

CAPÍTULO 3

Processos de fabricação aplicados ao cobre e suas ligas: parte 1

3.1 GENERALIDADES

A tecnologia de manufatura fundamenta-se nos processos imprescindíveis de fabricação de bens e geração de serviços, contribuindo para o desenvolvimento e a qualidade de vida da sociedade contemporânea. Conectores elétricos, trocadores de calor, baterias, ferramentas, recipientes, automóveis e aeronaves são alguns produtos presentes no cotidiano das pessoas que necessitam de processos de fabricação para serem produzidos.

Os processos de fabricação são também conhecidos como processos de manufatura. A palavra *manufatura* é de origem latina, da combinação de *manus* (mão) e *factus* (fazer), ou seja, “feito à mão”. Porém, a maioria dos processos de fabricação modernos é realizada por automação, cujo controle é computadorizado. Tecnicamente, a manufatura consiste na aplicação de processos para modificar a geometria e as propriedades, além de montar conjuntos e/ou o aspecto de um material, com o intuito de obter os produtos.

Os processos de fabricação consistem na combinação de etapas, seres humanos e máquinas. Normalmente, a fabricação é quase sempre referenciada como uma sequência de operações, em que cada operação trabalha o material de forma a ficar mais próximo da condição de produto final.

3.1.1 HISTÓRICO

Em termos históricos, a fabricação pode ser dividida em duas partes: (1) a descoberta e a invenção de materiais e processos de fabricação; e (2) o desenvolvimento dos sistemas de produção (ou de manufatura), que são os meios de organização de pessoas e máquinas para produzir de forma mais eficiente. Os processos de fabricação são anteriores aos sistemas de produção em muitos milênios. Na sequência, é apresentada uma linha do tempo pertinente aos processos de fabricação, com períodos aproximados:

- **8.000 a 3.000 a.C.:** período neolítico que trouxe o desenvolvimento de processos como carpintaria, moagem e polimento de pedras, moldagem manual e queima de argila, fiação de fibras, tecelagem e tingimento de tecidos e forjamento de metais como o cobre.
- **3.500 a 1.500 a.C.:** Idade do Bronze, em que se descobriu que a adição de estanho ao cobre produzia um metal mais resistente do que o cobre puro e melhorou as características de processos de fundição, como escoabilidade do material.
- **1.500 a.C. a 100 d.C.:** Idade do Ferro, quando o processo de fundição do ferro tem lugar na China, em 600 a.C.
- **1.770 a 1.850:** Primeira Revolução Industrial, quando apareceram os primórdios da tecnologia das máquinas-ferramenta. As máquinas-ferramenta foram desenvolvidas para a maior parte dos processos convencionais de usinagem, como torneamento, furação e fresamento. Muitos dos processos individuais são anteriores às máquinas-ferramenta; por exemplo, a furação e o serramento de madeira datam da Antiguidade, e o torneamento de madeira de aproximadamente a época de Cristo. Edwin Chaffee desenvolveu, por volta de 1835, um moinho de dois cilindros com aquecimento a vapor para misturar aditivos com borracha.
- **1.800:** desenvolvimento do torno para usinagem de roscas por Maudsley.
- **1.900:** início do desenvolvimento dos processos de soldagem por fusão, como técnicas de montagem de conjuntos. Porém, deve-se destacar que, há cerca de 2 mil anos, foram inventadas a soldagem por forjamento (tipo de soldagem no estado sólido) e a união adesiva.
- **1.940:** início da tecnologia de controle numérico (CN), ou comando numérico, creditado a John Parsons e Frank Stulen, da Parsons Corporation, em Michigan, concebendo um meio de utilizar dados de coordenadas numéricas para mover a mesa de trabalho de uma fresadora para produzir peças complexas para aeronaves.

Em tempos atuais, nota-se, de forma considerável, o uso da tecnologia de controle (ou comando) numérico computadorizado (CNC) em máquinas que realizam muitos processos de manufatura subtrativa (usinagem). Porém, a aplicação dessa tecnologia se estende a equipamentos em outros processos, como soldagem por fusão (a arco ou por resistência elétrica, por exemplo), cortes de chapas e dobramento de tubos.

Neste capítulo, são abordados os principais processos de fabricação utilizados na confecção de produtos metálicos baseados no cobre e suas ligas.

3.2 PROCESSOS DE FABRICAÇÃO DE COBRE E SUAS LIGAS

Os processos de fabricação utilizados na confecção de produtos de cobre e suas ligas destacados neste capítulo baseiam-se na solidificação (fundição), na conformação plástica ou mecânica, no processamento de particulados (metalurgia do pó), na remoção (usinagem ou manufatura subtrativa) e na união (soldagem) de materiais.

Na Figura 3.1 são mostradas as possíveis tecnologias de manufatura utilizadas no cobre e suas ligas, que subdividem esses materiais de engenharia como fundidos, deformados (ou trabalhados de forma mecânica) e tratados termicamente. Os tratamentos térmicos serão abordados no Capítulo 5, que trata de tecnologia de tratamentos.

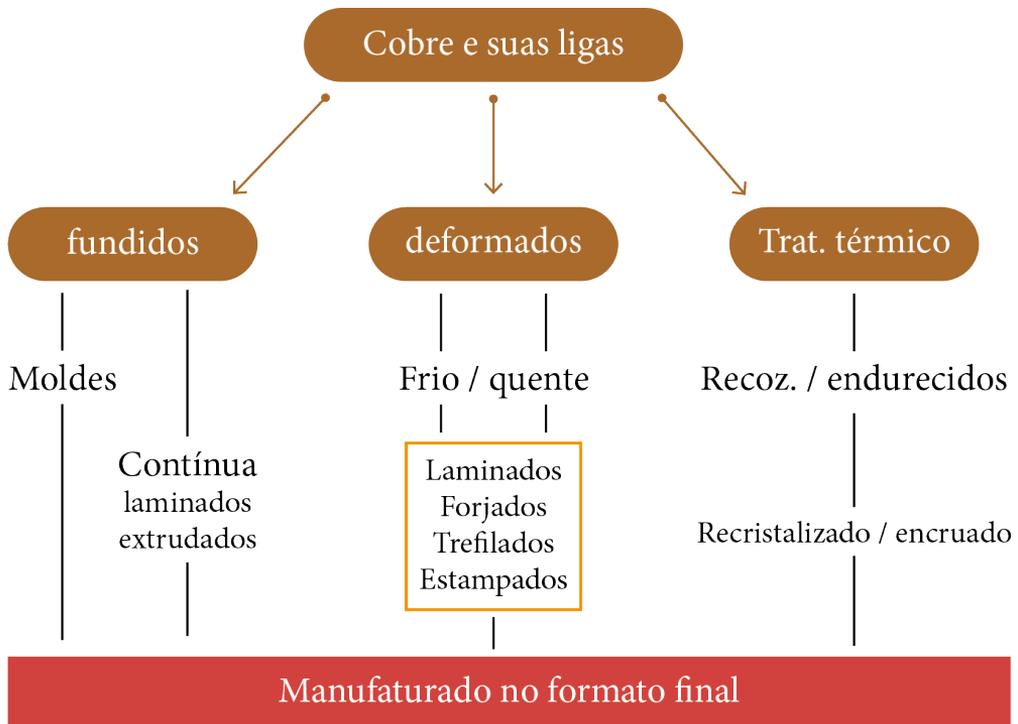


Figura 3.1 – Tecnologias de processamento do cobre e suas ligas.

3.2.1 FUNDIÇÃO

A *fundição* é um processo no qual o material metálico no estado líquido é vazado ou injetado dentro de um molde, adquirindo a forma da cavidade dessa ferramenta por meio de solidificação, a qual se baseia na retirada de calor. O escoamento do material pode ocorrer por força de gravidade ou outra força (sob pressão, por exemplo). A peça (ou componente) obtida por esse processo é conhecida como *fundido*.

Há fatores e variáveis que devem ser levados em consideração para otimizar o processo de fundição, como a temperatura de vazamento, o tempo de solidificação, o tipo de molde utilizado, a contração do metal e a escoabilidade.

A fundição inclui a fundição de lingotes (lingotamento) e a fundição de peças (ou componentes). Na indústria primária da área de metalomecânica, adota-se o termo *lingote*, que se trata de um fundido de forma simples (*billets* ou *cakes*, por exemplo) e em geral grande, que passa posteriormente por processos como a extrusão ou a laminação para conformação plástica. A *fundição de peças* (ou *componentes*) consiste na obtenção de formas mais complexas que são muito mais próximas da geometria final do respectivo produto, não envolvendo, portanto, conformação por deformação plástica. São exemplos de peças fabricadas por meio da fundição os conectores elétricos de liga de cobre.

A fundição em areia, a sob pressão e a de precisão são alguns dos principais processos de fundição, destacados na Figura 3.2. Além destes, outros processos de fundição são comentados neste capítulo.

