

COBRE E SUAS LIGAS

Tecnologia da manufatura,
caracterização e aplicações



Autores:

Luiz Henrique Caveagna
Márcio Rodrigues da Silva
Vinicius Torres dos Santos
Givanildo Alves dos Santos

Blucher



Termomecanica

COBRE E SUAS LIGAS

CONSELHO EDITORIAL

André Luiz V. da Costa e Silva

Cecilia Consolo

Dijon De Moraes

Jarbas Vargas Nascimento

Luis Augusto Barbosa Cortez

Marco Aurélio Cremasco

Rogério Lerner

Blucher



Luiz Henrique Caveagna
Márcio Rodrigues da Silva
Vinicius Torres dos Santos
Givanildo Alves dos Santos

COBRE E SUAS LIGAS

Tecnologia da manufatura, caracterização e aplicações

Cobre e suas ligas: tecnologia da manufatura, caracterização e aplicações

© 2024 Luiz Henrique Caveagna, Márcio Rodrigues da Silva, Vinicius Torres dos Santos,

Givanildo Alves dos Santos

Editora Edgard Blücher Ltda.

Publisher Edgard Blücher

Editor Eduardo Blücher

Coordenador editorial Rafael Fulanetti

Coordenação de produção Andressa Lira

Produção editorial Kedma Marques

Preparação de texto Gabriela Castro

Diagramação Erick Genaro

Revisão de texto Juliana Leuenroth

Capa Laércio Flenic

Imagem da capa Arquivo pessoal dos autores

Os autores e a editora buscaram tratar de forma ética todas as publicações e citá-las adequadamente, dando o devido crédito a todos os detentores dos direitos autorais, dispondo-se a possíveis acertos, caso, inadvertidamente, a identificação de algum deles tenha sido omitida. Apesar dos esforços de todos, torna-se inevitável a necessidade de ajustes no texto.

Blucher

Rua Pedroso Alvarenga, 1245, 4^o andar

04531-934 – São Paulo – SP – Brasil

Tel.: 55 11 3078-5366

contato@blucher.com.br

www.blucher.com.br

Segundo o Novo Acordo Ortográfico, conforme 6. ed. do *Vocabulário Ortográfico da Língua Portuguesa*, Academia Brasileira de Letras, julho de 2021.

É proibida a reprodução total ou parcial por quaisquer meios sem autorização escrita da editora.

Todos os direitos reservados pela Editora Edgard Blücher Ltda.

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação (CIP)

Angélica Ilacqua CRB-8/7057

Cobre e suas ligas: tecnologia da manufatura, caracterização e aplicações / Luiz Henrique Caveagna... [et al]. -- São Paulo: Blucher, 2024.
258 p.

Bibliografia

ISBN 978-85-212-2068-8

1. Cobre 2. Liga de cobre I. Título II. Caveagna, Luiz Henrique

24-0270

CDD 669.3

Índices para catálogo sistemático:

1. Cobre

DEDICATÓRIA

Em memória do nosso fundador, Engenheiro Salvador Arena, cujo legado, princípios e valores são mantidos como fonte de motivação e exemplo.

À Presidente do Conselho Curador da Fundação Salvador Arena e do Conselho de Administração da Termomecanica, Dra. Regina Celi Venâncio, pela excepcional e inspiradora liderança.

Aos Conselheiros da Fundação Salvador Arena, responsáveis por manterem vivo o legado de nosso fundador.

Aos Conselheiros de Administração e aos Diretores Executivos da Termomecanica, pela dedicação e empenho na gestão da companhia que é referência e líder em seu setor.

Aos nossos familiares, fonte inesgotável de amor, apoio e propósito.

Dedicamos esse livro a todos que, de alguma forma, contribuíram para a realização desta obra e que nos inspiram e motivam diariamente.

PREFÁCIO

O cobre, um dos metais mais antigos conhecidos pela humanidade, é utilizado há mais de 10 mil anos para criar soluções que mudaram o curso da história. Nobre e de cor quente e brilhante, ele fascina pelo seu poder – afinal, sem o cobre, o mundo como conhecemos hoje não existiria.

Sua versatilidade e características ímpares foram decisivas para o desenvolvimento da tecnologia moderna e a construção da sociedade globalizada. Além de ser um excepcional condutor de energia graças à sua maleabilidade, o cobre é utilizado para criar uma infinidade de objetos, artefatos, ferramentas, utensílios domésticos e até joias e peças de arte.

Sua mais importante contribuição, no entanto, está ligada à indústria. Todos os sistemas de produção mundial utilizam o cobre, incluindo os setores de construção civil, de eletricidade e de refrigeração, além das indústrias naval, aeroespacial, de petróleo, de máquinas e de equipamentos. Nos últimos anos, sua presença tem sido ampliada de forma extraordinária, impulsionada principalmente pelas tecnologias emergentes voltadas à geração de energia por fontes renováveis, telecomunicações e mobilidade.

Nesse contexto, é impossível falar da produção do cobre sem falar da *Termomecânica*. Desde que foi fundada, em 1942, pelo engenheiro Salvador Arena, a empresa tornou-se uma referência em seu segmento de atuação e hoje figura entre as maiores indústrias privadas brasileiras, ocupando a liderança no setor de transformação de cobre e suas ligas.

Um pouco do que a empresa aprendeu ao longo dos últimos oitenta anos será compartilhado com você neste livro, produzido com a mesma excelência que traduz o significado da marca Termomecânica no mercado. O ponto de partida é um breve relato de sua história, na qual a inovação e o pioneirismo sempre estiveram presentes, assim como a valorização do capital humano, a preocupação com o meio ambiente e a gestão ética e responsável.

A TRAJETÓRIA DE SUCESSO DA TERMOMECHANICA

Com mais de oito décadas de história, a Termomechanica iniciou sua jornada com apenas 200 dólares de capital e máquinas importadas dos Estados Unidos, tendo como foco a fabricação de fornos e equipamentos para padarias. Graças a seu crescimento acelerado, em pouco tempo a empresa deixou o modesto galpão alugado no bairro da Mooça e passou a ocupar um espaço maior no Ipiranga, ambos na capital paulista.

Sua vocação inegável para a metalurgia se destacou quando a empresa começou a produzir também trefilas, fornos de fundição e prensas, impulsionada pelo desenvolvimento industrial do país, extremamente promissor naquela época. O sucesso foi tanto que, na década de 1950, Salvador Arena decidiu construir uma nova fábrica, voltada para a produção diversificada de metais não ferrosos, no bairro de Rudge Ramos, em São Bernardo do Campo, onde até hoje funciona a matriz da empresa.

Os negócios continuaram em evolução e, em 1957, a Termomechanica já contava com uma equipe de cinquenta funcionários. A linha de produção de chapas e vergalhões se expandiu, especializando-se na fabricação de componentes que anteriormente só estavam disponíveis no mercado internacional.

Para atender à demanda crescente das últimas décadas, a Termomechanica inaugurou, em 1985, sua segunda fábrica, também localizada no município de São Bernardo do Campo. Entre 2008 e 2010, duas novas aquisições evidenciaram mais uma vez o notável desenvolvimento da empresa: o Centro de Distribuição de São Bernardo do Campo e o de Joinville, em Santa Catarina. Em 2011, outro momento histórico: foram adquiridas fábricas no Chile e na Argentina, totalizando 211.447 m² de área construída e aproximadamente 2 mil empregados.

A Termomechanica seguiu em ritmo de expansão e, em 2016, inaugurou uma terceira fábrica em São Bernardo do Campo, desta vez voltada para a produção de tubos e barramentos de alumínio, além de dar início à operação da unidade de Manaus, capital amazônica, dedicada à produção de tubos ranhurados de cobre. Três anos depois, em 2019, iniciou as atividades do Centro de Distribuição dos Estados Unidos, no estado da Carolina do Norte. Em 2021, passou a operar a linha de vergalhão de alumínio em São Bernardo do Campo, fortalecendo ainda mais sua presença nos mercados nacional e internacional.

Por trás do sucesso e desenvolvimento permanente da Termomechanica, o nome de Salvador Arena sempre esteve presente. Referência como profissional, empreendedor e ser humano, ele deixou um legado inigualável, tornando-se uma inspiração de ideias e valores para gerações seguintes.

DE 200 DÓLARES À CONSTRUÇÃO DE UM IMPÉRIO

Com habilidades incomuns, Salvador Arena foi uma das personalidades mais marcantes e controversas de sua época. Natural de Trípoli, na Líbia, nasceu em 12 de janeiro de 1915 e chegou ao Brasil com sua família aos 5 anos. A paixão pela mecânica,

herança do pai Nicola Arena, surgiu ainda na infância humilde e converteu-se em determinação após sua formação em Engenharia Civil, aos 21 anos, na Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, e seu trabalho com o famoso engenheiro estadunidense Asa White Kenney Billings, na São Paulo Trainway Light Power.

Em 1942, com apenas 27 anos, e duzentos dólares que recebeu de indenização após deixar seu emprego na Light, Arena criou a Termomecanica. Empresário de sucesso, fez seus negócios prosperarem por meio de muito trabalho, ousadia, criatividade e determinação, acumulando uma das maiores fortunas do país e figurando com sua empresa no topo do ranking de grandes indústrias instaladas no Brasil até hoje.

Contudo, não foi apenas sua capacidade de gestão que tornou Arena conhecido e respeitado como profissional. Seu lado inovador tornou-se marca registrada, dentro e fora da empresa. Desde pequeno, tinha paixão por inventar e construir, tanto que criou sua própria casa, iates e móveis do escritório e da residência, além de máquinas e pavilhões – tudo projetado e construído sob sua orientação.

Era um mundo fundido, torneado, ajustado e construído à sua maneira, de forma irretocável. Ainda hoje há máquinas em operação nas fábricas da Termomecanica que surgiram há mais de cinquenta anos, fruto de sua mente inquieta e ávida por novos desafios. Uma mente que também se distinguiu dos demais empresários da época em função de outra singularidade: seu jeito particular de gerir pessoas.

UM MODELO DE GESTÃO À FRENTE DO TEMPO

Salvador Arena acreditava no potencial de pessoas bem treinadas – algo que adquiriu em seu trabalho na Light, com a equipe responsável por instalar linhas de transmissão de energia elétrica planejadas por Billings, considerado um dos pioneiros no desenvolvimento desse tipo de sistemas no Brasil. Arena ficou surpreso com a rapidez dos empregados em aprender suas tarefas e, com base nisso, desenvolveu suas próprias habilidades didáticas, percebendo quanto lhe agradava ajudar os outros a progredir.

Nesse sentido, enquanto desenvolvia os negócios da Termomecanica, Salvador Arena criou um modelo de gestão próprio e inovador para a época, prezando pelo “valioso capital humano”, como gostava de se referir aos funcionários. Durante mais de cinco décadas, conduziu a empresa orientado exclusivamente por suas opiniões firmes e ideias singulares. Diversas teorias de gestão, desde processos de tomada de decisão centralizados até trabalho em equipe aberto e participativo, foram relegadas ao *status* de modismos por ele.

Embora conceitos como qualidade total, reengenharia ou *downsizing* tenham produzido seus efeitos, Arena extraiu deles apenas o que era prático para seus objetivos. Seguindo essa mesma lógica, passou a priorizar seus funcionários, investindo sem restrições em seu desenvolvimento. A atenção dedicada a eles era tanta que Arena conhecia todos pelo nome e sobrenome, bem como seus familiares, para os quais estendeu benefícios como cestas básicas com até 60 quilos de alimentos e atendimento médico e odontológico.

A política salarial, uma marca da Termomecanica até os dias atuais, foi sua criação. Tudo começou em 1948, quando concedeu o primeiro prêmio por produtividade após um esforço bem-sucedido de produção para atender um grande cliente. Embora na época não houvesse legislação a respeito da participação nos lucros e da remuneração por produtividade, essa prática tornou-se rotina na fábrica, e, sempre que havia um trabalho especial, um prêmio era concedido.

Mesmo antes de ser criado o 13º salário, Arena pagava um adicional aos funcionários no final do ano. Com o tempo, passou a distribuir a participação nos lucros com base no desempenho anual calculado por ele mesmo. Essa participação chegava a catorze, quinze e, às vezes, dezessete ou dezoito salários no ano. Em determinado momento, a Termomecanica pagou excepcionalmente 25 salários. Também foi dele a ideia de proteger os funcionários das altas taxas de juros do mercado, criando uma cooperativa de crédito com juros subsidiados como alternativa de financiamento pessoal.

MÉTODOS E PRINCÍPIOS

Em seu processo de gestão, Salvador Arena sempre seguiu rigorosamente os métodos e os princípios em que acreditava. Suas fórmulas não eram modernas nem antigas, nem ensinadas nas escolas de negócios. Ele não acreditava em consultores, tampouco ligava para diplomas: o perfil ideal para ele era um funcionário dedicado e disposto a aprender coisas novas rapidamente.

Por isso, eram raros os anúncios em jornais para cargos de gerência. Ao contrário, procurava candidatos internamente, escolhendo a dedo aqueles que se destacaram para chefiar seções e departamentos. Com isso, também dava oportunidades para outros ascenderem na fábrica. Arena também valorizava o trabalho das mulheres, reforçando que elas eram tão inteligentes e eficientes quanto os homens. Estava tão convencido disso que nomeou uma mulher para sucedê-lo na presidência da empresa.

Empresário arrojado, Salvador Arena gerenciava a companhia quase sozinho, definindo estratégias, prevendo novos mercados e desenvolvendo produtos. Lidava com a comunicação de uma maneira peculiar, assim como tudo o que se propunha a fazer: criou folhetos promocionais e catálogos técnicos para potenciais clientes, sendo esta a única forma de publicidade que utilizava. Como costumava dizer: “A melhor propaganda que posso fazer é ter um produto de boa qualidade e com preço baixo”.

Salvador Arena identificou cedo o fenômeno que chamou de “adoração do computador”, uma ênfase excessiva nas máquinas sem um retorno na produtividade, ao qual se opôs vigorosamente. Preferia valorizar o cérebro das pessoas, exigindo criatividade, atenção e, principalmente, lógica. Graças a essa postura, alcançou, em larga escala, o que outras empresas só conseguiam fazer com investimentos maciços em tecnologia de ponta: flexibilidade no atendimento – palavra final entre os gurus executivos em todo o mundo.

Inspirado pela citação clássica de Henry Ford “quando você paga bem seus homens, pode conversar com eles”, era conhecido por sua generosidade para com os funcionários.

Na época, chegou a ser chamado de socialista, louco e amigo dos trabalhadores. No entanto, os resultados e o impacto positivo na vida dos empregados mostraram a generosidade do ser humano e a eficácia de seu modelo de gestão como empreendedor.

Salvador Arena morreu em 1998, na plenitude de seus 83 anos, junto aos que mais amava: seus funcionários, suas máquinas, sua fábrica e sua comunidade. Deixou a Termomecanica ocupando uma posição de destaque no setor industrial brasileiro, em transformação de metais não ferrosos em produtos elaborados e semielaborados e altamente capitalizada, com um patrimônio líquido avaliado em mais de 800 milhões de dólares.

INOVAÇÃO E PIONEIRISMO

O perfil único e inovador de Salvador Arena não se destacava apenas na gestão da Termomecanica e de seus funcionários. Em 1950, aos 35 anos, ele alcançou a aspiração máxima dos metalurgistas do mundo todo ao desenvolver um processo singular de fundição contínua. As primeiras teorias sobre o tema surgiram na metade do século XIX, vindas principalmente de ingleses e estadunidenses que propunham diferentes técnicas de resfriamento e de uso de equipamentos, mas bastante limitadas. Nenhuma delas chegou a ser utilizada em escala industrial.

Salvador Arena, por sua vez, precisou de apenas quatro anos de pesquisa para criar o processo, considerado ainda hoje um avanço tecnológico. Ele permite fundir barras e chapas de modo que os produtos saíssem do forno praticamente na forma e na dimensão finais, eliminando processos intermediários, reduzindo custos e aumentando a produtividade e a qualidade. “Uma legítima glória da indústria nacional”, anunciou entusiasmado em um catálogo promocional da Termomecanica.

Essa conquista representou um marco na indústria nacional, evidenciando o nome da Termomecanica e reforçando a reputação de Arena como um empresário visionário e inovador. Além disso, a introdução da fundição contínua desencadeou uma reação sem precedentes em diversos setores. Amplamente utilizado em etapas intermediárias de fabricação de uma variedade de itens, o processo adicionou excelência aos produtos, proporcionando uma revolução silenciosa e de enorme impacto, embora pouco visível para o consumidor final.

O aumento significativo da qualidade das peças metálicas repercutiu diretamente em segmentos como o de automóveis, refrigeradores, aparelhos de som, máquinas, equipamentos, cadeados, fechaduras, geração e transmissão de energia elétrica e até canhões e foguetes. Os produtos tornaram-se mais leves, resistentes, eficientes e econômicos, em uma época crucial para a indústria nacional, que buscava modernização para atender às demandas de desenvolvimento do país.

Graças às inovações tecnológicas introduzidas por Arena, a Termomecanica conquistou uma parcela crescente do mercado. Sua superioridade tecnológica permitia que a empresa aceitasse pedidos que seus concorrentes não poderiam atender,

incluindo a produção de perfis e barras de bronze sem limitações de comprimento. Assim, a companhia ganhou reputação por ser capaz de executar qualquer serviço sob encomenda, e o mercado cresceu rapidamente à medida que a fábrica se equipava para atender a novas demandas e diversificar a produção.

Contudo, para fornecer atendimento personalizado, a empresa precisava repassar os custos da preparação especial dos fornos e matrizes para o preço final, o que nem sempre era viável para determinados perfis de clientes. Era preciso encontrar uma fórmula mais prática para a Termomecanica atender a um universo maior de indústrias e pequenas empresas, por meio de uma nova liga de metais com aplicação mais ampla a preços mais acessíveis.

Com obstinação, Arena começou a buscar a combinação perfeita de metais para obter uma liga mais versátil e acessível. Como resultado desse esforço, surgiu a liga TM23 – assim chamada porque foram necessárias 23 tentativas para encontrar a fórmula perfeita. Os testes realizados indicaram uma série de vantagens, incluindo maior resistência ao desgaste e ótima adaptabilidade a diferentes usos. A liga TM23 passou a ser produzida em grande escala, com preços reduzidos drasticamente. Até hoje é uma das mais utilizadas pela indústria brasileira.

Movido pelo prazer de superar os limites da tecnologia, Salvador Arena também decidiu construir uma prensa de sete mil toneladas, que demandou dez anos de trabalho e ainda é considerada uma das mais avançadas, sendo a maior de sua categoria na América Latina. Com ela, a Termomecanica conseguiu fabricar chapas mais largas e tubos maiores e passou a produzir itens mais complexos e de maior valor agregado, diversificando os segmentos de atendimento e aumentando as margens de lucro.

Herança da capacidade de inovação de seu fundador, atualmente a Termomecanica continua investindo em novas tecnologias e no desenvolvimento de novas ligas, com foco na otimização de custos, bem como no aumento da produtividade e da competitividade.

PRODUTOS E APLICAÇÕES

A constante demanda do mercado brasileiro, que absorve quase toda a produção da Termomecanica, estimula a empresa a investir continuamente na modernização e na expansão de seus sistemas e produtos. Atualmente, sua linha de produção compreende mais de cinco mil itens de cobre, agrupados em cinco grandes famílias: tubos, barras, vergalhões, perfis, laminados (fitas, tiras e chapas), fios, buchas e casquilhas. Além disso, desde 2016, a empresa também fabrica barramentos de alumínio para fins elétricos.

Entre os produtos de cobre, merecem destaque as barras, os vergalhões e os perfis, que são fabricados desde o início das operações da Termomecanica e continuam a ter papel de destaque na produção da empresa graças às suas diversas aplicações, tanto na indústria nacional, como no mercado internacional. Já no campo de tubos e no da trefilação, a Termomecanica possui o maior e mais completo conjunto de máquinas da América Latina, com capacidade de tração de até 200 toneladas.

Os diferentes produtos de cobre podem ser aplicados nas mais diversas indústrias, e o portfólio da Termomecanica possui excelentes soluções que atendem todos esses setores. Na área de construção civil, por exemplo, nada se compara ao cobre e suas ligas quando pensamos em tubos para água quente e fria, instalações de gás e redes de combate a incêndios, uma vez que o metal é altamente resistente às variações de pressão e de temperatura, evitando, assim, intervenções e retrabalhos nas instalações.

O cobre também se destaca por apresentar melhor desempenho e durabilidade quando comparado a outros insumos, com diferentes destinações. O metal é aplicado em fios e cabos por sua excelente condutibilidade elétrica, além de equipamentos onde há troca de calor, como aquecedores de água que podem operar a partir da energia elétrica ou solar, importantes fontes de energias renováveis. Em países com clima muito frio, o cobre é aplicado nos sistemas de calefação para aquecimento e manutenção da temperatura do ambiente. Nesse sentido, a cadeia do frio também se beneficia quando prioriza o cobre: graças à alta durabilidade do metal, os tubos utilizados em componentes de refrigeração, como aparelhos de ar-condicionado, geladeiras e refrigeradores comerciais, permitem maior eficiência energética e maior vida útil desses produtos.

No setor de arrefecimento, os tubos de cobre são utilizados em trocadores de calor, evaporadores em usinas sucroalcooleiras, radiadores industriais e automotivos e sistemas de pequeno e grande porte que requerem resistência à corrosão galvânica e alto desempenho em trocas térmicas.

Cabos e fios, sejam de alumínio ou de cobre, também atendem todos os setores que dependem de transmissão de energia, da construção civil, até o segmento elétrico, passando pela indústria do petróleo, de máquinas e equipamentos. Ou seja, qualquer setor que necessite transmitir energia elétrica em alguma etapa de seu processo, o que culmina em quase todo sistema de produção.

Já na indústria naval, o cobre é amplamente utilizado para a construção dos mais diversos tipos de embarcações, como navios de cruzeiros e de carga, iates e submarinos, devido à resistência à bioincrustação, e em hélices, tubulações, suportes, válvulas, engrenagens e outros equipamentos, uma vez que conta com elevada resistência mecânica e à corrosão.

No segmento aeroespacial, essa versatilidade de aplicações faz com que as ligas de cobre sejam consideradas opções mais convenientes em alguns componentes críticos da aeronave, quando comparado a outros metais. A escolha pela aplicação nesses casos deve-se pela combinação única de importantes propriedades físicas e químicas: elevada resistência mecânica, à corrosão e ao desgaste; condutividade térmica; e maior tenacidade à fratura em diferentes condições de temperatura.

CULTURA INOVADORA E TRANSFORMADORA

A Termomecanica sempre manteve o olhar estratégico voltado para o futuro, impulsionada por uma forte e consistente cultura inovadora implementada pelos ideais de seu fundador, buscando a excelência de seus produtos e contínua participação no mercado nacional e global. Esta ação tem sido fortalecida continuamente pelo

conselho curador, bem como pela diretoria da Termomecanica. Consequentemente, os avanços seguem em ritmo acelerado.

Um bom exemplo é a estruturação feita no setor de Pesquisa e Desenvolvimento (P&D), iniciada no ano de 2016 e que, em 2020, se transformou em uma divisão do Centro de Pesquisas, Desenvolvimento e Ensaio (CPDE), composto também pelo Laboratório de Análises Químicas e Físicas – este último inaugurado pelo fundador concomitantemente ao início das atividades da Termomecanica na unidade de São Bernardo do Campo. Hoje, o CPDE é acreditado pelo Inmetro e presta serviços laboratoriais em ligas pertencentes a diversas matrizes metálicas.

Sempre alinhada às principais demandas do mercado, a Termomecanica também vem buscando fortalecer a cultura *Environmental, Social and Governance* (ESG). Em sua trajetória, não faltam exemplos que comprovam a adoção permanente de estratégias ligadas ao meio ambiente, ao social e à governança. Isso inclui o desafio de usar a inovação contínua para tornar a empresa cada vez mais eficiente, atendendo à crescente demanda dos clientes por produtos ecologicamente corretos – ou seja, oferecer soluções de produtos com baixo impacto ecológico, que atendam aos mais altos padrões de eficiência energética, proteção ambiental e economia circular a médio prazo.

RESULTADOS DE NEGÓCIOS ALIADOS AO IMPACTO SOCIAL

O maior sonho de Salvador Arena sempre foi criar uma escola-modelo. Ele acreditava que apenas a educação de qualidade seria capaz de apoiar o desenvolvimento do país. Com isso em mente, em 1964 criou a Fundação Salvador Arena, que funcionava como uma espécie de braço social, concentrando esforços para ajudar pessoas em situação de vulnerabilidade.

Em 1989, a Fundação inaugurou inicialmente o Colégio Termomecanica, com a proposta de proporcionar ensino gratuito e de qualidade para crianças de todas as classes sociais. Em 2002, lançou a Faculdade de Tecnologia Termomecanica (FTT), que oferecia cursos de graduação tecnológica e pós-graduação também gratuitos e de alta qualidade.

As duas instituições de ensino foram transformadas no Centro Educacional da Fundação Salvador Arena em 2006. Ocupando uma área de 131 mil m² no bairro Alvarenga, em São Bernardo do Campo, a instituição oferece ensino de qualidade, alimentação, material didático e uniformes a mais de 3.200 alunos, além de investir em infraestrutura, cultura, conhecimento, esporte e lazer.

Juntamente a todos os bens que Arena acumulou, a Fundação herdou um dos traços mais marcantes de sua vida: o interesse pelo bem-estar genuíno das pessoas. Sem herdeiros, Arena preocupava-se com a continuidade de seus ideais humanitários, por isso estabeleceu a Fundação como herdeira universal de todo o seu patrimônio.

A instituição segue cumprindo o propósito de promover significado à riqueza de seu capital empresarial e, além de financiar o Centro Educacional, também desempenha

uma ampla gama de serviços comunitários, incluindo a distribuição de cestas básicas na região do ABC Paulista, assistência médica gratuita e contribuições para dezenas de instituições de caridade em todo o país, o que beneficia mais de 42 mil pessoas.

Comprometida com o desenvolvimento sustentável, a empresa, além de líder no setor de transformação de cobre e suas ligas, em produtos semielaborados e acabados, mantém programas de modernização e expansão que definem sua tradicional estratégia de reinvestimento de lucros e geração de empregos, contando com um patrimônio líquido superior a dois bilhões de reais.

Até aqui, foi possível conhecer momentos importantes da história da Termomecânica e de seu fundador. Nos capítulos a seguir, trazemos uma rica jornada pelo universo do cobre e da tecnologia envolvida em sua obtenção. Ao longo do conteúdo, você aprenderá sobre a produção desse valioso metal, sua história, curiosidades, características e aplicações técnicas.

Aproveite a leitura e descubra o mundo de possibilidades que o cobre oferece!

Regina Celi Venâncio
Presidente do conselho de
administração da Termomecânica

Luiz Henrique Caveagna
Diretor-geral da Termomecânica

CONTEÚDO

1. COBRE E SUAS LIGAS	21
1.1 Introdução	21
1.2 Metalurgia extrativa do cobre	23
1.3 Aspectos do cobre	28
1.4 Imperfeições ou defeitos cristalinos em metais	36
1.5 Propriedades do cobre e suas ligas	42
1.6 Ligas de cobre	51
Referências	67
2. CARACTERIZAÇÃO APLICADA AO COBRE E SUAS LIGAS	69
2.1 Generalidades	69
2.2 Ensaios destrutivos	70
2.3 Ensaios não destrutivos	102
Referências	105
3. PROCESSOS DE FABRICAÇÃO APLICADOS AO COBRE E SUAS LIGAS: PARTE 1	107
3.1 Generalidades	107
3.2 Processos de fabricação de cobre e suas ligas	109
Referências	131

4. PROCESSOS DE FABRICAÇÃO APLICADOS AO COBRE E SUAS LIGAS: PARTE 2	133
4.1 Usinagem (manufatura subtrativa)	133
4.2 Processos de união	142
4.3 Manufatura aditiva	154
Referências	163
5. TECNOLOGIA DE TRATAMENTOS APLICADOS AO COBRE E SUAS LIGAS	167
5.1 Generalidades	167
5.2 Deformação a quente e a frio do cobre e suas ligas	168
5.3 Tratamentos térmicos do cobre e suas ligas	175
5.4 Processos de tecnologia de superfície	186
Referências	190
6. ASPECTOS METALOGRAFICOS APLICADOS AO COBRE E SUAS LIGAS	193
6.1 Generalidades	193
6.2 Imagens metalográficas	206
Referências	213
7. A CORROSÃO NA SELEÇÃO DO COBRE E SUAS LIGAS	217
7.1 Corrosão	217
7.2 Tipos de corrosão	220
7.3 Testes de corrosão	224
7.4 Controle da corrosão	226
7.5 Considerações sobre corrosão no cobre e suas ligas	227
Referências	231
8. A TRIBOLOGIA NA SELEÇÃO DE LIGAS DE COBRE	233
8.1 Tribologia	233
8.2 Mancais de deslizamento	234
8.3 Propriedades tribológicas	236
8.4 Mecanismos e regime de desgaste no deslizamento a seco	237
8.5 Transformações microestruturais no deslizamento a seco	240

8.6 Propriedades importantes para mancais de deslizamento	241
8.7 Características microestruturais importantes para mancais	243
8.8 Ligas de cobre para buchas de mancais de deslizamento	245
8.9 Ensaios de desgaste	252
Referências	254
SOBRE OS AUTORES	257

CAPÍTULO 1

Cobre e suas ligas

1.1 INTRODUÇÃO

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

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

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

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

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

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

Curiosidades

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

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

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

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

1.2 METALURGIA EXTRATIVA DO COBRE

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

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

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

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

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

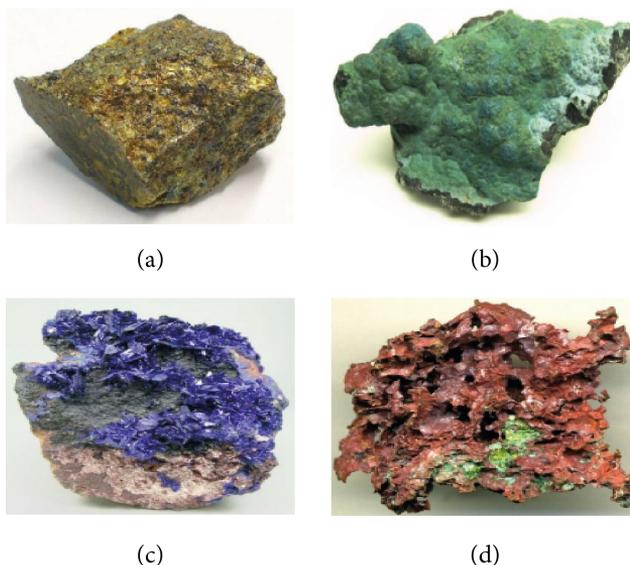


Figura 1.1 – Minérios de cobre: (a) calcopirita, (b) malaquita, (c) azurita e (d) cuprita.

1.2.1 PROCESSO DE METALURGIA EXTRATIVA DO COBRE

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

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

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

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

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

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



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

A seguir são descritas as etapas da metalurgia do cobre.

a) **Concentração do minério**

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

b) **Ustulação**

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

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

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

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

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

d) Obtenção do blister (oxidação ou conversão)

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

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

e) Refino a fogo (ânodo)

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

f) Refino eletrolítico (cátodo)

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

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

Observação

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

1.3 ASPECTOS DO COBRE

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

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

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

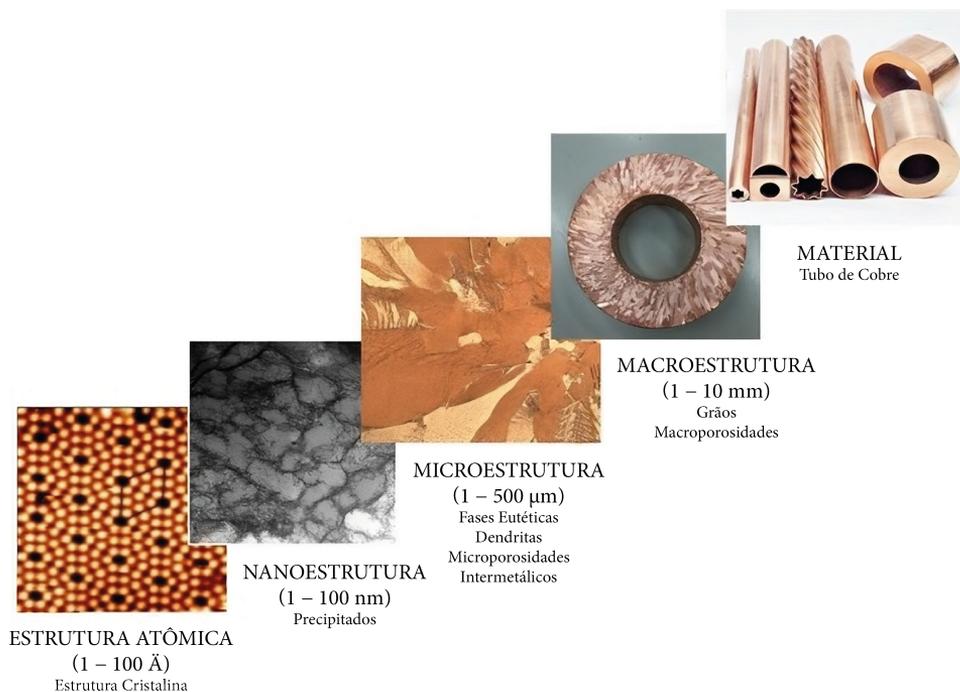


Figura 1.3 – Tubo de cobre com características estruturais e respectivas dimensões típicas, em termos de comprimento (Cortesia da Termomecanica São Paulo S.A.).

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

a) Estrutura atômica

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

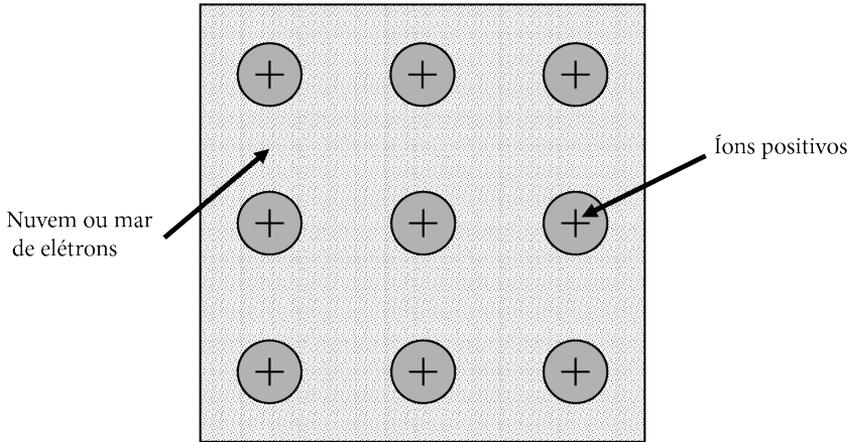


Figura 1.4 – Ligação metálica.

b) Arranjo atômico

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

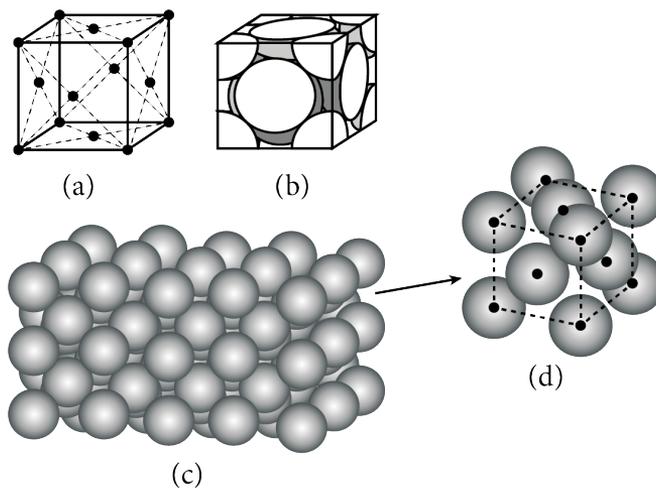


Figura 1.5 – Estrutura CFC: (a) representação esquemática com posições atômicas; (b) com esferas rígidas; (c) com empacotamento de células unitárias; e (d) com célula unitária isolada.

c) Microestrutura

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

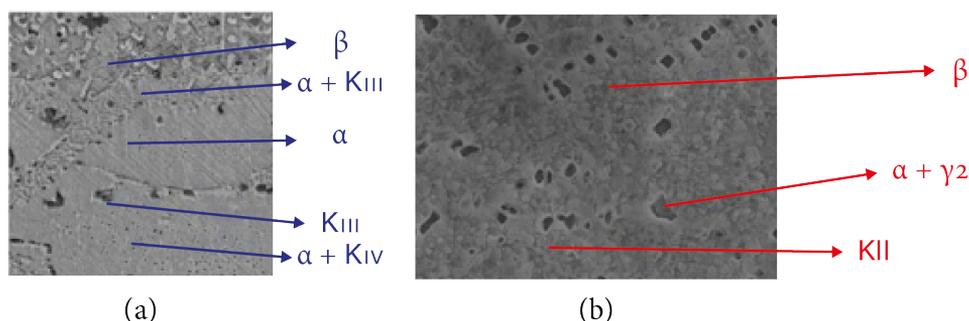


Figura 1.6 – Microestrutura de ligas de cobre (bronze-alumínio-níquel) obtida por microscopia eletrônica de varredura (MEV): (a) com 10% Al (em massa) e (b) com 14% Al (em massa), respectivamente.

d) Macroestrutura

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

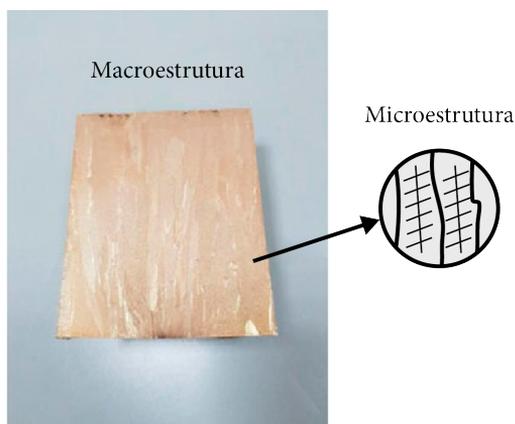


Figura 1.7 – Macroestrutura de liga de cobre em estado bruto de fusão em escala natural (imagem oriunda de estudos feitos em parceria entre o Centro de Pesquisas, Desenvolvimento e Ensaios da Termomecânica e o Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de São Paulo).

