

## CAPÍTULO 5

# Tecnologia de tratamentos aplicados ao cobre e suas ligas

### 5.1 GENERALIDADES

Os processos de fabricação vistos no capítulo anterior compreendem as principais tecnologias de processamento de componentes, que agregam valor aos produtos por meio de modificação intencional de forma. Neste capítulo, são destacadas tecnologias de tratamentos de engenharia utilizadas para melhorar as propriedades mecânicas de componentes ou processá-los superficialmente, sem alteração intencional de forma. As tecnologias de tratamentos são o segundo maior grupo de processamento de componentes, composto pelos tratamentos térmicos e pelos processos de tecnologia de superfície.

O cobre é um metal de extrema versatilidade tecnológica, em termos de possibilidades de aplicações de suas propriedades, como condutividade elétrica e térmica, comportamento mecânico e resistência à corrosão. No que diz respeito às propriedades mecânicas, o cobre pode adquirir incremento de resistência mecânica e dureza por meio de solução sólida na formação de ligas como latão e bronze, uso de agentes nucleantes ou refinadores de grão em processo de solidificação, encruamento (trabalho a frio) e por tratamentos térmicos.

A adição de um ou mais metais pode aumentar a resistência mecânica do cobre. Átomos de soluto como zinco, estanho, alumínio e níquel, no caso de solução sólida substitucional, criam *campos de tensões* em torno deles mesmos e dificultam o movimento de discordâncias (imperfeições lineares cujo escorregamento auxilia no processo de alteração de forma do material por conformação mecânica), o que gera incremento

de resistência mecânica na liga de cobre. A distorção do reticulado cristalino e o agrupamento de átomos semelhantes também impedem o movimento de discordâncias. Por exemplo, o cobre comercialmente puro conformado a frio pode apresentar limite de resistência à tração na ordem de 330 MPa; já o latão cartucho formado pela solução sólida de 70% de cobre e 30% de zinco, em massa, submetido às mesmas condições de deformação, pode alcançar limite de resistência à tração de 500 MPa.

Grãos menores dificultam a movimentação de discordâncias no cobre e suas ligas, o que aumenta a resistência mecânica. Por exemplo, o ferro é um elemento de liga utilizado apenas em pequenos teores da ordem de até 2,5%, em massa, em um pequeno grupo de ligas especiais de cobre. Ele favorece o refino de grão e aumenta a resistência mecânica quando presente em pequenos teores no bronze de manganês (Cu-Mn), no bronze de alumínio (Cu-Al) e no bronze de silício (Cu-Si).

Antes de abordarmos os tratamentos térmicos para o aprimoramento de propriedades do cobre e suas ligas, contextualizaremos a importância da deformação a quente e a frio para esses materiais.

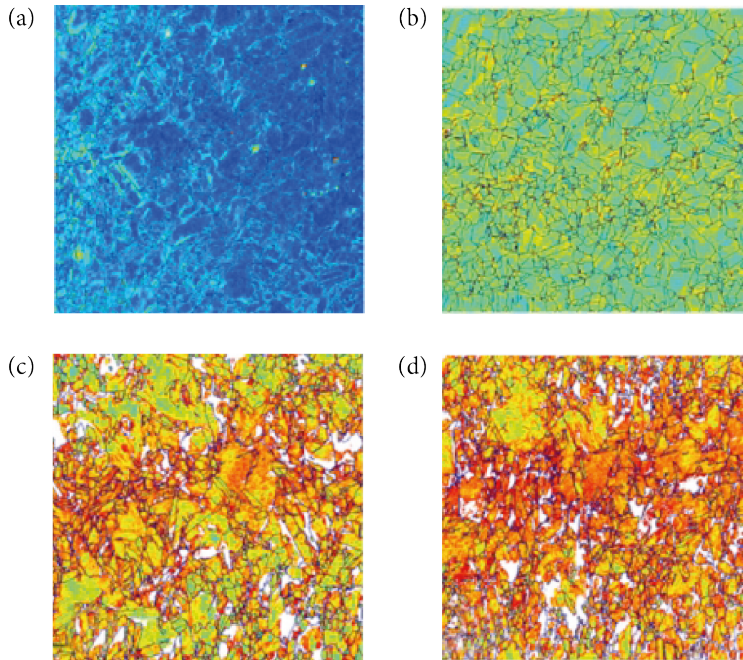
## 5.2 DEFORMAÇÃO A QUENTE E A FRIO DO COBRE E SUAS LIGAS

Os *tratamentos mecânicos* ou *termomecânicos* são utilizados para aprimoramento de propriedades de materiais metálicos dúcteis como o cobre e suas ligas. Os tratamentos mecânicos baseiam-se na aplicação de esforços durante o processamento do material, ocasionando deformação plástica a frio e propiciando o encruamento do material e o incremento de resistência mecânica e dureza. Em relação ao tratamento termomecânico, o material não fica encruado na deformação a quente, o que propicia maior capacidade de deformação durante o processo de manufatura considerado, principalmente em conformação mecânica.

Massa específica, coeficiente de expansão térmica, condutividades térmica e elétrica, temperaturas *solidus* e *liquidus* são exemplos de propriedades físicas das ligas de cobre, porque dependem basicamente da composição química das ligas. Entretanto, propriedades mecânicas como dureza, resistência mecânica, resistência à fadiga, ductilidade e maleabilidade podem ser influenciadas também por condições de tratamentos mecânicos ou termomecânicos.

Os principais processos de conformação por deformação plástica de ligas de cobre são a laminação, o forjamento, a extrusão e a trefilação. A elevação de propriedades mecânicas, como a resistência mecânica, após o processo de conformação mecânica pode ser explicada pela ocorrência de um aumento na densidade de discordâncias em sua microestrutura, quando os metais têm seus formatos geométricos deformados permanentemente; isso é denominado *encruamento* (*work-hardening*) ou *trabalho a frio* (*cold work*), uma vez que ocorre em temperaturas consideravelmente baixas como a temperatura ambiente (PADILHA, 1997).

Avaliações feitas por Jiang, Britton e Wilkinson (2013) em um ensaio de tração em temperatura ambiente mostraram por meio de HR-EBSD (do inglês *High Angular Resolution – Electron Back Scatter Diffraction*) notáveis aumentos da densidade de discordâncias na microestrutura de um cobre puro isento de oxigênio (10 ppm máximo). A Figura 5.1 apresenta o aumento da densidade de discordâncias, ao passo que o percentual de deformação do encruamento elevou-se, comprovando claramente maiores níveis de tensões atribuídas ao maior percentual experimentado.

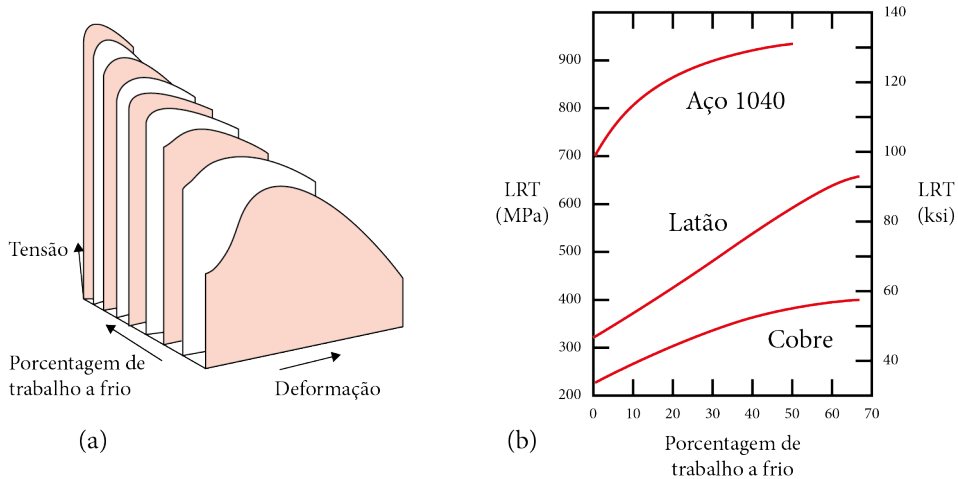


**Figura 5.1** – Microestruturas do cobre puro isento de oxigênio UNS C10200 com diversos percentuais de deformações. A barra de medição é de 50  $\mu\text{m}$ , (a) Microestrutura tratada termicamente isenta de encruamento, (b) Microestrutura com 6% de deformação, (c) Microestrutura com 22,5% de deformação e (d) Microestrutura com 40% de deformação. Adaptado de Jiang, Britton e Wilkinson (2013).

Os processos mecânicos baseados em conformação plástica a frio apresentam elevada densidade de discordâncias. A *densidade de discordâncias é igual à linha de defeito ( $m$ ) dividida pelo volume ( $m^3$ )*, cuja unidade de medida é  $\text{m}^{-2}$  pelo Sistema Internacional de Unidades (SI), sendo uma forma de mensurar a quantidade de discordâncias em um material manufaturado. Em termos de comparação, um material metálico solidificado lentamente pode apresentar densidade de discordâncias na ordem de  $10^6 \text{ m}^{-2}$ ; se for tratado termicamente por recozimento,  $10^{10} \text{ m}^{-2}$ ; e em processo de deformação a frio,  $10^{15} \text{ m}^{-2}$ .