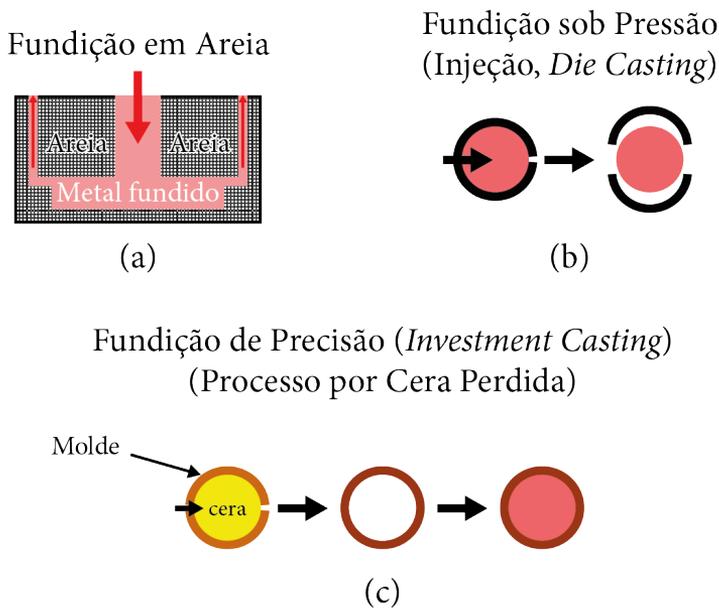


Figura 3.2 – Processos de fundição: (a) fundição em areia, (b) fundição sob pressão e (c) fundição de precisão.

A *fundição em areia* é o processo de fundição mais utilizado, em que areia de fixação úmida é comprimida em volta de um modelo na caixa de moldagem. Esse modelo posteriormente é retirado pela separação do molde em duas partes, gerando a cavidade no molde. Nesse processo, representado na Figura 3.2a, o metal fundido é vazado no molde, onde ocorre a solidificação do metal, e, depois, o molde em areia é quebrado para que a peça seja removida.

O molde em areia, que é descartável, também contém o sistema de canais para alimentação e de massalotes, ou seja, um reservatório de metal que serve como uma fonte de metal líquido para o fundido compensar a contração durante a solidificação. A versatilidade da fundição em areia permite fundir peças (ou componentes) pequenas a muito grandes, cuja quantidade produzida pode ser de uma até altas taxas de produção. Esse processo pode ser empregado na maioria dos metais, o que inclui o cobre e suas ligas.

Um macho deve ser também incluído no molde, caso a peça fundida precise ter superfícies internas (por exemplo, peças com furos ou ocas), conforme mostrado na Figura 3.3a. Além do macho, são mostrados em (b) o processo de vazamento e a turbulência do metal líquido e em (c) o fundido ainda contido na cavidade do molde permanente.

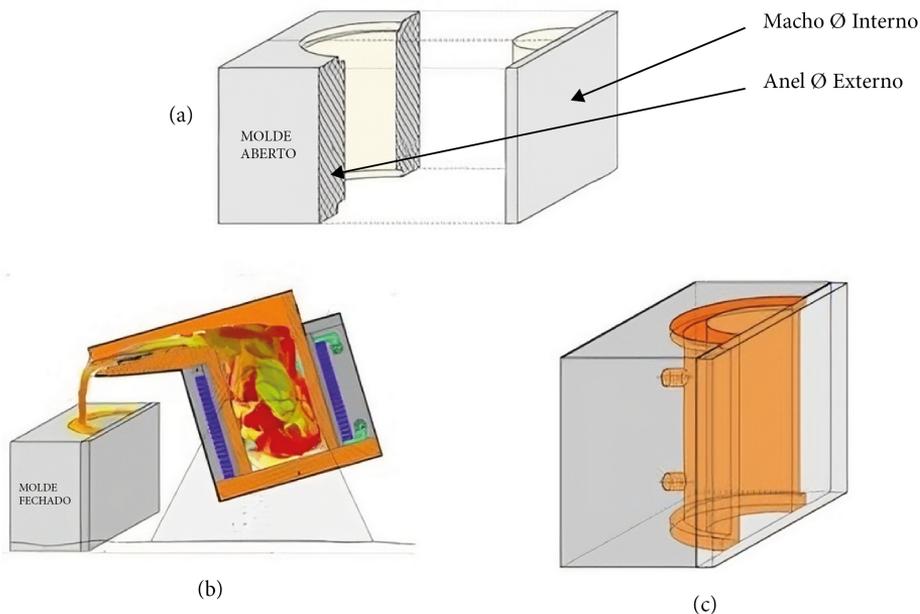


Figura 3.3 – Fundição por ação da gravidade em molde permanente: (a) macho e anel, (b) fundição por vazamento e (c) fundido ainda no molde.

A *fundição sob pressão* (ou *die casting*), representada na Figura 3.2b, é um processo de fundição realizado em molde permanente, no qual o metal fundido é injetado na cavidade do molde sob alta pressão, superior a 100 bar. Os moldes nessa operação são feitos de aço-ferramenta e são chamados de matrizes (*die*, em inglês, de onde vem o nome). O uso de pressão elevada para forçar o metal a entrar na cavidade do molde por meio de máquinas especiais (injetoras) é o aspecto mais notável desse processo; as injetoras são projetadas para fechar, de forma precisa, as duas metades do molde, mantendo-as assim enquanto o metal líquido é forçado

na cavidade. Há dois tipos principais de máquinas de fundição sob pressão, diferenciadas pela forma com que o metal fundido é injetado na cavidade: (1) câmara quente e (2) câmara fria.

Na fundição sob pressão de *câmara quente*, o metal é fundido em um contêiner anexo à máquina, e um pistão é usado para injetar o metal líquido, sob alta pressão, na matriz. A fundição sob pressão em câmara quente impõe especial desgaste no sistema de injeção, porque parte desse sistema é mantida imersa no metal fundido. Em função disso, sua aplicação limita-se a metais de baixo ponto de fusão, como zinco e estanho, que não ataquem quimicamente o pistão e outros componentes mecânicos.

No caso de metais de elevado ponto de fusão, como ligas de cobre, utiliza-se a fundição sob pressão de *câmara fria*. Nesse caso, o metal é fundido em forno independente da máquina de injeção, cujo cilindro é preenchido por uma panela de fundição a cada ciclo.

Curiosidade

A fundição com metal semissólido compreende processos em que a liga metálica está no estado pastoso durante a fundição, como uma lama, sendo uma mistura de sólido e líquido. A *reofundição* é uma variante da fundição sob pressão, com a injeção do material metálico no estado semissólido, especificamente uma lama semissólida com estrutura globular (esferoidizada), permitindo um ótimo preenchimento da cavidade do molde sem turbulência. No início da reofundição, o material está em uma temperatura entre a *solidus* e a *liquidus* (*mushy zone*), em vez de acima da *liquidus*; e a formação de estruturas como dendritas é evitada pela agitação da mistura pastosa.

Em geral, a fundição molda metal líquido por processo de solidificação em moldes, e os processos de conformação mecânica transformam metal sólido por deformação plástica em matrizes. A *reofundição* associa fundição e conformação plástica, permitindo propriedades mecânicas intermediárias entre a fundição e a conformação mecânica. A ausência de turbulência minimiza o aprisionamento de gases durante o processo, o que, de forma geral, é benéfico em termos de propriedades mecânicas, como resistência mecânica e tenacidade do produto resultante, por meio da redução de porosidades. Outras vantagens incluem a produção de peças com geometrias complexas, peças com paredes finas e tolerâncias mais estreitas.

A *fundição de precisão*, também denominada *fundição por cera perdida* ou *micro-fusão*, está representada na Figura 3.2c e consiste na utilização de um modelo de cera que é derretido e escorre, deixando uma cavidade no molde de material cerâmico. O metal fundido é vazado no molde, que é posteriormente destruído para a remoção do produto. Esse processo pode ser utilizado na fundição de qualquer material metálico e permite a reprodução de detalhes precisos. É possível a utilização de resina termoplástica em vez de cera e podem ser aplicados machos cerâmicos e solúveis em água.

O *lingotamento contínuo* consiste em fundir e conformar o produto numa única operação, sem períodos intermediários de esfriamento em moldes. A sequência desse processo compreende a fusão em forno adequado e a transferência do metal líquido (fundido) para o forno de trabalho contínuo por meio de uma calha de transferência, para que ocorra a passagem por uma matriz de fundição, que define a seção transversal do perfil. Depois, ocorre o corte do metal fundido continuamente em seções pré-definidas, de acordo com a necessidade de cada parque fabril. A grande vantagem desse processo é a ausência da necessidade de intermitências. Na Figura 3.4 é ilustrado o processo de lingotamento contínuo horizontal, que pode ser aplicado na fabricação da maioria das ligas de cobre comercialmente utilizadas.

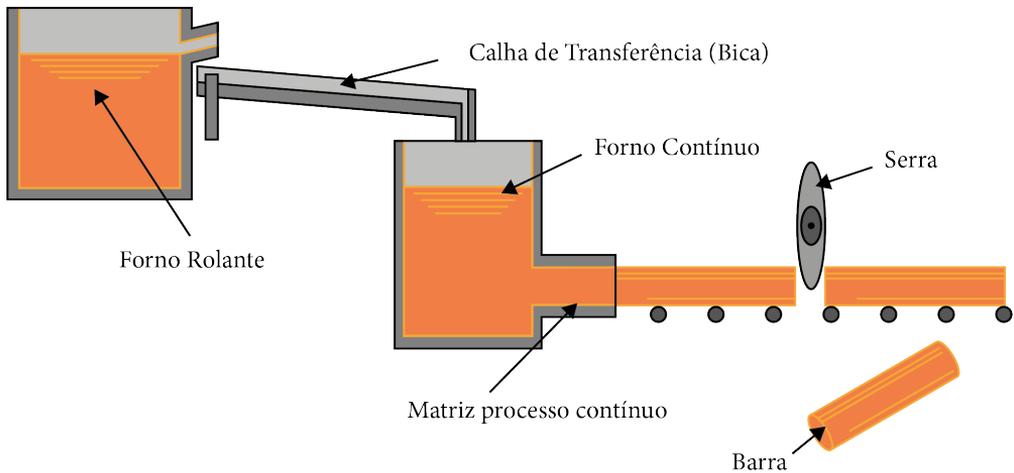


Figura 3.4 – Processo de lingotamento contínuo.