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

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



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

1.3.1 LIGAÇÕES METÁLICAS (ESTRUTURA ATÔMICA)

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

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

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

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

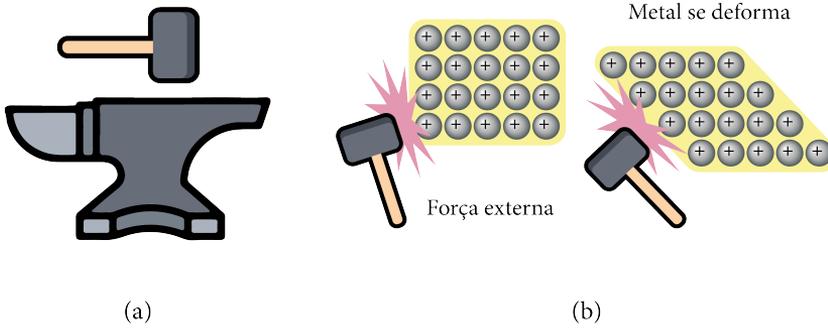


Figura 1.9 – (a) o golpe do martelo (b) força os cátions do material metálico a deslizar uns sobre os outros, gerando assim grande maleabilidade.

1.3.2 ESTRUTURAS CRISTALINAS E NÃO CRISTALINAS (AMORFAS)

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

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

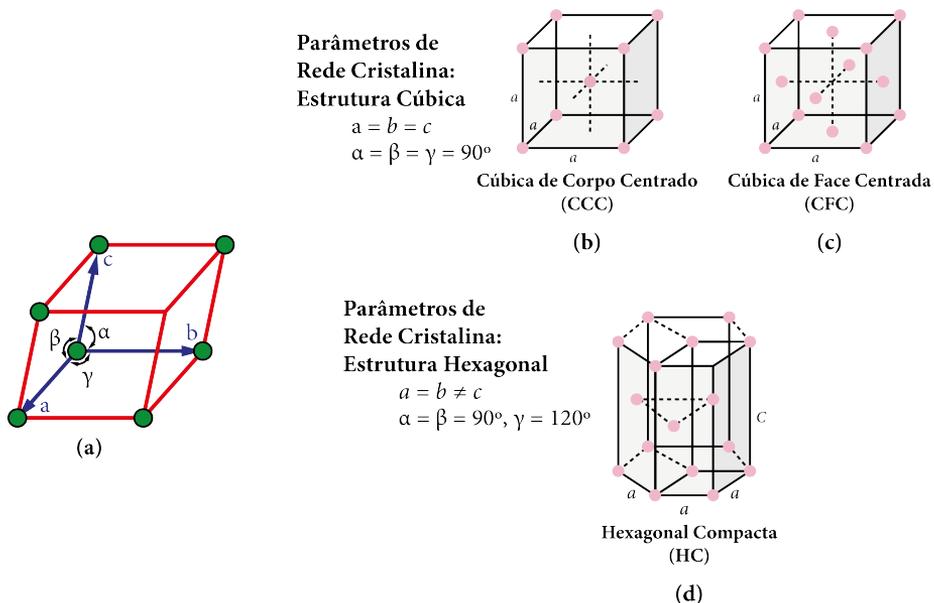


Figura 1.10 – (a) Parâmetros de rede cristalina e células unitárias: (b) CCC, (c) CFC e (d) HC.

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

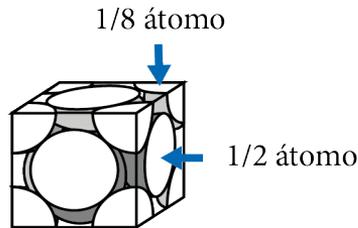


Figura 1.11 – Célula unitária tridimensional da estrutura cúbica de face centrada.

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

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

$$n = 4$$

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

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

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

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

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

Em que:

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

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

n = número de átomos da célula unitária;

V_e = volume da esfera (m^3);

R = raio atômico (m);

V_c = volume do cubo (m^3);

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

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

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

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

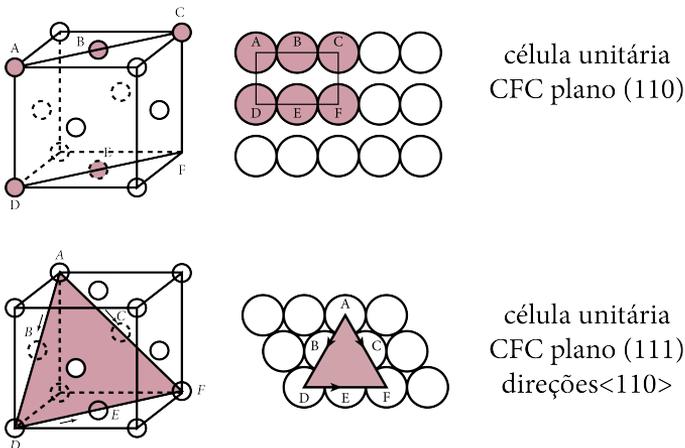


Figura 1.12 – Exemplos de planos e direções cristalográficas na estrutura cúbica de face centrada.

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

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

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

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

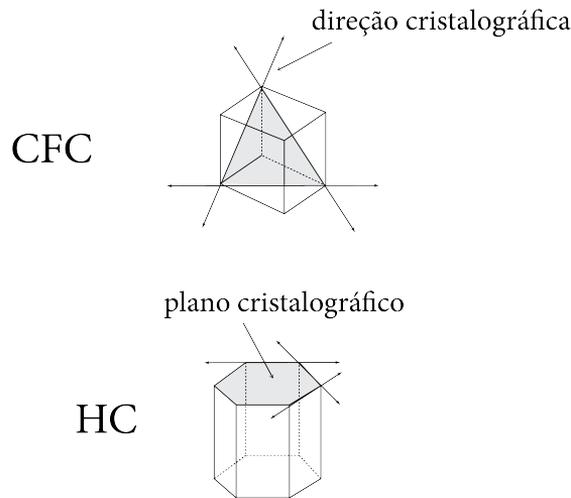


Figura 1.13 – Planos e direções de escorregamento de estruturas CFC e HC.

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

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

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

1.4 IMPERFEIÇÕES OU DEFEITOS CRISTALINOS EM METAIS

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

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

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

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

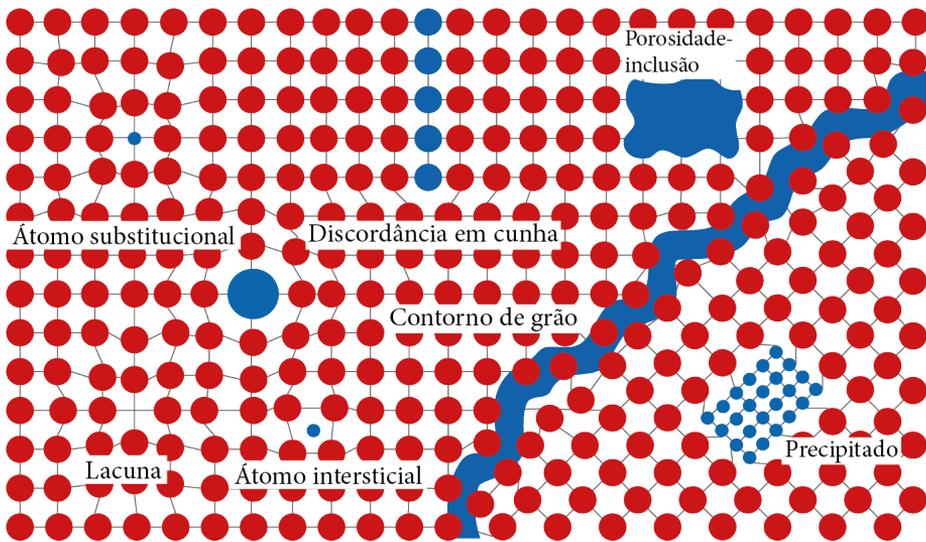


Figura 1.14 – Tipos de defeitos comuns em materiais metálicos.

1.4.1 DEFEITOS PONTUAIS

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

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

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

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

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

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

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

1.4.2 DEFEITOS LINEARES

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

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

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

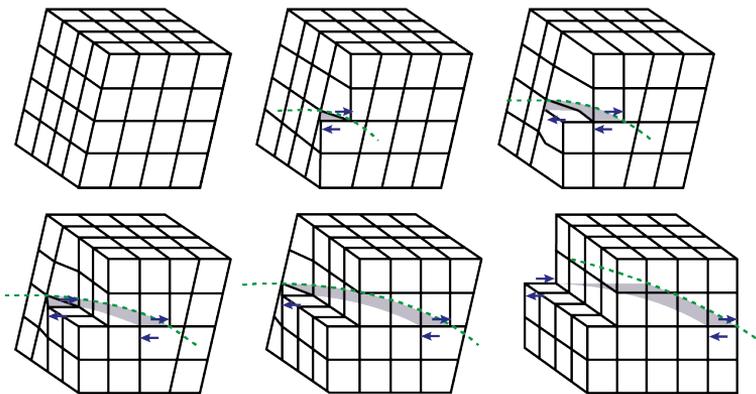


Figura 1.15 – Deformação plástica oriunda do escorregamento de discordâncias mistas. As setas mostram a direção da discordância, e as linhas tracejadas, a linha de discordância.

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

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

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

1.4.3 DEFEITOS INTERFACIAIS

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

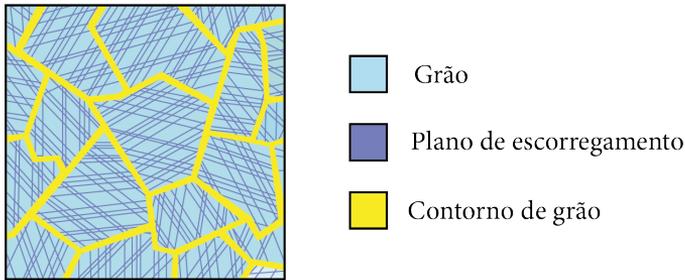
Os *contornos de grão* dividem o material em regiões com a mesma estrutura cristalina, mas com orientação cristalográfica diferente. Em engenharia, os materiais são geralmente policristalinos, constituídos por monocristais com diferentes orientações.

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

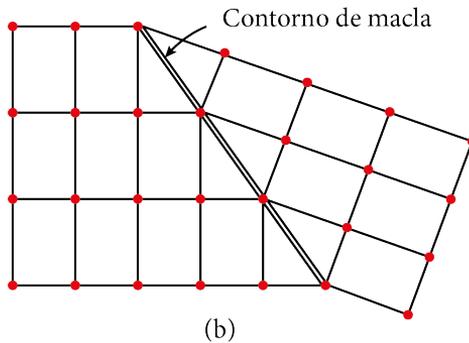
No interior do grão, todos os átomos estão arrançados com a mesma orientação, caracterizada pela célula unitária do material. Os contornos de grão são produzidos por processos de fabricação do material metálico, como aqueles que envolvem solidificação (fundição e soldagem por fusão, por exemplo).

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

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



(a)



(b)

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

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

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

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

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

1.4.4 DEFEITOS VOLUMÉTRICOS

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

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

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

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

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

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

1.5 PROPRIEDADES DO COBRE E SUAS LIGAS

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

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

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

1.5.1 PROPRIEDADES MECÂNICAS

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

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

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

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

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

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

1.5.2 PROPRIEDADES TÉRMICAS

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

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

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

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

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

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

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

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

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

Em que:

H = quantidade de energia térmica (J);

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

m = sua massa (kg);

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

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

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

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

Tabela 1.2 – Propriedades térmicas para alguns materiais de engenharia

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

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

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

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

1.5.3 PROPRIEDADES ELÉTRICAS

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

Tabela 1.4 – Materiais metálicos e % IACS

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

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

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

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

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

1.5.4 PROPRIEDADES MAGNÉTICAS

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

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

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

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

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

1.5.5 PROPRIEDADES QUÍMICAS

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

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

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

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

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

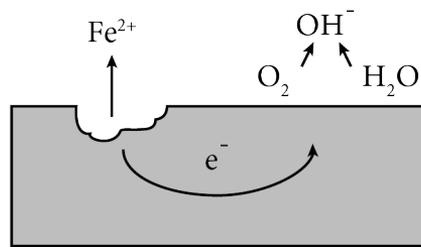


Figura 1.17 – Fenômeno de corrosão eletroquímica no ferro devido ao contato com água. Fonte: https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Fe_corrosion.PNG

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

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

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

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

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

1.5.6 PROPRIEDADES TECNOLÓGICAS

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

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

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

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

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

1.6 LIGAS DE COBRE

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

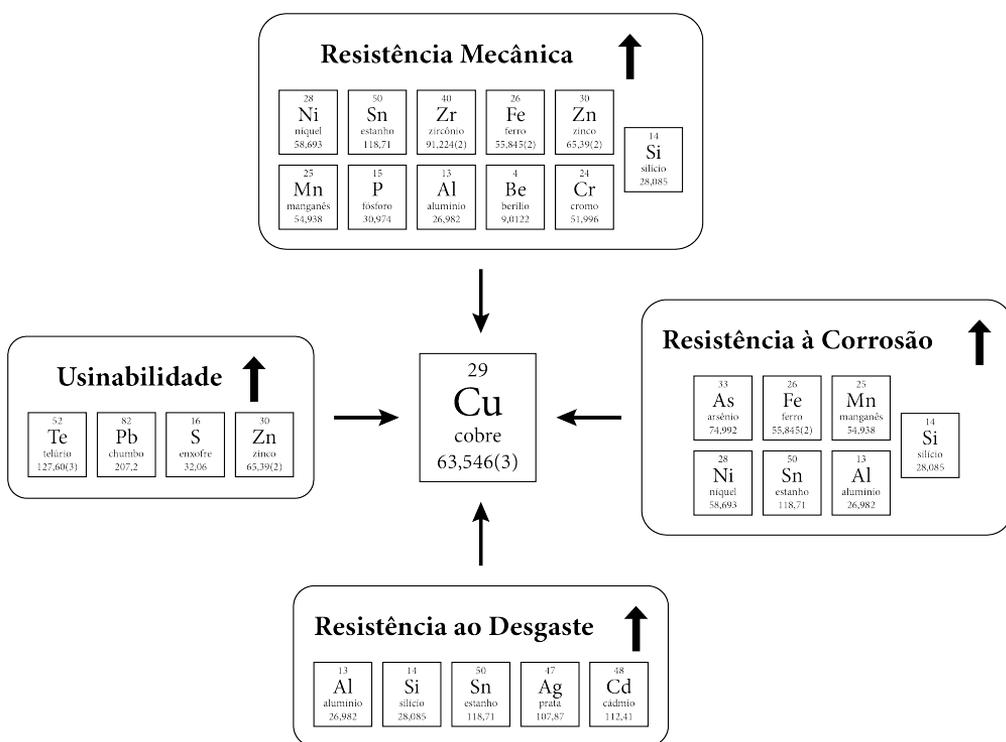


Figura 1.18 – Efeito da adição de diferentes elementos de liga ao cobre.

Entre esses elementos de liga, constam:

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

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

1.6.1 COBRE COMERCIALMENTE PURO E COBRE LIGADO

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

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

Cobre eletrolítico tenaz (ETP)

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

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

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

Cobre isento de oxigênio (Cu OF)

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

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

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

Cobre desoxidado com alto fósforo (DHP)

Especificação: mais conhecido como Cobre P122.

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

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

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

Cobre desoxidado com baixo fósforo (DLP)

Especificação: mais conhecido como Cobre Elétrico 103.

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

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

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

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

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

Ligas de alta condutividade elétrica

Cobre-prata (Cu-Ag)

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

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

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

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

Ligas de alta resistência mecânica

Cobre-cromo (Cu-Cr)

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

Aplicações: na construção elétrica em eletrodos de soldagem por resistência elétrica, chaves comutadoras e conectores. Na construção mecânica, é usado na fabricação de moldes e, em geral, em aplicações que exigem resistência mecânica e condutividade elétrica.

Cobre-zircônio (Cu-Zr)

Características: apresenta de 0,1% a 0,25% de zircônio, em massa, sendo isento de oxigênio e, portanto, não suscetível à fragilização por hidrogênio. Este cobre ligado possui propriedades semelhantes às do cobre-cromo, porém com níveis de resistência mecânica mais elevados, particularmente no que diz respeito à resistência ao amolecimento e à fluência. O limite de solubilidade do zircônio no cobre chega a 0,24%, em massa, sendo possível a aplicação do tratamento térmico de solubilização e envelhecimento, que proporciona o chamado endurecimento por precipitação. O tratamento térmico aumenta a condutividade elétrica, que pode atingir valores superiores a 90% IACS.

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

Ligas de alta usinabilidade

Cobre-telúrio (Cu-Te)

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

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

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

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

1.6.2 LIGAS DE COBRE

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

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

Latão

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

Exemplos:

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

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

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

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

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

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

Tomback 95/05

Especificação: liga UNS C21000 ou liga 210.

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

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

Tomback 90/10

Especificação: liga UNS C22000 ou liga 220.

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

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

Tomback 85/15

Especificação: liga UNS C23000 ou liga 230.

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

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

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

Curiosidade

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

Latão com 30% de zinco

Especificação: liga UNS C26000 ou liga 260.

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

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

Latão com 33% de zinco

Especificação: liga UNS C26800 ou liga 268.

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

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

Aplicações: similares às do latão 70/30.

Latões de 35% a 37% de zinco

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

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

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

Latão com 40% de zinco

Especificação: liga UNS C28000 ou liga 280.

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

Aplicações: fabricação de placas, barras e perfis; na arquitetura, em seções estruturadas e painéis espessos; na indústria química, em placas de tubos de condensadores e trocadores de calor e componentes mecânicos fabricados por forjamento.

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

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

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

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

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

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

Latão chave

Especificação: liga UNS C35000 ou liga 350.

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

Aplicações: principalmente na fabricação de chaves.

Latão forja

Especificação: liga UNS C37700 ou liga 377.

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

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

Latões especiais

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

Latão aluminado

Especificação: liga UNS C68700 ou liga 687.

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

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

Latão naval

Especificação: liga UNS C46400 ou liga 464.

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

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

Bronzes

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

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

Bronze fosforoso

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

Bronze fosforoso 511

Especificação: liga UNS C51100 ou liga 511.

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

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

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

Bronze fosforoso 510

Especificação: liga UNS C51000 ou liga 510.

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

Aplicações: similares às da liga 511; na fabricação de ganchos de chapas de revestimento, tubos para condução de águas ácidas, componentes para a indústria têxtil, química e de papel, molas condutoras e componentes de interruptores e tomadas, molas e diafragmas, parafusos, rebites, porcas, escovas, tubos de manômetros, varetas e eletrodos de soldagem.

Bronze fosforoso 519

Especificação: liga UNS C51900 ou liga 519.

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

Aplicações: na fabricação de tubos de condução de águas ácidas, componentes para as indústrias química, têxtil e de papel; na construção elétrica, para molas condutoras e componentes de interruptores; na construção mecânica, em molas e membranas, escovas, tubos de manômetros, engrenagens, componentes de bombas e eletrodos de soldagem. As ligas 510 e 519 também são utilizadas em conectores elétricos que atuam em aplicações que exigem o efeito “mola”.

Bronze Fosforoso 521

Especificação: liga UNS C52100 ou liga 521.

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

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

Bronze de alto chumbo para mancais

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

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

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

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

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

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

Cuproníqueis (Cu-Ni)

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

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

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

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

Cobre-níquel-zinco (Cu-Ni-Zn)

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

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

Ligas especiais de cobre

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

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

Cobre-alumínio (Cu-Al)

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

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

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

Cobre-silício (Cu-Si)

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

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

REFERÊNCIAS

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

CAPÍTULO 2

Caracterização aplicada ao cobre e suas ligas

2.1 GENERALIDADES

Os ensaios dos materiais consistem em técnicas adotadas para determinar suas características, suas propriedades e seus comportamentos. É essencial a padronização dos ensaios aplicados aos materiais para que haja uma linguagem comum entre seus fornecedores e usuários. Dessa forma, os ensaios dos materiais são procedimentos padronizados que compreendem testes, cálculos, gráficos e consultas a tabelas, em conformidade com normas técnicas nacionais e internacionais que regem o enquadramento dos materiais nos limites mecânicos, elétricos e microestruturais.

Os ensaios dos materiais podem ser agrupados em duas categorias:

- 1) *Integridade do material*, podendo ser classificados como destrutivos e não destrutivos. Os *ensaios destrutivos* são ensaios mecânicos que causam a inutilização parcial ou total da peça ou componente analisado. Incluem tração, compressão, dureza, flexão, fadiga, impacto e fluência. Os *ensaios não destrutivos* não comprometem a integridade da peça ou componente e incluem líquidos penetrantes, raios X e ultrassom.
- 2) *Velocidade de aplicação da carga*, podendo ser classificados como estáticos, dinâmicos e com carga constante. Nos *ensaios estáticos*, a carga é aplicada de forma lenta. Os ensaios de tração, compressão, flexão, torção e dureza são estáticos. Nos *ensaios dinâmicos*, a carga é aplicada de forma rápida ou cíclica, e isso ocorre nos ensaios de impacto e de fadiga, por exemplo. O ensaio de fluência é um exemplo de *ensaio com carga constante*, que é aplicada durante um longo período.

Na sequência, são abordados os ensaios e as análises mais importantes adotados pela indústria metalomecânica, que são utilizados na classificação e na seleção do cobre e suas ligas, sendo eles os ensaios destrutivos e os não destrutivos. O ensaio de dureza será incluído na categoria de destrutivos, embora não inutilize a peça ensaiada em determinados casos.

2.2 ENSAIOS DESTRUTIVOS

Na área da metalomecânica, seja para o projeto e a produção de pequenos ou grandes componentes, é imprescindível o conhecimento do comportamento do material a ser utilizado, de suas propriedades mecânicas em várias condições de aplicação. Tais condições envolvem, entre outras, a temperatura, o tipo de cargas e sua frequência de aplicação, o desgaste e a conformabilidade. Para que seja possível prever o comportamento do material em condições de trabalho é necessário obter os parâmetros de comportamento, determinados por meio de ensaios mecânicos destrutivos.

No caso específico do comportamento mecânico, as peças ou os componentes têm de ser projetados e fabricados com os requisitos necessários para suportar solicitações de esforços em condições de trabalho. Para saber se os materiais apresentam tais requisitos, faz-se uso, por exemplo, dos ensaios mecânicos de tração, impacto, fadiga, fluência e dureza. Além desses, são abordados os ensaios de fabricação, que, como o próprio nome diz, estão intimamente relacionados a processos de fabricação.

O cobre e suas ligas são materiais dúcteis, sendo, portanto, viáveis para processos de fabricação mecânica que conformam por deformação plástica e podem ser realizados em temperatura ambiente e em altas velocidades. Dessa forma, o ensaio de tração é uma ferramenta importante para determinar importantes propriedades mecânicas desses materiais de engenharia.

2.2.1 ENSAIO DE TRAÇÃO

Os comportamentos elástico e plástico dos materiais de engenharia podem ser avaliados pelo ensaio de tração, que é um dos ensaios mecânicos mais importantes e utilizados na indústria para a caracterização mecânica em função da sua praticidade, com boa reprodutividade e fácil realização.

Esse ensaio é bastante utilizado como teste para o controle das especificações de entrada e saída dos materiais nos processos de fabricação. É importante destacar que os resultados fornecidos pelo ensaio de tração são influenciados pela temperatura, pela velocidade de deformação, pela anisotropia do material, pelo tamanho de grão e pela porcentagem de impurezas, bem como por condições ambientais, fatores impostos pelas variações presentes nos processos de manufatura.

Na Figura 2.1 é apresentada uma ilustração do mecanismo utilizado para a realização do ensaio de tração, que consiste na aplicação de uma carga uniaxial crescente em um corpo de prova específico até a ruptura.

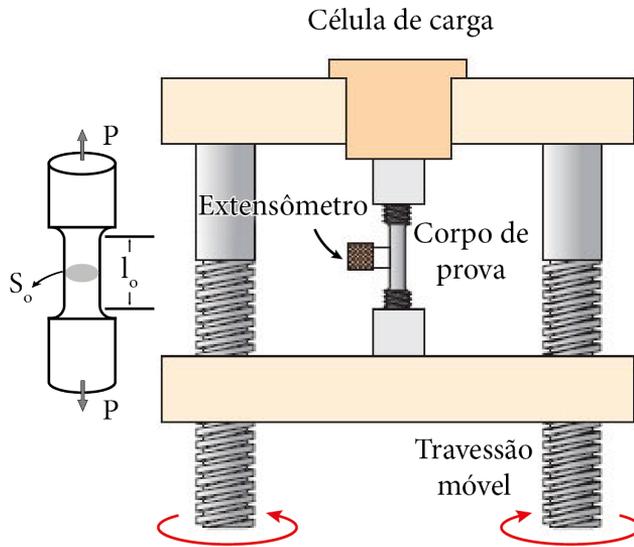


Figura 2.1 – Esquema ilustrativo do mecanismo de ensaio de tração.

Esse tipo de ensaio utiliza corpos de prova, cujos aspectos geométricos são definidos em normas técnicas, como a ASTM E8 (*Standard Test Methods for Tension Testing of Metallic Materials*). Parâmetros como velocidade e temperatura do ensaio e as dimensões do corpo de prova são padronizados sob a norma adotada, uma vez que há peculiaridades entre os materiais – elastômero requer uma velocidade de ensaio superior ao cobre, por exemplo.

No ensaio de tração, mede-se a variação no comprimento (Δl) como função da carga trativa (P) aplicada ao corpo de prova, representado na Figura 2.2a. No Sistema Internacional de Unidades (S.I.), utiliza-se como unidade de medida o newton (N) para carga (P) e o metro (m) para a variação de comprimento (Δl). Os resultados de $P \times \Delta l$ são transformados em gráficos de tensão (σ) \times deformação (ϵ) de engenharia, como podemos observar na Figura 2.2b.

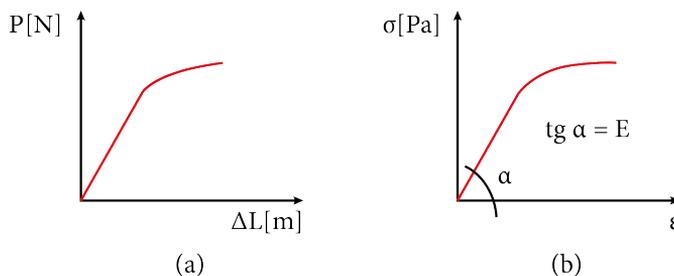


Figura 2.2 – (a) Curva carga (P) \times variação do comprimento (Δl) e (b) curva tensão (σ) \times deformação (ϵ) de engenharia.

A *tensão de engenharia* (σ) está representada na Equação 2.1, que se refere à tensão normal, podendo ser para tração (+) ou compressão (-).

$$\sigma = \frac{P}{S_0} \quad (2.1)$$

Em que:

σ = tensão (N/mm²);

P = carga aplicada (N); e

S_0 = seção transversal inicial (mm²).

A *deformação de engenharia* (ϵ) é dada por:

$$\epsilon = \frac{l - l_0}{l_0} = \frac{\Delta l}{l_0} \quad (2.2)$$

Em que:

ϵ = deformação (adimensional);

l_0 = comprimento inicial de referência (carga zero) (m); e

l = comprimento de referência para cada carga P aplicada (m).

O levantamento da curva tensão de tração pela deformação sofrida pelo corpo constitui o resultado do teste de tração. Na Figura 2.3, é mostrado o esboço da curva típica obtida no ensaio de tração de um corpo de prova padrão, de um material metálico dúctil com limite de escoamento nítido. É possível notar as regiões elástica e plástica no corpo de prova até a ruptura no ponto F.

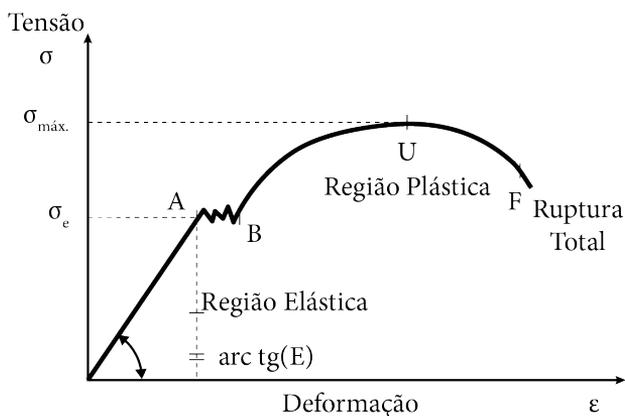


Figura 2.3 – Curva tensão (σ) x deformação (ϵ) de engenharia de um metal dúctil com limite de escoamento nítido.

Por meio da relação tensão-deformação de engenharia representada na Figura 2.3, nota-se que a deformação é proporcional à carga, se esta não exceder a tensão que compreende o limite elástico. Essa relação é conhecida como lei de Hooke e é frequentemente explicitada em termos de *tensão proporcional à deformação*, definindo uma dependência linear entre a carga e a deformação.

A lei de Hooke pode ser considerada válida abaixo da tensão de escoamento (σ_e). A *tensão de escoamento* ou *limite de escoamento* é o nível de tensão em que a deformação plástica tem início. Abaixo desse nível, a tensão média é proporcional à deformação média, ou seja:

$$\sigma = E\varepsilon \quad (2.3)$$

Em que E é uma constante, denominada *módulo de elasticidade longitudinal*, *módulo de Young* ou *módulo de rigidez*, cuja unidade usual é GPa . Esse módulo auxilia a determinar a propriedade mecânica denominada rigidez.

As curvas tensão-deformação de engenharia de alguns aços e outros materiais exibem uma transição elastoplástica muito bem definida, que ocorre de forma abrupta no que é conhecido por *fenômeno do pico de escoamento descontínuo*. Neste caso, o ponto limite de escoamento pode ser nítido, como apresentado na curva da Figura 2.3.

O cobre e suas ligas são materiais metálicos com grande ductilidade que experimentam transição elastoplástica gradual, cujo limite de escoamento é imperceptível, como exemplificado na Figura 2.4. Nesse caso, convencionou-se adotar uma deformação padrão (ou pré-deformação) que corresponda ao limite de escoamento. O valor da deformação padrão para o cobre e suas ligas é 0,5% ($\varepsilon = 0,005$). O limite de escoamento, algumas vezes chamado de *limite de proporcionalidade*, representado no ponto 1 da Figura 2.4, pode ser determinado como o ponto onde ocorre o afastamento inicial da linearidade da curva tensão-deformação de engenharia. Em tais casos, a posição deste ponto pode não ser determinada com precisão; como consequência, foi estabelecida uma convenção na qual uma linha reta é construída paralelamente à porção elástica da curva tensão-deformação, a partir de uma pré-deformação específica de 0,5 %, no caso do cobre e suas ligas. A tensão que corresponde à intersecção dessa linha com a curva tensão-deformação, à medida que esta última se inclina em direção à região plástica, é definida como o *limite de escoamento* (LE), representado no ponto 2 da Figura 2.4. As unidades da tensão limite de escoamento são MPa, psi e ksi.

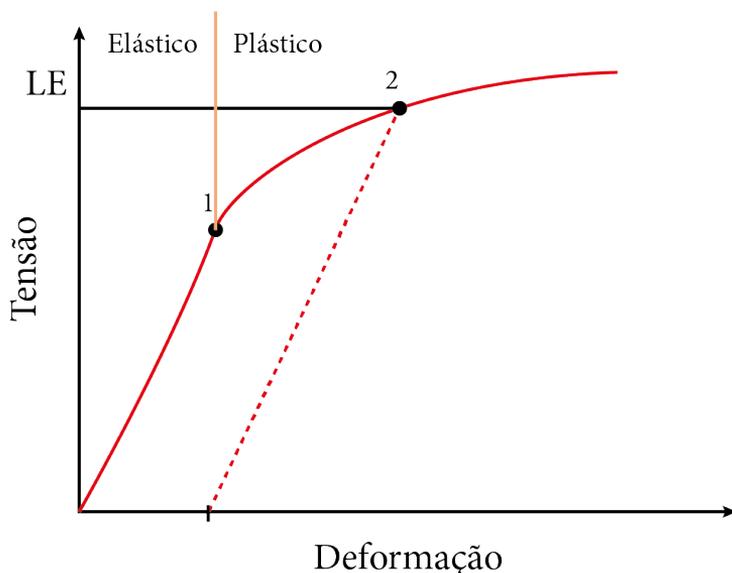


Figura 2.4 – Obtenção do limite de escoamento (LE) com a adoção da pré-deformação de 0,5%.

Após o escoamento, a tensão necessária para continuar a deformação plástica em metais aumenta até um valor máximo, ponto U da Figura 2.3 e então diminui até a fratura (ou ruptura) do material, ponto F da Figura 2.3. A resistência à tração ou tensão máxima ($\sigma_{m\acute{a}x}$) ou *limite de resistência à tração* (LRT) é a carga máxima ($P_{m\acute{a}x}$) dividida pela área da seção reta transversal inicial do corpo de prova, representada pela Equação 2.4.

$$\sigma_{m\acute{a}x} = \frac{P_{m\acute{a}x}}{S_0} \quad (2.4)$$

O limite de resistência à tração corresponde à tensão máxima que pode ser sustentada por uma peça ou um componente que se encontra sob tração. Toda deformação até esse ponto é uniforme ao longo da região estreita. Além de definir a elasticidade, a plasticidade e a rigidez do material, a curva tensão-deformação do ensaio de tração permite analisar se o material ensaiado é dúctil ou frágil, assim como outras propriedades, por exemplo resiliência, tenacidade e maleabilidade.

A resistência à tração é o valor mais frequentemente citado dos resultados de um ensaio de tração, apesar de, na realidade, ser um valor pouco fundamental em relação à resistência do material. Para materiais dúcteis, a resistência à tração deveria ser considerada uma medida da carga máxima que um metal pode suportar com as condições muito restritas de carregamento uniaxial, porém esse valor possui pouca relação com a resistência útil do metal sob condições mais complexas de tensão normalmente encontradas. Já para materiais frágeis, a resistência à tração é um critério válido para projetos.

Normalmente, quando a resistência de um metal é citada para fins de projeto, a tensão limite de escoamento é o parâmetro utilizado. Esse é o caso, pois, quando a tensão correspondente ao limite de resistência à tração chega a ser aplicada, com frequência a estrutura já experimentou tanta deformação plástica que já se tornou inútil. Além disso, normalmente as resistências à fratura não são especificadas para fins de projetos de engenharia. A resistência à fratura corresponde à tensão aplicada quando há ocorrência da fratura.

Em termos de processos por conformação mecânica, o LE e o LRT do cobre e suas ligas são informações tecnológicas muito importantes. Ambos compreendem o intervalo entre o início do escorregamento das discordâncias, determinado pelo limite de escoamento, e o início do empescoamento (estricção localizada), determinado pelo limite de resistência à tração. Por exemplo, na trefilação do cobre e suas ligas, ocorre a tração do material em trabalho a frio, envolvendo deformação plástica e encruamento do material processado e com a necessidade de evitar a formação do pescoço, o que inviabilizaria o processo.

Curiosidade

Por muitos anos, foi costume basear a resistência de peças na resistência à tração, adequadamente reduzida por um fator de segurança. A tendência atual é uma aproximação mais racional, a fim de basear o projeto estático de metais dúcteis na tensão de escoamento. Entretanto, devido à longa prática do uso da resistência à tração para determinar a resistência dos materiais, ela se tornou uma propriedade muito familiar e, como tal, é uma identificação muito útil de um material, da mesma maneira que a composição química para identificar um metal ou uma liga. Além do mais, por ser uma propriedade bem reproduzível e de fácil obtenção, ela é útil para fins de especificações e controle de qualidade de um produto.

Lobo *et al.* (2022) desenvolveram uma pesquisa sobre a influência de diferentes temperaturas durante o tratamento térmico na microestrutura e propriedades mecânicas de um bronze de manganês. Nesse trabalho, o ensaio de tração foi utilizado para mostrar a influência da temperatura adotada no tratamento térmico sobre o comportamento mecânico da liga, e foi possível notar a influência do aumento da temperatura na diminuição da resistência mecânica e no aumento da ductilidade do material. É importante destacar que a temperatura do tratamento térmico influencia na microestrutura resultante da liga de cobre estudada, o que, por sua vez, afeta o ensaio de tração, conforme citado no início deste capítulo.

Os autores utilizaram em sua pesquisa os resultados de tensão-deformação de engenharia de treze corpos de prova, incluindo o denominado como referência, processado com 34% de trabalho a frio. Todos os corpos de prova sofreram fratura no centro do comprimento útil. Na Figura 2.5, pode-se observar o efeito da temperatura no formato das curvas tensão-deformação de engenharia do bronze de manganês.

