domésticos, moedas e medalhas cunhadas.
- Liga (C 710) 80 % de cobre e 20 % de níquel, contendo manganês e ferro: Também é uma liga monofásica (fase alfa) com pequenos teores de ferro e manganês para elevar a resistência à corrosão-erosão pela ação das águas (inclusive água do mar) com velocidades de 1 a 4 m/s. É uma liga pouco sensível à corrosão sob tensão, que possui boa conformabilidade e que é facilmente soldável. É produzida na forma de placas, chapas e tubos, sendo usada na indústria química e na indústria naval, em tubos e placas de tubos para condensadores de sistemas de alimentação de água.
- Liga 75 % cobre e 25 % de níquel: É mais uma liga monofásica e que apresenta boa resistência à corrosão, ao desgaste e ao embaciamento, além de possuir excelentes características de conformação a frio e cunhagem. É produzida na forma de chapas e tiras e usada na fabricação de moedas e como fios para a fabricação de resistores elétricos.
- Liga (C 715) 70 % de cobre e 30 % de níquel com manganês e ferro: Outra liga monofásica que contém ferro e manganês para elevar a resistência à corrosão pela ação de águas em altas velocidades (1,5 a 4,5 m/s), inclusive água do mar poluída. Esta liga é praticamente insensível à corrosão sob tensão, mantém suas boas propriedades mecânicas em temperaturas relativamente elevadas, possui boa conformabilidade a frio e a quente é facilmente soldável. É produzida na forma de placas, chapas, barras e tubos para condensadores em serviços pesados, aquecedores e evaporadores de água usados em vários tipos de instalações, inclusive sistemas de dessalinização de água do mar.
- Liga 55 % de cobre e 44 % de níquel com manganês: Possui estrutura monofásica e pequenas quantidades de manganês e ferro, sendo caracterizada por uma resistividade elétrica razoavelmente alta e um baixo coeficiente elevação da resistividade elétrica com o aumento de temperatura. É uma liga que pode ser facilmente conformada e soldada, sendo produzida na forma de tiras e fios. É usada na fabricação de componentes elétricos como resistores de controle que operam em temperaturas elevadas e fazem parte de instrumentos de precisão, de termopares componentes de válvulas eletrônicas, elementos de aquecimento, termostatos bimetalicos e chaves de controle.

Ligas cobre-níquel fundidas

- Liga 90 % de cobre e 10 % de níquel com manganês e silício: Usada na fabricação de peças em geral que devem ter boa resistência à corrosão pela água do mar.
- Liga 80 % de cobre e 20 % de níquel com nióbio, manganês e silício: Utilizada em buchas de eixos de guias fundidas por centrifugação.
- Liga 70 % cobre e 30 % de níquel com nióbio, ferro, manganês e silício: Empregada em Usada em válvulas, corpos de bombas, flanges, conexões que devem ter resistência à corrosão pela água do mar.
- Liga 70 % de cobre e 30 % de níquel com ferro, berílio e silício: Usada em peças de alta resistência mecânica e com resistência à corrosão pela água do mar.
- Liga 97 % de cobre e 3 % de níquel contendo silício: É utilizada na fabricação de peças de alta condutividade térmica e elétrica como eletrodos para soldagem por resistência elétrica [1].

Propriedades dos cuproníqueis trabalhados [1]:

Liga (ASTM)	Composição	Limite de resistência à tração (MPa)	Limite de escoamento (MPa)	Alongamento (%)	Dureza Brinell (HB)	Limite de resistência à fadiga (MPa)
704	93,5Cu 5Ni 1Fe 0,5Mn	280-320	90-350	45-10	60-100	95-190
706	88,5Cu 10Ni 1Fe 0,5Mn	320-420	120-380	38-12	65-120	95-150
-	79,7Cu 20Ni 0,3Mn	340-460	150-420	40-12	80-135	240
710	78,3Cu 20Ni 1 Mn 0,7 Fe	340-470	150-420	40-14	80-130	120-235
-	74,7Cu 25Ni 0,3Mn	370	160	42	85	275
715	68,7Cu 30Ni 1Mn 0,3Fe	360-520	150-450	42-16	85-145	140-245
-	54,7Cu 44Ni1Mn 0,3Fe	480-700	200-550	45-5	95-165	290

b) Alpacas

Alpacas são ligas ternárias cobre-zinco-níquel, que eventualmente podem conter teores significativos de outros elementos, como o chumbo, por exemplo. Estas ligas contêm de 10 a 30 % de níquel, porém comercialmente em geral até 18 % de níquel, 45 a 70 % de cobre e o restante de zinco. As alpacas são soluções sólidas homogêneas que podem ser deformadas a frio e a quente, além de serem resistentes à corrosão. As alpacas possuem uma coloração esbranquiçada, semelhante à da prata, e o aumento do teor de níquel confere a essas ligas uma tonalidade mais metálica. Quando polidas essas ligas são muito usadas para finalidades decorativas, sendo que antes da popularização do aço inoxidável eram muito usadas para a fabricação de talheres. Muitos objetos decorativos fabricados em alpaca recebem um revestimento de prata. Outras aplicações importantes das alpacas estão na fabricação de zíper e de contatos de equipamentos elétricos e telefônicos, componentes de aparelhos óticos e fotográficos, assim como arames de resistores elétricos. A adição de chumbo, além de aumentar a usinabilidade, permite o uso das alpacas para a fabricação de materiais para gravação com fins decorativos. Além de serem trabalhadas na forma de produtos planos,

arames e barras, as alpacas podem ser fundidas para outras aplicações, como válvulas hidráulicas. As alpacas com chumbo fundidas em areia podem ser usadas na fabricação de equipamentos para a indústria de laticínios e de soda, válvulas e assentos de válvulas para temperaturas elevadas, instrumentos musicais, chaves, acessórios de construção naval, peças ornamentais e outros tipos de aplicações [1].

Propriedades das alpacas trabalhadas [1]:

No da Liga (ASTM)	Composição química	Limite de resistência à tração (MPa)	Limite de escoamento (MPa)	Alongamento (50 mm) (%)	Dureza (HRB)
740	70Cu 10Ni 20Zn	-	-	-	-
745	65Cu 10Ni 25Zn	340-910	130-530	50-1	22-92
760	63Cu 10Ni 27Zn	-	-	-	-
757	64Cu 12Ni 24Zn	370-650	130-560	48-2	22-92
762	59Cu 12Ni 29Zn	-	-	-	-
752	65Cu 18Ni 20Zn	410-730	180-630	40-3	40-78
764	62Cu 18Ni 20Zn	-	-	-	-
770	55Cu 18Ni 27Zn	420-1020	190-630	40-2	55-99
774	45Cu 10Ni 45Zn	-	-	-	-
754	65Cu 15Ni 20Zn	370-650	130-560	43-2	22-90

Propriedades das alpacas fundidas (em areia) [1]:

Liga	Limite de resistência à tração (MPa)	Alongamento (%)	Dureza Brinell (HB)
66Cu 25Ni 5Sn 2Zn 2Pb	280	12	135
64Cu 20Ni 8Zn 4Sn 4Pb	220	6	80
60Cu 16Ni 16Zn 3Sn 5Pb	210	16	55
57Cu 12Ni 20Zn 2Sn 9Pb	190	6	65

Fundição e Metalurgia do pó

a) Fundição

O cobre e suas ligas, na condição de produtos fundidos, apresentam grande variação de propriedades como a resistência mecânica, a resistência à corrosão e as condutividades

térmica e elétrica. O processo de fundição exige que a liga apresente alta fundibilidade para a obtenção de formas complexas e boa qualidade (ausência de defeitos de fundição). Entretanto, em função dos requisitos de desempenho das peças fundidas em serviços, outras características são importantes, como a resistência à corrosão (causada pela atmosfera, águas, solos e produtos químicos), resistência ao desgaste (particularmente quando a peça é usada como mancal de deslizamento), resistência à compressão, à fadiga, condutividade térmica e elétrica, deformabilidade, estanqueidade (para evitar o vazamento de fluidos através das paredes da peça fundida) e resistência mecânica a temperaturas relativamente elevadas (no máximo 300 °C) ou a baixas temperaturas.

As ligas de cobre podem ser fundidas por processos que permitam obter uma grande variedade de formas geométricas, como a fundição em areia, a fundição em casca, o processo por cera perdida e a fundição sob pressão. Mesmo os processos que permitem obter peças de boa qualidade, porém com limitação na variedade de formas, também podem ser aplicados às ligas de cobre, como a fundição contínua, a fundição centrífuga e a fundição em coquilha.

Para a escolha de um processo de fundição é fundamental determinar o tamanho e a forma das peças a serem fundidas, a quantidade de peças a serem produzidas e os requisitos de projeto, as tolerâncias dimensionais e a qualidade desejada.

A seguir os diversos tipos de processo de fundição recomendados para ligas de cobre são relacionados, levando em condição o grau de fundibilidade (alto ou baixo):

- Fundição em areia: alta fundibilidade para latões (Cu-Zn) e bronzes com chumbo e zinco; e fundibilidade razoável para bronzes fosforosos (com e sem chumbo), Cu-Zn-Sn, bronzes com chumbo, cobres de alta condutividade, latões de alta resistência mecânica, ligas cobre-cromo, cobre-alumínio, cuproníquel e Cu-Mn-Al.
- Fundição sob pressão: alta fundibilidade para latões e ligas cobre-alumínio e fundibilidade razoável para bronzes fosforosos, bronzes fosforosos com chumbo, bronzes com zinco, cobres de alta condutividade, latões e alta resistência mecânica, ligas cobre-cromo, ligas cobre-alumínio, cobre berílio e cobre-manganês-alumínio.
- Fundição contínua: alta fundibilidade para bronzes fosforosos, bronzes com zinco, bronzes com chumbo e bronzes com zinco e chumbo. Fundibilidade razoável para bronzes fosforosos com chumbo, cobres de alta condutividade, ligas cobre-alumínio, cobre níquel e cobre-manganês-alumínio.
- Fundição centrífuga: alta fundibilidade para bronzes fosforosos, e fundibilidade razoável para bronzes fosforosos com chumbo, bronzes com zinco, bronzes com chumbo, latões e latões de alta resistência mecânica, cobres de alta condutividade, ligas cobre-cromo, cobre-alumínio, cuproníqueis, cobre-berílio e cobre-manganês-alumínio.
- Fundição em coquilha: alta fundibilidade para bronzes fosforosos e bronzes fosforosos com chumbo, além de bronzes com chumbo. Fundibilidade razoável para bronzes com chumbo e zinco e bronzes com zinco.

As ligas de cobre podem ser classificadas, no que se refere à fundição, em dois grupos distintos, de acordo com a maneira pela qual se solidificam. Determinadas ligas, como as ligas cobre-alumínio, por exemplo, se solidificam em um estreito intervalo de temperaturas, de modo que durante a solidificação estas ligas se transformam rapidamente do estado líquido para o estado sólido. Por outro lado, outras ligas, como os bronzes fosforosos e os bronzes com chumbo se solidificam num amplo intervalo de temperaturas, permanecendo um certo tempo num estado “pastoso”, ou seja, numa mistura de fases líquidas e sólidas. Essas diferenças de velocidade de solidificação têm que ser consideradas ao se projetar a peça fundida e os canais de alimentação.

Entre as ligas com estreito intervalo de solidificação encontram-se os cobres de alta condutividade e as ligas cobre-cromo (0 °C), cobre-alumínio (5 a 15 °C), cobre-alumínio manganês (20 a 50 °C), latões (20 a 50 °C) e latões de alta resistência mecânica (10 a 20 °C).

No grupo das ligas com amplo intervalo de solidificação estão os bronzes fosforosos com e sem chumbo, bronzes com chumbo, bronzes com zinco e bronzes com zinco e chumbo (todas essas ligas têm intervalo de solidificação da ordem de 100 a 180 °C).

Para as ligas do primeiro grupo é necessário prever na peça aumentos progressivos das seções pequenas para as seções grandes, sendo também necessário prover alimentadores para todas as duas seções. Já as ligas do segundo grupo, devido ao estado “pastoso” em que se encontram durante a solidificação, apresentam menores problemas de alimentação de material à peça, e assim fundidos de melhor qualidade podem ser obtidos quando se consegue uma solidificação rápida quando essa for possível, através da implementação de seções com pequena espessura.

A qualidade da peça fundida depende do metal utilizado como matéria-prima, e a qualidade deste depende basicamente de sua composição química, particularmente o seu nível de impurezas e da sua microestrutura, que é influenciada tanto pela composição química como pelas condições de resfriamento e do processo de fundição em geral. A matéria-prima tanto pode ser material de prima fusão (metal primário) como metal secundário (reciclado), contudo, cuidados especiais devem ser tomados no que se refere aos teores máximos de impureza permitidos.

Quanto às impurezas são importantes as seguintes informações sobre os principais grupos de ligas:

Ligas cobre-estanho (bronzes): A influência que o antimônio, o arsênio, o bismuto e o ferro podem ter nas propriedades mecânicas, justificam as severas restrições que as normas impõem aos teores desses elementos nas ligas de cobre fundidas. É necessário ressaltar que o enxofre acima de 0,1 % afeta as propriedades de tração, enquanto o alumínio, mesmo em pequenos teores (acima de 0,01 %) provoca redução da estanqueidade e prejudica as propriedades de tração. O silício causa esses mesmos efeitos nos bronzes sem chumbo, além de acarretar reações metal-molde mais intensas, mesmo nos limites de 0,02 % especificados, para as ligas com chumbo. Excesso de fósforo além do necessário para desoxidação acarreta reação metal-molde e aumenta a porosidade da peça de seção espessa: cerca de 0,04 % de fósforo é um teor adequado para seções finas e cerca de 0,015 % para seções espessas.

Ligas cobre-zinco (latões): de um modo geral é significativa a tolerância quanto aos teores de impurezas nos latões comuns para fundição em areia., porém se é necessário que a peça apresente grande estanqueidade (resistência ao vazamento por fluidos através de suas paredes por pressão interna), o teor de alumínio deverá ser mantido em níveis muito baixos, para evitar a formação de películas de óxido de alumínio, que ficam retidas através das paredes da peça fundida, embora esse problema possa ser contornado através de cuidados especiais, principalmente no que diz respeito ao vazamento de metal líquido no molde. Outro elemento nocivo acima de determinados teores é o estanho. Além dessas impurezas, o silício acima de certos teores pode provocar o aparecimento de pontos duros que dificultam a usinagem.

Ligas cobre-berílio: na fundição dessas ligas devem ser controlados os teores de estanho e silício (0,01 % no máximo), magnésio (0,05 % no máximo) e chumbo (0,05 % no máximo).

b) Metalurgia do Pó

Diversos tipos de produtos à base de ligas de cobre podem ser fabricados através do processo de metalurgia do pó: filtros, mancais porosos, materiais para fricção, contatos elétricos e peças estruturais.

Os bronzes são ligas muito usadas na fabricação de filtros sinterizados por apresentarem elevada resistência mecânica e à corrosão, porém tanto a resistência mecânica quanto a utilidade do material dependem da sua densidade. Geralmente se utiliza uma liga com cerca de 11 % de estanho, mas os latões e as alpacas também podem ser utilizados para a

fabricação de certos filtros sinterizados. Esses filtros são utilizados para a filtragem de água, líquidos em geral e gases na indústria química e farmacêutica, líquidos combustíveis e fluidos hidráulicos de sistemas de comando.

Ao contrário dos mancais porosos, os filtros são fabricados a partir de pós constituídos de ligas, de maior granulação e forma esférica, e quando a operação de compressão é realizada durante a fabricação, são utilizadas pressões muito baixas.

Os mancais porosos feitos com bronze apresentam um variado campo de aplicações, porém se destaca o seu uso na fabricação de eletrodomésticos e de autopeças. A elevada porosidade faz com que esses mancais sejam capazes de reter uma considerável quantidade de lubrificantes, cerca de 25 % do volume total da peça, fazendo com que assumam a característica de autolubrificantes. Nesse tipo de peça o teor de estanho pode variar entre 5 e 12 %, podendo adicionalmente conter de 1 a 2 % de grafite, assim como ferro e chumbo em pequenos teores.

Os materiais para fricção sinterizados, que são utilizados nos sistemas de embreagem ou de freios em automóveis, contêm cobre (de 60 a 85 %), estanho (2 a 10 %) e outros materiais metálicos e abrasivos (até 20 %). A finalidade do uso do cobre é criar uma matriz para os demais pós e atuar como um componente que, devido à sua alta condutividade térmica, dissipa calor gerado durante a fricção em serviço.

Já os contatos elétricos são constituídos essencialmente de pós de cobre que apresentam alta condutividade térmica, e pós de tungstênio ou molibdênio (40 a 85 %), que apresentam boa resistência ao calor e ao desgaste. Essas características, conferidas pela presença desses dois metais reunidos num produto sinterizado, permitem o seu uso como elementos de contatos elétricos de chaves, interruptores, comutadores de transformadores, motores e outros equipamentos elétricos.

Sendo um processo alternativo aos chamados processos convencionais, a metalurgia do pó também permite, em alguns casos, a fabricação de peças e componentes estruturais em condições economicamente mais vantajosas [1].

A tabela 1 apresenta propriedades mecânicas de alguns componentes estruturais sinterizados em ligas de cobre [5]:

Liga (densidade em g/cm ³)	Resistência à tração (MPa)	Resistência ao escoamento (MPa)	Alongamento (% em 25 mm)	Dureza Rockwell (alpaca: HBR, demais HRH)
90 Cu – 10 Sn (7,2)	140	140`	3	65 HRH
90 Cu – 10 Zn (8,1)	210	-	20	77 HRH
85 Cu – 15 Zn (8,2)	220	-	20	82 HRH
70 Cu – 30 Zn (8,1)	266	21	21	87 HRH
68,5 Cu – 30 Zn – 1,5 Pb (7,7)	242	-	29	71 HRH
64 Cu – 10 Ni – 18 Zn (7,9)	230	-	12	83 HRB

Trabalhos: mecânico; a quente e a frio

a) Trabalho mecânico nas ligas de cobre

Os principais processos de fabricação de ligas de cobre envolvendo trabalho mecânico são a laminação, a trefilação, a extrusão e o forjamento. Os limites de composição química (teores máximos e mínimos exigidos pelas normas ASTM) estão dentro de intervalos mais estreitos no caso das ligas trabalhadas quando comparadas com as ligas fundidas, ou seja, determinadas composições químicas que são adequadas para fundição em areia ou em molde permanente, são totalmente inaceitáveis para ligas a serem trabalhadas mecanicamente, quando a ductilidade ou maleabilidade não for suficiente. Dependendo do tipo de liga o produto resultante da conformação da liga de cobre pode ser placa, chapa, tira, barra, vergalhão, arame ou tubo sem costura. Os principais elementos de liga com o cobre são o zinco, o estanho, o chumbo, o níquel, o silício ou o alumínio, e em menor grau de importância o manganês, o cádmio, o ferro, o fósforo, o arsênio, o cromo, o berílio, o selênio e o telúrio.

As faixas de composição química de ligas de cobre trabalhadas são periodicamente modificadas para se ajustarem às práticas de conformação, no que diz respeito às necessidades dos consumidores.

Efeitos dos elementos de liga: o zinco é o mais importante elemento de liga no caso das ligas de cobre, sendo usado não apenas em diferentes tipos de latões, mas também nas alpacas. A maioria dos latões está contida no campo monofásico alfa, apresentando assim boa conformabilidade a frio. Os latões com teores de zinco mais elevados, em torno de 40 %, são indicados somente para o trabalho a quente. A adição de zinco reduz a temperatura de fusão, a densidade, as condutividades térmica e elétrica e o módulo de elasticidade. Por outro lado, aumenta o coeficiente de expansão térmica, a resistência mecânica e a dureza. A capacidade de encruamento aumenta com o teor de zinco, mas o latão monofásico binário C 260 (70 % de cobre e 30 % de zinco) possui a melhor combinação de resistência mecânica e ductilidade. Nas ligas nas quais o zinco não é adicionado propositalmente como elemento de liga, ele é uma impureza que deve ser controlada para não ultrapassar um limite máximo especificado.

O chumbo é adicionado em cerca de 1/3 das ligas de cobre em teores que vão até 4 % no máximo, que é o limite para manter boas características de trabalhabilidade. No estado sólido este elemento não se dissolve na liga de cobre, mas fica distribuído como partículas de chumbo livre. Sua principal função é aumentar a usinabilidade, ou seja, favorecer as operações de corte. O chumbo aumenta a densidade e reduz a condutividade. Nas ligas nas quais não está presente como elemento de liga adicionado propositalmente, o chumbo é uma impureza que deve ser bastante restrita para não prejudicar a trabalhabilidade da liga. No latão para cartuchos o teor de chumbo deve ser inferior a 0,01 % para o trabalho a quente, enquanto nas alpacas não deve ser superior a 0,02 % para não afetar a trabalhabilidade.

O estanho é um elemento de liga essencial no grupo dos bronzes fosforosos. As ligas que são trabalhadas a frio podem conter estanho no máximo até 10 %, pois até esse teor tais ligas são monofásicas (somente fase alfa). A adição do estanho ao cobre aumenta significativamente sua resistência mecânica e sua dureza, enquanto reduz seu ponto de fusão, densidade e condutividades térmica e elétrica. O estanho também é adicionada a alguns latões em teores de até 1 % com o objetivo de melhorar a resistência à corrosão por dezincificação em água do mar, além de aumentar o limite de escoamento, a resiliência e a resistência à fadiga necessários às molas feitas com bronze fosforoso. Entretanto, o efeito da adição de estanho é menor nos latões de alto teor de cobre.

O níquel modifica a coloração da liga de cobre de modo que o cuproníquel é praticamente branco. A adição do níquel ao cobre aumenta a resistência mecânica e a dureza, mas a capacidade de encruamento dos cuproníqueis é inferior à de outras ligas de cobre. O níquel reduz significativamente as condutividades térmica e elétrica, e reduz ligeiramente o coeficiente de expansão térmica. Por outro lado, aumenta substancialmente o módulo de elasticidade. Como tem densidade semelhante à do cobre, o níquel não afeta esta propriedade. Embora o níquel e o cobre sejam mutuamente solúveis em qualquer proporção, por motivos de ordem técnica no processamento das ligas, o teor de níquel comercial costuma ser limitado no máximo em 30 %. Acima desse teor o ponto de fusão e a temperatura de recozimento tornam-

se muito altas para os fornos industriais, e a resistência ao trabalho a frio fica muito elevada para os laminadores comuns. Os cuproníqueis são particularmente adequados para aplicações em altas temperaturas. Nas alpacas as diversas combinações de níquel e zinco produzem uma grande variedade de ligas com coloração prateada, com propriedades de trabalho mecânico que se aproximam às dos latões comerciais.