A Figura 5.2a mostra o efeito do trabalho a frio no comportamento mecânico de um material metálico dúctil, sendo possível notar que, à medida que o percentual de

encruamento aumenta, eleva-se a resistência mecânica (representada por tensão) e, conseqüentemente, diminui-se a ductilidade, que está associada à capacidade de deformação plástica do material. Em relação ao cobre, latão e aço 1040, podemos observar em (b) que a resistência mecânica, representada pelo limite de resistência à tração (LRT, em MPa e ksi), aumenta conforme o percentual de encruamento aumenta (CALLISTER e RETHWISCH, 2020).



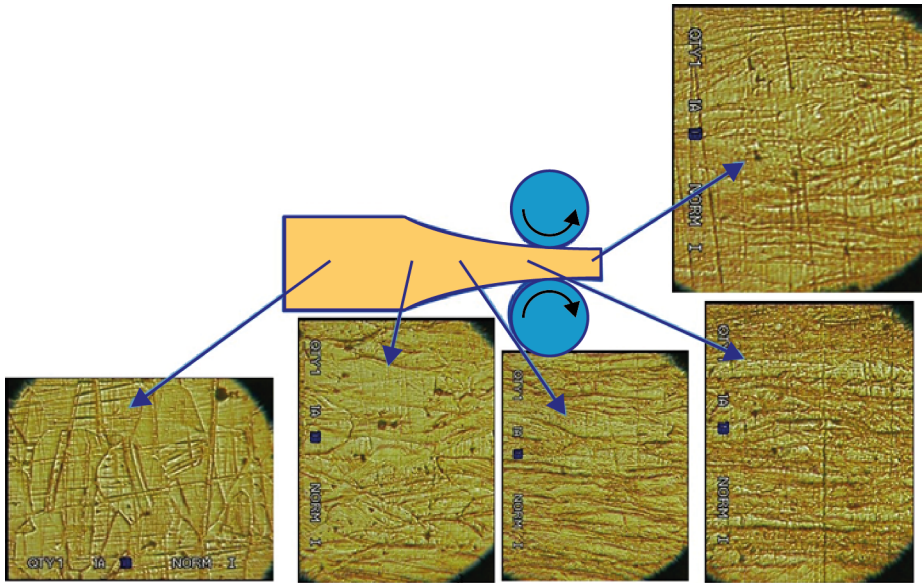
**Figura 5.2** – (a) Relação entre a porcentagem de trabalho a frio, capacidade de deformação e resistência mecânica e (b) Comportamento do cobre, latão e do aço 1040 quando submetidos a diferentes porcentagens de trabalho a frio. Adaptado de Callister e Rethwisch (2020).

Durante a deformação plástica, as discordâncias movimentam-se, aumentam-se em quantidade e fazem interações umas com as outras, obtendo altos relevos e emaranhados que dificultam a passagem das discordâncias; para conseguir superar esses obstáculos, é necessário o emprego de tensões (PADILHA, 1997).

Especificamente nas ligas de cobre, o zinco é um importante elemento de liga, utilizado não apenas em diferentes tipos de latões, mas também nas alpacas. A maioria dos latões está contida no campo monofásico alfa, apresentando assim boa conformabilidade a frio. Os latões com teores de zinco mais elevados, em torno de 40% em massa, são indicados somente para o trabalho a quente. A adição de zinco reduz a temperatura de fusão, a massa específica, as condutividades térmica e elétrica e o módulo de rigidez. Por outro lado, aumenta o coeficiente de expansão térmica, a resistência mecânica e a dureza.

A capacidade de encruamento aumenta com o teor de zinco, mas o latão binário monofásico C260 (latão 70-30, 70% de cobre e 30% de zinco) possui a melhor combinação de resistência mecânica e ductilidade. A Figura 5.3 mostra as estruturas de grão em diferentes regiões de um latão 70-30, comumente utilizado na fabricação de cartuchos para munição, durante o processo de laminação convencional. Podemos notar

que a forma inicial dos grãos se trata de um latão recozido com estrutura equiaxial, que é alterada conforme o material sofre deformação plástica a frio, em temperatura ambiente. Em função da criação, movimento e rearranjo das discordâncias durante o trabalho a frio, os grãos do latão 70-30 passam por distorção uns em relação aos outros. Conforme a deformação a frio é incrementada, ocorre o movimento de discordâncias, e os grãos ficam alongados de acordo com a direção de laminação do material.



**Figura 5.3** – Estruturas de grão em diferentes regiões de um latão cartucho laminado a frio. Adaptado de Smith e Hashemi (2012).

Segundo Smith e Hashemi (2012), em uma amostra de cobre com 30% de redução por laminação a frio, as discordâncias formam uma estrutura celular, que, com o aumento da deformação plástica a frio para 50% de redução, fica mais densa e alongada na direção de laminação.

Em relação ao chumbo nas ligas de cobre nas quais não está presente como elemento de liga adicionado propositalmente, esse elemento é uma impureza com restrição de concentração para não prejudicar a trabalhabilidade da liga. Na liga UNS C26000 (latão cartucho), o teor máximo em massa de chumbo previsto em norma deve ser inferior a 0,07%, para não afetar a trabalhabilidade da liga no processo de conformação.

O estanho é um elemento de liga essencial no grupo dos bronzes fosforosos. As ligas que são trabalhadas a frio podem conter estanho com teor máximo de 10%, pois até essa concentração essas ligas são monofásicas (somente fase alfa). A adição do estanho ao cobre aumenta significativamente sua resistência mecânica, enquanto reduz seu ponto de fusão, massa específica e condutividades térmica e elétrica.

A adição do níquel ao cobre aumenta a resistência mecânica, mas a capacidade de encruamento dos cuproníqueis é inferior à de outras ligas de cobre. O níquel reduz significativamente as condutividades térmica e elétrica e ligeiramente o coeficiente de expansão térmica; por outro lado, aumenta substancialmente o módulo de elasticidade. Como tem massa específica semelhante à do cobre, o níquel não afeta esta propriedade. Embora o níquel e o cobre sejam mutuamente solúveis em qualquer proporção, por motivos de ordem técnica no processamento das ligas, o teor de níquel costuma ser comercialmente limitado ao máximo de 30%. Os cuproníqueis são particularmente adequados para aplicações em altas temperaturas. Nas alpacas, as diversas combinações de níquel e zinco produzem uma grande variedade de ligas com coloração prateada, com propriedades de trabalho mecânico que se aproximam às dos latões comerciais.

O silício pode estar presente nas ligas de cobre em teores de até 3%, o limite para a obtenção de ligas monofásicas (fase alfa) com boa trabalhabilidade mecânica. De forma rápida, a adição de silício aumenta a taxa de encruamento da liga de cobre. O silício também reduz a temperatura *liquidus*, a massa específica e as condutividades térmica e elétrica.

O trabalho a quente é favorecido quando os teores de alumínio estão entre 8% e 10%, devido à presença de fase beta, que facilita o trabalho a quente em processos de laminação e extrusão, por exemplo. O alumínio reduz a temperatura *liquidus*, a condutividade elétrica e térmica, além da massa específica de modo significativo, uma vez que apresenta massa específica muito menor que a do cobre ( $2,7 \text{ g.cm}^{-3}$  do alumínio e  $8,9 \text{ g.cm}^{-3}$  do cobre, em temperatura ambiente).

O manganês é um elemento secundário que favorece o refino dos grãos de bronzes de manganês (Cu-Mn) e de alumínio (Cu-Al). Em pequenos teores, é adicionado aos cuproníqueis e alpacas para favorecer a laminação e aos bronzes de silício (Cu-Si) para, além de refinar os grãos, aumentar a soldabilidade.

O uso do fósforo nas ligas de cobre praticamente se resume aos bronzes fosforosos, com teores de até 0,5%. Atua como agente desoxidante nos bronzes fosforosos, nos quais seu teor residual também incrementa a resistência mecânica. No latão almirantado e no latão contendo alumínio, o fósforo ajuda a inibir a dezincificação. Seu efeito na redução da condutividade elétrica é muito forte.

Como já foi citado, o ferro apresenta boa capacidade de refino de grão nas ligas de cobre. Entretanto, esse elemento está presente como impureza em muitas ligas de cobre e, quando a contaminação do latão alfa é excessiva, além do limite usual de 0,05% de ferro, o efeito no tamanho de grão pode afetar o comportamento esperado nos tratamentos térmicos, além de promover o aumento da permeabilidade magnética da liga, característica desejada somente em aplicações muito específicas.

Além de elevar a usinabilidade, o telúrio pode ser adicionado em pequenos teores para a obtenção de uma liga de cobre com condutividade elétrica relativamente alta associada a um bom desempenho no processo de usinagem.



Agora, trataremos do *trabalho a quente*. Refere-se à deformação plástica realizada acima da temperatura de recristalização do material, que geralmente é a primeira etapa no processo de fabricação de produtos à base de cobre, por ser o método mais econômico para reduzir grandes seções transversais, ou seja, o desbaste em processos de conformação plástica. De forma geral, o trabalho a quente se diferencia do trabalho a frio por não apresentar encruamento na condição final do material conformado.