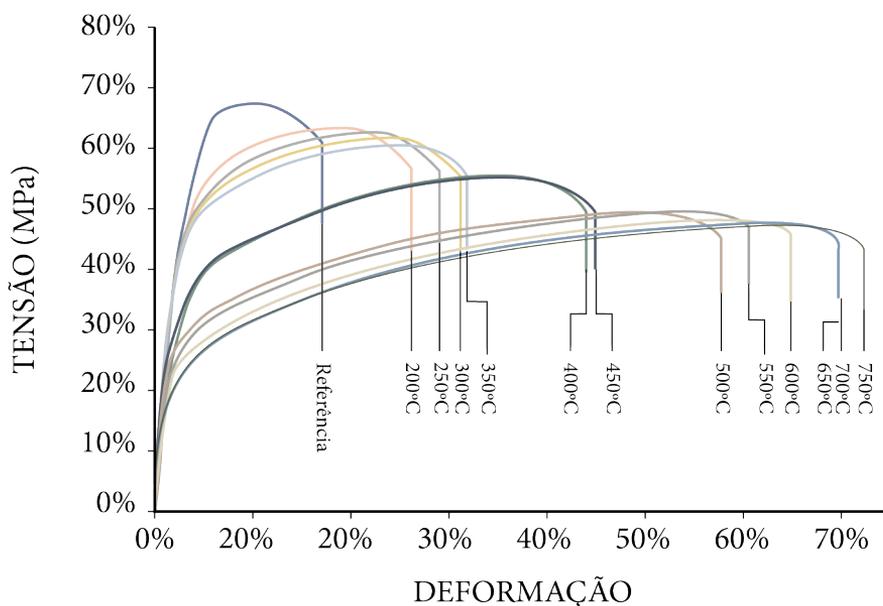


Figura 2.5 – Curvas tensão (σ) x deformação (ε) de engenharia em função da temperatura para o bronze de manganês. (Lobo *et al.*, 2022)

Tecnologicamente, as curvas tensão-deformação de engenharia de 200 a 350 °C, mostradas na Figura 2.5, representam a faixa de temperatura de trabalho na qual o processo de recuperação ocorre; no entanto, o grau de endurecimento por deformação é consideravelmente menor do que aquele obtido em trabalho a frio. Provavelmente, as curvas tensão-deformação convencionais de 350 a 750 °C representam o trabalho a quente, que envolve deformação acima da temperatura de recristalização do material, implicando em ganho de ductilidade do material e menor resistência mecânica.

Entretanto, apesar de sua importância tecnológica para determinar as propriedades mecânicas dos materiais submetidos ao ensaio mecânico, a curva tensão-deformação de engenharia (ou convencional) não apresenta uma informação real das características de tensão e deformação do material, porque se baseia nas dimensões iniciais do corpo de prova, as quais são continuamente modificadas durante o ensaio. No caso da adoção das dimensões instantâneas do corpo de prova durante a realização do ensaio, a curva tensão-deformação gerada pode ser denominada como real, verdadeira (ambas sendo as mais comuns), natural ou efetiva. Um esboço comparativo da curva tensão-deformação real e convencional está apresentado na Figura 2.6, destacando que o ensaio foi realizado em temperatura ambiente.

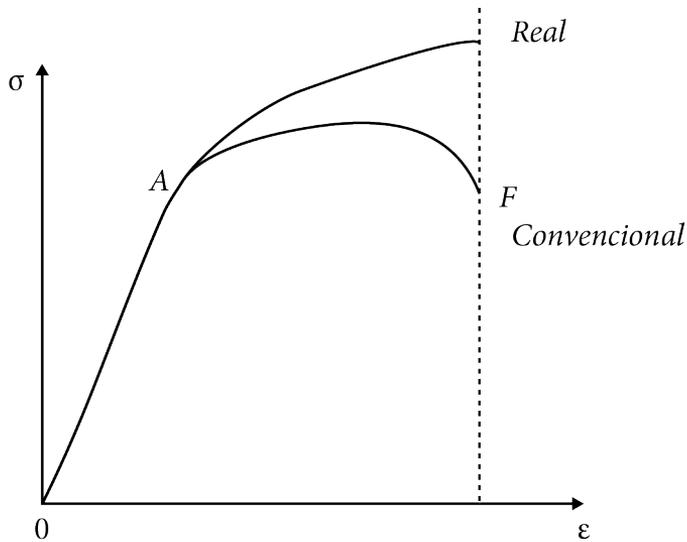


Figura 2.6 – Representação esquemática da curva tensão-deformação real e convencional de um material metálico. (Garcia et al., 2012)

A tensão real (σ_r) é dada por:

$$\sigma_r = \frac{P}{S} \quad (2.5)$$

Em que:

P = carga (N); e

S = área da seção transversal instantânea (m^2).

Como nesse caso se avalia a variação de S em cada instante do ensaio, a região plástica fica mais bem caracterizada, já que não se adota mais a seção transversal inicial como referência, e a tensão cresce continuamente até a fratura.

A deformação real (ϵ_r) é dada como função da variação infinitesimal da deformação e é definida por:

$$d_{er} = \frac{dl}{l} \quad (2.6)$$

A Equação 2.6 é válida para uma deformação uniaxial uniforme. A deformação é dada pela integração da Equação 2.6 dentro dos limites inicial (l_0) e instantâneo (l):

$$\varepsilon_r = \int_{l_0}^l \frac{dl}{l} = \ln \frac{l}{l_0} \quad (2.7)$$

Essa expressão não é aplicável entre o trecho UF (campo plástico não uniforme) do diagrama tensão-deformação mostrado na Figura 2.3, e assim ε_r deve variar entre os limites 0 e $\varepsilon_{\text{máx}}$, que corresponde a uma deformação no ponto U do diagrama, onde ocorre a instabilidade plástica do material. Para que se possa avaliar a deformação nessa região, é preciso analisar outras direções além da de aplicação de carga. Como o volume permanece constante na região plástica, desprezando variações elásticas (volume $V =$ volume inicial V_0), pode-se escrever:

$$S \cdot l = S_0 \cdot l_0 = \text{constante} \quad (2.8)$$

Ou

$$Sdl + ldS = 0 \quad (2.9)$$

Rearranjando, tem-se:

$$\frac{dl}{l} = -\frac{dS}{S} \rightarrow \int_0^\varepsilon d\varepsilon = \frac{dS}{S} \quad (2.10)$$

Ou

$$\varepsilon_r = \ln \frac{S_0}{S} \quad (2.11)$$

Ressalta-se que a Equação 2.11 não é aplicável na região elástica, já que o volume não permanece constante durante o tracionamento no campo elástico. Em função da sua relevância em termos de comportamento plástico, a curva tensão-deformação real é adotada em cálculos voltados para a conformação plástica e traduzida pela seguinte relação na região plástica (AU), também conhecida como curva de escoamento:

$$\sigma_r = k \varepsilon_r^n \quad (2.12)$$

Em que k é igual ao coeficiente de resistência, que quantifica o nível de resistência que o material pode suportar (Pa), e n é igual ao coeficiente de encruamento, que representa a capacidade com que o material distribui a deformação (adimensional). Ambos os coeficientes são características particulares do material, embora possam ser modificados pela ação de tratamentos térmicos e/ou químicos.

2.2.2 ENSAIO DE COMPRESSÃO

Refere-se ao ensaio mecânico em que se aplica uma carga que comprime um corpo de prova entre duas placas, sendo uma móvel e outra fixa (a mesa), conforme ilustrado na Figura 2.7a. Em termos mecânicos, trata-se do mesmo princípio aplicado na conformação mecânica do forjamento livre. À medida que o corpo de prova é comprimido, sua altura é reduzida e sua seção transversal aumenta. A tensão de engenharia também está representada na Equação 2.1, referindo-se à tensão normal.

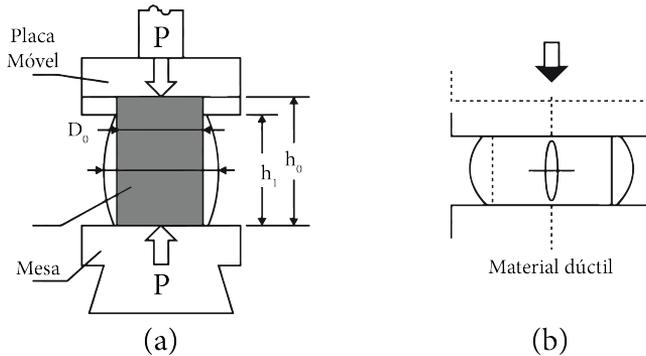


Figura 2.7 – (a) Ensaio de compressão e (b) comportamento dúctil.

A deformação de engenharia (ϵ) é dada por:

$$\epsilon = \frac{h - h_0}{h_0} = \frac{\Delta h}{h_0} \quad (2.13)$$

Em que:

ϵ = deformação (adimensional);

h_0 = altura inicial inicial de referência (carga zero) (m); e

h = altura de referência para cada carga P aplicada (m).

O forjamento de metais dúcteis como o cobre e suas ligas em matriz aberta é um exemplo de operação em que o material apresenta comportamento similar ao mostrado na Figura 2.7b, ocorrendo o efeito de *embarrilamento*, em função do fluxo livre do material na região central e do atrito entre o material e as placas (superior e inferior). A compressão direta ou indireta em conformação de metais é muito mais comum do que operações envolvendo a tração do material. A laminação e a extrusão são outros exemplos de processos de manufatura que envolvem compressão, e até mesmo a trefilação apresenta compressão indireta entre a fieira e o material durante o processamento. O ensaio de compressão é influenciado pelas mesmas variáveis do ensaio de tração.

2.2.3 ENSAIO DE DUREZA

A dureza de um material é definida como sua resistência a uma deformação plástica localizada, à impressão (indentação) permanente. O material com boa dureza geralmente é resistente ao riscamento e ao desgaste. Para muitas aplicações em engenharia, a dureza é uma propriedade mecânica importante do cobre e suas ligas. O tipo de têmpera adotado no processamento desses materiais determina seu nível de dureza.

Os ensaios de dureza são realizados com mais frequência que qualquer outro ensaio destrutivo, em função dos baixos custos, da rapidez e da conveniência, gerando apenas uma pequena impressão, além da existência de forte correlação entre a dureza e a resistência mecânica. Os resultados de dureza podem variar em função de tratamentos aplicados ao material, como tratamentos térmicos e mecânicos, temperatura e condições superficiais.

A escala Mohs compreende um sistema qualitativo construído unicamente em função da habilidade de um material riscar outro mais dúctil, variando de 1 para o talco (menor dureza da escala), até 10 para o diamante (maior dureza). Trata-se de um dos primeiros ensaios de dureza, baseado em minerais naturais. Com o passar dos anos, foram desenvolvidas técnicas quantitativas de dureza, em que um pequeno penetrador (ou indentador) padronizado é forçado contra a superfície de um material a ser testado, sob condições controladas de carga e de taxa de aplicação. O equipamento que permite a realização desse ensaio é o durômetro. A profundidade ou o tamanho da impressão resultante é medida e então relacionada a um número de dureza; quanto mais dúctil for o material, maior e mais profunda será a impressão, e menor será o índice de dureza.

Há uma variedade de ensaios de dureza devido à alteridade de valores encontrados em diferentes materiais, em que cada tipo de ensaio é mais apropriado para determinada faixa de dureza. Os ensaios de dureza abordados nesta obra são Brinell, Rockwell, Vickers e Knoop, representados na Figura 2.8. Entretanto, é necessário destacar que as durezas medidas são apenas relativas (em vez de absolutas), e deve-se tomar cuidado ao comparar valores determinados por técnicas diferentes.

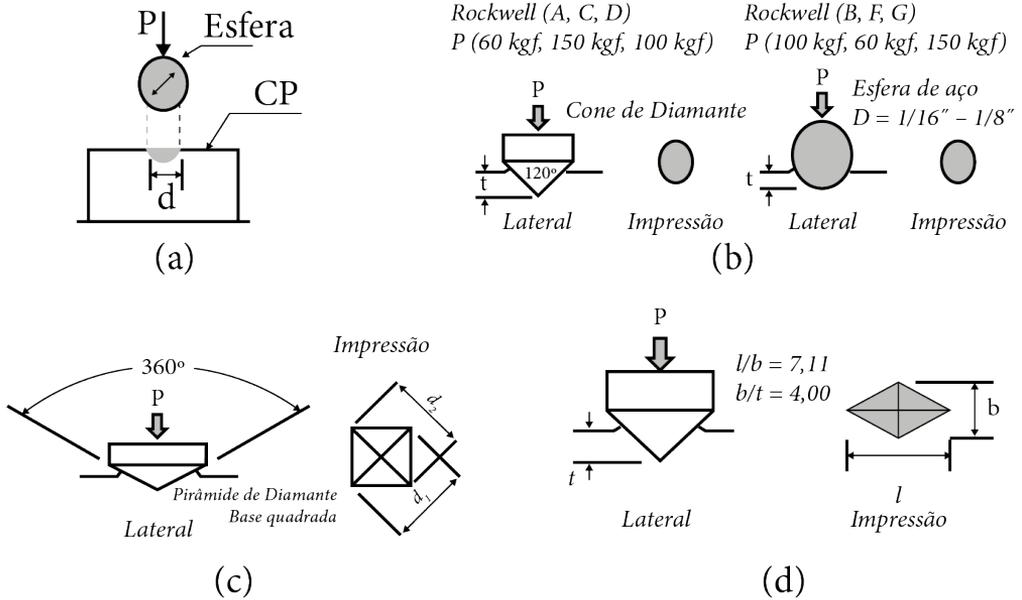


Figura 2.8 – Ensaios de dureza: (a) Brinell, (b) Rockwell, (c) Vickers e (d) Knoop.

O ensaio de dureza Brinell foi proposto inicialmente em 1900 pelo engenheiro sueco James A. Brinell e é com frequência empregado para o ensaio de metais e não metais de baixa ou média dureza. Nesse teste, representado na Figura 2.8a, pressiona-se uma esfera de aço endurecido (ou metal duro) de 10 mm de diâmetro contra a superfície de um corpo de prova (CP) utilizando uma carga de 500, 1500 ou 3000 kgf. A impressão gerada tem o formato de uma calota esférica. A carga é dividida pela área da impressão para obter o número de dureza Brinell (HB, do inglês *Hardness Brinell*) por meio da seguinte equação:

$$HB = \frac{2P}{\pi D(D - \sqrt{D^2 - d^2})} \tag{2.14}$$

Em que:

P = carga de penetração (kgf);

D = diâmetro da esfera (mm); e

d = diâmetro da impressão sobre a superfície (calota esférica) (mm).

Em termos de comparação, o ensaio de tração fornece dados mais confiáveis sobre o comportamento mecânico do material do que o ensaio de dureza. O número de dureza Brinell tem unidades em termos de tensão em kgf/mm², mas em geral as unidades são normalmente omitidas ao expressá-lo. Multiplicando o número de dureza Brinell por

0,102, ele pode ser expresso em termos de tensão em Pa, o que permite estabelecer relação entre dureza Brinell e limite de resistência à tração (LRT, em MPa) da seguinte forma:

$$LRT = \alpha \cdot HB \quad (2.15)$$

Em que α é igual à constante experimental, que depende do material. Por exemplo, o seu valor é 5,2 para o cobre recozido. A tendência é que o valor de α aumente para as ligas de cobre.

Entretanto, há uma restrição: não se aplica essa relação para durezas Brinell superiores a 380, pois a dureza passa a crescer de forma mais rápida que o LRT. Para materiais com dureza acima de 500 HB, utiliza-se a esfera de metal duro, uma vez que a esfera de aço endurecido experimenta deformação elástica que compromete a precisão da medida; além disso, são utilizadas cargas mais elevadas (1500 e 3000 kgf). Em função de diferenças nos resultados para cargas diferentes, considera-se uma boa prática indicar a carga utilizada no ensaio quando se mencionam as leituras do número de dureza Brinell.

Nascimento *et al.* (2019) realizaram uma pesquisa sobre a influência do processo de solidificação unidirecional em dois bronzes de alumínio, sendo um deles uma liga identificada como Cu10Al, que continha 10% em massa de alumínio, e a outra Cu14Al, que possuía 14%. Os dados obtidos no ensaio de dureza são mostrados na Figura 2.9. Baseando-se nas equações experimentais que correlacionam os valores de dureza Brinell (HB) com os valores da distância da superfície de extração de calor (P) e com os valores da taxa de resfriamento (T_R), é possível predeterminar o desempenho das duas ligas em termos de dureza, em função das mudanças de condições de resfriamento durante a solidificação desses materiais.

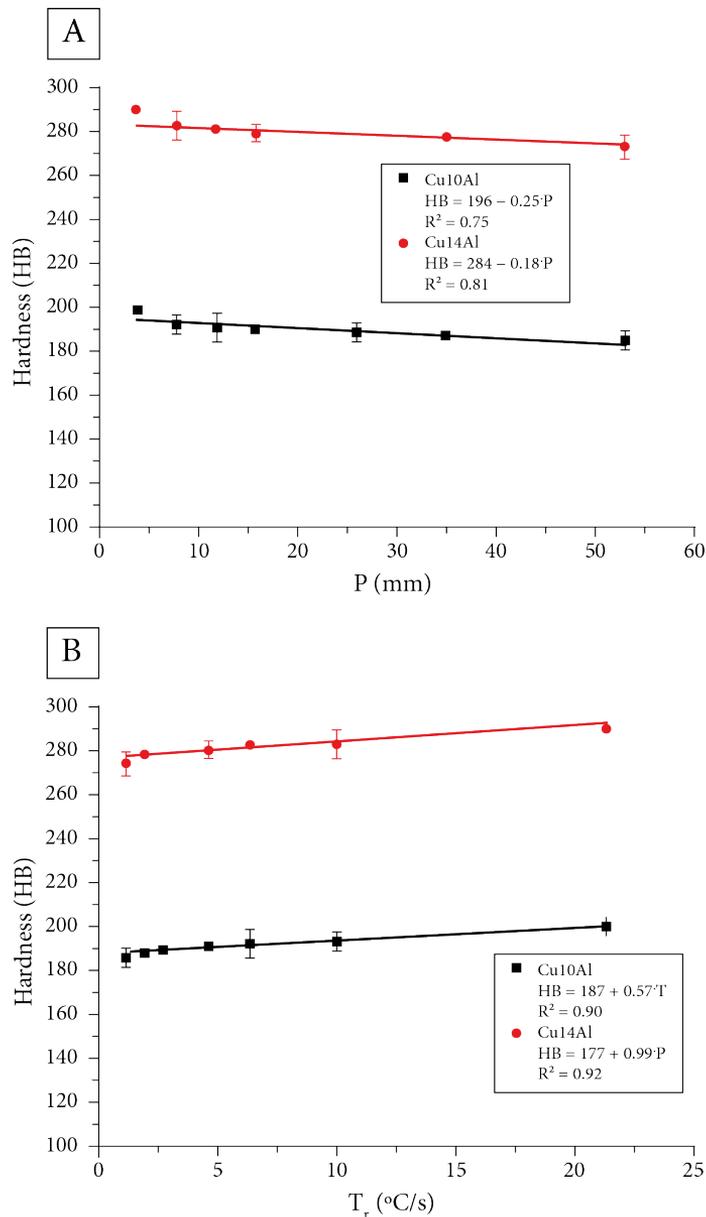


Figura 2.9 – Comparação de dois bronzes de alumínio submetidos ao processo de solidificação unidirecional ascendente, (a) resultados dos valores de dureza em função da posição e (b) resultados de dureza em função da taxa de resfriamento.

Em termos de comparação, a liga Cu14Al apresenta valores mais elevados de dureza do que a liga Cu10Al, sugerindo que o aumento de teor de alumínio influencia essa propriedade mecânica. Vale destacar que o alumínio apresenta massa específica menor que o cobre, o que deixa mais leve a liga com maior teor de alumínio.

O ensaio de dureza Rockwell, representado na Figura 2.8b, recebeu o nome do metalurgista Stanley Rockwell que o propôs no início da década de 1920. Nesse teste, um penetrador de formato esférico ou cônico é pressionado contra o corpo de prova utilizando uma pré-carga de 10 kgf, o que assenta o penetrador no material. No caso da esfera, o diâmetro d é igual a 1,6 ou 3,2 mm, de forma aproximada. Em seguida, uma carga principal de 150 kgf (ou outro valor) é aplicada, fazendo com que o penetrador entre no corpo de prova de determinada distância além de sua posição inicial. Essa distância de penetração adicional é convertida em uma leitura de dureza Rockwell pelo durômetro. As diferenças no carregamento e na geometria do penetrador fornecem várias escalas Rockwell para materiais diferentes. As escalas utilizadas para o cobre e suas ligas estão representadas na Tabela 2.1.

Tabela 2.1 – Escalas de dureza Rockwell para o cobre e suas ligas

Escala e símbolo de dureza	Penetrador	Carga (kgf)	Faixa de utilização	Observações
B (HRB)	Esfera ($d = 1,6$ mm)	100	20 a 100 HRB	Ligas de cobre
F (HRF)	Esfera ($d = 1,6$ mm)	60	60 a 100 HRF	Ligas de cobre recozidas, folhas de metais maleáveis
G (HRG)	Esfera ($d = 1,6$ mm)	150	30 a 94 HRG	Ligas de cobre-níquel-zinco e de cobre-níquel
15 T (escala de dureza Rockwell superficial)	Esfera ($d = 1,6$ mm)	15	50 a 94 HR 15T	Aplicações similares às escalas HRB, HRF, HRG
30 T (escala de dureza Rockwell superficial)	Esfera ($d = 1,6$ mm)	30	10 a 84 HR 30T	Aplicações similares às escalas HRB, HRF, HRG
45 T (escala de dureza Rockwell superficial)	Esfera ($d = 1,6$ mm)	45	10 a 75 HR 45T	Aplicações similares às escalas HRB, HRF, HRG

O ensaio de dureza Vickers também foi desenvolvido no início da década de 1920, recebendo seu nome da Companhia Vickers-Armstrong Ltda., que fabricou as máquinas para esse tipo de ensaio. Conforme mostrado na Figura 2.8c, o ensaio baseia-se na utilização de um penetrador de forma piramidal feito de diamante. As impressões produzidas pelo penetrador são geometricamente similares, independentemente da carga aplicada. Dessa forma, cargas de diferentes valores são aplicadas, dependendo da dureza do material a ser medido. O valor da dureza Vickers (HV, do inglês *Hardness Vickers*) pode ser obtido por:

$$HV = \frac{1,854P}{d_1^2} \quad (2.16)$$

Em que:

P = carga aplicada (kgf); e

d_1 = diagonal da impressão feita pelo penetrador (mm).

Trata-se do ensaio que pode ser empregado para todos os metais e possui uma das mais amplas escalas entre os ensaios de dureza.

O ensaio Vickers com a adoção de cargas menores pode ser utilizado para determinação de microdureza. Na Figura 2.10, é mostrada a influência da posição e da taxa de resfriamento na microdureza de dois bronzes de alumínio, sendo um deles uma liga identificada como Cu10Al e a outra Cu14Al. Trata-se da já mencionada pesquisa desenvolvida por Nascimento *et al.* (2019). Baseando-se nas equações experimentais que correlacionam os valores de microdureza (HV1, com carga de 1 kgf) aos valores da distância da superfície de extração de calor (P) e aos valores da taxa de resfriamento (T_R), é possível predeterminar o desempenho das duas ligas em termos de microdureza, em função das mudanças de condições de resfriamento durante a solidificação desses materiais.

Na análise de microdureza, é possível verificar a influência de regiões menores daquelas que são avaliadas no teste de dureza e, conseqüentemente, apresentar tendência diferente de comportamento, em que uma maior taxa de resfriamento pode significar um menor valor de microdureza. Em termos de comparação, a liga Cu14Al apresenta valores mais elevados de microdureza do que que a liga Cu10Al. Isso sugere que o aumento de teor de alumínio influencia também nessa propriedade mecânica e que deixa a liga com maior teor de alumínio com menor massa específica.

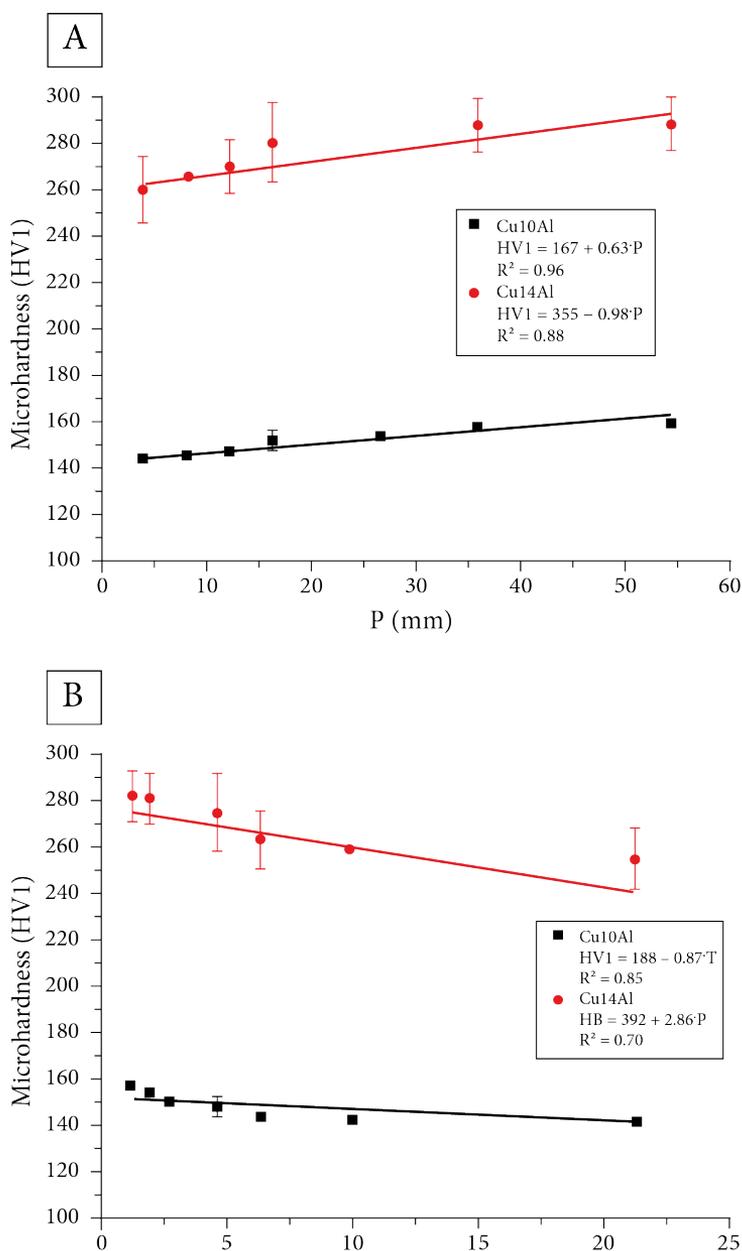


Figura 2.10 – Comparação de dois bronzes de alumínio submetidos ao processo de solidificação unidirecional ascendente, (a) Resultados dos valores de microdureza em função da posição e (b) Resultados de microdureza em função da taxa de resfriamento.

O ensaio de dureza Knoop foi desenvolvido em 1939 e utiliza um penetrador de forma piramidal, que apresenta uma razão entre seu comprimento (l) e sua largura (b) de

aproximadamente 7:1, conforme indicado na Figura 2.8d, e cargas em geral menores que as utilizadas no ensaio Vickers. Trata-se de um ensaio de microdureza, o que significa que é adequado para medir corpos de prova pequenos e finos ou materiais com dureza e fragilidade elevadas que possam fraturar se forem aplicadas cargas elevadas. O formato do penetrador facilita a leitura da impressão resultante das cargas mais leves do ensaio. O valor de dureza Knoop (HK, do inglês *Hardness Knoop*) pode ser obtido por:

$$HK = 14,2 \frac{P}{l^2} \quad (2.17)$$

Em que:

P = carga (gf); e

l = maior diagonal do penetrador (μm).

Uma vez que a impressão feita nesse ensaio é normalmente muito pequena, um cuidado considerável deve ser tomado ao preparar a superfície a ser medida.

2.2.4 ENSAIO DE FLEXÃO

O *ensaio de flexão* é utilizado para testar a resistência de materiais a partir de uma configuração em que um corpo de prova, cuja seção transversal pode ser retangular, é posicionado entre dois suportes e uma carga é aplicada em seu centro. Nesse caso específico, trata-se do ensaio de flexão em três pontos, conforme Figura 2.11a. Outra possibilidade de realização desse ensaio é em quatro pontos, ilustrada pela Figura 2.11b.

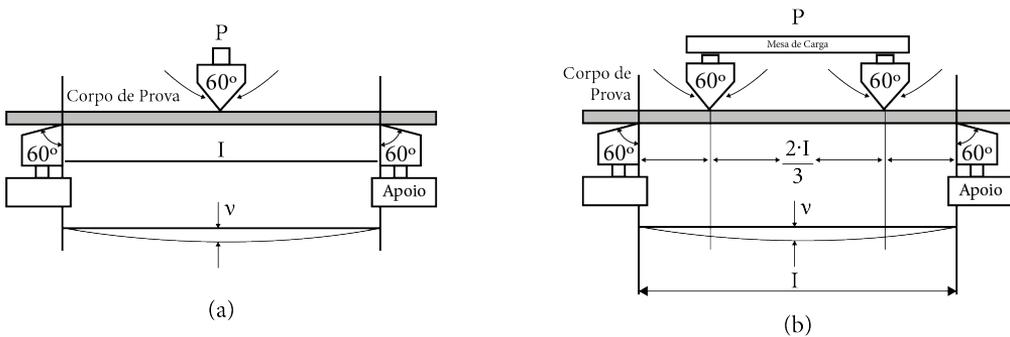


Figura 2.11 – Ensaio de flexão: (a) em três pontos e (b) em quatro pontos.

Esse tipo de teste é indicado para materiais duros e frágeis (por exemplo, cerâmicas), que apresentam elasticidade com pouca ou nenhuma plasticidade. As cerâmicas não respondem bem a um ensaio de tração tradicional, em função de problemas na preparação dos corpos de prova, possíveis desalinhamentos das garras que seguram o corpo

e defeitos críticos que podem estar localizados fora do comprimento útil do ensaio de tração. Esses materiais frágeis se deformam elasticamente até a iminência da fratura. A falha usualmente ocorre porque o limite de resistência à tração das fibras externas do corpo de prova é ultrapassado, resultando em *clivagem*, um modo de falha associada a cerâmicas e metais aplicados em baixas temperaturas de trabalho, em que ocorre a separação ao longo de determinados planos cristalográficos em vez de escorregamento.

O valor de resistência derivado do ensaio de flexão é denominado *resistência à ruptura transversal* ou *resistência à flexão* e, considerando que o ensaio de flexão seja em três pontos e que o corpo de prova seja retangular, esse valor pode ser obtido da seguinte forma:

$$\sigma_{rf} = \frac{1,5Pl}{wt^2} \quad (2.18)$$

Em que:

σ_{rf} = resistência à flexão (MPa);

P = carga aplicada no momento da fratura (N);

l = comprimento do corpo de prova entre os apoios (mm);

w = largura (mm); e

t = espessura da seção transversal do corpo de prova (mm).

Os resultados do ensaio de flexão podem variar com a temperatura, a velocidade de aplicação da carga, os defeitos superficiais e as características microscópicas, assim como a geometria da seção transversal do corpo de prova empregado.

O ensaio de flexão também pode ser utilizado em determinados materiais não frágeis, como os polímeros termoplásticos. Nesse caso, por ser um material suscetível a deformação em vez do rompimento ou da fratura, a resistência à flexão não é determinada com base na falha do corpo de prova. Em vez disso, usa-se a carga registrada em determinado nível de deflexão ou a deflexão observada em determinada carga.

Curiosidade

Os materiais dúcteis, como o cobre e suas ligas, quando sujeitos às condições de flexão, são capazes de suportar grandes deformações plásticas, ocorrendo dobramento do corpo de prova e, assim, não fornecendo resultados quantitativos qualificados para esse tipo de ensaio. Para esses materiais, o ensaio em condições de flexão trata-se de um ensaio de fabricação denominado dobramento, discutido na seção 2.2.9. Em processos de manufatura, a flexão está presente em operações de dobramento empregadas na conformação mecânica de chapas metálicas, por exemplo. O processo de dobramento de uma seção transversal retangular submete o material a tensões trativas na metade externa da seção curvada e tensões compressivas na metade interna.

2.2.5 ENSAIO DE TORÇÃO

Processos de manufatura que envolvem o cisalhamento são comuns na indústria. A ação é utilizada em operações de corte, como o puncionamento de chapas metálicas; na usinagem (ou manufatura subtrativa), a remoção de material ocorre pelo mecanismo de deformação de cisalhamento. O comportamento em cisalhamento também é importante em elementos de fixação, como rebites e parafusos, e outros componentes mecânicos, como motores de arranque e turbinas aeronáuticas.

O *ensaio de torção* é utilizado para obter a tensão e a deformação de cisalhamento de um material, consistindo na submissão de um corpo de prova geralmente cilíndrico maciço ou tubular de paredes finas a um torque (força P x braço B), como mostrado na Figura 2.12. À medida que o torque aumenta, o tubo se deforma, torcendo, o que representa a deformação de cisalhamento para a geometria considerada.

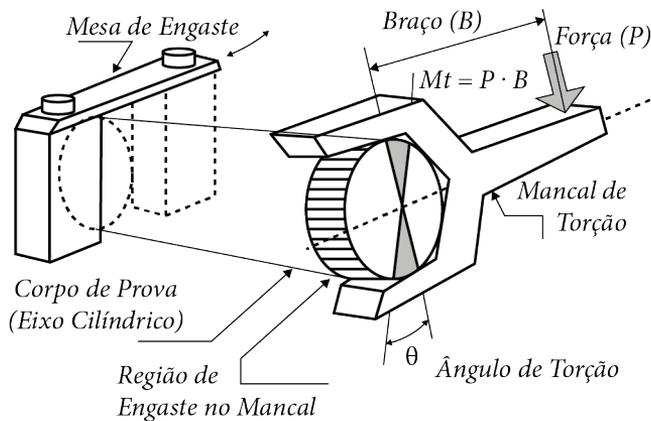


Figura 2.12 – Exemplo de configuração para o ensaio de torção. Adaptado de Garcia, Spim e Santos (2012)

Considerando um corpo de prova cilíndrico tubular de paredes finas, a tensão de cisalhamento pode ser determinada no ensaio de torção por

$$\tau = \frac{T}{2\pi R t^2} \quad (2.19)$$

Em que:

τ = tensão de cisalhamento (MPa);

T = torque aplicado (N.mm);

R = raio do tubo medido até o eixo neutro da parede (mm); e

t = espessura da parede (mm).

A deformação de cisalhamento pode ser determinada medindo a quantidade de deflexão angular do tubo, convertendo esse valor em uma distância defletida e dividindo pelo comprimento de medida L . O cálculo é representado pela seguinte expressão:

$$\gamma = \frac{R\theta}{L} \quad (2.20)$$

Em que:

θ = deflexão angular ou ângulo de torção (radianos).

De forma análoga à curva tensão-deformação de engenharia (ou convencional) obtida no ensaio de tração, a curva tensão-deformação de cisalhamento de engenharia fornece resultados importantes, como limite de escoamento ao cisalhamento, limite de resistência ao cisalhamento e módulo de elasticidade transversal ou módulo de cisalhamento (G). Esses resultados são fortemente influenciados por temperatura, velocidade de deformação, tamanho de grão, porcentagem de impurezas, tratamento térmico, anisotropia do material e condições ambientais do ensaio.

2.2.6 ENSAIO DE IMPACTO

O impacto, também conhecido como choque, está presente em muitos exemplos de carregamento, como a fixação de um prego com um martelo, a quebra de um bloco de concreto com uma britadeira, uma colisão de veículos, a soltura das rodas de um veículo em um buraco na estrada.

O ensaio de impacto é muito aplicado em materiais metálicos, e sua principal aplicação é caracterizar o comportamento dúctil-frágil dos materiais como função da temperatura, possibilitando a determinação da faixa de temperaturas na qual um material sofre a denominada transição de dúctil-frágil, caso isso ocorra. Ele torna possível determinar as características de fratura dos materiais sob altas taxas de carregamento, pois a carga é aplicada na forma de esforços por choque (dinâmicos), e o impacto é obtido por meio da queda de um martelo ou pêndulo, de uma altura determinada, sobre o corpo de prova, conforme mostrado na Figura 2.13.

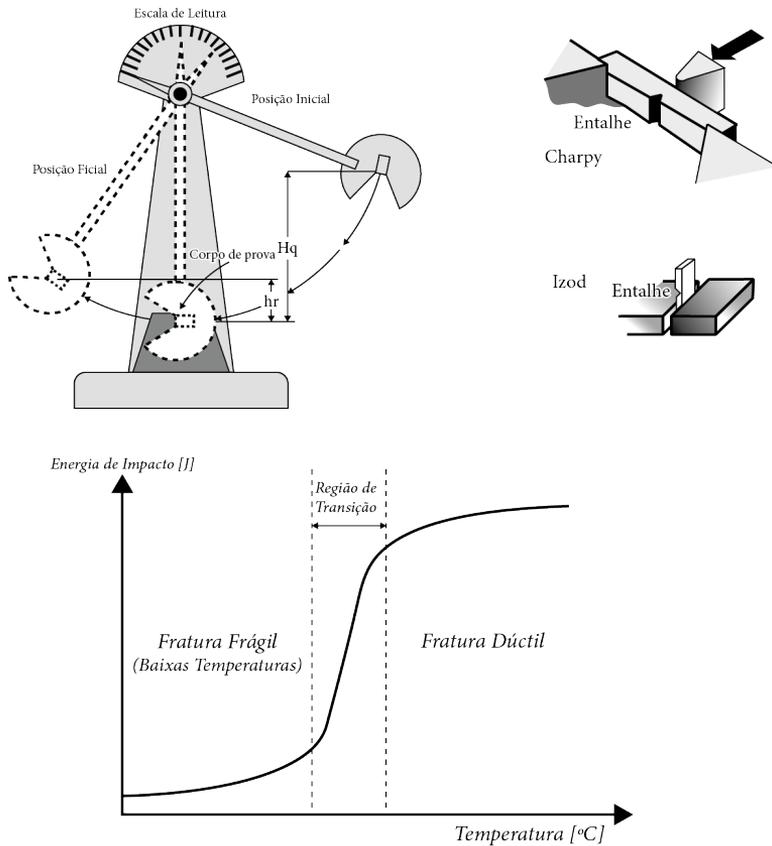


Figura 2.13 – Configuração do ensaio de impacto, disposição da amostra nos ensaios Charpy e Izod e transição dúctil-frágil.