O silício pode estar presente nas ligas de cobre em teores de até 3 %, que é o limite para a obtenção de ligas monofásicas alfa com boa trabalhabilidade. A adição de silício aumenta a taxa de encruamento rapidamente, embora na têmpera macia a ductilidade seja muito elevada. O silício reduz o ponto de fusão, a densidade e as condutividades térmica e elétrica. A excelente soldabilidade das ligas cobre-silício favorece a aplicação comercial dessas ligas.

O alumínio, nas ligas cobre-alumínio, deve ser limitado em até 10 % nas ligas trabalhadas, embora o trabalho a frio exija teores inferiores a 8 % para que seja possível obter uma microestrutura monofásica (fase alfa) que garanta suficiente ductilidade. O trabalho a quente é favorecido quando os teores de alumínio estão entre 8 e 10 %, devido à presença de fase beta, que facilita a laminação a quente, a extrusão e o forjamento. O alumínio reduz o ponto de fusão, a condutividade elétrica e térmica, além de reduzir a densidade de modo muito significativo.

O manganês é um elemento secundário que favorece o refino dos grãos nas ligas Cu-Mn e Cu-Al. Em pequenos teores é adicionado aos cuproníqueis e alpacas para favorecer a laminação e nas ligas Cu-Si, além de refinar os grãos, aumenta a soldabilidade. Como reduz muito a condutividade elétrica é bastante útil nas ligas Cu-Mn de alta resistividade.

O uso do fósforo nas ligas de cobre praticamente se resume aos bronzes fosforosos, nos quais está presente em teores de até 0,50 %. Sua função básica é a de agente desoxidante nos bronzes fosforosos, nos quais seu teor residual também melhora as propriedades mecânicas. No latão do almirantado e no latão contendo alumínio o fósforo ajuda a inibir a dezincificação. Seu efeito na redução da condutividade elétrica é muito forte. Em combinação com pequenos teores de níquel forma o fosfeto de níquel, que mediante tratamento térmico produz o efeito de endurecimento por precipitação, além de, por não estar em solução sólida, não ter um efeito tão negativo sobre a condutividade térmica, sendo pelos mesmos motivos usado em ligas cobre-zinco-estanho com alto teor de cobre. Como impureza no latão o fósforo afeta o crescimento de grão, alterando o resultado do recozimento.

O ferro é usado como elemento de liga apenas em pequenos teores da ordem de até 2,5 % e mesmo assim somente em poucas ligas de cobre. Quando presente no bronze de manganês (Cu-Mn) ou nas ligas Cu-Al e Cu-Si, em teores não muito altos, favorece o refino de grão e aumenta a resistência mecânica. Também em pequenos teores aumenta a resistência à corrosão do cuproníquel em águas marinhas. Está presente como impureza em todas as ligas de cobre e quando a contaminação do latão alfa é excessiva, além do limite usual de 0,05 %, esse efeito no tamanho de grão pode afetar o efeito desejado para os tratamentos térmicos, além de afetar a susceptibilidade magnética das ligas de cobre, normalmente não magnéticas, quando o teor de ferro é excessivo.

O arsênio é usado em ligas de cobre apenas como inibidor da dezincificação em latões do almirantado e latões com alumínio em ambientes corrosivos, porém o teor de arsênio não deve ultrapassar valores da ordem de alguns centésimos percentuais.

O cádmio pode ser adicionado ao cobre em teores de até 1 por cento, de modo que se obtenha uma composição que resulte em suficiente ductilidade e maleabilidade para operações de laminação. Esse elemento é bastante útil para aumentar a resistência mecânica e a resistência ao desgaste do cobre com menor diminuição da condutividade elétrica do que a causada pela adição de outros elementos. Por esse motivo o cobre-cádmio é indicado para aplicações em cabos de trólebus, linhas de energia de longo alcance e outras aplicações semelhantes. As mesmas vantagens fazem com que essas ligas sejam indicadas para a fabricação de eletrodos de soldagem por resistência elétrica.

O berílio é adicionado ao cobre em teores de até 2 % com o objetivo de se obter o efeito de endurecimento por precipitação, que proporcionam dureza e resistência mecânica muito superiores às das demais ligas de cobre. A liga Cu-Be é bem dútil devido ao amolecimento causado pelo recozimento/solubilização e resfriamento rápido que antecede as operações de trabalho a frio, às quais se seguem o envelhecimento em temperaturas relativamente baixas. Em alguns casos o cobalto é utilizado juntamente com o berílio em algumas ligas.

Tanto o selênio como o telúrio podem ser adicionados em pequenos teores para a obtenção de uma liga de baixos teores e alta usinabilidade e trabalhabilidade a quente, ao mesmo tempo mantendo boa resistência mecânica e condutividade elétrica.

Propriedades como densidade, coeficiente de expansão térmica, condutividades térmica e elétrica, temperaturas solidus e liquidus, entre outras, são consideradas propriedades físicas das ligas de cobre, porque dependem basicamente da composição química das ligas, ao passo que propriedades como dureza, resistência mecânica, resistência à fadiga, tenacidade, entre outras, são fortemente dependentes das condições de tratamentos termomecânicos, razão pela qual são consideradas como propriedades mecânicas das ligas.

O coeficiente de expansão térmica varia com a temperatura e ligeiramente com a composição química. A resistividade elétrica e sua recíproca condutividade térmica variam bastante com a variação da composição química, embora também sejam afetadas pelo trabalho mecânico (a condutividade é reduzida). O módulo de elasticidade em tração e o módulo de rigidez são afetados pela variação de composição química até certo grau. A razão de Poisson para as ligas de cobre trabalhadas é de aproximadamente 0,33.

Define-se como tira o material laminado com até 4,775 mm de espessura e até 508 mm de largura. Chapa é o material com até 4,775 mm de espessura e largura superior a 508 mm. Barra é o material com espessura acima de 4,775 mm e largura até 304,8 mm. E placa é o material com mais de 4,775 mm de espessura e largura superior a 304,8 mm.

O recozimento é definido em diferentes graus (têmperas) de acordo com o tamanho de grão nominal definido em microns: 100, 70, 50, 35, 25 e 15. Têmperas de laminação ou trefilação (trabalho a frio): 1/8 duro, 1/4 duro, 1/2 duro, duro, extraduro, mola e extramola. Têmperas de trabalho a quente (acabado a quente) incluem como laminado a quente e como extrudado.

A resistência à tração é a propriedade mecânica básica como referência para produtos laminados e a resistência ao escoamento a 0,5 % de extensão ou alongamento sob carga é geralmente aceita para ligas de cobre. A redução em área sob ensaio de tração é um indicativo de trabalhabilidade a frio e embora muitas vezes não seja um requisito especificado, é de interesse geral e freqüentemente determinada. Dentro de certos limites, dependendo da composição química e da têmpera do material, a resistência ao cisalhamento apresenta certa correspondência com a resistência à tração. Também dentro de certos limites a dureza Rockwell pode ser correlacionada com o tamanho de grão e com a resistência à tração. A resistência à fadiga, determinada por ensaios cíclicos em bastões ou tiras também é relevante para certas aplicações, bem mais do que a resistência à compressão, por exemplo. A resistência à fluência adquire certa importância em aplicações em altas temperaturas.

A entidade responsável pela regulamentação dos requisitos (composição química e propriedades mecânicas) para diversos tipos de aplicações de diferentes tipos de ligas de cobre é a ASTM (American Society for Testing Materials). No caso das ligas de cobre essas normas da ASTM geralmente iniciam pela letra B, como a B 122, por exemplo [3].

b) Trabalho a quente das ligas de cobre

Define-se como trabalho a quente a deformação (elástica e plástica) realizada acima da temperatura de recristalização, que geralmente é a primeira etapa no processo de fabricação de produtos à base de liga de cobre, por ser o método mais econômico de reduzir grandes espessuras. O trabalho a quente não resulta em encruamento no cobre ou nas ligas de cobre quando é feito o resfriamento até a temperatura ambiente. Entretanto, ocorrem algumas transformações de fase durante o trabalho a quente: alguns constituintes sofrem transformação

térmica como consequência do resfriamento e estas transformações podem produzir considerável endurecimento, mas de um modo geral o trabalho a quente se diferencia do trabalho a frio por não envolver encruamento. A dificuldade experimental de analisar metais em alta temperatura desfavorece o estudo das características do trabalho a quente, mas de um modo geral é possível dizer que grandes deformações podem ser obtidas com o emprego de menores forças durante o processamento e sem encruamento significativo no metal ou liga.

Uma vez obtida boa qualidade no produto fundido, como um tarugo, uma placa, ou qualquer outra forma, a qualidade do produto final depende diretamente da qualidade do produto trabalhado a quente, como um vergalhão, uma chapa grossa ou qualquer outro, uma vez que é praticamente impossível eliminar nas etapas seguintes de trabalho a frio, defeitos originados durante o trabalho a quente. Assim, é de fundamental importância o projeto e todas as demais características dos equipamentos para trabalho a quente de metais e ligas, desde os equipamentos de transporte e manuseio até os de aquecimento e de deformação a quente propriamente dita. As deformações que correm durante operações como laminação a quente e extrusão são tão complicadas que o projeto de um equipamento para tais operações é mais uma arte do que uma ciência.

O cobre e as ligas de cobre em geral podem ser trabalhados a quente por um ou mais dos seguintes processos: laminação, extrusão, perfuração, forjamento e compressão, ou dobramento e conformação. A capacidade do cobre resistir à deformação plástica acima da temperatura de recristalização sem trincar é o critério básico para avaliar a adequação de cada um desses processos. O metal ou liga que trinca excessivamente é considerado como um material que apresenta fragilidade a quente e considerado inadequado para o trabalho a quente. Impurezas e elementos secundários constituem um importante fator que afeta as características de trabalho a quente do cobre e das ligas de cobre. O principal motivo desse efeito é que pequenas quantidades de certos elementos ou compostos intermetálicos levam à formação de fases frágeis de baixo ponto de fusão, que segregam-se, durante a fundição, nos contornos de grãos, reduzindo as forças de coesão entre os cristais da fase matriz.

Conseqüentemente, o metal fragilizado pela presença desse tipo de fase pode ser inadequado ao trabalho a quente ou ter seu processamento a quente limitado a algumas condições específicas. Alguns tipos de processos de fabricação exigem que o metal resista a condições mais severas de rasgamento, tracionamento ou alongamento do que outros, como é o caso da perfuração em comparação com a laminação. Sendo assim, a escolha do processo a ser empregado depende em grande parte das especificações do produto acabado como também da capacidade do metal se adequar a outros tipos de processo que estejam disponíveis.

Temperatura de Trabalho a Quente e seus Efeitos

Existe um intervalo limitado de temperaturas no qual o metal ou liga apresenta as melhores características para o trabalho a quente em um equipamento, dependendo do tipo e processo de fabricação empregado.

A tabela 7.1 mostra os intervalos de temperaturas adequados para a laminação a quente de certas ligas de cobre.

Liga	% de cobre	Temperatura inicial de laminação (° C)	Resistência à tração (MPa)	Alongamento percentual em 50 mm
Cobre eletrolítico	99,92	704 - 871	227	50
Cobre desoxidado	99,95	704 - 871	227	50
Tombac 95-5	95	760 - 871	248	45
Tombac 90-10	90	760 - 871	248	50
Latão vermelho	85	788 - 899	276	50

Latão 80-20	80	788 - 871	310	55
Latão para cartuchos 70-30	70	732 - 816	331	55
Metal de Muntz	60	677 - 788	379	50
Latão naval	62	677 - 788	379	45
Bronze fosforoso	98,7	788 - 871	276	45
Bronze de baixo silício	97,7	732 - 843	276	50
Bronze de alto silício	96	732 - 843	379	60

As temperaturas mostradas na tabela 7.1 servem apenas como referência, já que foram obtidas empiricamente na prática industrial e não possuem caráter científico, podendo variar até certo ponto em função do tipo de equipamento utilizado e das condições operacionais. Quando o cobre e suas ligas são aquecidos em fornos a gás ou óleo obtêm-se boas combinações de temperatura e de controle de atmosfera.

Recomenda-se trabalhar com atmosfera neutra ou ligeiramente redutora, de modo a evitar ou minimizar a formação de óxidos na superfície o produto laminado. Também é importante evitar a fragilização do cobre eletrolítico com gases redutores.

A homogeneização de ligas de cobre deve ser uma prática limitada a determinadas circunstâncias, já que o aquecimento prolongado ou em temperaturas excessivamente altas pode levar à formação de óxidos superficiais, ou mesmo modificar a composição química da liga, como no caso da dezincificação do latão e da formação do eutético Cu-Cu₂O presente entre os grãos do cobre eletrolítico. A formação desse tipo de eutético prejudica o desempenho do material em operações subsequentes de conformação, além de gerar defeitos no produto acabado. O óxido de cobre coalescido durante o aquecimento para a laminação a quente pode causar quebras excessivas no arame trefilado e o surgimento de orifícios em chapas finas ou tiras.

Entretanto, algumas transformações de fase importantes ocorrem durante o aquecimento normal em condições operacionais convencionais de trabalho a quente. Por causa do resfriamento rápido uma grande quantidade de fase alfa é produzida a partir de produtos fundidos contendo uma quantidade variável de fase beta. Durante o aquecimento e o trabalho a quente a fase beta, geralmente presente em ligas contendo entre 65 e 70 % de cobre, é absorvida pela fase alfa majoritária, produzindo-se uma liga monofásica (alfa). Também no trabalho a quente do cobre eletrolítico (ETP) os grãos de cobre relativamente grandes e o eutético posicionado entre eles são deformados e fraturados, de modo que a recristalização do cobre a partir dos núcleos ocorre imediatamente. Durante este processo o eutético desaparece como tal, sendo as pequenas partículas de óxido absorvidas pelos grãos de cobre na vizinhança, ou coalescidos em novos cristais de cobre, distribuindo de modo praticamente uniforme as partículas de óxido (Cu₂O) ao longo do material.

O enxofre no cobre fundido está presente sob a forma de um eutético Cu-Cu₂S, que também desaparece durante o trabalho a quente. As partículas resultantes de Cu₂O e Cu₂S têm a mesma aparência quando observadas em microscópio ótico com iluminação convencional, embora possam ser diferenciadas com luz polarizada, pois neste caso as partículas do óxido aparecem avermelhadas, enquanto as partículas de sulfetos são bem escuras. Embora o teor de oxigênio das amostras trabalhadas e fundidas possa ser o mesmo, ou bem próximo, é preferível descrever o material fundido em termos do teor do eutético Cu-Cu₂O, ao passo que o metal trabalhado deve ser descrito em função do teor de óxido (Cu₂O). A mudança que ocorre na fase óxido durante o trabalho a quente melhora as propriedades físicas (mecânicas), porém reduz a precisão na determinação do teor de óxido durante observação em microscópio ótico.

O cobre sem óxido (OFHC) e o cobre desoxidado (DHP e DLP) não contêm eutético Cu-Cu₂O, porém todos os tipos de cobre comercial contêm uma pequena quantidade de enxofre, em

média de 0,0015 %. Esse enxofre está presente como sulfeto cuproso, formando um eutético semelhante ao óxido, e é modificado do mesmo modo.

Alguns outros constituintes secundários das ligas de cobre podem sofrer transformação de fase dependendo da temperatura de trabalho a quente. Por exemplo, a solubilidade do chumbo no cobre no estado sólido é de cerca de 0,04 % na temperatura habitual de trabalho a quente (800 °C), mas de aproximadamente 0,003 % a 600 °C. Portanto, uma quantidade substancial de chumbo pode precipitar durante a operação de trabalho a quente, ou mesmo durante o resfriamento subsequente. O arsênio e o antimônio se comportam de modo semelhante. É importante controlar a temperatura de trabalho a quente e a velocidade de resfriamento, de modo a minimizar a precipitação de determinados constituintes secundários por causa de seus efeitos sobre a temperatura de recristalização. Em geral o trabalho a quente num intervalo de temperatura que garanta o máximo de solubilidade dos constituintes secundários resultará em menor trincamento, e, quando seguido por um resfriamento rápido, resultará na maior temperatura de recristalização possível para o produto acabado. O arame de cobre trefilado a frio após o trabalho a quente nessas condições resistirá a temperaturas mais elevadas sem amolecer e por períodos mais longos de tempo.

A densidade de praticamente todas as ligas de cobre (e do cobre comercialmente puro) trabalhadas a quente é maior do que a do mesmo tipo de material fundido, devido ao fato de que as cavidades resultantes da contração durante o resfriamento pós-fundição e a porosidade, gerada pela presença de gases, são reduzidas em volume pela compressão associada ao trabalho mecânico. Esse efeito é mais pronunciado nos produtos fundidos por processos tradicionais, como os que utilizam moldes de areia, por exemplo, que são muito menos densos do que os que resultam da fundição contínua. Entretanto, o efeito de eliminação de cavidades e porosidade resultantes da fundição durante o trabalho a quente é apenas parcial, e esses defeitos podem permanecer como bolhas no material trabalhado. A presença de óxidos e outros tipos de inclusões remanescentes da fundição também podem resultar no aparecimento de defeitos no material laminado. Métodos de inspeção, como ensaios não destrutivos, por exemplo, podem ser aplicados ao material fundido de modo que o material defeituoso possa ser descartado antes da etapa de trabalho a quente, minimizando a ocorrência de defeitos no material trabalhado. Evidentemente defeitos muito pequenos, em escala microscópica, podem ser tolerados, dependendo do tipo de aplicação do produto.

A microestrutura dendrítica do cobre e das ligas de cobre fundidos muitas vezes apresenta como característica o encontro de cristais que cresceram a partir de superfícies opostas do molde de fundição, gerando uma interface planar que se constitui numa discontinuidade e portanto numa região frágil, que pode gerar problemas durante o trabalho a quente subsequente. A presença de trincas originárias da fundição em produtos trabalhados a quente muitas vezes não pode ser completamente eliminada por melhorias no processo de fundição, mas muitas vezes essas trincas, sendo muito pequenas, superficiais e localizadas nas extremidades da peça, podem ser eliminadas pelo descarte de parte do material fundido, muito embora tal procedimento deva ser realizado com muito cuidado, pois muitas vezes não é tão simples determinar com exatidão a extensão e profundidade do trincamento. Fundamentalmente trincas superficiais em produtos fundidos são causadas pela contração durante a solidificação, que resulta em tensões internas ou atrito com a superfície interna do molde devido ao movimento do metal no mesmo.

Durante a solidificação algumas peças fundidas trincam na superfície por causa da pressão interna causada pelo metal solidificado superficialmente em torno de um núcleo ainda líquido, assim aumentando a pressão interna acima da resistência mecânica da casca de metal solidificado na superfície, ou devido ao acréscimo de pressão interna causado pelo gás liberado pelo metal líquido do núcleo da peça. No caso do cobre eletrolítico (ETP) o núcleo líquido enriquece-se em eutético à medida que a solidificação avança, de modo que esse excedente de metal líquido acaba por se deslocar para o alto e para fora, formando a exsudação conhecida como "lágrimas" na superfície do produto fundido. Esse problema pode ser minimizado por um projeto adequado das dimensões da peça fundida e do molde e seu revestimento interno, de modo que haja um melhor controle da taxa de resfriamento e das condições de transmissão de calor do metal ao molde, permitindo que a parte mais alta do metal líquido permaneça neste estado, ou que escoe devido à pressão interna, porém de

maneira que a casca superficial de metal líquido tenha se tornado espessa o suficiente para resistir às pressões internas sem trincar. Exsudações são comuns em produto fundidos de bronze (ao estanho e ao silício). É uma prática industrial comum descartar o metal exsudado, porém placas fundidas para laminação a quente freqüentemente trincam nestes locais, produzindo defeitos superficiais.

Trincas produzidas pelo atrito com o molde em geral se devem ao empenamento deste, a irregularidades nas paredes do molde que evitam, ou dificultam, o movimento do metal líquido, ao comprimento excessivo do mesmo, ou devido à fragilidade inerente do metal líquido a uma temperatura próxima do seu ponto de fusão. Este tipo de trinca pode variar em tamanho de uma linha quase invisível a uma abertura totalmente visível que se estende por vários centímetros de comprimento. Em alguns casos, produtos fundidos com trincas muito pequenas e superficiais podem ser processados satisfatoriamente para a produção de material trabalhado a quente, principalmente em alguns casos, como o da extrusão. Porém no caso de laminação a quente as tensões trativas resultantes do próprio processamento levam ao agravamento do trincamento, geralmente resultando em produtos defeituosos.

Efeito da Composição Química no Trabalho a Quente

Cobre Comercialmente Puro e Cobre Ligados

Produtos fundidos em escala piloto com dimensões relativamente pequenas apresentam menor tendência ao trincamento do que peças fundidas com grandes dimensões em escala industrial, principalmente no caso do cobre eletrolítico, que é muito sensível à presença de impurezas. E a presença de determinados tipos de impureza exerce grande influência sobre o limite de tolerância especificado para outros tipos de impureza, como por exemplo a presença do óxido cuproso no cobre eletrolítico (ETP), que determina a tolerância para o chumbo, o bismuto e outras impurezas no caso de laminação a quente.

Outros fatores, como o grau de deformação nos passes de laminação iniciais e as relações de tensões na borda das placas, que, caso sejam excessivos, podem produzir o abaulamento das bordas que se tornam convexas, também influem nas práticas de laminação a quente. Em vista de todos esses fatores, não há um valor único especificado como tolerância para impurezas em ligas de cobre trabalhadas a quente, mas sim vários níveis de tolerância, definidos empiricamente, dependendo do tipo de produto ou processo/equipamento utilizado.