Entretanto, ocorrem algumas transformações de fases durante o trabalho a quente. Alguns constituintes sofrem transformações com o aumento de temperatura e o resfriamento, que podem produzir considerável endurecimento. A dificuldade experimental de analisar metais em alta temperatura desfavorece o estudo das características do trabalho a quente, mas, de um modo geral, é possível dizer que grandes deformações podem ser obtidas com o emprego de menores forças durante o processamento e sem o encruamento significativo no metal ou liga quando conformado mecanicamente.

Uma vez obtida boa qualidade no lingote, como um tarugo, uma placa ou qualquer outra forma, a qualidade do produto final depende diretamente da qualidade do produto trabalhado a quente, uma vez que é praticamente impossível eliminar nas etapas seguintes de trabalho a frio, defeitos originados durante o trabalho a quente.

A capacidade de deformação plástica do cobre acima da temperatura de recristalização sem que haja trincas superficiais de conformação é o critério básico para avaliar a adequação de cada um dos processos que podem ser utilizados. O material metálico que trinca excessivamente mesmo após ser submetido a diversos parâmetros de processos que envolvem taxa de deformação (velocidade) e temperatura é considerado um material que apresenta fragilidade a quente, sendo inadequado para este tipo de processo. Impurezas e elementos secundários constituem um importante fator que afeta as características de trabalho a quente do cobre e suas ligas. O principal motivo desse efeito é que pequenas quantidades de certos elementos ou compostos intermetálicos levam à formação de fases frágeis de baixo ponto de fusão, que se segregam, durante o lingotamento, nos contornos de grãos, reduzindo as forças de coesão entre os cristais da fase matriz.

O metal que apresenta fases frágeis pode ser inadequado ao trabalho a quente ou ter seu processamento a quente limitado a algumas condições específicas. Alguns tipos de processos de manufatura exigem que o metal resista a condições mais severas de tensionamento ou alongamento do que outros, e, dessa forma, a seleção adequada do processo a ser utilizado depende das especificações do produto acabado e da capacidade do metal de ser processado.

A Figura 5.4 mostra um comparativo entre o cobre, que apresenta baixa energia de falha de empilhamento (EFE), e o alumínio, que apresenta elevada EFE, durante o processo de laminação a quente, considerando uma redução de 50%, em que se pode notar em ambos os metais a recuperação dinâmica, que ocorre rapidamente durante o processo de deformação plástica gerada pela ação de compressão direta dos cilindros (ou rolos) laminadores sobre o material metálico a ser conformado; entretanto, apenas o cobre apresenta recristalização estática, com formação de novos grãos (cristais) logo após esse processo.

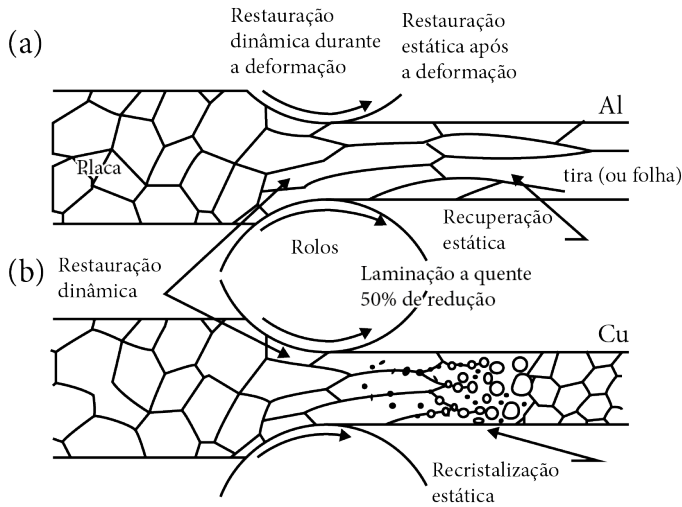


Figura 5.4 – Laminação a quente com 50% de redução para (a) alumínio e (b) cobre.

A Figura 5.5 mostra um comparativo entre o cobre (baixa EFE) e o alumínio (elevada EFE) durante o processo de extrusão a quente, que apresenta taxas de deformação superiores às da laminação a quente, considerando uma redução de 99%, em que se pode notar no alumínio uma recuperação dinâmica, gerada durante o processo de deformação a partir da ação compressiva da matriz sobre o material de trabalho, e uma recristalização estática, com formação de novos grãos após esse processo. Já o cobre apresenta recristalização dinâmica, com formação de novos grãos durante o processo de deformação plástica, e recristalização estática, que ocorre após o processo.

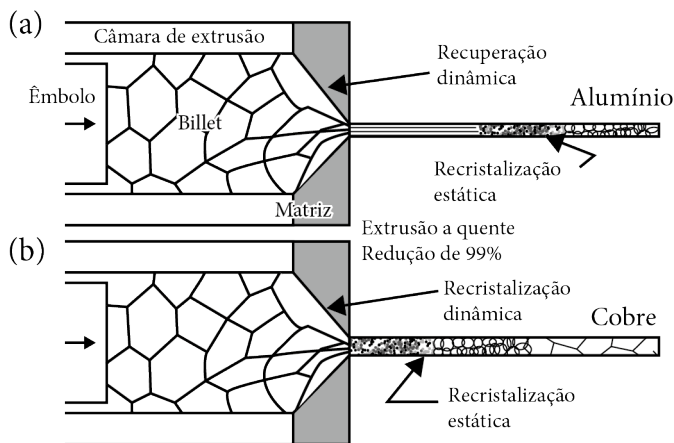


Figura 5.5 – Extrusão a quente com 99% de redução para (a) alumínio e (b) cobre.



## 5.3 TRATAMENTOS TÉRMICOS DO COBRE E SUAS LIGAS

Os tratamentos térmicos são a mais importante tecnologia de tratamento, incluindo processos como recozimento, revenimento (alívio de tensões) e endurecimento por precipitação, que são muito utilizados no cobre e suas ligas.

Um *tratamento térmico* envolve vários procedimentos de aquecimento e resfriamento, realizados para efetuar alterações microestruturais no material, o que, por sua vez, afeta suas propriedades mecânicas.

Em relação aos materiais metálicos, os tratamentos térmicos podem ser realizados em um componente nas várias etapas do seu processo de fabricação. Em alguns casos, o tratamento térmico é aplicado antes do processo de conformação mecânica de materiais metálicos, com o objetivo de facilitar a conformação enquanto o material está aquecido. Em outros casos, é utilizado para diminuir os efeitos do encruamento que ocorrem durante a conformação plástica a frio, possibilitando uma deformação adicional ao material (por exemplo, o recozimento intermediário em um processo de trefilação). O tratamento térmico também pode ser realizado perto da etapa final, para atingir as propriedades mecânicas e a morfologia microestrutural necessárias ao produto.

Na sequência, são abordados importantes tratamentos térmicos para o cobre e suas ligas: recozimento, endurecimento por transformação martensítica e revenimento e endurecimento por precipitação.

### 5.3.1 RECOZIMENTO

*Recozimento* consiste em aquecer o material metálico até uma temperatura adequada, mantendo-a por um tempo determinado (encharque) e resfriar lentamente. Um metal é recozido por qualquer um desses motivos: reduzir a dureza e fragilidade, alterar a microestrutura para obter as propriedades mecânicas desejáveis, reduzir a dureza para melhorar a conformabilidade e recristalizar metais trabalhados a frio (encruados). Diferentes designações são empregadas no recozimento, dependendo dos detalhes do processo e da temperatura utilizada em relação à temperatura de recristalização do metal que está sendo tratado.

As peças ou os componentes metálicos trabalhados a frio frequentemente são recozidos para diminuir os efeitos do encruamento e aumentar a ductilidade. O tratamento permite que o metal encruado recristalize parcial ou completamente, dependendo das temperaturas, encharques e taxas de resfriamento. Quando o recozimento é feito para que seja realizado mais trabalho a frio na peça, ele se chama *recozimento intermediário*. Quando feito na peça acabada (deformada a frio) para remover os efeitos do encruamento e quando não é realizada uma deformação subsequente, é chamado simplesmente de *recozimento*. O processo em si é basicamente o mesmo, mas são empregadas designações diferentes para indicar o propósito do tratamento.

Se as condições de recozimento permitem a recuperação total do metal deformado a frio para a estrutura de grãos original, então ocorre a *recristalização*. Em seguida, o metal tem a nova forma criada pela operação de conformação, mas sua estrutura de grãos e suas propriedades a ela associadas são essencialmente as mesmas de antes do trabalho a frio. As condições que tendem a favorecer a recristalização são a temperatura mais alta, o maior encharque e a menor taxa de resfriamento. Se o processo de recozimento só permitir o retorno parcial da estrutura de grãos para seu estado original, ele se chama *tratamento de recuperação*. O revenimento permite que o metal retenha a maior parte de seu encruamento obtido no trabalho a frio. Normalmente, se o processo de tratamento térmico só permitir o alívio das tensões residuais da estrutura de grãos, ele se chama revenimento para o cobre e suas ligas.

O *recozimento de homogeneização*, ou apenas *homogeneização*, consiste no tratamento térmico cujo principal processo é a aniquilação das consequências da segregação dendrítica, a qual pode ocorrer em processos de solidificação de ligas de cobre. Como resultado dessa segregação, surgem heterogeneidades químicas em microescala no interior dos cristais da solução sólida, podendo surgir na matriz da liga fases de não equilíbrio, em excesso.