As massas utilizadas nos ensaios são intercambiáveis, com diferentes valores e caindo de alturas variáveis. Os ensaios mais conhecidos são Charpy e Izod, dependendo da configuração geométrica do entalhe e do modo de fixação do corpo de prova na máquina de teste (Figura 2.13). No *ensaio Charpy*, mais popular nos Estados Unidos, o corpo de prova é posicionado de forma horizontal, e seu entalhe fica no lado oposto em relação ao martelo. No *ensaio Izod*, mais popular na Europa, o corpo de prova é posicionado de forma vertical, e seu entalhe fica no lado que ocorre o contato com martelo. Os entalhes são concentradores de tensões nesses ensaios mecânicos.

Como resultado do ensaio, obtém-se a tenacidade ao impacto do material, além da resistência ao impacto, relacionando a energia absorvida com a área da seção resistente. Variáveis que incluem o tamanho e a forma do corpo de prova, assim como a configuração e a profundidade do entalhe, influenciam os resultados dos testes. O ensaio de impacto é utilizado nas indústrias naval e bélica, destacando-se as construções que devem suportar baixas temperaturas. O ensaio de impacto também é muito utilizado em polímeros e cerâmicas.

2.2.7 ENSAIO DE FLUÊNCIA

A deformação plástica dependente do tempo de materiais metálicos submetidos a uma carga (ou tensão) constante e em temperaturas superiores a aproximadamente $0,4T_f$ (ponto de fusão) é denominada fluência. Os materiais de engenharia com frequência são expostos a condições de operações por longos períodos sob condições de elevada temperatura e tensão mecânica estática. Essas condições são favoráveis a alterações de comportamento dos materiais em função do processo de difusão dos átomos, do movimento de discordâncias, do escorregamento de contornos de grão e da recristalização. O ensaio de fluência serve para a análise desse comportamento, e, apesar de a definição apresentada no início do parágrafo se referir a materiais metálicos, a fluência pode ocorrer em qualquer material.

O ensaio consiste na aplicação de uma carga inicial e constante sobre um material durante um período quando submetido a temperaturas elevadas, conforme mostrado na Figura 2.14. O objetivo do ensaio é a determinação da vida útil do material nessas condições.

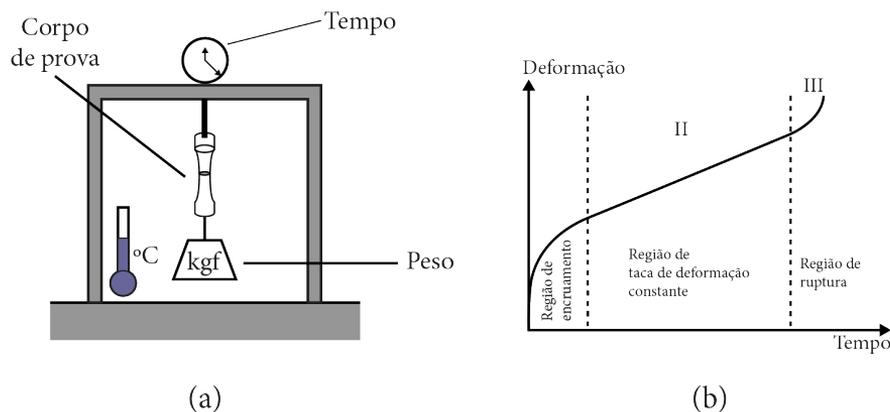


Figura 2.14 – Esboços de (a) máquina de ensaio de fluência e (b) curvas de ensaio de fluência.

Conforme mostrado na Figura 2.14b, uma curva típica de ensaio de fluência, considerando deformação em função do tempo, exibe normalmente três regiões distintas: (I) *transiente* (ou *primária*), caracterizada pelo decréscimo contínuo da taxa de fluência e diminuição da inclinação da curva com o tempo, em função do aumento da resistência à fluência provocado pelo encruamento; (II) *estacionária* (ou *secundária*), em que a taxa de fluência é essencialmente constante e a curva apresenta-se com aspecto linear, em função do equilíbrio que ocorre entre dois fenômenos atuantes e competitivos, a saber o encruamento e a recuperação; e (III) *terciária*, em que ocorre uma aceleração na taxa de fluência, culminando com a ruptura do corpo de prova.

Entre os principais materiais ensaiados em fluência, podem ser citados os utilizados em indústria aeroespacial, instalações de refinarias petroquímicas, usinas nucleares, tubulações e turbinas. Esse ensaio não constitui um ensaio de rotina devido à

grande quantidade de tempo necessária para a sua realização, motivo pelo qual foram desenvolvidas técnicas de extrapolação de resultados para longos períodos e ensaios alternativos em condições severas.

2.2.8 ENSAIO DE FADIGA

A quebra de um arame metálico por flexão para a frente e para trás de forma repetida é um exemplo de falha por fadiga, que resulta da deformação plástica repetida. Sem o escoamento plástico repetido, as falhas por fadiga não podem ocorrer. As falhas por fadiga ocorrem normalmente após milhares ou mesmo milhões de ciclos de minúsculos escoamentos que, com frequência, só existem em um nível microscópico. A falha por fadiga em materiais metálicos pode ocorrer em níveis de tensões bem abaixo do limite de escoamento determinado no ensaio de tração convencional.

O *ensaio de fadiga* consiste na aplicação de carga cíclica em corpo de prova apropriado e padronizado segundo o tipo de ensaio a ser realizado. Trata-se de um ensaio mecânico de grande aplicação nas indústrias automobilística e aeronáutica, desde pequenos componentes até estruturas como asas e longarinas. O ensaio de fadiga mais utilizado em outras modalidades de indústria é o ensaio de flexão rotativa, conforme mostrado na Figura 2.15a; variações no tipo de sollicitação mecânica também podem ser aplicadas, como tração e compressão uniaxiais e cisalhamento.

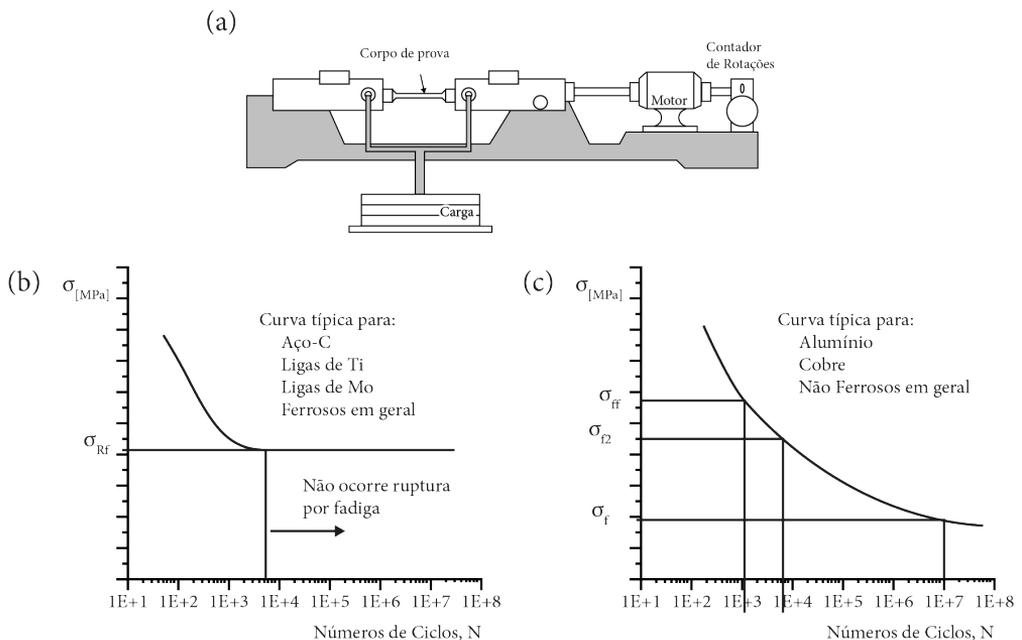


Figura 2.15 – Esboços de: (a) máquina de ensaio de flexão rotativa, (b) e (c) curvas de ensaio de fadiga.

O ensaio de fadiga pode fornecer dados quantitativos relativos às características de um material ou componente ao suportar cargas repetitivas e/ou cíclicas por longos períodos sem que ocorra a fratura (ou ruptura). Analisando a *curva S-N* (ou *curva de Wohler*) de materiais ferrosos, ligas de molibdênio e ligas de titânio, representada por σ -N na Figura 2.15b, observa-se que ela apresenta um limite de tensão que, para valores abaixo desse limite, o corpo de prova nunca sofrerá ruptura por fadiga. Esse limite de tensão é conhecido como limite de resistência à fadiga (σ_{Rf}), e a curva S-N, nesse ponto, toma a forma de um patamar horizontal. A maioria das ligas não ferrosas (alumínio, cobre e outras) não apresenta limite de resistência à fadiga, já que a tensão decresce continuamente com o número de ciclos de aplicação de carga, conforme visto na Figura 2.15c. Nesse caso, a fadiga é caracterizada pela resistência à fadiga (σ_f), que é a tensão na qual ocorre ruptura para um número arbitrário de ciclos de aplicação de carga. Outro parâmetro importante na caracterização do comportamento diante da fadiga de um material é a vida em fadiga (N_f), que consiste no número de ciclos que causa a ruptura para determinado nível de tensão.

Uma vez que o escoamento altamente localizado pode iniciar uma falha por fadiga, em termos de projeto é necessário prestar atenção em todos os locais potencialmente vulneráveis, como furos, cantos vivos, roscas, rasgos de chavetas, superfícies com riscos e regiões ou pontos corroídos. De forma frequente, o reforço desses locais vulneráveis é tão eficaz quanto fabricar todo o componente de um material mais resistente mecanicamente e pode ser mais viável economicamente.

2.2.9 ENSAIOS DE FABRICAÇÃO

Os *ensaios de fabricação* avaliam características intrínsecas do material na etapa de manufatura. Em geral, são empregados para análise do comportamento de materiais metálicos diretamente durante o processo de conformação mecânica por deformação plástica. Os materiais a serem conformados normalmente são tiras e chapas finas para estampagem ou barras e placas para dobramento de determinado produto. Esses ensaios procuram avaliar as condições de conformação com o intuito de evitar defeitos como rugas, trincas de bordas (no caso da estampagem de copos) ou outras geometrias. Além disso, são empregados na determinação dos esforços envolvidos entre a ferramenta de conformação e o material de trabalho nas diferentes situações existentes em um processo de conformação de chapas.

Especificamente, na estampagem profunda, quando a deformação gerada durante a conformação excede certo limite do material envolvido, surgem os defeitos e/ou as falhas indesejáveis no processo industrial que desqualificam o produto, tornando-o não conforme (Figura 2.16). Os possíveis defeitos são enrugamento da flange, enrugamento da parede, rasgamento do fundo e faixas de Lüders.

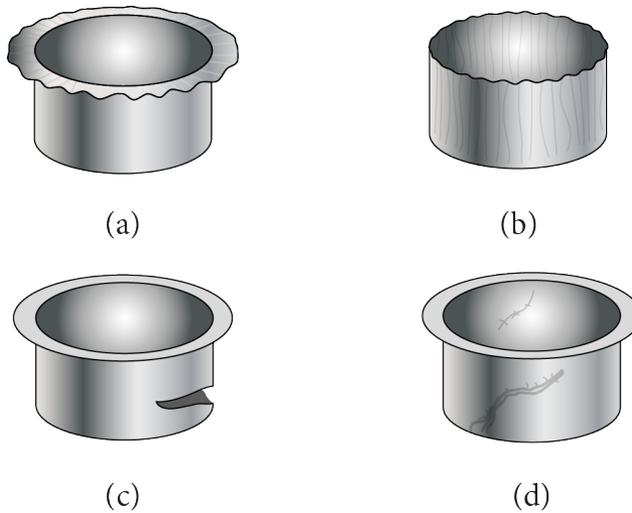


Figura 2.16 – Defeitos possíveis em estampagem profunda: (a) enrugamento da flange, (b) enrugamento da parede, (c) rasgamento do fundo e (d) faixas de Lüders.

O conhecimento prévio da conformabilidade da chapa (incluindo material e geometria), que consiste na sua capacidade de ser conformada, é fundamental na indústria metalomecânica, de modo que alguns ensaios foram propostos para estabelecer uma janela de conformação, na qual o surgimento dos defeitos nos produtos conformados pode ser evitado. Na Figura 2.17, é mostrado um diagrama que destaca a janela de conformabilidade, cuja definição é obtida por determinados ensaios de fabricação (de embutimento). Por meio de análise do diagrama, observa-se as faixas em que se pode evitar o empescoçamento e o enrugamento no material analisado.

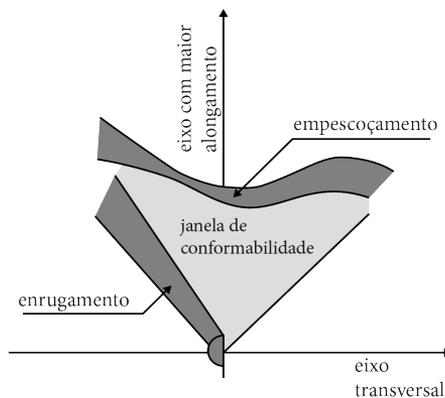


Figura 2.17 – Diagrama obtido por ensaio de conformabilidade. (Banabic, 2010)

Os dois tipos de ensaios de fabricação bastante difundidos na indústria de conformação mecânica são o *ensaio de embutimento* e o *ensaio de dobramento*. O primeiro avalia a estampabilidade de chapas e tiras, e seus diferentes tipos de ensaios estão representados nas Figuras 2.18a, b e c, que representam, respectivamente, o ensaio Erichsen e Olsen, o ensaio Swift e o ensaio Fukui. O ensaio de dobramento serve para avaliar a conformação de segmentos retos de seção circular, quadrada, retangular, tubular ou em segmentos curvos. As etapas do ensaio de dobramento estão representadas na Figura 2.18, sendo (d) antes, (e) durante e (f) depois da realização do ensaio.

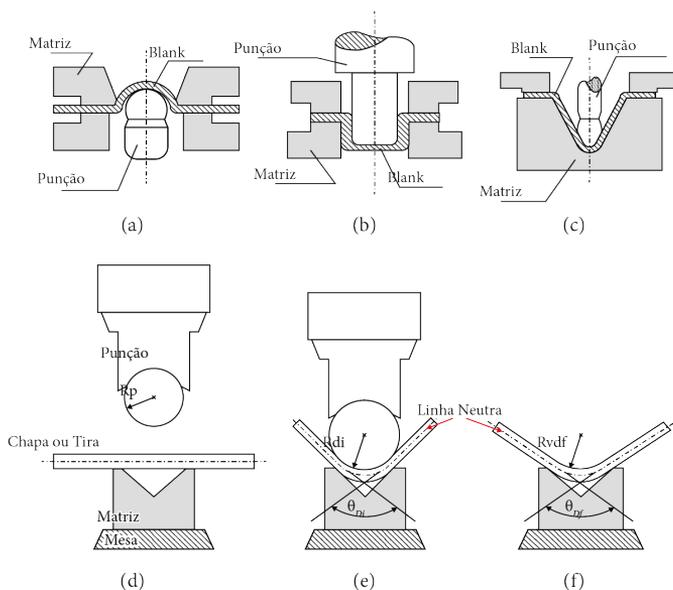


Figura 2.18 – Ensaios de fabricação: (a) ensaio Erichsen e Olsen, (b) ensaio Swift, (c) ensaio Fukui, (d) antes, (e) durante e (f) depois das etapas do ensaio de dobramento.

O *ensaio Erichsen* foi o primeiro ensaio de conformabilidade de chapas metálicas (ou de estampabilidade), proposto em 1914. Ele é muito utilizado na Europa, Japão e Brasil e consiste em avaliar a deformação gerada por um punção esférico em um corpo de prova, uma tira metálica (*blank*) na forma de disco, preso em uma matriz, como demonstrado na Figura 2.18a. Por meio desse ensaio, mede-se a máxima penetração do punção, que corresponde à profundidade do copo que foi formado, para o qual não tenha ocorrido a ruptura da tira ou que a ruptura seja incipiente. A profundidade do copo gerado, expressa em milímetros, representa o índice de ductilidade Erichsen. Na Figura 2.19, são mostrados resultados do ensaio Erichsen em corpo de prova de latão 70-30 (CuZn30), com seus respectivos gráficos de força de estampagem e de curso do punção, ambos em função do tempo.

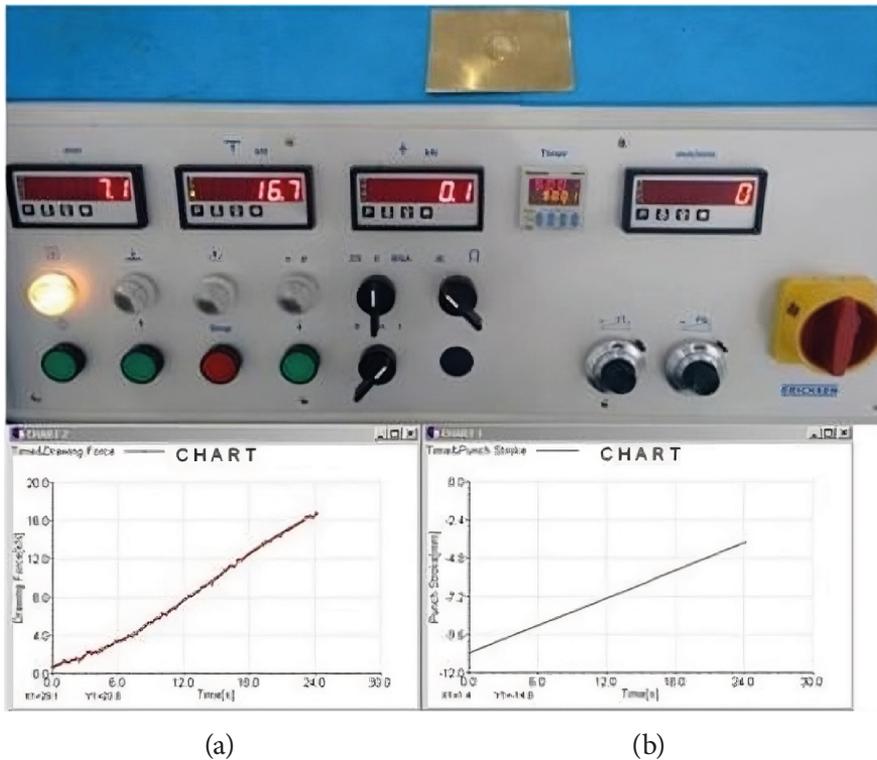


Figura 2.19 – Ensaio Erichsen para o latão 70-30: (a) gráfico de força de estampagem x tempo e (b) gráfico de curso do punção x tempo. (Gentilmente cedido pela Termomecanica São Paulo S.A.)

O *ensaio Olsen*, ilustrado pela Figura 2.18a, é mais difundido nos Estados Unidos. É semelhante ao ensaio Erichsen, exceto em algumas dimensões do equipamento, como o diâmetro da cabeça externa. O corpo de prova também tem forma de disco e é fixado na matriz. Durante o teste, são medidas continuamente a carga e a altura do copo. O índice de ductilidade Olsen é obtido pela altura do copo, em milésimos de polegada, no momento que a carga começa a cair.

O *ensaio Swift*, ilustrado na Figura 2.18b, consiste na deformação de um disco metálico preso em uma matriz por meio de um punção cilíndrico. O resultado é obtido pela relação entre o diâmetro máximo do disco e o diâmetro do punção que provoca a ruptura da peça. Nesse ensaio, é necessária a utilização de diversos corpos de prova, sendo aplicado em estampagem profunda.

O *ensaio Fukui*, ilustrado na Figura 2.18c, consiste na conformação de um disco metálico na forma de um cone com vértice esférico com operações simultâneas de estampagem e estiramento. A altura do copo no momento da fratura corresponde à medida da estampabilidade. Assim como o ensaio Swift, o Fukui exige a utilização de diversos corpos de prova, sendo igualmente utilizado para análise de estampagem profunda.

O *ensaio de dobramento* trata-se de um ensaio qualitativo simples e barato que pode ser utilizado para avaliar a ductilidade de um material. Frequentemente é aplicado para controle de qualidade de juntas com solda de topo. Tanto o equipamento como os corpos de prova são bastante simples, possibilitando a condução do ensaio no ambiente fabril. Em relação ao corpo de prova, pode ter forma cilíndrica, tubular ou prismática (de seção quadrada ou retangular), como uma pequena viga. Esse teste é muito importante na determinação do retorno elástico (*springback*) de curvatura do material, permitindo a obtenção de valores físicos precisos sobre o ajuste necessário ao ângulo para que determinada curva seja obtida.

2.2.9.1 Coeficiente de anisotropia

Durante a conformação das chapas metálicas, grãos cristalinos individuais são alongados na direção da maior deformação de tração. O alongamento é resultado do processo de escorregamento do material durante a deformação. Nos materiais policristalinos, que são os mais comuns em materiais metálicos de engenharia, os grãos tendem a girar para alguma orientação limite, devido a um confinamento mútuo entre grãos. Isso faz com que os planos atômicos e as direções cristalinas dos materiais com orientação aleatória (materiais isotrópicos) adquiram uma textura (orientação preferencial), fazendo com que sejam anisotrópicos.

A conformação plástica a frio, que é a mais comum na laminação de acabamento e na conformação de chapas, produz textura no material processado. A textura é sinônimo de orientação preferencial e propicia direcionalidade de propriedades, uma vez que a anisotropia é uma característica do material conformado a frio. Logo, a textura pode ser utilizada para descrever o direcionamento preferencial de cristais ou grãos. Entretanto, ela não descreve o formato dos grãos, pois não se pode inferir a partir dele se há ou não textura.

Geralmente, as chapas metálicas utilizadas em processos como a estampagem profunda são obtidas pelo processo de laminação (Figura 2.20), o que intensifica a anisotropia do material, tendo o comportamento mecânico ao longo do eixo L (longitudinal, paralelo à direção de laminação) fundamental importância no processo subsequente de conformação dessa chapa. O sistema de eixos ortogonais é composto ainda pelos eixos T (transversal à direção de laminação) e N (perpendicular à direção de laminação).

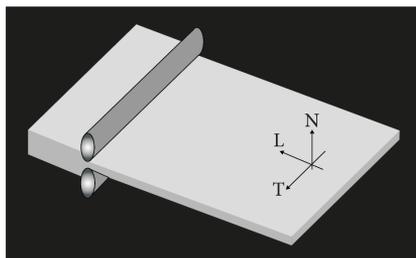


Figura 2.20 – Laminação convencional com indicação dos eixos.

A variação do comportamento mecânico em função das direções é estabelecida pelo coeficiente de anisotropia (r), também chamado de parâmetro ou coeficiente de Lankford. O *coeficiente de anisotropia* (r) é a razão entre a deformação verdadeira na largura (ε_w) e na espessura (ε_t) de um corpo de prova de ensaio de tração, após determinada deformação longitudinal pré-definida.

$$r = \frac{\varepsilon_w}{\varepsilon_t} \quad (2.21)$$

Esse parâmetro é determinado por um ensaio de tração em um corpo de prova na forma de tira. O plano da chapa e a direção de laminação (DL) estão representados na Figura 2.21a, e a orientação da extração do corpo de prova está representada na Figura 2.21b.

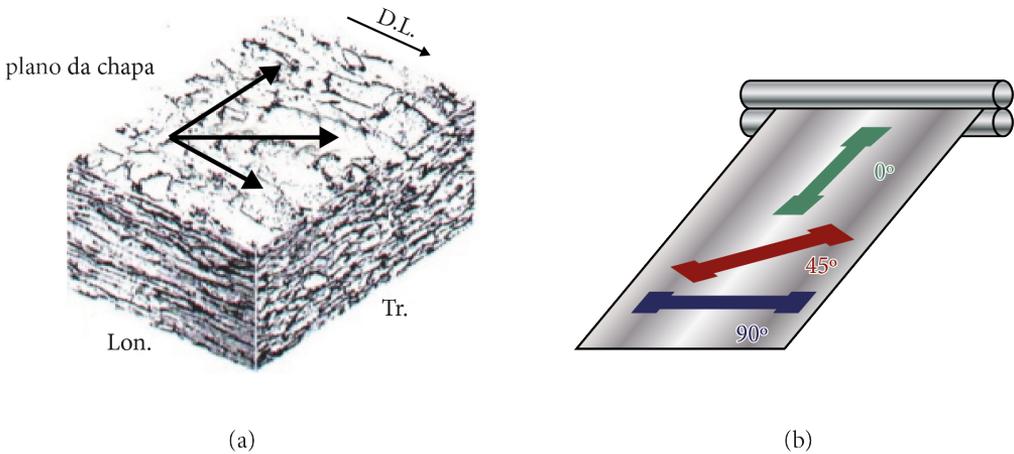


Figura 2.21 – Análise de anisotropia: (a) textura do material e (b) orientações para os corpos de prova.

Considerando a anisotropia no plano da chapa na Figura 2.21a, geralmente são definidos dois coeficientes de anisotropia: normal e planar (ou simplesmente anisotropia planar).

O *coeficiente de anisotropia normal* (r_n), representado na Equação 2.22, indica a capacidade da chapa analisada em resistir ao afinamento sob condições de esforços trativos e/ou compressivos, no plano.

$$r_n = \frac{r_0 - 2r_{45} + r_{90}}{4} \quad (2.22)$$

O *coeficiente de anisotropia planar* (Δr), representado na Equação 2.23, indica a diferença de comportamento mecânico que o material pode apresentar no plano da chapa.

$$\Delta_r = \frac{r_0 - 2r_{45} + r_{90}}{2} \quad (2.23)$$

Em que r_0 , r_{45} e r_{90} são os valores de r medidos a 0° , 45° e 90° , respectivamente, com a direção de laminação, para ambos os coeficientes (r_n) e (Δr).

Um material isotrópico apresenta $r_n = 1$ e $\Delta r = 0$, uma vez que não possui direcionalidade de propriedades. Nos materiais para estampagem profunda, um elevado valor de coeficiente de anisotropia normal é desejado, o que propicia maior resistência ao afinamento da chapa. Em relação à textura cúbica do cobre, pode-se gerar valor muito baixo de r_n , de até 0,1, o que é um problema para a estampagem. Isso justifica a importância da análise de anisotropia em chapas de cobre.

A tendência à formação de defeitos como “orelhas” (enrugamento da flange) na estampagem é função da anisotropia planar. Esses defeitos se formam a 0 e 90° com a direção de laminação, quando o coeficiente de anisotropia planar (Δr) é maior que 0 e a 45° e 135° com a direção de laminação, quando o coeficiente de anisotropia planar é menor que 0.

2.2.10 ENSAIOS PARA DUCTILIDADE A QUENTE E TENSÃO DE DEFORMAÇÃO

O trabalho ou a transformação a quente do cobre e suas ligas é utilizado para transformar rapidamente o material gerado no lingotamento/fundição em produtos semiacabados. As altas temperaturas facilitam a deformação plástica do material, elevando sua plasticidade. A deformação a quente envolve maior complexidade do que a deformação a frio, pela superposição de fenômenos microestruturais (encruamento e restauração), exigindo um controle mais rigoroso de processo.

Os exemplos de ensaios que podem ser empregados para análise de deformação a quente incluem o ensaio de *tração*, com medição direta de tensão e deformação; o ensaio de *compressão axissimétrica*, em que a pressão (carga compressiva) é medida e correlacionada à tensão de deformação; o ensaio de *compressão plana*, com condições de deformação plana; o ensaio de *torção*, no qual se obtém tensão e deformação de cisalhamento; e o *processamento em laboratório*, no qual se mede a força do trabalho mecânico (carga de laminação) e sua conversão em valor de tensão de deformação, o que requer considerável interpretação dos resultados.

A Figura 2.22 mostra o princípio em (a) do ensaio de compressão axissimétrica, em que P é a carga compressiva e H a altura, e em (b) do ensaio de compressão plana, com estado de deformações planas, em que P é a carga compressiva, w é a largura da ferramenta de aplicação de carga e b_0 e h_0 são, respectivamente, a largura e a espessura iniciais do material a ser ensaiado.

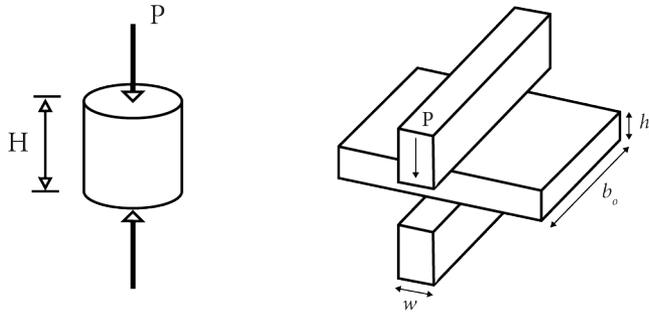


Figura 2.22 – Princípio do ensaio de compressão: (a) axissimétrica e (b) plana.

Em função das diversas modalidades de processos de fabricação que contam com o auxílio da temperatura para a conformação mecânica do cobre e suas ligas, dentro dos segmentos de transformações metalomecânicas e siderúrgicos, destacam-se principalmente os processos de laminação e extrusão a quente, em que elevadas cargas mecânicas são aplicadas nos materiais metálicos a fim de serem obtidos maiores níveis de deformação; processos classificados como trabalho a frio não são capazes de obter tais reduções, uma vez 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 relação àquelas que ocorrem em trabalho a quente, geralmente em temperaturas homólogas com valores entre 0,6 e 0,8 (temperatura de fusão em escala Kelvin, T_f), pois se considera que o trabalho a quente é realizado acima da temperatura de recristalização e que o material pode recristalizar à medida que é deformado (dependendo da taxa de deformação, temperatura e energia de falha de empilhamento do material considerado). É mais significativo pensar no trabalho a quente como um processo no qual a recristalização ocorre nos intervalos das operações, como na laminação, ou mesmo antes que o material passe por troca de calor com o ambiente, logo após o processo de conformação (SELLARS e TEGART, 1972; HOSFORD, 2009).

Com a evolução da pesquisa nessa área, foi revelado também que a microestrutura formada diretamente no processo de deformação a quente é, com frequência, desfigurada pela recristalização que ocorre durante o resfriamento a partir da temperatura no final da deformação a quente. O resfriamento rápido do material no momento de interrupção da deformação a quente colabora para revelar a estrutura que se formou naquele momento. Importantes informações tecnológicas também são geradas nas curvas tensão-deformação verdadeira ou real obtidas com experiências realizadas em ensaio de compressão a quente (NOVIKOV, 1994; MIRZADEH, CABRERA e NAJAFIZADEH, 2012).

A taxa de deformação ($\dot{\epsilon}$) durante o trabalho a quente pode ser encontrada no intervalo de 10^{-2} a 10^{-3} s^{-1} , com a possibilidade de sofrer alterações em função do tipo de equipamento utilizado nos experimentos e de como a resistência à deformação está

intimamente ligada à taxa de deformação. Em função disso, se faz necessário construir as curvas tensão-deformação verdadeira em diversas velocidades e temperaturas (SELLARS e TEGART, 1972; DIETER, 2003; MCQUEEN e IMBERT, 2004; MEYERS e CHAWLA, 2008).

A modelagem do escoamento a quente e a previsão de curvas são importantes em processos de conformação de metais, como laminação e extrusão a quente. Tais informações podem ser obtidas por meio das equações oriundas de modelos fenomenológicos, que representam matematicamente a dependência da tensão de deformação nas condições em que ela ocorre, envolvendo teorias da termodinâmica, movimentação de discordâncias termicamente ativadas e cinética do escorregamento das discordâncias (MIRZADEH, CABRERA e NAJAFIZADEH, 2012).

A influência da temperatura e da taxa de deformação nas curvas de escoamento podem ser observadas em alguns modelos matemáticos constitutivos que são a base para a simulação numérica, pois dependem de dados precisos quanto ao comportamento dos metais em função da temperatura e da taxa de deformação. Um dos principais modelos constitutivos foi proposto por Zener e Hollomon (1943), que trataram a deformação plástica como um processo termicamente ativado (MCQUEEN e JONAS, 1971; ZHANG *et al.*, 2014; ZHANG *et al.*, 2015).

Nesse modelo, assume-se que a taxa de deformação segue uma lei de taxa de Arrhenius, que é amplamente utilizada na análise de uma grande variedade de processos cuja taxa depende fortemente da variação da temperatura, conforme a equação a seguir.

$$Z = \dot{\epsilon} \exp\left[\frac{Q}{RT}\right] = f(\sigma) \quad (2.24)$$

Em que:

$\dot{\epsilon}$ = taxa de deformação (s^{-1});

Q = energia de ativação para o escoamento plástico (J/mol);

T = temperatura absoluta (K);

R = constante dos gases de Boltzmann, adotada como 8,314 J/K. mol; e

$f(\sigma)$ = modelo da função dedicado à tensão (σ).

Z é o parâmetro de Zener-Hollomon, taxa de deformação compensada pela temperatura T .

2.3 ENSAIOS NÃO DESTRUTIVOS

Os *ensaios não destrutivos* são realizados na inspeção de peças semiacabadas ou acabadas, que não destroem ou inutilizam as mesmas (no todo ou em parte), nem alteram sua integridade geométrica ou dimensional, sendo realizados nas etapas de

fabricação, montagem e manutenção. São importantes testes em diversos setores industriais, incluindo metalomecânica, de manutenção e inspeção de máquinas e motores; dependendo do tipo de ensaio a ser utilizado, ele pode proporcionar baixos custos de uso, praticidade e rapidez de realização.

Os defeitos que podem ser analisados pelos ensaios não destrutivos incluem trincas e fissuras (superficiais, subsuperficiais e internas); defeitos típicos de fundição, laminação, usinagem e de recobrimento; descontinuidades, inclusões e segregações; falta de penetração de soldas; defeitos originados por fadiga; e defeitos ocasionados por corrosão.

De forma geral, as vantagens dos ensaios não destrutivos incluem: a realização do ensaio adotado diretamente nos elementos; a possibilidade de serem realizados em todos os elementos constituintes de uma estrutura; as regiões críticas de um mesmo componente podem ser examinadas de forma simultânea; o auxílio à manutenção preventiva; o não descarte dos materiais e peças de altos custos de produção; a pouca ou nenhuma necessidade de preparação de amostras; a portatibilidade dos equipamentos e materiais empregados como consumíveis; e o fato de serem mais baratos e mais rápidos que os ensaios destrutivos.

As desvantagens incluem: o envolvimento de medições indiretas de propriedades; o comportamento em serviço da peça ensaiada como resultado de um significado indireto; os resultados em geral qualitativos e poucas vezes quantitativos; e a necessidade de experiências prévias na interpretação das indicações dos testes.

Entre os ensaios não destrutivos, destacam-se inspeção visual, líquidos penetrantes, raios X e ultrassom. Na Figura 2.23, são mostrados alguns desses tipos de ensaios não destrutivos aplicados industrialmente, sendo (a) líquidos penetrantes, (b) raios X e (c) ultrassom.

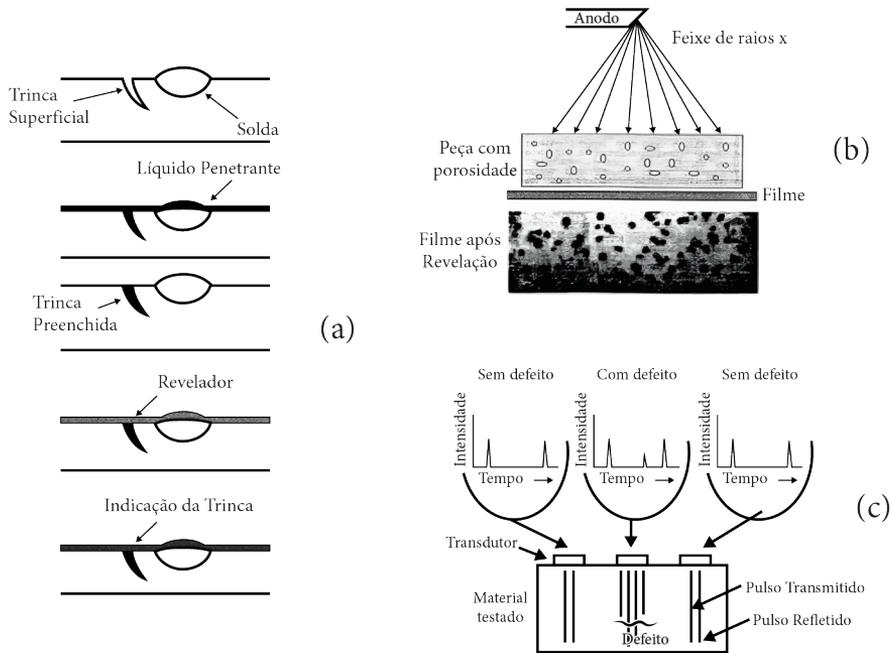


Figura 2.23 – Ensaios não destrutivos: (a) líquidos penetrantes, (b) raios X e (c) ultrassom.

O *ensaio visual* consiste na observação visual da peça (ou componente). Trata-se de uma técnica simples para detectar não somente falhas na superfície ou distorções na estrutura, mas também o grau de acabamento e de formato de uma peça. Caso a peça apresente uma falha passível de identificação a olho nu, o processo pode ser interrompido antes da próxima etapa. A experiência do profissional que realiza essa avaliação exerce grande influência nos resultados, que dependem também das condições de acesso ao local e da iluminação do ambiente.

O *ensaio por líquidos penetrantes* envolve as seguintes etapas: limpeza do material, aplicação de uma camada de líquido penetrante na superfície a ser ensaiada, remoção do excesso e, com a utilização de um revelador, identificação da região em que existe penetração do líquido, o que indica trinca no material (Figura 2.23a).

A denominada *radiografia industrial* é utilizada na detecção de falhas e fundamenta-se no mesmo princípio da radiografia clínica usada nos seres humanos. Como diferença, pode-se citar o fato de empregar doses de radiação 10 vezes maiores que a radiografia clínica, o que exige um nível de segurança mais elevado. O princípio básico de funcionamento consiste em emitir os *raios X* ou *raios γ* . Uma parte da radiação é absorvida pelo material e a outra parte o atravessa, sensibilizando o filme e produzindo uma imagem. O ensaio por raios X está representado na Figura 2.23b. Em comparação ao ensaio por raios X, o ensaio com raios γ permite maiores variações de espessura do objeto, sem perda de qualidade da imagem.