O lingotamento contínuo vertical é muito difundido, pois, além de estar presente no lingotamento de cobre e suas ligas, também é utilizado em usinas integradas de produção de aço. No caso específico do cobre, o metal líquido flui sob ação da gravidade através de um molde de grafite, passando pelo processo de solidificação vertical descendente (de cima para baixo) e consequente cristalização, obtendo a forma definida, conforme mostrado na Figura 3.5. O suporte de rolos contém o produto e ajusta a velocidade de fundição. Após o processo de corte por serra, o lingote já com o comprimento definido passa para o processamento seguinte.

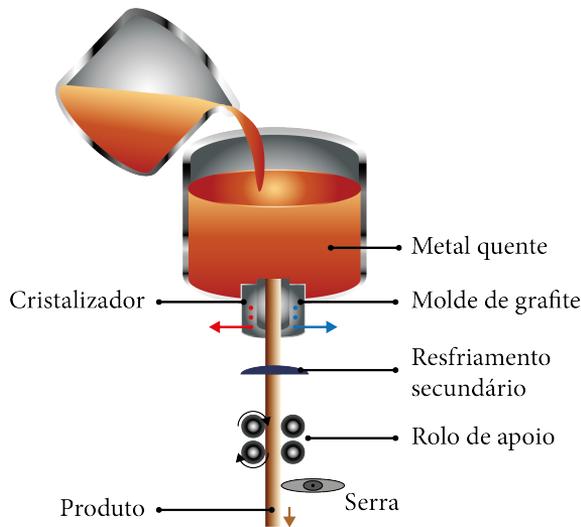


Figura 3.5 – Processo de lingotamento contínuo vertical.

Fonte: <https://kmmbronze.com/technologies-of-continuous-casting-horizontal-vertical-downward-vertical-upward/>

As vantagens do lingotamento contínuo vertical incluem a simetria do resfriamento, que possibilita um padrão previsível e uniforme de cristalização e carregamento axial na casca de metal recém-solidificada à medida que o material sai do molde. No lingotamento de tubos ou perfis ocos, o lingotamento contínuo vertical elimina a “lança de fim de corrida”, propiciando um produto em conformidade até o final do molde, o que é uma grande vantagem em termos de economia.

As desvantagens do lingotamento contínuo vertical estão relacionadas principalmente à logística: dificuldade na manipulação de lingotes com seções de grandes comprimentos, dificuldade no controle do corte e aspectos de segurança mais rigorosos.

Uma variante tecnológica muito importante desse lingotamento é o processo de *lingotamento contínuo up cast* (Figura 3.6), que se baseia na utilização da solidificação vertical ascendente (de baixo para cima) para a fabricação de produtos de pequenos diâmetros, como fios. Ele consiste no uso de uma matriz de fundição (molde) de grafite parcialmente imersa em metal fundido. A parte superior da matriz é cercada por uma camisa refrigerada à água, e apenas a matriz de grafite fica imersa no metal líquido, com posicionamento mantido por um controle de nível, de forma precisa. A ação de retirada vertical pulsada da haste (ou fio) eleva o material metálico além da extremidade inferior do resfriador, propiciando a solidificação. O equipamento de lingotamento contínuo *up cast* opera em um sistema de múltiplas matrizes, produzindo fios de 12 mm de diâmetro com velocidade da ordem de 3 mm/min. Esse tipo de lingotamento apresenta todas as vantagens do lingotamento contínuo vertical e mitiga suas desvantagens por resultar em produtos de pequenos diâmetros com a aplicação do processo *up cast*.

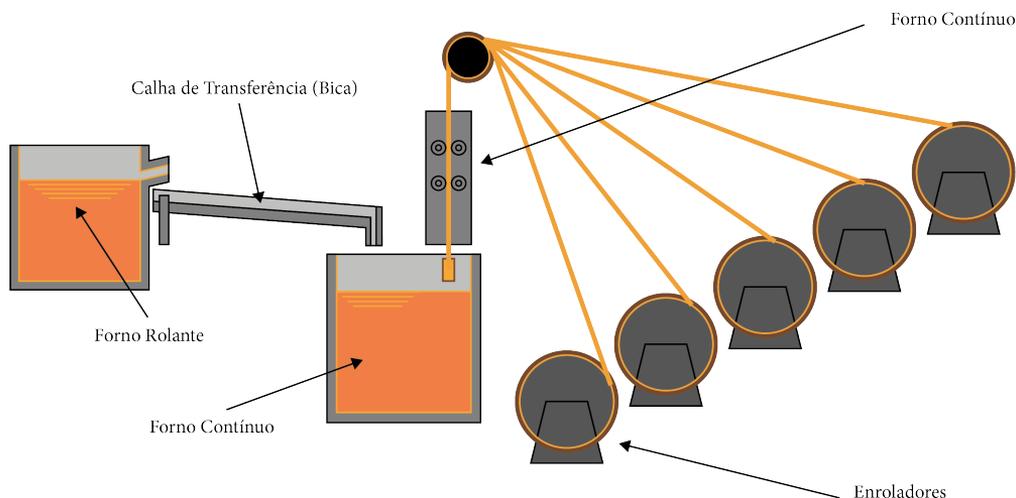


Figura 3.6 – Processo de lingotamento contínuo *up cast*.

A estrutura bruta de fusão de grãos define muitas propriedades requeridas em serviço e processamento e o refino dessa estrutura pode ser realizado a partir da inoculação do banho metálico antes do início da solidificação, aumentando o número de núcleos sólidos formados. A inoculação consiste no tratamento do metal líquido mediante a adição de elementos inoculantes que, de alguma forma, resultam no aumento do número de núcleos sólidos formados no interior do líquido, o que, por sua vez, sucede em maior número de grãos e, conseqüentemente, em um processo de refino de grão. Dessa forma, a estrutura bruta de fusão é modificada para uma de morfologia equiaxial relativamente fina, permitindo uma maior reprodutibilidade nos processos de fabricação e conferindo melhores propriedades mecânicas ao produto, como resistência mecânica e tenacidade.

De forma geral, observa-se o uso de zircônio como elemento inoculante em ligas de cobre, como os latões, e o ferro como elemento inoculante em ligas especiais de cobre, como bronze-alumínio-níquel. Entretanto, no caso do cobre e de suas ligas, os estudos são escassos e muitas vezes inconclusivos. Na maioria deles, utilizam-se ligas contendo os elementos principais das ligas de cobre comerciais, como o estanho e o zinco, além de diversos outros que aparecem em menores teores. Alguns desses estudos são apresentados e discutidos a seguir.

Wallace e Kissling (1963) adicionaram ferro (Fe) em pequenos teores na faixa de 0,05% a 0,07%, em massa, ao cobre comercialmente puro e observaram um efeito moderado de refino de grão. Os autores relacionaram o efeito observado com a formação de precipitados por reações peritéticas.

Gould *et al.* (1960) também observaram um efeito de refino moderado após a adição de 0,02% de ferro (Fe), em massa, na forma de partículas ao cobre comercialmente puro líquido mantido em baixos superaquecimentos (< 50 °C). Com a elevação do

superaquecimento, o refino foi inexistente. Os autores concluíram que a nucleação ocorreu sobre as partículas de Fe antes de elas se dissolverem completamente no cobre líquido. O aumento do superaquecimento pode ter acelerado a dissolução, resultando no desaparecimento completo dessas partículas antes da solidificação e impedindo o efeito refinador. Contudo, embora essas hipóteses tenham sido propostas para explicar os resultados, elas não foram investigadas.

Patchett e Abbaschian (1985) estudaram o efeito da adição de ferro (Fe) na faixa entre 0,57% e 7,5% (em massa) ao cobre de alta pureza. Nos experimentos, o líquido solidificou na forma de gotas levitando em uma atmosfera controlada e livre de oxigênio. O tamanho de grão decresceu de 300 μm a cerca de 60 μm para adições de até aproximadamente 2,8% Fe. Para teores de Fe acima desse valor, observou-se uma queda abrupta no tamanho de grão, que pode estar relacionada à precipitação de partículas de Fe- α no interior do banho líquido e com a reação peritética $\text{Cu (L)} + \text{Fe}_\alpha \rightarrow \text{Cu}_\alpha$. Entretanto, os autores não formularam mecanismos para explicar a diminuição do tamanho de grão.

Cibula (1954) adicionou zircônio (Zr) a ligas Cu-10%Sn na presença de uma fonte de carbono. O autor mostrou uma diminuição acentuada no tamanho de grão de 2 mm até aproximadamente 200 μm para teores de Zr da ordem de 0,01%, em massa. Sugeriu-se que a nucleação ocorreu sobre partículas de ZrC formadas no interior do líquido a partir das adições consideradas. No entanto, quando boro (B) também foi adicionado, houve refino de grão, mas com menor efeito. Desta forma, o autor concluiu que se formou ZrB₂ preferencialmente a ZrC, e que o ZrB₂ não é um substrato tão efetivo para nucleação heterogênea da fase Cu- α . Apesar das hipóteses sobre as partículas inoculantes, não houve uma investigação mais profunda.