Entretanto, de um modo geral, o processamento a quente do latão monofásico e do cobre comercialmente puro é muito afetado pela presença de bismuto e de chumbo e sendo assim os teores destes elementos devem ser os mais baixos possíveis. Por outro lado, o latão bifásico alfa+beta, de mais fácil processamento a quente, pode tolerar, sem efeitos adversos, maiores teores de chumbo e de outras impurezas. O trincamento é mais comum na laminação a quente e na perfuração do que em outros processos de deformação a quente e assim os produtos fundidos destinados a estes processos devem ser mais puros e fisicamente mais perfeitos do que os que são destinados à extrusão, por exemplo.

Todos os tipos de cobre comercialmente puros podem ser facilmente trabalhados a quente na faixa de 800 a 900 °C por qualquer tipo de equipamento ou método convencionais. Entretanto, o cobre de alta condutividade (OFHC) é laminado a quente geralmente na faixa de 650 a 750 °C, pois neste intervalo ocorre menor oxidação superficial durante o aquecimento da placa e conseqüentemente chapas e tiras de melhor qualidade superficial são produzidas nesta faixa de temperaturas. O cobre-cádmio é geralmente laminado a uma temperatura ainda mais baixa ou deliberadamente resfriado após as reduções de espessura iniciais e mais intensas, de modo a ser acabado com uma microestrutura próxima do que resultaria do trabalho a frio, de modo a se obter uma resistência à tração mais alta do que a que seria obtida mediante uma laminação a quente convencional. Os cobses ligados ao arsênio e ao cromo são laminados em geral na faixa de 800 a 900 °C, porque o cobre-cromo pode endurecer por precipitação se for laminado abaixo de 700 °C e o cobre-arsênio fragiliza-se entre 600 e 700 °C. Ambos esses cobses ligados têm uma tendência maior ao trincamento do que o cobre OFHC em qualquer

temperatura, mas podem ser trabalhados a quente desde que observados os cuidados necessários nesse processamento.

O teor de oxigênio dos cobs eletrolítico, refinado em fogo e do cobre-arsênio varia entre 0,015 e 0,05 % e dentro desta faixa não apresenta efeitos negativos no trabalho a quente. Contudo, a presença do oxigênio altera as características químicas e a solubilidade de outros elementos, afetando desta forma a trabalhabilidade a quente, particularmente no caso da laminação a quente e da perfuração. O grau de fragilização causado pelo arsênio varia com o teor de óxido cuproso (Cu_2O), sendo que o metal mais frágil é aquele que apresenta a maior razão entre os teores de oxigênio e arsênio, isto é, o teor de arsênio mais baixo (0,05 %) com teor de oxigênio mais alto (0,05 %) é o que mais dificulta a laminação a quente.

O efeito fragilizante do chumbo, do bismuto e do antimônio também é influenciado pelo teor de oxigênio, sendo a quantidade máxima permitida aumentada pela presença do oxigênio. Estes elementos, assim como o ferro, o níquel, o enxofre, o selênio e o telúrio, não têm efeito significativo na prática industrial de laminação a quente, desde que seus teores estejam dentro das especificações do cobre, independentemente da presença de oxigênio. Todavia, o cobre refinado a fogo pode conter uma quantidade muito maior de um ou mais destes elementos e conseqüentemente pode trincar no trabalho a quente. Embora o óxido cuproso aumente o teor máximo admissível para a presença da maioria das impurezas no cobre trabalhado a quente, por razões de ordem prática é impossível aceitar um teor de oxigênio acima de 0,05 % no cobre comercial, porque acima desse nível dimui muito a utilidade dos produtos acabados.

Ligas Cobre-Zinco (Latões)

Todos os latões contendo de 33 a 46 % de zinco podem ser trabalhados a quente por um ou mais dos processos convencionais. Os latões beta contendo de 44 a 46 % de zinco e os latões bifásicos alfa + beta contendo de 38 a 44 % de zinco são algumas das ligas de cobre mais facilmente trabalhadas a quente, porém a maior parte dos latões bifásicos e todos os latões beta são extrudados. O trabalho a quente dos latões alfa, abaixo de 38 % de zinco, tem aumentado crescido continuamente desde que o zinco de alta pureza (baixo teor de chumbo) tornou-se comercialmente mais disponível. Um dos motivos é o fato de que estas ligas apresentam fragilidade a quente mesmo se contaminadas por quantidades muito pequenas de chumbo e de bismuto. O trabalho a quente de latões alfa produzidos a partir de cobre e zinco de alta pureza não é complicado, porém a necessidade econômica de refundir sucata pode levar a uma pequena, porém significativa, contaminação, de modo que a maioria das indústrias do ramo especificam com rigor um teor máximo de chumbo e de outras impurezas, com base em sua experiência no processamento destes materiais. Entretanto, como no caso do cobre comercialmente puro e do cobre ligado, essas especificações podem variar significativamente de um fabricante para outro.

A experiência prática e mesmo o trabalho de vários pesquisadores demonstram que o chumbo é uma das impurezas mais nocivas no latão alfa e em geral se aceita como limite máximo um teor da ordem de 0,02 %. Contudo, com um controle preciso de temperatura e de outras variáveis de processamento é possível ultrapassar ligeiramente este limite. Por outro lado, a maioria das indústrias procura trabalhar com limites máximos de chumbo da ordem de 0,015 % ou mesmo menos do que isso, de modo obterem uma margem de segurança em suas operações. No caso de extrusão é possível trabalhar com teores significativamente mais altos, da ordem de 0,05 % para latões alfa.

Do mesmo modo, pequenos teores de bismuto também causam fragilidade a quente nos latões alfa, mesmo milésimos de 1 % causam efeitos muito nocivos. O arsênio, o antimônio e o fósforo podem ser adicionados ao latão como inibidores da dezincificação. Nos teores recomendados (no máximo 0,05 %) esses elementos não apresentam efeitos nocivos no trabalho a quente, principalmente no caso de extrusão de tubos. Os limites de teores de ferro nos latões são determinados por seu efeito no tamanho de grão e outras características de acabamento superficial de produtos e por essas razões não ultrapassam o valor de 0,05 % nos latões alfa. Outras ligas sem chumbo contendo muito mais ferro, como os latões de alta resistência à tração, que contêm 1 % de ferro, apresentam boa trabalhabilidade a quente em

um amplo intervalo de temperaturas. O ferro e o alumínio neutralizam um pouco o efeito fragilizante do chumbo. O latão 60-40 com 1 % de chumbo apresenta trincamento severo nas bordas quando comparado com o latão 60-40 puro, porém a adição de 1 % de ferro à mesma liga reduz significativamente este efeito nocivo. A presença de outros elementos residuais provenientes da matéria-prima (cobre e zinco primários) durante a fundição dos latões, como selênio, telúrio, enxofre e outros, tem efeito desprezível no trabalho a quente dessas ligas. Quase não ocorre mudança na resistência do latão à deformação em altas temperaturas devido a variações na composição química, não havendo necessidade de alterar equipamentos nem seqüências de reduções, embora a temperatura de pré-aquecimento deva ser variada entre 650 e 850 °C para a obtenção de melhores resultados, dependendo da composição química do latão, do processo empregado (laminação, extrusão ou perfuração) e das propriedades físicas desejadas no produto final. De um modo geral as ligas com maior teor de cobre são processadas em temperaturas mais elevadas.

Ligas Cobre-Níquel (cuproníqueis)

Todas as ligas binárias de cobre e níquel, conhecidas como cuproníqueis), contendo de 4 a 30 % de níquel, são trabalhadas a quente por laminação e extrusão, porém necessitam de melhor controle de temperatura e a aplicação de maiores cargas (pressões) do que o cobre comercialmente puro.

Essas ligas são fragilizadas por pequenas quantidades de chumbo, bismuto e outras impurezas, sendo o limite máximo para o teor de chumbo de aproximadamente 0,05 %. A contaminação por bismuto pode ser evitada pelo uso de cobre e níquel de elevada pureza, resultando em teores de bismuto inferiores a 0,001 % na prática industrial.

Pequenas quantidade de enxofre, da ordem de 0,01 % ou menos, inviabilizam o trabalho a quente do cuproníquel devido à presença do eutético Ni-Ni₃S₂ com baixo ponto de fusão (664 °C), o qual se segrega nos contornos de grãos. O manganês é adicionado para converter esse composto em sulfeto de manganês, o qual se separa em glóbulos, não produzindo efeito fragilizante no trabalho a quente do cuproníquel. O magnésio é adicionado aos cuproníqueis para desoxidá-los, resultando porém apenas em pequenos teores residuais, ao contrário do manganês, que também pode ser adicionado em teores mais elevados como elemento de liga. O enxofre e o oxigênio não costumam acarretar problemas no trabalho a quente dos cuproníqueis, devido á prática industrial usual de usar cobre comercialmente puro como matéria-prima e adicionar magnésio e manganês. O carbono, impureza proveniente da contaminação da sucata usada como matéria-prima por graxas e outros tipos de sujeiras, deve ser limitado em aproximadamente 0,05 % ou menos, devido ao seu efeito adverso em ambas as operações de laminação a quente e a frio. Pra determinados tipos de aplicações, o ferro, o manganês, o cromo, o silício e o alumínio são adicionados, em teores variáveis, porém não costumam acarretar dificuldades na laminação a quente nem na extrusão.

Outro grupo importante de ligas contendo cobre e níquel é o das alpacas, ligas ternárias de cobre, zinco e níquel, que contêm em geral de 10 a 20 % de níquel e 44 a 70 % de cobre, sendo o remanescente principalmente zinco, podendo haver no entanto pequenas adições de manganês. As alpacas podem ser monofásicas (fase alfa) ou bifásicas (alfa+beta) dependendo da proporção entre os teores dos principais elementos de liga.

As alpacas monofásicas contendo 58% ou mais de cobre são menos dúteis e mais sensíveis aos efeitos da temperatura do que os latões monofásicos. Por conseqüência essas alpacas são pré-aquecidas em temperaturas mais elevadas, da ordem de 900 °C. Essas ligas também são afetadas negativamente pela presença de pequenos teores de chumbo e de outras impurezas, do mesmo modo que ocorre com os cuproníqueis, como mencionado anteriormente. E do mesmo modo que ocorre com o latão alfa, o teor máximo de chumbo é limitado em 0,02 %, ou menos, porque a mairora dessas ligas é laminada a quente para a produção de chapas ou tiras.

As alpacas bifásicas alfa + beta, contendo 6 a 18 % de níquel e 38 a 45 % de zinco, como os latões correspondentes, podem ser trabalhadas a quente por extrusão e forjamento em um

amplo intervalo de temperaturas. A liga contendo 45 % de zinco possui boas características de trabalho a quente, mas o aumento do teor de níquel torna a liga menos extrudável.

O fósforo prejudica a trabalhabilidade a quente dessas ligas, devendo ser evitado o uso de sucata contendo cobre desoxidado com fósforo como matéria-prima na fundição. O chumbo não afeta a extrudabilidade, mas prejudica seriamente o comportamento da liga em forjamento. Outros elementos como manganês, silício e ferro, dentro dos limites especificados na prática industrial, não apresentam efeitos adversos na extrusão nem no forjamento.

Bronze de estanho e bronze fosforoso

A maioria das ligas cobre-estanho produzidas industrialmente e, entre essas, praticamente todas as que são produzidas por trabalho mecânico, contém fósforo em teores de 0,02 a 0,35 %, e por este motivo são conhecidas como bronzes fosforosos.

Se o estanho for adicionado ao cobre que contém óxido cuproso, desoxidará o cobre, mas formará óxido de estanho, que permanece como inclusões no material fundido. Por isso, uma quantidade suficiente de fósforo é adicionada ao cobre para desoxidá-lo antes da adição de estanho, deixando um teor mínimo de 0,015 % de fósforo em excesso. Entretanto, um excesso bem maior é frequentemente utilizado para se obter maior resistência à tração e dureza, dependendo da aplicação. A maior parte das ligas destinadas ao trabalho a quente contém de 1,5 a 11 % de zinco, porém já foram trabalhadas a quente ligas com até 16 % de estanho.

A fase alfa, que é o principal constituinte das ligas comerciais, é relativamente frágil em altas temperaturas e, adicionalmente, podem estar presentes complexos cobre-estanho-fósforo metaestáveis com baixo ponto de fusão. Outras impurezas, como chumbo, bismuto e antimônio, mesmo em pequenos teores possuem um efeito adverso nas propriedades dessas ligas. Como resultado de todos esses fatores os bronzes fosforosos são considerados as ligas de cobre mais dificilmente trabalhadas a quente.

Os bronzes com menor teor de estanho, da ordem de 1,5 a 7 ou 8 %, podem ser trabalhados a quente mais facilmente do que os bronzes com maior teor de estanho, mas necessitam de cuidadoso e prolongado pré-aquecimento em um intervalo estreito de temperaturas para que se obtenha bons resultados no trabalho a quente. Os bronzes fosforosos podem ser laminados a quente, forjados e extrudados, desde que com os cuidados necessários, porém a exigência de altas pressões de extrusão e laminação leva obrigatoriamente ao uso de equipamentos com grande capacidade.

Na extrusão o bronze fosforoso se comporta de maneira muito diferente do latão e da maioria das outras ligas de cobre e além da elevada pressão, necessita de uma boa combinação de temperatura e velocidade, por um lado, e de composição química e formato, por outro, de modo a se evitar o trincamento a quente ou mesmo a desintegração do produto extrudado. Em especial as temperaturas e velocidades de extrusão muito elevadas são particularmente nocivas. A temperatura máxima de trabalho a quente é determinada essencialmente pelos teores de estanho e de fósforo, que quanto mais baixos permitem temperaturas mais altas.

Uma faixa de temperaturas adequada para a laminação de um bronze contendo 1,25 % de estanho e 0,1 % de fósforo é de cerca de 800 a 850 °C, enquanto para o bronze contendo 7 % de estanho e 0,1 % de fósforo já seria necessário um intervalo de temperaturas muito inferior. Por causa da alta pressão necessária, é vantajoso operar o mais próximo possível do valor máximo permitido para cada liga e formato. Devido às dificuldades impostas por teores crescentes de estanho e fósforo, atualmente o processo se limita a ligas com no máximo 8 % de estanho e 0,25 % de fósforo. Os bronzes de baixo teor de estanho, até 5 %, e abaixo de 0,1 % de fósforo, podem ser extrudados com velocidade controlada entre 800 e 850 °C, aproximadamente. Na prática industrial os limites máximos permitidos para o chumbo e o bismuto geralmente são os mesmos estabelecidos para o cobre desoxidado de alta pureza, e, adicionalmente, apenas estanho de mais alta pureza é utilizado como matéria-prima, de modo a minimizar a presença de elementos nocivos como antimônio, arsênio e outros.

Bronzes de silício (Cu-Si)

Os bronzes de silício são ligas monofásicas contendo de 1,5 a 3,25 % de silício e de 0,15 a 1,25 % de manganês e podem ser trabalhados a quente por laminação, extrusão e forjamento. Pequenas adições de zinco e de estanho podem ser feitas para aplicações especiais sem efeito adverso nas características de trabalho a quente.

Estas ligas possuem alta resistência mecânica em elevadas temperaturas e por isso são trabalhadas a quente em temperaturas mais próximas possíveis ao limite superior do intervalo no qual são dúteis. As temperaturas de pré-aquecimento variam de 850 a 900 °C. Pequenos teores de impurezas causam fragilidade a quente, do mesmo modo que ocorre com as ligas monofásicas alfa contendo zinco e níquel, por isso adota-se os mesmos limites empregados para estas ligas. O teor máximo de chumbo permitido é de 0,02 % ou menos, embora na extrusão possa ser tolerado um teor bem mais alto.

Bronzes de alumínio (Cu-Al)

As características de trabalho a quente dos bronzes de alumínio são muito semelhantes às dos latões (Cu-Zn). As ligas beta, contendo de 9 a 11 %, com variadas combinações de teores de níquel, manganês e ferro, possuem boas características de trabalho a quente, como os latões beta, podendo ser laminadas, extrudadas e forjadas num amplo intervalo de temperaturas, sem apresentar fragilidade até cerca de 950 °C no máximo. Assim como ocorre no caso dos latões, as ligas alfa e alfa + beta podem ser laminadas a quente ou extrudadas se os teores de chumbo e bismuto forem baixos. O níquel, o manganês e o ferro são adicionados a essas ligas sem efeito adverso nas características de trabalho a quente. O chumbo pode ser adicionado como elemento de liga no caso da produção de peças forjadas para serem usinadas, embora tais peças não possam ser laminadas a quente devido à incidência de trincamento severo, que não corre de modo tão significativo na extrusão.

Características do Processo de Laminação a Quente

A maior parte dos produtos laminados a quente é processada a partir de placas pesando entre 300 kg e 1 ton, apenas uma pequena parte do total é laminada a partir de placas pesando até 5 ton. Exemplos de resumos de procedimentos operacionais de laminação a quente:

Cobre comercialmente puro: placas fundidas com 102 x 610 x 838 mm³ pesando cerca de 454 kg são reduzidas para cerca de 9,65 mm de espessura em 13 passes de laminação.

Latão 70-30: placas fundidas com 114 x 635 x 1500 mm³ pesando cerca de 907 kg são reduzidas para cerca de 9,65 de espessura em 13 passes de laminação.

O laminador duplo é preferido para operações de desbaste, porque neste caso porque placas de espessura mais uniforme podem ser produzidas a uma velocidade maior, e, quando o equipamento dispõe de rolos específicos para bordas, a quantidade de perdas de processo é menor (menor geração de aparas/sucata). É necessária a refrigeração por água para evitar o superaquecimento dos rolos e manter o contorno dos mesmos. Também é necessário o uso de óleo solúvel (emulsão de óleo em água) para amenizar o contato entre os rolos e o metal que está sendo processado, de modo a evitar que o óxido que se formou na superfície do metal saia desta e fique aderido à superfície dos rolos.

Como a escala de produção das ligas de cobre é bem menor do que a dos aços, para superar a limitação de número de diferentes larguras de placas torna-se necessária a realização de laminação cruzada (laminar primeiro em uma direção e em seguida na direção perpendicular) para obter uma maior variação de larguras de chapas laminadas.

Após o último passe de laminação as chapas são decapadas em solução ácida, lavadas em água e escovadas, sendo então niveladas em uma operação contínua, após o que são enviadas para os equipamentos de laminação a frio.

Laminação de Produtos Não Planos

Esses tipos de laminadores utilizam rolos côncavos que permitem reduzir as dimensões padronizadas de vários tipos de vergalhões ou barras. Nos rolos de desbaste as barras passam completamente por uma concavidade antes de entrarem na próxima concavidade numa direção reversa. As reduções em área para cada concavidade devem estar cuidadosamente proporcionadas de modo a evitar que o metal entre em excesso nas mesmas, causando problemas. Por este motivo o tamanho das concavidades dos rolos é modificada para a laminação de certas ligas, especialmente o metal de Muntz, o latão naval e o cobre OFHC, já que estes se espalham mais do que o cobre eletrolítico (ETP).

O resfriamento dos rolos é feito por jatos d' água, que são direcionados para as concavidades dos rolos em velocidade suficiente para remover qualquer partícula de óxido formado nos vergalhões ou nos rolos.

Extrusão

O processo de extrusão consiste em aquecer o tarugo cilíndrico metálico em um intervalo de temperaturas nas quais o mesmo apresenta elevada plasticidade, colocar este tarugo no container cilíndrico de uma prensa hidráulica de alta pressão e forçar este tarugo através de um ou mais orifícios de uma matriz.

Entre os motivos para o crescimento da produção de extrudados está a qualidade superficial dos produtos superior àquela obtida por laminação ou perfuração, a produção de formatos mais complexos e a maior facilidade de extrudar ligas que apresentam fragilidade a quente durante laminação ou perfuração. As dimensões dos tarugos destinados à extrusão variam de 117 de diâmetro e 178 mm de comprimento a 25 mm de diâmetro e 762 mm de comprimento (pesando 363 kg) nas grande prensas horizontais.

Há vários tipos de fornos para aquecimento de tarugos em uso, todos com capacidade suficiente para aquecer o material a uma temperatura uniforme, porém em muitos casos a temperatura do tarugo é verificada pelo uso de um pirômetro de radiação laser antes de ser colocado no container da prensa de extrusão. A capacidade das prensas fica, em geral, entre 2500 e 7500 toneladas. Prensas verticais são usadas exclusivamente para a produção de tubos com paredes finas, pois permitem fabricar mais facilmente tubos concêntricos. Entretanto, com manutenção adequada e o uso de tarugos perfurados no centro, é possível produzir tubos com paredes finas em prensas horizontais, com tolerâncias entre 10 e 15 % de espessura.

Existem dois tipos básicos de métodos de extrusão: direta e inversa.

Na extrusão direta o tarugo é impelido, em uma de suas extremidades, por um êmbolo que força o metal através do orifício (ou orifícios) de uma matriz colocada na extremidade oposta. Nesse método o tarugo move-se para frente à medida que a extrusão ocorre.

Na extrusão inversa a matriz e o êmbolo são posicionados na mesma extremidade da prensa, de modo que não há movimento do tarugo em relação ao container. Neste método o metal escoar através da matriz e para fora da prensa por meio de uma abertura no êmbolo.

O método direto é preferido e mais usado para cobre e ligas de cobre, embora as diferentes características do método indireto possam favorecer seu uso com o objetivo de reduzir as perdas causadas por defeitos como "canal" e segregação, assim como devido aos requisitos menos exigentes de capacidade (pressão) da prensa, já que neste caso não existem cargas friccionais causadas pelo atrito da superfície lateral do tarugo com as paredes internas do container.

Na extrusão direta a partir de tarugos sólidos o bloco de contato (pisa usada entre a superfície da extremidade do êmbolo e a superfície da extremidade do tarugo) deve ser cerca 6 mm menor em diâmetro do que o interior do container, de modo que essa peça possa cisalhar através do tarugo, deixando livre a casca superficial oxidada do tarugo.

Na extrusão o escoamento do metal ocorre de um modo que depende de alguns fatores tais como o projeto da matriz e do bloco de contato, o teor de cobre da liga, a lubrificação e outras variáveis, porém numerosos estudos comprovaram que o metal escoava primeiro da posição central do tarugo, emergindo da matriz com uma microestrutura razoavelmente semelhante à do tarugo fundido. O atrito na parede do container retarda o escoamento na superfície externa lateral do tarugo, resultando em um perfil de escoamento caracterizado por maior avanço na região central do material.