O ensaio por ultrassom é muito difundido na avaliação ou inspeção da qualidade de vários componentes de indústrias como a aeroespacial, a automobilística e a petroquímica. Baseia-se na utilização de ondas ultrassônicas para detecção interna de defeitos em materiais ou medição de espessura de paredes e detecção de corrosão. Nesse teste, uma onda ultrassônica pulso-ecoante é enviada através do material. Quando a onda é interrompida e então parcialmente devolvida, ela fornece informações como a localização e a orientação de imperfeições e a espessura da parede do material. Um dos métodos de ensaio por ultrassom é o método de reflexão, que utiliza pulsos ultrassônicos e está representado na Figura 2.23c.

O ensaio por ultrassom apresenta como vantagem uma boa sensibilidade na detecção de descontinuidades internas. Para isso, não requer planos especiais de segurança e/ou quaisquer acessórios para a sua realização. Diferentemente do ensaio por raios X ou por raios γ (radiografia industrial), o ultrassom não necessita de revelação de um filme para obter os resultados, apenas da análise dos dados mostrados na tela do equipamento. Como principal limitação, o método exige intenso investimento em treinamento de pessoal para a realização da análise.

REFERÊNCIAS

- ASM HANDBOOK. **Properties and selection: Nonferrous alloys and special-purpose materials.** Ohio: ASM International, v. 2, 1992.
- BANABIC, D. **Sheet metal forming processes: Constitutive modelling and numerical simulation.** New York: Springer-Verlag, 2010.
- 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, p. 42-51, 2012.
- 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.
- DIETER, G. E. **Handbook of workability and process design.** [S.l.]: ASM International, 2003.
- DIETER, G. E. **Mechanical metallurgy.** 2. ed. [S.l.]: McGraw-Hill Company, 1988.
- GARCIA, A.; SPIM, J. A.; SANTOS, C. A. **Ensaio dos materiais.** 2. ed. Rio de Janeiro: LTC, 2012.
- 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.
- JIA LIU, X. W.; JITUO, L.; YANFENG, L.; HANGYU, L.; CHAN, W. Hot deformation and dynamic recrystallization behavior of Cu-3Ti-3Ni-0.5Si alloy. **Journal of Alloys and Compounds**, n. 782, p. 224-234, 2019.
- KIMINAMI, C. S.; CASTRO, W. B.; OLIVEIRA, M. F. **Introdução aos processos de fabricação de produtos metálicos**. São Paulo: Blucher, 2013.
- 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**, 12(14), 6974, 2022. <https://doi.org/10.3390/app12146974>
- MCQUEEN, H. J.; IMBERT, C. A. C. Dynamic recrystallization: plasticity enhancing structural development. **Journal of Alloys and Compounds**, 378, n. Issues 1 - 2, 35-43, 2004.
- MCQUEEN, H. J.; JONAS, J. J. **Hot workability testing techniques**. In: Hoffmann A.L. (eds) Metal Forming: Interrelation Between Theory and Practice. Boston, MA: Springer, 1971. p. 393-428.
- MEYERS, M.; CHAWLA, K. **Mechanical Behavior of Materials**. 2. ed. New York: Cambridge University Press, 2008. ISBN
- MIRZADEH, H.; CABRERA, J. M.; NAJAFIZADEH, A. Modeling and prediction of hot deformation flow curves. **Metallurgical and Materials Transactions**, 43A, 108-122, 2012.
- NOVIKOV, I. **Teoria dos tratamentos térmicos dos metais**. Tradução de Joel Regueira Teodósio. Rio de Janeiro: UFRJ, 1994.
- 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.
- 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.
- ZHANG, X.; ZHENG, R.; XIU, R. Z.; JING, R.; FU, K. L.; LI, Q. H. Behavior of flow stress of Al-Mn alloy during hot compression. **Advanced Materials Research**, 886, 109-114, 2014.
- ZHANG, Y.; Bingjie, W.; Baohong, T.; Junchao, A.; Volinsky, A.; Huili, S.; Yong, L.; Kexing, S. Effects of Ce Addition on High Temperature Deformation Behavior of Cu-Cr-Zr Alloys. **Journal of Materials Engineering and Performance**, 24, 3783-3788, 2015.

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.

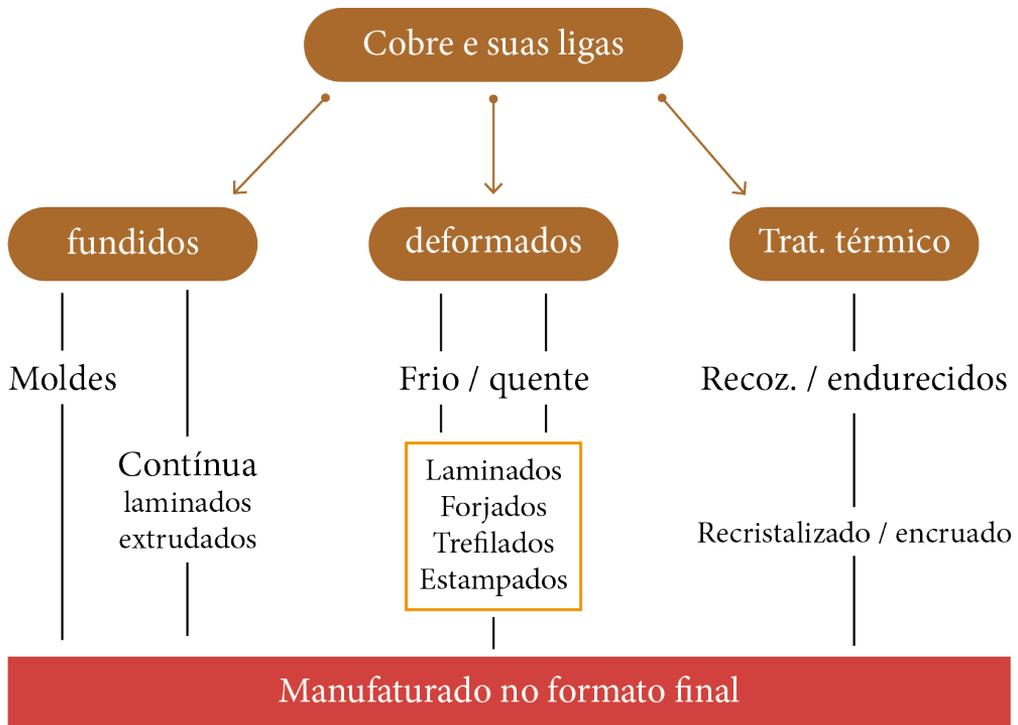


Figura 3.1 – Tecnologias de processamento do cobre e suas ligas.

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.

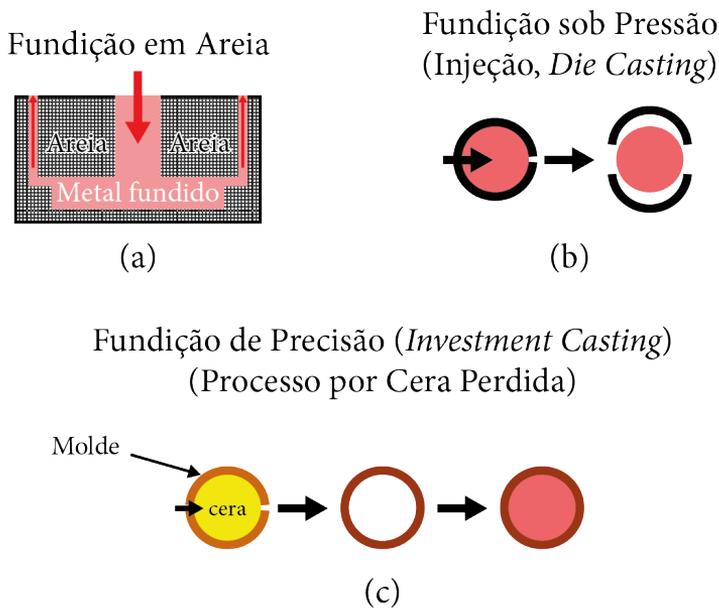


Figura 3.2 – Processos de fundição: (a) fundição em areia, (b) fundição sob pressão e (c) fundição de precisão.

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.

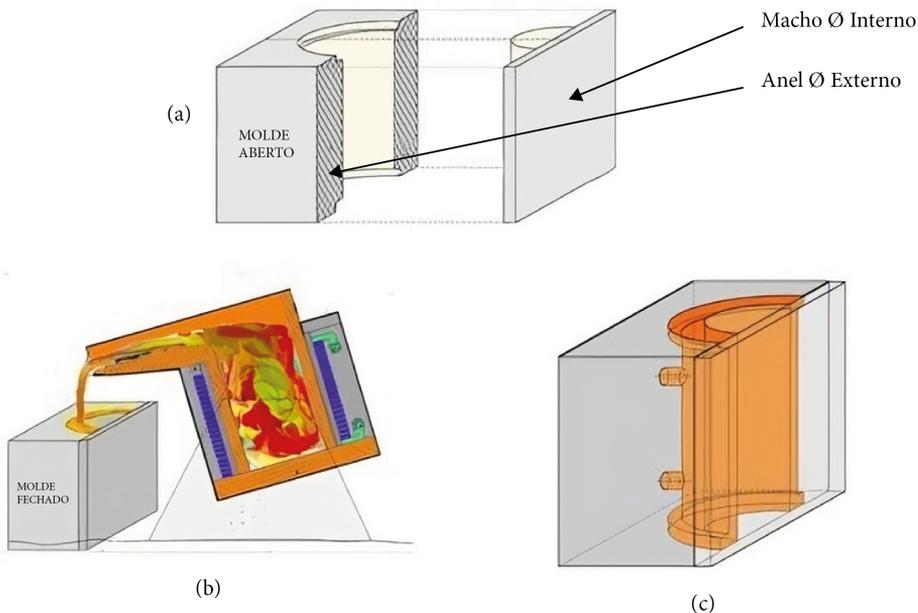


Figura 3.3 – Fundição por ação da gravidade em molde permanente: (a) macho e anel, (b) fundição por vazamento e (c) fundido ainda no molde.

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.

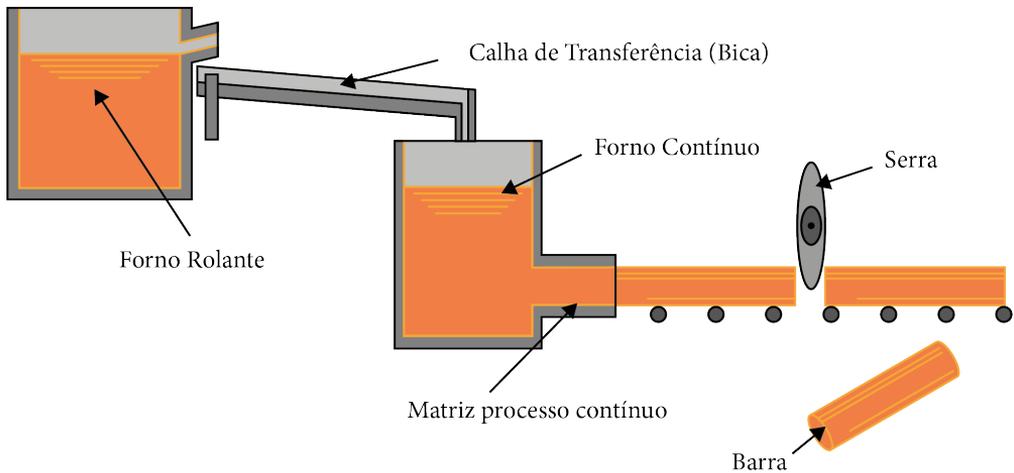


Figura 3.4 – Processo de lingotamento contínuo.

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.

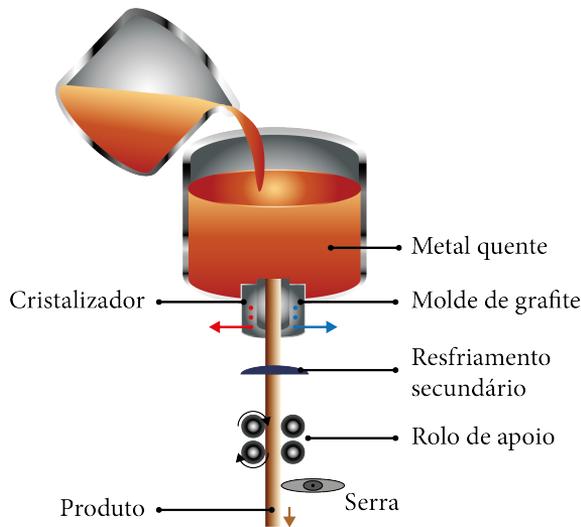


Figura 3.5 – Processo de lingotamento contínuo vertical.

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 ocios, 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*.

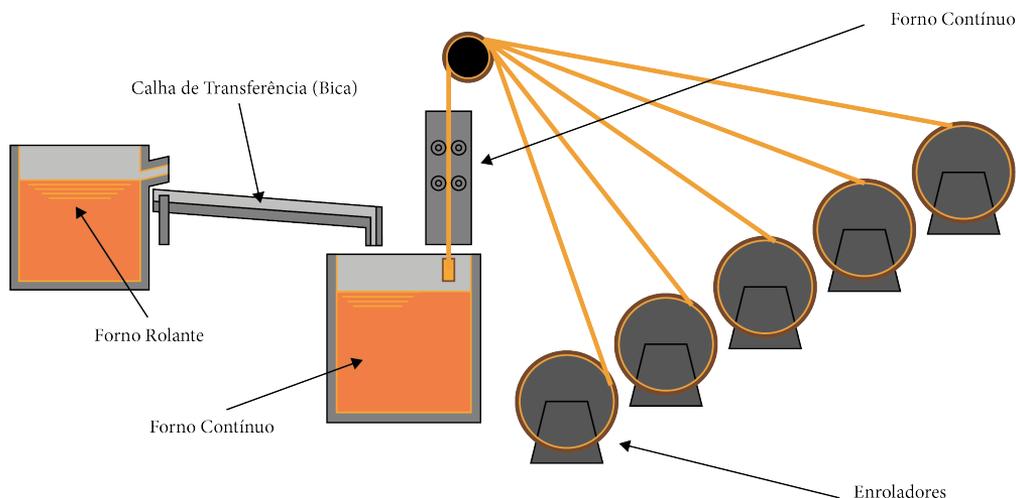


Figura 3.6 – Processo de lingotamento contínuo *up cast*.

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.

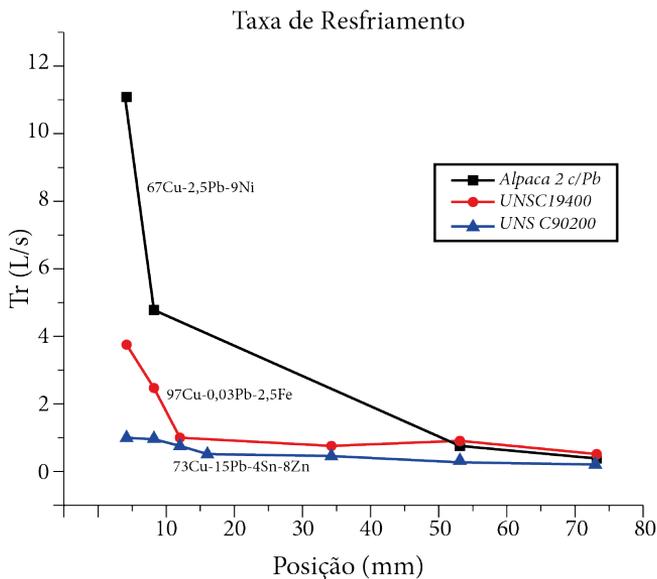


Figura 3.7 – Taxa de resfriamento em função da posição para ligas de cobre.

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.

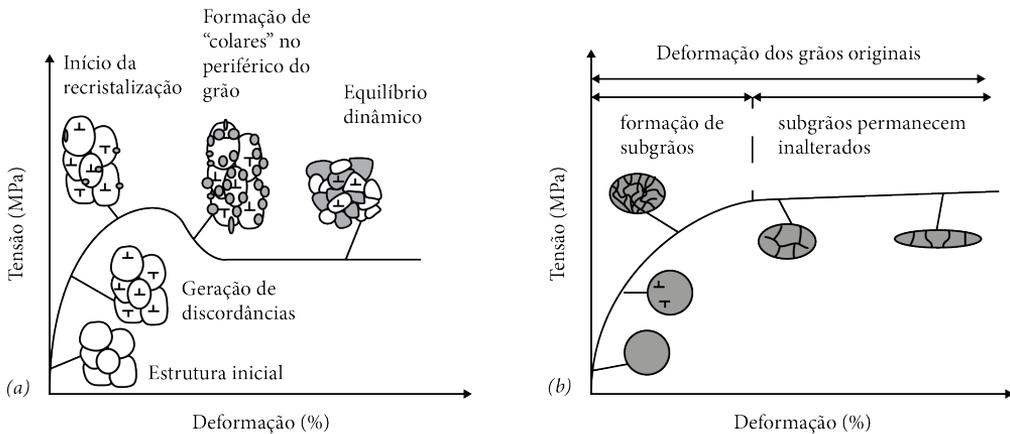


Figura 3.8 – Evolução da microestrutura durante a deformação a quente: (a) comportamento microestrutural da recristalização dinâmica e (b) comportamento microestrutural da recuperação dinâmica.

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.

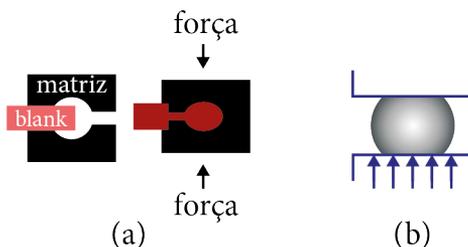


Figura 3.9 – Forjamento: (a) em matriz fechada e (b) em matriz aberta (ou livre).

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.

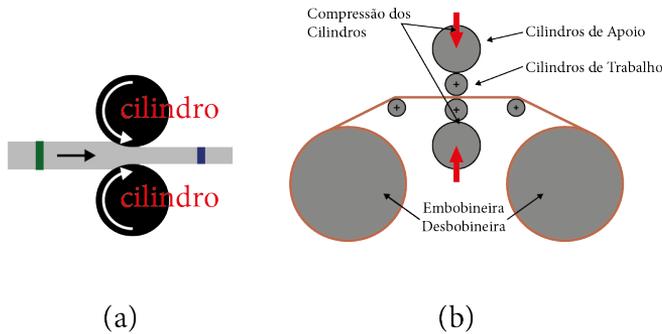


Figura 3.10 – (a) Laminador duo e (b) laminador quádruo.

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).

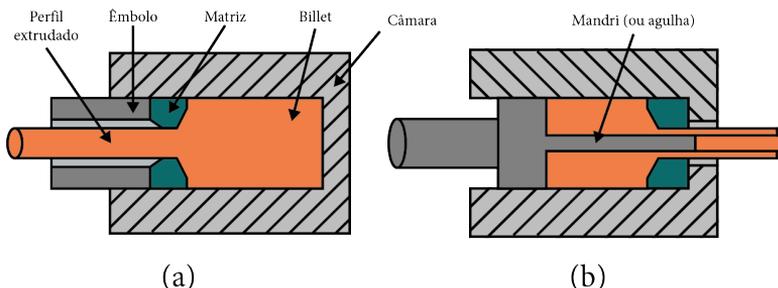


Figura 3.11 – Processos de extrusão: (a) indireta e (b) direta com mandril (ou agulha).

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.

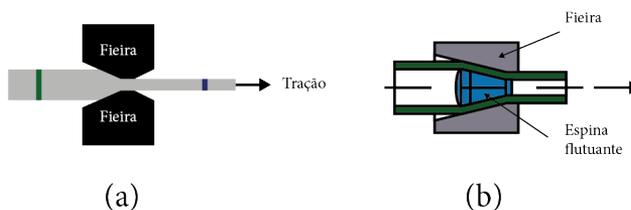


Figura 3.12 – (a) Processo de trefilação e (b) com espina flutuante (ou mandril interno).

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.

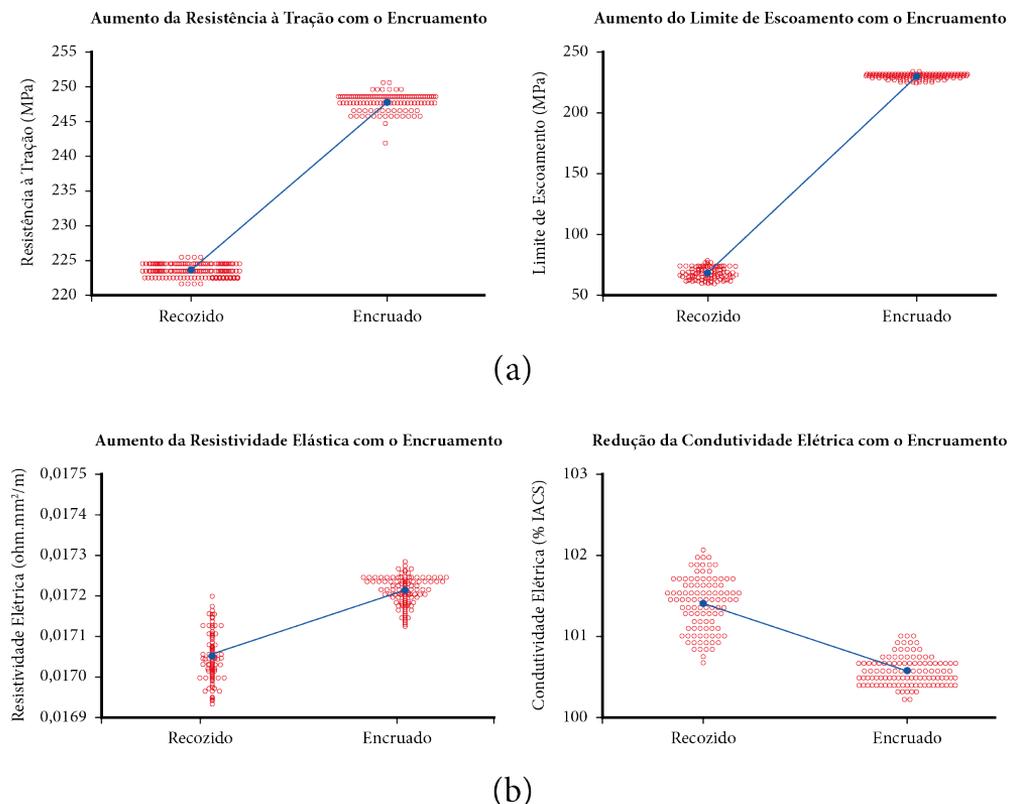


Figura 3.13 – Comparação entre material recozido e encruado em termos de: (a) resistência mecânica e (b) comportamento elétrico. (Santos *et al.*, 2018)

Curiosidade

Na conformação mecânica, também se trabalha com metal semissólido. Trata-se da *tixoconformação*, em que pastas refundidas 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.

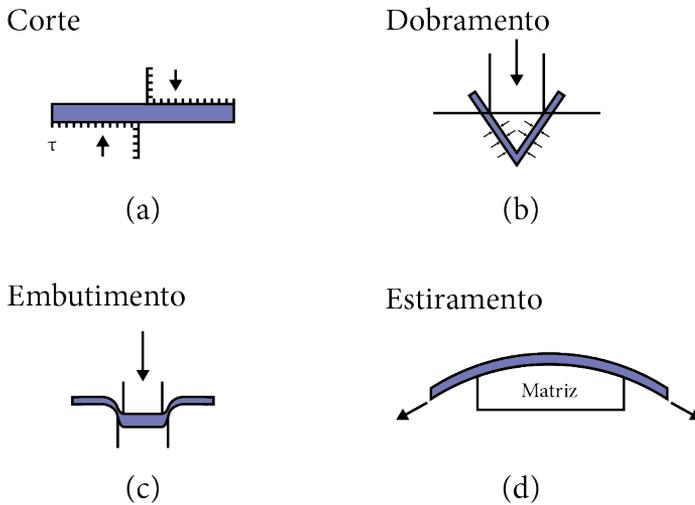


Figura 3.14 – Conformação de chapas: (a) corte, (b) dobramento, (c) embutimento e (d) estiramento.

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.

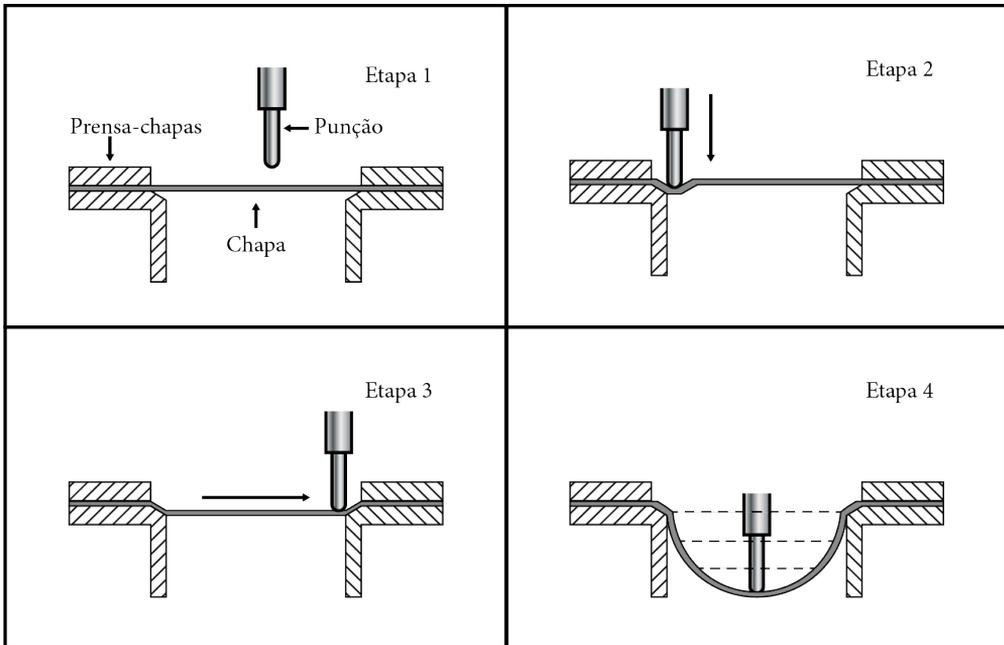


Figura 3.15 – Etapas da estampagem incremental. Adaptado de Bertol *et al.* (2012).

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.

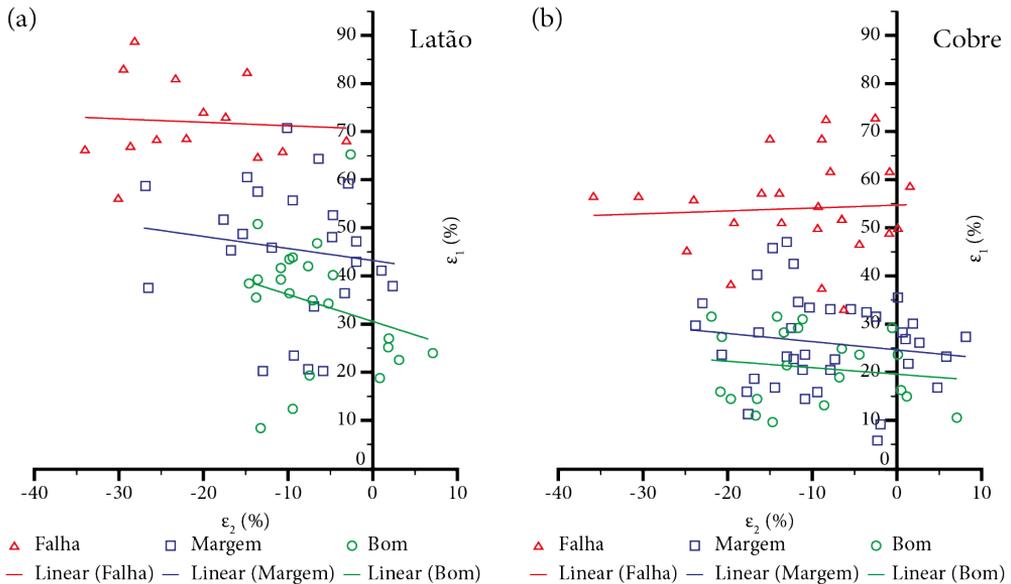


Figura 3.16 – Diagrama limite de conformação (Nakazima) para: (a) latão e (b) cobre. (Pereira, 2018)

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.

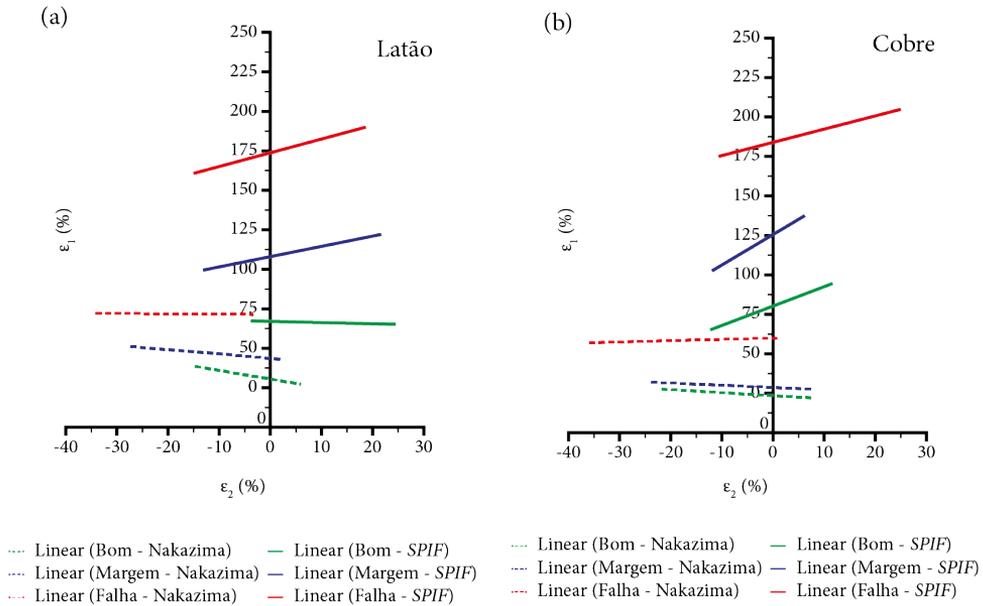


Figura 3.17 – Diagrama limite de conformação (Nakazima x estampagem incremental) para: (a) latão e (b) cobre. (Pereira, 2018)

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.

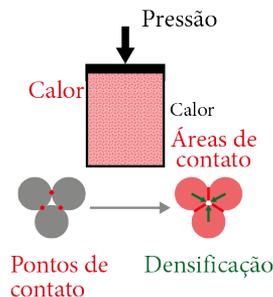


Figura 3.18 – Processo de metalurgia do pó.

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.

CAPÍTULO 4

Processos de fabricação aplicados ao cobre e suas ligas: parte 2

4.1 USINAGEM (MANUFATURA SUBTRATIVA)

Os *processos de usinagem* são baseados na mudança da forma por meio de remoção de materiais e, por isso, podem ser classificados como *manufatura subtrativa*. Na usinagem, a ação predominante envolve deformação por cisalhamento do material para formar um cavaco que é removido, gerando uma nova superfície.

A usinagem é um dos mais importantes processos de fabricação, em função da variedade de materiais de trabalho, formas geométricas (de simples a complexas), precisão dimensional e bons acabamentos superficiais. A manufatura subtrativa é tipicamente utilizada como processo complementar para outros processos como fundição, metalurgia do pó ou conformação mecânica. Em contrapartida, uma operação de usinagem leva mais tempo e desperdiça mais material do que a fundição ou o forjamento, e isso deve ser levado em consideração. Esses processos podem ser divididos em:

- 1) *processos de usinagem convencionais*: em que uma ferramenta de corte afiada (mono ou multicortante) é utilizada para cortar o material, com o intuito de obter a geometria desejada (por exemplo, torneamento e fresamento);
- 2) *processos abrasivos*: que removem o material pela ação de partículas duras e abrasivas (por exemplo, retificação); e
- 3) *processos de usinagem não convencionais*: que removem material sem a utilização de uma ferramenta de corte afiada ou partículas abrasivas (por exemplo, eletroerosão).

Com exceção dos processos não convencionais, a usinagem consiste na utilização de ferramentas feitas de material mais duro que o material a ser usinado. Entretanto, a tecnologia da usinagem é mais abrangente, englobando a utilização de informações sobre a peça e as ferramentas usadas no processo, materiais, fixação e manuseio da peça, tipo de processo, uso ou não de fluido de corte, entre outras, de tal forma que as condições de obtenção da forma desejada da peça sejam otimizadas.

No caso da usinagem, há alteração de volume. O desbaste compreende a operação de maior remoção de material do que a operação de acabamento, que visa finalizar a peça e obter as dimensões finais, as tolerâncias e o acabamento superficial.

Os parâmetros de corte são necessários para que uma operação de usinagem seja realizada com êxito, sendo eles a velocidade de corte, o avanço e a profundidade de usinagem, representados na Figura 4.1a. A *velocidade de corte* (v_c , em mm/min) é o principal movimento relativo entre a ferramenta e a peça, sendo a velocidade tangencial (instantânea) resultante do movimento de rotação da peça ou da ferramenta, dependendo do processo utilizado (torneamento ou fresamento, por exemplo); o *avanço* (f , em mm.rev⁻¹) compreende um movimento mais lento, baseado na movimentação da ferramenta de um lado a outro da peça; e a *profundidade de usinagem* (a_p , em mm), que antigamente era conhecida como profundidade de corte, consiste na penetração da ferramenta de corte abaixo da superfície original do material de trabalho. A geometria da ferramenta e sua penetração na superfície a usinar, combinadas aos movimentos entre ferramenta e peça, produzem a forma desejada da superfície usinada.

Exercício

A velocidade de corte é uma importante grandeza utilizada em processos de usinagem que apresentam movimentos de rotação, como o torneamento. Essa grandeza pode ser obtida por meio de $vc = \pi \cdot d \cdot n / 1.000$, em m/min, em que d é o diâmetro do elemento rotativo no processo de usinagem (ferramenta ou peça, em mm), n corresponde ao número de rotações por minuto (rpm) e a divisão por 1.000 serve para converter mm em m. Com base nessas informações, calcule o número teórico de rotações que deve ser utilizado na operação de torneamento de desbaste de uma peça de bronze-alumínio-níquel, especificamente CuAl-10Ni5Fe5, com 50 mm de diâmetro, considerando 130 m/min a velocidade de corte para esta operação.

Solução:

Os dados fornecidos no exemplo são: $vc = 130$ m/min, $d = 50$ mm (no caso do torneamento, a peça a ser usinada é que realiza o movimento de rotação e, portanto, deve-se utilizar o seu diâmetro neste cálculo) e $n = ?$.

Isolando n e substituindo os dados na equação de vc , temos:

$$v_c = \pi \cdot d \cdot n / 1000$$

$$n = v_c \cdot 1000 / \pi \cdot d$$

$$n = 130 \cdot 1000 / \pi \cdot 50$$

$$n = 827,6 = 828 \text{ rpm (valor teórico aproximado)}$$

Resposta:

O número teórico aproximado de rotações que deve ser utilizado no torneamento de desbaste de uma peça de bronze-alumínio-níquel é 828 rpm.

Observações tecnológicas:

Como as velocidades das máquinas estão estipuladas em faixas determinadas, deve-se utilizar o valor mais próximo do calculado. Para realizar as operações de fresamento ou furação, deve-se considerar o diâmetro da ferramenta de corte (fresa ou da broca, respectivamente), pois é ela que realiza o movimento de rotação durante a usinagem do material.

As ferramentas de geometria definida podem ser mono ou multicortantes. Uma *ferramenta monocortante* apresenta apenas uma aresta de corte (ou gume) e é utilizada para separar o cavaco do material da peça em operações como o torneamento. Nesse tipo de ferramenta, há uma única superfície de saída, sobre a qual o cavaco é formado e escoa durante sua saída da região de trabalho de usinagem. Na Figura 4.1b, são mostradas regiões importantes de uma ferramenta monolítica, com destaque para a aresta de corte, que é o principal gume da ferramenta. Já as *ferramentas multicortantes* têm mais de uma aresta de corte e geralmente realizam seu movimento relativo à peça por meio de rotação, como na furação e no fresamento. A ferramenta de corte pode ser monolítica (inteiriça), compreendendo um conjunto único de cabo e região de contato entre ferramenta e material de trabalho; no caso do uso de insertos, estes podem ser fixados mecanicamente ou por brasagem.

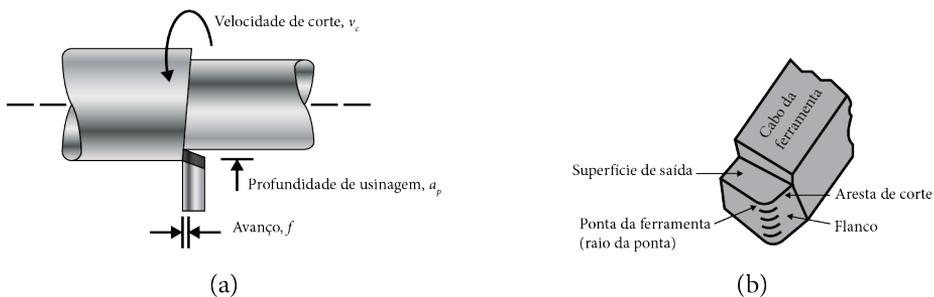


Figura 4.1 – Usinagem de materiais: (a) parâmetros de corte no torneamento e (b) regiões importantes em uma ferramenta monolítica.

Os materiais das ferramentas utilizadas na usinagem podem ser aços rápidos, estelita (ou *stellite*), carbos duros sinterizados, cerâmicas, nitreto de boro cúbico e diamante policristalino.