Em ligas monofásicas, como no sistema cobre-níquel, que apresentam solução sólida contínua, o recozimento de homogeneização é um processo difusional, cujo intuito é o nivelamento da composição química dos grãos da solução sólida, eliminando a segregação intercrystalina. Para as ligas de cobre que não são submetidas a processo de conformação a frio ou a quente, capazes de modificar a estrutura do material, a homogeneização é de grande importância.

O *recozimento de heterogeneização* é um tratamento térmico cujo principal intuito consiste na possibilidade de maior precipitação de uma ou algumas fases, a partir da fase matriz. Na maioria das ligas metálicas, a fase matriz é uma solução sólida baseada no metal principal (solvente), enquanto a fase livre tem como base o soluto.

O recozimento de heterogeneização para amolecimento de semifabricados deformados pode ser utilizado em ligas estabilizáveis termicamente. O objetivo é amolecer o material, torná-lo dúctil diante de processos de conformação de chapas (estampagem, por exemplo) e outras operações de conformação a frio. Por exemplo, o latão 60-40 (alfa + beta), como resultado de aceleração do resfriamento desde a região beta, após conformação a quente, tem reduzido a ductilidade devido à grande quantidade de fase beta. Esse efeito deletério em termos de ductilidade pode ser eliminado ou mitigado com resfriamento lento, durante o qual a fase alfa, que é dúctil a partir da fase beta, precipita de forma mais plena.

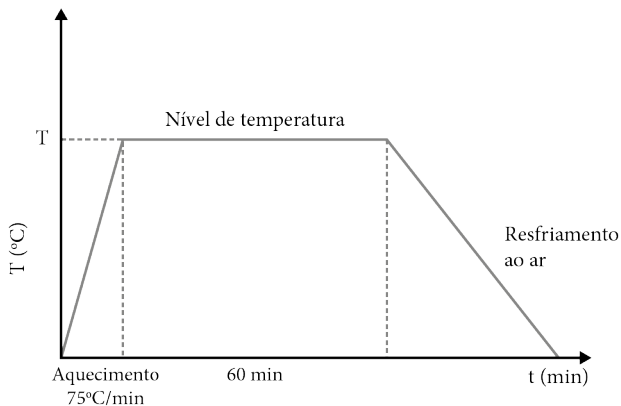
Lobo *et al.* (2022) desenvolveram uma pesquisa sobre a influência de diferentes temperaturas durante o tratamento térmico na microestrutura e nas propriedades mecânicas de um bronze de manganês. A liga estudada possui algumas designações, como UNS C67600, CZ115, CW722R e CuZn40Mn1Pb1FeSn, oriundas de normas técnicas para ligas de cobre (JOSEPH, 2001; NASCIMENTO *et al.*, 2019; ASTM-B138, 2017; EN

12164, 2016; EN 12165, 2016). Ela é composta, em massa, por 60% de cobre, 1% de chumbo, 1,5% de estanho, 1,3% de ferro, 0,5% de manganês e o restante de zinco.

Nesse estudo, treze amostras foram submetidas a processo de trabalho a frio, especificamente trefilação com redução de 34%. A escolha por esse percentual de redução foi fundamentada na média de valores utilizados em processos industriais. Em seguida, essas amostras foram tratadas termicamente por uma hora com diferentes temperaturas, variando de 200 °C a 750 °C, com o incremento de 50 °C para cada amostra.

O trabalho a frio dessa liga é em geral combinado ao recozimento sequencialmente. Durante o processo de deformação a frio e conseqüente encruamento do material metálico, uma parte da energia mecânica é transformada em calor, porém o restante dessa energia fica armazenado no material, proporcionando um aumento da densidade de defeitos cristalinos, especificamente discordâncias. Durante o tratamento de recozimento, a energia armazenada promove inicialmente os processos de recuperação, com o rearranjo e a diminuição das discordâncias, e posteriormente com o aumento da temperatura, a recristalização e a nucleação e formação de novos grãos a partir de grãos previamente encruados. O crescimento de grãos deve ser controlado, pois grãos grosseiros propiciam perda de resistência mecânica e capacidade de trabalhabilidade (ductilidade prejudicada).

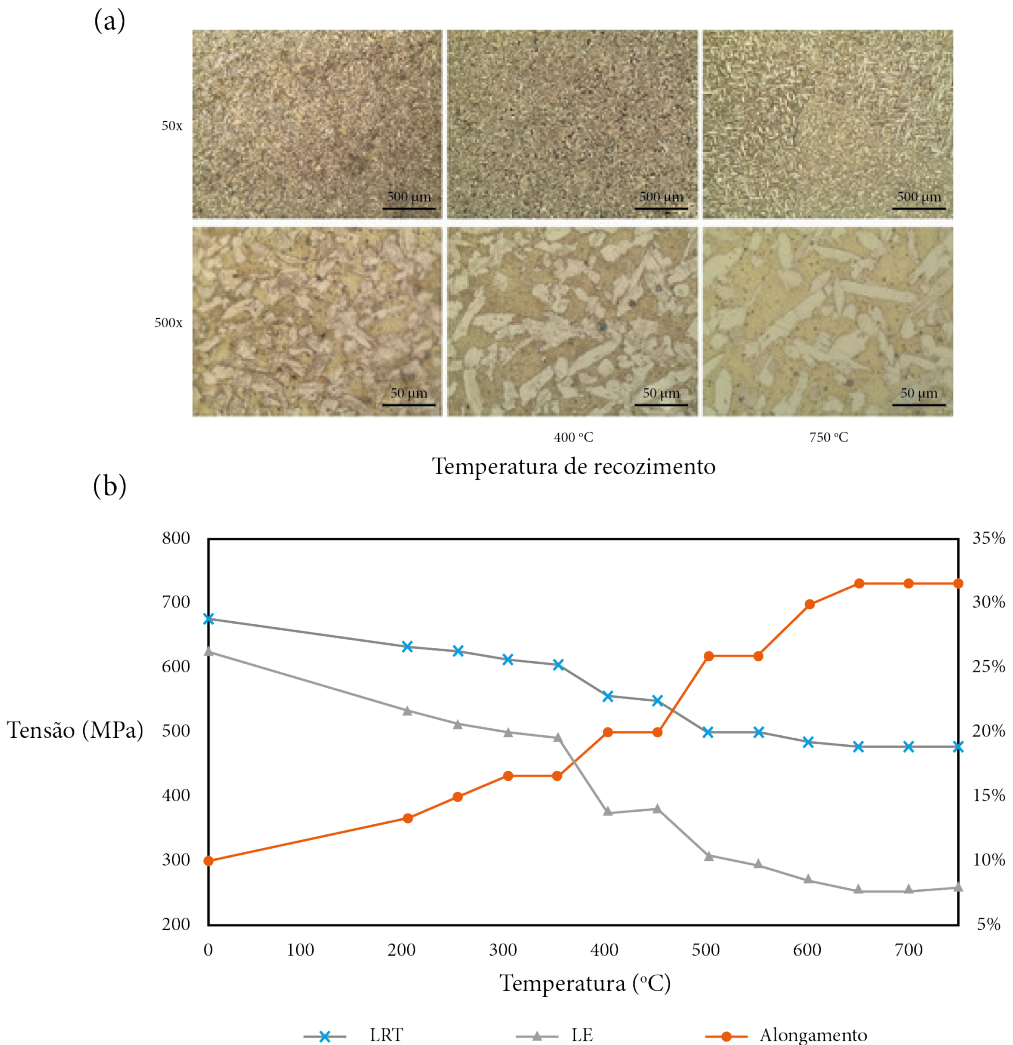
Na Figura 5.6, é mostrado o procedimento de tratamento térmico de recozimento adotado para as amostras da liga UNS C67600, considerando temperatura (T) e tempo (t), com aquecimento em forno, encharque para homogeneização da microestrutura com um nível de temperatura para cada amostra e resfriamento moderado ao ar.