Durante a extrusão a microestrutura do material é gradualmente refinada, resultando em variação do tamanho de grão ao longo do comprimento do tubo ou perfil extrudado, variação essa que é acompanhada por correspondentes variações de propriedades físicas/mecânicas. Por consequência algumas ligas extrudadas necessitam de trabalho a frio e recozimento para a obtenção uniformidade de propriedades físicas/mecânicas.

O escoamento do metal ao longo do orifício da matriz pode ocorrer de duas maneiras distintas, dependendo da permanência, ou não, da casca superficial do tarugo no local, de encontro à parede cilíndrica do container. Num container não lubrificado ligas como o latão e o cuproníquel escoam diagonalmente para o orifício da matriz, enquanto as partes periféricas do tarugo são arrastadas no corpo do tarugo e levadas para baixo entre as paredes do tubo extrudado. Num container lubrificado o metal escoava do final do tarugo através da matriz e as partes periféricas do tarugo não são arrastadas para o corpo do tarugo do mesmo modo que ocorre no outro caso. Na prática industrial todos os tipos de cobre escoam como descrito no caso do container lubrificado, independentemente da aplicação ou não de lubrificante, devido à presença de uma camada superficial de óxido que atua como lubrificante para o cobre, enquanto que no caso do cobre sem essa camada superficial de óxido o escoamento se assemelha ao do latão. Já o escoamento do latão revestido por cobre oxidado se assemelha ao deste, uma vez que este fenômeno é puramente superficial.

O tipo de escoamento é importante, porque determina a quantidade, a localização e o tipo de defeitos de extrusão encontrados no produto final.

A lubrificação (com grafite e óleo na matriz e no mandril, por exemplo) não é aplicada no container quando a extrusão tem por objetivo deixar uma casca, porque tem por objetivo manter a camada circunferencial do tarugo no local, enquanto o bloco de contato cisalha para fora e extrude o metal situado embaixo.

A extrusão com geração de casca é a prática mais comum, uma vez que a camada superficial de óxido no tarugo e defeitos menos importantes são minimizados significativamente no produto final extrudado. Nas extremidades de todo produto extrudado aparecem defeitos e por esse motivo essas extremidades devem ser cortadas, de modo que, após inspeção visual, o produto final não apresente tais defeitos. Quando não é feita a lubrificação o defeito mais comum é a segregação na extremidade do produto sólido ou delaminações na parede do tubo como resultado da oxidação superficial do tarugo que escoava para o interior no bloco de contato e finalmente para o interior do produto extrudado. Quando é feita a lubrificação os defeitos mais comuns são bolhas ou inclusões de impurezas na superfície. No escoamento do latão em container lubrificado e do cobre com ou sem lubrificação esses defeitos do tarugo aparecem na superfície externa do produto extrudado e não entre as paredes.

A pressão necessária para a extrusão varia com a temperatura, com a razão de extrusão, com o formato da matriz, com a composição da liga metálica que está sendo extrudada e com outras variáveis menos significativas, porém as variáveis mais importantes para uma liga específica são a temperatura e a razão de extrusão. Na prática industrial essa pressão pode variar entre 170 e 965 MPa, sendo o valor mais alto o necessário para extrudar bronze fosforoso e Cu-Si.

O ciclo de pressão começa no valor máximo e cai gradualmente até o final, quando ocorre um súbito acréscimo. Neste momento a extrusão é interrompida porque necessitaria de uma imensa pressão para forçar uma pequena quantidade de material remanescente através da matriz, e, além disso, esse material, como comentado anteriormente, teria que ser sucateado devido à excessiva presença de defeitos. A velocidade de extrusão tem um efeito relativamente

pequeno sobre a pressão na prática industrial, já que economicamente a operação de extrusão necessita da velocidade mais alta possível, porém compatível com a qualidade do produto final. Geralmente a velocidade é limitada pelo formato do produto extrudado, por causa do surgimento de trincas transversais em pequenos intervalos da superfície do produto extrudado, que podem ser evitadas com a diminuição da temperatura dos tarugos, embora também possam ser causadas por defeitos na matriz ou por velocidade excessiva.

Características comuns a vários tipos de matrizes de extrusão são um adocamento na entrada da matriz (para evitar que o tarugo fique “preso”), um formato angular na entrada e um alívio angular na extremidade posterior. Essas características fundamentais variam dependendo do formato do produto extrudado, da composição química da liga, e da experiência prática no tipo de processo empregado.

Forjamento

O forjamento a quente é definido como a conformação do metal por um único golpe, ou vários golpes repetidos, de um martelo ou prensa numa matriz com formato definido. Muitas ligas de cobre, especialmente as do tipo beta ou alfa + beta podem ser forjadas, concentrando-se a maior demanda em latões particularmente os de alto teor de chumbo destinados à usinagem posterior. Os latões de alta resistência mecânica, as alpacas e os bronzes de alumínio também podem ser trabalhados a quente por forjamento.

A maioria das peças forjadas possuem pequenas dimensões e são fabricadas a partir de aparas geradas em outros processos como, por exemplo, a extrusão. O processo de forjamento consiste basicamente em aquecer a matéria-prima em pequenos fornos de pré-aquecimento próximos ao martelo ou prensa, colocar a matéria-prima dentro da matriz (de aço endurecido) e submeter esse material a um ou mais golpes do martelo ou da prensa de alta capacidade, de modo que o metal escoe sob compressão e preencha todos os contornos da matriz. Qualquer excesso de metal, denominado “rebarba”, é posteriormente cortado, assim como perfurado para gerar cavidades. Este processo é muito usado para a fabricação de cápsulas de munição, peças de refrigeração, de automóveis, de aviões, de encanamentos e outros componentes. Estas peças geralmente têm formato irregular e cavidades num plano e geralmente necessitam de usinagem para a eliminação das rebarbas. É um processo mais econômico (menor geração de sucata) do que a fundição e geralmente produz uma microestrutura mais favorável do ponto de vista das propriedades mecânicas do material.

Os martelos de forjamento variam de 450 a 2270 kg, enquanto as prensas variam de 90 a 1135 kg. Prensas de parafuso e de manivela são usadas para formatos simétricos que combinam forjamento e pequenas extrusões na mesma operação. O forjamento por martelamento é especialmente útil para formatos assimétricos ou quando se necessita de dobramento e conformação. As matrizes têm que dispor de inclinações suaves, com ângulo entre 1 e 7° que permitam a retirada da peça forjada e essa inclinação é maior no caso do martelamento. Matrizes de impressão múltipla são usadas por motivos econômicos quando o projeto e o tamanho da peça permitem. Deve ser prevista no projeto da peça forjada a contração volumétrica associada ao resfriamento. O número de peças que podem ser forjadas numa única matriz depende de vários fatores, como, por exemplo, o tipo de aço usado na matriz e as tolerâncias permitidas nas dimensões da peça. A vida útil de uma matriz de forjamento de ligas de cobre varia em geral entre 5.000 e 100.000 peças. As matrizes são lubrificadas com óleo e grafite de modo a facilitar o escoamento do metal e evitar a aderência e o superaquecimento da matriz. As peças forjadas podem ter tolerância dimensional estreita, da ordem de + 0,127 mm, embora quanto mais estreita a tolerância, menor a vida útil da matriz, então na prática trabalha-se com tolerâncias da ordem de 0,254 mm [3].

c) Trabalho a frio das ligas de cobre

O trabalho a frio das ligas de cobre é aquele realizado em temperaturas mais baixas, ou seja, desde a temperatura ambiente até temperaturas inferiores à temperatura de recristalização do metal. Em geral verifica-se que a quantidade de deformação à frio que pode ser imposta ao material é limitada, uma vez que com o acúmulo da deformação plástica (encruamento) o

material torna-se cada vez mais frágil, aproximando-se do ponto no qual ocorre a falha por fratura. O metal pode ser restaurado para uma condição em que esteja adequado ao trabalho a frio posterior somente se for feito um tratamento térmico de recozimento, para a eliminação do encruamento através da recristalização.

Durante a deformação a frio os grãos do metal tornam-se mais alongados e progressivamente mais distorcidos. Quando o grau de deformação é elevado até mesmo a visualização em microscópio é complicada por causa da pequena variação do efeito do ataque metalográfico. Quando há contato entre a superfície da ferramenta e a superfície do metal, esta torna-se lisa, porém quando não ocorre esse contato, pode haver uma certa rugosidade na mesma, porque cada cristal individual deforma-se de um modo diferente. O grau de rugosidade depende do tamanho do grão e essa rugosidade afeta o acabamento superficial de peças polidas para aplicações específicas.

Quando se analisa a possibilidade de trabalhar a frio um determinado metal ou liga, deve-se levar em conta os efeitos do trabalho a frio em sua ductilidade e resistência mecânica, havendo uma correlação entre as variações de cada propriedade mecânica. Em geral as propriedades diretamente relacionadas com a resistência mecânica, como a dureza, a resistência à tração e a resistência ao escoamento, aumentam com o aumento do grau de deformação a frio, ao passo que diminuem as propriedades diretamente relacionadas com a utilidade, como a redução em área e o alongamento.

As propriedades relacionadas com a ductilidade são máximas e as que estão relacionadas com a resistência mecânica são mínimas quando o material está totalmente recozido. As taxas de encruamento, indicadas por curvas tensão x deformação e similares, são bons indicadores das propriedades de embutimento profundo. Com poucas exceções a taxa de encruamento varia proporcionalmente com o estado inicial de recozimento de uma liga. As ligas que apresentam taxa de encruamento mais elevadas são as ligas de maior resistência mecânica e mais refratárias como o bronze de alumínio e o bronze de silício. Uma das exceções a esta regra geral é o cuproníquel, que embora seja uma das ligas de cobre mais duras, no caso do cuproníquel 70 % Cu – 30 % Ni encrua a uma taxa inferior à dos latões amarelos.

Embora tenha havido muito progresso tanto na laminação a quente como na laminação a frio de ligas de cobre nas últimas décadas, permanecem alguns problemas de trincamento no que se refere ao desbaste de certas ligas como latões com chumbo e bronzes fosforosos, que ainda não pode ser feito a quente, devendo ser feito obrigatoriamente a frio, uma vez que, para serem desbastadas a quente, determinadas ligas devem apresentar teores mais baixos possíveis de determinados elementos como o chumbo. Como a máxima redução possível de espessura no desbaste de ligas de cobre limita-se a 50 ou no máximo 65 %, recozimentos intermediários devem ser feitos para evitar o surgimento de trincas.

Em geral o desbaste conclui-se quando a placa original teve sua espessura reduzida para um valor em torno de 10 mm, quando então começa a preocupação com o acabamento superficial da chapa laminada, que só não existe para poucas aplicações, como, por exemplo, o uso de chapas de cobre em telhados. A operação de desbaste exige que o metal seja fresado na superfície em cerca de 0,25 a 0,50 mm da espessura, garantindo a remoção dos óxidos formados durante a laminação a quente. Laminadores de desbaste típicos trabalham com chapas de até 625 mm de largura e velocidades de até 210 m/min. Valores típicos de diâmetro dos rolos dos laminadores estão entre 11 e 60 mm.

Além da laminação propriamente dita, outras operações complementares são realizadas no produto laminado a frio, tais como o achatamento, o nivelamento, e o corte (não somente de aparas descartadas, mas também para a produção de fitas a partir das chapas finas). O corte é feito em tesouras de cisalhamento automatizadas, que devem ter capacidade suficiente para garantir um corte reto e em ângulos retos. O encruamento resultante da operação de corte é muito pequeno. Para reduzir a distorção e efeitos de dobramento, alargamento e enrolamento, são utilizados carretéis que bobinam e rebobinam as tiras, cuja espessura pode ser no máximo 6 mm.

Além da laminação de produtos planos, a laminação a frio de produtos não planos (barras, vergalhões e etc) é igualmente importante, e é uma alternativa ao processo de trefilação no caso de bitolas mais estreitas. Entretanto, em qualquer caso, a deformação a quente (extrusão ou laminação a quente de não planos) antecede a deformação a frio.

Algumas ligas de cobre, como os bronzes fosforosos com teor de estanho superior a 4 %, bronzes fosforosos com chumbo, as alpacas (com e sem chumbo) e as ligas Cu-Be, só podem ser processadas a frio, desde o desbaste até o acabamento. Então a laminação desses produtos não planos é muito usada como operação de desbaste a frio destas ligas. Operações típicas de desbaste reduzem espessuras da ordem de 19 mm para cerca de 6 mm. A velocidade de saída do arame atinge um valor máximo de 55 m/min numa bobinadora de 600 mm instalada na saída do laminador. Podem ser obtidas reduções de espessura de até 80 % na maioria das ligas de cobre, embora naquelas que contêm chumbo o valor máximo fique em torno de 70 %.

O método mais comum de acabamento de vergalhões e arames de ligas de cobre é a operação de trefilação. O material inicialmente extrudado, laminado a quente ou a frio, é submetido a um ou mais passes de trefilação para acabamento, com recozimentos intermediários. Após o acabamento as bobinas são retificadas e cortadas no comprimento ideal. Na trefilação são usados lubrificantes como sabão, sebo e gordura animal em geral. As fieiras (matrizes de trefilação) podem ser feitas de aço trabalhado e endurecido ou de carbeto sinterizados, no caso de processamento de ligas mais duras. O acabamento a frio é fundamental para que se atinja as tolerâncias dimensionais exigidas para determinadas peças.

Os equipamentos de trefilação em geral possuem de 5 a 17 fieiras. As velocidades de saída dos arames atingem de 450 a 2400 m/min, valores mais altos no caso de arames mais finos. A trefilação inicial reduz a espessura de 6 para até 1,3 mm, envolvendo reduções da ordem de 25 a 30 %. Em geral, para determinadas ligas reduz-se a espessura em até 90 % antes do recozimento, embora em outras esta redução limite-se a 25 %, dependendo das características de encruamento da liga. O cobre comercialmente puro suporta maior grau de deformação, o latão um grau menor, e o bronze um grau ainda menor.

O cobre e muitas de suas ligas, como por exemplo os latões, são adequadas à operação de embutimento. O cobre apresenta alta ductilidade, porém tenacidade relativamente baixa e uma taxa de encruamento também baixa, o que pode ser nocivo em alguns casos. É um metal que suporta elevados graus de deformação antes do recozimento, porém requer um certo número de recozimentos no caso do embutimento profundo com o objetivo de gerar peças com paredes muito finas. Para aplicações que exijam embutimento muito profundo o cobre OFHC, por permitir maior redução em área do que o ETP (eletrolítico), deve ser preferencialmente utilizado, diminuindo a necessidade de um recozimento intermediário. A redução de área deve ser minimizada no caso de cobre e latões com baixos teores de zinco (5 a 10 %), uma vez que o recozimento também deve ser controlado rigorosamente para evitar crescimento excessivo de grão. No recozimento do cobre eletrolítico deve ser evitado o uso de atmosferas que contenham hidrogênio, que apresenta um considerável efeito fragilizante sobre este tipo de cobre comercialmente puro.

Já no embutimento do latão amarelo, com maiores teores de zinco e maior resistência mecânica, é possível obter maiores reduções de área/espessura de parede antes de que seja necessário fazer um recozimento, da ordem de 30 a 45 % de redução em área entre cada recozimento, embora a razão de redução seja decrescente, do tipo 3,5 – 3,5 – 3 – 2. É importante que a redução de diâmetro seja acompanhada por uma considerável redução de espessura, uma vez que esta última é fundamental para garantir a diminuição das tensões residuais, o que é essencial para minimizar a ocorrência de corrosão sob tensão, principalmente quando não é feito um recozimento final para alívio de tensões.

As ligas mais duras, como os bronzes fosforosos e de silício, também podem ser submetidas ao embutimento. Entretanto, um bom controle de bitola nessas ligas requer que sejam aplicadas menores reduções do que as aplicadas nos latões, assim como cuidados para evitar a formação de óxidos abrasivos durante o recozimento.

A operação de formação de copos no embutimento deve ser feita num prensa de dupla ação onde a ferramenta externa corta a chapa e aplica a pressão necessária para segurá-la, ou numa prensa de ação única, na qual a pressão necessária para segurar a chapa é fornecida por suportes de borracha. Copos de maior bitola, como os de cartuchos de munição, são feitos em prensas de ação única sem seguradores de chapa, e a pressão aplicada deve ser suficiente para evitar o enrugamento, mas não tão forte para resistir ao natural engrossamento do flange que ocorre durante a formação do copo, uma vez que isso levaria diminuiria a espessura do fundo do copo, levando a uma eventual fratura. Os raios da matriz e da ferramenta de punção não podem ser muito pequenos (agudos) e as matrizes devem permanecer razoavelmente polidas. Os raios da matriz devem ser aproximadamente 5 a 10 vezes superiores à espessura da chapa. As ferramentas de puncionamento não devem ser polidas e sim ásperas o suficiente para manter o controle do metal.

O segundo estiramento/embutimento é feito em prensas de ação única, com reduções da ordem de 30 %. Estas podem incluir grandes reduções de espessura de parede e pequenas reduções de diâmetro ou vice-versa, começando a partir de chapas grossas ou finas apropriadas. Geralmente o embutimento envolve uma combinação dessas duas condições. No embutimento leve e nas operações e segundo embutimento os melhores lubrificantes são os sabões com várias concentrações. No embutimento profundo é necessário o uso de pastas de sabão contendo partículas sólidas, como, por exemplo, talco. A facilidade de remoção é uma característica importante para o uso desses lubrificantes [3].

Tratamentos térmicos e recristalização

a) Tratamentos Térmicos

Os tratamentos térmicos abordados a seguir compreendem somente aqueles ciclos de aquecimento e resfriamento que produzem mudanças de estado de tensões ou alterações microestruturais significativas, que resultam em mudança de propriedades físicas em geral e mecânicas em particular, as quais definem o campo de aplicação do material. Sendo assim, estão excluídos do escopo deste texto os ciclos de aquecimento e resfriamento relacionados única e exclusivamente com o trabalho a quente.

Os principais tipos de tratamentos térmicos aplicados ao cobre e suas ligas são os seguintes:

- (1) – Recozimento com o propósito de amolecer um material encruado como consequência do trabalho mecânico. Além da recuperação inicial, resulta em recristalização, e, em casos de tempo prolongado e/ou temperatura elevada, crescimento de grão.
- (2) – Tratamento térmico de alívio de tensões para evitar corrosão sob tensão acarretada por tensões residuais. É realizado em temperaturas inferiores à temperatura de recristalização, portanto abaixo da temperatura na qual ocorre significativo amolecimento no material.
- (3) – Homogeneização para dissolver segregação de elementos em determinados locais e promover, por difusão, sua distribuição de modo mais uniforme por todo o material. As ligas que exigem esse tipo de tratamento contêm níquel e estanho.
- (4) – Tratamento de solubilização e endurecimento por precipitação: aplica-se a um determinado grupo de ligas de cobre, as ligas cobre berílio (Cu-Be). Estas ligas contêm até 2 % de berílio e podem apresentar também pequenos teores de níquel, cobalto ou cromo

Recozimento

O recozimento com o propósito de amolecer o material encruado por deformação mecânica pode produzir diferentes graus de amolecimento, dependendo do tempo e da temperatura nos quais este material é tratado. Quanto maior a temperatura e mais longo o tempo, maior o

amolecimento obtido. O parâmetro mais utilizado para avaliar o grau de amolecimento obtido pelo recozimento é a mensuração do tamanho de grão. Valores de dureza Rockwell também podem ser utilizados como referência, porém como informação complementar e aproximada. Isso se deve ao fato de que o tamanho de grão é uma variável mais sensível à variação das condições de têmpera do que outras características metalúrgicas como as propriedades determinadas por ensaios mecânicos tais como resistência à tração, alongamento, redução em área ou dureza Rockwell.

A tabela 8.1 apresenta a relação entre tamanho de grão e trabalhabilidade a frio para o cobre e suas ligas. Essa tabela é mais adequada no caso dos latões com maior teor de zinco, como o 65-35 e o 70-30, uma vez que latões com menores teores de zinco são mais dúteis e não encruam tão rapidamente com o trabalho a frio. Em geral o tamanho de grão de 0,035 mm (35 m) é considerado aceitável para o embutimento profundo de ligas de cobre com μ teor de cobre mais alto.

Tabela 8.1 – Tamanho de Grão de Ligas de Cobre Recozidas x Tipo de Operação de Conformação Recomendada.

Tamanho de Grão Nominal (mm)	Operação de Conformação Recomendada
0,015	Operações de conformação muito leves
0,025	Embutimento não profundo
0,035	Embutimento mais profundo combinado com razoável qualidade de acabamento superficial
0,050	Operações de embutimento profundo
0,070	Embutimento muito profundo com bitolas espessas

A tabela 8.2 apresenta uma correlação entre tamanho de grão e dureza.

Tabela 8.2 – Tamanho de Grão x Dureza.

Têmpera	Tamanho de Grão (mm)		Dureza Rockwell			
			Escala F		Superficial (15-T)	
	Mínimo	Máximo	Mínimo	Máximo	Mínimo	Máximo
Recozimento total	Totalmente recristalizado	-	-	65	-	68
Embutimento profundo (0,025 mm nominal)	Totalmente recristalizado	0,050	30	75	44	73

A tabela 8.3 apresenta os requisitos de tamanho de grão para placas, chapas e tiras de diferentes tipos de latões.

Tabela 8.3 – Tamanho de grão em função da liga.

Liga	Nominal	Tamanho de Grão (mm)	
		Mínimo	Máximo
210	0,050	0,035	0,090
	0,035	0,025	0,050
	0,025	0,015	0,035
95 Cu – 5 Zn	0,015	Totalmente recristalizado	0,025
220	0,050	0,035	0,090
	0,035	0,025	0,050
	0,025	0,015	0,035
90 Cu – 10 Zn	0,015	Totalmente recristalizado	0,025

230	0,070	0,050	0,100
	0,050	0,035	0,070
	0,035	0,025	0,050
	0,025	0,015	0,035
85Cu – 15Zn	0,015	Totalmente recristalizado	0,025
240	0,070	0,050	0,120
	0,050	0,035	0,070
	0,035	0,025	0,050
	0,025	0,015	0,035
80Cu – 20Zn	0,015	Totalmente recristalizado	0,025
260 e 270	0,120	0,070	-
	0,070	0,050	0,120
	0,050	0,035	0,070
	0,035	0,025	0,050
70Cu-30Zn	0,025	0,015	0,035
e	0,015	Totalmente recristalizado	0,025

Tabela 8.4 – Dureza Rockwell em função do tamanho de grão.