Um *fluido de corte* pode ser aplicado na operação de usinagem para refrigerar e lubrificar a ferramenta de corte. Geralmente, as condições de usinagem incluem a decisão de usar ou não um fluido de corte e a escolha do fluido adequado. *Usinagem a seco* é o nome dado à usinagem sem fluido de corte. Considerando o material a ser usinado e a ferramenta, a escolha dessas condições influencia muito na determinação do sucesso de uma operação de usinagem.

O termo *máquina-ferramenta* é aplicável a qualquer máquina motorizada que realize uma operação de usinagem, incluindo a retificação. Esse termo também é aplicado às máquinas que realizam operações de conformação plástica.

4.1.1 PROCESSOS CONVENCIONAIS DE USINAGEM

O *torneamento* utiliza uma ferramenta monocortante para remover o material da peça rotativa, a fim de gerar uma forma cilíndrica, podendo ser qualquer componente com elementos de revolução. É possível alimentar o material na máquina (torno) de forma manual ou automática. O movimento que produz a velocidade de corte no torneamento é proporcionado pela rotação da peça, e o movimento de avanço é obtido pela ferramenta de corte se movendo lentamente em uma direção paralela ao eixo de rotação da peça. Esse processo está ilustrado na Figura 4.1a.

Dentro da variedade de operações de torneamento, está o torneamento cilíndrico interno ou externo, o torneamento cônico, o rosqueamento, o faceamento (para obter uma superfície plana) e o sangramento (para obter entalhe circular).

Há a possibilidade de tornos automáticos e semiautomatizados, que seguem operações ativadas por mecanismos das máquinas. O torneamento apresenta potencial muito grande de interação com sistemas de desenho ou projeto assistido por computador (CAD, do inglês *computer-aided design*).

A *furação* é um processo usado para produzir um furo cilíndrico, usando uma ferramenta rotativa multicortante denominada broca, que é introduzida na peça em uma direção paralela ao seu eixo de rotação. A furadeira é a máquina-ferramenta empregada nesse processo de usinagem, e o tipo mais comum é a furadeira de coluna. As principais operações são furação em cheio, alargamento para aumento de furo já existente, furação escalonada com variação de diâmetro da broca e atarraxamento, com o uso de macho para rosqueamento interno em um furo.

O *fresamento* é um processo que usa ferramenta rotativa multicortante (fresa), que avança lentamente através do material e perpendicular ao eixo de rotação da ferramenta para gerar um plano ou superfície reta. O movimento que produz a velocidade

de corte é proporcionado pela fresa rotativa. Apresenta ampla faixa de possibilidades de geometria e materiais de ferramenta de corte.

As fresadoras são as máquinas operatrizes usadas nesse processo, que pode ser horizontal ou vertical. No *fresamento horizontal*, o eixo é paralelo em relação à peça (fresamento tangencial na Figura 4.2a, por exemplo), enquanto no *fresamento vertical*, o eixo de rotação da ferramenta é perpendicular à superfície da peça (fresamento frontal na Figura 4.2b, por exemplo).

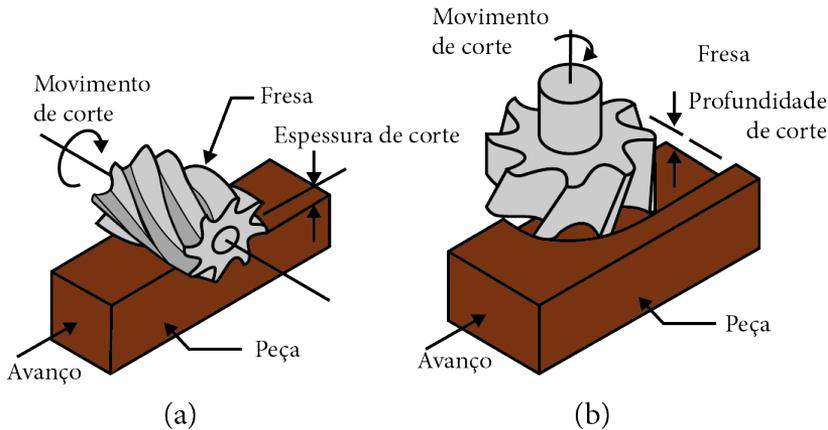


Figura 4.2 – Fresamento: (a) tangencial (horizontal) e (b) frontal (vertical).

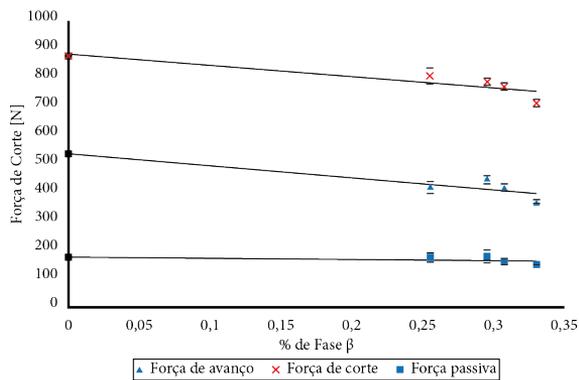
A usinagem no fresamento pode ser concordante ou discordante. No *fresamento concordante*, a direção da passagem do dente da ferramenta de corte pela peça coincide com a direção do avanço quando o dente corta a peça, ocorrendo a espessura máxima do cavaco no início do corte. No *fresamento discordante*, a direção do movimento dos dentes da fresa é oposta à direção de avanço da peça em relação à ferramenta, atingindo a espessura máxima do cavaco no fim do corte.

Outros processos convencionais de usinagem incluem aplainamento, serramento e brochamento. Além disso, a retificação e as operações abrasivas similares são incluídas frequentemente na categoria de usinagem.

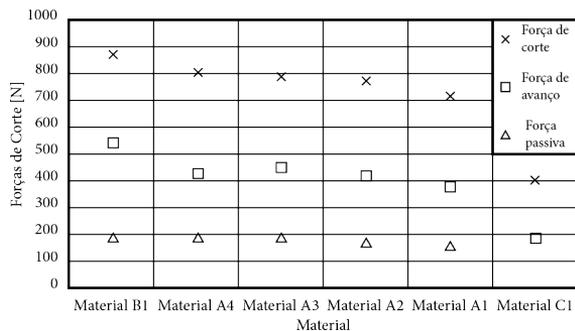
Silva (2015) desenvolveu um estudo sobre a usinagem de ligas de cobre sem chumbo de relevante importância comercial. De forma específica, analisou o efeito da microestrutura na liga 60/40 (latão) isenta de chumbo, com quatro diferentes frações volumétricas e morfologias de fase β , em termos de usinabilidade. Na Tabela 4.1, são mostradas as frações de fase β e as propriedades mecânicas para as ligas envolvidas na pesquisa.

Tabela 4.1 – Fração de fase β e propriedades mecânicas das ligas de cobre estudadas. Adaptado de Silva (2015)

Grupo	Liga	Fração de fase β (%)	Limite de resistência à tração (MPa)	Limite de escoamento (MPa)	Alongamento (%)	Dureza (HV 10)
A1	60/40	34,7	573	553	20	186
A2	60/40	31,2	437	259	46	125
A3	60/40	28,5	391	177	50	102
A4	60/40	25,5	425	243	43	116
B1	70/30	0	332	165	66	86
C1	CLA com Pb	18,7	388	305	36	122



(a)



(b)

Figura 4.3 – (a) Influência da fase β nos esforços de corte e (b) esforços de corte para as ligas de cobre estudadas. Em ambos os casos, adotou-se os mesmos parâmetros de corte. Adaptado de Silva (2015).

Na Figura 4.3a, é mostrada a influência da fase β nos esforços de corte e, na Figura 4.3b, os esforços de corte para as ligas de cobre estudadas. O pesquisador concluiu que a fase β , que apresenta estrutura cúbica de corpo centrado, influencia na redução de forças de corte, conforme indicado na Figura 4.3a; além disso, o estudo demonstrou a influência dessa fase na diminuição de rugosidade do material, baseando-se em valores de R_a (rugosidade média) e R_z (rugosidade de profundidade média).

A aplicação de ligas isentas de chumbo (metal pesado) e em processo de usinagem a seco (ou sem lubrificação) gera uma alternativa interessante no que diz respeito à manufatura verde. A usinagem sem lubrificação é vantajosa para o processo de beneficiamento do cobre, que visa a recuperação desse importante material e reaproveitamento para o processo produtivo. Tal beneficiamento enquadra-se como forma de Economia Circular, em que o cliente pode utilizar sucata de cobre como parte do pagamento do produto, além de possibilitar menor consumo de energia no reprocessamento do cobre e suas ligas.

Guimarães *et al.* (2021) observaram em estudos sobre torneamento com comando numérico computadorizado (CNC) e sem refrigeração na liga bronze-alumínio-níquel CuAl10Ni5Fe5, com encruamento e tratada termicamente por um tipo de recozimento (SRA, do inglês *stress relief annealed*), que, na maior velocidade aplicada ($v_c = 450$ m/min), os valores de rugosidade ficaram menores e mais estáveis durante a vida de ferramenta avaliada. A condição com $v_c = 80$ m/min apresentou os maiores valores de rugosidade e a maior variação durante a vida avaliada. A condição intermediária com $v_c = 280$ m/min apresentou baixa rugosidade inicial, porém com maior variação comparada com a $v_c = 450$ m/min, conforme mostrado na Figura 4.4.

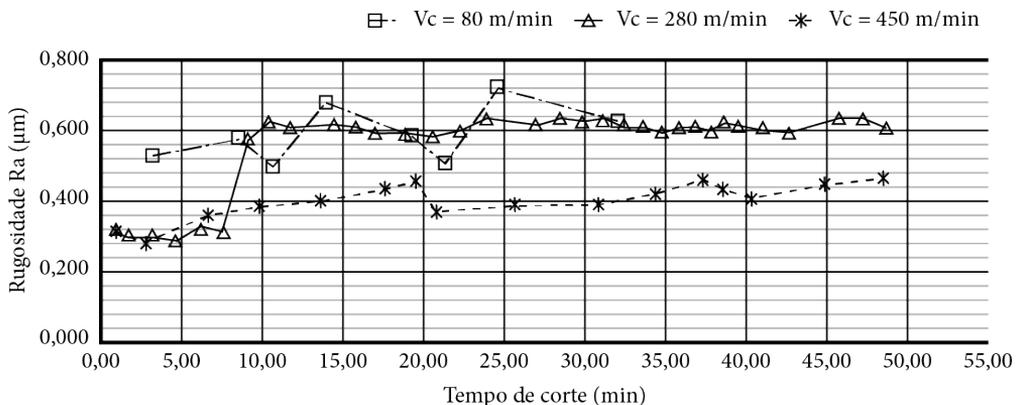


Figura 4.4 - Variação da rugosidade pastilha MD-PVD – $v_c = 80, 280$ e 450 m/min. (Guimarães *et al.*, 2021)

Estudos mais detalhados mostraram que a velocidade de corte de 280 m/min apresentou melhor combinação de menor variação dimensional e rugosidade. Na condição de $v_c = 80$ m/min, ocorreu excessiva variação da rugosidade, ultrapassando o limite

estabelecido antes de atingir a vida útil considerada. Os pesquisadores notaram também que a pastilha de cermet com revestimento PVD, que significa deposição física de vapor, apresentou comportamento muito semelhante à de metal duro com PVD nas mesmas condições experimentais, porém com maior variação dimensional.

Em condições de baixa velocidade de corte, ocorre a formação de aresta postiça de corte (APC) na ferramenta. Durante a usinagem, a aresta postiça de corte se quebra ciclicamente e é removida da área de corte. Tal fenômeno afeta a superfície de saída de cavacos da ferramenta, alterando a geometria de corte e prejudicando o acabamento superficial da peça.

4.1.2 PROCESSOS ABRASIVOS

Retificação é um processo de remoção de material realizado por ferramenta abrasiva de revolução, o rebolo, que, em geral, tem a forma de disco e é balanceado precisamente para altas velocidades de rotação empregadas no processo. Os tipos de rebolos se diferenciam pelo formato, tipo de grão e dureza. Materiais aglomerantes (ou ligantes) como metal, vidro, resina ou borracha mantêm unidos os grãos abrasivos que formam o rebolo e estabelecem a forma e a integridade estrutural dessa ferramenta abrasiva. Os materiais abrasivos comumente empregados são o carboneto de silício (SiC) e a alumina (Al_2O_3); o nitreto de boro cúbico (CBN) e o diamante também são utilizados.

A retificação é um processo importante, podendo ser usada em todos os tipos de metais, dúcteis e endurecidos, principalmente nas operações de acabamento, propiciando ótimo acabamento superficial com Ra de até 0,025 μm .

A retificadora é a máquina utilizada na retificação. Alguns tipos de retificação são: *cilíndrica*, em que a superfície usinada é uma superfície cilíndrica interna ou externa; *plana*, em que a superfície usinada é, como o próprio nome diz, plana; *sem centros* (*centerless*), que é uma retificação cilíndrica na qual a peça sem fixação axial é retificada por rebolos, com ou sem movimento longitudinal da peça; e *creep-feed*, que é realizada em único passe com uma grande profundidade de usinagem.

A *dressagem* é um procedimento importante para recuperar rebolos com a capacidade de autoafiação prejudicada, por meio de um disco rotativo ou outro rebolo de retificação que opera em alta velocidade contra o rebolo a ser *dressado* à medida que ele gira. O procedimento objetiva romper os grãos sobre a periferia externa do rebolo para expor grãos novos afiados e remover cavacos que obstruem o rebolo. Já o *perfilamento* é um procedimento alternativo que afia o rebolo e recupera a sua forma cilíndrica.

4.1.3 PROCESSOS NÃO CONVENCIONAIS DE USINAGEM

Os processos não convencionais (ou não tradicionais) de usinagem são processos avançados, classificados frequentemente de acordo com a forma principal de energia utilizada para efetuar a remoção do material, que pode ser mecânica, elétrica, térmica e química.

As necessidades que resultam na importância comercial e tecnológica dos processos não convencionais incluem a necessidade de usinar novos materiais metálicos e não metálicos, de produzir peças com geometrias incomuns que não podem ser obtidas facilmente por usinagem convencional e de evitar as tensões residuais criadas pela usinagem convencional. Boa parte dessas necessidades está associada ao setor aeroespacial. Há dezenas de processos de usinagem não convencionais, e alguns deles são definidos a seguir.

A *usinagem por eletroerosão* (EDM, do inglês *Electric Discharge Machining*) é um dos processos não tradicionais de usinagem mais utilizados, que emprega descargas elétricas para gerar energia térmica, com temperaturas localizadas elevadas. A cavidade da peça acabada é produzida por um eletrodo (geralmente de grafite) com a forma desejada a ser produzida. A cavidade é produzida pela fusão ou vaporização localizada do metal, causada por descargas elétricas geradas por uma fonte de energia. As faíscas ocorrem através de um pequeno *gap* entre a ferramenta e a superfície da peça. O processo usa um fluido dielétrico, que resfria os cavacos e os leva da superfície da peça. Geralmente, um CNC é empregado nesse processo. A *eletroerosão a fio* é uma forma especial de usinagem por eletroerosão, que usa um fio de pequeno diâmetro como eletrodo para fazer um corte estreito na peça.

A *usinagem ultrassônica* (USM, do inglês *Ultrasonic Machining*) é um processo em que uma lama abrasiva é movida contra a peça por uma ferramenta vibratória em baixa amplitude e alta frequência. A lama é formada por abrasivos como CBN, SiC e diamante, contidos numa suspensão em água em concentrações de 20% a 60%. A ferramenta oscila em uma direção perpendicular à superfície da peça e é avançada lentamente para a peça, de modo que a forma da ferramenta é transmitida para a peça. Porém, é a ação dos abrasivos, colidindo com a superfície da peça, que realiza o corte. Nesse caso, trata-se do uso de energia mecânica que não envolve a ação de uma ferramenta de corte convencional.

A *usinagem química* (CM, do inglês *Chemical Machining*) utiliza produtos químicos para remover seletivamente o material de partes da peça, enquanto outras partes da superfície são protegidas por uma máscara, que é gerada por tintas, fitas ou materiais poliméricos. A escolha adequada do corrosivo químico possibilita que a maioria dos materiais seja usinada dessa forma.

A *usinagem eletroquímica* (ECM, do inglês *Electrochemical Machining*) remove o metal de uma peça condutora de eletricidade por meio de eletrólise, na qual a forma da peça é obtida por um eletrodo, geralmente de cobre, que fica em grande proximidade com a peça, imersa em um banho contendo eletrólito que flui rapidamente. A peça é o anodo, e a ferramenta é o catodo. Esse processo utiliza energia eletroquímica para remover material, e o mecanismo é o inverso da galvanoplastia (ou eletrodeposição).

A *usinagem por jato abrasivo* é um processo indicado para materiais frágeis e consiste na ação erosiva de um abrasivo em um fluido que é focalizado em um jato de alta velocidade por meio de um bocal de safira ou de tungstênio. Trata-se de um processo que usa energia mecânica para o corte do material. O meio fluido é a água ou um gás (ar ou dióxido de carbono) e os abrasivos podem ser alumina e carbetto de silício.

O bocal pode ser redondo ou quadrado e a profundidade do corte pode ser ampliada de acordo com a pressão do jato.

Além dos processos citados, outras possibilidades de usinagem não tradicional incluem a *usinagem por feixe de elétrons* (EBM, do inglês *Electron Beam Machining*), que utiliza um fluxo de elétrons focalizado na superfície da peça para remover o material por fusão e vaporização, e a *usinagem a laser* (LBM, do inglês *Laser Beam Machining*), que utiliza um feixe de laser para remover material por meio de vaporização e ablação.

4.2 PROCESSOS DE UNIÃO

Soldagem é um processo de manufatura utilizado para unir materiais no qual duas ou mais peças são coalescidas em suas superfícies de contato pela aplicação adequada de calor e/ou pressão.

Em alguns processos de soldagem, um material de *adição* é acrescentado para facilitar a coalescência. A montagem das peças unidas por soldagem se chama *conjunto soldado*. Geralmente, a soldagem é utilizada em peças metálicas, mas o processo também é utilizado para unir outros tipos de materiais, como polímeros termoplásticos.

Os processos de soldagem utilizam diversas formas ou combinações de energia: elétricas, químicas, ópticas e mecânicas. Eles podem ser divididos, basicamente, em dois grupos principais: por fusão e no estado sólido. Há também a brasagem e a soldagem branda ou fraca, nas quais apenas o metal de adição é fundido, e não o metal de base.

4.2.1 SOLDAGEM POR FUSÃO

Trata-se de diversos processos de soldagem que utilizam a fusão e a solidificação do material na zona de junção. As principais zonas de um processo de soldagem por fusão, representadas na Figura 4.5, são: as zonas de metal de adição e metal de base nos estados líquidos (fundidos), cuja mistura gera a *zona de fusão*; a zona de metal de base solidificado, um contorno estreito denominado *interface da solda* que separa a zona de fusão da zona afetada pelo calor (ZAC); e a zona do metal de base que não foi afetada e, portanto, não apresenta alteração metalúrgica. Porém, em função da contração do metal na zona de fusão, o metal de base que circunda a ZAC é suscetível a um estado de tensão residual elevado.

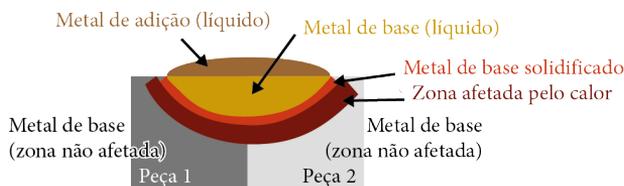


Figura 4.5 – Processo de soldagem por fusão.

Na sequência são apresentadas definições e informações tecnológicas sobre importantes processos de soldagem por fusão.

Há um grupo de processos de soldagem cujo aquecimento dos metais é obtido a partir de um arco elétrico, chamado *soldagem a arco* (AW, do inglês *Arc Welding*). Em relação às questões técnicas, os processos de soldagem a arco utilizam eletrodos consumíveis ou não e carecem de proteção do arco em função das altas temperaturas do arco elétrico (6.000 °C a 30.000 °C). Essa proteção é obtida pelo revestimento da ponta do eletrodo, do arco e da poça de solda fundida com uma camada de gás ou fluxo, ou ambos, que inibe a exposição do metal de solda ao ar. Algumas operações de soldagem a arco também aplicam pressão durante o processo, e a maioria utiliza um metal de adição.

Curiosidade

O *fluxo* é um material colocado no local a ser soldado em alguns processos de soldagem. Durante a soldagem, ocorre a fusão e a transformação do fluxo em escória líquida, cobrindo a operação e protegendo o metal de solda fundido. O fluxo é formulado com misturas complexas para atender várias funções, como proporcionar atmosfera protetora para a soldagem, estabilizar o arco e reduzir os respingos.

O *processo de soldagem* (TIG, do inglês *Tungsten Inert Gas*), também chamado de *soldagem a arco tungstênio com atmosfera gasosa*, é um processo a arco elétrico, gerado automaticamente na linha de união entre a peça e um eletrodo não consumível de tungstênio, com a proteção gasosa de um gás inerte, geralmente argônio, para evitar oxidação e contaminação. Nesse processo, o metal é fundido e a solda é gerada com ou sem metal de adição. Ele é aplicado à maioria dos metais não ferrosos como o cobre. No caso específico do cobre, em função da sua elevada condutividade térmica, utiliza-se uma mistura de hélio e argônio como gás de proteção; esse procedimento também é adotado na soldagem de materiais com espessuras superiores a 6 mm, para obter maiores taxas de penetração e solda.

O *processo de soldagem* (MIG, do inglês *Metal Inert Gas*) é um processo a arco elétrico no qual o eletrodo consumível é um arame metálico não revestido (nu), e a proteção é obtida pelo preenchimento do arco com um gás inerte, como o argônio ou

o hélio. Os gases inertes são utilizados para soldar ligas de alumínio e aços inoxidáveis. No *processo de soldagem* (MAG, do inglês *Metal Active Gas*), o processo é parecido, porém este utiliza um gás ativo como o dióxido de carbono ou combinações de dióxido de carbono com argônio ou oxigênio com argônio, que oxida o metal durante a soldagem. A oxidação de um filme da superfície da poça de fusão proporciona benefícios como a estabilidade do arco; para evitar a formação de inclusões na solda, são adicionados elementos desoxidantes, como o manganês. MAG é um processo frequentemente empregado na soldagem de aços com baixo e médio teor de carbono. Nesses dois processos, conhecidos como *soldagem a arco metálico com atmosfera gasosa*, a combinação do eletrodo nu e da atmosfera gasosa controlada elimina a deposição de escória no cordão de solda e, com isso, dispensa a necessidade de esmerilhamento manual e remoção da escória. Os dois processos são ideais para soldagens multipasses na mesma junta.

A *soldagem a arco com eletrodo revestido* (SMAW, do inglês *Shielded Metal Arc Welding*) é um processo de soldagem no qual a fusão do metal é produzida pelo aquecimento gerado por um arco elétrico mantido entre a ponta de um eletrodo consumível e a superfície do metal de base. O eletrodo consiste em uma vareta de metal de adição revestida com elementos químicos que fornecem a proteção gasosa ao processo de soldagem.

A *soldagem a arco com arame tubular* (FCAW, do inglês *Flux-Cored Arc Welding*) é um processo de soldagem a arco elétrico, no qual o eletrodo é um tubo consumível na forma de arame e contínuo, que contém fluxo e outros elementos em seu núcleo, como desoxidantes e elementos de liga. O eletrodo é flexível e pode ser fornecido na forma de bobinas para ser alimentado continuamente por meio de uma pistola de soldagem a arco. Existem duas variações do processo FCAW: *soldagem com arame tubular autoprottegida*, com proteção fornecida por um núcleo com fluxo, e *soldagem com arame tubular e proteção gasosa*, que obtém a proteção do arco a partir de gases fornecidos externamente.

A *soldagem a arco submerso* (SAW, do inglês *Submerged Arc Welding*) é um processo de soldagem a arco elétrico similar à soldagem a arco elétrico com eletrodo revestido. No processo SAW, utiliza-se um arame (eletrodo) sem revestimento, consumível e contínuo, e a proteção do arco é proporcionada por uma camada de fluxo granular. O arame é alimentado automaticamente no arco a partir de uma bobina. O fluxo é introduzido na junta, ligeiramente à frente do arco de solda, por gravidade, proveniente de um funil. A operação de soldagem fica completamente submersa na camada de fluxo granular, prevenindo centelhas, respingos e radiação, que são muito nocivos em outros processos de soldagem a arco elétrico. O processo SAW é amplamente utilizado na fabricação de aços para perfis estruturais (por exemplo, soldagem de vigas em I), costuras longitudinais e circunferências para tubos de grande diâmetro, vasos de pressão e componentes soldados para máquinas pesadas.

A *soldagem a arco plasma* (PAW, do inglês *Plasma Arc Welding*) é uma forma especial de soldagem TIG, em que um arco plasma constricto entre um eletrodo não consumível de tungstênio e o metal ou entre o eletrodo e o bocal de constrição produz o aquecimento necessário para fundir e unir as partes. Nesse processo, utiliza-se um fluxo de gás inerte de alta velocidade na região do arco para formar um fluxo de arco plasma intensamente quente, com temperaturas que atingem 33.000 °C, à alta velocidade, tornando possível a fusão de qualquer metal conhecido.

Curiosidade

O arco elétrico produz, com a finalidade de soldar ou cortar, um calor tão intenso que pode fundir praticamente qualquer metal. A maioria dos processos de corte a arco usa o calor gerado por um arco elétrico entre um eletrodo e uma peça metálica para produzir um corte que separa a peça por meio de fusão. Os processos de corte a arco são processos especiais de usinagem que empregam energia térmica, e os mais comuns são o *corte a plasma*, que separa metais pela fusão de uma área localizada com um arco de plasma e remove o material fundido com um jato de gás ionizado de alta velocidade, e o *corte a arco com eletrodo de carvão*, no qual a fusão dos metais a serem cortados é gerada pelo calor estabelecido entre um eletrodo de carvão (ou carbono) e a peça, e de forma simultânea um jato de ar comprimido remove o material fundido.

A *soldagem por eletroescória* (ESW, do inglês *Electroslag Welding*) é um processo de soldagem por fusão em que o coalescimento dos metais é obtido por calor gerado pela resistência que uma escória fundida quente, eletricamente condutora, oferece à passagem de corrente elétrica entre o eletrodo consumível e a peça. É realizada em uma orientação vertical usando sapatas de retenção refrigeradas com água para conter a escória fundida e o metal de solda. Vale ressaltar que um arco entre a ponta do eletrodo consumível e a região da peça de trabalho é estabelecido no início desse processo, mas não o caracteriza como soldagem a arco. Outro processo é a *soldagem por eletrogás* (EGW, do inglês *Electrogas Welding*), similar à soldagem por eletroescória, porém o calor do processo EGW é gerado pelo arco elétrico estabelecido entre o eletrodo consumível contínuo e a peça, sendo, portanto, um processo de soldagem a arco.

A *soldagem por resistência* (RW, do inglês *Resistance Welding*) compreende um grupo de processos de soldagem por fusão que utiliza uma combinação de calor e pressão para obter coalescência, com o calor sendo gerado pela resistência elétrica resultante do fluxo de corrente entre as junções a serem soldadas. A *soldagem por resistência por ponto* (RSW, do inglês *Resistance Spot Welding*), também conhecida como *soldagem por ponto*, é um processo de soldagem no qual a fusão das superfícies de atrito de uma junta sobreposta é obtida em um local por eletrodos em posições opostas. Trata-se do processo de soldagem por resistência mais difundido, que resulta em uma zona fundida entre as duas peças, chamada *lente de solda* ou *pepita de solda*.

Um exemplo de aplicação desse processo está na soldagem de cabines de caminhões, que utiliza robôs e apresenta elevado nível de automação.

A *soldagem por resistência por costura* (RSEW, do inglês *Resistance Seam Welding*) é um processo de soldagem por resistência cujos eletrodos giratórios tem o formato de rodas ou rolos, diferentemente da soldagem por ponto, cujos eletrodos têm forma de vareta. Em função desse formato, uma série de soldas por pontos sobrepostas são feitas ao longo da junta. A soldagem por costura apresenta aplicações industriais na produção de tanques de gasolina, silenciador de automóveis e outros recipientes fabricados de chapas metálicas.

De forma geral, a soldagem por resistência utiliza eletrodos não consumíveis, e não usa gases de proteção, fluxo ou metal de adição. Apesar de o calor aplicado nesses processos quase sempre causar a fusão das superfícies em atrito, algumas operações de soldagem baseadas em aquecimento por resistência elétrica empregam temperaturas abaixo dos pontos de fusão dos metais de base. No entanto, a soldagem por resistência é classificada como soldagem por fusão.

A *soldagem por oxigás* (OFW, do inglês *Oxyfuel Gas Welding*) consiste no processo de soldagem por fusão realizada por meio da queima de vários combustíveis misturados com oxigênio. O gás oxicombustível também é utilizado frequentemente em maçaricos para cortar e separar placas metálicas e outras peças. O gás mais utilizado é o acetileno, recebendo o nome de soldagem oxiacetileno, de baixo custo e com chama de até 3.100 °C.

Outros processos de soldagem por fusão são a *soldagem por feixe de elétrons* (EBW, do inglês *Electron-Beam Welding*), cujo calor para a união entre os metais similares ou dissimilares é produzido por um fluxo de alta intensidade e uma corrente extremamente concentrada de elétrons que incidem sobre a superfície de trabalho, e a *soldagem por laser* (LBW, do inglês *Laser-Beam Welding*), cujo coalescimento é alcançado pela energia de um feixe de luz coerente e altamente concentrado, focalizado sobre a junta a ser soldada, sendo realizado normalmente com atmosfera gasosa para prevenir a oxidação e sem um metal de adição. Esses dois processos são empregados para produzir soldas de alta qualidade, penetração elevada e uma estreita zona afetada pelo calor.

4.2.2 SOLDAGEM NO ESTADO SÓLIDO

Soldagem por atrito ou *por fricção* (FRW, do inglês *Friction Welding*) é um processo de soldagem no estado sólido no qual a união dos metais é alcançada pelo calor gerado pelo atrito combinado com pressão. O atrito é induzido pelo contato e pelo movimento relativo entre os metais de base, geralmente pela alta rotação de uma peça em relação à outra fixa (duas barras redondas ou tubos), elevando a temperatura na interface da junta até a faixa de trabalho a quente dos metais envolvidos, pois ocorre deformação plástica. Esse processo também é denominado de *soldagem por atrito rotativo* ou *soldagem por atrito convencional*.

Em termos históricos, esse processo foi desenvolvido na antiga União Soviética e introduzido nos Estados Unidos por volta de 1960. Há dois tipos de soldagem por atrito rotativo: *não inercial*, no qual ocorre a interrupção brusca da rotação e o aumento da pressão até completar a ligação metalúrgica (Figura 4.6); e *inercial*, no qual o sistema de rotação é deixado a sua própria inércia após ser liberado por um sistema de embreagem, e a pressão é criada com o avanço do cabeçote até completar a ligação metalúrgica.

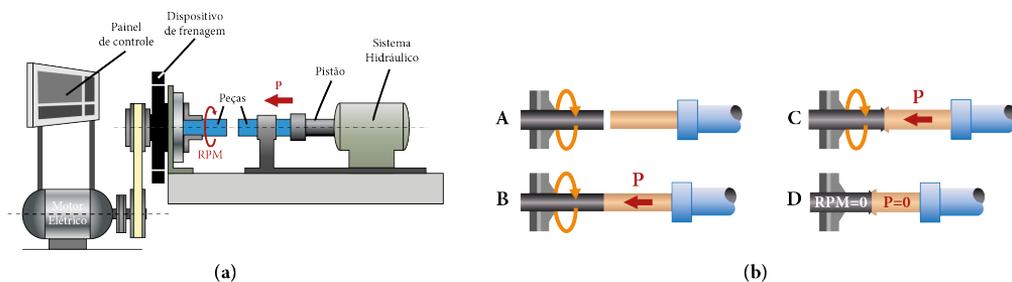


Figura 4.6 – (a) Equipamento de soldagem por atrito rotativo e (b) etapas da soldagem por atrito rotativo: A - período de aproximação; B - desligamento do motor e aplicação da pressão “P”; C - diminuição da velocidade de rotação (RPM) pela aplicação da pressão “P”; e D - fim da soldagem (RPM=0, P=0). Adaptado de Monteiro *et al.* (2021).

A força de compressão axial durante o processo de soldagem por atrito convencional recalca as peças por meio da deformação plástica gerada, e uma rebarba é produzida pelo material deslocado. A rebarba deve ser retirada para promover uma superfície plana na região da solda. Trata-se de um processo de soldagem que pode ser aplicado praticamente em todos os metais similares e dissimilares, sem o uso de metal de adição, fluxo e gases protetores. A soldagem por atrito é propensa aos métodos de produção automatizados e apresenta como fator limitador o alto custo do equipamento.

Monteiro *et al.* (2021) analisaram o comportamento da microestrutura e o mecânico da liga de cobre bronze-alumínio-silício UNS C64200 e levantaram os parâmetros de soldagem ideais após esse material ser submetido ao processo de soldagem por atrito rotativo convencional (*não inercial*). Os parâmetros são responsáveis tanto pela soldabilidade da junta como pelos defeitos – por exemplo, trincas, fases intermetálicas, inclusões ou deformações que irão interferir diretamente nas propriedades mecânicas do material.

O foco da pesquisa baseou-se na melhor alternativa de combinações de parâmetros que garanta a eficiência da junta soldada. De acordo com os resultados da micrografia, assim como a estrutura da soldagem realizada, pode-se definir os parâmetros ótimos e realizar a sequência das outras soldagens. Na Tabela 4.2, são mostrados os parâmetros de soldagem adotados em seis amostras que, em função do número de ensaio, são denominadas de E1 a E6, sendo E1 pertinente ao número de ensaio 1 e assim por diante até a sexta amostra.

Tabela 4.2 – Registros dos ensaios obtidos na soldagem por atrito rotativo para a liga de cobre estudada

No Ensaio	Rotação inicial da Máquina (rpm)	Pressão de Atrito (MPa)	Rotação de Trabalho (rpm)	Tempo de Atrito (s)	Pressão de Recalque (MPa)	Tempo de Recalque (MPa)	Comprimento inicial (mm)	Comprimento final (mm)	Perda por conformação (mm)
01	1000	3200	0,1	20	4	15	130	117	13
02	1000	3200	0,1	10	3	10	131	129	2
03	1000	3200	0,3	10	4	15	132	131	1
04	1000	3200	0,3	15	4	15	131	128	3
05	1000	3200	0,3	17	4	15	130	124	6
06	1000	3200	0,3	17	4	15	130	122	8

Na Figura 4.7, é mostrada a disposição dos seis corpos de prova soldados, em sequência crescente da esquerda para a direita. Dos seis experimentos realizados, notou-se que E1 apresentou boa soldabilidade, porém, pela rebarba gerada da conformação mecânica, apresentou também uma perda muito grande de material, fato que sugeriu novos ajustes de parâmetros para a sequência de soldagens.

De forma visual, E2 e E3 apresentaram uma soldabilidade falha, constatada por ocasião de realização de esforços laterais por meio de pancada, ocasionando o rompimento da união. E4 ainda sugeriu falta de adesão na região soldada por conta da rebarba na junta e, finalmente, E5 apresentou características típicas de uma boa adesão da junta soldada, o que permitiu a repetição dos mesmos parâmetros em E6.



Figura 4.7 – Sequência de amostras obtidas por soldagem por atrito rotativo para seleção do melhor ajuste de parâmetros para a liga UNS C64200. (Monteiro *et al.*, 2021)

Na Figura 4.8, são mostrados detalhes da microestrutura da liga de cobre soldada, considerando o mesmo aumento para o experimento E1 para: a) material de base (MB); b) zona termomecânica afetada (ZTMA); c) zona afetada pelo calor (ZAC); e d) região soldada (RS), na qual se pode notar o refinamento da microestrutura.

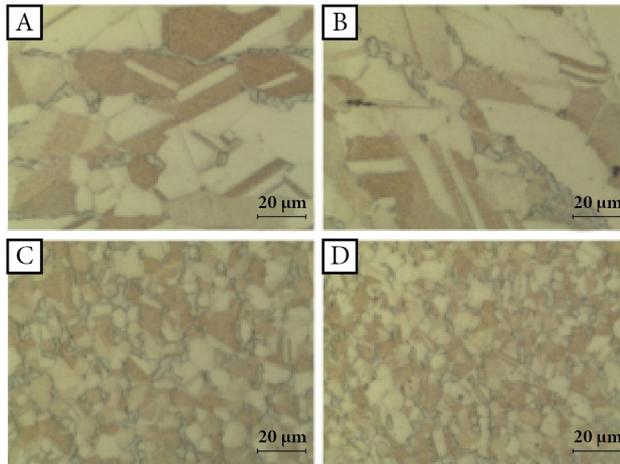


Figura 4.8- Microestrutura para cada região: (A) MB, (B) ZTMA, (C) ZAC e (D) RS. (Monteiro *et al.*, 2021)

Essa pesquisa permite afirmar que a soldagem por atrito convencional para barras cilíndricas da liga UNS C64200, com dimensões 15,875 mm de diâmetro e 65 mm de comprimento, produzidas pela Termomecanica São Paulo S.A. e unidas por esse processo, revela-se como uma eficaz e promissora técnica capaz de obter uniões satisfatórias. A resposta do experimento E5 apresenta parâmetros ótimos para os valores de 3.200 rpm, pressão de atrito de 0,3 MPa, pressão de forjamento de 4 MPa e, respectivamente, 17 e 15 segundos para os tempos de atrito e forjamento. Os parâmetros foram confirmados no experimento E6 e comparados entre si, revelando e atestando os dados adquiridos.

De acordo com as aferições realizadas, nenhum dos valores de dureza ficou abaixo do mínimo estabelecido por norma, sendo observada uma dureza média de 89,4 HRB, o que comprova a diminuição do grão e aumento da dureza em relação à dureza do metal na condição de fornecimento, que é 86,5 HRB.

