

CAPÍTULO 1

Cobre e suas ligas

1.1 INTRODUÇÃO

O nível de desenvolvimento de uma sociedade pode ser avaliado pela sua capacidade de desenvolver e produzir materiais e, de forma tecnológica, fabricar produtos e gerar serviços. Em termos históricos da civilização, o cobre é um material muito importante, pois foi um dos primeiros metais minerados e manufaturados pelo ser humano, apresentando facilidade de extração e processamento em comparação a outros metais.

A descoberta do processo de extração do cobre e de seu respectivo processamento praticamente originou a metalurgia, ramo da ciência que estuda os metais. O cobre e suas ligas compreendem um grupo de materiais metálicos das mais antigas e diversificadas aplicações. Na sequência, é apresentada uma linha do tempo, com períodos aproximados, da grande contribuição do cobre e suas ligas, como um dos principais materiais de engenharia, na evolução da sociedade.

- **10.000 a 3.500 a.C.:** Idade do Cobre ou Era Calcolítica, na qual as sociedades descobriram como extrair o cobre para fabricação de ornamentos e acessórios. Evidências arqueológicas indicam que o cobre foi utilizado há mais de dez mil anos na Ásia Ocidental. Em seus hieróglifos, os egípcios antigos usavam o símbolo *Ankh* para representar o cobre. Papiros revelam que o cobre era utilizado no tratamento de infecções e esterilização da água. Desde aquela época, a humanidade já havia notado no cobre sua excelente ductilidade nos processos de conformação. Por volta de 5.000 a.C., surgiram os primeiros trabalhos de fundição de cobre em moldes feitos de pedra lascada. Entre 4.000 e 3.000 a.C., o cobre era ativamente extraído na Espanha, especificamente na região da Huelva.

- **3.500 a 1.500 a.C.:** Idade do Bronze, período da adição de estanho ao cobre, formando uma das mais importantes ligas de cobre em função de suas propriedades. Em períodos de guerra, o aumento da resistência mecânica dada por essa adição gerou vantagens na produção de escudos e outros artefatos.
- **Por volta de 1.000 a.C.:** o poeta grego Homero chamou o cobre de *Chalkos*. Em função disso, a Era do Cobre também é conhecida como Era Calcólítica.
- **1.500 a.C. a 100 d.C.:** Início da Era Cristã, quando textos romanos descrevem as palavras *aes Cyprium* para representar o cobre, pois muito do metal provinha da ilha de Chipre (Cyprus). Esta ilha ficou conhecida por fornecer a maioria do cobre utilizado pelos impérios antigos da Fenícia, Grécia e Roma. Em torno de três a dois séculos antes do início da Era Cristã, os gregos dos tempos de Aristóteles já eram familiarizados com o latão, mas só a partir do Império Romano de Augusto¹ a liga de cobre e zinco teve maior difusão de utilização.
- **100 a 1.600:** Antes da chegada dos europeus à América do Sul, as civilizações maia, asteca e inca já exploravam o cobre e outros metais nobres, como o ouro e a prata, em seus respectivos auges de desenvolvimento. Na Idade Média, o cobre e o bronze foram difundidos na China, na Índia e no Japão.
- **1.600 a 1.760:** Melhor compreensão da combinação de elementos químicos empregados na metalurgia na formação de ligas metálicas, incluindo o cobre.
- **1.760 a 1.840:** Primeira Revolução Industrial, um novo período para o cobre, quando, em função das descobertas e invenções realizadas por Ampère, Faraday e Ohm no campo da eletricidade, esse metal se mostrou um excelente condutor elétrico e térmico. O cobre é até hoje a melhor opção em custo-benefício na seleção de materiais para aplicações de engenharia que necessitem de excelente condutividade elétrica e/ou térmica.
- **1.900 a 1.935:** Desenvolvimento de ligas de alumínio de alta resistência, com destaque para ligas alumínio-cobre que possibilitaram a combinação de leveza e resistência mecânica por meio de tratamento térmico (endurecimento por precipitação), condição ideal para a indústria aeronáutica.
- **1.955 a 1.970:** Desenvolvimento de ligas de ferro, cobalto e titânio, propiciando materiais com propriedades mecânicas superiores. As ligas de cobre foram decisivas para o desenvolvimento dessas ligas, tanto como elemento de liga, quanto para confecção de moldes utilizados na fundição desses materiais.
- **1.970 até os dias atuais (2024):** Pesquisas envolvendo desenvolvimento de materiais e processos de fabricação que envolvam aplicações tecnológicas do cobre e suas ligas com materiais estratégicos, como nióbio e grafeno. A Termomecânica São Paulo S.A. (TM) tem se destacado como incentivadora e patrocinadora de pesquisas nesse segmento no âmbito nacional e da América Latina.

¹ Refere-se a Augusto, fundador do Império Romano e seu primeiro imperador, governando de 27 a.C. até sua morte em 14 d.C.

É necessário destacar que a importância do cobre e suas ligas ultrapassa a questão temporal, já que ele é um dos mais importantes grupos de materiais metálicos para aplicações em engenharia, assumindo significativa relevância comercial e tecnológica para a sociedade moderna. O cobre e suas ligas apresentam um conjunto de características que comprova as vastas possibilidades de aplicação, agregando valor a produtos e serviços, em diferentes períodos e com forte tendência de adoção em tecnologias futuras.

Curiosidades

Um importante exemplo de aplicação do cobre e suas ligas encontra-se nos veículos automotivos. Um automóvel comum de cerca de 1 t tem em sua massa de 22 a 25 kg de cobre e suas ligas. Já em uma tendência mundial, um veículo elétrico possui de 68 a 81 kg. O cobre é encontrado nos motores de propulsão, em sistemas de freios regenerativos e condutores para a bateria, além de aplicações tradicionais como equipamentos eletrônicos, acessórios audiovisuais e fios condutores. O cobre assume importante papel também na fabricação de componentes de veículos híbridos, que conciliam fontes de energia para motores de combustão interna (gasolina, por exemplo) e energia elétrica.

Em função das características peculiares do cobre em termos de qualidade de vida para o ser humano, especificamente para a saúde, ele apresenta os seguintes aspectos e aplicações:

- É um nutriente essencial para o organismo, sendo necessária a ingestão de 1 a 3 mg por dia;
- Sua falta pode causar doenças como a anemia profunda e problemas cardiovasculares; e
- Possui ação bactericida, e sua utilização nas tubulações diminui, de forma notável, a quantidade de bactérias carregadas pela água – tal propriedade não é encontrada em outros materiais.

Na sequência deste capítulo, são apresentados fundamentos sobre metalurgia, estrutura, imperfeições cristalinas, propriedades e ligas metálicas pertinentes ao cobre.

1.2 METALURGIA EXTRATIVA DO COBRE

A metalurgia extrativa do cobre é a última etapa do processamento de minérios e consiste na obtenção do metal, fase tipicamente conhecida como *redução do minério*. Em relação a metais como o alumínio e o ferro, a presença do cobre na crosta terrestre é pequena. Ele é encontrado na natureza na forma de sulfetos, óxidos e hidrocarbonatos, apresentados na Tabela 1.1.

Tabela 1.1 – Principais minérios de cobre, fórmulas químicas e percentuais em massa de cobre nas composições químicas

Minério	Fórmula química	Cobre (% em massa)
Calcopirita	CuFeS_2	34,5
Calcocita	Cu_2S	79,8
Covellita	CuS	66,5
Bornita	$2\text{Cu}_2\text{S} \cdot \text{CuS} \cdot \text{FeS}$	63,3
Tetraedrita	$\text{Cu}_3\text{SbS}_3 + x(\text{Fe,Zn}) 6\text{Sb}_2\text{S}_9$	32-45
Malaquita	$\text{Cu}_2(\text{OH})_2\text{CO}_3$	57,3
Azurita	$2\text{CuCO}_3 \cdot \text{Cu}(\text{OH})_2$	55,1
Crisocola	$\text{CuO} \cdot \text{SiO}_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$	37,9
Cuprita	Cu_2O	88,8

O minério mais importante para obtenção do cobre é a calcopirita, um sulfeto de cobre e ferro (CuFeS_2) que normalmente apresenta as seguintes impurezas: cal, sílica, alumina, Fe_2O_3 , TiO_2 e outros óxidos. Apesar dos valores mostrados na Tabela 1.1, atualmente são extraídos minérios com menos de 0,2% de cobre em massa.

A Figura 1.1 apresenta: (a) calcopirita, (b) malaquita, (c) azurita e (d) cuprita.

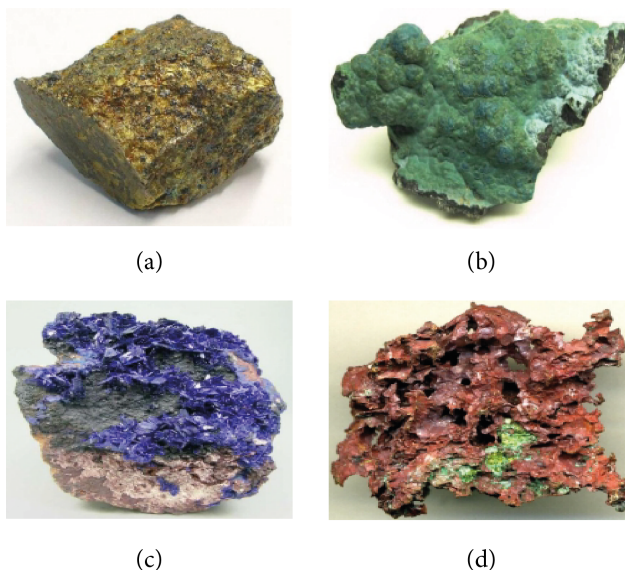


Figura 1.1 – Minérios de cobre: (a) calcopirita, (b) malaquita, (c) azurita e (d) cuprita.

1.2.1 PROCESSO DE METALURGIA EXTRATIVA DO COBRE

Em condições naturais, os metais se encontram combinados com outros elementos, como enxofre e oxigênio, numa condição estável de energia mínima. Para extrair o componente metálico do minério é necessário um grande dispêndio de energia: a quantidade para extrair 1 kg de cobre é de 50 a 90 MJ, compreendendo valores muito elevados, porém muito menores do que a quantidade necessária para a extração de alumínio, que é de 250 a 300 MJ/kg.

Os processos de extração de metais são basicamente dois: a pirometalurgia e eletrometalurgia. A *pirometalurgia* baseia-se na utilização de altas temperaturas e na mistura e reação do minério com elementos que possibilitam a extração do metal (por exemplo, a redução do ferro a partir da hematita). Já a *eletrometalurgia* baseia-se em um processo eletrolítico, no qual utiliza-se uma corrente elétrica para a extração de metais do minério, em equipamentos denominados cubas eletrolíticas, com consumo muito alto de energia (por exemplo, procedimento Hall-Héroult para redução do alumínio).

Em relação ao cobre, utiliza-se parcialmente o processo pirometalúrgico, uma vez que para aplicações elétricas o cobre deve alcançar pureza de 99,9% a 99,96%, em massa. Tratando-se do cobre eletrolítico, que é o cobre comercialmente puro, o processo eletrolítico é utilizado para refinar o metal além das condições permitidas pelo processo pirometalúrgico.

Por meio da avaliação de indicadores de instituições especializadas em cobre, como a Copper Development Association Inc. (CDA), os maiores produtores mundiais de minério de cobre são Chile, Estados Unidos, Peru e China. O Chile é, sozinho, responsável por aproximadamente 35% da produção desse importante minério. Já os Estados Unidos e o Peru têm um “empate técnico”, na ordem de 8%, o que possibilita a alternância entre a segunda e a terceira colocação dependendo do período considerado. A China está logo atrás, com 6%. O Brasil fica na décima quinta colocação, com pouco mais de 1% da produção mundial.

As principais minas produtoras no Chile são Chuquicamata, Escondida, Collahuasi e El Salvador (Índio Muerto); nos Estados Unidos, são Bingham e Morenci. Em relação ao Brasil, as principais minas são Mina do Sossego (Canaã dos Carajás – PA), Mina Chapada (Alto Horizonte – GO) e Mina Caraíba (Jaguarari – BA).

A Figura 1.2 mostra o diagrama com as etapas de obtenção de cobre, desde o trabalho inicial com o minério, passando por processo pirometalúrgico até obter o cobre, com grau de pureza superior a 99,95% Cu, em massa, por meio de processo eletrolítico.



Figura 1.2 – Sequência de obtenção do cobre, do minério até o cátodo de cobre.

A seguir são descritas as etapas da metalurgia do cobre.

a) **Concentração do minério**

Um moinho é utilizado para obter grãos com 0,5 mm; depois, por flotação (em água), os sulfetos pouco molháveis, que flutuam na espuma, são separados das impurezas que se depositam no fundo.

b) **Ustulação**

Trata-se do aquecimento do minério sob forte jato de ar. Processo químico que consiste numa oxidação parcial e precária que ocorre no estado sólido, destinada a reduzir o teor de enxofre (S), formando dióxido de enxofre (SO_2), e o teor de ferro, formando óxido de ferro (FeO).

c) **Fusão do matte (fundição intermediária)**

Consiste na operação de fusão do concentrado no forno do revérbero, formando o produto conhecido por matte de cobre. O matte é um composto fusível (funde entre

950 e 1.000 °C) contendo os sulfetos FeS e Cu₂S, que se dissolvem em quaisquer proporções, e pequenas quantidades de impurezas.

A fusão do matte corresponde a um refino por escória: adiciona-se um combustível (normalmente carvão em pó) com a carga e, após a fusão, a escória retém os óxidos FeO, SiO₂ e CaO.

d) Obtenção do blister (oxidação ou conversão)

A oxidação ou conversão é a etapa de produção do blister, iniciada quando o matte de cobre é transferido para os fornos conversores. O blister é o cobre impuro com muitas bolhas de SO₂. De forma geral, a operação compreende a oxidação do ferro com injeção de oxigênio e adição de areia, que escorifica o FeO formado.

Após a oxidação do ferro, o cobre reage formando Cu₂O, Cu e SO₂. A oxidação pode ser feita em conversores (tipo LD, ou processo Linz-Donawitz). Resulta no blister, que é uma liga com 98,5% de cobre contido, em massa.

e) Refino a fogo (ânodo)

É um refino pirometalúrgico, cujo objetivo é escorificar as impurezas facilmente oxidáveis, aumentando a pureza do blister. Consta de fusão, oxidação, redução e lingotamento, com o intuito de obter placas (ânodos) pesando entre 200 e 400 kg. Resulta em um produto de cobre de pureza de 99,5% (em massa), tornando o material adequado para um refino eletrolítico final.

f) Refino eletrolítico (cátodo)

O processo eletrolítico consiste na realização de dissolução do cobre dos ânodos obtidos na etapa anterior, por meio de uma solução de sulfato de cobre em ácido sulfúrico, com formação de eletrólito, e por meio do transporte do cobre para o cátodo por ação de corrente elétrica, onde se deposita com grau de pureza superior a 99,95% (em massa), constituindo a folha de cobre denominada cátodo. As impurezas Pb, Se, Te, Sn e metais preciosos são insolúveis no eletrólito e depositam-se no fundo da célula eletrolítica, formando um lodo, que é removido e utilizado para recuperação dos metais presentes, incluindo os preciosos.