**Figura 5.6** – Procedimento de recozimento para a liga UNS C67600. (Lobo *et al.*, 2022)

A Figura 5.7 (a) mostra o efeito da temperatura durante o recozimento na microestrutura das amostras da liga UNS C67600. Pode-se notar que a microestrutura foi afetada pelo aumento da temperatura de recozimento. Entre 200 °C e 350 °C, pode ter ocorrido a recuperação com gradual diminuição na densidade de discordâncias na

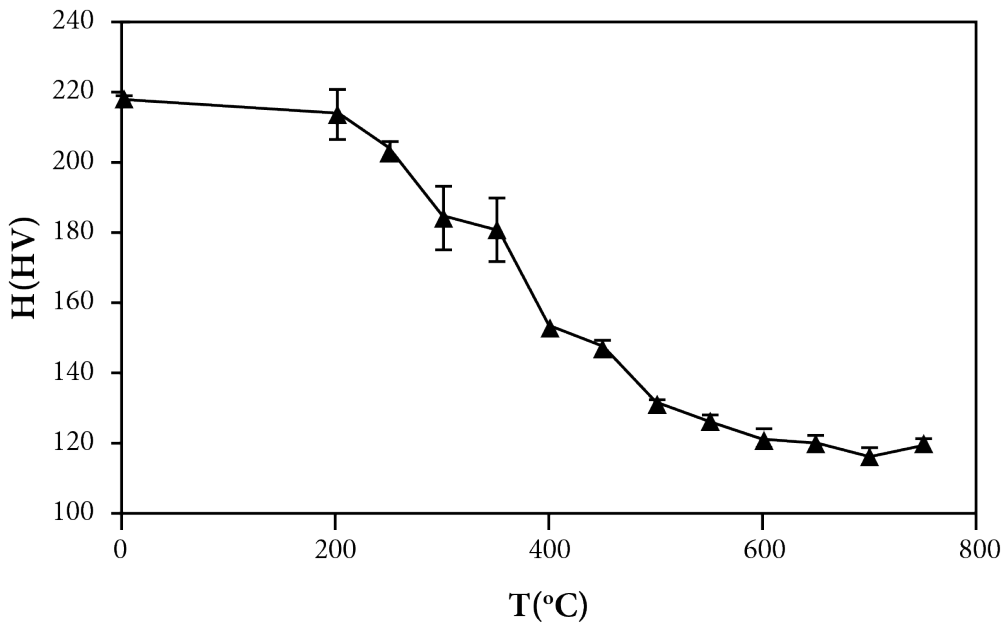
fase circular  $\alpha$ . A 350 °C, o material pode ter começado a recrystalizar com formação de grãos da fase  $\alpha$  livre de tensões e possivelmente finalizando a 500 °C. A 700 °C, as amostras apresentaram uma estrutura de descontinuidade entre a superfície e o núcleo do material, com a aparência de uma estrutura de Widmanstätten.



**Figura 5.7** – Efeito da temperatura durante o tratamento térmico (a) na microestrutura das amostras a 200 °C, 400 °C e 750 °C, respectivamente, nas colunas da esquerda para a direita; e (b) nas propriedades mecânicas segundo cada temperatura aplicada. (Lobo *et al.*, 2022)

Em relação ao comportamento mecânico do bronze de manganês estudado, a Figura 5.7b mostra o efeito da temperatura do tratamento térmico na resistência mecânica, representada por limite de resistência à tração (LRT) e limite de escoamento (LE), e também no alongamento. Os resultados mostraram um aumento do

alongamento e diminuição de resistência mecânica com a elevação da temperatura de tratamento térmico. Na Figura 5.8, pode-se notar que os valores médios de dureza (H, do inglês *hardness*) também diminuem com o aumento da temperatura (T) do tratamento térmico adotado. É possível observar que, para obter mudanças significantes nas propriedades mecânicas, é necessário submeter a liga UNS C67600 a um tratamento térmico com uma temperatura mínima de 400 °C, considerando um trabalho a frio prévio de no mínimo 34%.



**Figura 5.8** – Efeito da temperatura durante o tratamento térmico na dureza média da liga UNS C67600. (Lobo *et al.*, 2022)

### 5.3.2 ENDURECIMENTO POR TRANSFORMAÇÃO MARTENSÍTICA E REVENIMENTO

Os aços são importantes ligas de ferro que, dependendo da composição química, possuem a capacidade de endurecimento por meio de tratamento térmico, que consiste em transformar austenita em martensita por meio de têmpera (resfriamento severo) e posterior revenimento para obter microestrutura com alívio das tensões resultantes da têmpera. Ligas especiais de cobre como o bronze de alumínio, especificamente o bronze aeroespacial previsto na norma AMS 4590 (2015), apresentam características similares de tratamento térmico baseadas em transformação martensítica e posterior revenimento, resultando em aprimoramento de propriedades mecânicas, como incremento de dureza e resistência mecânica.

Entre as ligas do grupo de bronze de alumínio, destaca-se o bronze de alumínio-níquel, conhecido mundialmente como NAB (*Nickel-Aluminium Bronze*), contendo percentuais aproximados em massa de 80% de cobre, 10% de alumínio, 5% de níquel e 5% de ferro (CuAl10Ni5Fe5). Santos *et al.* (2022) estudaram a relação entre o endurecimento por têmpera, com posterior revenimento, e as propriedades mecânicas geradas no bronze aeroespacial UNS C63000 (ou CuAl10Ni5Fe5).

De forma geral, o bronze de alumínio-níquel de aplicação aeronáutica utiliza como referência a norma AMS 4640, que determina os padrões mecânicos e químicos do produto final (AMS 4640, 2011). Essa norma descreve dois processos de fabricação distintos, denominados *TQ50* e *HR50*, responsáveis pela obtenção das propriedades mecânicas finais do bronze de alumínio-níquel, cuja dureza deve ser de 201 a 248 HB, limite de resistência à tração com valor mínimo de 758 MPa, limite de escoamento mínimo a deformação padrão de 0,5% de 469 MPa e alongamento mínimo de 10%.

O processo *TQ50*, conhecido como *Quenching* (têmpera, em inglês), é obtido por meio do processo de conformação a quente e, posteriormente, conta com o auxílio do aquecimento seguido do resfriamento brusco em água ou óleo (têmpera) para elevação de dureza e resistência mecânica, passando depois por revenimento. Para o processo *HR50*, conhecido também como *Draw and Stress Relieved* (trefilação e alívio de tensões), as propriedades mecânicas desejadas são adquiridas somente pelo processo de conformação a frio (trefilação), o que gera encruamento do material, e de posterior revenimento (Meigh, 2000).

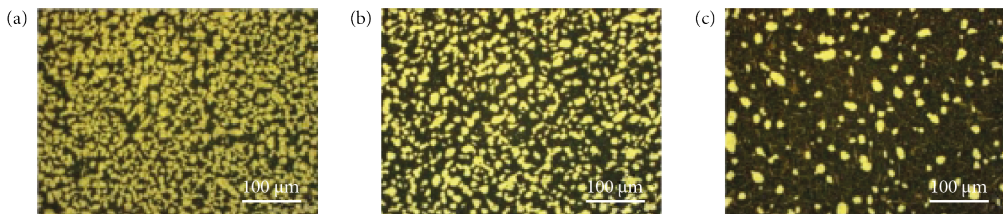
Santos *et al.* (2022) consideraram em sua pesquisa a têmpera *TQ50*, baseados no fato de que o processo *HR50* é o mais utilizado para fabricação da liga UNS C63000, enquanto o processo via *TQ50* é pouco utilizado, necessitando de pesquisa e desenvolvimento. Consideraram também como fator motivador o estudo sobre as transformações de fases presentes no bronze de alumínio-níquel forjado e temperado e suas aplicações finais no segmento aeronáutico, o que torna tecnologicamente imprescindível a realização de pesquisas sobre o tratamento térmico para verificação do comportamento microestrutural e mecânico desse material.

Na Tabela 5.1, são destacados os valores das propriedades mecânicas encontradas em cada amostra, em que foi feito o aquecimento seguido do resfriamento brusco na água em temperatura ambiente. Por meio da análise desses valores, nota-se a elevação da resistência mecânica (LRT e LE) e da dureza conforme a temperatura do tratamento térmico é elevada, enquanto o alongamento apresentou reduções com o aumento da temperatura, haja visto que, quanto maior a taxa de resfriamento, maior a retenção da fase martensítica  $\beta$ . Na Figura 5.9, são mostradas as microscopias ópticas das três amostras, com os respectivos percentuais das frações volumétricas da fase  $\alpha$  contida na microestrutura.



**Tabela 5.1** – Resultados das propriedades mecânicas obtidas após o aquecimento seguido de resfriamento brusco em água. (Santos *et al.*, 2022)

Amostra	Temperatura e tempo do tratamento térmico	Limite de resistência à tração (LRT, MPa)	Limite de escoamento à deformação padrão de 0,5% (LE, MPa)	Alongamento (%)	Dureza (HB)
1	785 °C – 2 h	839	348	10	215
2	835 °C – 2 h	842	381	6,5	242
3	885 °C – 2 h	883	440	5	255

**Figura 5.9** – (a) Micrografia da microestrutura da amostra 1 com fração volumétrica de 42% de fase  $\alpha$  (200x), (b) Micrografia da microestrutura da amostra 2 com fração volumétrica de 29,6% de fase  $\alpha$  (200x) e (c) Micrografia da microestrutura da amostra 3 com fração volumétrica de 21% de fase  $\alpha$  (200x).

Nas figuras 5.9 (a) e (b), em que foram utilizadas, respectivamente, as temperaturas de tratamento térmico 785 °C e 835 °C, observou-se a fase  $\alpha$  de forma mais intensa, apresentando-se de forma circular e tendo a presença de microconstituintes Kappa's dispersos em toda microestrutura da amostra. Já na figura 5.9 (c), que utilizou 885 °C, a intensidade da fase  $\alpha$  é menor, tendo em vista o modelo de cristalização do bronze de alumínio-níquel, em que a fase  $\alpha$  em temperaturas elevadas ainda está no início da decomposição, apresentando-se, portanto, em menores frações volumétricas – em temperaturas elevadas, a predominância é da fase martensítica  $\beta$ , que fica retida na microestrutura no processo de têmpera, tendo a necessidade de ser realizado o revenimento para que ela seja decomposta em  $\alpha + \kappa$ III (reação eutetoide), o que reduz naturalmente os valores de resistência mecânica e dureza.