No tocante ao ensaio de tração realizado, as propriedades mecânicas levantadas em um primeiro momento apresentaram valores para o material em estado de fornecimento de LRT = 572,5 MPa, LE a 0,5% de 390,5 MPa e alongamento médio de 21,5%. As amostras soldadas chegaram a valores de LRT = 587 MPa, LE = 337 MPa a 0,5% e alongamento de 53%. Notou-se que os valores encontrados após a peça ser submetida à soldagem por atrito rotativo convencional agiram de maneira satisfatória, apresentando comportamento mecânico superior quando examinado o LRT e um alongamento acima do dobro da amostra em estado de fornecimento.

A soldagem por atrito e mistura (FSW, do inglês *Friction Stir Welding*), também conhecido como *soldagem por agitação e atrito*, é um processo de soldagem no estado sólido no qual uma ferramenta rotativa não consumível avança ao longo da linha de união entre duas peças a serem soldadas, gerando calor de atrito e agitação mecânica

do metal para formar o cordão de solda. O processo FSW é relativamente novo, pois foi desenvolvido em 1991 no *The Welding Institute*, em Cambridge, Inglaterra. O processo FSW diferencia-se do processo de soldagem por atrito convencional pelo fato de que o calor de atrito é gerado por uma ferramenta resistente ao desgaste separada, em vez das próprias peças (metais de base).

A ferramenta rotativa é escalonada, consistindo em uma base (“ombro” cilíndrico) e um pequeno pino central projetado abaixo do ombro, como mostrado na Figura 4.9. Durante o processo FSW, a base entra em atrito com as superfícies de topo das duas peças, desenvolvendo uma grande parte do calor de atrito, enquanto o pino central gera calor adicional misturando mecanicamente o metal ao longo das superfícies de topo. O calor produzido pela combinação de atrito e mistura não funde o metal, mas o amolece para que ocorra deformação plástica. À medida que a ferramenta avança ao longo da junta, a superfície principal do pino gira e pressiona o metal em torno dele e em seu percurso, produzindo forças que forjam o metal em uma costura de solda. A base serve para restringir o fluxo de metal plastificado em torno do pino.

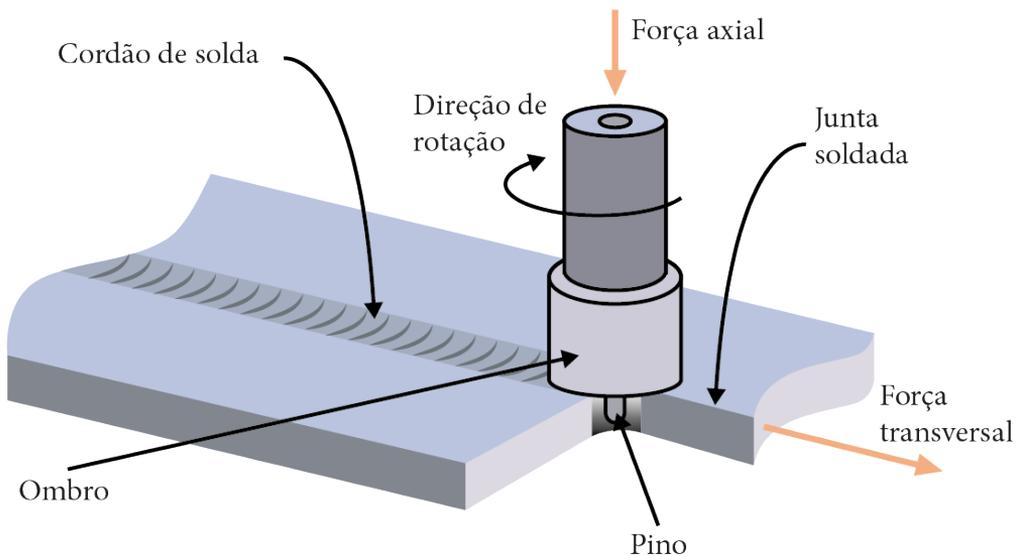


Figura 4.9 – Processo *friction stir welding* (FSW). (Rosa et al., 2023)

O processo FSW é aplicado nas indústrias aeroespacial, automotiva, ferroviária e naval, principalmente para juntas de topo em grandes peças de ligas de alumínio (séries 2xxx, 5xxx, 6xxx e 7xxx), incluindo ligas que não podem ser soldadas por técnicas de soldagem por fusão. O cobre e suas ligas também têm sido soldados por esse processo. Entre suas vantagens estão a obtenção de boas propriedades mecânicas da junta de solda, a ausência de problemas como gases tóxicos e empenamento, pouca distorção ou contração e bom aspecto da solda. A produção de um furo na peça quando a ferramenta é retirada é uma desvantagem desse processo.

Rosa *et al.* (2023) desenvolveram pesquisa sobre a caracterização do processo FSW de juntas sobrepostas da liga cobre-zinco UNS C27200. Nesse trabalho, todas as amostras apresentaram redução de dureza na zona de mistura/agitação (ZM), quando comparado ao seu metal base (MB). Apesar de as maiores diferenças de durezas serem apresentadas no lado de avanço na região compreendida pela zona afetada pelo calor (ZAC) de cada solda, onde se tem maior concentração de calor no lado de avanço devido ao arrasto de material do que no lado de recuo, o *nugget* também apresentou uma diferença considerável, conforme observado na Figura 4.10.

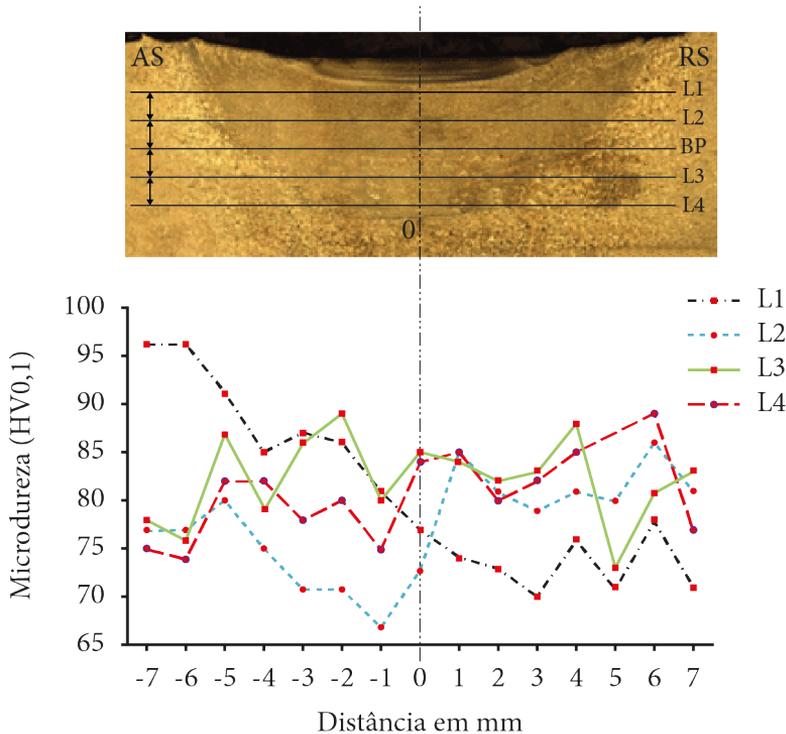


Figura 4.10 – Perfil de microdureza *Vickers* em relação ao centro da solda com velocidade de rotação (VR = 1050 rpm) e velocidade de soldagem (VS = 20 mm/min). (Rosa *et al.*, 2023)

O pico de temperatura foi obtido justamente na linha de simetria da junta, sendo uma região de identificação visual facilitada, com maior garantia para a análise. Ocorreu também a contribuição da forma do pino, de que o formato cônico resultou em perfil de temperatura maior que um formato cilíndrico e que a força axial na soldagem também foi maior, de maneira que aumentou a geração de calor na condição a quente, causando redução expressiva na dureza média para 80,4 HV0,1, se comparado ao metal base de 179 HV0,1. Houve redução gradual de dureza de 40% a 50% na região de mistura (ZM) em relação ao metal base (MB).

A *soldagem por difusão* (DFW, do inglês *Diffusion Welding*) é um processo de soldagem no estado sólido que resulta da aplicação de calor e pressão, geralmente em atmosfera inerte controlada, cujo principal mecanismo de união dos metais é a difusão no estado sólido, envolvendo a migração dos átomos através das interfaces entre as superfícies de contato. A interdifusão atômica e uma deformação plástica localizada na interface da união criam a ligação metalúrgica após um período. Nas indústrias aeroespacial e nuclear, as aplicações desse processo incluem a união de metais de alta resistência e refratários, podendo ser similares ou dissimilares. Normalmente, na união de metais dissimilares, insere-se uma camada de enchimento de metal diferente entre os dois de base para promover a difusão.

A *soldagem por explosão* (EXW, do inglês *Explosion Welding*) é um processo de soldagem no estado sólido no qual a rápida união de duas superfícies metálicas é ocasionada pela energia de detonação de um explosivo. Em geral, o processo EXW é utilizado na união de dois metais dissimilares, particularmente para aplicar um metal como revestimento de um metal de base (revestimento por explosão). O processo não usa metal de adição, nem aplicação de calor externo, e não ocorre difusão durante o processo.

A *soldagem por ultrassom* (SW, em inglês *Ultrasonic Welding*) é um processo de soldagem no estado sólido em que dois componentes são unidos sob uma pequena pressão de aperto na face da união, provocada por uma sonda vibratória, com o objetivo de provocar o coalescimento. O movimento oscilatório entre as duas peças rompe quaisquer óxidos superficiais, propiciando o maior contato e a elevação da temperatura para que ocorra a forte ligação metalúrgica entre as superfícies. Nesse processo, não é necessário usar metais de adição, fluxos ou gases de proteção. A soldagem ultrassônica pode ser usada em metais mais dúcteis como ligas de cobre e na união de materiais dissimilares.

Em função da soldagem no estado sólido normalmente estar associada à deformação plástica, há processos cujas denominações combinam soldagem com processo de conformação mecânica; esse é o caso da soldagem por forjamento e uma de suas variantes, a soldagem por laminação. A *soldagem por forjamento* é um processo no qual os componentes a serem unidos são aquecidos até altas temperaturas de trabalho e depois forjados juntos por meio de um martelo ou outros meios. A *soldagem por laminação* ou *soldagem por rolos* (ROW, do inglês *Roll Welding*) é um processo no qual é aplicada pressão suficiente através de rolos para provocar o coalescimento do material, com ou sem aplicação externa de calor. Outra variante é a *soldagem por forjamento a frio* (CW, do inglês *Cold Welding*), que ocorre em temperatura ambiente, pela aplicação de alta pressão entre as superfícies de contato excepcionalmente limpas, exigindo desengraxe e escovação delas. Um exemplo de aplicação de CW está na preparação de conexões elétricas.

Outros processos de união de materiais incluem a brasagem, a soldagem branda e a união adesiva. A *brasagem* consiste na aplicação de calor, fundindo um material de adição, que tenha temperatura de fusão maior ou igual a 450 °C, na região interfacial entre as peças a serem unidas que não se fundem. Na brasagem, a união ocorre por

ação capilar do metal de adição e, geralmente, utiliza-se um fluxo para evitar a oxidação e auxiliar na remoção de óxidos quando formados para, assim, reduzir a fumaça. Exemplos de metais de adição usados na brasagem são cobre para aço doce e ligas de cobre (latões e bronzes) para cobre.

A *soldagem branda* ou *soldagem fraca* aplica princípio de processamento similar à brasagem, com a diferença de que o metal de adição se funde à temperatura inferior a 450 °C. Exemplos de metais de adição usados na soldagem branda são as ligas de chumbo-estanho, chumbo-prata e estanho-antimônio. A brasagem e a soldagem branda são comumente aplicadas em uniões de chapas metálicas e tubulares, e a aplicação da soldagem branda tem destaque em conexões elétricas.

4.3 MANUFATURA ADITIVA

Em processos de fabricação de produtos, é comum se deparar com a manufatura subtrativa, na qual se utilizam os processos de usinagem tradicionais e não tradicionais para a remoção de materiais e, dessa forma, obter as dimensões e qualidade superficial desejadas nas peças ou componentes. Nesta seção, são destacados os processos que utilizam o princípio da adição de material para fabricar itens, denominados de *manufatura aditiva*.

A Figura 4.11 mostra os princípios de obtenção de forma de importantes processos de manufatura, baseados na remoção de materiais com diminuição de volume, conformação mecânica por deformação plástica com volume constante e adição de materiais com aumento de volume, respectivamente.

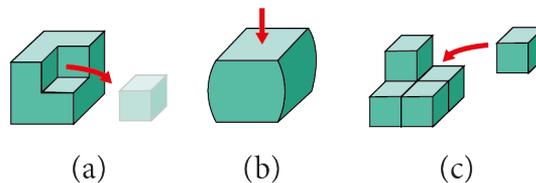


Figura 4.11 – Princípios de processos de manufatura: (a) subtrativa, (b) conformação mecânica e (c) aditiva.

A manufatura aditiva (MA), também conhecida como *impressão 3D*, pode ser definida como um processo de fabricação por meio da adição sucessiva de material na forma de camadas, com informações obtidas diretamente de uma representação geométrica computacional tridimensional do componente. Na Figuras 4.12, são mostrados modelos resultantes de manufatura aditiva com geometria simples e com cavidades, respectivamente.

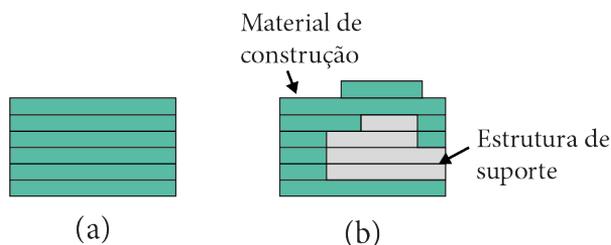


Figura 4.12 – Manufatura aditiva: (a) modelo vertical com geometria simples e (b) modelo com cavidades com estrutura de suporte.

A popularização das máquinas de manufatura aditiva de baixo custo tem possibilitado o crescimento de um campo de aplicação mais popular e doméstico usando essa tecnologia, devido à obtenção de produtos customizados e de entretenimento (brinquedos em geral).

A norma brasileira ABNT NBR ISO/ASTM 52900:2018 baseia-se na norma ISO para definir que os processos de manufatura aditiva são classificados nas categorias descritas na Tabela 4.3.

Tabela 4.3 – Sete categorias dos processos de manufatura aditiva

Categoria	Descrição
<i>Binder jetting</i> Jato de aglutinante	Processo no qual um ligante no estado líquido é depositado de forma seletiva para unir materiais em pó.
<i>Direct energy deposition</i> Deposição por energia direcionada	Processo no qual a energia térmica focada é usada para unir materiais por fusão, à medida que estão sendo depositados.
<i>Material extrusion</i> Extrusão de material	Processo no qual o material é depositado de forma seletiva através de um bico extrusor ou orifício.
<i>Material jetting</i> Jateamento de material	Processo no qual as gotas de material de fabricação são depositadas de forma seletiva.
<i>Powder bed fusion</i> Fusão em leito de pó	Processo no qual a energia térmica funde seletivamente regiões do leito de pó.
<i>Sheet lamination</i> Laminação de folha	Processo no qual folhas de material são ligadas para formar uma peça ou componente.
<i>Vat photopolymerization</i> Fotopolimerização em cuba	Processo no qual o fotopolímero líquido em uma cuba é curado seletivamente por polimerização ativada por luz.

Na Figura 4.13 são mostrados os níveis presentes na manufatura aditiva, sendo o nível virtual baseado em informações matemáticas e o nível físico, no processamento de material e geração da peça. A programação da peça nos processos de manufatura aditiva envolve as seguintes etapas:

- 1) *modelagem geométrica*, em uma plataforma de desenho assistido por computador (CAD, do inglês *Computer-Aided Design*);
- 2) *tesselação do modelo geométrico*, que se trata da criação de um mosaico em que o modelo em CAD é geralmente transformado em formato de estereolitografia (STL, do inglês *STereoLithography*) para distinguir o interior do exterior do objeto; e
- 3) *fatiamento do modelo em camadas* horizontais, paralelas e pouco espaçadas, que são utilizadas posteriormente na confecção do modelo físico.

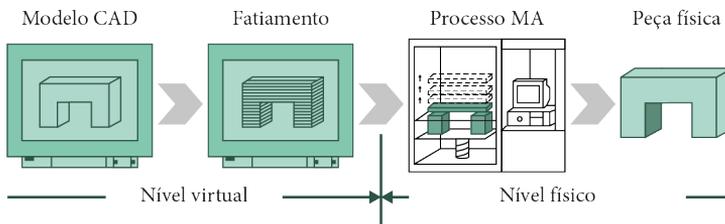


Figura 4.13 – Níveis presentes em MA.

A *prototipagem rápida* é um subgrupo da manufatura aditiva, no qual os processos baseados na adição de materiais são utilizados para fabricar protótipos. Um modelo computacional do projeto em uma plataforma CAD pode ser chamado de *protótipo virtual*; a realidade virtual pode ser utilizada como prototipagem virtual para analisar detalhes de um produto (o interior de uma aeronave, por exemplo). Os processos de usinagem também podem ser utilizados na confecção de protótipos.

É possível que os processos de manufatura aditiva sejam classificados por estado ou forma inicial da matéria-prima utilizada na fabricação. Nessa perspectiva, os processos são classificados como baseados em líquido, sólido e pó. Na Tabela 4.4, são apresentados a forma da matéria-prima, importantes processos de manufatura aditiva, os materiais comumente empregados e o processo de formação de camadas.

Tabela 4.4 – Forma das matérias-primas, processos, materiais tipicamente usados e o processo de formação de camadas na manufatura aditiva

Forma da matéria-prima	Processo	Materiais tipicamente usados	Formação de camadas
Polímero líquido	Estereolitografia	Fotopolímero	Cura a laser
Polímero líquido	Estereolitografia por processamento de luz digital	Fotopolímero	Cura a laser
Pós	Sinterização seletiva a laser	Polímeros, metais	Sinterização a laser
Pós	Impressão tridimensional	Aglomerante aplicado aos pós de polímero	Cabeçote de impressão baseada em gotas
Sólido (material fundido)	Modelagem por deposição de material fundido	Polímeros, cera	Cabeçote de extrusão
Sólido (material fundido)	Fabricação por deposição em gotas	Polímeros, cera e metais de baixo ponto de fusão	Cabeçote de impressão baseada em gotas
Lâminas sólidas	Manufatura de objetos em lâminas	Papel ou polímero	Laser ou faca

4.3.1 PROCESSOS BASEADOS EM LÍQUIDO

Em relação aos processos baseados em líquido, pode-se destacar a estereolitografia e a projeção de luz digital. A *estereolitografia* (SL ou SLA, do inglês *Stereolithography Apparatus*) foi o primeiro processo de manufatura aditiva, inventado por Charles Hull em 1988. É um dos métodos de manufatura aditiva mais utilizados e consiste no processo de fabricação de uma peça sólida de plástico a partir de um polímero líquido fotossensível, utilizando um feixe direto de laser com baixa potência para curar o polímero. A fabricação do componente é feita em uma série de camadas, na qual cada camada é adicionada sobre a anterior para construir gradualmente a geometria tridimensional desejada.

Os fotopolímeros líquidos típicos usados em SL incluem acrílico, epóxi, elastômero e éter vinil, que são curados pela exposição a um laser ultravioleta. Após todas as camadas terem sido formadas, o excesso de polímero é removido e um lixamento leve às vezes é utilizado para melhorar o acabamento e a aparência.

A SL por *processamento de luz digital* em manufatura aditiva (DLP, do inglês *Digital Light Processing*) é uma das variações da estereolitografia convencional e consiste na exposição de uma só vez da camada inteira do fotopolímero líquido a uma fonte de luz ultravioleta por meio de uma máscara, em vez de utilizar um feixe de laser de forma pontual. A chave para a DLP é o uso de uma máscara dinâmica alterada digitalmente para cada camada por um projetor, que pode ser um dispositivo digital de microespelhos. A cura de cada camada é mais rápida do que no processo de estereolitografia convencional por ser realizada em etapa única.

4.3.2 PROCESSOS BASEADOS EM PÓ

Como o próprio nome indica, os processos baseados em pó utilizam como matéria-prima o pó. Os principais processos de manufatura aditiva incluídos nessa classificação são a sinterização seletiva a laser e a impressão 3D.

A *sinterização seletiva a laser* (SLS, do inglês *Selective Laser Sintering*) utiliza um feixe de laser móvel com alta potência para sinterizar material em pó por calor uma camada por vez. Após cada camada ter sido completada nas áreas correspondentes ao modelo geométrico em CAD, uma nova camada de pó é espalhada sobre a superfície e nivelada usando um rolo de contrarotação, até construir a peça sólida.

Em SLS, os pó são pré-aquecidos até um pouco abaixo de seu ponto de fusão, para facilitar a ligação e reduzir a distorção do produto acabado e os requisitos de energia do laser. Em regiões não sinterizadas pelo feixe de laser, os pó continuam soltos para que possam ser separados da peça concluída. Durante o processo, os pó não sinterizados servem para apoiar as regiões sólidas da peça, à medida que a fabricação avança. A Figura 4.14 mostra o processo de sinterização seletiva a laser.

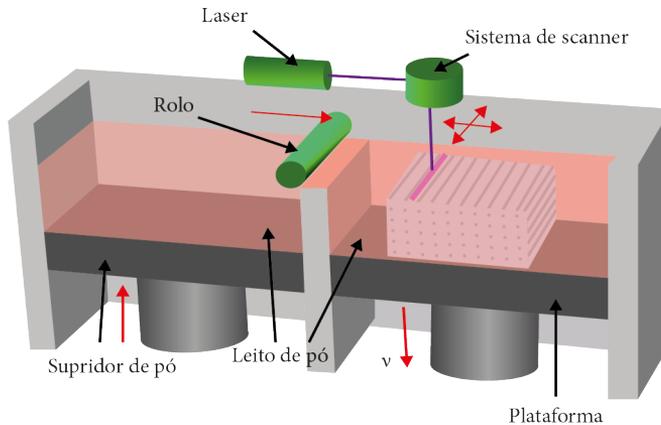


Figura 4.14 –Sinterização seletiva a laser (SLS). Adaptado de Santos *et al.* (2021).

Os materiais empregados em SLS na forma em pó são termoplásticos fusíveis por calor (incluindo aqueles preenchidos com vidro), elastômeros, cera, metais pulverizados com ligante (por exemplo, aço inoxidável, aços-ferramenta e ligas, titânio, tungstênio, ligas de cobre, superligas de alumínio e níquel), cerâmica pulverizada e areia de moldagem (com ligante).

Como aspectos de projeto, a espessura da camada é de 0,075 a 0,50 mm, dependendo do material usado. O processo SLS geralmente é realizado em um compartimento preenchido com nitrogênio para minimizar a degradação dos pó que poderiam ser susceptíveis à oxidação (por exemplo, metais). Vale ressaltar que essa tecnologia pode ser empregada para a fabricação direta não apenas na confecção de protótipos. O

processo *direct metal laser sintering* (DMLS) é uma variante da sinterização seletiva a laser utilizada para a manufatura de forma direta de produtos metálicos, em que camadas mais finas, a partir de 0,02 mm, podem ser obtidas.

Curiosidade

A *fusão seletiva a laser* (SLM, do inglês *Selective Laser Melting*) aplica princípio similar à SLS, porém utiliza feixe de laser com alta potência que se move pontualmente para fundir o material em vez de sinterizá-lo. A energia fornecida é suficiente para elevar o pó acima da temperatura de fusão, criando uma pequena região chamada poça de fusão, em um local exato que corresponde à projeção 2D do modelo CAD. A SLM, a SLS e a DMLS consistem em processos que utilizam a tecnologia de laser, assim como a usinagem e a soldagem a laser.

A fusão seletiva a laser consiste em uma possibilidade muito interessante para o processamento de cobre e suas ligas. Em função das propriedades ópticas, o cobre puro reflete até 90% da radiação do laser em comprimentos de onda de 1 μm . Como resultado, apenas uma pequena porção da energia do laser é depositada no material e disponibilizada para o processo de fusão. Além do baixo aproveitamento, a radiação refletida também pode danificar componentes do sistema, pois o uso de luz infravermelha acaba gerando um processo de fusão instável e intermitente. Uma alternativa para mitigar esses problemas é a adoção do uso da luz verde, que gera um comprimento de onda de 515 nm no cobre comercialmente puro, por exemplo. Essa capacidade consideravelmente maior de absorção significa a necessidade de aporte muito menor de energia de laser para estabilizar o processo.

A *fusão por feixe de elétrons* (EBM, do inglês *Electron Beam Melting*) também se trata de uma tecnologia de manufatura aditiva baseada em pós. A EBM é um dos vários processos industriais que podem utilizar feixes de elétrons para sua realização, como soldagem, usinagem não tradicional, endurecimento seletivo da superfície (têmpera superficial), deposição física de vapor por evaporação, revestimento de íons e litografia. A técnica EB na manufatura aditiva aplica um feixe de elétrons de alta energia para fundir uma região do leito de pó metálico e é normalmente realizada sob vácuo para evitar a oxidação indesejada e o reflexo de elétrons altamente energizados na atmosfera circundante.

A EBM segue um princípio similar à soldagem por feixe de elétrons (EBW, do inglês *Electron Beam Welding*). É um processo de soldagem por fusão, em que o calor para a soldagem é produzido por um fluxo altamente concentrado e de alta intensidade de elétrons colidindo com a superfície de trabalho.

Em contraste com a fusão seletiva a laser, a EBM transfere sua energia a cerca de 70% da velocidade da luz através das colisões cinéticas entre elétrons acelerados e a região do leito de pó. Como resultado, a energia fornecida pelo feixe de elétrons não apenas funde o pó, mas também aumenta sua carga negativa. O efeito dessa

eletronegatividade pode resultar em um feixe de energia mais difuso, à medida que o pó repele os elétrons recebidos. Normalmente, a câmara que abriga o leito de pó para EBM é aquecida antes do processo para mitigar os efeitos de grandes gradientes de temperatura e acúmulo de tensões residuais, além de impedir a formação de microestruturas indesejadas que possam comprometer a qualidade do produto. A tecnologia de manufatura aditiva EBM possui importante aplicação na fabricação de componentes de titânio e outros materiais metálicos para a indústria aeronáutica.

Considerando a fabricação de componentes com as mesmas características geométricas e de mesmo material, a SLM e a EBM produzem peças com melhores propriedades mecânicas em termos de resistência mecânica do que a SLS, porque ambas possuem processos de fusão e solidificação completa da camada, enquanto a SLS restringe-se à sinterização e à densificação do material processado.

A *impressão 3D* (3DP, do inglês *Three-Dimensional Printing*) fabrica a peça usando uma cabeça de impressão, semelhante à impressora jato de tinta, para ejetar ligante no estado líquido entre sucessivas camadas de pó. O *ligante* é o material adesivo que une os pós para formar a peça sólida e suportar suas características salientes e frágeis, assim como no processo SLS. Os pós não ligados permanecem soltos para serem removidos posteriormente, quando o processo de construção está concluído. Para reforçar ainda mais a peça, pode ser realizada uma etapa adicional de sinterização para unir os pós ligados.

Os materiais empregados em 3DP na forma em pó são aço inoxidável, bronze, cerâmicas, areia de moldagem, gesso e amido; e na forma líquida de um ligante (aglomerante) são cera, resina epóxi, elastômero e poliuretano.

4.3.3 PROCESSOS BASEADOS EM SÓLIDO

Nesses processos, a matéria-prima encontra-se no estado sólido, na forma de filamento sendo fundido durante o processo, como na modelagem por deposição de material fundido e na fabricação por deposição em gotas, ou na forma de lâminas, como na manufatura de objetos em lâminas.

A *modelagem por deposição de material fundido* (FDM, do inglês *Fused-Deposition Modeling*) é o processo em que um filamento de cera e/ou polímero termoplástico é extrudado sobre a superfície de uma peça existente a partir de um cabeçote. Este é controlado no plano horizontal e então se move para cima, a uma distância igual a uma camada. Dessa forma, a peça é fabricada da base para cima, usando um procedimento camada a camada, similar ao dos outros sistemas de manufatura aditiva. A matéria-prima é um filamento sólido com diâmetro típico de 1,25 mm, acomodado em um carretel que alimenta o cabeçote, no qual o material é aquecido a aproximadamente 0,5°C acima de seu ponto de fusão antes de extrudá-lo na superfície da peça. O material extrudado é solidificado e soldado em uma superfície da peça mais fria. Se for necessária uma estrutura de suporte, o material geralmente é extrudado por um segundo cabeçote, usando um material diferente que pode ser facilmente separado da peça principal.

Os materiais empregados em FDM, de forma geral, são cera, elastômeros e diversos termoplásticos, como material de montagem e cerâmicas (com material ligante). Em uma base limitada, metais eutéticos e materiais reforçados com fibra de vidro foram usados para produzir componentes. Em relação aos materiais de suporte, emprega-se cera e material tipo *nylon*.

A FDM é o processo de manufatura aditiva mais utilizado no mundo, e sua praticidade permite que ele seja utilizado em ambientes de escritório. Uma desvantagem é sua velocidade relativamente baixa, pois o material depositado é aplicado de forma pontual, e o cabeçote de trabalho não pode ser movido com a alta velocidade de um ponto de laser. Além disso, o uso de um extrusor, com seu orifício de bocal circular, dificulta a formação de cantos vivos.

A *fabricação por deposição em gotas* (DDM, do inglês *Droplet Deposition Manufacturing*), conhecida também como fabricação com partículas balísticas, funde a matéria-prima e atira pequenas gotas sobre uma camada previamente formada. A DDM se refere ao fato de que pequenas partículas de material são depositadas e projetadas do bocal de trabalho. As gotas líquidas resfriam e se fundem na superfície, formando uma nova camada. A deposição das gotas para cada nova camada é controlada por um cabeçote de pulverização móvel em plano horizontal de forma pontual, no qual a trajetória se baseia na seção transversal do modelo geométrico CAD que foi fatiado em camadas.

Em DDM, para as geometrias que requerem uma estrutura de suporte, dois cabeçotes de trabalho são utilizados: o primeiro para distribuir o polímero e produzir o próprio objeto e o segundo para depositar outro material para suporte. Após cada camada ter sido aplicada, a plataforma em que a peça está depositada desce até a distância correspondente à espessura da camada na preparação para a próxima.

A *manufatura de objetos em lâminas* (LOM, do inglês *Laminated-Object Manufacturing*) produz um modelo físico sólido empilhando camadas de lâminas, que são cortadas com um contorno correspondente à forma da seção transversal de um modelo CAD que foi fatiado em camadas. As camadas são empilhadas sequencialmente e unidas para produzir a peça. Após o corte que pode ser realizado por laser ou faca, o excesso de material em cada camada continua no lugar para apoiar a peça durante a construção.

Os materiais para o processo LOM incluem papel, papelão e termoplásticos na forma de lâminas, folhas de metal e cerâmica. De forma geral, os materiais são fornecidos em rolos com adesivo na base. Como alternativa, o processo LOM deve incluir um passo de recobrimento adesivo para cada camada.

4.3.4 OUTRAS OBSERVAÇÕES SOBRE MANUFATURA ADITIVA

Como características de processo, a manufatura aditiva possui a facilidade de automatização, minimizando consideravelmente a intervenção do operador durante o processo. A necessidade do operador praticamente ocorre na preparação da máquina,

com a alimentação de materiais e devidos parâmetros do maquinário e, ao final do processo, na retirada e na limpeza da peça.

A adoção da manufatura aditiva causa impacto positivo no sistema de produção e atendimento da demanda, notadamente na redução de estoque de produtos acabados e no tempo de entrega de produtos. A utilização da manufatura aditiva possibilita que a empresa reformule com muitos ganhos e benefícios o processo de desenvolvimento de produtos. Aliás, as primeiras aplicações dessa tecnologia foram em projetos, especificamente no desenvolvimento de produtos, sobretudo, para possibilitar a obtenção de protótipos para visualização dos estágios iniciais do produto.

A adoção do processo de fabricação por meio da manufatura aditiva, quando possível, permite fabricar peças ou componentes no local de uso. A manufatura aditiva empregada na fábrica de forma isolada, sem a aplicação de tecnologias de comunicação (conectividade, por exemplo) não caracteriza a presença da indústria 4.0, pois a manufatura aditiva é um elemento que complementa outros conceitos da manufatura avançada. É necessário que a manufatura aditiva esteja associada a outros conceitos, como internet das coisas e computação em nuvem, para que a adoção de indústria 4.0 esteja caracterizada.

Uma vez caracterizada essa adoção, a conectividade permite, por exemplo, que uma pessoa forneça as informações necessárias para a fabricação do produto de qualquer local para que uma máquina de manufatura aditiva o produza no mesmo ou em qualquer outro local. A versatilidade e a flexibilidade permitem a customização em massa.

Uma aplicação das tecnologias de manufatura aditiva que desperta particular interesse, em função do potencial oferecido, é a fabricação de ferramental, associada à obtenção de gabaritos e dispositivos, modelos-mestre, modelos e ferramentais de “sacrifício” e moldes permanentes para vários processos de fabricação (moldes-protótipo). Como exemplos, pode-se citar a fabricação de eletrodos para eletroerosão e de modelos de cera para a fundição de precisão, de borracha de silicone para a confecção do molde de produção e de molde na fundição em areia.

A existência de uma peça física fabricada por manufatura aditiva permite que certos tipos de atividade de análise de engenharia sejam realizados, como verificação do apelo estético da peça, análise de fenômenos de transporte como fluxo de fluidos e teste em túnel de vento de diferentes formas aerodinâmicas, além de análise de tensões de um modelo físico. Em gestão de produção, a fabricação de peças por manufatura aditiva antes da produção pode auxiliar no planejamento do processo e no projeto de ferramental. Na área médica, a combinação de tecnologias de diagnóstico como a imagem por ressonância magnética com a manufatura aditiva permite criar modelos que auxiliam médicos no planejamento de procedimentos cirúrgicos ou na manufatura de próteses ou implantes.

A *fabricação direta* por manufatura aditiva está sendo cada vez mais empregada para produzir peças e produtos. Os exemplos de produção de peças finais incluem: peças plásticas em pequenos lotes, evitando o alto custo do molde para a moldagem por injeção; peças com geometrias complexas, evitando processos de montagem; peças avulsas; e peças customizadas no tamanho exato para cada aplicação. Nota-se que a fabricação

direta não é substituta para a produção em massa. Em vez disso, é adequada para a produção de baixo volume e a customização em massa, na qual produtos são fabricados em grande quantidade, mas cada produto é único de alguma forma. Em todos os casos, o requisito é que um modelo CAD do componente (ou produto) deve estar disponível.

Os exemplos de peças customizadas tornam-se cada vez mais comuns em aplicações médicas, como as próteses ósseas, aparelhos auditivos e aparelhos dentários, que requerem adaptações personalizadas.

A precisão e o acabamento superficial das peças produzidas por manufatura aditiva são algumas das restrições ou deficiências atuais dessa tecnologia, pois são inferiores aos das peças obtidas por processos convencionais, como a usinagem. Isso também se deve ao princípio de adição de material em camadas, que dá origem aos degraus de escada nas superfícies de regiões inclinadas e curvas. Outros problemas relacionados à manufatura aditiva são a limitada variedade de materiais – a estereolitografia é restrita a fotopolímeros, por exemplo – e o desempenho mecânico das peças fabricadas, pois esses materiais geralmente não são tão resistentes quanto os materiais das peças produzidas por outros processos.

Quando comparados aos processos de fabricação tradicionais, em especial à usinagem com CNC, os processos de manufatura aditiva apresentam muitas vantagens, como a liberdade geométrica na fabricação, o pouco desperdício de material, a utilização eficiente de energia, a dispensa de dispositivos de fixação, a ausência de necessidade de troca de ferramentas durante a fabricação do componente, a fabricação do componente em um único equipamento do início ao fim, cálculos simples das trajetórias de ferramentas, a possível produção de peças finais e algumas tecnologias cujo potencial é misturar materiais dissimilares.

REFERÊNCIAS

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

Associação Brasileira de Normas Técnicas. NBR ISO/ASTM 52900:2018: **manufatura aditiva — princípios gerais — terminologia**. Rio de Janeiro, 2002.

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, p. 42-51, 2012.

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.

GUIMARÃES, M. DE A.; DOS SANTOS G. A.; NASCIMENTO M. S.; TERAM R.; DOS SANTOS V. T.; DA SILVA M. R., *et al.* **Study on the wear of cutting-tools used in dry machining of Cu-10wt%Al-5wt%Ni-5wt%Fe alloy**. DDF, 2021; 413:194–200. <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/ddf.413.194>.

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.

MONTEIRO, P. S. P.; DOS SANTOS, G. A.; NAKAMOTO, F. Y.; NASCIMENTO, M. S.; TERAM, R.; DOS SANTOS, V. T.; DA SILVA, M. R.; COUTO, A. A.; MACHADO, I. F.; BRANDI, S. Analysis of the influence of continuous-drive friction welding on the microstructure and mechanical properties of the uns c64200 bronze-aluminum-silicon alloy. *Defect and Diffusion Forum*, v. 412, **Trans Tech Publications, Ltd.**, 2021, p. 185–195.

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.

ROSA, R. F.; ALMEIDA, I. O.; VARASQUIM, F. M. F. A.; JUNIOR, E. J. C.; COUTO, A. A.; SANTOS, V. T.; SILVA, M. R.; NAKAMOTO, F. Y.; SANTOS, G.A. (2023).

Analysis of the Influence of friction stir welding on the microstructure and mechanical properties of alloy UNS-C27200 (CU-ZN). **Materials Research**, 26, e20220581.

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, G. A.; NASCIMENTO, M. S.; TERAM, R.; SILVA JUNIOR, W. C. ; SANTOS, V. T. ; SILVA, M. R. ; COUTO, A. A. **A review on the metallic components direct production by additive manufacturing**. In: International Conference on Industrial Engineering and Operations Management. Proceedings of the International Conference on Industrial Engineering and Operations Management. Southfield (v. 2). Michigan: IEOM Society International, 2021. p. 331-340.