As informações sobre o processo de metalurgia extrativa do cobre demonstram a complexidade e os custos de extração e são importantes para subsidiar políticas de conservação de energia.

Observação

Hidrometalurgia é o termo que designa processos de extração de metais nos quais a principal etapa de separação metal-ganga envolve reações de dissolução do(s) mineral(is) contendo os metais de interesse em meio aquoso. Suas aplicações incluem a produção de cobre, alumina, ouro, urânio, zinco, níquel, titânio, terras-raras, dentre outros.

1.3 ASPECTOS DO COBRE

O cobre e suas ligas pertencem ao grande grupo de materiais de engenharia classificado como materiais metálicos, que possuem propriedades que satisfazem ampla variedade de requisitos de projeto. São materiais de elevada importância tecnológica devido à sua extensa gama de propriedades possíveis, sendo estas influenciadas por ligações atômicas, elementos constituintes (composição química) e outras imperfeições, processos de manufatura e estruturas resultantes (micro e macroestrutura).

Compreendem materiais versáteis e importantíssimos, pois a seleção adequada de materiais propicia uma ótima relação custo-propriedades. Além disso, são materiais de extrema relevância comercial.

Na Figura 1.3 são mostrados aspectos estruturais importantes em um tubo de cobre e as respectivas escalas típicas de comprimento, usados como exemplos de materiais de engenharia. Vale ressaltar que a palavra *estrutura* vem do latim *structura*, derivada do verbo *struere*, que significa construir. De modo geral, refere-se à forma como as partes ou os elementos se agregam para compor o todo.

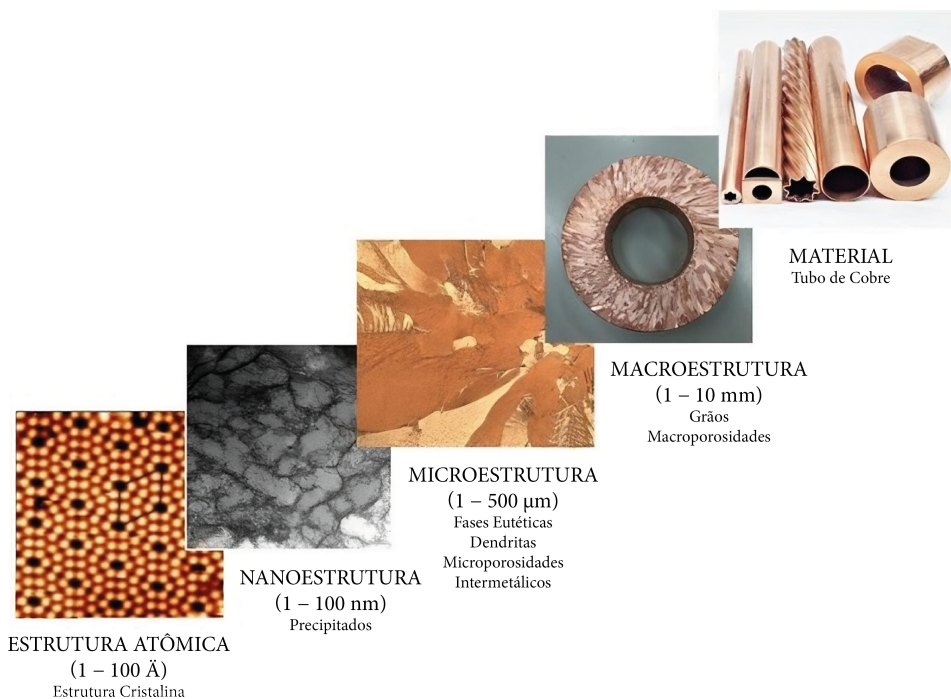


Figura 1.3 – Tubo de cobre com características estruturais e respectivas dimensões típicas, em termos de comprimento (Cortesia da Termomecanica São Paulo S.A.).

Em ciência e tecnologia dos materiais, essa forma de aglomeração dos elementos constituintes pode se apresentar em quatro níveis distintos:

a) Estrutura atômica

Se refere à forma como os átomos presentes no material estão ligados e, consequentemente, as propriedades resultantes. Por exemplo, os átomos de cobre são unidos por meio de ligações metálicas, conforme Figura 1.4.

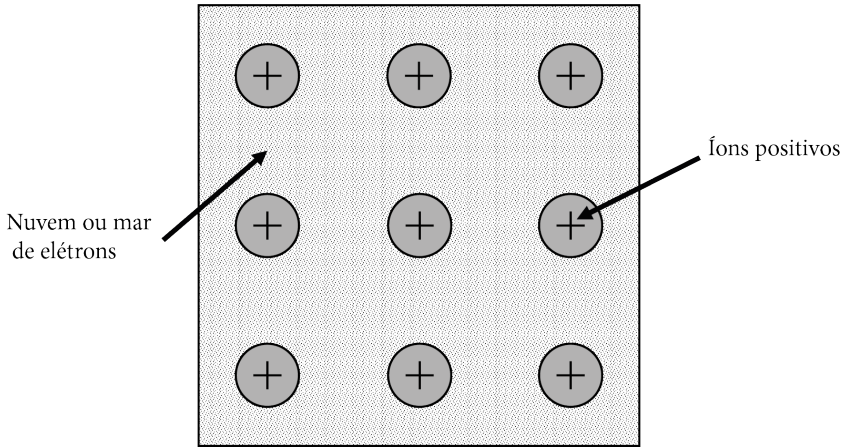


Figura 1.4 – Ligação metálica.

b) Arranjo atômico

Se refere à forma como os átomos estão arranjados uns em relação aos outros. Por exemplo, o arranjo atômico gerado no cobre apresenta estrutura cristalina cúbica de face centrada (CFC), conforme mostrado na Figura 1.5.

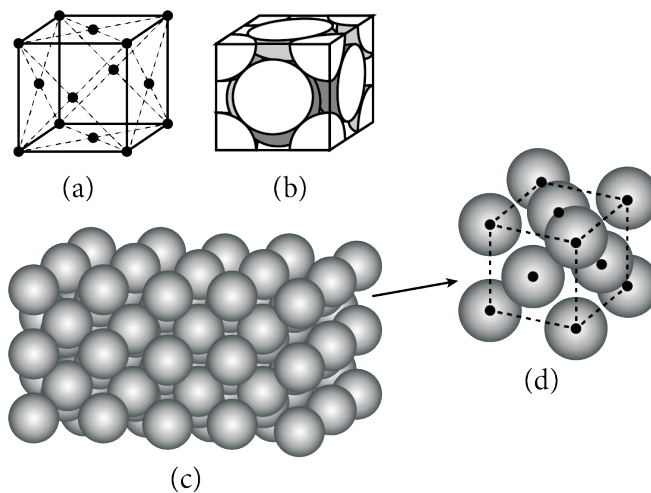


Figura 1.5 – Estrutura CFC: (a) representação esquemática com posições atômicas; (b) com esferas rígidas; (c) com empacotamento de células unitárias; e (d) com célula unitária isolada.

c) Microestrutura

É o sequenciamento dos cristais gerado pelos dois níveis anteriores, porém ainda é muito pequeno para ser observado a olho nu, necessitando de ampliação superior a 10 vezes. Por exemplo, as Figuras 1.6(a) e (b), respectivamente, apresentam a microestrutura de ligas de cobre, bronze-alumínio-níquel, considerando em (a) uma linha de referência de 1 μm e em (b) uma linha de referência de 5 μm . Em ambas as imagens há destaque para as fases e microconstituintes ou intermetálicos presentes na liga.

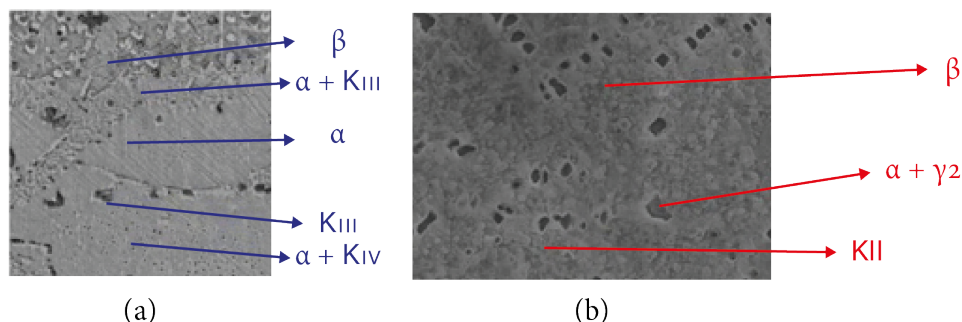


Figura 1.6 – Microestrutura de ligas de cobre (bronze-alumínio-níquel) obtida por microscopia eletrônica de varredura (MEV): (a) com 10% Al (em massa) e (b) com 14% Al (em massa), respectivamente.

d) Macroestrutura

Compreende a forma como as microestruturas se organizam para compor o material, podendo ser visível a olho nu ou com aumento óptico máximo de 10 vezes (visível com auxílio de lupa ou de microscópio óptico). Por exemplo, a Figura 1.7 mostra a macroestrutura de uma liga de cobre (bronze com microadições de fósforo) em estado bruto de fusão.

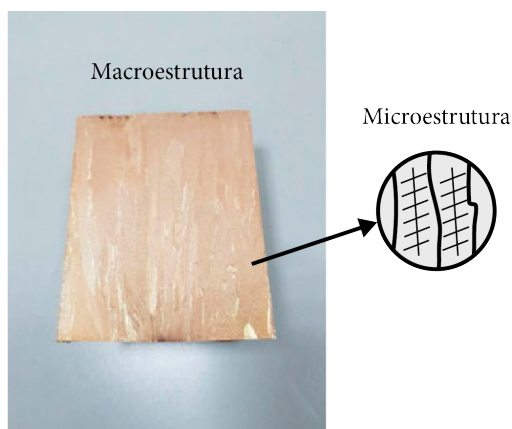


Figura 1.7 – Macroestrutura de liga de cobre em estado bruto de fusão em escala natural (imagem oriunda de estudos feitos em parceria entre o Centro de Pesquisas, Desenvolvimento e Ensaios da Termomecânica e o Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de São Paulo).

A microestrutura e a macroestrutura requerem preparação da superfície do material a ser analisado, e geralmente é utilizado ataque por meio de reagentes químicos para posterior visualização da estrutura resultante, independentemente do aumento considerado.

É importante salientar que, nos quatro níveis apresentados, a estrutura resultante do material influencia em suas propriedades. A Figura 1.8 mostra a relação linear em ciência e tecnologia dos materiais:



Figura 1.8 – Relação linear entre processo de manufatura, estrutura resultante e propriedades dos materiais.

1.3.1 LIGAÇÕES METÁLICAS (ESTRUTURA ATÔMICA)

A formação dos materiais ocorre por meio das ligações atômicas, que certamente influenciam suas propriedades. A classificação dos materiais está relacionada a essas ligações, que podem ser primárias ou secundárias. As ligações metálicas são as ligações químicas primárias presentes nos metais e suas ligas, o que inclui o cobre. Compreendem átomos que apresentam na camada de valência (1, 2 ou até 3 elétrons), logo tendem a perder elétrons. A Figura 1.4 apresenta os íons positivos envoltos pelo “mar ou nuvem de elétrons”.

Em função das ligações metálicas, os materiais metálicos apresentam peculiaridades como as próprias ligações atômicas que os constituem, embora exibam certo caráter covalente. A condutividade térmica, a condutividade elétrica e a opacidade, propriedades que caracterizam um metal, são decorrentes da existência da nuvem de elétrons. Quanto menor for o número de elétrons de valência do átomo metálico, maior será a predominância da ligação metálica.

O cobre tem caráter metálico muito forte, o que possibilita que ele apresente condutividades elétrica e térmica elevadas. Já os metais de transição, como níquel, ferro, tungstênio e vanádio, que apresentam maior número de elétrons de valência nos seus átomos, possuem uma parcela apreciável de ligações covalentes. Isso explica suas piores condutividades térmica e elétrica em comparação ao cobre.

Em geral, os materiais metálicos são resistentes e deformáveis, em função das ligações metálicas. A Figura 1.9 mostra o comportamento mecânico que ocorre em materiais metálicos. Durante a aplicação de carga ou força externa por meio de martelo, nota-se que os íons positivos escorregam uns sobre os outros, permitindo que o metal se deforme. Assim, o material metálico muda de forma, mas não se quebra (Figura 1.9), o que explica o comportamento maleável do cobre, por exemplo.

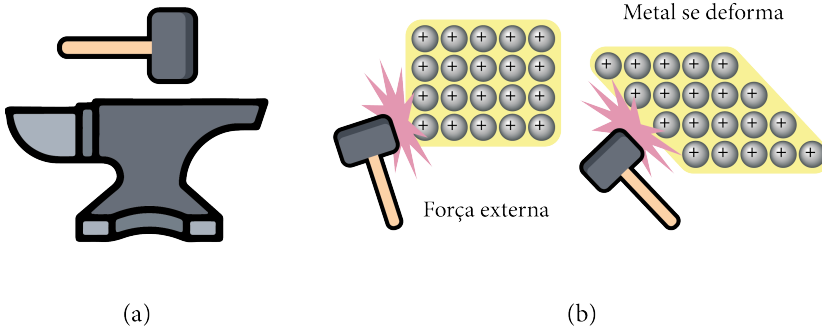


Figura 1.9 – (a) o golpe do martelo (b) força os cátions do material metálico a deslizar uns sobre os outros, gerando assim grande maleabilidade.

1.3.2 ESTRUTURAS CRISTALINAS E NÃO CRISTALINAS (AMORFAS)

No caso dos materiais metálicos, é comum durante o processo de solidificação que seus átomos se unam e adquiram um arranjo atômico organizado e periódico ao longo de grandes distâncias atômicas, o que é denominado estrutura cristalina. As estruturas cristalinas mais comuns nos metais são as estruturas cúbica de corpo centrado (CCC), cúbica de face centrada (CFC) e hexagonal compacta (HC).

Na Figura 1.10, são mostradas as células unitárias dessas três possibilidades de estruturas cristalinas e seus respectivos parâmetros de rede cristalina.