Martorano e Capocchi (2000) mostraram um efeito semelhante ao observado por Cibula, ou seja, uma alteração brusca de uma estrutura colunar para uma estrutura completamente equiaxial de grãos refinados, após a adição de 0,08% Zr, em massa, a um banho de Cu-8%Sn. O mecanismo causador do refino de grão não foi investigado.

A *fundição em casca (shell molding)* é um processo de fundição no qual o molde é uma casca fina confeccionado a partir da mistura de areia com resina aglomerante. Nessa mistura também são colocados aditivos para produzir o coquilhamento e prevenir problemas como trincas térmicas e defeitos oriundos de gases no molde. Esse processo permite a confecção de peças simples ou complexas e vantagens como maior capacidade de produção do que a fundição em areia e a estocagem dos moldes.

Na *modalagem a vácuo*, utiliza-se um molde em areia cuja ligação é mantida por aplicação de vácuo, em vez de aglomerante químico. Assim, o termo *vácuo* nesse processo se refere à fabricação do molde e não propriamente à operação de fundição. Não confundir, portanto, com *fundição em molde permanente sob vácuo*, processo no qual o vácuo é utilizado no direcionamento do metal fundido para a cavidade do molde.

A *fundição centrífuga* compreende diversos métodos de fundição, nos quais o molde é girado a velocidades elevadas, de tal forma que a força centrífuga distribui o metal líquido para as regiões periféricas da cavidade do molde. O molde pode ser

descartável (areia verde ou seca) ou permanente (aço ou cobre). Uma particularidade desse processo é a heterogeneidade microestrutural que pode ser obtida, o que requer controle para que a peça apresente variação funcional de propriedades.

Defeitos comuns a todos os processos de fundição, como falha de preenchimento, gotas frias, cavidade de contração, microporosidades, bolhas e trincas a quente, podem ser evitados com o devido cuidado com o projeto e as condições operacionais utilizadas. Em relação a considerações sobre produtos fundidos, recomenda-se a simplicidade geométrica para melhorar a fundibilidade do material e evitar cantos vivos (concentradores de tensões), a uniformidade da espessura das seções para evitar cavidades de contração e as seções da peça dentro do molde para ter ângulo de saída ou conicidade para facilitar a remoção da peça ou do modelo do molde.

De forma geral, a fundição de metais compreende a aplicação de fundamentos da solidificação que influenciam na macro e microestrutura resultantes e nas suas respectivas propriedades. Na Figura 3.7, são mostrados valores de taxas de resfriamento (Tr) para três ligas de cobre em função da posição para um processo de solidificação unidirecional ascendente (de baixo para cima), com um molde metálico na base refrigerado à água. As ligas são alpaca 2 com chumbo, UNS C19400 e UNS C90200, em que se nota taxas de resfriamento maiores nas posições mais próximas do molde. A taxa de resfriamento é uma variável térmica de solidificação que influencia no nível de refinamento da microestrutura e nas propriedades mecânicas resultantes dos materiais metálicos.

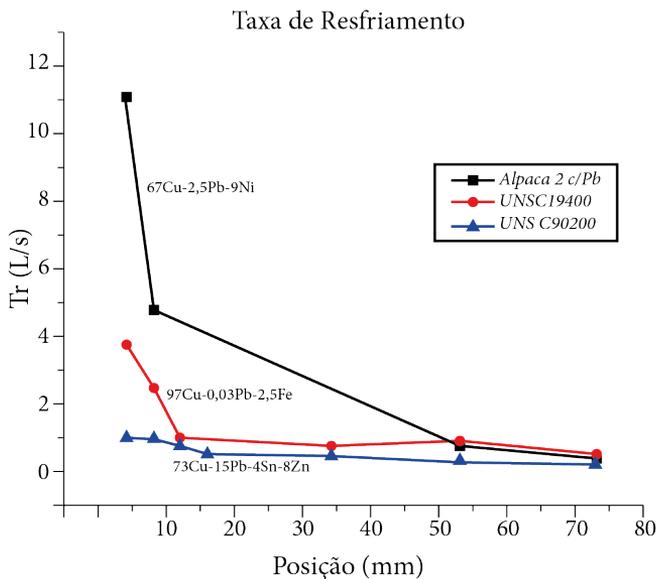


Figura 3.7 – Taxa de resfriamento em função da posição para ligas de cobre.

Em termos práticos, dependendo das condições impostas pelo sistema metal-molde, é possível preestabelecer valores desejados de propriedades para o cobre e suas ligas. Por exemplo, considerando a fabricação de um mesmo produto (forma e material), um molde de grafite (maciço) propicia maiores taxas de resfriamento e uma estrutura mais refinada do que um molde de areia, o que gera maior resistência mecânica, por exemplo.

3.2.2 PROCESSOS DE CONFORMAÇÃO MECÂNICA

A *conformação mecânica* de materiais metálicos baseia-se no emprego de processos nos quais a mudança de forma é obtida por meio de aplicação de tensões que geram deformação plástica no material e, por isso, também são denominados de *processos de conformação plástica*. Esses processos podem ser divididos em duas categorias principais: conformação volumétrica e conformação de chapas metálicas.

Além da deformação plástica, resultado da aplicação de tensões sobre o material metálico por meio de uma ferramenta (normalmente uma matriz), a temperatura de trabalho é outro fator muito importante na conformação plástica. De forma geral, os processos de conformação que envolvem maiores deformações, tratando-se de operações de desbaste, são realizados em condições de trabalho a quente, e as operações de acabamento são executadas em condições de trabalho a frio.

Tendo em vista as diversas modalidades de processos de fabricação que contam com o auxílio da temperatura para a conformação mecânica, dentro dos segmentos de transformações metalomecânicas e siderúrgicas, destacam-se principalmente os processos de extrusão a quente (*hot extrusion*), nos quais elevadas cargas mecânicas são aplicadas nos metais a fim de obter maiores níveis de deformação – uma vez que processos caracterizados como a frio (*cold working*) não são capazes de obter tais reduções, haja visto que são realizados em temperaturas ambientes (DIETER, 1988; VERLINDEN *et al.*, 2007).

É comum encontrar descrições técnicas que fazem distinções das deformações ocorridas a frio em comparação àquelas que ocorrem a quente, geralmente em temperaturas homólogas entre 0,6 e 0,8 T_f (temperatura de fusão), pois se considera que o trabalho a quente é feito acima da temperatura de recristalização e que o material recristaliza à medida que é deformado (SELLARS e TEGART, 1972; HOSFORD, 2009).

Na Figura 3.8, as alterações microestruturais são mostradas para ilustrar a recristalização dinâmica com uma alta taxa de deformação, pois (a) apresenta um pico único e (b), o processo de recuperação dinâmica, sendo ilustrada esquematicamente por meio da curva tensão-deformação.

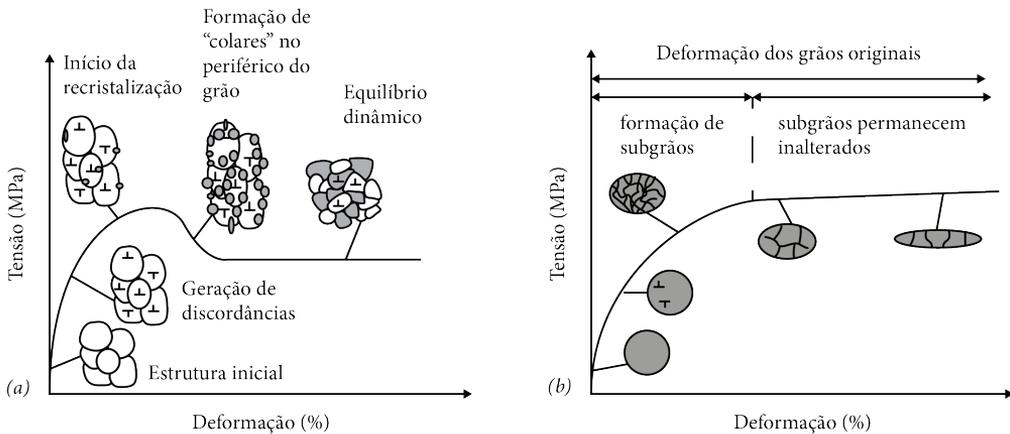


Figura 3.8 – Evolução da microestrutura durante a deformação a quente: (a) comportamento microestrutural da recristalização dinâmica e (b) comportamento microestrutural da recuperação dinâmica.

O trabalho a quente realizado em temperaturas elevadas pode apresentar como desvantagens a necessidade de fornos para o aquecimento e maiores cuidados com segurança, a dificuldade de controle dimensional e a possível formação de carepas (superfície formada por óxidos) no cobre e suas ligas. Por exemplo, para a remoção dos óxidos da superfície de uma chapa de cobre extrudada a quente, é necessária a utilização de processo de fresamento. Na Tabela 3.1, são mostradas faixas de temperaturas de realização de trabalho a quente para algumas ligas de cobre.

Tabela 3.1 – Ligas à base de cobre e faixas de temperaturas de trabalho a quente

Liga de cobre	Faixa de temperatura para trabalho a quente (°C)
CuAl5	900 – 1000
Cu-DHP	750 – 950
Cu-ETP *	750 – 950
CuZn10	750 – 900
CuZn33	750 – 800
CuZn40Pb	650 – 750
CuZn40P3	625 – 725
CuAl10Ni5Fe4	780 – 925

* Ocorrerá fragilização do Cu- ETP se for aquecido em atmosfera que contenha excesso de hidrogênio. Adaptado de ASM Handbook (1992).