Tabela 8.4 – Dureza Rockwell em função do tamanho de grão.

Tamanho de Grão Nominal Resultante do Recozimento (mm)	Dureza Rockwell – somente valores aproximados de referência			
	Escala F		Escala 30-T superficial	
	Mínimo	Máximo`	Mínimo	Máximo
Liga 210 (95Cu – 5Zn)				
0,050	40	52	-	4
0,035	47	54	-	7
0,025	50	61	1	17
0,015	54	65	7	23
Liga 220 (90Cu – 10Zn)				
0,050	50	60	1	16
0,035	54	64	7	21
0,025	58	70	13	31
0,015	62	75	19	39
Liga 230 (85Cu – 15Zn)				
0,070	53	60	6	16
0,050	56	63	10	20
0,035	58	66	13	24
0,025	60	72	16	34
0,015	62	79	19	48
Liga 240 (80Cu-20Zn)				
0,070	53	64	2	21
0,050	57	67	8	27
0,035	61	72	16	35
0,025	63	77	20	42
0,015	66	83	25	50
Ligas 260 (70Cu-30Zn) e 270 (65Cu-35Zn)				

0,120	50	62	-	21
0,070	52	67	3	27
0,050	61	73	20	35
0,035	65	76	25	38
0,025	67	79	27	42
0,015	72	85	33	50

Tratamento de Alívio de Tensões

As ligas de cobre trabalhadas a frio são suscetíveis à corrosão sob tensão mesmo em temperaturas e atmosferas/ambientes comuns. Esse tipo de degradação é acelerado em ambientes que contêm amônia e é mais comum em ligas que contêm mais de 10 % de zinco. O latão naval e o latão com alumínio são especialmente suscetíveis.

O alívio de tensões é obtido mediante aquecimento adequado ou flexão mecânica. Frequentemente uma combinação de aquecimento e de ação mecânica é o método mais efetivo para aliviar tensões. O aquecimento para alívio de tensões é feito de maneira lenta e uniforme e em temperaturas inferiores à temperatura de recristalização da liga. A flexão mecânica é feita ao se submeter o material encruado ao endireitamento ou achatamento em máquinas que realizam esses tipos de operação em vergalhões, tubos, placas e chapas.

Homogeneização

Homogeneização é o tratamento térmico que consiste em aquecer um peça por longo tempo (horas) em temperaturas relativamente elevadas para eliminar ou minimizar a presença de segregação (de determinados elementos químicos ou fases) através da difusão de átomos.

Os latões comuns acima de 70 % de cobre não apresentam segregação significativa, porém os latões entre 58 e 70 % de cobre apresentam razoável quantidade de fases secundárias segregadas nos produtos fundidos. Os bronzes de estanho com teor de estanho de até 8 % apresentam considerável segregação, que se forma durante o resfriamento através do intervalo de temperaturas que corresponde à solidificação. Sendo assim, é necessário um rigoroso tratamento de homogeneização destas ligas por várias horas a 760 °C antes de submeter estes materiais fundidos ao trabalho a frio, de modo que seja evitado o surgimento de trincas. Também é necessário homogeneizar cuproníqueis e alpacos, ligas também suscetíveis à segregação em produtos fundidos. Durante o trabalho a frio de latões comuns são necessários repetidos recozimentos até se chegar ao produto acabado. Estes recozimentos repetidos removem qualquer traço de segregação no produto final.

Solubilização e Endurecimento por Precipitação

Muito comum entre diversos tipos de ligas de alumínio, entre as ligas de cobre este tipo de tratamento praticamente se restringe às ligas cobre-berílio.

Padrões de Qualidade Superficial

O critério básico para o acabamento superficial do material resultante do tratamento térmico é a economia do acabamento do material. Por exemplo, uma chapa de metal com tamanho de grão de 0,050 mm apresentará efeito “casca de laranja”, que é a rugosidade resultante de tamanho de grão grosseiro semelhante a uma casca de laranja, a qual inviabiliza o uso da chapa em operações de estampagem e embutimento destinadas à produção de peças cujas aplicações exigem excelente acabamento superficial (superfície mais lisa possível). O mesmo tipo de chapa com tamanho de grão da ordem de 0,025 mm já não apresenta esse efeito indesejável, necessitando de menor trabalho de acabamento superficial para atingir a qualidade superficial desejada. Como a operação de acabamento geralmente é mais custosa do que a obtenção de grão mais fino, normalmente opta-se pela redução do tamanho de grão para uma faixa ideal.

Outro aspecto importante é a ausência de manchas, que podem exigir a realização de limpeza, a qual ataca ligeiramente a superfície do material, exigindo maior trabalho de polimento para atingir a qualidade superficial necessária para certas aplicações. Uma importante fonte causa do surgimento de manchas é o uso de lubrificantes durante as operações de conformação mecânica do material, os quais causam manchas durante o tratamento térmico posterior. Normalmente o custo final é menor quando se realiza uma operação de limpeza antes do tratamento térmico, ou mesmo uma limpeza adicional após o tratamento.

A presença de óxidos, em geral formados durante a fundição ou durante o tratamento térmico, também compromete a qualidade superficial do material, podendo resultar em diversos tipos de defeitos no produto final. Entretanto, a realização de operações de usinagem, como fresagem, por exemplo, evita, ou pelo menos minimiza a presença de defeitos oriundos da presença de óxidos.

Fatores que afetam o Tratamento Térmico

O primeiro requisito é a uniformidade da têmpera. Já foi mencionado que o tamanho de grão é a grandeza padrão para determinar a têmpera. Outro aspecto a ser considerado é o acabamento superficial, que determina o tipo de forno, combustível, atmosfera protetora e limpeza a ser realizada antes e após o aquecimento. A temperatura especificada determina o tipo de forno, se de construção leve ou pesada, o tipo de combustível e o tipo de controles necessários. A temperatura também afeta o acabamento. Lubrificantes usados no processamento do metal podem ser queimados em temperaturas elevadas, deixando um depósito que adere à superfície, enquanto baixas temperaturas não permitem a queima completa dos óleos, exigindo a limpeza do metal antes do tratamento térmico. O recozimento em baixa temperatura se constitui em uma ajuda considerável ao recozimento limpo de ligas contendo zinco.

O tempo durante o qual o material é mantido no forno é determinado pela massa a ser aquecida e pelo método de carregamento. De um modo geral quanto menos tempo o material permanece no forno, mais limpo ele estará ao término do aquecimento. O uso de ventiladores, que promovem a circulação forçada de ar em câmaras de aquecimento e de resfriamento, pode reduzir o tempo dessas operações em até 30 %.

Atmosferas Protetoras

Atmosferas protetoras para o recozimento limpo são utilizadas no forno para evitar/minimizar a oxidação do material recozido durante os ciclos de aquecimento e resfriamento. Cobre comercialmente puro e ligas de cobre que não contêm zinco podem ser facilmente recozidas de modo limpo (sem deixar manchas).

Devido ao fato de que o cobre e suas ligas não são facilmente oxidados por vapor d' água nem por CO₂, têm sido usadas atmosferas protetoras de vapor, de gás parcialmente queimado e de carvão de lenha parcialmente queimado por muitos anos.

Ligas de cobre e zinco necessitam de decapagem mesmo após o uso de atmosferas protetoras, porque o zinco difunde para a superfície, causando descoloração e um depósito que aumenta o desgaste da ferramenta em operações de conformação subseqüentes. Essa dificuldade é aumentada pelo alto teor de zinco, pelas altas temperaturas de recozimento e por longos períodos de aquecimento e de resfriamento. O latão para cartuchos apresenta grande dificuldade para ser recozido sem deixar manchas.

É prática usual hoje em dia fazer um recozimento sem manchas de cobre, cuproníquel, bronze fosforoso ou outra liga que não contém zinco sem posterior decapagem e limpeza. A alpaca contendo 20 % de zinco é uma exceção e pode ser recozida sem manchas em fornos contínuos nos quais os ciclos de aquecimento e resfriamento são de curta duração.

O enxofre provoca o surgimento de manchas nessas ligas e portanto deve ser mantido em teores muito baixos. Se o material apresentar uma superfície suja como decorrência de oxidação prévia, decapagem insuficiente ou queima de lubrificantes, certamente também

apresentará uma superfície suja após o recozimento. Os melhores resultados são obtidos quando o material é submetido a uma limpeza antes do recozimento. Cloretos provocam o surgimento de manchas e embora não sejam encontrados usualmente, podem aparecer como resultado do uso de algumas soluções de limpeza usadas antes ou depois do recozimento. O material deve ser inserido no forno a uma taxa constante e razoável de modo a assegurar que os produtos de combustão sejam suficientes para carrear todo o ar não queimado. Geradores de atmosferas protetoras para suplementar gases dos queimadores do forno constituem-se em uma expressiva ajuda à operação desse tipo de forno, particularmente durante o carregamento ou esvaziamento do forno.

De um modo geral, a maneira pela qual o material deve ser aquecido depende da liga, da forma, da quantidade, da uniformidade e do acabamento requeridos para o produto e do tipo de forno no qual o mesmo é aquecido.

Crítérios para a Seleção de Novos Fornos, Equipamentos e Combustíveis

Na escolha do tipo de forno mais adequado ao tratamento térmico das ligas de cobre o fator mais importante de todos é o tipo de combustível a ser utilizado, pois envolve economia, disponibilidade, controle automático e teor de enxofre. Ligas com alto teor de cobre são manchadas pelo contato com o enxofre proveniente do combustível. Em geral o óleo apresenta maior disponibilidade do que o gás, mas, por outro lado, acarreta problemas relacionados à presença de enxofre. É um combustível insatisfatório para fornos com controle automático, porque os queimadores são mais suscetíveis a problemas, necessitando de atenção e manutenção constantes. Para temperaturas inferiores a 600 °C é complicado manter um controle de chama quando se usa esse tipo de combustível, sendo a fumaça resultante uma autêntica fonte de perturbações.

A ASTM (American Society for Testing and Materials) especifica um limite máximo de teor de enxofre de 0,50 % para óleos destinados ao uso como combustíveis em fornos para aquecimento de tarugos e barras, e de 0,20 % para óleos usados como combustíveis em fornos utilizados para recozimento final.

O gás é um combustível mais satisfatório que o óleo, por causa da menor necessidade de manutenção de queimadores e do melhor controle automático, especialmente para temperaturas mais baixas. O tratamento de alívio de tensões de ligas de cobre é realizado freqüentemente em temperaturas tão baixas como 200 °C.

O enxofre também acarreta problemas quando presente no gás manufaturado, e quanto menor o teor de enxofre, melhor o acabamento superficial. Acredita-se que o enxofre, quando completamente queimado num forno aberto, não manche o cobre e suas ligas. Muitos fornos utilizam chama aberta em suas câmeras. O propano e o butano liqüefeito podem ser usados com resultados relativamente satisfatórios.

Queimadores com tubos radiantes podem ser usados em fornos cujo combustível é o gás, porém é necessária a convecção forçada para garantir a uniformidade do aquecimento. O custo pode ser inferior ao da energia elétrica e praticamente o mesmo dos fornos que utilizam gás diretamente queimado.

A eletricidade é usada no aquecimento de modo muito satisfatório, porém a um custo em geral mais elevado do que o do óleo e o do gás. Apresenta como inegável vantagem a inexistência dos problemas relacionados à presença de enxofre. No caso do forno aquecido por energia elétrica é essencial o uso de ventiladores para garantir a convecção forçada necessária para assegurar a uniformidade do aquecimento. O calor em geral é fornecido por barras (resistores) colocadas no interior do forno.

Há vários sistemas de aquecimento que utilizam o próprio tubo ou arame fino de latão para promover o aquecimento destes materiais, usando a própria resistência elétrica dos mesmos. Porém o aquecimento por indução de cobre e latões é geralmente limitado a algumas aplicações específicas, como a brasagem e a soldagem de estruturas.

Determinação do Tratamento Térmico para Usos Específicos

Só há um modo seguro para determinar o tempo, a temperatura e o volume de carga necessários para garantir uniformidade de tratamento, que é o registro dos intervalos de tempo e de temperaturas relacionadas entre a superfície e o interior das peças aquecidas. Para qualquer temperatura final ocorre pouco crescimento de grão após a primeira hora de aquecimento. Pequenos objetos apresentam pouca diferença de temperatura entre a superfície e o interior, de modo que a uniformidade de aquecimento pode ser obtida ao ser manter a temperatura por períodos relativamente curtos.

Variações devido a composição, impurezas, lubrificantes, emissividade térmica superficial, bitola, balanço térmico no forno e outros fatores, são todas causas de não uniformidade quando o tempo de aquecimento é curto. Evidentemente ciclos térmicos mais longos, minimizam esses efeitos.

A uniformidade do tratamento térmico deve ser considerada conjuntamente com o custo necessário para mantê-la. Os tratamentos térmicos de menor custo são realizados com altos gradientes térmicos, cargas pesadas e ciclos curtos. Esse tipo de tratamento requer menor investimento na capacidade do forno por unidade de massa de material tratado, produzindo maior rotatividade de material. Entretanto, é esperado que o custo da uniformidade de tratamento e da qualidade superficial sejam compensados pela economia alcançada durante as operações de conformação e de acabamento [3].

Recristalização e Controle do Tamanho de Grão no Cobre e suas Ligas

A rugosidade da superfície do material aumenta com o crescimento do grão. Outra propriedade afetada pelo tamanho de grão é a resistência à fluência (deformação em elevadas temperaturas), que aumenta com o aumento do tamanho de grão. A resistência à fadiga e à corrosão sob tensão também são afetadas pelo tamanho de grão.

O tamanho de grão pode ser determinado por diferentes métodos de metalografia quantitativa. Um deles é o método comparativo, pelo qual uma imagem micrográfica da amostra é comparada com um padrão estabelecido pela ASTM. Outro método utilizado com a mesma finalidade é o dos interceptos, no qual o tamanho de grão é definido a partir do número de interseções que os contornos dos grãos fazem com uma linha horizontal com comprimento definido na norma relativa a esse tipo de ensaio. Embora seja um método mais lento, costuma ser mais preciso do que o método comparativo. Além disso, atualmente, com o avanço dos sistemas de processamento digital de imagens, o uso de programas computacionais específicos permite ainda melhorar essa precisão simultaneamente com uma redução acentuada do tempo de determinação do tamanho de grão.

Os valores nominais dos tamanhos de grãos no cobre monofásico (alfa) usualmente variam entre 0,015 e 0,120 mm, porém em geral o tamanho de grão máximo de uma mesma amostra atinge cerca de duas vezes o tamanho de grão mínimo.

Tamanho de Grão dos Latões (Ligas Cobre-Zinco)

De um modo geral entre os latões a ductilidade sempre aumenta com o aumento do tamanho de grão, porém esse efeito é ainda mais intenso nas ligas com maior teor de zinco, ao contrário do cobre comercialmente puro, que não mostra esse aumento de ductilidade com o tamanho de grão, podendo até mesmo apresentar decréscimo de ductilidade para valores mais altos de tamanho de grão.

A resistência à fadiga e a razão entre resistência à fadiga e resistência à tração aumentam com o decréscimo do tamanho de grão. Entretanto, para níveis de deformação da ordem de reduções de espessura em laminação entre 37 e 60 % a razão entre resistência à fadiga e resistência à tração praticamente não varia com o tamanho de grão prévio.

Os latões com maior teor de zinco são suscetíveis à corrosão sob tensão e essa susceptibilidade varia com o tamanho de grão, sendo maior quando o tamanho de grão é menor.

A condutividade elétrica das ligas de cobre monofásicas recozidas praticamente não é afetada pelo tamanho de grão e conseqüentemente pela temperatura de recozimento, porém o mesmo não corre com cobres comercialmente puros, como o eletrolítico e em geral cobres contendo oxigênio: a condutividade ótima é obtida ao se realizar o recozimento numa determinada faixa restrita de temperaturas. A condutividade elétrica do cobre recozido aumenta com a temperatura de recozimento até aproximadamente 500 °C e em seguida diminui. Isso não é exatamente um efeito do tamanho d grão, mas sim da variabilidade da solubilidade do oxigênio e de impurezas em geral no cobre.

Ao contrário dos latões, para outras ligas de cobre, como os bronzes ao estanho e fosforosos, não há tanta necessidade de rigoroso controle do tamanho de grão. Estas ligas á base de cobre e estanho são usadas freqüentemente na condição de trabalhadas a frio. Não importando o teor de estanho do bronze, quanto maior o tamanho de grão, no intervalo de 0,015 a 0,050 mm, menor a resistência á tração e maior o alongamento (medida de ductilidade).

Entre os cobres comercialmente puros, o eletrolítico (ETP ou C110) é o que apresenta a mais baixa temperatura de recristalização, o que é esperado devido ao alto grau de pureza e o efeito do oxigênio sobre outras impurezas. A presença de prata, mesmo residual, provoca aumento na temperatura de amolecimento. O cobre OFHC (C102, de alta condutividade e sem oxigênio) apresenta maior temperatura de amolecimento do que o ETP, devido ao fato de que, na ausência de oxigênio, as impurezas residuais, mesmo desprezíveis no que concerne às aplicações do material, causam um pequeno efeito de endurecimento por solução sólida, elevando a temperatura de amolecimento. Este efeito é ainda mais pronunciado nos cobres que contêm fósforo, como o DLP e o DHP (C 120 e C122). Em geral os cobres comercialmente puros sofrem recristalização completa em temperaturas relativamente baixas, porém a taxa de crescimento de grão com o aumento da temperatura de recozimento é baixa. Em temperaturas intermediárias é comum aparecerem grãos com diferentes tamanhos misturados. Isso torna o controle de tamanho de grão dos cobres comercialmente puros bem mais complicado do que o dos latões, nos quais o crescimento de grão é mais consistente em todo o intervalo de temperaturas de recozimento. Quanto maior o grau de deformação, mais alta será a temperatura na qual ocorrerá o crescimento rápido de grão. O cobre de elevada pureza que é submetido a um grau de deformação muito elevado (95 a 97,5 % de redução em espessura) recristaliza à temperatura ambiente após longo tempo. Por exemplo, o cobre eletrolítico trefilado 84 % recristaliza em cerca de 50 % após aproximadamente 6000 horas a 150 °C e recristaliza completamente a 200 °C em poucas horas. O cobre sem oxigênio severamente deformado apresenta características muito semelhantes às do cobre eletrolítico no que diz respeito à recristalização e às características de amolecimento (ao contrário do mesmo cobre recozido), devido à variabilidade das pequenas porém importantes quantidades de impurezas nesse tipo de cobre. O cobre com fósforo severamente deformado apresenta características de recristalização e amolecimento intermediárias entre às do cobre com arsênico e os cobres eletrolítico e sem oxigênio.

Os latão monofásico (alfa) com 67 % de cobre e 33 % de zinco ao ser laminado em diferentes graus de deformação, de 13 a 75 %, não amolece abaixo de 200 °C. A aproximadamente 200 °C o mesmo material laminado com redução de espessura de 75 % apresenta um certo amolecimento. Para uma redução de 56 % o amolecimento inicial ocorre a 250 °C. As curvas individuais de amolecimento coincidem a cerca de 330 °C e mantêm essa mesma relação em temperaturas mais elevadas, concluindo-se assim que a condição final resultante do recozimento é independente da deformação prévia.

Quando o latão 70-30 laminado em 50 % e recozido por 20 minutos a 800 °C e então laminado em vários graus diferentes e recozido por 30 minutos num certo intervalo de temperaturas, verifica-se que a recristalização pode ser constatada em temperaturas cada vez mais baixas à medida que o grau de deformação aumenta, sendo que os grãos primeiramente recristalizados tornam-se cada vez menores. O tamanho de grão em temperaturas mais baixas diminui à medida que o grau de deformação a frio prévio aumenta. Em temperaturas mais altas este efeito desaparece.

No latão 68-32 ocorre significativa dispersão nos valores finais de tamanho de grão resultantes de temperaturas de recozimento mais baixas. No intervalo mais baixo o tamanho de grão final aumenta com o aumento do tamanho de grão inicial, dificultando a obtenção de grãos finos ao final do processo quando os grãos iniciais são muito grandes.

Outro fator importante para o resultado final de tamanho de grão é a taxa de aquecimento. O tamanho de grão do latão aumenta com o aumento do tempo de recozimento, porém a temperatura final atingida no recozimento é de maior importância do que o tempo de manutenção da temperatura. O tamanho de grão médio pode ser aproximadamente dobrado por um aumento de 25 vezes no tempo de recozimento numa dada temperatura.

A temperatura para início de recristalização ou amolecimento de uma ampla variedade de latões contendo de 5 a 35 % de zinco apresenta pouca variação para diferentes condições de processamento. Entretanto, a temperatura de amolecimento de ligas contendo de 0 a 40 % de zinco aumenta até atingir um valor máximo para 5 % de zinco e depois cai suavemente com o aumento do teor de zinco. A temperatura necessária para produzir um dado tamanho de grão aumenta com o teor de cobre até 90 %.

Efeito das Impurezas no Recozimento do Latão

A solubilidade, no estado sólido, do ferro no latão é pequena, porém varia muito para um dado intervalo de temperaturas: 0,05 % a 500 °C, 0,15 % a 600 °C e 0,3 % a 700 °C. O efeito do ferro no tamanho de grão do latão depende essencialmente da condição em que este elemento se encontra: em solução sólida ou formando uma segunda fase (partícula intermetálica) que restringe o crescimento de grão. Até um teor de ferro de no máximo cerca de 0,012 % esse efeito de restrição não ocorre no latão 70-30. Acima desse limite ocorre uma acentuada restrição no tamanho de grão, principalmente quando a temperatura de recozimento é inferior a aproximadamente 650 °C.