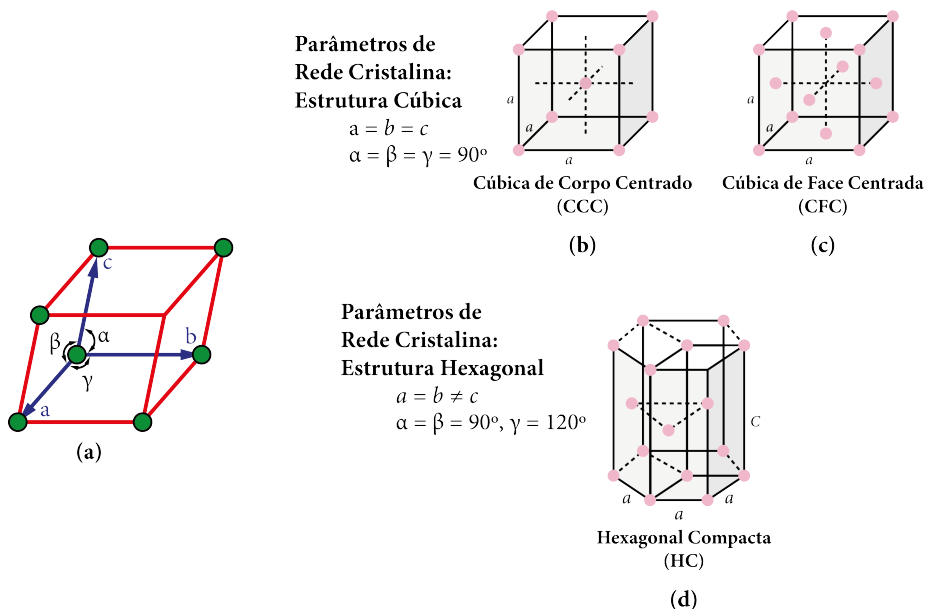


Figura 1.10 – (a) Parâmetros de rede cristalina e células unitárias: (b) CCC, (c) CFC e (d) HC.

A estrutura cúbica de face centrada do cobre, destacada em maiores detalhes na Figura 1.11, apresenta uma estrutura cristalina que possui uma célula unitária com átomos localizados em todos os oito vértices e no centro das seis faces.

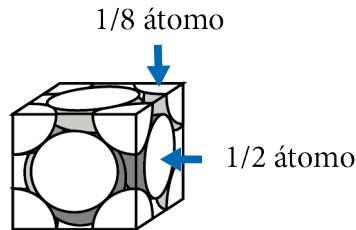


Figura 1.11 – Célula unitária tridimensional da estrutura cúbica de face centrada.

Por meio de análise da Figura 1.11, nota-se que há meio átomo no centro de cada face e um oitavo em cada vértice da célula unitária. O número (n) de átomos por célula unitária é obtido da seguinte forma:

$$n = 6 \cdot \frac{1}{2} + 8 \left(\frac{1}{8} \right)$$

$$n = 4$$

Logo, a estrutura CFC apresenta 4 átomos por célula unitária.

O *Fator de Empacotamento Atômico* (FEA) da estrutura CFC, considerando a agregação de esferas de forma ótima, pode ser obtido da seguinte forma:

$$FEA = \frac{V_{\text{átomos}}}{V_{\text{célula-unitária}}} \quad (1.1)$$

$$FEA = \frac{nV_e}{V_c} \quad (1.2)$$

$$FEA = \frac{4 \left(\frac{4}{3} \pi R^3 \right)}{a^3} \quad (1.3)$$

Em que:

$V_{\text{átomos}}$ = volume dos átomos na célula unitária (m^3);

$V_{\text{célula-unitária}}$ = volume da célula unitária (m^3);

n = número de átomos da célula unitária;

V_e = volume da esfera (m^3);

R = raio atômico (m);

V_c = volume do cubo (m^3);

a = aresta do cubo (m) — é o parâmetro de rede a para células unitárias cúbicas.

A estrutura cúbica de face centrada (CFC) apresenta FEA igual a 0,74 ou 74%, ou seja, obtemos esse valor se pegamos os dados de raio atômico (R) e de parâmetro de rede (a) para qualquer material com estrutura cúbica de face centrada (CFC), como é o caso do cobre. Em termos de comparação, a estrutura hexagonal compacta (HC) também apresenta 74% de FEA, e a estrutura cúbica de corpo centrado (CCC), tem FEA de 68%. As estruturas CFC e HC são compactas, em função do máximo adensamento atômico.

O *Número de Coordenação* (NC) da célula unitária representa o número de átomos vizinhos mais próximos que cada átomo da referida estrutura apresenta. No caso da estrutura CFC, o número de coordenação é 12.

Outros conceitos importantes em relação à estrutura CFC do cobre são as direções e os planos cristalográficos. A direção cristalográfica é um vetor dentro da célula unitária representado em linha que, assim como os planos cristalográficos (planos contidos na célula unitária), é importante para compreender aspectos do cobre que vão desde a solidificação até a ductilidade e o excelente desempenho na deformação a frio (realizada abaixo da sua temperatura de recristalização). Na Figura 1.12, são mostrados exemplos de planos e direções cristalográficas na estrutura CFC.

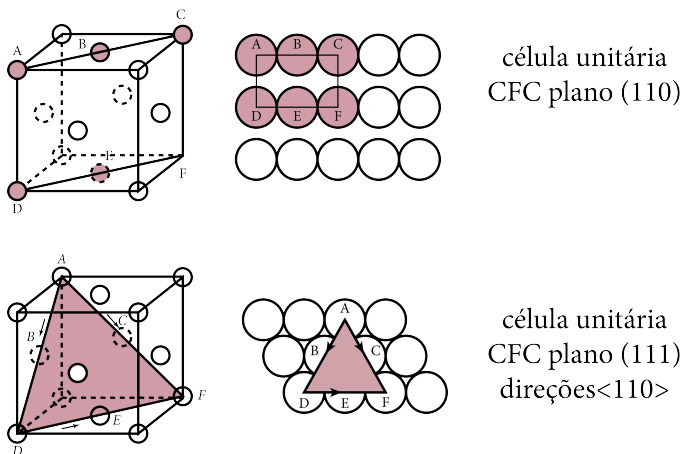


Figura 1.12 – Exemplos de planos e direções cristalográficas na estrutura cúbica de face centrada.

A Figura 1.13 mostra a representação de direções cristalográficas contidas nos planos cristalográficos em estruturas CFC. Na estrutura cristalina CFC, os sistemas de

escorregamento são resultado do produto entre quatro planos e três direções, totalizando 12 possibilidades de escorregamento. Na parte superior da figura, visualizamos as três direções representadas por setas e apenas um plano; entretanto, há quatro planos possíveis com três direções cada. Na HC, os sistemas de escorregamento são resultado do produto entre um plano e três direções, totalizando três. Já na parte inferior da figura, visualizamos as três direções representadas por setas e o plano no qual estão contidas.

No que diz respeito à ductilidade, a estrutura CFC apresenta 12 sistemas possíveis para escorregamento de discordâncias, que são as possibilidades de planos cristalográficos; entre eles, estão as direções cristalográficas em que as discordâncias (defeitos em linha) poderão escorregar (ou deslizar).

É importante ressaltar que o escorregamento de discordâncias ocorre nas direções mais densas contidas nos planos mais densos, pois os átomos mais próximos em linha apresentam movimentação facilitada nos espaços presentes no material (interstícios, por exemplo). A estrutura CFC é uma das justificativas da excelente ductilidade do cobre em comparação a metais de estrutura HC, como o magnésio e zinco.

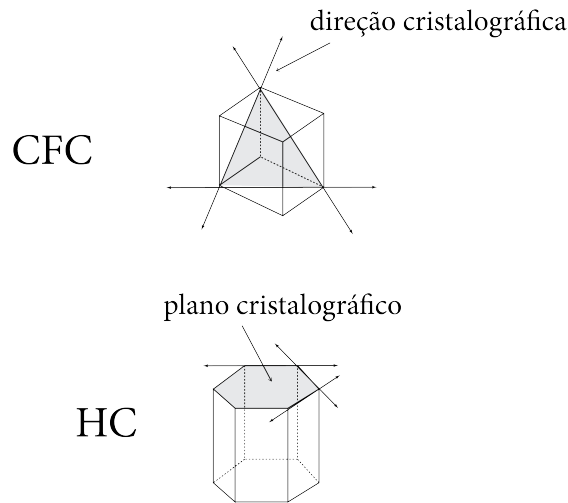


Figura 1.13 – Planos e direções de escorregamento de estruturas CFC e HC.

O cobre é CFC, porém sua combinação com outros elementos e processos de tratamento térmico podem alterar regiões específicas da microestrutura com morfologias diferentes, como estrutura cúbica de corpo centrado (CCC), aumentando as possibilidades de aplicação. Por exemplo, na condição de liga cobre-zinco (especificamente latão α/β), a fase rica em cobre é chamada de fase alfa (α), apresentando estrutura CFC. Dependendo da composição da liga, é comum a ocorrência da fase beta (β) com estrutura CCC. A estrutura CFC é mais dúctil do que a CCC, que é mais frágil.

Por fim, o *material amorfo* possui uma estrutura não cristalina. São materiais cuja ordem alcança apenas os átomos vizinhos mais próximos e são desordenados, considerando grandes distâncias atômicas. Alguns materiais metálicos podem ser amorfos, dependendo do processo de manufatura utilizado. São chamados de metais vítreos ou vidros metálicos.

Durante o processo de solidificação de um material metálico, o uso de altas taxas de resfriamento, superiores a 10^5 K/s, acaba gerando uma estrutura desordenada (não cristalina). Isso possibilita, por exemplo, a obtenção de ligas cobre-zircônio (Cu-Zr) amorfas com propriedades mecânicas muito interessantes, com resistência mecânica superior às ligas de mesma composição que apresentam estrutura cristalina definida.

1.4 IMPERFEIÇÕES OU DEFEITOS CRISTALINOS EM METAIS

Antes de iniciar a contextualização do tema imperfeições em sólidos com ênfase no cobre, seria pertinente analisar as seguintes questões: por que é benéfico adicionar elementos de liga ao cobre, saindo da condição de elemento teoricamente puro (cristais hipoteticamente perfeitos)? Por que o cobre e suas ligas sofrem deformação plástica e podem ser conformados? Por que é necessária a utilização de atmosfera controlada em determinados processos?

O conhecimento sobre as imperfeições cristalinas auxilia a responder essas e outras questões pertinentes a aplicações tecnológicas do cobre e suas ligas que envolvam a necessidade de minimizar os defeitos cristalinos ou curiosamente de introduzi-los para incremento de propriedades desejadas ao material metálico. Isso significa que as imperfeições cristalinas não são exclusivamente deletérias a esse importante grupo de materiais de engenharia.

Os *defeitos cristalinos* são imperfeições em sólidos que ocorrem no arranjo periódico regular dos átomos em um cristal. Podem envolver irregularidades na posição e no tipo de átomos envolvidos. O tipo e o número de defeitos dependem do material, do histórico de processamento e do ambiente considerado.

Por meio da introdução de defeitos, controlando o número e o arranjo destes, é possível aprimorar e desenvolver novos materiais com as características desejadas, como a obtenção de dureza. Os defeitos cristalinos podem ser pontuais, lineares, planares e volumétricos. Na Figura 1.14 são mostrados os defeitos cristalinos mais comuns em materiais metálicos.

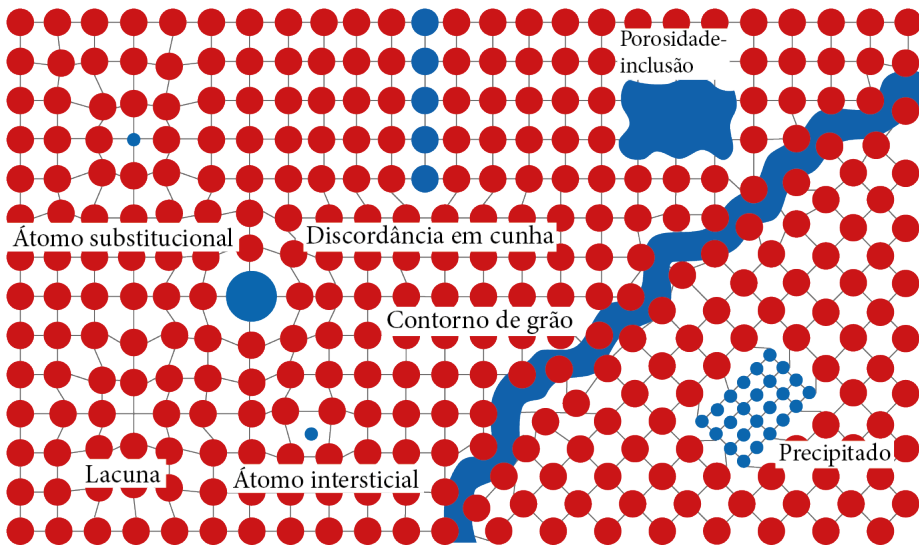


Figura 1.14 – Tipos de defeitos comuns em materiais metálicos.

1.4.1 DEFEITOS PONTUAIS

Os *defeitos pontuais* compreendem imperfeições puntiformes (adimensionais) associadas a uma ou duas posições atômicas, ou seja, em nível de arranjo atômico. São formados durante a solidificação do cristal como resultado do deslocamento dos átomos.

Lacunas (ou vacâncias) e *átomos autointersticiais* geram distorções de planos atômicos e influenciam geralmente as propriedades dos materiais de forma deletéria. Porém, as lacunas podem ser benéficas para processos difusivos que envolvam movimentação de material, propiciando maior facilidade para a inserção de outros átomos.

Os *átomos intersticiais* e *substitucionais* podem ser benéficos, pois propiciam a formação das ligas metálicas, mas deve-se tomar cuidado com o controle de teores máximos de determinados elementos na composição da liga para evitar efeitos deletérios em termos de propriedade.

Nas ligas de cobre, os átomos de outros elementos podem ser adicionados com o intuito de obter características específicas, como incremento de resistência mecânica, dureza e/ou outras propriedades. Nas ligas de cobre, a adição de elementos como níquel aumenta a resistência mecânica e à corrosão, por exemplo. Por meio da formação de ligas de cobre, ocorre uma gama maior de possibilidades de aplicações em função das características desejadas.