Curiosidade

No caso do cobre e suas ligas, conforme Tabela 3.1, o trabalho a quente é realizado em altas temperaturas, porém há materiais como o estanho, o chumbo e o zinco que se recristalizam em temperatura ambiente, em torno de 25 °C. Isso significa que, para esses materiais, o trabalho a quente ocorre em baixas temperaturas. Podemos notar, por exemplo, que a presença dos elementos zinco (40%, em massa, aproximadamente) e chumbo (0,3% a 0,8%, em massa) na liga CuZn40Pb reduziu os valores apresentados na faixa de temperatura de trabalho a quente.

O *trabalho a frio* é realizado em temperatura inferior a de recristalização, geralmente em temperatura ambiente ou pouco acima dela, e a maioria dos produtos é manufurada a frio. A trefilação e a conformação de chapas de cobre e suas ligas são exemplos de aplicação desse tipo de trabalho. Acaba funcionando como um tratamento mecânico, em que o material encrua aumentando sua resistência mecânica e reduzindo a ductilidade.

O acabamento superficial promovido pelo trabalho a frio nas ligas de cobre é superior ao obtido no trabalho a quente, permitindo produção em série e, de forma geral, o custo é menor do que o trabalho a quente, pois não requer a utilização de fornos para obter a temperatura de trabalho do cobre e suas ligas, nem o desgaste excessivo de ferramentas de conformação. Porém, é imprescindível maior cuidado com a limpeza e o acabamento superficial do material antes do trabalho a frio para evitar a formação de trincas e fissuras.

Para aprimorar as propriedades do material durante o escoamento, as operações de conformação são realizadas algumas vezes acima da temperatura ambiente, mas abaixo da de recristalização, recebendo a denominação de *trabalho a morno*.

Os principais processos de conformação volumétrica são forjamento, laminação, extrusão e trefilação. Eles são caracterizados por grandes alterações de forma e significativa deformação plástica, porém considerando que não há alteração de volume.

O *forjamento*, representado nas Figuras 3.9a, e b, fundamenta-se na compressão do material entre duas matrizes opostas, de modo que a geometria das matrizes é fornecida ao material conformado. Ele é tradicionalmente um processo de conformação a quente, porém várias operações são realizadas a frio.

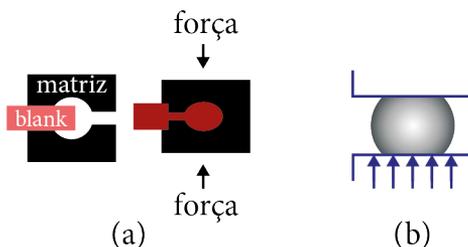


Figura 3.9 – Forjamento: (a) em matriz fechada e (b) em matriz aberta (ou livre).

O forjamento propicia a fabricação de produtos de alta resistência mecânica em função do fibramento gerado durante a conformação do material metálico. Por exemplo, é utilizado no latão de alto desempenho, que é aplicado na fabricação de anéis sincronizadores. Essa liga de cobre possui um composto denominado de siliceto de manganês de morfologia acicular, cuja dureza é obtida por meio de forjamento. Além disso, a indústria metalúrgica utiliza o forjamento para obter a forma elementar de grandes componentes que são usinados posteriormente para as formas e as dimensões finais.

Na Figura 3.9a, é mostrado o *forjamento em matriz fechada*, no qual o material é conformado entre duas metades de matriz sob alta pressão. A matriz possui impressões com o formato que se deseja transmitir à peça, permitindo formatos mais complexos. Na Figura 3.9b, é mostrado o *forjamento livre* ou *em matriz aberta*, no qual o material é conformado entre matrizes planas ou com formato simples, sem contato entre elas.

Os equipamentos comumente utilizados no forjamento incluem dois grupos: (1) *martelos de forja*, que conformam o material metálico por meio de rápidos golpes de impacto em sua superfície; e (2) *prensas*, que conformam o material metálico por meio de uma compressão contínua com velocidade relativamente baixa. Em comparação com as prensas, geralmente os martelos de forja são maiores, produzem formas simples e apresentam vida útil inferior.

Outras variações do processo de forjamento compreendem o *forjamento de precisão*, que utiliza matrizes de precisão, gerando a forma quase final da peça ou componente (sem a formação de rebarba, *flashless*); e o *forjamento rotativo ou radial*, que é empregado para reduzir o diâmetro de um tubo ou barra sólida.

A *laminação convencional*, representada na Figura 3.10a, é um processo de conformação por compressão direta, no qual a espessura do material é reduzida pela ação de dois cilindros (ou rolos) laminadores que giram em sentidos opostos, conformando e comprimindo o material metálico na região de abertura entre eles. Ocorre aumento do comprimento do material sem aumento acentuado da largura.

A ação dos cilindros laminadores sobre o material metálico gera elevadas tensões compressivas e as forças de atrito necessárias para puxá-lo durante a realização da conformação. Geralmente, nas operações de desbaste, utiliza-se o trabalho a quente e, no acabamento, o trabalho a frio. Entretanto, devido à ductilidade das ligas de cobre, é possível realizar operações de desbaste a frio.

A laminação pode ser empregada na produção de chapas e perfis a partir de barras, lingotes, placas e outros materiais de partida, fabricados de metais dúcteis como as ligas de cobre. Trata-se de um processo de conformação plástica que permite altas taxas de produção e um controle dimensional preciso do produto acabado, porém geralmente requer grande investimento de capital, pois seus equipamentos contêm componentes robustos, com as combinações de rolos laminadores que realizam o processo. No processo de laminação, é possível conformar tubos com costura por soldagem por fusão e sem costura utilizando um mandril.

As configurações dos laminadores permitem que sejam classificados em *laminadores duo*, como mostra a Figura 3.10a, que consiste em apenas dois cilindros opostos; *laminadores trio* (três cilindros); *quádruo* (quatro cilindros); e outras configurações com mais cilindros. Determinadas configurações podem ser reversíveis ou não e, normalmente, o número maior de cilindros está associado à maior precisão do processo. Por exemplo, no laminador quádruo, os cilindros que têm contato com o metal de trabalho são os cilindros de trabalho e os outros dois são os cilindros de apoio, como mostrado na Figura 3.10b.

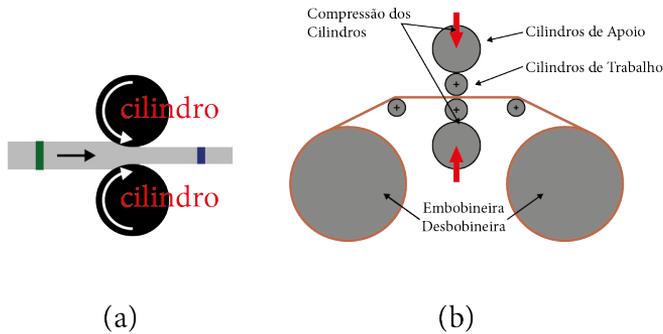


Figura 3.10 – (a) Laminador duo e (b) laminador quádruo.

A *extrusão*, representada nas Figuras 3.11a, e b, é um processo de compressão no qual o material é forçado a escoar pela abertura de uma matriz, modificando sua seção transversal a partir da geometria da matriz.

Os dois principais tipos desse processo de conformação plástica são extrusão direta e extrusão indireta. A *extrusão indireta* (*inversa* ou *reversa*) possui pistão vazado, o que possibilita o deslocamento no sentido oposto do material em relação ao pistão, como mostrado na Figura 3.11a. Isso reduz o atrito entre material e câmara, no entanto a rigidez do pistão é menor, uma vez que é vazado. A *extrusão direta* ou *extrusão avante*, ilustrada na Figura 3.11b, apresenta deslocamento do material e do êmbolo (ou pistão) no mesmo sentido, o que necessita de aumento de aplicação de força para realizar o processo, devido ao atrito entre o material e a superfície das paredes da câmara (ou contêiner).

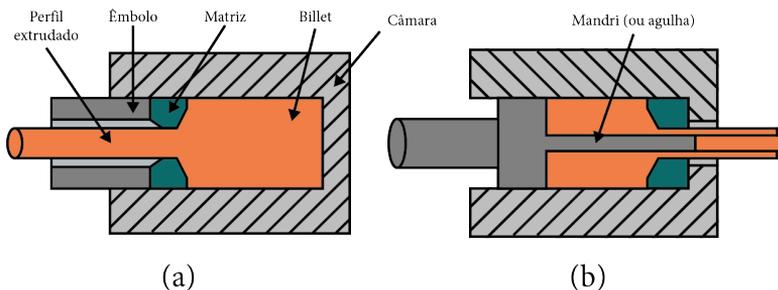


Figura 3.11 – Processos de extrusão: (a) indireta e (b) direta com mandril (ou agulha).

Em termos práticos, a extrusão direta é a mais empregada na indústria metalúrgica, tipicamente para trabalho a quente. Outras variantes de extrusão são a *extrusão hidrostática*, que consiste em conformar uma peça com o auxílio de pressão hidrostática proveniente da compressão de um fluido no estado líquido, o que aprimora o processo de aplicação de pressão e a capacidade de extrusão e onera a manutenção do processo; e *extrusão por impacto*, que se trata de extrusão a frio em alta velocidade.

A *trefilação*, representada na Figura 3.12a, consiste no processo de conformação a frio em que, de forma geral, o diâmetro de um arame ou uma barra redonda é reduzido ao ser tracionado pela abertura de uma matriz (ou fieira).

Nesse processo, fica evidente a presença de tensões de tração, mas a compressão também é importante, uma vez que há compressão indireta do material metálico, conforme passa pela abertura da matriz. De forma geral, trata-se de um processo realizado em trabalho a frio, que, portanto, pode ser realizado no cobre, pois apresenta elevadíssima ductilidade em temperatura ambiente.