Na Tabela 5.2, são demonstrados os resultados das propriedades mecânicas das amostras após o processo de revenimento, realizado a 650 °C por 4 horas em todas as amostras do estudo. Por meio da análise dos resultados da tabela, nota-se que a amostra 3 é a mais efetiva no atendimento aos valores de propriedades mecânicas previstos na norma AMS 4640 (2011). Ressalta-se que, na amostra 3, foi adotado o parâmetro de temperatura de 885 °C por 2 horas para realização da têmpera e posterior revenimento de 650 °C por 4 horas.

**Tabela 5.2** – Propriedades mecânicas das amostras após o processo de revenimento. (Santos *et al.*, 2022)

Amostras	Temperatura do tratamento térmico	Revenimento	Limite de resistência à tração (MPa)	Limite de escoamento à deformação padrão de 0,5% (MPa)	Alongamento (%)	Dureza (HB)
1	785 °C – 2 h	650 °C – 4 h	747	417	18	183
2	835 °C – 2 h	650 °C – 4 h	780	445	16	205
3	885 °C – 2 h	650 °C – 4 h	820	534	15	210

Em suma, os resultados do trabalho de Santos *et al.* (2022) mostram que temperaturas de aquecimento na ordem de 785 °C, 835 °C e 885 °C, seguidas de resfriamento brusco em água, promovem a elevação dos resultados mecânicos de resistência e dureza; no entanto, nota-se a redução gradativa do percentual de fase  $\alpha$ . A elevação do limite de resistência à tração, do limite de escoamento e da dureza e a redução notável do alongamento estão fundamentadas no fato de que, quanto maior a variação de temperatura entre a liga de bronze de alumínio-níquel e a solução na qual ocorre o resfriamento severo, maior a retenção da fase martensítica  $\beta$  (CCC), que é rica em NiAl e, conseqüentemente, menor a intensidade da fase  $\alpha$  (CFC). Dessa forma, o processo de revenimento torna-se indispensável para o material.

### Curiosidade

Em relação à possibilidade de tratamento térmico de metais, pode-se aplicar a *têmpera com fusão superficial* para elevar a resistência ao desgaste de peças de ligas de cobre. Por exemplo, na têmpera com fusão superficial de bronzes de alumínio de muitos componentes, em função do aquecimento por laser e posterior solidificação rápida da camada fundida, pode-se obter uma camada com estrutura monofásica homogênea, que possui resistência aumentada contra a corrosão e a ação de cavitação.

### 5.3.3 ENDURECIMENTO POR PRECIPITAÇÃO

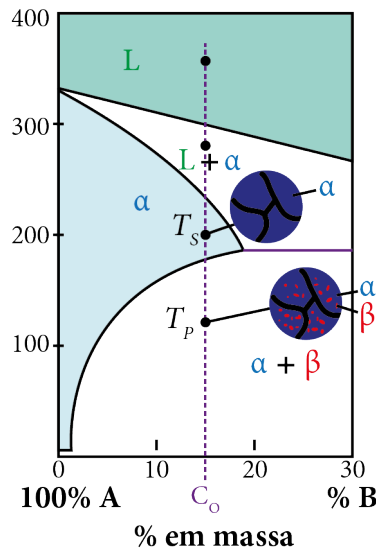
O *endurecimento por precipitação* (PH, do inglês *Precipitation-hardening*) é um tratamento térmico que consiste na formação de precipitados (partículas finas) que dificultam o movimento das discordâncias, aumentando a resistência mecânica e dureza do metal. É muito importante para aumentar a resistência mecânica de algumas ligas de cobre e de outros metais não ferrosos.

Basicamente, a liga que pode ser endurecida por precipitação é aquela que apresenta duas fases (alfa e beta, por exemplo) em temperatura ambiente, mas que pode ser aquecida até uma temperatura que dissolva a segunda fase (beta).

O tratamento de endurecimento por precipitação de uma liga metálica fundamenta-se em três etapas:

- 1) *solubilização*, na qual a liga é aquecida a uma *temperatura solidus* ( $T_s$ ) na região monofásica alfa e mantida por um período suficiente para dissolver os átomos da fase beta, formando uma solução homogênea;
- 2) *resfriamento rápido* até a temperatura ambiente para criar uma solução sólida supersaturada; e
- 3) *tratamento de precipitação* (ou *envelhecimento*), no qual a liga é aquecida a uma *temperatura de precipitação* ( $T_p$ ), inferior à temperatura *solidus* usada na solubilização, propiciando a precipitação de partículas finas da fase beta.

Na Figura 5.10, é mostrada uma parte de um diagrama de fases de uma liga que consiste em metais A e B, que pode ser endurecida por precipitação, com exemplos de temperatura *solidus* ( $T_s$ ) para a solubilização e temperatura de precipitação ( $T_p$ ).



**Figura 5.10** – Parte de um diagrama de fases de liga metálica que pode ser endurecida por precipitação.

O envelhecimento baseia-se na combinação de temperatura e tempo durante o tratamento de precipitação, o que é fundamental para obter as propriedades desejadas na liga. O envelhecimento pode ocorrer em algumas ligas à temperatura ambiente, chamado *envelhecimento natural*. Quando ele é realizado a uma temperatura elevada, trata-se do *envelhecimento artificial*. O *superenvelhecimento* refere-se ao prosseguimento do processo de envelhecimento que ocasiona uma redução nas propriedades de resistência mecânica e dureza, apresentando efeito semelhante ao do recozimento.

É importante destacar que algumas ligas não ferrosas são endurecíveis por precipitação e outras, não. O berílio é um elemento que, adicionado ao cobre em teores mássicos

de até 2%, possibilita o efeito de endurecimento por precipitação, proporcionando valores de dureza muito superiores aos das demais ligas de cobre. No caso específico da liga cobre-berílio UNS C17200, ela pode ser trabalhada a quente a determinada temperatura, depois aquecida e mantida a uma temperatura mais alta para forçar uma dispersão randômica do berílio na solução sólida. Em seguida, a liga passa por um resfriamento rápido para aprisionar a solução supersaturada em temperatura ambiente. Logo após, o material é reaquecido até uma temperatura de precipitação e mantido nessa temperatura por um intervalo, enquanto uma parte da solução supersaturada precipita, incrementando a dureza do material. Durante o processo de envelhecimento, há a formação de partículas microscópicas ricas em berílio na matriz metálica – uma reação controlada por difusão, cuja intensidade depende do tempo e da temperatura desse processo.

Em determinadas ligas de cobre, o fósforo em combinação com pequenos teores de níquel forma o fosfeto de níquel, que mediante tratamento térmico produz o efeito de endurecimento por precipitação. Entretanto, como impureza no latão, o fósforo afeta o crescimento de grão, alterando o desempenho da liga no processo de recristalização.

### Curiosidade

*Têmpera* é uma condição aplicada ao cobre ou à liga de cobre, por meio de deformação plástica a frio ou de tratamento térmico, propiciando estrutura e propriedades mecânicas características. A expressão não tem qualquer ligação com a utilizada nos produtos de aço (tratado termicamente para obter endurecimento por transformação martensítica, por exemplo). De forma geral, em ciência e engenharia de materiais, *têmpera* é sinônimo de resfriamento rápido.

### Exercício

Os elementos cobre e níquel (Cu-Ni) na condição de ligas binárias fazem parte de um sistema isomorfo, em função de sua elevada afinidade na formação de liga por solução sólida substitucional, apresentando 100% de solubilidade e proporcionando uma única fase sólida, denominada alfa. Esses dois elementos metálicos apresentam características que ratificam essa afinidade, como o mesmo tipo de estrutura cristalina (cúbica de face centrada), raios atômicos que não diferem mais que 15%, eletronegatividade e valência semelhantes, conforme Tabela 5.3.

**Tabela 5.3** – Características de níquel e cobre associadas à solubilidade

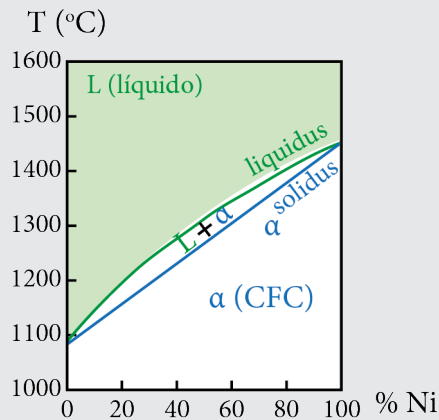
	Cu	Ni
Raio Atômico [Å]	1,28	1,25
Estrutura Cristalina	CFC	CFC
Eletronegatividade	1,9	1,8
Valência	+1 (+2)	+2

Os valores mostrados na Tabela 5.3 atendem às regras de Rume-Rothery, que descrevem as condições sob as quais um elemento pode se dissolver em um metal, formando uma solução sólida.

Em relação ao cobre e níquel, independentemente do elemento que for soluto ou solvente na liga binária, podemos notar as seguintes condições:

- 1) *Fator tamanho atômico*: a diferença entre os raios atômicos dos dois metais é menor do que 15%.
- 2) *Estrutura cristalina*: os dois metais apresentam a mesma estrutura cristalina do solvente e soluto.
- 3) *Efeito eletroquímico*: possuem aproximadamente a mesma eletronegatividade.
- 4) *Efeito valência*: uma vez atendida as condições anteriores, um metal de maior valência é mais provável de dissolver em um metal de menor valência do que o contrário.