Em ligas de cobre compostas por sistemas binários, ou seja, por dois elementos, temos o solvente (elemento com maior percentual, o cobre, que é a base da liga) e o soluto (elemento com menor percentual). Por exemplo, no latão 70/30, o cobre é o

solvente com 70% em massa e o zinco é o soluto com 30% em massa. Em muitos casos práticos, é comum se deparar com sistemas superiores aos binários, como os ternários (três elementos; Cu-Al-Ni, cobre-alumínio-níquel, por exemplo), os quaternários (quatro elementos; Cu-Al-Ni-Fe, cobre-alumínio-níquel-ferro, por exemplo) e os multinary (acima de quatro elementos; Cu-Al-Ni-Fe-Nb, cobre-alumínio-níquel-ferro-nióbio, por exemplo).

As ligas de cobre no estado sólido são formadas por soluções sólidas e/ou segundas fases. As propriedades e as estruturas das soluções sólidas podem ser explicadas com base na estrutura cristalina. Uma solução sólida de dois metais (sistema binário) é formada em todas as proporções: se os átomos de um deles puderem substituir os átomos na estrutura cristalina do outro, temos então uma solução sólida substitucional – o que ocorre com o sistema cobre-níquel, por exemplo.

1.4.2 DEFEITOS LINEARES

As *discordâncias* são imperfeições unidimensionais que originam uma distorção da rede em torno de uma linha, separando a região perfeita da região deformada do material. Essas imperfeições estão associadas ao processo de solidificação e de deformação do material, sendo este último o de maior ocorrência.

O escorregamento de discordâncias nas direções cristalográficas contidas nos planos cristalográficos, em que ambos (direções e planos) apresentam o maior adensamento, propicia um mecanismo para a deformação plástica do cobre e suas ligas, o que é imprescindível para os processos de conformação mecânica por deformação plástica: forjamento, laminação, extrusão, trefilação e estampagem.

A Figura 1.15 é uma representação esquemática da deformação plástica do arranjo cristalino gerada pelo escorregamento de discordâncias do tipo misto, que combina discordâncias em cunha e em hélice.

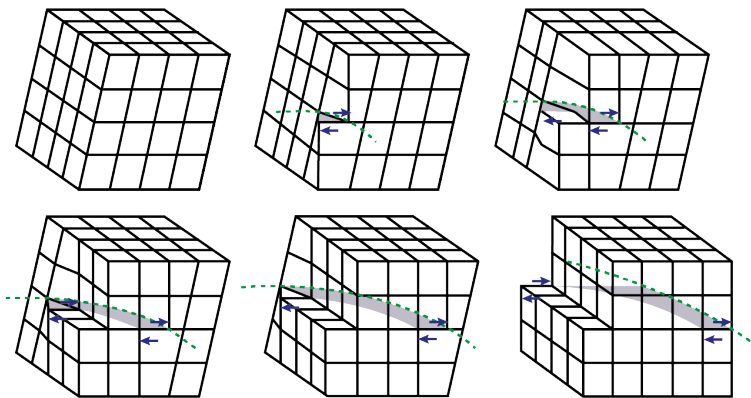


Figura 1.15 – Deformação plástica oriunda do escorregamento de discordâncias mistas. As setas mostram a direção da discordância, e as linhas tracejadas, a linha de discordância.

As discordâncias também geram lacunas e podem, portanto, influenciar em processos de fabricação que envolvam difusão. A densidade e o movimento das discordâncias podem ser controlados pelo grau de deformação (conformação mecânica) e/ou por tratamentos térmicos.

O grau de deformação plástica nos processos de conformação mecânica de cobre e suas ligas gera o encruamento, uma característica de trabalho a frio, e consiste no aumento da resistência mecânica e dureza do material metálico por meio de trabalho mecânico. Isso significa que, se o objetivo é elevar a resistência mecânica e a dureza desses materiais, as discordâncias são benéficas, pois estão associadas às deformações plásticas que propiciam tal obtenção.

Para ligas de cobre que não são tratáveis termicamente (endurecíveis por precipitação, por exemplo), torna-se tecnologicamente possível o incremento de resistência mecânica e dureza por meio de trabalho mecânico.

1.4.3 DEFEITOS INTERFACIAIS

Os defeitos interfaciais, também conhecidos como planares ou superficiais, são contornos ou fronteiras que possuem duas dimensões e, normalmente, separam regiões dos materiais de diferentes estruturas cristalinas e/ou orientações cristalográficas. Em relação ao cobre e suas ligas, esses defeitos cristalinos incluem os contornos de grão e maclas, por exemplo.

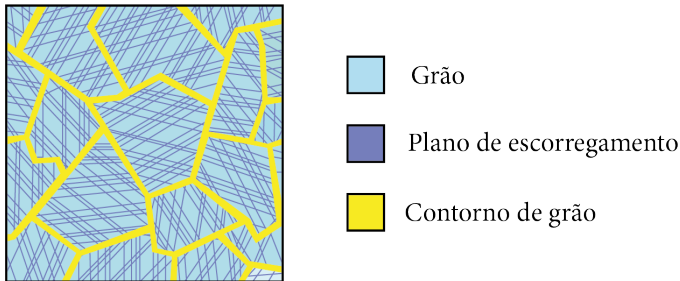
Os *contornos de grão* dividem o material em regiões com a mesma estrutura cristalina, mas com orientação cristalográfica diferente. Em engenharia, os materiais são geralmente policristalinos, constituídos por monocristais com diferentes orientações.

A fronteira entre os monocristais é uma “parede”, que corresponde a um defeito bidimensional. Esse defeito cristalino refere-se ao contorno que separa dois pequenos grãos (ou cristais) com diferentes orientações cristalográficas, presentes em um material policristalino.

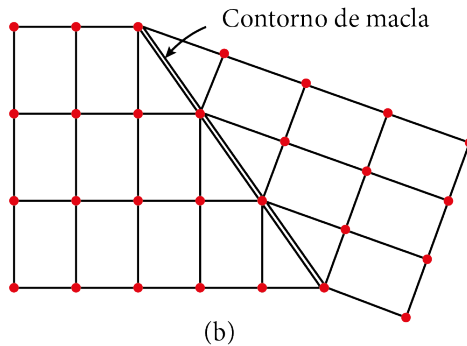
No interior do grão, todos os átomos estão arrançados com a mesma orientação, caracterizada pela célula unitária do material. Os contornos de grão são produzidos por processos de fabricação do material metálico, como aqueles que envolvem solidificação (fundição e soldagem por fusão, por exemplo).

Os contornos de grão influenciam as propriedades mecânicas dos materiais metálicos, pois são obstáculos para o escorregamento (ou deslizamento) das discordâncias, que contribuem para as deformações plásticas dos materiais metálicos. Os grãos apresentam orientações cristalográficas diferentes. Logo, quando as discordâncias chegam aos contornos do grão, encontram dificuldade para o escorregamento, pois o grão vizinho apresenta outra orientação. Por isso, um material metálico de mesma composição química (cobre comercialmente puro ou na condição de liga, por exemplo) com grãos refinados apresenta maior resistência mecânica do que um com grãos grosseiros.

A Figura 1.16(a) mostra uma estrutura policristalina, resultado mais comum em processamento de materiais metálicos, destacando os grãos e seus respectivos contornos de grão e planos de escorregamento.



(a)



(b)

Figura 1.16 – (a) Estrutura policristalina, destacando grãos, contornos de grão e planos de escorregamento e (b) ilustração de macla, destacando contorno de macla.

As *maclas*, também chamadas de “twins” (cristais gêmeos), compreendem uma região na qual existe uma estrutura-espelho por meio de um plano ou de um contorno, conforme mostrado na Figura 1.16(b). São formadas durante a deformação plástica (tensão mecânica) e a recristalização (tratamento térmico) e são imperfeições comuns em ligas de cobre.

Assim como as discordâncias, as maclas estão associadas à deformação plástica. No entanto, há ligas metálicas com efeito de memória de forma (EMF) que sofrem deformação plástica por meio de tensão mecânica e formam as maclas mecânicas.

Existem ligas cobre-zinco (Cu-Zn) e cobre-alumínio-níquel (Cu-Al-Ni) que são compostas pelo arranjo entre metais de transição e detêm o efeito de memória de forma. Para essas ligas, com o aquecimento a determinada temperatura, o material retorna à forma anterior ao processo de deformação plástica (maclas mecânicas), e por isso também são chamadas de *pseudoelásticas*. Materiais com tais características fazem parte do grupo dos materiais inteligentes.

Para as ligas de cobre com efeito de memória de forma, a deformação plástica realmente irreversível é a que ocorre por escorregamento de discordâncias, pois a de malhas pode ser reversível.

1.4.4 DEFEITOS VOLUMÉTRICOS

Os defeitos volumétricos, também conhecidos como defeitos de massa, são imperfeições tridimensionais introduzidas durante o processamento do material e/ou fabricação do componente. Os tipos de defeitos volumétricos comuns no cobre e principalmente em ligas de cobre são:

- Porosidades: presença de gases durante o processamento do material ou pela contração dos materiais metálicos.
- Inclusões: presença de impurezas estranhas ou gasosas.
- Precipitados: aglomerados de partículas com composição diferente da matriz.
- Segunda fase: presença de impurezas (ocorre quando o limite de solubilidade é ultrapassado).

No processo de fundição, a estrutura resultante após a solidificação determina as propriedades do produto. Pode-se afirmar que a solidificação influencia também os produtos que passam por processos de conformação mecânica, com destaque para os produtos conformados por deformações plásticas que são influenciados por outros fatores, como temperatura de recristalização, encruamento (trabalho a frio) e tipo de deformação. No entanto, é clara a importância da estrutura obtida no lingotamento e dos muitos defeitos que surgem na solidificação permanecem mesmo após a etapa de conformação plástica dos lingotes.

Em relação aos defeitos volumétricos, especificamente as inclusões (impurezas) ou alterações de composições químicas, na própria técnica de manuseio adequado de ferramentas no banho metálico, por exemplo, evita-se que em ligas de cobre o ferro presente em ferramentas de aço para agitação do metal líquido seja inserido para dentro do banho, resultando, após o processo de solidificação, na alteração da composição química da liga de cobre e, conseqüentemente, de suas propriedades.

A presença de porosidades é prejudicial em relação ao comportamento mecânico da liga de cobre, pois são concentradores de tensão e fragilizam o material, tornando-o suscetível a falhas. Uma forma de minimizar as porosidades e a ocorrência dos gases aprisionados (inclusões: hidrogênio que causa fragilização) é o processo de solidificação por meio da adoção de ligas com menores intervalos de solidificação e/ou a utilização de atmosfera controlada (inserção de gás inerte, como o argônio). Fornos a vácuo também propiciam controle de atmosfera e melhora de processo. Outra forma de minimizar as porosidades pode ser a conformação mecânica por deformação plástica, como o forjamento, que se baseia na aplicação de cargas compressivas sobre o material, realizado normalmente em trabalho a quente, e geração do “colapso” das porosidades, reduzindo-as.

Técnicas operacionais adequadas e tecnologias bem empregadas minimizam a possibilidade de defeitos volumétricos, que geralmente são prejudiciais para as propriedades dos materiais metálicos e suas respectivas aplicações em engenharia.

1.5 PROPRIEDADES DO COBRE E SUAS LIGAS

As propriedades do cobre ou de suas ligas compreendem a forma como o material se comporta em relação a determinados estímulos externos. É possível encontrar soluções para projetos mecânicos, edificações, aplicações elétricas e outras tecnologias por meio da análise e compreensão dos comportamentos apresentados pelos materiais em função de solicitações mecânicas, elétricas, térmicas e outras.

Por exemplo, quando uma liga de cobre é submetida a trabalhos em temperaturas elevadas, seu comportamento mecânico se altera ou não? Por que determinadas ligas de cobre são mais resistentes mecanicamente do que outras? Por que o cobre é viável para a fabricação de fios condutores, já o aço não?

No processo de seleção de materiais para as aplicações tecnológicas, é crucial o conhecimento de suas propriedades, pois estas influenciam na segurança, na economia e no desempenho de qualquer peça ou componente. As propriedades gerais dos materiais de engenharia são definidas a seguir: mecânicas, térmicas, elétricas, magnéticas, químicas, ópticas e tecnológicas.

1.5.1 PROPRIEDADES MECÂNICAS

As *propriedades mecânicas* consistem no comportamento do material quando é exposto a esforços (cargas externas) que geram tensões mecânicas. Em relação ao cobre e suas ligas, são propriedades que determinam sua capacidade de transmitir e resistir aos esforços que lhe são aplicados, sem romper nem verificar deformações permanentes ou com a verificação de deformações permanentes.

As principais propriedades que determinam o comportamento mecânico de um material de engenharia são definidas a seguir:

- *Elasticidade* é a propriedade que os materiais apresentam para recuperar a forma quando as tensões deformantes são retiradas ou diminuídas. Um exemplo de deformação elástica ocorre quando abrimos um clipe metálico com o intuito de prender folhas de papel: ele se deforma com uma força externa e retorna ao formato original após a retirada da força.
- *Plasticidade* é a propriedade dos materiais quando excedido o limite para o comportamento elástico, em que o corpo apresenta uma deformação permanente após a retirada da carga aplicada. Define-se como *deformação plástica* aquela presente num corpo que está permanentemente deformado. Os fios de cobre que são obtidos por trefilação são um ótimo exemplo da plasticidade dos materiais.

- *Rigidez* pode ser definida como a resistência que o material oferece à deformação.
- *Ductilidade* é a capacidade de o material deformar-se plasticamente sem romper. O cobre é um bom exemplo de material dúctil.
- *Resiliência* é a capacidade do material em absorver energia quando submetido a uma deformação elástica, de resistir a esforços externos como impactos, desde que não sofra deformação permanente. As molas são elementos de construções mecânicas que evidenciam a importância da resiliência em aplicações tecnológicas, pois armazenam energia quando são tensionadas e a liberam quando o esforço é cessado.
- *Resistência mecânica* pode ser definida como a capacidade de um componente ou de uma estrutura de suportar esforços sem sofrer deformações permanentes. Por exemplo, a estrutura metálica de um automóvel e de outros produtos do setor de transportes deve resistir a todos os esforços durante a sua utilização.
- *Tenacidade* é a capacidade do material de absorver energia até ocorrer a fratura. Quando a energia é absorvida progressivamente, acontece a deformação elástica e plástica do material antes de se romper. É fundamental para projetos com deformação plástica. Um exemplo é a carroceria de automóveis.
- *Maleabilidade* é a propriedade que um material tem de se deformar sob pressão ou choque. Um material é maleável quando, sob tensão, não sofre rupturas ou fortes alterações na estrutura (endurecimento). Essa tensão pode ser aplicada sob aquecimento. Se a maleabilidade em temperatura ambiente é muito grande, o material é chamado plástico, como é o caso do cobre.
- *Dureza* é a propriedade característica de um material sólido de resistir à penetração, ao desgaste e a deformações permanentes. De forma corriqueira, ou seja, na linguagem do chão de fábrica, define-se dureza como resistência ao risco. De forma geral, a inserção de elementos de liga no cobre incrementa os valores dessa propriedade mecânica.
- *Fragilidade* é a propriedade mecânica do material que apresenta baixa resistência aos impactos. A adição de elementos de liga ao cobre contribui para o aumento de resistência mecânica, de dureza e diminuição de tenacidade, o que de certa forma aumenta a fragilidade do material.
- *Fluência (creep)* é uma propriedade de materiais quando submetidos a cargas de tração constantes em temperaturas elevadas, dependente do tempo. Por exemplo, materiais aplicados em turbinas devem apresentar bom comportamento em condições de fluência.