O material metálico a ser trefilado deve ser preparado adequadamente por meio de três etapas: recozimento, limpeza e apontamento. O *recozimento* busca aumentar a ductilidade do material para possibilitar a conformação a frio, especialmente para as ligas de cobre, em que a ductilidade é menor comparada ao cobre comercialmente puro; às vezes, essa etapa é utilizada entre os estágios das reduções de áreas promovidas pela trefilação. A *limpeza* consiste na remoção de contaminantes superficiais (por exemplo, óxidos) por meio de decapagem química feita em solução líquida contendo ácido sulfúrico (H_2SO_4). O *apontamento* (ou *ponteamento*) compreende a redução do diâmetro de entrada do metal para que possa ser inserido através da fieira para iniciar o processo de trefilação. Esse apontamento pode ser realizado por conformação plástica (forjamento ou laminação) ou usinagem (torneamento).

Tubos também podem ter seu diâmetro reduzido por meio da trefilação. Para que ocorra controle do diâmetro interno e da espessura da parede, torna-se necessário o uso de mandril fixo ou de espina flutuante, conforme Figura 3.12b.

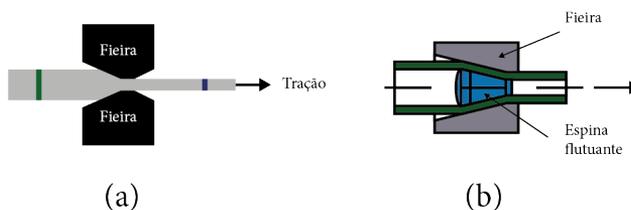


Figura 3.12 – (a) Processo de trefilação e (b) com espina flutuante (ou mandril interno).

As características gerais da trefilação são similares às da extrusão. A diferença é que, na trefilação, o metal é puxado através da matriz; já na extrusão, ele é empurrado através da matriz.

O atrito faz parte dos processos de conformação mecânica, porém, para evitar que atinja condições indesejáveis durante o contato direto entre o ferramental e a superfície do material metálico, torna-se necessário o uso de lubrificantes. Em condições de trabalho a frio, os lubrificantes usados incluem óleos minerais e outras soluções específicas para o processamento do cobre e suas ligas. No trabalho a quente, os lubrificantes podem ser compostos de óleos minerais, grafite e vidro. No forjamento a quente de diversos materiais metálicos, utiliza-se frequentemente a grafite contida em água ou em óleo mineral.

Santos *et al.* (2018) desenvolveram um estudo sobre a influência do trabalho a frio, em percentuais de redução de área, na resistividade elétrica do cobre eletrolítico UNS C11000. O trabalho a frio praticado no processo de fabricação do cobre eletrolítico é responsável pela obtenção das propriedades mecânicas do material, porém, ao aplicar as reduções de área, ocorre o aumento da resistividade elétrica e, como consequência, a redução da condutividade elétrica. As amostras foram submetidas ao processo de recozimento e conformadas posteriormente em uma trefila retilínea, tendo suas propriedades mecânicas e elétricas avaliadas antes e depois do processo de trefilação.

Nessa pesquisa, as propriedades mecânicas foram avaliadas por meio do ensaio de tração, permitindo a obtenção dos valores de limite de resistência à tração e de escoamento. No que diz respeito ao ensaio de resistividade, utilizou-se aparato experimental elétrico para a leitura em um comprimento de amostra no valor de 1 m.

Por meio de análise da Figura 3.13a, nota-se o aumento da resistência mecânica no material encruado, obtendo-se uma diferença de 25,01 MPa e 169,95 MPa nas médias dos limites de resistência à tração e de limite de escoamento, respectivamente. Na Figura 3.13b, são mostradas as distribuições dos valores de resistividade e de condutividade elétrica para a condição de material recozido e encruado (trabalhado a frio).

Os percentuais de redução de área, aplicados nesse estudo, proporcionaram o aumento da resistividade elétrica na ordem de $1,610 \times 10^{-4} \Omega \cdot \text{mm}^2/\text{m}$, representando uma redução na condutividade elétrica em 0,935 % IACS. Os pesquisadores concluíram que a obtenção do cobre eletrolítico encruado com resistividade elétrica próxima à do cobre recozido é possível utilizando percentuais de redução de área no trabalho a frio entre 8,8% e 10,6%. Em termos de aplicações, os resultados são muito interessantes, pois se conciliou ganho de resistência mecânica com excelente condutividade elétrica no material estudado.

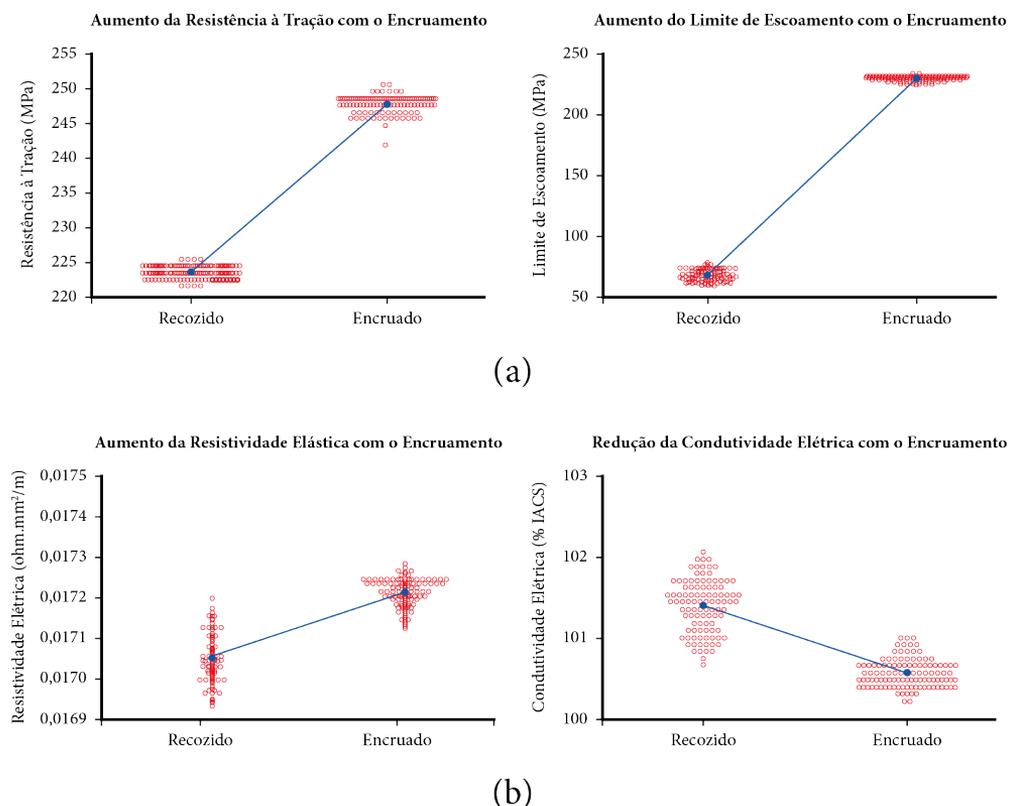


Figura 3.13 – Comparação entre material recozido e encruado em termos de: (a) resistência mecânica e (b) comportamento elétrico. (Santos *et al.*, 2018)

Curiosidade

Na conformação mecânica, também se trabalha com metal semissólido. Trata-se da *tixoconformação*, em que pastas reofundidas com estruturas globulares são conformadas plasticamente, como o tixoforjamento e a tixoextrusão. Esses processos necessitam de esforços menores para a conformação e permitem a obtenção de propriedades intermediárias entre a fundição e a conformação plástica.

Os *processos de conformação de chapas metálicas* são operações de corte ou de modificação de forma, geralmente realizadas a frio, em chapas planas de materiais metálicos. Tais operações são tipicamente realizadas por meio de um conjunto de ferramentas composto de um *punção* (parte convexa ou macho) e uma matriz (parte côncava ou fêmea).

As principais operações de conformação de chapas metálicas são corte, dobramento, embutimento e estiramento, ilustradas na Figura 3.14.

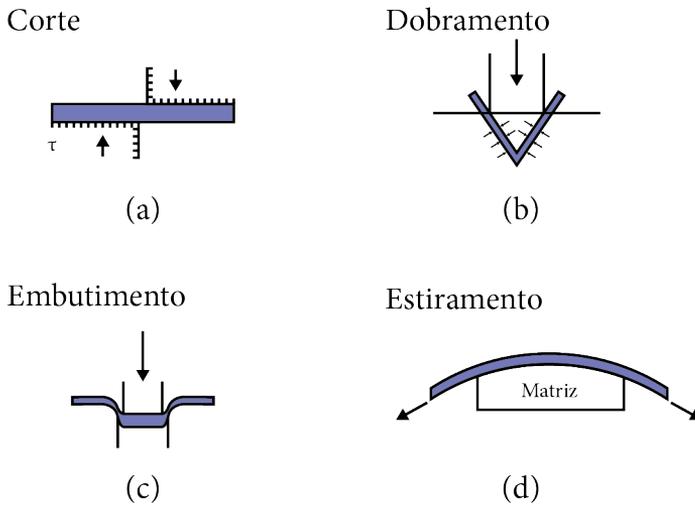


Figura 3.14 – Conformação de chapas: (a) corte, (b) dobramento, (c) embutimento e (d) estiramento.