No latão 65-35 ocorre diminuição do tamanho de grão até um teor de ferro de 0,05 %. Entretanto, deste valor até 0,08 % ocorre uma substancial recuperação do tamanho de grão e um acentuado decréscimo do tamanho de grão para teores de ferro mais elevados, a não ser que o recozimento seja efetuado em temperaturas muito altas. A acentuada restrição ao crescimento de grão, que ocorre nas temperaturas mais baixas se deve ao efeito das partículas que contêm ferro e atuam como obstáculos ao movimento dos contornos de grãos e a inexistência deste efeito em temperaturas mais altas se deve à dissolução dessas partículas (solubilização do ferro) nestas temperaturas mais elevadas. Deste modo, com o aumento da temperatura reduz-se o efeito do ferro como inibidor do crescimento de grão do latão. O material destinado ao embutimento ou estampagem deve apresentar teor de ferro de no máximo 0,02 %, uma vez que teores da ordem de 0,03 % já são suficientes para inibir fortemente o crescimento do grão.

O cromo é pouco solúvel no cobre e nas ligas de cobre no estado sólido e assim apresenta um pronunciado efeito de inibir o crescimento do grão de latão, principalmente em teores inferiores a 0,01 %.

O fósforo também é outro inibidor do crescimento de grão nos latões, porém acima de 770 °C esse efeito pode ser reduzido, mesmo quando o teor de fósforo é elevado. No latão 70-30 um teor de fósforo de 0,005 % já reduz o tamanho de grão de 0,100 para 0,060 mm.

O alumínio em teores de até 0,13 % quase não influi no tamanho de grão, no amolecimento ou na recristalização. Acima de 0,13 % o alumínio já passa a atuar como inibidor do crescimento de grão no latão.

O chumbo pouco afeta o amolecimento inicial, porém retarda consideravelmente o crescimento de grão dos latões, mesmo para teores tão baixos como 0,06 %. Como o limite de solubilidade do chumbo no latão é muito baixo em diferentes temperaturas, inferior a 0,02 %, a restrição ao crescimento de grão se deve às partículas de chumbo que atuam como obstáculos ao movimento dos contornos de grãos.

O manganês, quando presente em teores de até 0,13 %, apresenta um efeito insignificante no amolecimento inicial e na recristalização. Quando o grão é maior, esse efeito é menos insignificante.

O níquel também em teores de até 0,13 % não apresenta nenhum efeito no amolecimento inicial, na recristalização nem no crescimento de grão subsequente. O silício, mesmo em teores tão baixos como 0,017 % apresenta um acentuado efeito de retardamento do amolecimento inicial e da recristalização dos latões. O grau de retardamento desse amolecimento inicial parece ser diretamente proporcional ao teor de silício, embora acima da temperatura de recristalização completa não haja efeito significativo.

O estanho, quando presente em teores de até 0,096 % não apresenta efeito no amolecimento e no crescimento de grão em temperaturas baixas e moderadas. A 610 °C é perceptível um efeito de retardamento, porém modesto e não significativo, com o aumento do teor de estanho.

Quando o ferro e o fósforo estão presentes em teores significativos nos latões, os efeitos de retardamento do amolecimento, da recristalização e do crescimento de grão são ainda mais acentuados dos que ocorrem com cada elemento isoladamente. Isso se deve à formação de compostos químicos pelos elementos (impurezas) como o Fe₂P. A solubilidade deste fosfeto de ferro é muito pequena em muitas temperaturas, entre as quais as temperaturas de recozimento dos latões. O crescimento de grão já sofre uma considerável restrição para teores tão baixos como 0,01 % Fe e 0,03 % P. Acima de 0,018 % Fe e 0,05 % P não ocorre aumento do efeito de inibir o crescimento de grão com o aumento do teor dessas impurezas. A combinação Fe-P, embora pouco afete o amolecimento, retarda significativamente a conclusão da recristalização. O fósforo é adicionado intencionalmente a alguns latões de alto teor de cobre, como o 90-10, por exemplo, para melhorar a qualidade dos produtos fundidos, mas isso simultaneamente introduz dificuldades no recozimento do mesmo material trabalhado a frio. O efeito restritivo ao crescimento de grão torna-se pronunciado à medida que o teor de ferro cresce acima de 0,004 % para a temperatura de recozimento de 566 °C. A 649 °C o efeito restritivo é menor, porém se desenvolve uma microestrutura de grãos mistos quando o teor de ferro é de 0,05 % e o de fósforo de 0,02 %, devido à parcial solubilização do ferro e do fósforo. Outras ligas de cobre também apresentam não uniformidade de tamanho de grão devido à presença de ferro e fósforo.

O níquel e o fósforo juntos, do mesmo modo que ocorre com o ferro e o fósforo, podem ser adicionados a ligas de cobre com o propósito de obter o efeito de endurecimento por precipitação, sendo que a solubilidade desses elementos em temperaturas de recozimento moderadas é baixa. Nos latões o crescimento e grão é significativamente retardado pela presença simultânea desses dois elementos., sendo esse efeito mais pronunciado do que o causado pela presença do fósforo somente, principalmente em temperaturas mais baixas, e os resultados são semelhantes aos alcançados com a presença de ferro e fósforo nos latões.

Embora a presença do níquel sozinho não acarrete nenhum efeito de restrição ao crescimento de grão nos latões, quando adicionalmente o silício está presente (em teores de até 0,07 % conjuntamente com teor de níquel da ordem de 0,014 %), ocorre significativo retardamento do amolecimento e do crescimento de grão. Esse efeito pode ser atribuído à formação de uma segunda fase do tipo siliceto de níquel, que se dissolveria em temperaturas acima de 650 °C. Entretanto, o recozimento a 540 °C produz uma microestrutura com tamanhos de grãos mistos.

A presença simultânea do berílio (0,041 %) e do ferro (0,062 %) afeta o amolecimento, aumenta a temperatura de recristalização e restringe acentuadamente o crescimento de grão. Como o teor de ferro da ordem de 0,062 % não é suficiente para aumentar a temperatura de recristalização significativamente, e seu efeito de restrição ao crescimento de grão é apenas moderado, o efeito observado quando ambos os elementos estão presentes nestes teores pode ser atribuído tanto à presença do berílio somente como também à combinação berílio-ferro.

Prática Comercial de Recozimento das Ligas de Cobre

Os fornos normalmente utilizados no recozimento das ligas de cobre são classificados como fornos de batelada, semicontínuos e contínuos. A energia térmica é fornecida a esses fornos por meio de eletricidade ou combustão de gás ou óleo. Este último combustível é mais usado para o recozimento de metais nas etapas iniciais do processamento. Atualmente a maior parte dos recozimentos é feita com controle de atmosfera, de modo a se obter superfícies com excelente acabamento, do tipo brilhante, semibrilhante ou “limpo”, sendo muito pequena a necessidade de decapagem. Materiais como cobre e cuproníquel podem ser recozidos para se obter acabamento brilhante sem necessidade de limpeza ou decapagem. Já os latões com maiores teores de zinco são mais freqüentemente acabados com superfície semibrilhante ou “limpa”, necessitando de uma leve etapa de decapagem.

O recozimento “brilhante” do cobre contendo oxigênio (C110 = ETP, por exemplo) é realizado em temperatura igual ou inferior a 480 °C. Esta restrição de temperatura é necessária para evitar a fragilização por hidrogênio desse tipo de cobre, que ocorre em temperaturas mais altas devido á presença de hidrogênio na atmosfera redutora do forno.

O tempo necessário para aquecer uma peça metálica num ciclo de recozimento varia consideravelmente de acordo com o tipo de forno e do seu modo de operação, podendo variar de alguns poucos minutos no caso de fornos contínuos a várias horas no caso de alguns fornos de batelada. Além desses limites estão os poucos segundos necessários para o aquecimento por resistência elétrica de tubos condensadores individuais de latão e a curta imersão de alguns tipos de materiais em banhos de sais fundidos.

A taxa de aquecimento nos equipamentos comerciais comuns não é de grande importância para atingir um determinado tamanho de grão final, mas deve ser tomado cuidado para garantir um aquecimento o mais uniforme possível. A transferência de calor é facilitada, particularmente em baixas temperaturas, pelo uso de ventiladores e sopradores. Muitas das peças tratadas não atingem a temperatura nominal do forno, principalmente em fornos contínuos, e essa diferença entre temperatura do forno e temperatura máxima do metal varia de acordo com as condições do forno, porém é controlada. Para um efetivo controle do tamanho de grão é essencial que o forno de tratamento térmico esteja suficientemente calibrado, ou seja, que a temperatura nominal do forno, o tipo e o peso da carga, o tempo de aquecimento , a liga e o tamanho de grão estejam correlacionados.

A tabela 8.5 apresenta valores de temperaturas de recozimento para as ligas de cobre mais utilizadas na prática industrial.

Tabela 8.5 – Temperaturas de Recozimento de Ligas de Cobre

Nome da Liga	Composição Química Nominal (%)	Temperatura de Recozimento (°C)
Cobre Eletrolítico (ETP)	99,92 Cu – 0,04 P	370 - 650
Cobre Desoxidado com Fósforo	99,94 Cu – 0,02 P	370 - 650
Tomback 95-5	95 Cu – 5 Zn	425 - 790
Tomback 90-10	90 Cu – 10 Zn	425 - 790
Latão Vermelho 85-15	85 Cu – 15 Zn	425 – 730
Latão Vermelho 80-20	80 Cu – 20 Zn	425 – 705
Latão para Cartuchos	70 Cu – 30 Zn	425 – 760
Latão Amarelo	65 Cu – 35 Zn	425 – 705
Metal de Muntz	60 Cu – 40 Zn	425 - 595
Latão Comercial com Chumbo	89 Cu – 1,75 Pb – 9,25 Zn	425 - 650
Latão com Baixo Chumbo (Tubo)	67 Cu – 0,5 Pb – 32,5 Zn	425 - 650
Latão com Baixo Chumbo	64,5 Cu – 0,5 Pb – 35 Zn	425 - 595
Latão com Médio Chumbo	64,5 Cu – 1 Pb – 34,5 Zn	425 - 595

Latão com Alto Chumbo (Tubo)	67 Cu – 1,6 Pb – 31,4 Zn	425 - 595
Latão com Alto Chumbo	62,5 Cu – 1,75 Pb – 35,75 Zn	425 - 595
Latão com Chumbo Extra Alto	62,5 Cu – 2,5 Pb – 35 Zn	425 - 595
Latão de Corte Fácil	61,5 Cu – 3 Pb – 35,5 Zn	425 - 595
Metal de Muntz com Chumbo	60 Cu – 0,5 Pb – 39,5 Zn	425 - 595
Metal de Muntz de Corte Fácil	60,5 Cu – 1,1 Pb – 38,4 Zn	425 - 595
Latão para Forjamento	60 Cu – 2 Pb – 38 Zn	425 - 595
Latão Arquitetônico	57 Cu – 3 Pb – 40 Zn	425 - 595
Latão do Almirantado	71 Cu – 1 Sn – 28 Zn	425 - 595
Latão Naval	60 Cu – 0,75 Sn – 39,25 Zn	425 - 595
Latão Naval com Chumbo	60 Cu – 1,75 Pb – 0,75 Sn – 37,5 Zn	425 - 595
Latão com Manganês	58,5 Cu – 1 Fe – 1 Sn – 0,3 Mn – 39,2 Zn	425 - 595
Latão com Alumínio	76 Cu – 2 Al – 22 Zn	425 - 595
Bronze Fosforoso 5 %	95 Cu – 5 Sn + P	480 - 675
Bronze Fosforoso 8 %	92 Cu – 8 Sn + P	480 - 675
Bronze Fosforoso 10 %	90 Cu – 10 Sn + P	480 - 675
Bronze Fosforoso 1,25 %	98,75 Cu – 1,25 Sn + P	480 - 650
Cuproníquel 70-30	70 Cu – 30 Ni	650 – 815
Alpaca 65-17-18	65 Cu – 17 Zn – 18 Ni	595 - 815
Alpaca 55-27-18	65 Cu – 27 Zn – 18 Ni	595 - 815
Bronze de Alto Silício	94,8 Cu (mínimo) – 3 Si	480 – 705
Bronze de Baixo Silício	96 Cu (mínimo) – 1,5 Si	480 - 675

O recozimento é aplicado em geral ao metal no processo de fabricação após trabalho a frio com redução em espessura da ordem de 35 a 75 %. É necessário cuidado para evitar indesejável ocorrência orientação preferencial de grãos na chapa ou tira, e parcialmente por esse motivo em muitos casos a redução de acabamento é mantida entre 35 e 50 %. É uma prática industrial generalizada realizar recozimentos sucessivos seguindo um padrão de decréscimo do tamanho de grão.

Um procedimento típico de laminação e recozimento de latão (70 Cu – 30 Zn) segue o seguinte esquema:

- 1 – Laminação da placa fundida com 57 mm de espessura para 25 mm.
- 2 – Recozimento até atingir tamanho de grão de 0,105 mm.
- 3 – Laminação até 9,9 mm de espessura.
- 4 – Recozimento até tamanho de grão de 0,150 mm.
- 5 – Laminação leve de correção/revisão até 9, 14 mm.
- 6 – Laminação até 2, 79 mm.
- 7 – Recozimento até tamanho de grão de 0,010 mm.
- 8 – Laminação até 1,32 mm.
- 9 – Recozimento até tamanho de grão de 0,050 mm.
- 10 – Laminação até 0,762 mm.
- 11 – Recozimento até tamanho de grão de 0,030 mm.

Evidentemente o procedimento de laminação e recozimento de outras ligas de cobre apresentam valores de temperatura, tamanho de grão e espessura diferentes, porém seguem o mesmo tipo de esquema [6].

Soldagem e Corrosão

a) Soldagem

O principal fator a ser considerado na soldagem do cobre é sua elevada condutividade térmica, que, se for menosprezada, pode levar ao surgimento de diversos tipos de defeitos de soldagem. Se não forem tomadas medidas adequadas para contrabalançar o rápido fluxo de calor a partir da solda, não será possível obter boas características de fusão, dificultando, por exemplo, a obtenção de plena penetração na raiz da solda e de fusão lateral adequada, gerando um cordão de solda defeituoso.

À temperatura ambiente a condutividade térmica do cobre é aproximadamente 7 vezes superior à do aço, porém a 1000 °C, a condutividade do cobre atinge um valor 10 vezes superior à condutividade do aço na mesma temperatura. Por esse motivo torna-se essencial o pré-aquecimento do cobre antes da operação de soldagem, quando a espessura for superior a cerca de 6 mm. As temperaturas de pré-aquecimento recomendadas variam de 150 a 700 °C, dependendo da espessura, do gás de proteção, da corrente de soldagem e do próprio tipo de processo de soldagem aplicado.

Um elevado valor de corrente de soldagem não exime o material da necessidade do pré-aquecimento, embora neste caso o pré-aquecimento necessário possa ser menos intenso. Por outro lado, uma corrente de soldagem excessiva pode causar turbulência anormalmente intensa na poça de fusão, levando ao surgimento de defeitos de soldagem, como poros e trincas. Por esta razão o valor de corrente de soldagem deve ser ajustado, levando em consideração a espessura do material. Uma vez estabelecido o valor adequado de corrente de soldagem, define-se o nível de intensidade do pré-aquecimento de modo a garantir um adequado grau de penetração na raiz e de fusão lateral, estabelecendo-se assim o tamanho ideal da poça de fusão para uma dada posição de soldagem.

Outra propriedade física do cobre que influi bastante nas condições de soldagem é a sua elevada expansão térmica. Essa expansão provoca o fechamento dos espaços da raiz à medida que a soldagem prossegue, motivo pelo qual é necessário calcular corretamente o posicionamento das partes a serem soldadas, levando em conta essa expansão. De um modo geral uma tolerância da ordem de 15 mm por m deve ser considerada no caso de juntas geometricamente mais simples, porém no caso de geometrias mais complexas, além de um cálculo mais preciso, é necessária a experiência do soldador. Quando a tolerância não é bem calculada podem ocorrer problemas como distorções, empenamento e, no caso, de tolerância muito pequena levando ao completo fechamento dos espaços, penetração incompleta na raiz do cordão de solda. Os efeitos da elevada contração térmica, que ocorre durante o resfriamento após o término da operação de soldagem, também devem ser levados em conta, podendo exigir uma redução artificial na taxa de resfriamento, de modo a permitir que, num intervalo de tempo adequado, essas tensões possam ser acomodadas.

Os fatores metalúrgicos que afetam a soldabilidade são aqueles que se manifestam principalmente durante a soldagem do cobre eletrolítico (ETP), já que na condição de material deformado esse cobre apresenta partículas de óxido cuproso distribuídas aleatoriamente, e, portanto, sem efeito significativo nas propriedades mecânicas, ao passo que na condição de material fundido o mesmo cobre apresenta segregação dessas partículas nos contornos de grãos, evidentemente prejudicando as propriedades mecânicas do material. Sendo assim, o cobre eletrolítico não deve ser soldado em processo autógeno e sim com metal de adição que contenha poderosos desoxidantes, de modo a garantir a produção de um cordão de solda isento de óxidos. Na zona termicamente afetada (ZTA) as temperaturas são elevadas o suficiente para permitir a dissolução das partículas de óxidos, liberando oxigênio que migra para os contornos, onde se forma uma rede quase contínua de óxidos durante o resfriamento. Evidentemente esse processo depende de temperatura e tempo, de modo que na soldagem do cobre eletrolítico é necessária a maior rapidez possível, também para restringir o aquecimento generalizado do componente que está sendo soldado.

Já a soldagem do cobre isento de oxigênio (OFHC) e desoxidado com fósforo (DHP e DLP) não apresenta as mesmas dificuldades encontradas na soldagem do cobre eletrolítico (ETP). Apesar da presença do fósforo no DHP e no DLP, tanto nesses tipos de cobre como no OFHC há uma certa tendência de formação de porosidade na poça de fusão e na ZTA devido à inevitável contaminação atmosférica e pela difusão de hidrogênio e oxigênio do metal de base.

para a zona de soldagem. Como também no caso do ETP, metal de adição com desoxidantes deve ser utilizado sempre que possível, embora haja aplicações para as quais soldas de boa qualidade são obtidas no caso do OFHC e DHP/DLP sem o uso de desoxidantes no metal de adição. Nestes casos a proteção é garantida pelo uso de uma atmosfera de gases protetores inertes, cujo fluxo deve ser cuidadosamente observado.

O segredo da soldagem bem sucedida de ligas de cobre reside basicamente na rapidez e na eficiência. Demora excessiva na operação de soldagem, temperaturas de pré-aquecimento desnecessariamente altas, pausas para a remoção de defeitos de soldagem enquanto o componente ainda está quente e o descuido que permite a oxidação causada pela atmosfera, deteriorando permanentemente o metal de base e exaustão dos desoxidantes do metal de adição.

Soldagem TIG de Cobre/Ligas de Cobre

Três tipos de gases protetores são utilizados na soldagem TIG de cobre e suas ligas: argônio, hélio e nitrogênio. O hélio é um gás mais comum nos Estados Unidos do que em outros países, razão pela qual é mais usado naquele país, ao passo que o argônio é mais usado na Europa, no Brasil e em outros países e regiões. O nitrogênio é o gás mais barato dos três, porém só permanece inerte em temperaturas não muito elevadas, e na prática é pouco usado na proteção da poça de fusão durante a soldagem do cobre e de suas ligas. A quantidade de oxigênio e de umidade misturados a cada um desses gases protetores deve ser controlada em níveis muito baixos. O nitrogênio exige que o comprimento do arco seja de cerca de 12 mm: acima desse valor o arco pode ser extinto e abaixo ocorre excessiva turbulência na poça de fusão. No caso do argônio e do hélio o comprimento ideal do arco é bem menor: cerca de 3 mm. Para o mesmo valor de corrente do arco, o nitrogênio é o gás para o qual a voltagem do arco, conseqüentemente sua potência e o aporte térmico, são os mais elevados, sendo cerca de 4 vezes superior aos mesmos valores para o argônio. No caso do hélio esses valores não são tão elevados como no caso do nitrogênio, mas mesmo assim atingem o dobro dos mesmos valores obtidos com o argônio. Entretanto, com menores valores de corrente no arco é mais difícil iniciar o arco no caso do hélio, devido ao seu maior potencial de ionização. A soldagem com proteção de nitrogênio é mais complicada devido ao maior comprimento do arco e à baixa fluidez da poça de fusão (quando comparada à proteção com hélio ou argônio), que favorece a ocorrência de defeitos de soldagem, devido ao aprisionamento de gases durante uma solidificação rápida de uma poça de fusão estreita, como, por exemplo, porosidade.

Na soldagem do cobre não se utiliza muito misturas gasosas, entretanto, misturas de argônio com até 30 % de nitrogênio ou hélio oferecem como vantagens o maior aporte térmico e velocidades de soldagem mais altas, em comparação com o argônio puro. Os desoxidantes utilizados nos metais de adição apresentam maior afinidade pelo oxigênio, quando comparados com o cobre, como, por exemplo, o silício, o manganês, o alumínio, o boro e o titânio, presentes em teores muito baixos, entre 0,02 e 0,35 %. Quando a condutividade elétrica é uma propriedade muito importante para uma dada aplicação, utiliza-se o boro como desoxidante no metal de adição, uma vez que este elemento afeta menos a condutividade elétrica do cobre. O metal de adição contendo silício e manganês como desoxidantes foi inicialmente desenvolvido para aplicações nas quais o hélio e o argônio são usados como gases protetores, porém mais recentemente tem sido usado também quando a proteção gasosa é feita com nitrogênio, já que atualmente este gás tem sido produzido com níveis de pureza mais elevados, prescindindo assim do uso de desoxidantes mais fortes como alumínio e titânio. Sendo assim, atualmente os metais de adição com desoxidantes silício e manganês são usados com qualquer um dos três tipos de proteção gasosa.