Os componentes feitos a partir de materiais metálicos como cobre e suas ligas, que são expostos a esforços externos, devem ser processados de forma a apresentar níveis apropriados de certas propriedades mecânicas (isto é, resistência mecânica, dureza, ductilidade e tenacidade). Dessa forma, é essencial compreender o significado dessas propriedades e desenvolver um senso de perspectiva das magnitudes aceitáveis dos valores das propriedades.

A forma como as propriedades mecânicas do cobre e suas ligas são obtidas será mais bem explicada no Capítulo 2, pertinente aos ensaios mecânicos.

1.5.2 PROPRIEDADES TÉRMICAS

Os materiais submetidos a variações de temperaturas apresentam diferentes comportamentos devido a algumas propriedades classificadas como *propriedades térmicas*. Elas apresentam relevante papel nas aplicações do cobre, que apresenta ótima condutividade térmica, sendo muito utilizado em trocadores de calor, por exemplo.

A *expansão térmica*, de forma geral, consiste no aumento do volume e na diminuição da massa específica de um material sólido que sofre variação em sua temperatura quando submetido à ação do calor.

O cobre e suas ligas se expandem quando aquecidos e se contraem quando resfriados. A variação do comprimento é proporcional à variação da temperatura, na qual a constante de proporcionalidade é o coeficiente de expansão térmica (α , em $^{\circ}\text{C}^{-1}$), conforme a seguinte equação:

$$L_2 - L_1 = \alpha L_1 (T_2 - T_1) \quad (1.4)$$

Em que L_1 e L_2 são comprimentos, em mm, correspondentes às temperaturas T_1 e T_2 , em $^{\circ}\text{C}$, respectivamente.

A expansão térmica se reflete em função da energia de ligação interatômica: quanto maior essa energia, menor é o coeficiente de expansão térmica. Dessa forma, os valores dos coeficientes de expansão térmica dos polímeros são tipicamente maiores que os dos metais, que por sua vez são maiores que os das cerâmicas.

O *calor específico* (C) de um material compreende a quantidade de energia térmica necessária para aumentar a temperatura de uma massa unitária do material em um grau.

No tratamento térmico de ligas de cobre, a quantidade de energia necessária para aquecer certa massa em um forno à temperatura elevada pode ser determinada a partir da seguinte equação:

$$H = Cm(T_2 - T_1) \quad (1.5)$$

Em que:

H = quantidade de energia térmica (J);

C = calor específico da liga de cobre ($J/\text{kg } ^{\circ}\text{C}$);

m = sua massa (kg);

$(T_2 - T_1)$ = variação de temperatura ($^{\circ}\text{C}$).

A capacidade volumétrica de armazenamento de calor de um material é a massa específica multiplicada pelo calor específico ρC . Dessa forma, o *calor específico volumétrico* é a energia térmica necessária para elevar a temperatura de um volume unitário do material em um grau ($\text{J}/\text{mm}^3 \text{ } ^\circ\text{C}$).

A *condutividade térmica* (k) é a propriedade dos materiais de transferir mais ou menos calor, ou seja, é o fenômeno pelo qual o calor é transportado das regiões de alta temperatura para as de baixa em uma substância.

O cobre e suas ligas são exemplos de materiais que apresentam boa condutividade térmica. Na Tabela 1.2, são mostrados alguns valores de propriedades térmicas para determinados materiais de engenharia em temperatura ambiente, e nota-se que o cobre apresenta condutividade térmica muito superior ao ferro, que é base para os aços e ferros fundidos, e ao alumínio.

Tabela 1.2 – Propriedades térmicas para alguns materiais de engenharia

Material	Calor específico (J/kg.K)	Condutividade térmica (W/m.K)
Cobre	386	398
Alumínio	900	247
Ferro	448	80
Prata	235	428

A relação entre a condutividade térmica e o calor específico volumétrico é frequentemente encontrada na análise de transferência de calor, sendo chamada *difusividade térmica* (K) e determinada da seguinte forma:

$$K = k / \rho C \left(\text{m}^2 / \text{s} \right) \quad (1.6)$$

Um exemplo de utilização da difusividade térmica está no cálculo das temperaturas de corte em processos de manufatura subtrativa, como o torneamento e o fresamento.

1.5.3 PROPRIEDADES ELÉTRICAS

Outra característica em que o cobre se sobressai é a facilidade com que ele, na condição de material sólido, transmite uma corrente elétrica e serve de referência para outros materiais na determinação da condutividade. A *Lei de Ohm* relaciona a corrente elétrica I — ou taxa de passagem de cargas elétricas ao longo do tempo — com a tensão elétrica aplicada V da seguinte maneira:

$$V = IR \quad (1.7)$$

Em que R é a resistência elétrica do material por meio do qual a corrente está passando. As unidades para V , I e R são, respectivamente, V (volt), A (ampère) e Ω (ohm).

A *resistividade elétrica* é a propriedade que determinados materiais possuem de se opor ao fluxo de corrente elétrica. A resistividade pode ser obtida da seguinte forma:

$$r = RA / l \quad (1.8)$$

Em que r é a resistividade elétrica em $\Omega.m$, R é a resistência elétrica, A é a área da seção transversal em m^2 , perpendicular à direção da corrente, e l é a distância, em m, entre os dois pontos em que a tensão elétrica é medida.

A *condutividade elétrica* é o inverso da resistividade elétrica ($1/r$), sendo a propriedade que possui maior ou menor transporte de cargas elétricas de acordo com o material, tendo como unidade de medida $(\Omega.m)^{-1}$. O cobre é um material no qual esse transporte se dá com facilidade e, em função disso, é chamado de *condutor elétrico*. Por serem bons condutores elétricos, o cobre e suas ligas são utilizados na fabricação de fios e aparelhos elétricos. Na Tabela 1.3, são mostrados valores de condutividade elétrica para alguns materiais metálicos em temperatura ambiente.

Tabela 1.3 – Condutividade elétrica em temperatura ambiente para alguns materiais metálicos

Metal	Condutividade elétrica (temperatura ambiente) $\times 10^7(\Omega.m)^{-1}$
Cobre	6
Alumínio	3,8
Ferro	1
Ouro	4,3
Prata	6,8
Latão 70/30	1,6
Aço-carbono comum	0,6

Por meio da análise da Tabela 1.3 nota-se, por exemplo, que o cobre, com condutividade elétrica de $6.10^7(\Omega.m)^{-1}$, é melhor condutor que os demais materiais mostrados, com exceção da prata – entretanto, a relação custo-benefício do cobre é muito superior em comparação a esse material. Considerando essa propriedade elétrica, pode-se compreender porque o ferro, principal elemento dos aços, oferece limitações para utilização em fios elétricos, por exemplo.

No caso do cobre, a adição de impurezas aumenta a resistividade elétrica do material. Por exemplo, numa liga cobre-níquel, os átomos de níquel no cobre atuam como centros de espalhamento de elétrons, e um aumento da concentração do níquel no cobre resulta em um aumento da resistividade. O encruamento gerado em conformação mecânica por deformação plástica também aumenta a resistividade elétrica, como resultado do maior número de discordâncias, o que também causa o espalhamento dos elétrons.

O cobre tem propriedades elétricas tão boas que é utilizado como referência para outros metais. O cobre recozido tem condutividade de 100% IACS (sigla de *International Annealed Copper Standard*, ou, em português, Padrão Internacional de Cobre Recozido) e tem a melhor relação custo-desempenho. A Tabela 1.4 apresenta valores de % IACS para alguns materiais metálicos.

Tabela 1.4 – Materiais metálicos e % IACS

Material metálico	% IACS
Cobre recozido	100
Latão 70/30	40
Alumínio 2014	48
Alumínio 1050	60
Aço 1010	12
Aço 4340	2

Fonte: Adaptado de <http://www.copper.org/>.

A norma IACS, adotada internacionalmente, é fixada em 100% para a condutividade de um fio de cobre de 1 metro de comprimento com 1 mm² de seção e cuja resistividade a 20 °C seja 0,017241 Ω.mm²/m. Por meio de análise dos materiais mostrados na tabela, nota-se que o cobre é a escolha mais adequada em termos de % IACS em comparação às ligas de alumínio e aço. No entanto, no caso do latão 70/30, que contém 30% de zinco em massa, o teor de zinco propicia ganho de resistência mecânica, mas significativa perda de condutividade elétrica.

As propriedades elétricas do cobre desempenham um papel importante em determinados processos de manufatura. Em processos de usinagem não convencionais, como a eletroerosão, o calor gerado pela energia elétrica na forma de discretas descargas elétricas (centelhas ou faíscas) é utilizado para cortar materiais metálicos. O cobre e o grafite são materiais utilizados na confecção de eletrodos aplicados na eletroerosão, e, no caso da usinagem eletroquímica, aplica-se especificamente cobre. A maioria dos processos

de soldagem por fusão utiliza energia elétrica para fundir a junta metálica – por exemplo, eletrodos opostos de cobre são utilizados na soldagem por ponto, em que o comportamento elétrico do cobre permite que o calor seja gerado pela resistência elétrica decorrente do fluxo de corrente entre as junções a serem soldadas.

1.5.4 PROPRIEDADES MAGNÉTICAS

A característica mais comum associada às propriedades magnéticas é a *suscetibilidade magnética*. Trata-se da propriedade de um material de ficar magnetizado sob a ação de uma estimulação magnética, ou seja, é o grau de magnetização de um material em resposta a um campo magnético. Na natureza, existem alguns materiais que, na presença de um campo magnético, são capazes de se tornar um ímã. Esses materiais são classificados em diamagnéticos, paramagnéticos e ferromagnéticos.

Algumas ligas de cobre, por terem baixíssimas permabilidades magnéticas, são utilizadas para confecção de dispositivos que detectam minas subaquáticas magneticamente ativadas, como o bronze-alumínio-silício previsto na norma NES-834, cuja permeabilidade magnética não pode ultrapassar 1,05 μ r.

O cobre é não magnético, especificamente *diamagnético*, pois é um material que apresenta forma fraca de magnetismo induzido ou não permanente, cuja suscetibilidade magnética é negativa. Se colocado na presença de um campo magnético, tem seus ímãs elementares orientados no sentido contrário ao do campo, ou seja, o campo magnético é repellido. Outros exemplos de materiais diamagnéticos incluem o bismuto, a prata e o chumbo.

O sulfato de cobre é *paramagnético*, pois é um material que, na presença de um campo magnético, apresenta forma de magnetismo relativamente fraca, resultante do alinhamento independente de dipolos atômicos (magnéticos). Outros exemplos de materiais paramagnéticos são o alumínio e o magnésio.

Alguns metais como ferro em fase alfa (CCC), cobalto, níquel e as ligas formadas por esses materiais são *ferromagnéticos*, os quais se imantam fortemente quando colocados na presença de um campo magnético, gerando magnetizações grandes e permanentes.

1.5.5 PROPRIEDADES QUÍMICAS

As propriedades químicas são aquelas que se referem à capacidade de um material de sofrer transformações, podendo ocasionar sua deterioração. A corrosão é um processo de deterioração de materiais metálicos.

O termo corrosão deriva do latim *corrodere*, que significa destruir gradativamente. De forma geral, a *corrosão* é um processo espontâneo e pode ser entendido como uma deterioração do material metálico devido às reações químicas e/ou eletroquímicas com o meio.

As formas de corrosão podem ser inúmeras, mas a incidência da corrosão em meio aquoso é maior. Como exemplo, cita-se a *corrosão aquosa*, que tem a água como o principal solvente e ocorre por intermédio da condensação da umidade numa superfície. No caso do cobre e suas ligas, esses materiais sofrem corrosão acentuada em presença de soluções amoniacais e ácidos nítricos.

Para especificar, o fenômeno corrosivo representa uma situação em que duas ou mais reações eletroquímicas diferentes ocorrem simultânea e espontaneamente, sendo pelo menos uma de natureza *anódica* e outra *catódica*.

A reação anódica de *dissolução do metal* fornece elétrons à reação catódica de *redução*, gerando uma carga elétrica transferida por unidade de tempo. Para que a reação de dissolução do metal tenha prosseguimento, é necessário que os elétrons produzidos sejam removidos; caso contrário, ocorre equilíbrio eletroquímico. A reação de redução de hidrogênio que ocorre simultaneamente só tem prosseguimento se receber elétrons. Dessa forma, os elétrons produzidos pela reação de dissolução do metal são utilizados pela reação de redução do hidrogênio, e as reações têm prosseguimento simultâneo, conforme mostrado na Figura 1.17.

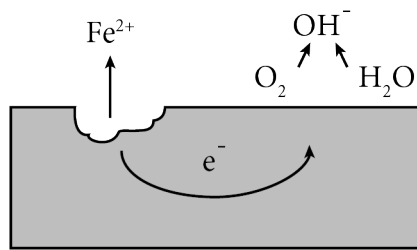


Figura 1.17 – Fenômeno de corrosão eletroquímica no ferro devido ao contato com água. Fonte: https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Fe_corrosion.PNG

A *resistência à corrosão* é a propriedade que o material metálico tem para evitar danos causados por outros materiais que possam deteriorá-lo. O efeito da oxidação direta de um metal é o dano mais importante. Também merece destaque a resistência do material à corrosão química.

Uma vez que o ataque pela corrosão é irregular, é muito difícil medi-la. A unidade mais comum utilizada para medir a corrosão é polegadas, centímetros ou milímetros de superfície perdida por ano. A necessidade de utilização de metais em altas temperaturas e em meios altamente corrosivos, como a água do mar para a indústria petrolífera, tem levado à obtenção de novas ligas especiais e à utilização de tratamentos superficiais específicos para essas aplicações.

Além da deterioração por corrosão, as reações eletroquímicas estão presentes em processos industriais como a eletrodeposição ou a galvanoplastia, que consiste em adicionar um revestimento fino de um metal (por exemplo, cobre) na superfície de

outros metais (por exemplo, aço ou zinco) para fins de proteção superficial ou outros, e usinagem eletroquímica, um processo não convencional de manufatura subtrativa em que o material é removido da superfície de uma peça metálica. Os dois processos dependem da eletrólise para adicionar ou remover material da superfície de uma peça metálica, respectivamente.