No que diz respeito a tratamentos térmicos, por meio de análise do diagrama de fases do sistema cobre-níquel (Figura 5.11), explique se as ligas desse sistema podem ser tratáveis termicamente ou não por endurecimento por precipitação.



**Figura 5.11** – Diagrama de equilíbrio de fases do sistema cobre-níquel (Cu-Ni).

*Resposta:*

Não, pois o sistema isomorfo cobre-níquel apresenta apenas a fase alfa em temperatura ambiente, o que inviabiliza o tratamento térmico de endurecimento por precipitação.

## 5.4 PROCESSOS DE TECNOLOGIA DE SUPERFÍCIE

Os processos de tecnologia de superfície consistem em tecnologias empregadas para alterar a superfície do componente; entre elas, destacam-se os tratamentos de superfície, os processos de revestimento e a deposição de filmes finos.

As tecnologias empregadas na indústria com o intuito de aprimorar as superfícies dos produtos se tornam cada vez mais importantes no processo de agregação de valor aos bens produzidos. Algumas dessas tecnologias têm como principal propósito evitar a corrosão, enquanto outras são voltadas para melhorar a dureza superficial e a resistência ao desgaste.

Em relação aos revestimentos, eles podem ser divididos em duas famílias primárias: metálicos e não metálicos, em função do tipo de revestimento, e não do substrato. Os revestimentos não metálicos são poliméricos, vitro-cerâmicos e conversão térmica (oxidação e fosfatação, por exemplo). Os revestimentos metálicos são difusão, recobrimento, banho quente, pulverização e deposição.

O processamento de superfícies será discutido na sequência deste capítulo, considerando desde técnicas de limpeza industrial, necessárias para preparar e tratar as superfícies de materiais de trabalho, até tecnologias de revestimento, que possibilitam aprimoramentos no aspecto e nas propriedades da superfície do produto, por exemplo. Destacam-se processos de tecnologias de superfície que podem ser utilizados em produtos de cobre e suas ligas ou até mesmo que utilizam o cobre como metal de revestimento.

### 5.4.1 LIMPEZA INDUSTRIAL E TRATAMENTO DE SUPERFÍCIE

A maior parte dos componentes requer preparação por meio de limpeza durante sua sequência de fabricação. A *limpeza industrial* compreende os processos que utilizam técnicas de limpeza química e mecânica para a remoção de manchas e contaminantes, resultantes de processamento anterior ou do próprio ambiente industrial.

As técnicas de limpeza química empregam produtos químicos para remover óleos e manchas indesejadas da superfície do componente. A limpeza mecânica envolve a remoção de substâncias de uma superfície por meio de operações mecânicas de vários tipos, podendo ser uma simples escovação até um jateamento por abrasivos. Essas operações de limpeza mecânica acabam atendendo a outros propósitos, como a remoção de rebarbas, a redução de rugosidade, a adição de brilho e a melhoria das propriedades superficiais.

As principais técnicas de *limpeza química* são: *alcalina*, que utiliza álcalis para remover óleos, graxas, ceras e diversos tipos de partículas (cavacos, carbono e sílica) de uma superfície metálica; *por emulsão*, que emprega emulsificantes adequados (sabões), que resultam na dissolução ou emulsificação da sujeira da superfície do componente; *com solventes*, em que substâncias químicas dissolvem as sujeiras; *ácida*, em que soluções ácidas combinadas com solventes miscíveis em água eliminam óleos e óxidos de fácil remoção das superfícies metálicas por meio de imersão, aspersão ou abrasão manual; e *por ultrassom*, que combina limpeza química e agitação mecânica do fluido de limpeza para remover contaminantes superficiais.



A *limpeza mecânica* compreende a remoção de sujeiras, carepas ou filmes da superfície do componente normalmente por abrasão ou por outra ação mecânica. Jateamento abrasivo, *shot peening* e tamboreamento são alguns processos empregados, que também servem para tratar a superfície do material com melhoria de propriedades na região em que atuam.

O *jateamento abrasivo* utiliza o impacto de partículas de substâncias abrasivas em alta velocidade para limpar e preparar a superfície do componente. Várias substâncias são usadas no jateamento, incluindo partículas de sílica ( $\text{SiO}_2$ ) no jateamento com areia, de alumina ( $\text{Al}_2\text{O}_3$ ) e carбето de silício (SiC), grânulos de náilon e cascas de nozes trituradas. As partículas abrasivas são projetadas contra a superfície do componente por meio de ar pressurizado ou força centrífuga. Em algumas aplicações, o processo é realizado a úmido, com as partículas finas contidas em uma lama aquosa projetadas contra a superfície por pressão hidráulica.

O *tamboreamento* é um processo de acabamento em massa que utiliza um tambor horizontal, com seção transversal hexagonal ou octogonal, cuja rotação mistura as peças em velocidades de 10 a 50 rpm. O acabamento é feito pela ação de deslizamento do meio abrasivo e dos componentes conforme o tambor gira. Trata-se de um processo relativamente lento, podendo ser necessárias muitas horas para a conclusão do processo. Os altos níveis de ruído e a necessidade de grandes espaços para os equipamentos também são desvantagens do acabamento por tamboreamento.

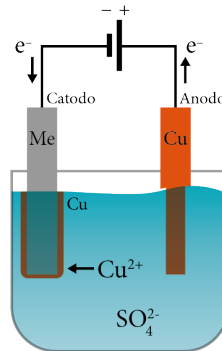
#### 5.4.2 ELETRODEPOSIÇÃO (GALVANOPLASTIA)

*Eletrodeposição*, também conhecida como *galvanoplastia*, é um processo eletrolítico em que um componente (o catodo) é imerso em um eletrólito ionizado, juntamente ao material de revestimento (o anodo), e uma corrente direta de uma fonte de alimentação externa passa entre os dois. O eletrólito é uma solução aquosa composta de ácidos, bases ou sais; ele conduz corrente elétrica pelo movimento dos íons metálicos em solução. A temperatura de operação da galvanoplastia varia de 20 °C a 60 °C. Resultados melhores são obtidos com componentes quimicamente limpos um pouco antes do processo.

Os materiais utilizados como materiais de revestimento são zinco, alumínio, níquel, estanho, cobre, latão, bronze, cádmio, índio, chumbo, ligas de estanho-chumbo e cromo. No caso de joias, utilizam-se metais preciosos (ouro, prata, platina) como materiais a serem depositados. O ouro também é utilizado em conectores elétricos. O componente a ser revestido é o substrato do processo de eletrodeposição e pode ser feito de materiais metálicos como aços carbono, aços inoxidáveis, aços de baixa liga e ligas de alumínio e de cobre, alguns polímeros termoplásticos e vidro com pré-revestimento eletricamente condutor.

O *cobre* possui aplicações importantes como metal de revestimento. É amplamente utilizado como um revestimento decorativo sobre aço e zinco, isoladamente ou formando liga com zinco, como chapa de latão. Também tem aplicações importantes na eletrodeposição de placas de circuito impresso. Finalmente, o cobre é depositado com frequência no aço, como uma base por baixo do revestimento de níquel e/ou cromo. A

Figura 5.12 mostra um esquema com o princípio de eletrodeposição, com o cobre sendo o material de revestimento (anodo). Na imagem, nota-se a redução de íons de cobre e adesão do cobre à superfície do metal a ser revestido.



**Figura 5.12** – Galvanoplastia: cobre como material de revestimento.

Fonte: [https://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/c/c7/Copper\\_electroplating\\_principle\\_%28multilingual%29.svg](https://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/c/c7/Copper_electroplating_principle_%28multilingual%29.svg)

A *niquelação* trata-se do revestimento de níquel sobre latões, bronzes, fundidos de zinco e outros metais, sendo utilizada para decoração e proteção contra a corrosão. As aplicações incluem acessórios automotivos e outros bens de consumo. O níquel também é usado como uma base para camadas muito finas de cromo.

O *revestimento de estanho* é muito utilizado para proteção contra corrosão em recipientes de alimentos e para melhorar o processo de soldagem de componentes elétricos.

O *revestimento de cromo* (também conhecido como *cromatização*) é valorizado por sua aparência decorativa e é muito utilizado em produtos automotivos, móveis de escritórios e produtos de cozinha. Ele também produz um dos revestimentos mais duros entre todos os eletrodepositados; portanto, é amplamente empregado em peças que exigem resistência ao desgaste (por exemplo, pistões e cilindros hidráulicos, anéis de pistão e componentes de motores de aeronaves).

A *eletrodeposição em escova* é uma variação desse processo, em que o componente a ser revestido é o catodo, e uma escova embebida na solução de revestimento é o anodo. Sua limitação é a incapacidade de produzir um revestimento espesso.