Antes de iniciar o processo de soldagem TIG de cobre e suas ligas pode ser necessário calcular as folgas que compensem a expansão térmica decorrente do aquecimento gerado pela soldagem, de modo a minimizar distorções e desalinhamento das peças soldadas. Na soldagem de materiais com espessura muito fina (inferior a cerca de 1,5 mm) deve ser feita preferencialmente uma soldagem autógena (sem metal de adição), ao contrário da soldagem de material com maior espessura. Em ambos os casos é recomendável o uso de aparas da mesma liga posicionadas ao lado das peças a serem soldadas de modo que a soldagem seja

iniciada nessas aparas, pois eventuais defeitos associados ao início da operação de soldagem (abertura do arco) ficariam restritos a estas aparas. Entretanto, após a soldagem essas aparas soldadas devem ser removidas, pois poderiam levar à propagação de trincas para as peças efetivamente soldadas. Do mesmo modo, após a soldagem deve ser feita uma limpeza com escova de arame para a remoção de óxidos.

O pré-aquecimento ajuda a obtenção de uma poça de fusão mais fluida, que de outro modo poderia ser muito mais difícil de se obter. Normalmente não é necessária nenhuma operação de acabamento no cordão de solda, e a deformação a frio ou a quente do mesmo pode levar ao surgimento de trincas. Um cuidado especial deve ser tomado durante e após o depósito do passe de raiz, que não pode ser muito pequeno, devendo ter as dimensões mínimas necessárias para não trincar devido às restrições térmicas impostas pela deposição dos passes posteriores, os quais deve suportar. Adicionalmente, após a soldagem deve ser feita uma cuidadosa limpeza para a remoção de óxidos da superfície do cordão do passe de raiz sobre a qual serão depositados os passes posteriores. O processo TIG pode ser aplicado a qualquer tipo de posição de soldagem, com exceção da posição vertical, porém a facilidade com a qual a operação de soldagem nas demais posições é realizada depende de alguns fatores como a habilidade do operador e a espessura do material, que por sua vez determina o tamanho da poça de fusão.

Soldagem MIG de Cobre/Ligas de Cobre

Argônio é o gás convencional para a proteção durante a soldagem MIG de cobre e suas ligas, porém existem vantagens significativas com o uso de misturas gasosas de argônio com hélio ou nitrogênio. Essas adições aumentam o aporte térmico, resultando em maior velocidade de soldagem, penetração mais profunda, melhor perfil do cordão de solda e melhor qualidade de deposição do mesmo. Além disso, o uso dessas misturas reduzem a intensidade do pré-aquecimento necessário. Porém, para espessuras inferiores a 12 mm a proteção com argônio puro é satisfatória.

Metais de adição contendo boro só devem ser evitados quando a proteção gasosa contém nitrogênio, pois neste caso o nitrogênio reage com o boro.

A soldagem MIG pode ser feita tanto em direção à direita como em direção à esquerda, porém a preferência recai no primeiro caso, uma vez que assim se reduzem os riscos aprisionamento de inclusões de óxidos no metal de solda. Quando a soldagem é feita para a direita, o arco atinge a poça de fusão de maneira contínua, dando mais tempo para ocorrer a desoxidação. O ângulo de posicionamento da pistola de soldagem também é importante e deve ser de 70 a 80 ° da vertical para evitar o risco de deslocamento da poça de fusão para longe do arco e de sua proteção gasosa, o que pode acontecer durante a soldagem em direção à esquerda.

O comprimento do arco durante a soldagem MIG deve ser mantido entre 3 e 6 mm para todos os tipos de proteção gasosa para que se obtenham as melhores propriedades possíveis na junta soldada. A voltagem do arco deve estar entre 24 e 30 V para permitir o comprimento adequado para o arco elétrico. Um comprimento de arco mais curto provoca turbulência na poça de fusão e falta de penetração com acúmulo de respingos no bocal da pistola. Um arco muito longo permite intensa oxidação e falta de fusão lateral e na raiz.

A soldagem MIG convencional é adequada a todas as posições de soldagem com exceção da posição sobre-cabeça, pois nesse caso, como no caso da soldagem TIG, é difícil estabelecer um balanço de condições de soldagem para resultar num perfil de cordão de solda satisfatório. Sendo assim, a soldagem do cobre na posição sobre-cabeça deve ser evitada sempre que possível. A posição ideal para soldagem MIG, assim como TIG, é a posição plana, de modo a minimizar as dificuldades de controle da poça de fusão. Há poucas referências sobre a soldagem MIG com arame fino e soldagem MIG com corrente pulsada no caso de posições complicadas, porém deve ser dada alguma atenção a esses processos. A soldagem com corrente pulsada permite um certo controle do aporte térmico e do tamanho da poça de fusão em relação à taxa de deposição de metal, enquanto a soldagem com arame fino permite melhor acesso a determinadas regiões da peça que está sendo soldada, particularmente quando a espessura do material é muito pequena.

Soldagem de Cobre/Ligas de Cobre com Eletrodo Revestido

A maior diferença entre a soldagem de ligas de cobre e a soldagem do cobre comercialmente puro é o menor aporte térmico e a menor necessidade de pré-aquecimento no caso das ligas, o que facilita muito a operação de soldagem ao tornar as condições muito mais favoráveis. Isso se deve à menor condutividade térmica das ligas de cobre em comparação com o metal comercialmente puro. Como no caso destas ligas raramente surgem problemas relacionados com o aporte térmico, a soldagem com eletrodo revestido é feita geralmente com argônio como gás protetor, embora o uso do argônio apresente algumas vantagens, que posteriormente serão abordadas. Apesar da eliminação de muitos problemas relacionados com o aporte térmico, podem surgir outros problemas relacionados com outros fatores, como a contaminação pela atmosfera ou por impurezas presentes tanto no metal de base como no metal de adição, por exemplo.

Em geral as ligas de cobre mais facilmente soldadas são os bronzes de alumínio (Cu-Al), os cuproníqueis (Cu-Ni) e os latões (Cu-Zn), desde que as variáveis do processo sejam razoavelmente controladas e que o metal de base e o metal de adição atendam às especificações de composição química, principalmente no que concerne ao nível de impurezas.

Metais de adição: A tabela 9.1 apresenta algumas faixas de composição química de metais de adição para soldagem de ligas de cobre, de acordo com a British Standard (BS 2901: Parte 3 [7]):

Tabela 9.1 – Composição química de metais de adição

Tipo de metal de adição	Classificação BS	Composição química (% em massa)
Bronze de silício	C9	Cu-0,75 a 1,25 Mn-2,75 a 3,25 Si
Bronze de estanho fosforoso	C10	Cu-4,5 a 6,0 Sn – 0,02 a 0,40 P
Bronze de alumínio	C12	Cu-6,0 a 7,5 Al – 1 a 2,5 Fe + Ni + Mn
	C12 Fe	Cu-6,5 a 8,5 Al – 2,5 a 3,5 Fe
	C13	Cu-9,0 a 10,0 Al – 0,75 a 1,5 Fe
	C20	Cu-8,0 a 9,5 Al – 1,5 a 3,5 Fe – 3,5 a 5,0 Ni – 0,5 a 2,0 Mn
Cuproníquel	C16	Cu-0,2 a 0,5 Ti – 1,5 a 1,8 Fe – 10,0 a 12,0 Ni – 0,5 a 1,0 Mn
	C18	Cu-0,2 a 0,5 Ti – 0,4 a 1,0 Fe – 30,0 a 32,0 Ni – 0,5 a 1,5 Mn
Bronze de alumínio e manganês	C22	Cu-7,0 a 8,5 Al – 2,0 a 4,0 Fe – 1,5 a 3,0 Ni – 11,0 a 14,0 Mn

Em geral a composição química do metal de adição se aproxima razoavelmente da composição química do metal base, porém no caso de ligas de cobre endurecíveis por precipitação, como cobre-cromo e cobre-berílio, não existe uma composição ideal de metal de adição, devendo se usar basicamente no metal de adição a mesma composição química do metal base, quando disponível.

Uma das funções importantes do metal de adição é a de desoxidar o metal de solda, e isso é obtido mediante o uso da capacidade desoxidante dos elementos já presentes no metal de adição, ou pela incorporação de desoxidantes específicos no metal de adição. No primeiro caso enquadram-se os bronzes de alumínio, já que o alumínio é um poderoso desoxidante por si só. No segundo caso estão os cuproníqueis, que necessitam da incorporação de desoxidantes específicos ao metal de adição.

Soldagem do Bronze de Silício (Cu-Si)

A condutividade térmica do bronze de silício é cerca de 1/12 da condutividade do cobre desoxidado com fósforo., portanto um valor comparável ao da condutividade do aço baixo carbono, não apresentando assim problemas relacionados com requisitos de aporte térmico para soldagem. Apenas com peças muito espessas, raramente encontradas na prática industrial, é necessário algum grau de pré-aquecimento.

O principal fator a ser considerado durante a soldagem deste material é a existência de um intervalo de temperaturas, entre 800 e 950 °C, no qual ocorre fragilidade a quente. Esse fenômeno pode levar ao surgimento de trincas no metal de solda e na zona termicamente afetada em condições de restrições na peça, particularmente durante o resfriamento após a soldagem. O resfriamento dentro deste intervalo deve ser o mais rápido possível. Outra consideração importante, particularmente durante a soldagem MIG deste material, principalmente com altas velocidades de soldagem e altas taxas de deposição, é a possibilidade de formação fases frágeis de não equilíbrio no metal de solda durante a solidificação rápida. Novamente, em condições de restrição na peça pode ocorrer trincamento no metal de solda, o qual pode ser evitado pela redução da velocidade de soldagem pelo ajuste adequado dos parâmetros de soldagem.

Na soldagem TIG geralmente se utiliza polaridade negativa em corrente contínua, sendo esse processo mais adequado para soldagem de peças com espessura de até 12 mm. Se a manipulação da poça de fusão se tornar complicada, devido à formação de uma camada de sílica refratária sobre a poça, o uso de uma técnica com corrente alternada pode melhorar a manipulação. A corrente alternada exerce uma ação de limpeza do arco, que efetivamente dispersa a camada de óxido.

A soldagem MIG convencional pode ser usada para materiais acima de 4 mm de espessura. Abaixo desse valor o efeito de aquecimento pelo arco é excessivo. Entretanto, a soldagem MIG com arame fino pode ser usada para materiais com espessuras da ordem de 1 mm. Se altas velocidades de soldagem MIG originam trincas, a velocidade de soldagem deve ser reduzida e as condições de soldagem ajustadas.

Como sempre na soldagem de cobre e suas ligas deve ser feita uma limpeza adequada com escova de arame para eliminar todo tipo de contaminação superficial, principalmente quando mais de um passe de soldagem é depositado.

Na soldagem TIG a técnica com movimento para a esquerda é empregada, soldando-se na posição plana sempre que possível. Entretanto, é possível soldar em outras posições, pois sendo um material de condutividade térmica relativamente baixa, a poça de fusão pode ser mantida em pequenas dimensões, em comparação com a soldagem do cobre comercialmente puro, por exemplo.

Soldagem do Bronze de Alumínio (Cu-Al)

Até cerca de 7 % de alumínio essas ligas Cu-Al são monofásicas, porém acima desse teor e até 11 % as ligas desse sistema são bifásicas. A soldagem afeta a microestrutura destas ligas (6 a 8 % de alumínio e 2 a 3,5 % de ferro), geralmente utilizadas em trocadores de calor e que podem sofrer fragilização na raiz no caso de soldagem multipasse autógena. Essa fragilização provavelmente é causada pela decomposição da fase beta retida em fase frágil gama 2 durante o reaquecimento do metal de solda, o qual é rapidamente resfriado após o passe na raiz. O problema de trincamento na raiz da solda é geralmente resolvido pelo uso de metal de adição com composição química diferente da liga bifásica.

A fase beta do metal de adição bifásico pode, sob determinadas condições, sofrer um tipo de corrosão conhecido como desaluminificação, podendo ser necessário depositar um revestimento final de metal de solda com composição química semelhante a do metal base para evitar esse tipo de corrosão eletroquímica. O fenômeno amplamente divulgado de trincamento no metal base pode ser evitado pelo controle cuidadoso dos procedimentos de laminação e reaquecimento durante a fabricação das chapas.

Em comum com outro tipos de ligas de cobre os bronzes de alumínio apresentam perda de ductilidade num certo intervalo de temperaturas particularmente crítico durante a soldagem,

dificultando este processo. Devido aos problemas de soldagem apresentados pelas ligas Cu-Al foram desenvolvidas as novas ligas Cu-Al-Si, contendo cerca de 6 % de alumínio e 2 % de silício, que mostraram ser alternativas bastante viáveis às aplicações tradicionais do bronze de alumínio, tanto como metal base quanto como metal de adição nas aplicações em que média resistência mecânica é solicitada. Outro grupo de ligas que deve ser considerado é o do sistema Cu-Al-Mn, que contém até cerca de 9 % de alumínio, 12 % de manganês e adições de ferro e níquel, sendo que essas ligas são destinadas basicamente à produção de peças fundidas. São ligas que apresentam excelente soldabilidade e não sofrem fragilização em temperaturas intermediárias, embora necessitem de tratamento térmico pós-soldagem para restaurar as propriedades mecânicas e a resistência à corrosão.

Todos os bronzes de alumínio, mesmo com a melhor proteção gasosa possível, formam o óxido refratário alumina (Al_2O_3) devido à oxidação da poça de fusão. De modo a se obter boa fluidez na poça e evitar o aprisionamento de inclusões de óxidos, essas camadas de óxidos devem ser dispersas, o que obriga ao uso de corrente alternada na soldagem TIG, de modo a se aproveitar a ação de limpeza proporcionada pelo uso da corrente alternada. Argônio é o gás normalmente usado como proteção. Na soldagem MIG é possível se obter uma ação de limpeza contínua do arco através do uso de polaridade positiva. Em ambos os processos TIG e MIG o fluxo de gás deve ocorrer a uma taxa que seja suficiente para evitar oxidação excessiva da zona de soldagem e evitar defeitos de falta de fusão e de aprisionamento de inclusões de óxidos. A proteção gasosa com hélio na soldagem TIG também é vantajosa, pois a corrente contínua com polaridade negativa proporciona satisfatória ação de limpeza da poça de fusão. O uso de hélio também proporciona melhor penetração e mais altas velocidades de soldagem. O pré-aquecimento deve ser evitado sempre que possível e as temperaturas interpasse devem ser mantidas num valor mínimo, e modo a evitar um superaquecimento que poderia causar perda de utilidade e problemas de trincamento. É essencial a limpeza com escovas após a deposição de cada passe de soldagem para se obter boa qualidade na junta soldada.

Soldagem do Bronze de Estanho (Cu-Sn)

Os bronzes de estanho trabalhados contêm até 8 % de estanho com um teor de fósforo sempre inferior a 0,05 % e mesmo dentro dessa faixa são denominados bronzes fosforosos. As ligas fundidas podem conter até 12 % de estanho. Os bronzes de estanho utilizados na fabricação de canhões contêm também zinco (até 9 %) e chumbo (até 5 %) e este último elemento prejudica consideravelmente a soldabilidade dessas ligas, de modo que a brasagem com prata é preferível para a junção de peças destas ligas. As partículas de chumbo presentes de forma dispersa nestas ligas fundem nas temperaturas usuais de soldagem, provocando trincamento a quente tanto no metal de solda como na zona afetada pelo calor. Outra característica nociva à soldagem destas ligas é o seu amplo intervalo de solidificação, que causa porosidade por contração térmica e induz o trincamento de solidificação à medida que o metal de solda se solidifica, principalmente em condições de restrições físicas a esta solidificação. Também é possível, em condições de resfriamento rápido pós-soldagem e especialmente em ligas com alto teor de estanho, a formação da fase delta dura e frágil, que prejudica as propriedades mecânicas da junta soldada. Isso pode ser evitado por um resfriamento pós-soldagem mais lento e controlado, ou, se a fase delta já está formada, pela sua remoção através de tratamento térmico pós-soldagem a cerca de 600 °C. A soldagem destas ligas leva à formação de vapores de zinco, embora em geral isso não seja prejudicial.

A soldagem TIG deve ser realizada com corrente contínua em polaridade negativa, tanto com argônio quanto hélio como proteção gasosa. A soldagem MIG também é satisfatória. Como a condutividade térmica destas ligas é muito menor do que a do cobre comercialmente puro, não há necessidade de pré-aquecimento. Existem metais de adição com composição próxima à dos bronzes de estanho comuns, mas o mesmo não ocorre com os bronzes destinados à fabricação de canhões. Estes são soldados com metais de adição compostos por bronze de estanho comum ou por ligas muito diferentes como bronzes de alumínio, por exemplo. Mais recentemente foi desenvolvido um metal de adição para soldar bronzes para canhões que consiste basicamente num bronze de estanho com certas adições de níquel e silício e um teor de fósforo relativamente mais alto.

Soldagem do Cuproníquel (Cu-Ni)

Os cuproníqueis comerciais contêm de 10 a 30 % de níquel. Adições de manganês e de ferro podem ser feitas com o intuito de melhorar a resistência à corrosão e à cavitação em certos ambientes, particularmente na água do mar.

O cobre e o níquel são mutuamente solúveis em qualquer proporção de composição química e em qualquer temperatura e a adição de ferro e de manganês não afeta substancialmente a microestrutura destas ligas, ou seja, não ocorre a formação de fases secundárias. Estas ligas são utilizadas principalmente na condição de trabalhadas, mas também podem ser fundidas.

O principal problema encontrado na soldagem dos cuproníqueis são aqueles associados à presença de elementos residuais que podem levar ao trincamento do metal de solda e da zona afetada pelo calor, e a porosidade causada pelo aprisionamento de gases. Entretanto, como o trabalho a quente é uma etapa essencial na fabricação destas ligas, já nesta etapa o fabricante deve minimizar a presença desses elementos residuais para evitar o trincamento a quente durante a laminação a quente. Por esse motivo, raramente ocorrem casos de trincamento no metal de solda devido à presença significativa desses elementos residuais nocivos. Entretanto, ainda é essencial o cuidado para evitar contaminações externas, como as que são causadas por descuido na manipulação e na limpeza das peças a serem soldadas. Sem esses cuidados poderia ocorrer contaminação por enxofre e chumbo proveniente de óleos e camadas de tinta aderidos à superfície das peças. Os cuproníqueis são particularmente susceptíveis à absorção de oxigênio, hidrogênio e nitrogênio na poça de solda fundida. A porosidade surge como consequência do aprisionamento do gás no metal em solidificação, e a oxidação pode ser evitada pelo uso de desoxidantes no metal de adição. Por esse motivo, a soldagem autógena de cuproníquel quase sempre resultará em juntas soldadas porosas. Até o momento o titânio é o elemento desoxidante mais poderoso encontrado nos metais de adição usados para soldagem de cuproníquel, juntamente com o manganês. Estão disponíveis comercialmente dois tipos de metal de adição com teores de níquel de 10 e de 30 %, respectivamente.

Metais de adição estão disponíveis para a soldagem MIG e TIG dos cuproníqueis, e embora seja comum selecionar um metal de adição com composição química próxima à do metal base, a soldagem de ligas com baixo teor de níquel usando metais de adição com 30 % de níquel pode apresentar vantagens, principalmente no que se refere à melhoria de propriedades mecânicas. Entretanto, esse procedimento deve ser adotado com certo cuidado, uma vez que há uma significativa diferença de intervalo de solidificação entre essas ligas e isso pode levar, em caso de restrições físicas à solidificação, ao trincamento nos contornos de grão parcialmente fundidos na zona afetada pelo calor após a solidificação do cordão de solda depositado.

Embora freqüentemente o argônio seja usado como proteção gasosa, o hélio pode oferecer algumas vantagens, particularmente quando a peça é muito espessa. No caso de soldagem TIG usa-se corrente contínua com polaridade negativa, tanto com argônio quanto com hélio. O processo TIG é o mais adequado para a soldagem de chapas, placas e tubos com até 6 mm de espessura. No caso da soldagem de tubos o processo TIG é aplicado para produzir um passe de raiz controlado, completando-se a solda nos passes subseqüentes com o processo de soldagem MIG manual.

Tanto no processo TIG quanto no processo MIG, devem ser evitadas velocidades de soldagem excessivas que possam causar falhas na proteção gasosa. A soldagem de peças como tubulações necessita do uso de uma proteção traseira de argônio, para evitar a contaminação atmosférica do pé do cordão de solda e assim produzir uma solda de boa qualidade.

Soldagem do Latão (Cu-Zn) e da Alpaca (Cu-Zn-Ni)

Do ponto de vista de soldagem os comportamentos do latão e da alpaca são muito semelhantes. As alpacas podem ser consideradas latões com substanciais adições de níquel. Ambos os grupos de ligas podem conter chumbo com o objetivo de melhorar a usinabilidade, e assim, como ocorre com os bronzes de estanho, a soldagem dessas ligas pode ser complicada. Do ponto de vista de soldabilidade os latões podem ser considerados em três grupos principais: 1) Latão com alumínio (Cu-22Zn-2Al); 2) Latão do almirantado (Cu-29Zn-1Sn); 3) Latão Naval (Cu-36,75 Zn – 1,25 Sn). Sob ponto de vista semelhante, as alpacas

podem ser consideradas em três grupos principais: 1) Alpacas monofásicas (alfa) contendo até 65 % de cobre e 20 % de níquel (zinco remanescente); 2) Alpacas bifásicas (alfa + beta) contendo até 47 % de cobre, 25 % de níquel (zinco remanescente geralmente com até 2, 5 % de chumbo para melhorar a usinabilidade); 3) Alpacas de fundição contendo até 65 % de cobre, 25 % de níquel (zinco remanescente com até 9 % de chumbo). Os comentários sobre a soldagem do latão aplicam-se igualmente à soldagem dos cuproníqueis.

Por causa da evolução de vapores de zinco a soldagem de qualquer liga contendo zinco é complicada. Entretanto, a soldagem com proteção gasosa pode minimizar a volatilização do zinco, devendo também ser considerada a possibilidade de soldar com metal de adição com composição química diferente da do metal base, pois isso reduziria o risco de formar uma camada de óxido refratário sobre a superfície da poça de fusão. Sob esse ponto de vista metais de adição com composição ideal seriam os bronzes de silício e de alumínio. Contudo, ao se soldar com esse tipo de metal de adição deve se trabalhar com corrente alternada no caso de processo TIG com proteção d argônio, de modo a garantir o necessário efeito de limpeza do arco.