O *corte de chapas* envolve cisalhamento em vez de conformação, assim mostrado na Figura 3.14a. O cisalhamento é gerado pela ação de força exercida por um punção ou uma lâmina de corte. Esse processo é destinado à obtenção de formas geométricas planas e não apresenta deformação plástica continuamente, mas é uma operação comum e necessária à conformação de chapas. Em função disso, os processos de conformação de chapas também são chamados de *processos de corte e conformação de chapas*, que é uma forma mais abrangente.

O *dobramento* envolve a deformação de uma chapa metálica para formar um perfil angular ou com contornos ao longo de um eixo linear. A chapa é submetida a esforços aplicados em duas direções opostas, que provocam a flexão e a deformação plástica. A superfície é alterada para duas superfícies concorrentes, conforme ilustrado na Figura 3.14b.

O *embutimento* ou *estampagem profunda* é um processo utilizado para conformar uma chapa metálica plana em uma forma côncava (fêmea) fornecida pela matriz, como é mostrado na Figura 3.14c. O punção (macho) impõe a força necessária para o processo de conformação plástica. A utilização de operação de calibragem possibilita a obtenção de tolerâncias dimensionais mais estreitas. Adota-se, de forma arbitrária, que a distinção entre estampagem profunda e rasa é em função da relação entre profundidade e diâmetro do copo produzido. Na estampagem profunda, o copo é mais profundo que a metade do seu diâmetro e, na estampagem rasa, é menor.

O *estiramento* consiste em fixar e esticar uma chapa metálica sobre um molde simples, conforme mostrado na Figura 3.14d. Ao contrário dos processos de corte, dobramento e embutimento, o estiramento não é realizado em prensa.

Outro processo de conformação de chapa metálica não realizado em prensas é o *repuxamento*, que usa roletes ou ferramentas que geram pressão para conformar a chapa metálica com um mandril durante a rotação da peça. Esse processo também pode ser empregado para reduzir seções tubulares.

Processos especiais de conformação de chapas metálicas envolvem a *conformação por elastômero*, que aplica a flexibilidade e a baixa compressibilidade do elastômero como ferramental elástico no contato com a chapa a ser conformada, evitando danos superficiais na peça, porém limita-se a formas rasas, e a *conformação por explosivos*, um processo não convencional que conforma peças com contornos complexos e de grandes dimensões em uma cavidade de uma matriz pela aplicação de carga explosiva. A conformação por explosivos permite taxas de energia mais elevadas que os processos de conformação de chapas citados anteriormente. Esses dois processos especiais são mais utilizados na indústria aeronáutica.

O *dobramento* ou *curvamento de tubos* compreende métodos empregados para curvar tubos sem que ocorra o colapso prévio do material. Alguns desses métodos utilizam mandris flexíveis especiais, que são inseridos no tubo antes do curvamento para apoiar as paredes durante a operação.

Estampagem Incremental

A *estampagem incremental* (ISF, do inglês *Incremental Sheet Forming*) é um processo de conformação plástica utilizado na fabricação de protótipos ou pequenos lotes, realizado normalmente em centros de usinagem e tendo como material de partida chapas metálicas. Engloba uma série de processos nos quais, durante a conformação plástica, apenas uma pequena parte do material é deformado a cada momento.

Nesse tipo de processo, parte de uma chapa metálica, que é fixada em uma base e um punção (ferramenta), produz na peça a ser produzida pequenas deformações, que são incrementadas verticalmente a cada passe, até se obter o formato desejado. A trajetória do punção é constituída por uma sequência de linhas de contorno geradas normalmente por programas de projeto (ou desenho) e manufatura assistidos por computador: *CAD/CAM*.

Na Figura 3.15, são mostradas as quatro etapas do processo de ISF, especificamente a de ponto simples: a etapa 1 consiste no *setup* (preparação) da máquina e indica as principais partes do sistema – o prensa-chapas, que é um dispositivo que fixa e sustenta a chapa a ser conformada, e o punção, que é uma ferramenta sólida, com dureza superior à da chapa a ser conformada, e com a qual são realizadas as trajetórias programadas a fim de se conformar a chapa na geometria desejada –; a etapa 2 mostra o início da trajetória do punção sobre a chapa, causando uma pequena deformação; a etapa 3 mostra o deslocamento do punção sobre a chapa; e a etapa 4 apresenta a peça acabada após o punção ter realizado todas as trajetórias programadas.

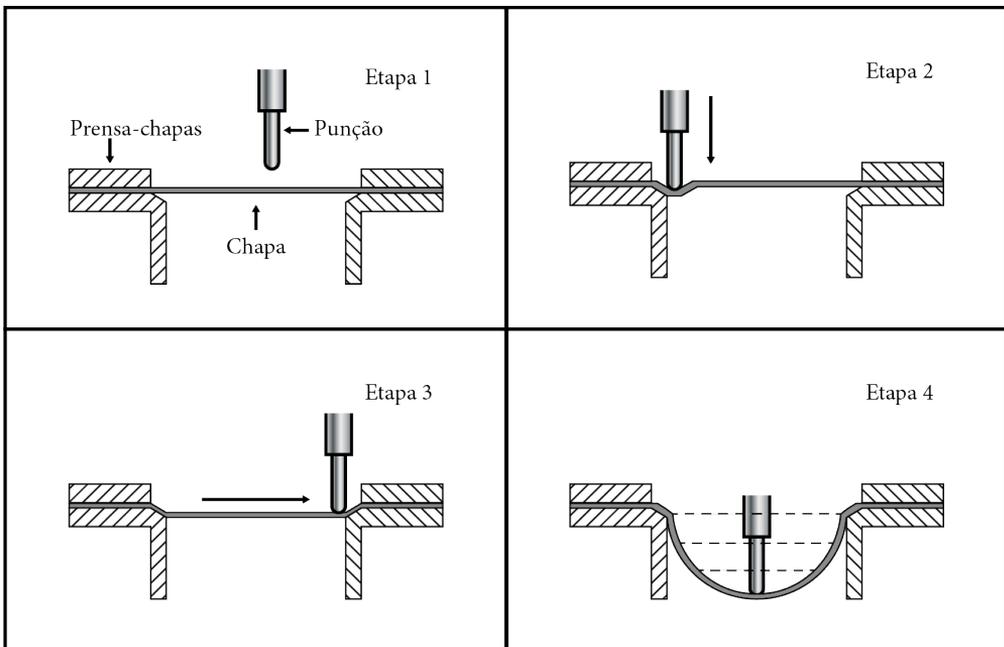


Figura 3.15 – Etapas da estampagem incremental. Adaptado de Bertol *et al.* (2012).

Por ser tratar de uma técnica ainda recente, a ISF possui muitos limites a serem investigados para se tornar mais presente no meio fabril. Em comparação a outros processos de conformação, apresenta como vantagens o custo reduzido e o ferramental simples; e como limitações, a demanda de maior tempo de processo de fabricação por peça ou componente e maiores desvios geométricos e dimensionais (menor precisão).

Pereira (2018) desenvolveu pesquisa sobre ISF de ponto simples de chapas de latão UNS C26000 e de cobre UNS C11000, com espessuras de 0,5 e 1,0 mm e geometrias e ângulos de parede diferentes. Os materiais foram caracterizados por meio do tamanho de grão e por ensaios de dureza, tração e Nakazima (ensaio de fabricação), que mostraram que, apesar de o latão apresentar maior resistência mecânica, com o cobre foi possível a obtenção de melhor estampabilidade.

O processo foi realizado em um centro de usinagem de 5 eixos, e os resultados possibilitaram a obtenção do ângulo limite de estampagem e a análise da espessura do perfil obtido. Para as chapas com 0,5 mm de espessura, não se obteve o ângulo limite de estampagem devido à fratura precoce do material. Com as chapas de 1,0 mm de espessura se obteve o ângulo limite de estampagem de $66,5^\circ$ para o latão e de 68° para o cobre, e, para ambos os materiais, uma diferença média de espessura de 7,7% se comparada ao valor previsto matematicamente. Ao se comparar os alongamentos máximos, o pesquisador verificou que os valores atingidos no processo são muito superiores aos atingidos nos ensaios de tração e de Nakazima.

O ensaio de Nakazima é um ensaio de fabricação utilizado para análise de estampabilidade de chapas. Na Figura 3.16, são mostrados os diagramas-limite de conformação para (a) o latão UNS C26000 e para (b) o cobre UNS C11000, gerados a partir da medição das suas respectivas elipses. Foram geradas linhas de tendência para indicar os limites de conformação para cada tipo de elipse medida (falha, margem e bom). ϵ_1 e ϵ_2 são, de forma respectiva, as deformações maiores e menores do ensaio de Nakazima.