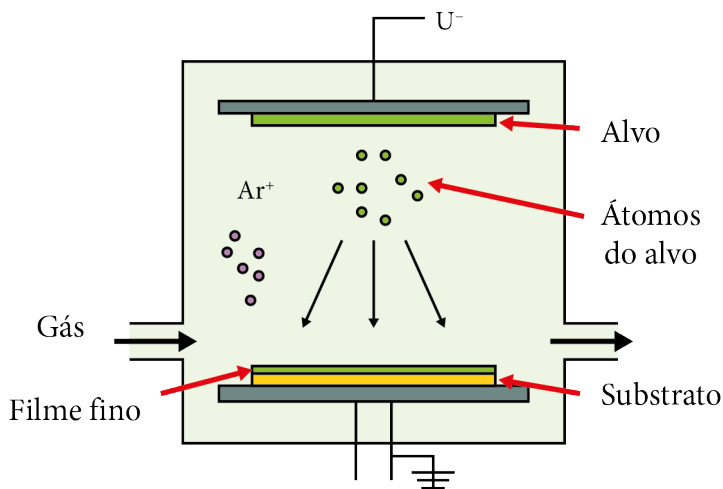
### 5.4.3 PROCESSOS DE DEPOSIÇÃO DE VAPOR

O processo de deposição de vapor forma um revestimento fino no substrato por meio de condensação ou reação química de um gás sobre a superfície do substrato. No caso da condensação do gás, trata-se da deposição física de vapor (PVD) e, no caso da reação química de um gás, da deposição química de vapor (CVD).

A *deposição física de vapor* (PVD, do inglês *Physical Vapor Deposition*) é uma tecnologia de revestimento que se baseia na transformação do material de revestimento para a fase vapor, em uma câmara de vácuo, e na condensação desse material sobre a superfície do substrato, formando uma camada muito fina. Trata-se de forma estrita de um processo físico. Os materiais de revestimento podem ser metais e suas ligas, cerâmicas e outros compostos inorgânicos e determinados polímeros. Os possíveis materiais a serem revestidos (substratos) são metais, cerâmicas, vidros e plásticos. É um processo de deposição de material versátil, aplicável a uma combinação quase ilimitada de materiais de revestimento e de substrato.

A tecnologia PVD é muito utilizada no revestimento (ou recobrimento) de ferramentas de corte e moldes para injeção de plásticos com nitreto de titânio (TiN), objetivando aumentar a resistência ao desgaste desses produtos. Outros exemplos de aplicação de PVD são a produção de revestimentos antirreflexos de fluoreto de magnésio ( $MgF_2$ ) em lentes ópticas, manufatura de equipamentos eletrônicos e outros.

O *bombardeamento* (*sputtering*), uma das variações do processo PVD, utiliza a descarga de plasma de íons de argônio que bombardeia o material de revestimento catódico (alvo), expulsando-o em parte na forma de vapor; depois, essa parte é depositada na superfície do substrato, onde se condensa e forma um revestimento. No caso da deposição de carbetos e nitretos, o bombardeamento pode ser realizado em um gás reativo, conforme mostrado na Figura 5.13. Outra variação é *PVD com aquecimento resistivo*, em que o material de revestimento é aquecido a uma elevada pressão de vapor por meio de aquecimento elétrico resistivo em baixo vácuo, sendo indicado para metais que apresentem baixa temperatura de fusão.



**Figura 5.13** – Processo PVD: *Sputtering*.

Fonte: [https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Physical\\_Vapor\\_Deposition\\_\(PVD\).jpg](https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Physical_Vapor_Deposition_(PVD).jpg)

A *deposição química de vapor* (CVD, do inglês *Chemical Vapor Deposition*) consiste na colocação do componente a ser revestido (substrato) em uma câmara de reação, onde é aquecido a uma temperatura elevada. Essa tecnologia de deposição de vapor por processo químico envolve a interação entre a mistura de gases e a superfície do substrato aquecido, causando a decomposição química de alguns constituintes dos gases e a formação de um filme sólido no substrato.

O processo CVD inclui uma ampla faixa de pressão e temperatura, o que possibilita uma grande variedade de revestimentos e materiais do substrato. Os materiais de revestimento compreendem: metais, como alumínio, cobre, cobalto, irídio, tungstênio e titânio; carbetos, como carbetos de silício, carbetos de titânio, carbetos de cromo e carbetos de zircônio; nitretos, como nitreto de silício, nitreto de titânio e nitreto de zircônio; óxidos, como alumina e óxido de zircônio; fibras de carbono; nanotubos de carbono; e diamante. Os materiais do substrato compreendem a maioria dos metais, polímeros termofixos, cerâmicas e vidros.

A tecnologia CVD é importante para aplicações que necessitem de resistência ao desgaste, à corrosão, à erosão e ao choque térmico. Ela é utilizada no revestimento de ferramentas de metal duro, metal refratário depositado em palhetas de turbinas de motores a jato e outros.

A *CVD térmica* é um processo CVD realizado normalmente entre 800 °C e 2000 °C, em diferentes pressões, como a atmosférica, a baixa pressão (com vácuo parcial) e o vácuo ultra-alto. A *CVD auxiliada por plasma* é uma variação do processo CVD, que utiliza um plasma em vácuo para ionizar e dissociar o gás envolvido na reação, o que melhora a reação química e fornece calor. Outra variação é a *CVD auxiliada por laser*, em que um feixe de laser focalizado gera fonte de calor localizada sobre o componente a ser revestido.

## REFERÊNCIAS

AMS 4640. **Aerospace material specification – aluminum bronze, bars, rods, shapes, tubes, and forgings 81,5cu – 10,0al – 4,8ni – 3,0fe – draw and stress relieved (hr50) or temper annealed (TQ50)**. SAE Internacional Group, 2011.

ASM HANDBOOK. **Properties and selection: nonferrous alloys and special-purpose materials** (v.2). Ohio: ASM International, 1992.

ASTM-B138. **Standard specification for manganese bronze rod, bar, and shapes**. West Conshohocken, PA, USA: American Society for Testing and Materials, 2017.

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**. 5. ed. Rio de Janeiro: LTC, 2020.

EN 12164; Copper and Copper Alloys. **Rod for free machining purposes**. Berlin: Institut für Normung, 2016.

EN 12165; Copper and Copper Alloys. **Wrought and unwrought forging stock**. Berlin: Deutsches Institut für Normung, 2016.

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.

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

JIANG, J., BRITTON, T. B., WILKINSON, A. J. **Evolution of dislocation density distributions in copper during tensile deformation**. *Acta Materialia*, v. 61, n. 19, p. 7227-7239, 2013.

JOSEPH, R.D. **Copper and Copper Alloys**. Park Ohio: Cleveland, OH, USA, 2001; pp. 3–52. [Google Scholar]

LOBO, F. G.; HUANG, H. P.; SANTOS, V. T. D.; SILVA, M. R. D.; SANTOS, G. A. D.; COUTO, A. A. Microstructure and mechanical properties of manganese bronze submitted to cold work and subsequent heat treatment. **Applied sciences**, v. 12, n. 14, p. 6974–6974, 2022.

MEIGH, H. J. **Cast and wrought aluminum bronzes properties-processes and structure**. 2. ed. London: IomCommunications Ltd, 2000.

NASCIMENTO, M.S.; SANTOS, G.A.; TERAM, R.; SANTOS, V.T.; SILVA, M.R.; COUTO, A.A. Effects of thermal variables of solidification on the microstructure, hardness, and microhardness of Cu-Al-Ni-Fe alloys. **Materials**, v. 12, p. 1267, 2019.

NORTON, R.L. **Projeto de máquinas: uma abordagem integrada**. 4. ed. Porto Alegre: Bookman, 2013.

NOVIKOV, I. **Teoria dos tratamentos térmicos dos metais**. Rio de Janeiro: Editora UFRJ, 1994.

PADILHA, A. F. **Materiais de Engenharia**. São Paulo: Hemus Editora, 1997.

PADILHA, A.; SICILIANO, F. **Encruamento, recristalização, crescimento de grão**. 3. ed. [S.l.]: ABM, 2005.

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.

SANTOS, V. T. D.; SILVA, M. R. D.; HUANG, H. P.; LOBO, F. G.; SANTOS, G. A. D.; SILVA JUNIOR, W. C. D.; COUTO, A. A. Influência da variação de temperatura nos aspectos microestruturais e propriedades mecânicas no bronze de alumínio-níquel UNS C63000 submetido ao processo de têmpera. **Tecnologia em Metalurgia, Materiais e Mineração**, v. 19, p. e2507, 2022.

SANTOS, V. T.; SILVA, M. R.; RUBIO, F.; TAMASHIRO, N. Y.; GOMES, S. C. P. **Influência do trabalho a frio na resistividade elétrica do cobre eletrolítico uns C11000**. In: CBECIMAT. Anais do XXIII Congresso Brasileiro de Engenharia e Ciências dos Materiais. Foz do Iguaçu, Paraná, 2018.

SMITH, W. F.; HASHEMI, J. **Fundamentos de Engenharia e Ciências dos Materiais**. 5. ed. [S.l.]: AMGH, 2012. Wikimedia Commons. Disponível em: [https://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/c/c7/Copper\\_electroplating\\_principle\\_%28multilingual%29.svg](https://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/c/c7/Copper_electroplating_principle_%28multilingual%29.svg). Acesso em 25 ago 2023. Wikimedia Commons. Disponível em: [https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Physical\\_Vapor\\_Deposition\\_\(PVD\).jpg](https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Physical_Vapor_Deposition_(PVD).jpg). Acesso em: 25 ago 2023.