A *eletrólise* consiste na decomposição de um composto mediante a passagem de uma corrente elétrica numa solução. Na eletrodeposição (ou galvanoplastia), a peça é posicionada em um circuito eletrolítico como o cátodo, em que os cátions do metal de revestimento são atraídos pela peça negativamente carregada. Na usinagem eletroquímica, a peça é o ânodo, e a ferramenta com perfil inverso ao formato da peça final desejada é o cátodo. A ação da eletrólise nesse tipo de usinagem permite a remoção de metal da superfície da peça em determinadas regiões pelo formato da ferramenta, conforme ela avança lentamente sobre a peça.

1.5.6 PROPRIEDADES TECNOLÓGICAS

O cobre e suas ligas apresentam também propriedades que podem ser classificadas como tecnológicas, pois elas possibilitam que esses materiais sejam trabalhados em processos de manufatura, como fundição, metalurgia do pó, soldagem e usinagem.

As principais propriedades tecnológicas pertinentes ao cobre e suas ligas são definidas a seguir.

- A *soldabilidade* é a propriedade dos materiais de se unirem depois de serem aquecidos. O metal ou a liga metálica que muda de modo rápido do estado sólido para o líquido dificilmente é soldável.
- A *fusibilidade* é a propriedade do material de passar do estado sólido para o líquido sob ação do fornecimento de calor para o sistema. O cobre apresenta ponto de fusão de 1083 °C. No caso de processos de fabricação de metais que envolvam solidificação, como a fundição e o lingotamento, a fusibilidade é crucial para posterior solidificação do metal por meio da retirada de calor e, conseqüentemente, para adquirir a forma da cavidade do molde.
- A *usinabilidade* é a grandeza tecnológica que expressa, por meio de um valor numérico comparativo, um conjunto de propriedades de usinagem do material. Pode ser influenciada pelo material da peça, pelos processos mecânicos e pelas condições de usinagem. Os materiais metálicos apresentam características peculiares de usinabilidade, que dizem respeito tanto ao material da peça quanto ao da ferramenta. Elementos de liga podem auxiliar no processo de formação de cavaco durante a realização de usinagem, como o chumbo em ligas de cobre. Outra possibilidade de facilitar a quebra do cavaco é a presença de outra fase mais dura, como a beta no latão alfa-beta.

O conhecimento da usinabilidade de um material permite calcular os períodos de usinagem necessários para programar uma fabricação. Alguns tratamentos térmicos são indicados para melhorar a usinabilidade dos materiais:

- A *fadiga* compreende a falha do material em níveis de tensão mecânica relativamente baixos e de peças ou componentes que são submetidos a tensões cíclicas e oscilantes (esforços dinâmicos). Quando um material está exposto a essas condições durante um longo período, observa-se uma perda nas propriedades mecânicas, ocasionando a ruptura. A fadiga pode ser também superficial, provocando desgaste de peças sujeitas a esforços cíclicos, como ocorre em dentes de engrenagens. Em máquinas operatrizes, como o torno mecânico, há a possibilidade de usinagem com variações de rotações do eixo motor (eixo-árvore) e mudanças de esforços; logo, essas máquinas devem ser confeccionadas com elementos que disponibilizem materiais que apresentem bom comportamento em condições de fadiga.
- A *conformabilidade* e a *reciclabilidade* também são propriedades tecnológicas associadas à capacidade do cobre e suas ligas de serem conformados e reciclados, respectivamente.

1.6 LIGAS DE COBRE

O cobre e suas ligas fazem parte do grupo dos *metais não ferrosos*, materiais metálicos não baseados em ferro que, quando possuem este elemento em sua composição, apresentam teores controlados de acordo com a aplicação da liga.

Conforme informações citadas nas propriedades do cobre comercialmente puro, ele é um material metálico cuja mais notável propriedade de interesse em engenharia é sua alta condutividade elétrica — uma das mais altas entre todos os elementos. Devido a essa propriedade e à sua relativa abundância na natureza, o cobre comercialmente puro é muito usado como condutor elétrico.

O cobre é também um excelente condutor térmico. É um dos metais nobres, assim como o ouro e a prata, por isso é resistente à corrosão. Todas essas características fazem do cobre um dos metais mais importantes do ponto de vista tecnológico e comercial.

A resistência mecânica e a dureza do cobre são relativamente baixas, em especial quando a massa específica – relação massa-volume – é levada em consideração. Dessa forma, para melhorar as propriedades mecânicas, com frequência são adicionados elementos de liga ao cobre, como zinco, estanho, berílio, níquel, silício, manganês, alumínio e titânio.

A *liga metálica* pode ser definida como a mistura de aspecto metálico composta de dois ou mais elementos (dos quais pelo menos um deles é um metal) que podem

formar misturas homogêneas e heterogêneas, as quais geralmente apresentam propriedades mecânicas e tecnológicas específicas. O cobre é elemento base de muitas ligas, por exemplo: latão, bronze e cobre-níquel.

A especificação das ligas de cobre é baseada no Sistema Unificado de Numeração para Metais e Ligas (UNS, do inglês *Unified Numbering System*), que utiliza um número de cinco dígitos precedidos pela letra C (para indicar cobre). As ligas são processadas como conformadas mecanicamente (trabalhadas) ou fundidas, e a especificação UNS inclui ambas.

O sistema da Associação de Desenvolvimento do Cobre (CDA, do inglês *Copper Development Association*), também adotado pela Sociedade Americana para Testes e Materiais (ASTM, do inglês *American Society for Testing and Materials*), divide as ligas de cobre conforme mostrado na Tabela 1.5.

Tabela 1.5 – Série CDA-ASTM e respectivo tipo de liga

Série CDA-ASTM	Tipo de liga
C1XXXX	Cobre comercialmente puro e cobre ligado
C2XXXX	Latão binário (cobre-zinco)
C3XXXX	Latão com chumbo (cobre-zinco-chumbo)
C4XXXX	Latão com estanho (cobre-zinco-estanho)
C5XXXX	Bronzes (cobre-estanho, com e sem fósforo)
C6XXXX	Cobre-alumínio, cobre-silício
C7XXXX	Cuproníquel e alpaca

Observação: As séries C8XXXX e C9XXXX são reservadas às ligas de cobre fundidas.

O primeiro algarismo identifica o grupo da liga, enquanto os demais identificam determinada liga. De forma comercial, o mais utilizado é o sistema de 3 algarismos, devido à sua maior praticidade. No sistema mostrado na Tabela 1.5, pode-se identificar, por exemplo, a liga UNS C26000 (ou liga 260, sistema de três algarismos) como o latão para cartucho (70% de cobre e 30% de zinco, em massa) e a liga UNS C52100 (liga 521) como um bronze fosforoso (8% de estanho, em massa). Vale ressaltar que numa liga de cobre como a C26000, pode ocorrer a variação dos dois últimos algarismos em função de uma pequena alteração de composição química.

De forma mais específica, a Tabela 1.6 mostra uma descrição do cobre e suas ligas para as condições de trabalhados (forjados) ou fundidos.

Tabela 1.6 – Correlação das ligas de cobre com a numeração UNS. Adaptado de ASM Metals Handbook (1992)

Liga	Trabalhados	Fundidos
Cobre	C10000 a C13000	C80100 a C81200
Latão	C20500 a C38580	C83300 a C85800
Latão naval	C40400 a C48600	C83300 a C84800
Bronze fosforoso	C50100 a C52400	C90200 a C91700
Bronze alumínio	C60800 a C64210	C95200 a C95900
Bronze silício	C64700 a C66100	C87000 a C87999
Latões especiais	C69400 a C69710	C87300 a C87900
Cuproníquel	C70100 a C72950	C96200 a C96900
Alpacas	C73500 a C79900	C97300 a C97800

A *designação europeia*, controlada pelo Instituto Alemão para Normatização (DIN, do alemão *Deutsches Institut für Normung*) e baseada nos elementos da liga, é uma forma de especificação também muito difundida para ligas de cobre. Fundamenta-se na composição química do material metálico, considerando os símbolos químicos dos elementos da liga e mostrando os algarismos pertinentes às composições desses elementos logo após os respectivos símbolos, com exceção do cobre, que é a base. Por exemplo, o latão 70/30, um latão binário que contém em massa 70% de cobre e 30% de zinco, é especificado como CuZn30 na designação europeia. De forma análoga, a liga UNS C46400 ou liga 464, que é uma liga Cu-40%Zn-1%Sn, em massa, recebe a especificação CuZn40Sn1.

Na Figura 1.18, são apresentados importantes elementos que podem ser adicionados ao cobre na formação de ligas e os respectivos incrementos em termos de propriedades.

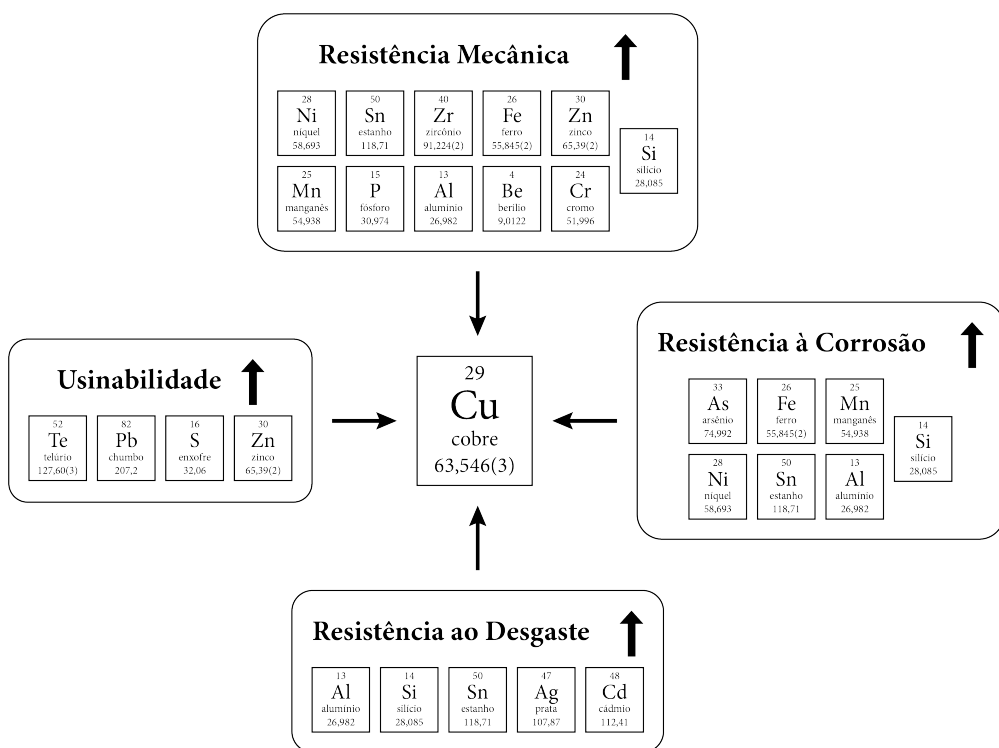


Figura 1.18 – Efeito da adição de diferentes elementos de liga ao cobre.

Entre esses elementos de liga, constam:

- Al (Alumínio) – incrementa a resistência mecânica e resistência à corrosão;
- As (Arsênio) – atua como inibidor de corrosão em água salobra (com teor de sais dissolvidos superior ao da água doce e inferior ao da água salgada);
- Sn (Estanho) – aumenta a resistência mecânica e à corrosão;
- Zn (Zinco) – incrementa a resistência mecânica e a usinabilidade;
- Ni (Níquel) – aumenta a resistência mecânica e à corrosão; e
- Si (Silício) – aumenta a resistência ao desgaste e a resistência à corrosão.

O cobre e suas ligas podem ser reunidos em três categorias básicas: cobre comercialmente puro, cobses ligados e ligas de cobre. Na sequência, são apresentadas informações tecnológicas sobre essas categorias. Durante a descrição das ligas de cobre, esses e outros elementos de liga serão levados em consideração na composição química e nas propriedades de aplicação das ligas consideradas.

1.6.1 COBRE COMERCIALMENTE PURO E COBRE LIGADO

Para ser considerado *cobre comercialmente puro* e não liga de cobre, o material metálico deve conter em massa 99,9% ou mais do elemento cobre, incluindo o teor de prata, geralmente proveniente do minério, ao qual não se adiciona nenhum outro tipo de elemento. Apesar de não ser considerado liga de cobre, comercialmente também é chamado de *liga de alto teor de cobre*.

Destacam-se nesse tipo de material metálico o cobre eletrolítico tenaz, o cobre isento de oxigênio e os cobres desoxidados com fósforo (DHP e DLP). As especificações, as características e as importantes aplicações em engenharia dessas ligas de alto teor de cobre são apresentadas na sequência.

Cobre eletrolítico tenaz (ETP)

Especificação: liga UNS C11000 ou liga 110 (nomenclatura mais comum).

Características: trata-se do cobre inicialmente fundido (em placas ou tarugos), tendo como matéria-prima o cobre eletrolítico. Apresenta no mínimo 99,9% em massa de cobre (cobre comercialmente puro). É também conhecido como cobre elétrico, apresentando teor de oxigênio de 0,01% a 0,07%, em massa, e condutividade no estado recozido superior a 100% IACS.

Aplicações: fios e cabos condutores, transformadores, peças automotivas, enrolamentos de motores, componentes de equipamentos elétricos que trabalham em temperaturas elevadas e tubos.

Cobre isento de oxigênio (Cu OF)

Especificação: liga UNS C10200 ou liga 102 (nomenclatura mais comum).

Características: a denominação OF vem do inglês *oxygen free*, pois se trata do cobre eletrolítico que não apresenta teores de oxigênio superiores a 10 ppm (partes por milhão). Apresenta 99,95% a 99,99% de cobre, em massa. É também conhecido como cobre Elox. A condutividade no estado recozido é igualmente 100% IACS. Trata-se de um material resistente à fragilização por hidrogênio, por apresentar teores de oxigênio baixíssimos. O cobre Elox é mais nobre e pode substituir o cobre elétrico em aplicações tecnológicas, porém este último, por conter oxigênio em sua composição, não pode ser usado como o Elox.

Aplicações: mesmas do cobre elétrico, porém com superioridade de propriedades. Também é aplicado em equipamentos eletroeletrônicos, peças para radar, antenas e ânodos de tubos de raios X.

Cobre desoxidado com alto fósforo (DHP)

Especificação: mais conhecido como Cobre P122.

Características: a denominação DHP vem do inglês *deoxidized high phosphorus*, ou seja, cobre desoxidado com alto fósforo. De forma específica, trata-se do cobre fabricado por lingotamento contínuo e obtido pelo uso do fósforo com desoxidante não

metálico (metaloide). Apresenta 99,85% a 99,96% de cobre, em massa, e com alto teor de fósforo: 0,015% a 0,040%, em massa. Tais teores de fósforo acarretam naturalmente na queda da condutividade elétrica, não sendo adequado em aplicações elétricas.