Também há certo risco de trincamento na zona afetada pelo calor se o metal de adição com composição diferente se solidificar antes do metal base. Isso pode ser evitado por meio de um resfriamento lento e sem perturbações desde as temperaturas de soldagem, para assegurar solidificação completa de ambos os metais de solda e metal base. A soldagem TIG com bronze de alumínio e proteção gasosa com argônio requer o uso de corrente alternada devido à formação de óxido de alumínio na poça de fusão durante a soldagem.

Latões com teor de zinco muito baixo (até cerca de 3 % de zinco) podem ser úteis em certas aplicações como substitutos do cobre desoxidado com fósforo. A volatilização de zinco é pequena nessas ligas e excelentes resultados são obtidos com o processo TIG tanto com o uso de argônio quanto hélio como proteção gasosa. O nitrogênio não deve ser usado com essa finalidade. A maior vantagem sobre o cobre desoxidado com fósforo no caso de soldagem de chapas com pequenas espessuras é a possibilidade de soldagem autógena, por causa das características desoxidantes da adição de zinco.

Soldagem dos Cobre Ligados e das Ligas de Cobre Endurecíveis por Precipitação

- Cobre-Cádmio

O trabalho a frio do cobre-cádmio pode resultar em propriedades mecânicas muito boas, estando o cádmio presente inteiramente em solução sólida e conferindo resistência ao amolecimento em temperaturas moderadamente elevadas. Como o aumento de dureza é obtido por encruamento (deformação plástica a frio), evidentemente a soldagem elimina esse ganho de dureza e assim tanto o metal de solda quanto a zona afetada pelo calor apresentarão menor resistência mecânica do que o metal base. Por esse motivo raramente o cobre cádmio é soldado por fusão. A característica do cádmio como elemento muito tóxico também dificulta a operação de soldagem, pois os vapores de cádmio são muito nocivos à saúde do operador. As soldas feitas com esse tipo de material apresentam elevada porosidade e grande diminuição de utilidade e de resistência mecânica simultaneamente. Como metal de adição o cobre desoxidado com boro tem sido usado com sucesso na soldagem de ligas cobre-cádmio.

- Cobre-Zircônio

As ligas de cobre-zircônio em geral contém até 0,15 % de zircônio e até certo ponto podem ser endurecidas por precipitação. A dureza máxima é obtida após deformação a frio seguida de envelhecimento, e assim não pode ser mantida com a soldagem. Assim, o metal de solda e a zona afetada pelo calor apresentarão propriedades mecânicas inferiores às do metal base e estas não podem ser recuperadas por tratamento térmico pós-soldagem. Estas ligas são soldadas com metal de adição com composição química bem próxima à do metal base e o zircônio presente também age como um eficiente agente desoxidante. Entretanto, a possibilidade de ocorrer trincamento a quente não deve ser descartada, uma vez que em

condições de resfriamento fora do equilíbrio termodinâmico pode se formar um eutético Cu-Zn de baixo ponto de fusão.

- Cobre-Berílio

Cu-Be com alto teor de berílio

As ligas cobre-berílio de alto teor contêm normalmente de 1,7 a 1,9 % de berílio com pequenas adições (da ordem de 0,25 %) de cobalto ou níquel para possibilitar um envelhecimento controlado. Estas ligas são endurecíveis por precipitação e caracterizadas por elevada dureza, resistência mecânica, à fadiga e ao desgaste, além de apresentarem considerável resistência à corrosão. Os avanços tecnológicos nos processos de soldagem podem tornar estas ligas adequadas a aplicações estruturais na indústria química, porém a evolução dos vapores tóxicos de berílio durante a soldagem por fusão convencional requer precauções adicionais. Como no caso de todas as ligas termicamente tratadas surgem dificuldades durante a soldagem por fusão, de modo que deve ser aplicado um tratamento térmico pós-soldagem para possibilitar recuperação das propriedades do material e a homogeneização da microestrutura da zona afetada pelo calor e do metal de solda.

Estas ligas Cu-Be apresentam condutividade térmica equivalente a cerca de 25 % da condutividade térmica do cobre comercialmente puro, o que favorece a operação de soldagem sob esse ponto de vista. Entretanto, pode ser necessário certo pré-aquecimento no caso de peças com grande espessura.

Quando a peça a ser soldada apresenta pequena espessura a zona afetada pelo calor tende a ser estreita e o material apresenta elasticidade suficiente para acomodar as tensões de origem térmica que surgem durante o ciclo de soldagem. Sendo assim, o material fino pode ser soldado sem dificuldade tanto na condição de trabalho a frio quanto na condição de envelhecimento. Em materiais mais espessos as tensões térmicas não são acomodadas tão facilmente e pode ocorrer trincamento tanto no metal de solda quanto na zona afetada pelo calor. Nesse caso é recomendável soldar o material na condição de superenvelhecimento, pois assim o material estará mais macio devido ao coalescimento dos precipitados e não endurecerá sem tratamento de solubilização posterior. Por outro lado, a soldagem do material solubilizado é complicada devido à precipitação diferenciada na zona afetada pelo calor durante a operação de soldagem.

Em todos os casos o tratamento térmico pós-soldagem deve ser realizado como uma operação em duas etapas, envolvendo uma nova solubilização e novo envelhecimento de modo a se obter propriedades razoavelmente uniformes ao longo de toda a área de solda. Evidentemente o metal de solda manterá uma microestrutura bruta de fusão, porém as propriedades mecânicas serão apenas um pouco inferiores às do metal base.

Devido à formação de camadas de óxidos refratários os processos de soldagem com proteção gasosa são os únicos que permitem resultados favoráveis. Tanto o processo TIG quanto o processo MIG são adequados com o uso de metal de adição com composição química semelhante à do metal base. A proteção com argônio é a ideal no caso de soldagem TIG de materiais com espessura de até 6 mm com corrente alternada para garantir a limpeza da poça de fusão, ao passo que o mesmo tipo de liga é soldada pelo processo MIG com espessuras maiores, de até 50 mm. O pré-aquecimento deve ser evitado sempre que possível, mas pode ser necessário para peças mais espessas. As temperaturas de pré-aquecimento devem ficar entre 100 e 200 °C. O uso de gás inerte na parte posterior da solda protege a penetração do cordão, reduzindo a formação de camadas de óxidos refratários e promovendo fusão adequada.

Cu-Be com baixo teor de berílio

Estas ligas com baixo teor contêm tipicamente 0,4 a 0,6 % de berílio e 2,5 % de cobalto ou níquel. Também são ligas endurecíveis por precipitação, porém, ao contrário das ligas Cu-Be de alto teor, nas ligas de baixo teor os precipitados endurecedores são compostos intermetálicos de cobalto e berílio ou de níquel e berílio. Estas ligas apresentam propriedades

mecânicas inferiores às encontradas nas ligas de alto teor, porém condutividade elétrica mais elevada, podendo ser usadas na fabricação de molas, diafragmas e eletrodos e garras para soldagem por resistência elétrica. Como no caso das ligas de alto teor, as de baixo teor também são usadas nas condições de fundidas e de trabalhadas.

As ligas de baixo teor apresentam várias características em comum com as de alto teor, no que diz respeito à soldabilidade, necessitando também de tratamentos térmicos pós-soldagem. Como apresentam condutividade térmica superior à das ligas de alto teor, a soldagem das ligas de baixo teor geralmente é mais difícil.

Em geral as ligas de baixo teor são soldadas com metais de adição com composição química significativamente diferente, com o objetivo de evitar trincamento a quente, sendo usado como metal de adição geralmente ligas Cu-Be de alto teor. Como as condições de tratamento térmico ideais para otimização de dureza variam de um tipo de liga (baixo teor) para as de outro tipo (alto teor), o tratamento térmico de envelhecimento deve ser balanceado para obter propriedades mecânicas razoáveis tanto no metal base (baixo teor) como no metal de solda e na zona termicamente afetada que resultam do uso de um metal de adição diferente (alto teor).

Do mesmo modo, para as ligas de baixo teor a soldagem de peças espessas também é mais fácil quando a liga se encontra na condição superenvelhecida, mas o tratamento térmico pós-soldagem subsequente na faixa de temperaturas de 850 a 900 °C pode resultar na fusão de fases metaestáveis presentes no metal de adição com alto teor de berílio através do resfriamento rápido durante a soldagem. Esse risco pode ser minimizado por meio de um tratamento de homogeneização entre 800 e 850 °C antes da solubilização. Com um bom ajuste do tratamento térmico pós-soldagem é possível obter boas propriedades mecânicas tanto no metal base quanto no metal de solda.

Os processos de soldagem a arco elétrico com proteção gasosa podem ser aplicados de modo similar aos que são aplicados para ligas de alto teor de berílio, mas deve se dar maior atenção ao pré-aquecimento por causa da alta condutividade térmica.

- Cobre-Cromo

Essas ligas Cu-Cr contêm de 0,5 a 1,0 % de cromo e são endurecíveis por precipitação, atingindo boas propriedades mecânicas e mantendo boa condutividade elétrica. Produtos fundidos e trabalhados destas ligas são usados numa ampla variedade de aplicações que exijam resistência mecânica moderada e alta condutividade elétrica.

Estas ligas apresentam tendência de fragilidade a quente num amplo intervalo de temperaturas. A presença de impurezas, mesmo em pequenos teores, favorece a formação de camadas frágeis nos contornos de grãos. Isso provavelmente causa trincamento durante a soldagem e, do mesmo modo que ocorre com as ligas cobre-berílio, é recomendável que a peça seja soldada na condição superenvelhecida quando a região de solda é submetida a restrições físicas. Estas ligas possuem elevada condutividade térmica na condição envelhecida, necessitando de pré-aquecimento no caso de peças mais espessas. Após a soldagem deve ser realizado um tratamento térmico completo de solubilização e envelhecimento.

Devido à formação de óxidos refratários, a soldagem sempre deve ser feita por arco elétrico com proteção gasosa para se obter bons resultados, e no caso da soldagem TIG geralmente é usada corrente alternada e argônio como gás protetor para evitar dificuldades decorrentes da formação de camadas de óxidos. Geralmente se utiliza metal de adição com composição química bem próxima à do metal base. O processo MIG também é usado quando se necessita de maiores velocidades de soldagem e maior deposição de metal de solda, principalmente em seções mais espessas.

A soldagem TIG com hélio como gás protetor também pode ser usada com corrente contínua e polaridade negativa para melhorar as condições de soldagem [7].

b) Corrosão

O cobre comercialmente puro e as ligas de cobre são muito usados em diversos ambientes e aplicações por causa de sua excelente resistência à corrosão, combinada com outras propriedades desejáveis como alta condutividade térmica e elétrica, facilidade de fabricação por diferentes processos, uma grande amplitude de valores de propriedades mecânicas que podem ser obtidos e a resistência à degradação por agentes biológicos. O cobre sofre corrosão, porém em taxas muito reduzidas, no ar não poluído, na água e na presença de ácidos não oxidantes em ambientes não areados. Artefatos de cobre enterrados por milênios apresentam-se em condições bem razoáveis como materiais pouco usados, e telhados de cobre em atmosfera rural sofreram corrosão em taxas inferiores a 0,4 mm em 200 anos. As ligas de cobre resistem a muitas soluções salinas, alcalinas e substâncias químicas orgânicas. Entretanto, o cobre é suscetível a um ataque muito mais rápido por ácidos oxidantes, sais oxidantes de metais pesados, enxofre, amônia (NH₃) e alguns compostos de enxofre e de amônia. A resistência a soluções ácidas depende principalmente do grau de severidade das condições oxidantes na solução. A relativa facilidade de reação do cobre com o enxofre e sulfetos para formar sulfetos de cobre (CuS e Cu₂S) impede a utilização do cobre e das ligas de cobre em ambientes contendo enxofre ou seus compostos.

O cobre e suas ligas apresentam excelente comportamento em serviço nas seguintes aplicações:

- Aplicações que exigem resistência à exposição à atmosfera, como o uso em telhados na construção civil e outros usos arquitetônicos como maçanetas de portas, por exemplo.
- Encanamentos e tubulações de água que necessitem de elevada resistência à corrosão causada por vários tipos de águas e solos.
- Aplicações navais, como por exemplo tubulações de água fresca e de água salgada, trocadores de calor, condensadores, válvulas, nas quais o material deve resistir ao ataque da água salgada, de depósitos de sais hidratados e de agentes biológicos.
- Trocadores de calor e condensadores em serviço marítimo, usinas de energia a vapor e componentes usados na indústria química em contato com produtos orgânicos e inorgânicos.
- Fiação elétrica, hardware, conectores, circuitos impressos e dispositivos eletrônicos em geral, que necessitam de uma boa combinação de condutividade térmica e elétrica com boas propriedades mecânicas.

A oxidação do cobre leva à formação do óxido cuproso (Cu₂O), que se forma de acordo com a 2Cu₂O.◇seguinte reação: 4Cu + O₂

Efeito dos Elementos de Liga na Resistência à Corrosão do Cobre

O cobre comercialmente puro e os chamados cobres ligados apresentam excelente resistência à corrosão causada por águas salgadas e por agentes biológicos, mas são suscetíveis à corrosão-erosão causada por águas em movimento com altas velocidades. O processamento mecânico com o objetivo de melhorar a resistência mecânica de cobres ligados também aumenta sua resistência à corrosão-erosão, sem prejudicar sensivelmente sua condutividade térmica e elétrica e sua resistência á corrosão atmosférica.

Os latões com teores de zinco de até 15 % apresentam satisfatória resistência à corrosão causada por soluções aquosas, mas acima desse teor podem sofrer dezincificação, que é um ataque corrosivo preferencial que leva à oxidação e eliminação do zinco presente no latão, que assim assume coloração mais avermelhada em determinados locais. Soluções salinas mesmo com velocidade moderada, água salobra e soluções suavemente ácidas já são suficientes para levar à dezincificação do latão. Do mesmo modo, a susceptibilidade á corrosão sob tensão também é dependente do teor de zinco do latão, sendo mais acentuada nos latões com mais alto teor de zinco (15 % ou mais). A corrosão sob tensão praticamente não ocorre no cobre comercialmente puro.

Elementos de liga adicionados com o objetivo de aumentar a usinabilidade, como o chumbo, ou a resistência mecânica, como berílio, telúrio, cromo, fósforo e manganês, praticamente não têm efeito, ou têm um efeito muito limitado sobre a resistência à corrosão do cobre comercialmente puro e dos latões.

Os latões com estanho possuem resistência à corrosão significativamente maior do a dos latões binários (Cu-Zn), principalmente melhor resistência à dezincificação, devido à presença do estanho como elemento de liga em teores significativos. É o caso do latão do almirantado (C443), modificação do latão para cartuchos (C280) ao qual 1 % de estanho é adicionado, e do latão naval (C464), modificação do metal de Muntz (C280) ao qual 0,75 % de estanho é adicionado. Outros elementos em menor escala podem ser adicionados ao latão para aplicações navais, como o níquel e o chumbo.

Os latões (Cu-Zn-Al) e bronzes de alumínio (Cu-Al) se beneficiam, no que se refere à resistência à corrosão, pela formação da camada passivada protetora de alumina (Al_2O_3) que impede o prosseguimento da corrosão. O uso de inibidores, como arsênico, fósforo e antimônio evita a dezincificação nos latões.

Os bronzes fosforosos apresentam boa resistência à corrosão causada por águas salgadas em movimento e pela maioria dos ácidos não oxidantes, exceto o ácido clorídrico (HCl). Ligas contendo 8 a 10 % de estanho apresentam alta resistência à corrosão associada ao impacto de partículas e gotas. Os bronzes fosforosos são muito menos suscetíveis à corrosão sob tensão do que os latões são tão resistentes ao ataque pelo ácido sulfúrico quanto o cobre comercialmente puro. De um modo geral os bronzes também resistem bem à corrosão causada por agentes biológicos.

Os cuproníqueis se constituem no grupo de ligas de alumínio com maior resistência à corrosão, principalmente o cuproníquel C715 (70% de cobre e 30 % de níquel), que apresenta a maior resistência à corrosão aquosa, embora muitas vezes o cuproníquel C706 (10 de níquel) seja preferido por apresentar resistência à corrosão ainda muito boa, porém com menor custo do que o C715. São ligas que apresentam resistência à corrosão causada por soluções ácidas em nível superior à do cobre comercialmente puro e à das outras ligas de cobre, além de uma elevada resistência à corrosão sob tensão e à corrosão associada ao impacto de partículas e gotas.

As alpacas apresentam boa resistência à corrosão causada por água fresca e por água salgada. O elevado teor de níquel inibe a dezincificação. Alpacas como a C752 e C770 são muito mais resistentes à corrosão em soluções salinas do que latões com teores de zinco semelhantes.

Os bronzes de silício (Cu-Si) em geral apresentam resistência à corrosão semelhante à do cobre comercialmente puro, mas possuem melhores propriedades mecânicas e soldabilidade superior. As ligas Cu-Si são muito mais resistentes à corrosão sob tensão que os latões comuns. Os bronzes de silício são suscetíveis à fragilização por vapor em alta pressão e devem ser testados para comprovar adequação ao serviço em ambiente agressivo antes de serem especificados para a fabricação de componentes usados em altas temperaturas.

Os bronzes de alumínio (Cu-Al) contendo de 5 a 12 % de alumínio possuem excelente resistência à corrosão pelo impacto de partículas e gotas e à oxidação em alta temperatura. Resistem bem à abrasão mecânica e ao ataque químico de soluções de sulfetos. Quando o teor de alumínio é inferior a 8 % a liga é monofásica e resiste bem à maioria dos tipos de ataques corrosivos, porém acima de 8 % de alumínio a liga é bifásica (fases alfa e beta) em alta temperatura (565 °C ou acima) e o resfriamento rápido mantém estas fases à temperatura ambiente. Entretanto, o aquecimento posterior a temperaturas intermediárias (entre 320 e 565 °C) leva à decomposição da fase beta numa mistura eutetóide de fases alfa e gama 2 de aspecto lamelar ou nodular. A fase beta já é menos resistente à corrosão do que a fase alfa e a microestrutura eutetóide (alfa + gama 2) é ainda menos resistente à corrosão.

Em alguns ambientes particularmente agressivos a fase beta e o eutetóide podem ser atacados de modo seletivo semelhante à dezincificação dos latões. Um tratamento térmico adequado

envolvendo aquecimento em alta temperatura, resfriamento rápido e revenimento em temperaturas intermediárias aplicado a ligas bifásicas como C624 e C954, por exemplo, resulta numa microestrutura de fase beta revenida com cristais novamente precipitados de fase alfa, uma combinação que apresenta resistência à corrosão superior à das ligas normalmente recozidas.

Pequenas partículas de formato arredondado ou rosetado, e ricas em ferro, aparecem na microestrutura de bronzes de alumínio quando o teor de ferro é superior a 0,5 %. Estas partículas às vezes conferem um aspecto de corrosão, mas não apresentam efeito comprovado nas taxas de corrosão. Os bronzes de alumínio contendo níquel apresentam uma microestrutura mais complicada, incluindo a fase K. O níquel parece alterar as características de corrosão da fase beta, conferindo maior resistência à perda de elementos de ligas e à corrosão por cavitação causada pela maioria dos líquidos. Para as ligas C632 e talvez C958 tratamentos térmicos de solubilização, resfriamento rápido e revenido em temperaturas intermediárias podem aumentar a resistência à perda de elementos de liga. A liga C957, contendo alto teor de manganês, apresenta resistência à corrosão inferior à das ligas C955 e C958, que possuem menores teores de manganês e maiores teores de alumínio.

Os bronzes de alumínio em geral são adequados para serviço em ambientes contendo ácidos minerais não oxidantes, como os ácidos fosfórico (H_3PO_4), sulfúrico (H_2SO_4) e clorídrico (HCl), ácidos orgânicos, como o láctico e o acético (CH_3COOH) e oxálico, soluções salinas neutras como as de cloreto de sódio (NaCl), hidróxido de potássio (KOH) e hidróxido de amônia anidro (NH_4OH), vários tipos de águas naturais, incluindo água do mar, água salobra e águas potáveis. Entretanto, o uso dessas ligas deve ser evitado em alguns ambientes, como os que contêm ácido nítrico (HNO_3), alguns sais metálicos como cloreto férrico ($FeCl_3$) e ácido crômico ($H_2Cr_2O_4$), hidrocarbonetos cloretados e úmidos e NH_3 úmido. A aeração pode resultar em corrosão acelerada em muitos meios aparentemente compatíveis. A exposição a elevadas tensões trativas em ambientes contendo NH_3 pode resultar em corrosão sob tensão. Em alguns ambientes a corrosão pode reduzir o limite de resistência à fadiga em até 25 a 50 % do valor obtido em condições ambientais normais [8].

Referências bibliográficas

- [1] - Gomes, M.R. & Bresciani Filho, E. - "Propriedades e Usos de Metais Não-ferrosos", ed. ABM, São Paulo, 1987, capítulo 3.
- [2] - Brooks, C.R. - "Heat Treatment, Structure and Properties of Nonferrous Alloys", ed. ASM, Metals Park, 1988, capítulo 8.
- [3] - Butts, A. - "Copper, the Science and Technology of the Metal, its Alloys and Compounds", ed. Reinhold Publishing Corporation, New York, 1954, 3 th printing 1960.
- [4] - Philips, A. - "Metais e Ligas Não Ferrosas", Instituto Militar de Engenharia (IME), Rio de Janeiro, 1971.
- [5] - Metalurgia do Pó, Vicente Chiaverini, ABM, 4ª edição, São Paulo, 2001, páginas 294 a 296.
- [6] - Burke, J.E.; Kenyon, R.L., Burghoff, H.; Hobbs, J.T.; "Grain Control in Industrial Metallurgy", American Society for Metals (ASM), Cleveland, Ohio, USA, 1949, p.158 - 208.
- [7] – Dawson, R.J.C. – “Fusion Welding and Brazing of Copper and Copper Alloys”, Newnes-Butterworths, London, 1973, capítulos 2 e 3, p.14-42.
- [8] – Metals Handbook, 9 th edition, Volume 13 – Corrosion, ASM, Metals Park, Ohio, USA, 1987, Corrosion of Copper and Copper Alloys, p.610-611.

Este material encontra-se publicado na seção de Metais e Ligas de www.infomet.com.br