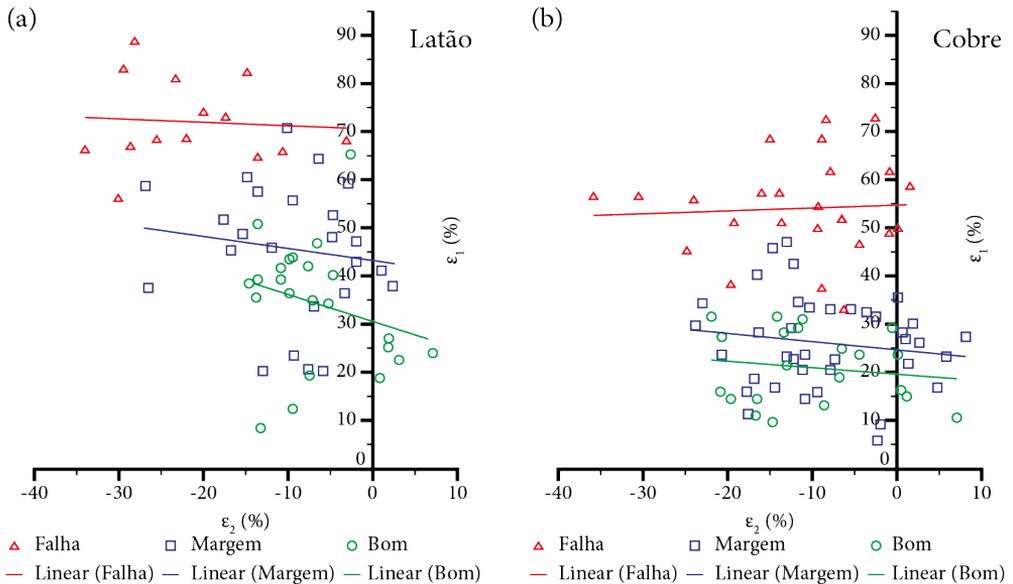


Figura 3.16 – Diagrama limite de conformação (Nakazima) para: (a) latão e (b) cobre. (Pereira, 2018)

Segundo Pereira (2018), os pontos de *falha* dos dois materiais mostraram um comportamento similar, com predominância de valores positivos para deformação maior e negativos para deformação menor. Para os pontos de *bom* e de *margem*, as linhas de tendência do latão apresentaram patamares mais afastados, enquanto para o cobre as linhas estão mais próximas e os pontos menos dispersos. O latão atingiu deformações superiores às do cobre para os três tipos de elipses, indicando que o material possui maior estampabilidade segundo os critérios do ensaio de Nakazima.

Na Figura 3.17, pode-se observar o diagrama limite de conformação com as linhas de tendência obtidas no ensaio de Nakazima e no processo de ISF da pesquisa. Os limites de conformação atingidos no processo de ISF foram muito superiores aos obtidos no ensaio de Nakazima, em todos os casos. Por esse motivo, o ensaio de Nakazima não é indicado para prever o comportamento de materiais produzidos pela ISF.

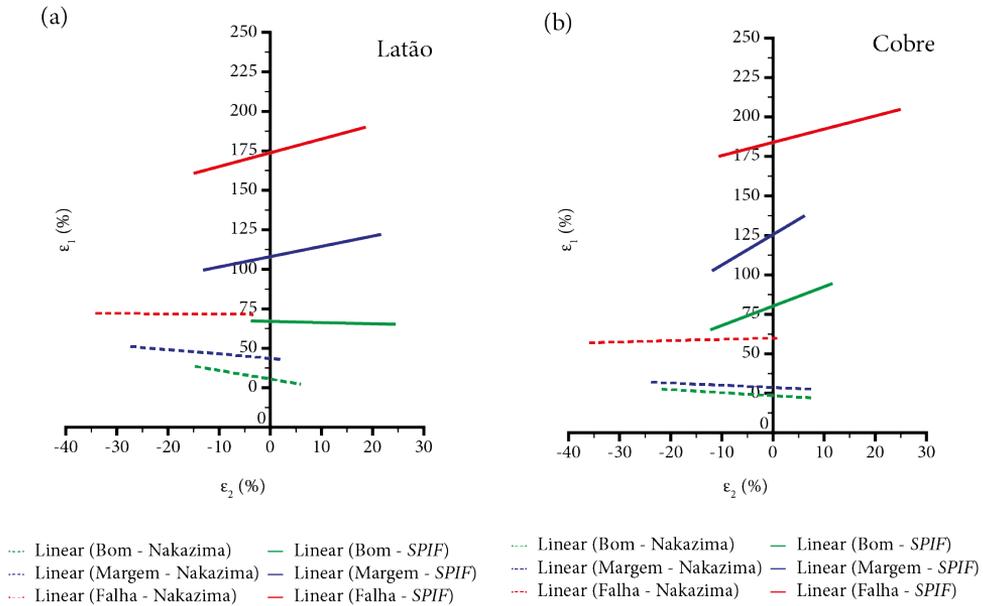


Figura 3.17 – Diagrama limite de conformação (Nakazima x estampagem incremental) para: (a) latão e (b) cobre. (Pereira, 2018)

3.2.3 METALURGIA DO PÓ

A *metalurgia do pó* (MP) é uma tecnologia de manufatura baseada no processamento de particulados, produzindo peças ou componentes a partir de pós metálicos, como pós de ligas de cobre. De forma sequencial, a fabricação baseia-se na compactação desses pós em matrizes por meio de prensas para obter o *compactado verde* com a forma desejada e, depois, na *sinterização*, que consiste no aquecimento do compactado verde para provocar o aumento da ligação entre as partículas (densificação), gerando uma massa rígida e dura, conforme mostrado na Figura 3.18.

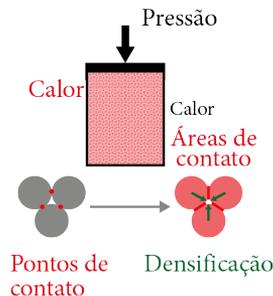


Figura 3.18 – Processo de metalurgia do pó.

As aplicações da MP incluem ferramentas de usinagem de metal duro, rolamentos, filtros porosos, engrenagens e outras. As peças produzidas por esse método diminuem ou eliminam a necessidade de operações subsequentes de acabamento. Uma vantagem considerável é o baixo desperdício de material.

Os pós metálicos podem ser obtidos por atomização do metal líquido a gás ou à água, redução do tamanho de partículas por moagem, eletrólise ou redução química.

A MP pode processar materiais não conformáveis por outros métodos, uma vez que sejam transformados em pós (por exemplo, determinadas combinações de ligas de cobre e carbonetos).

As desvantagens desse processo incluem os custos elevados com equipamentos, ferramental e pós de engenharia, o cuidado necessário com o manuseio dos pós e a geometria da peça (por exemplo, não é possível fabricar roscas por MP).

Após a sinterização, algumas operações secundárias são realizadas para finalizar a conformação, aumentar a densidade ou aprimorar a precisão dimensional da peça ou componente. Essas operações podem ser reprensagem, calibragem, usinagem, tratamentos térmicos e termoquímicos, tratamentos superficiais e infiltração (penetração de metal fundido nos poros da peça sinterizada).

Algumas variações do processo são: *compactação em matriz fria*, realizada em temperatura ambiente, gerando peças de alta porosidade e baixa resistência mecânica; *compactação isostática* (fria ou quente), em que um fluido pressurizado é utilizado na compactação dos pós, propiciando maior uniformidade no processo; *compactação sem pressão*, para peças porosas; e *sinterização por centelhamento*, possibilitando propriedades elétricas e magnéticas ao produto.

REFERÊNCIAS

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

BERTOL, L. S.; FOLLE, L.; SCHAEFFER, L.; KINDLEIN JR., W. **Avaliação dos ângulos-limite na estampagem incremental de alumínio e titânio**. Porto Alegre: Corte & Conformação, 2012. p. 42-51.

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.

CIBULA, A. **Grain-refining additions for cast copper alloys**. Journal of the Institute of Metals, v. 82, n. 11, p. 513-524, 1954.

CIMM. **Centro de informação metal mecânica**. Site institucional. Disponível em: <https://www.cimm.com.br/>. Acesso em: 14 de fevereiro de 2023.

- DIETER, G. E. **Mechanical metallurgy**. 2. ed. [S.l.]: McGraw-Hill Company, 1988.
- GOULD, G. C.; FORM, G. W.; WALLACE, J. F. **Grain refinement of copper**. *Modern Casting*, p. 144-153, 1960.
- 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.
- HOSFORD, W. F. **Mechanical behavior of materials**. 2. ed. Cambridge: Cambridge University Press, 2009. p. 92-112.
- KIMINAMI, C. S.; CASTRO, W. B.; OLIVEIRA, M. F. **Introdução aos processos de fabricação de produtos metálicos**. São Paulo: Blucher, 2013.
- KMM Bronze. **Continuous casting: horizontal, vertical downward, vertical upward**. Disponível em: <https://kmmbronze.com/technologies-of-continuous-casting-horizontal-vertical-downward-vertical-upward/>. Acesso em: 25 ago. 2023.
- MARTORANO, M. A.; CAPOCCHI, J. D. T. Dendrite structure control in directionally solidified bronze castings. **International Journal of Cast Metals Research**, v. 13, n. 1, p. 49-57, 2000.
- PATCHETT, J.; ABBASCHIAN, G. Grain refinement of copper by the addition of iron and by electromagnetic stirring. **Metallurgical and Materials Transactions B**, v. 16, n. 3, p. 505-511, 1985.
- PEREIRA, L. C. **Estudo da estampabilidade do latão C260 e do cobre C110 pelo processo de estampagem incremental de ponto simples em um centro de usinagem de 5 eixos**. Dissertação (Mestrado Acadêmico em Engenharia Mecânica) – Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de São Paulo, 2018.
- 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.; 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 (PR), 2018.
- SELLARS, C. M.; TEGART, W. J. M. Hot workability. **International Metallurgical Reviews**, 17, n. Review 158, 1972.
- VERLINDEN, B.; DRIVER, J.; SAMAJDAR, I.; DOHERTY, R. D. **Thermo-mechanical processing of metallic materials**. [S.l.]: Pergamon Materials Series, 2007.
- WALLACE, J. F.; KISSLING, R. J. **Grain refinement of copper alloy castings**. *Foundry*, p. 54-57, 1963.