Aplicações: tubos para sistemas de refrigeração e em aplicações nas quais o controle da corrosão seja importante e não se tenha preocupação com perda da condutividade elétrica.

Cobre desoxidado com baixo fósforo (DLP)

Especificação: mais conhecido como Cobre Elétrico 103.

Características: a denominação DLP vem do inglês *deoxidized low phosphorus*, ou seja, cobre desoxidado com baixo teor de fósforo (em relação ao DHP). Trata-se de um material fabricado da mesma forma que o cobre DHP, com 99,9% de cobre, em massa, porém com um teor mássico residual de fósforo bem mais baixo, de 0,004% a 0,012%. Com os baixos teores de fósforo, o decréscimo de condutividade elétrica é muito pequeno.

Aplicações: guias de onda para antenas de telefonia móvel e em aplicações nas quais seja necessário um desoxidante, com controle da condutividade elétrica (aplicações em soldagem).

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

Já os *cobres ligados*, de fato, são ligas de cobre nas quais os teores de todos os elementos somados não ultrapassam 1% em massa, ou seja, são constituídas por muito baixo teor de elemento de liga. A função dos elementos, como o cádmio e o cromo, é aumentar a resistência mecânica do cobre sem redução significativa de condutividade elétrica. Em alguns casos, são necessários tratamentos térmicos para aumentar a resistência mecânica desses materiais. São também conhecidos como *ligas de alto cobre especiais*.

As ligas de alto cobre especiais formam três famílias importantes: de alta condutividade elétrica (Ag), de alta resistência mecânica (Cr e Zr) e de alta usinabilidade (Pb, Te, S e Se). Essas famílias são descritas a seguir.

Ligas de alta condutividade elétrica

Cobre-prata (Cu-Ag)

Especificação: liga UNS C10400 (liga 104) ou C 10700 (liga 107).

Características: são conhecidas como cobre-prata tenaz. O teor de prata (Ag) varia de 0,02% a 0,12%, em massa, sendo este elemento adicionado de forma intencional e

apresentando uma estrutura homogênea, já que, para esses teores, a prata permanece totalmente solubilizada no cobre. A adição de prata melhora a resistência mecânica e a resistência à fluência (em altas temperaturas), podendo aumentar a resistência ao amolecimento do cobre em aproximadamente 100 °C; ela mantém a condutividade elétrica em valores de 90% a 102% IACS.

Aplicações: na indústria elétrica, como bobinas e interruptores, além de coletores de motores.

Ligas de alta resistência mecânica

Cobre-cromo (Cu-Cr)

Características: é um material com teor em massa de cromo de 0,8%, aproximadamente. Pode ter suas propriedades mecânicas melhoradas por tratamento térmico de solubilização e envelhecimento, endurecendo por precipitação. Apesar disso, sua condutividade elétrica é relativamente elevada, de 80% a 85% IACS, e possuindo resistência ao amolecimento quando sujeita a temperaturas de até 400 °C. Por meio de tratamento termomecânico, no qual o tratamento térmico de solubilização e envelhecimento pode ainda ser combinado com deformação plástica (encruamento), são obtidas dureza e resistência mecânica ainda mais elevadas do que as obtidas com o tratamento térmico convencional sem deformação plástica.

Aplicações: 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 que exigem resistência mecânica e condutividade elétrica.

Cobre-zircônio (Cu-Zr)

Características: apresenta de 0,1% a 0,25% de zircônio, em massa, sendo isento de oxigênio e, portanto, não suscetível à fragilização por hidrogênio. Este cobre ligado possui propriedades semelhantes às do cobre-cromo, porém com 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%, em massa, sendo possível a aplicação do tratamento térmico de solubilização e envelhecimento, que proporciona o chamado endurecimento por precipitação. O tratamento térmico aumenta a condutividade elétrica, que pode atingir valores superiores a 90% IACS.

Aplicações: na fabricação de lamelas de comutadores e enrolamentos de motores elétricos (ambos sujeitos a solicitações severas), bases de diodos, chaves comutadoras e eletrodos para soldagem elétrica.

Ligas de alta usinabilidade

Cobre-telúrio (Cu-Te)

Especificação: liga definida na norma ASTM como UNS C14500, também conhecida como liga 145.

Características: apresenta teor em massa de telúrio de 0,3% a 0,8%. A adição de telúrio possibilita que a usinagem do cobre fique mais fácil em comparação ao cobre elétrico e Elox, podendo alcançar usinabilidade relativa de 85% em comparação ao latão CLA.

Aplicações: em peças com alta condutividade elétrica e de maior complexidade obtida por remoção de materiais, permitindo características geométricas como furos, roscas e variações de perfis (conectores, componentes de chaves e motores, parafusos e outros).

O *cobre-selênio* (Cu-Se) apresenta características similares às do cobre-telúrio. O *cobre-enxofre* (Cu-S) contém de 0,2% a 0,5%, em massa de enxofre, e suas aplicações também são similares às do cobre-telúrio. A condutividade elétrica do cobre-enxofre é da ordem de 93% a 95 % IACS e o índice de usinabilidade é de 85%, sendo considerado de fácil usinagem.

1.6.2 LIGAS DE COBRE

As ligas de cobre são classificadas de acordo com o tipo de elemento básico adicionado, conferindo, em determinados casos, denominações tradicionais como latão (ligas de cobre e zinco), bronze (ligas de cobre e estanho), cuponíqueis (ligas de cobre e níquel) e bronzes de alumínio (ligas de cobre e alumínio).

Informações tecnológicas sobre as ligas de cobre de importância comercial são apresentadas a seguir.

Latão

O *latão* é uma liga de cobre e zinco com ou sem adição de elementos secundários (por exemplo, 65% Cu e 35% Zn, em massa). A quantidade de zinco e dos elementos adicionais determina a família do latão:

Exemplos:

- 1) Cobre + Zinco = latão binário;
- 2) Cobre + Zinco + Chumbo = latão usinável; e
- 3) Cobre + Zinco + Outros = latão especial (diversas combinações possíveis).

Quanto mais zinco no latão, mais resistente mecanicamente fica a liga. Da mesma forma, para trabalhar a frio um latão Tombac 80/20, que apresenta 80% de cobre e 20% de

zinco (% em peso ou em massa), os equipamentos para conformação a frio precisam aplicar carga menor do que para um latão 70/30 (70% Cu e 30% Zn, em massa) por exemplo.

A adição de chumbo no latão melhora a usinabilidade, gerando cavacos pequenos e com pouco ou até mesmo sem fluido de corte, dependendo dos parâmetros de corte impostos ao latão.

Na sequência, são apresentados importantes latões comerciais, como binários, ternários e especiais.

Latões binários com até 20% de zinco – “latões tomback”

Tomback 95/05

Especificação: liga UNS C21000 ou liga 210.

Características: é uma liga de cobre que recebe a designação 95/05, por ser formada por 95% de cobre e 5% de zinco, em massa. Seu nome comercial é *Gilding Metal* ou liga para enfeite e douração. A elevada concentração de cobre facilita operações de douração e prateação, que consiste no recobrimento do material com ouro e prata, respectivamente. Esta liga não é suscetível à dezincificação, tipo de corrosão comum nos latões com maiores teores de zinco, em que este elemento é preferencialmente atacado e eliminado da liga. É um material maleável, com boa conformabilidade (facilmente conformável).

Aplicações: na fabricação de terminais elétricos, bijuterias, medalhas e adornos, moedas, emblemas, placas, material usado como base para aplicação de ouro e de esmaltes vítreos.

Tomback 90/10

Especificação: liga UNS C22000 ou liga 220.

Características: é uma liga de cobre que recebe a designação 90/10, por ser formada por 90% de cobre e 10% de zinco, em massa. Conhecida como “bronze comercial” ou “latão vermelho”, apresenta características similares ao tomback 95/05, com menor custo de matéria-prima, uma vez que o teor de cobre é menor.

Aplicações: espelhos de fechaduras (peças nobres), componentes náuticos, rebites, parafusos, recobrimento de projéteis, bijuterias em geral, decorações ornamentais, artigos esmaltados, telas, cantoneiras, canaletas. Em função das características, possui aplicações similares às do tomback 95/05.

Tomback 85/15

Especificação: liga UNS C23000 ou liga 230.

Características: também conhecida comercialmente como “latão vermelho”, esta liga de cobre recebe a designação 85/15 por ser formada por 85% de cobre e 15% de

zinco, em massa. Entre os três tombacks mencionados, é o mais utilizado em função da relação custo-benefício, levando em consideração seu menor teor de cobre entre as três ligas. Assim como os outros três tombacks, é uma liga monofásica (fase alfa) e possui elevada resistência à corrosão (especificamente, em relação à dezincificação).

Aplicações: frisos, guarnições, cantoneiras, molduras, mangueiras flexíveis, tubulações, recipientes para cosméticos, mostradores para relógios e instrumentos, bijuterias, chapas gravadas, peças destinadas a brasagem, fechaduras, *zippers*, tubulações químicas, soquetes, contadores.

Curiosidade

Em relação às ligas de cobre, especificamente as ligas binárias, pode-se realizar algumas observações sobre a designação. Por exemplo, na liga 210 (ou C210) o algarismo 2 está associado ao fato de ser um sistema binário (Cu-Zn) e o número 10 ao dobro da porcentagem em massa de zinco na referida liga, que apresenta 5% em sua composição. Isso é um fato que pode ser observado em outras ligas binárias de cobre, como 220, 230, 260, 270, 280 e outras. Porém, essa observação não é uma regra geral, pois não se aplica de forma indiscutível em exemplos como a liga 272, que pode conter 37% de zinco, cujo dobro é 74; ou a liga 268, que pode conter 33% de zinco, com dobro igual a 66.

Latão com 30% de zinco

Especificação: liga UNS C26000 ou liga 260.

Características: o latão 70/30 é o latão mais conhecido e utilizado. Recebe a designação 70/30 por ser formado por 70% de cobre e 30% de zinco, em massa. Esta liga é conhecida comercialmente como “latão cartucho”, pela sua grande utilização na fabricação de cartuchos de munição. É uma liga monofásica, mas possui características bem diferentes dos tombacks, começando por sua coloração amarelada. Pode apresentar problemas de dezincificação, dependendo do ambiente de aplicação; em compensação, apresenta a mais favorável combinação de valores elevados de resistência mecânica e ductilidade entre todos os latões. Em função da excelente conformabilidade, é uma liga muito indicada para processos de conformação de chapas, especificamente estampagem e embutimento profundo.

Aplicações: cartuchos de munição, moedas, instrumentos musicais, adornos, objetos de decoração, radiadores, utensílios domésticos.

Latão com 33% de zinco

Especificação: liga UNS C26800 ou liga 268.

Características: o latão 67/33, conhecido como “latão comercial”, é formado por 67% de cobre e 33% de zinco, em massa. Possui comportamento mecânico similar ao do latão 70/30, desde que a liga seja recozida adequadamente. Em relação ao custo do

material, ele é menor do que o do latão 70/30, em função da menor quantidade de cobre na composição. Em geral, a liga 268 é utilizada como alternativa à liga 260 em aplicações nas quais os requisitos de propriedades mecânicas não são tão importantes e o custo de fabricação é um fator determinante.

Aplicações: similares às do latão 70/30.

Latões de 35% a 37% de zinco

Especificação: liga UNS C27000 ou liga 270; liga UNS C27200 ou liga 272.

Características: a liga 270 (latão 65/35) é formada por 65% de cobre e 35% de zinco, em massa, e a liga 272 (latão 63/37), por 63% de cobre e 37% de zinco, em massa. Trata-se de ligas conhecidas comercialmente como "latões amarelos" ou latões "fio máquina". Essas ligas podem apresentar uma pequena quantidade de fase beta. Em função dos teores de cobre menores, são menos custosas do que os latões citados anteriormente. No entanto, apesar de ainda suportarem condições de conformação mecânica relativamente severas, nota-se ligeira perda na capacidade de serem conformadas, em função do aumento da quantidade de zinco. Não podem ser utilizadas em ambientes corrosivos.

Aplicações: várias aplicações similares às dos latões 70/30 e 67/33, sobretudo peças de veículos automotivos, ferragens residenciais e terminais elétricos.

Latão com 40% de zinco

Especificação: liga UNS C28000 ou liga 280.

Características: o latão 60/40 é a típica liga bifásica (alfa e beta), composta por 60% de cobre e 40% de zinco, em massa. A fase beta facilita a trabalhabilidade a quente; em contrapartida, dificulta a conformação a frio e limita-se a aplicações em condições não muito corrosivas. Essa liga tem sido uma ótima opção na fabricação de produtos que precisam ser isentos de chumbo e que serão submetidos à usinagem, em função do comportamento da fase beta. Não é melhor que os latões que possuem chumbo, porém é uma ótima opção se houver a possibilidade de alterar as variáveis do processo de usinagem, como geometria da ferramenta e velocidade de corte.

Aplicações: 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.

Latões ternários cobre-zinco-chumbo (Cu-Zn-Pb) – Latões usináveis

Conforme citado, a presença do chumbo como elemento de liga torna as ligas de cobre usináveis com maior facilidade, fato ratificado também nos latões. Na sequência, são discutidos importantes latões usináveis.

Latão de corte livre americano (CLA) e latão de corte livre europeu (CLE)

Especificação: liga UNS C36000 ou liga 360; liga UNS C38500 ou liga 385.

Características: a liga 360 (CLA) é composta por 60% a 63% de cobre, 2,5% a 3,0% de chumbo e o restante de zinco, em massa. É uma liga muito utilizada nos Estados Unidos e apresenta limitada capacidade de deformação plástica em trabalho a frio. A liga 385 (CLE) é composta por 56% a 60% de cobre, de 2% a 3,5% de chumbo e o restante de zinco, em massa. É uma liga muito utilizada na Europa e apresenta excelente capacidade de deformação plástica em trabalho a quente e, assim como o latão CLA, limitada para trabalho a frio.

Aplicações: similares para os dois materiais (CLA e CLE), em elementos como porcas, parafusos, pinos, buchas, mancais, afastadores e peças tubulares com extremidades abertas ou fechadas. Trata-se de um material muito utilizado em peças a serem usinadas.

Latão chave

Especificação: liga UNS C35000 ou liga 350.

Características: também conhecido como *Medium Leaded Brass*, o latão chave tem por composição de 59% a 64% de cobre, de 0,8% a 1,4% de chumbo e o restante de zinco, em massa. Possui boa capacidade de trabalho a frio, principalmente em comparação a CLA e CLE.

Aplicações: principalmente na fabricação de chaves.

Latão forja

Especificação: liga UNS C37700 ou liga 377.

Características: o latão forja é composto por 58% a 61% de cobre, 1,5% a 2,5% de chumbo, 0,3% de ferro (no máximo) e o restante de zinco, em massa. É o melhor latão conhecido para operação de forjamento, conciliando boa usinabilidade devido à presença do chumbo. O teor menor de cobre proporciona melhor desempenho no trabalho a quente do forjamento. É uma liga recomendada para manufatura de peças que são submetidas aos processos e conformação mecânica por forjamento e remoção de materiais por usinagem.

Aplicações: componentes com rosca em registros de botijões de gás e acionadores de extintores de incêndio.

Latões especiais

Os latões especiais são ligas de cobre e zinco com adição de um ou mais elementos específicos que conferem propriedades distintas, possibilitando incremento na gama de aplicações.

Latão aluminado

Especificação: liga UNS C68700 ou liga 687.

Características: comercialmente conhecido como "latão aluminado", essa liga possui cerca de 2% de alumínio, em massa. O alumínio melhora a escoabilidade e a resistência à corrosão e aumenta significativamente a resistência mecânica da liga. Pode contar ou não com adição de arsênio, um elemento que aumenta a proteção à corrosão em água salina.

Aplicações: trocadores de calor para aplicações em plataforma de petróleo no mar (*offshore*).

Latão naval

Especificação: liga UNS C46400 ou liga 464.

Características: a liga de cobre-zinco-estanho é comercialmente conhecida como "latão naval". O estanho aumenta a maleabilidade e a resistência à corrosão.

Aplicações: peças fundidas de aplicações navais, hélices e lemes de navios, rotores para turbinas movidas à água, buchas, engrenagens, eixos.

Bronzes

O *bronze* é uma liga formada principalmente de cobre e estanho, que varia de 2% a 10%, em massa, e ainda é bastante utilizada, apesar de sua origem muito antiga (ou seja, desde a Idade do Bronze, na Pré-História). Outras ligas de cobre do grupo dos bronzes têm sido desenvolvidas, compostas com outros elementos além do estanho, por exemplo o alumínio ou o silício.

O bronze apresenta elevada resistência à corrosão. Quanto mais estanho presente na composição do bronze, mais dura se torna a liga e mais difícil de ser trabalhada a quente (em prensa no processo de extrusão, por exemplo).

Bronze fosforoso

Trata-se de bronzes dúcteis, que são *trabalháveis* de forma mecânica por processos de conformação, possibilitando a obtenção de formas de chapas no processo de laminação a frio. Na sequência, são apresentados bronzes fosforosos definidos conforme a quantidade de estanho e que apresentam determinado teor de fósforo.

Bronze fosforoso 511

Especificação: liga UNS C51100 ou liga 511.

Características: é uma liga de cobre com 4% de estanho, em massa, e com pequenos teores de fósforo, que possui uma microestrutura monofásica (fase alfa). Propicia

uma boa combinação de trabalhabilidade a frio, resistência mecânica e dureza. Apresenta boa resistência à corrosão, inclusive sob tensão.

Aplicações: em aplicações elétricas, como conectores que exigem o efeito “mola”, componentes de interruptores, chaves, contatos e tomadas; na construção mecânica, como diafragmas, parafusos com cabeças obtidas por recalque a frio, rebites, porcas e escovas metálicas; em aplicações arquitetônicas, como ganchos de chapas de revestimento.

Bronze fosforoso 510

Especificação: liga UNS C51000 ou liga 510.

Características: é uma liga de cobre com 5% de estanho, em massa, e com pequenos teores de fósforo, que também possui uma microestrutura monofásica. Apresenta propriedades similares às do bronze fosforoso 511, com uma resistência mecânica um pouco superior.

Aplicações: similares às da liga 511; 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 fosforoso 519

Especificação: liga UNS C51900 ou liga 519.

Características: é uma liga de cobre com 6% de estanho, em massa, e com pequenos teores de fósforo, apresentando também uma microestrutura monofásica. Em termos de propriedades, possui elevada capacidade de trabalhabilidade, excelente resistência à corrosão e maior resistência à fadiga e ao desgaste quando comparada aos bronzes 510 e 511.

Aplicações: 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; na construção mecânica, em molas e membranas, escovas, tubos de manômetros, engrenagens, componentes de bombas e eletrodos de soldagem. As ligas 510 e 519 também são utilizadas em conectores elétricos que atuam em aplicações que exigem o efeito “mola”.

Bronze Fosforoso 521

Especificação: liga UNS C52100 ou liga 521.

Características: é uma liga de cobre com 8% de estanho, em massa, e com teores de fósforo. É uma liga monofásica, portanto com fase alfa que, dependendo das condições de manufatura, pode conter pequenas quantidades de fase delta. Em função do elevado teor de estanho, apresenta elevada resistência à fadiga, à corrosão e ao desgaste e comportamento de antifricção (diminuindo os efeitos do atrito).

Aplicações: similares às do bronze fosforoso 519. De forma específica, em relação à fabricação de molas, é mais adequada para condições de solicitações mais severas, além de ser muito apropriada para a fabricação de discos de fricção.

Bronze de alto chumbo para mancais

O mancal é um elemento de máquina que permite o movimento de rotação de um eixo. As ligas para mancais são de cobre e estanho (bronzes) com adições de chumbo que fazem parte dos *bronzes fundidos*, obtidas, portanto, por fundição contínua ou fundição em molde (estática). Existem muitas ligas diferentes para esse tipo de aplicação, chegando a mais de 200 ligas comerciais.

O engenheiro Salvador Arena, fundador da Termomecânica, foi responsável pela criação de dois importantes bronzes fundidos: TM23 e TM620.

O *bronze TM23* é composto por 73% de cobre, 4% de estanho, 8% de zinco e 15% de chumbo, em massa. É utilizado na fabricação de buchas (casquilhos) de mancais para condições de baixos esforços e/ou baixas velocidades e com lubrificação deficiente. Trata-se de um bronze fundido amplamente utilizado na indústria sucroalcooleira, em moenda de cana-de-açúcar.

O *bronze TM620* contém 87% de cobre, 8% de estanho, 4% de zinco e 1% de chumbo, em massa. Esse bronze fundido apresenta maiores valores de propriedades mecânicas, como dureza, resistência mecânica e capacidade de absorção de energia em condições de impacto, do que o bronze TM23. É utilizado na fabricação de buchas de mancais para condições de altos esforços e/ou altas velocidades e com lubrificação eficiente. O menor teor de chumbo desse bronze fundido possibilita propriedades que atendam a essas condições de uso.

O chumbo tem ação deletéria em relação às propriedades mecânicas de resistência, porém incrementa características de autolubrificação. O chumbo (Pb), elemento presente nos bronzes TM, é insolúvel nas ligas sólidas de bronze, ficando isolado sob a forma de pequenos módulos em uma matriz ternária de cobre-estanho-zinco (Cu-Sn-Zn).

A ação do chumbo na folga entre o eixo e o mancal é se interpor entre o eixo e o metal que o suporta, impedindo ou retardando o engripamento. De forma natural, o Pb disponível é pouco, e a ação descrita é de curta duração quando há falta total de lubrificante. Nas faltas ocasionais, como na partida da máquina, quando o filme de óleo ainda não se restabeleceu, o Pb é muito útil. Quando a lubrificação é precária, o Pb também é de indiscutível ajuda para prolongar a vida do mancal.

Cuproníqueis (Cu-Ni)

Cuproníqueis são ligas de cobre com 10%, 20% ou 30% de níquel, em massa. São ligas monofásicas (fase alfa) para qualquer composição considerada e são dúcteis,

possibilitando que sejam trabalhadas a frio e a quente. Também apresentam elevada resistência à corrosão, principalmente em água salgada.

Em relação à composição, de forma geral, contém 2% de ferro e manganês, em massa, com o intuito de elevar a resistência mecânica. As aplicações dessas ligas de cobre incluem a indústria naval, tubos para condensadores, aquecedores e moedas.

Constatan são ligas de cobre com 45% de níquel, que apresentam elevada resistividade elétrica e, portanto, são utilizadas em elementos de aquecimento, como os termopares, nos quais a resistência mecânica independe da temperatura.

Cobre-níquel-zinco (Cu-Ni-Zn)

As ligas cobre-níquel-zinco também são conhecidas como *alpaca* ou *prata alemã*. Em sua composição em termos mássicos, essas ligas apresentam comercialmente de 6% a 20% de níquel, com valor típico de 18%; 45% a 70% de cobre; e o restante de zinco. De forma geral, as alpaca são constituídas de soluções sólidas homogêneas e, na condição dúctil, também possibilitam a realização de conformação mecânica em trabalho a quente ou a frio.

As alpaca apresentam elevada resistência à corrosão, e a presença de chumbo torna essas ligas suscetíveis à usinagem para obtenção de chaves automobilísticas e aos tratamentos de superfície, como gravação para fins decorativos.

Ligas especiais de cobre

Esse grupo engloba ligas de cobre, nas quais as composições e os processos de fabricação devidamente associados possibilitam aplicações tecnológicas de elevado desempenho em termos de propriedades mecânicas e de resistência à corrosão, por exemplo. Essas ligas apresentam propriedades tecnológicas superiores às de muitos aços, até mesmo os inoxidáveis.

O bronze-alumínio e o bronze-silício fazem parte do grupo de ligas especiais de cobre e são definidos na sequência.

Cobre-alumínio (Cu-Al)

A liga do sistema cobre-alumínio também é conhecida como *bronze-alumínio* (ou *bronze de alumínio*). É um tipo de bronze no qual o principal elemento de liga é o alumínio, cujo teor mássico de até 5% faz com que a liga apresente uma estrutura monofásica que possibilita a realização de conformação mecânica em trabalho a frio e, em termos de propriedades, possui elevadas resistência mecânica e à corrosão.

Teores maiores de alumínio, de até 10%, tornam a estrutura bifásica, o que propicia elevada resistência à oxidação e conformabilidade plástica a quente. Outros elementos também podem ser considerados na composição de ligas cobre-alumínio, como o níquel (que eleva a resistência mecânica e à corrosão), o ferro (que incrementa a resistência mecânica) e o manganês (que aumenta a soldabilidade).

Uma liga classificada como bronze-alumínio-níquel (NAB, do inglês *nickel-aluminium-bronze*) é um ótimo exemplo de liga especial de cobre de alto desempenho tecnológico. Especificamente, a liga CuAl10Ni5Fe5, trabalhada mecanicamente (ou forjada), pode ser aplicada na indústria aeronáutica e, como fundida, pode ser utilizada em aplicações marítimas.

Cobre-silício (Cu-Si)

A liga de cobre desse sistema também é conhecida como *bronze-silício* (ou *bronze de silício*). Nesse tipo de bronze, o silício é o principal elemento de liga, em que o seu teor na composição do material determina se a liga pode ser classificada como trabalhada mecanicamente (forjada) ou fundida.

A adição de silício ao cobre propicia elevada soldabilidade e excelente resistência à corrosão por ácidos. As ligas trabalhadas (dúcteis) possuem no máximo 3% de silício e podem conter em torno de 1% de manganês. As ligas para fundição apresentam 4% a 5% de silício e pequenos teores de zinco, ferro e manganês.

REFERÊNCIAS

- ASKELAND, D. R.; WRIGHT, W. J. **Ciência e engenharia dos materiais**. São Paulo: Cengage Learning, 2014.
- BRESCIANI FILHO, E.; ZAVAGLIA, C. A. C.; BUTTON, S. T.; GOMES, E.; NERY, F. A. C. **Conformação plástica dos metais**. 5. ed. Campinas: Editora da Unicamp, 1997.
- CALLISTER JR., W. D.; RETHWISCH, D. G. **Fundamentos da ciência e engenharia de materiais: uma abordagem integrada**. 4. ed. Rio de Janeiro: LTC, 2014.
- CDA. **Copper Development Association**. Site institucional. Disponível em: <https://www.copper.org/>. Acesso em: 08 de outubro de 2021.
- CIMM. **Centro de Informação Metal Mecânica**. Site institucional. Disponível em: <https://www.cimm.com.br/>. Acesso em: 18 de outubro de 2021.
- FERRANTE, M.; WALTER, Y. **A materialização da ideia: noções de materiais para design de produto**. Rio de Janeiro: LTC, 2010.
- GARCIA, A.; SPIM, J. A.; SANTOS, C. A. **Ensaio dos materiais**. 2. ed. Rio de Janeiro: LTC, 2012.
- GENTIL, V. **Corrosão**. 6. ed. Rio de Janeiro: LTC, 2011.
- GROOVER, M. P. **Fundamentos da moderna manufatura** (v. 1). 5. ed. Rio de Janeiro: LTC, 2017.
- GROOVER, M. P. **Fundamentos da moderna manufatura** (v. 2). 5. ed. Rio de Janeiro: LTC, 2017.

Infomet. Site institucional. Disponível em: <https://www.infomet.com.br/>. Acesso em: 11 de outubro de 2021.

JUVINALL, R. C.; MARSHEK, K. M. **Fundamentos do projeto de componentes de máquinas**. 5. ed. Rio de Janeiro: LTC, 2016.

KIMINAMI, C. S.; CASTRO, W. B.; OLIVEIRA, M. F. **Introdução aos processos de fabricação de produtos metálicos**. São Paulo: Blucher, 2013.

NEWELL, J. **Fundamentos da moderna engenharia e ciência dos materiais**. Rio de Janeiro: LTC, 2010.

PADILHA, A. F. **Materiais de engenharia: microestrutura e propriedades**. São Paulo: Hemus, 2000.

RICHARDSON, I. **Guide to Nickel Aluminum Bronze for Engineers**. Copper Development Association, Birmingham (Miami), vol. 222, 2010.

SANTOS, G. A. **Tecnologia dos materiais metálicos: propriedades, estruturas e processos de obtenção**. São Paulo: Érica, 2015.

SANTOS, G. A. **Tecnologias mecânicas: materiais, processos e manufatura avançada**. São Paulo: Érica, 2020.

SHACKELFORD, J. F. **Ciência dos materiais**. 6. ed. São Paulo: Pearson, 2008.

SILVA, A. L. C.; MEI, P. R. **Aços e ligas especiais**. 3 ed. São Paulo: Blucher, 2010.

SMITH, W. F.; HASHEMI, J. **Fundamentos de engenharia e ciência dos materiais**. 5. ed. São Paulo: Mc-Graw Hill, 2012.

TM. Termomecanica São Paulo S.A. Site institucional. Disponível em: <https://www.termomecanica.com.br/>. Acesso em: 09 de novembro de 2021.