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.

SELLARS, C. M.; TEGART, W. J. M. **Hot workability. international metallurgical reviews**, 17, n. Review 158, 1972.

SILVA, M. R. **Estudo do efeito da fase β na usinabilidade de ligas de latão livres de chumbo**. Dissertação (Mestrado). Escola Politécnica da Universidade de São Paulo (USP), São Paulo, 2015.

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.

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.

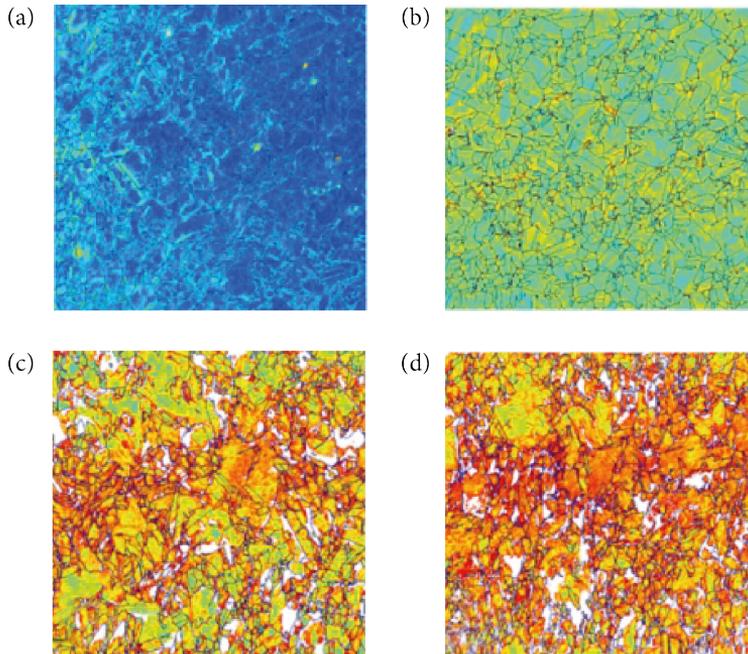


Figura 5.1 – Microestruturas do cobre puro isento de oxigênio UNS C10200 com diversos percentuais de deformações. A barra de medição é de 50 μm , (a) Microestrutura tratada termicamente isenta de encruamento, (b) Microestrutura com 6% de deformação, (c) Microestrutura com 22,5% de deformação e (d) Microestrutura 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 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 m^{-2} ; se for tratado termicamente por recozimento, 10^{10} m^{-2} ; e em processo de deformação a frio, 10^{15} 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).

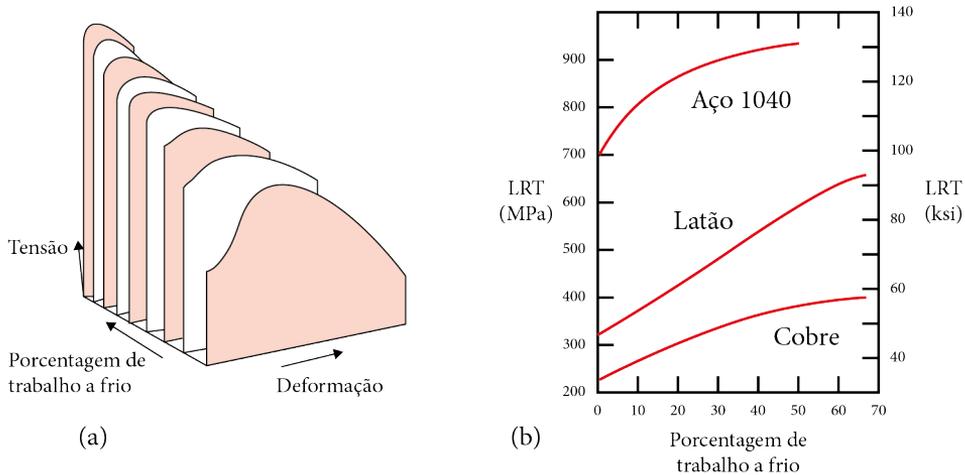


Figura 5.2 – (a) Relação entre a porcentagem de trabalho a frio, capacidade de deformação e resistência mecânica e (b) Comportamento do cobre, latão e do aço 1040 quando submetidos a diferentes porcentagens de trabalho a frio. Adaptado de Callister e Rethwisch (2020).

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.

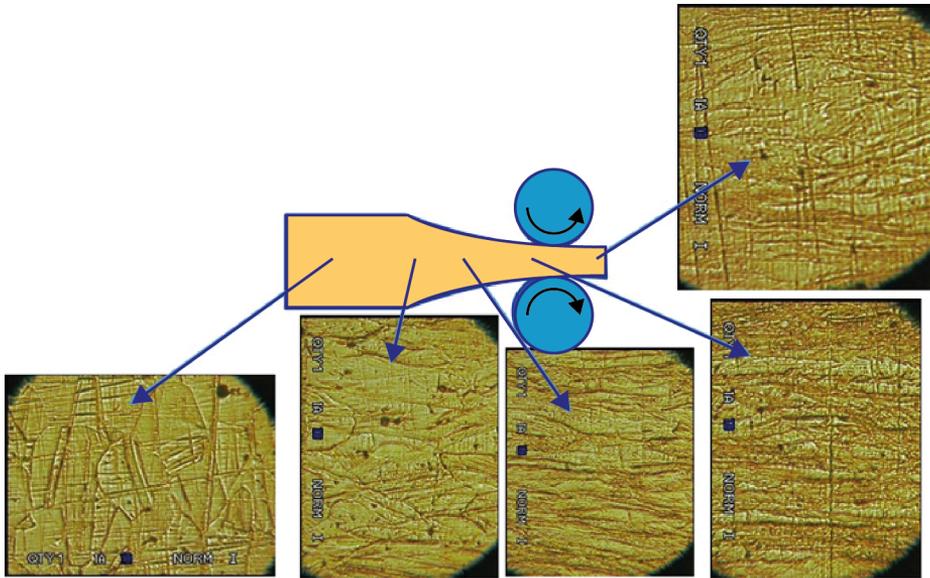


Figura 5.3 – Estruturas de grão em diferentes regiões de um latão cartucho laminado a frio. Adaptado de Smith e Hashemi (2012).

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.

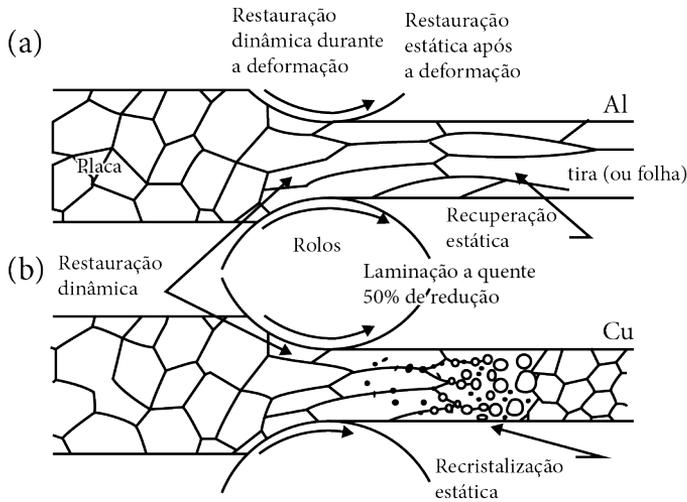


Figura 5.4 – Laminação a quente com 50% de redução para (a) alumínio e (b) cobre.

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.

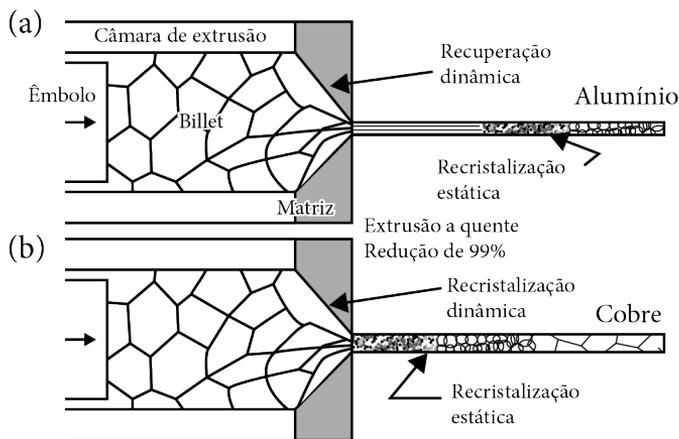


Figura 5.5 – Extrusão a quente com 99% de redução para (a) alumínio e (b) cobre.

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.

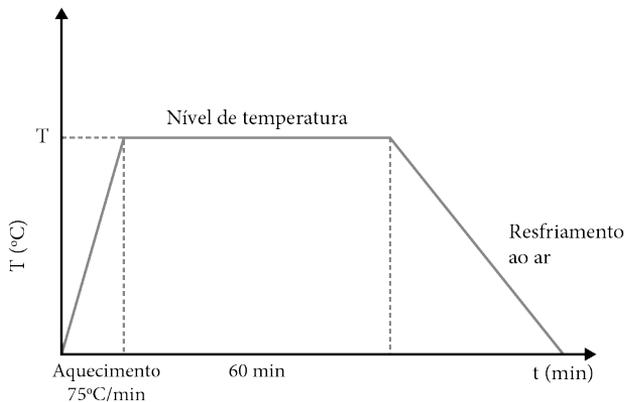


Figura 5.6 – Procedimento de recozimento para a liga UNS C67600. (Lobo *et al.*, 2022)

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 α . A 350 °C, o material pode ter começado a recrystalizar com formação de grãos da fase α 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.

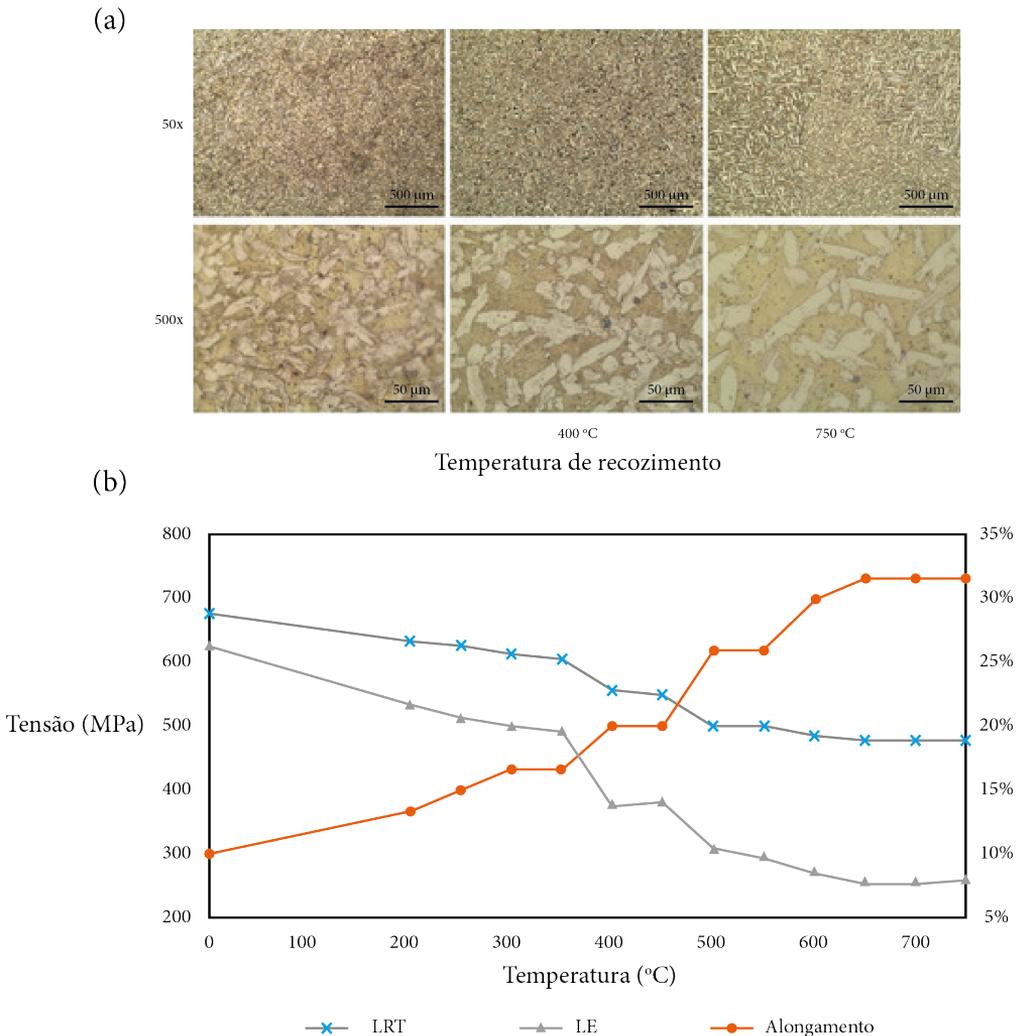


Figura 5.7 – Efeito da temperatura durante o tratamento térmico (a) na microestrutura das amostras a 200 °C, 400 °C e 750 °C, respectivamente, nas colunas da esquerda para a direita; e (b) nas propriedades mecânicas segundo cada temperatura aplicada. (Lobo *et al.*, 2022)

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%.

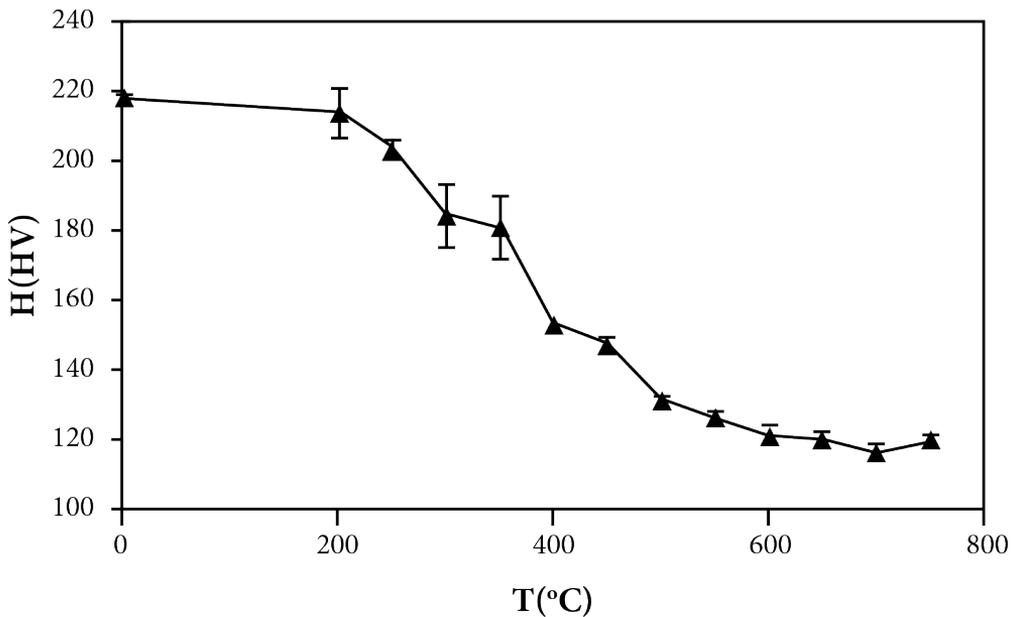


Figura 5.8 – Efeito da temperatura durante o tratamento térmico na dureza média da liga UNS C67600. (Lobo *et al.*, 2022)

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%.

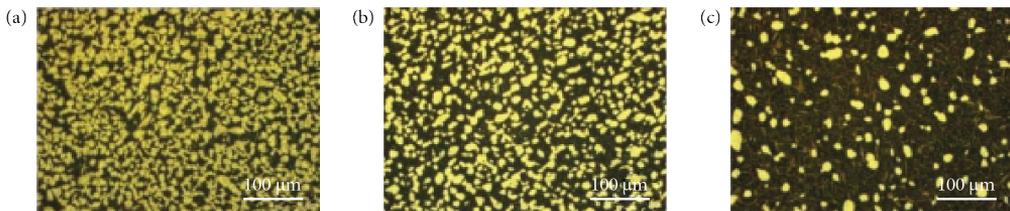
O processo *TQ50*, conhecido como *Quenching* (têmpera, em inglês), é obtido por meio do processo de conformação a quente e, posteriormente, conta com o auxílio do aquecimento seguido do resfriamento brusco em água ou óleo (têmpera) para elevação de dureza e resistência mecânica, passando depois por 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 β . Na Figura 5.9, são mostradas as microscopias ópticas das três amostras, com os respectivos percentuais das frações volumétricas da fase α 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 α (200x), (b) Micrografia da microestrutura da amostra 2 com fração volumétrica de 29,6% de fase α (200x) e (c) Micrografia da microestrutura da amostra 3 com fração volumétrica de 21% de fase α (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 α 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 α é menor, tendo em vista o modelo de cristalização do bronze de alumínio-níquel, em que a fase α 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 β , 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 α . 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 β (CCC), que é rica em NiAl e, conseqüentemente, menor a intensidade da fase α (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).

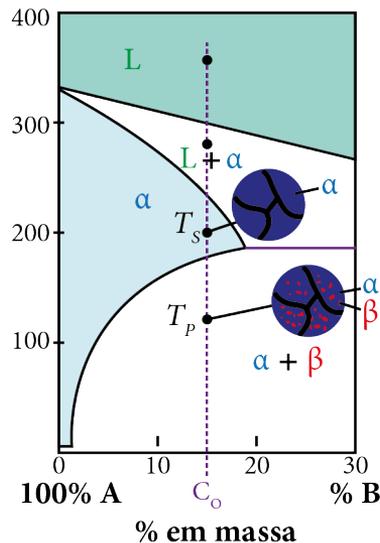


Figura 5.10 – Parte de um diagrama de fases de liga metálica que pode ser endurecida por precipitação.

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.

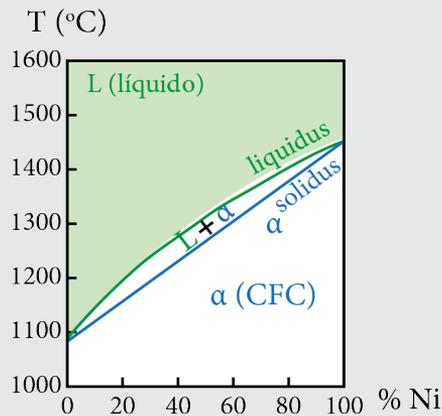


Figura 5.11 – Diagrama de equilíbrio de fases do sistema cobre-níquel (Cu-Ni).

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 (SiO_2) no jateamento com areia, de alumina (Al_2O_3) e carbetto 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.

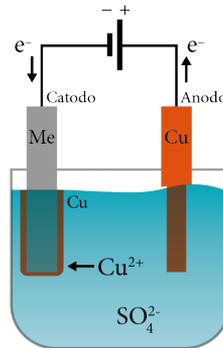


Figura 5.12 – Galvanoplastia: cobre como material de revestimento.

Fonte: https://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/c/c7/Copper_electroplating_principle_%28multilingual%29.svg

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.

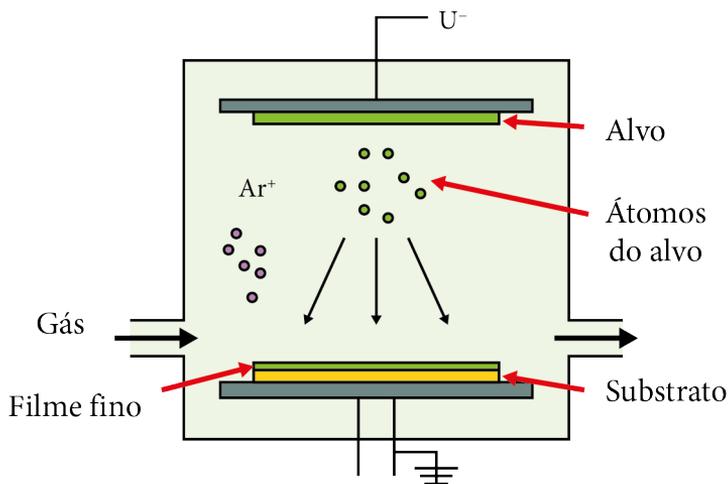


Figura 5.13 – Processo PVD: *Sputtering*.

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 carbeto de silício, carbeto de titânio, carbeto de cromo e carbeto 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. 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.

CAPÍTULO 6

Aspectos metalográficos aplicados ao cobre e suas ligas

6.1 GENERALIDADES

Na manufatura do cobre e suas ligas, observa-se claramente a plena influência do processo de fabricação na estrutura e, conseqüentemente, nas propriedades; portanto, é fundamental o conhecimento sobre o histórico de processamento (variáveis empregadas, elementos da liga, processos de transformação) para o alcance dos resultados mecânicos e microestruturais almejados.

Em metalurgia, a menor porção de matéria é o átomo. A estruturação dos átomos na escala microscópica faz surgir a microestrutura de materiais metálicos como o cobre e suas ligas. A microestrutura é a principal característica de um material metálico para determinar seu comportamento mecânico, e a metalografia é imprescindível para análise microestrutural desse material.

A *metalografia* pode ser definida como o exame ou a análise da estrutura de um material ou amostra metálica por meio de uma superfície devidamente preparada, ou seja, polida e geralmente atacada com um reagente específico. O exame metalográfico possibilita avaliar a micro e a macroestrutura do material metálico, relacionando às propriedades (resistência mecânica ou resistência à corrosão, por exemplo) e ao processo de transformação desse material.

Trata-se de uma ferramenta muito importante para a caracterização e o controle do cobre e suas ligas, possibilitando o estudo da estrutura em nível de micro e de macroestrutura, o que esclarece ou pré-determina o comportamento do metal em

aplicações de engenharia. Na Figura 6.1, é mostrado um lingote bruto de fusão obtido por processo de solidificação unidirecional, em sentido oposto ao do fluxo de extração de calor. Nota-se que o material metálico se constitui por macroestrutura (no caso colunar e equiaxial) e por microestrutura.

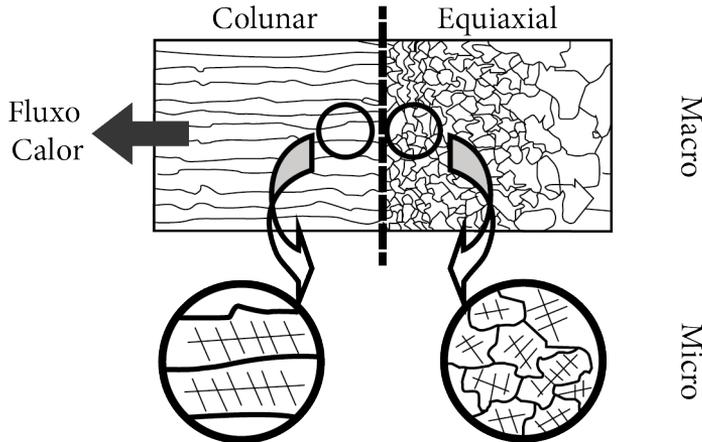


Figura 6.1 – Representação esquemática das macro e microestruturas de um lingote fundido com transição colunar/equiaxial. (Santos, 2020)

A macroestrutura pode ser observada a olho nu ou com aumento óptico de até 10 vezes, enquanto a microestrutura, de escala microscópica, pode ser observada com aumento óptico superior a 10 vezes. No caso da Figura 6.1, na macroestrutura visualiza-se os grãos colunares e equiaxiais; e na microestrutura, o arranjo da dendritas nos grãos. A macroestrutura pode ser coquilhada (região pequena mais próxima do molde), colunar e equiaxial.

Em relação à estrutura colunar e à equiaxial, a estrutura colunar é anisotrópica, com direcionalidade de propriedades (principalmente comportamento mecânico), pois exibe valores diferentes de propriedades para diferentes direções em relação ao ponto considerado; já a estrutura equiaxial é praticamente isotrópica. Na isotropia, as propriedades são iguais, independentemente da direção escolhida em relação ao ponto considerado.

Na Figura 6.2, são mostrados lingotes obtidos por solidificação direcional, porém multidirecional, o que é típico em processos de fundição ou lingotamento aplicados na indústria metalomecânica. No caso da solidificação multi ou polidirecional, observa-se a formação da zona coquilhada, gerada no início do processo de solidificação do lingote durante o contato inicial entre metal e molde; e, na sequência, a formação das zonas colunares e equiaxiais.

O material metálico pode apresentar zona colunar e equiaxial, com predominância de uma ou de outra ou apenas um desses tipos de macroestrutura. Por exemplo, em relação ao processo de solidificação, a utilização de superaquecimentos maiores

tende a formar macroestrutura colunar, enquanto a utilização de refinadores de grão ou agentes de intensificação de nucleação tende a formar a macroestrutura equiaxial. Conforme já foi citado no início deste capítulo, zonas colunares e equiaxiais apresentam comportamentos distintos em termos de direcionalidade.

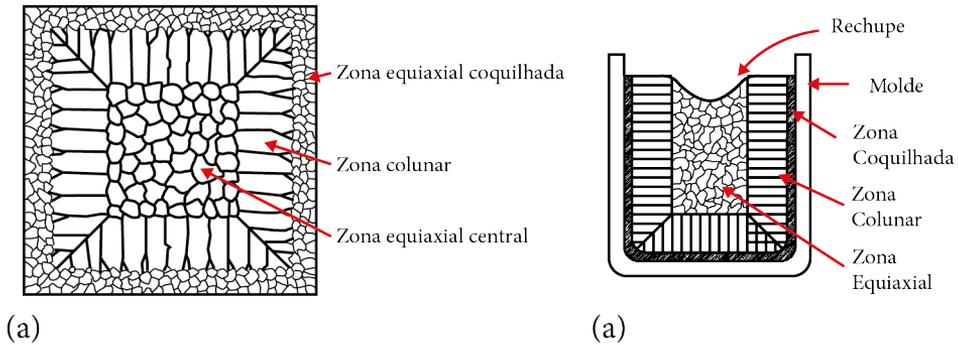


Figura 6.2 – a) Esquemática de lingotes obtidos por solidificação multidirecional, apresentando zona equiaxial coquilhada, zona colunar e zona equiaxial central (Ohno, 1988); e b) Representação das zonas macroestruturais (Garcia, 2007).

As principais aplicações da metalografia são:

- *Revelação de defeitos cristalinos em materiais metálicos*: tamanho de grão, linhas de fluxo, tipos de estruturas, variação de composição química (como regiões de segregação, carbonetos, sulfetos, inclusões, zonas carbonetadas e descarbonetadas), presença de vazios, porosidades, trincas e fraturas.
- *Estudo das estruturas de juntas soldadas*: profundidade de penetração do metal de adição, definição da zona afetada pelo calor e da zona fundida, poros e trincas.
- *Tratamentos térmicos*: determinação de regiões de endurecimento ou fragilização, trincas de têmpera, avaliação da profundidade do tratamento superficial, etc.
- *Área de manutenção industrial*: observação de trincas em ferramentas e matrizes.
- *Processamento de materiais metálicos*: controle de qualidade de lingotes produzidos pelo processo de lingotamento contínuo, possibilitando a observação de inclusões, segregação e estrutura, assim como a presença de trincas externas e internas.

As regiões de interesse da análise metalográfica nos produtos dos principais processos de manufatura são apresentadas a seguir:

- *Fundidos*: corta-se a amostra de acordo com o defeito ou a característica que se deseja observar.

- *Tarugos, placas, blocos e laminados*: geralmente observa-se a seção transversal em relação ao comprimento do lingote ou laminado, permitindo a análise da estrutura, segregação, inclusões, trincas e dobras; é possível também analisar a seção longitudinal para verificação de trincas externas e internas, bandas de segregação, vazios, poros, etc.
- *Forjados e extrudados*: trata-se de cortes transversais em relação ao comprimento, que permitem a visualização de escamas e fendas, e cortes longitudinais, que mostram linhas de fluxo do material durante as etapas de conformação.
- *Tiras e tiras finas*: se laminadas, geralmente observa-se somente a seção transversal e, em alguns casos, um quarto dessa seção. Para o caso de lingotadas, analisam-se as seções transversais e longitudinais.
- *Peças soldadas*: trata-se de um corte perpendicular à direção de soldagem que permite a visualização da penetração do cordão de solda, zona afetada pelo calor e zona fundida, e, dependendo da localização do cordão de solda, a observação de trincas e poros.

6.1.1 LABORATÓRIO DE METALOGRAFIA

O laboratório de metalografia é composto em geral por equipamentos cujo princípio de funcionamento é relativamente simples; apesar disso, um treinamento adequado e uma leitura cuidadosa dos manuais é algo fundamental para desenvolver uma boa preparação das amostras. Entre os principais materiais e componentes que constituem um laboratório metalográfico, destacam-se:

- *Material de consumo*: reagentes químicos e demais acessórios (detergentes, álcool, vidraria etc.), discos de corte lisos ou rugosos, baquelite em pó para embutimento das amostras, resina líquida e catalisador, lixas com diferentes granulometrias (100/ 120/ 220/ 320/ 400/ 500/ 600/ 800/ 1.000/ 1.200/ 1.500 *mesh*), pano de poliamento para uso com pasta de diamante ou alumina, pasta de diamante com diferentes granulometrias (6, 1 e 0,25 μm), alumina em suspensão (1, 0,3 e 0,5 μm).
- *Cortadora metalográfica*: materiais metálicos.
- *Prensa embutidora*: resinas termorrígidas e termoplásticas, com sistema de refrigeração, manômetro de pressão e *timer* eletromecânico para operações automáticas de embutimento e refrigeração das amostras.
- *Politriz lixadeira*: metalográfica rotativa com controle de rotações e dispositivo de lixamento a seco ou úmido.
- *Equipamento de ultrassom*: limpeza das amostras por meio da aplicação de ondas ultrassônicas, agindo sobre uma solução de limpeza e criando milhões de bolhas que, ao implodirem na superfície das amostras, expulsam a sujeira.
- *Capela de exaustão*: de gases para realização dos ataques das amostras com reagentes químicos.

- *Microscópio óptico*: metalográfico para amostras de dimensões maiores e sistema de deslocamento da amostra, possibilitando ou não o acoplamento com câmeras fotográficas ou sistema de aquisição de imagens.

Dependendo do nível de magnitude de visualização e da análise microestrutural desejados, torna-se necessário utilizar microscópios com maiores capacidades de aumento, como os microscópios eletrônicos (de varredura ou de transmissão).

6.1.2 PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL

É descrito a seguir o procedimento experimental para a análise metalográfica de um material.

Corte

Utiliza-se máquina de corte com disco abrasivo e refrigeração para evitar excesso de deformação na superfície a ser analisada. Para cada tipo de material, de acordo com sua faixa de dureza, existem discos mais adequados. No caso de ligas metálicas dúcteis como as ligas de cobre (latão e bronze, por exemplo), utiliza-se disco de carbetto de silício (SiC). A escolha da seção de corte (longitudinal ou transversal), dependendo da amostra e do que se pretende observar nela, também é levada em consideração.

Dependendo da região de interesse, pode-se efetuar a retirada das amostras nos planos longitudinal, transversal e planar, conforme apresentado na Figura 6.3.

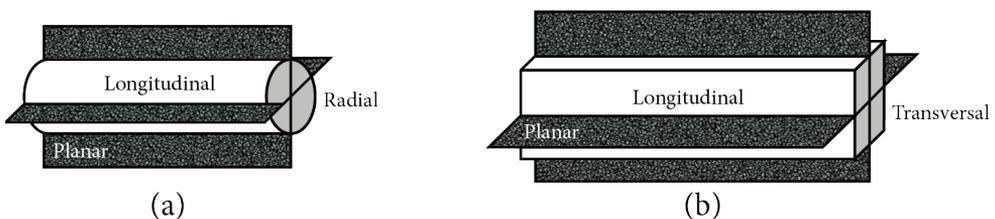


Figura 6.3 – Principais planos de retirada de amostras em produtos: (a) cilíndricos e (b) planos. (Santos, 2020)

Na Figura 6.4, é mostrado um corte da seção transversal de uma barra, apresentando estruturas isotrópicas e anisotrópicas e destacando como poderiam aparecer os grãos cristalinos em relação a esse tipo de corte.

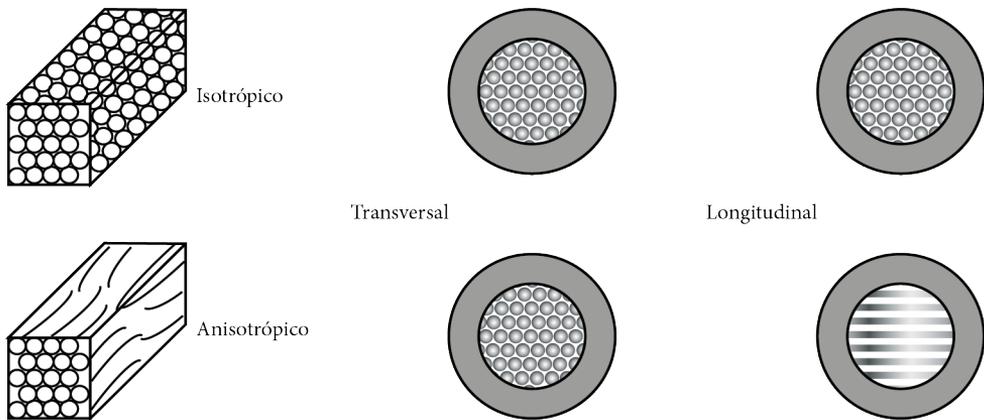


Figura 6.4 – Exemplo de cortes na seção longitudinal e transversal em barra para obtenção de amostras para observação: (a) material isotrópico e (b) material anisotrópico. (Santos, 2020)

Embutimento

O embutimento da amostra é necessário para facilitar as etapas subsequentes da preparação, com o objetivo de obter uma superfície plana e paralela, além de proteger a superfície de arredondamento nos cantos. O interessante de se embutir as amostras metalográficas é a padronização e a marcação, evitando possíveis trocas ou enganos, além de facilitar o lixamento e polimento com dispositivos automáticos.

Utiliza-se normalmente resinas plásticas, como baquelite, epóxi, acrílica e poliéster. No caso do cobre e suas ligas, que são materiais metálicos que apresentam elevadas temperaturas de fusão e de recristalização, as amostras são embutidas geralmente em baquelite, um termorrígido que exige a aplicação de pressão para compactação e aquecimento para o processo de sinterização (aproximadamente 200°C), condições obtidas por meio de uma máquina de embutimento. O cobre e suas ligas não apresentam mudanças na microestrutura em temperatura da mesma ordem utilizada para a “cura” da resina (baquelite). Outra possibilidade é a preparação de dispositivos mecânicos para a fixação das amostras, dependendo do tamanho, da configuração geométrica e da disponibilidade dos aparelhos de lixamento e de polimento.

Identificação

A marcação das amostras embutidas pode ser efetuada utilizando um gravador vibratório, gravador com prensa, lápis elétrico ou mesmo um punção, e deve ser realizada diretamente no corpo de prova ou em uma chapa metálica colada na amostra embutida.

Lixamento

O processo de lixamento, manual ou automático, tem como objetivo a remoção da camada de material que sofreu deformação durante o corte e a obtenção de uma superfície plana e paralela, facilitando assim o polimento posterior.

As amostras são lixadas gradativamente na sequência de lixas, partindo da granulometria mais grosseira para as mais finas; os valores numéricos menores implicam em lixas com tamanho de grãos maiores, e vice-versa. A sequência mais usual de lixamento consiste na utilização das lixas de desbaste 100 ou 180 *mesh*, e as de lixamento 220, 320, 400, 500, 600, 1.000 ou 1.200 *mesh*, dependendo do tipo de ataque e da estrutura que se pretende revelar.

Em cada lixa, a amostra deve ser lixada no mesmo sentido; na lixa seguinte, deve-se alternar em 90° o sentido de lixamento. A passagem de uma lixa para outra de granulometria menor deve ser feita quando não existirem mais riscos da lixa anterior visíveis a olho nu. É fundamental que, nas mudanças de lixas, as amostras estejam limpas, incluindo a mão do operador, o que deve ser realizado com uma lavagem de água e detergente, evitando assim a contaminação de abrasivos entre as diferentes lixas. Deve-se utilizar a lixa apropriada para o material metálico considerado; assim, é preciso escolher entre as lixas para materiais ferrosos e as para não ferrosos. Geralmente as lixas conhecidas como lixas d'água são de carbetto de silício; é possível encontrar também lixas de coríndon.

Antes de iniciar o processo propriamente dito de lixamento, recomenda-se o arredondamento dos cantos vivos da amostra para evitar que rasguem as lixas, fazendo um chanfro com a lixa grossa nas laterais da face a ser atacada. Não se devem lixar amostras não embutidas em lixadeiras rotativas, e sim em lixadeiras de cinta.

Recomenda-se a utilização de líquido refrigerante – na maioria das vezes, água. Pode também ser utilizado álcool ou querosene, para retirada do material extraído da superfície da amostra por cisalhamento durante as etapas de lixamento, bem como evitar um possível aquecimento da camada superficial do material, o que poderia implicar em mudanças estruturais, principalmente no caso de processos de lixamento mecânico.

A pressão aplicada sobre a amostra também é fundamental no lixamento, já que ela influencia diretamente na profundidade dos riscos na superfície da amostra e, conseqüentemente, na profundidade da camada deformada. Essa variável é mais significativa no caso de materiais extremamente dúcteis ou duros, em que, no primeiro caso, é muito difícil evitar a deformação da superfície do material, e, no segundo, a remoção de riscos deixados pela lixa anterior é dificultada. Assim, pode-se concluir que, quanto maior a dureza do material, menor será a profundidade do risco e, por outro lado, mais difícil será a remoção dos riscos.

Para o caso de lixamento manual (em lixas de cinta), a amostra deve ser deslocada sobre a lixa de trás para frente e vice-versa, também utilizando água de refrigeração.

Esse método é mais aplicado no caso de corpos de prova do próprio material ou no caso de amostras com dimensões incompatíveis com a lixadeira rotativa.

Após o lixamento, segue-se uma lavagem cuidadosa, geralmente uma limpeza com ultrassom e secagem.

Polimento

Essa etapa pode ser considerada uma das mais importantes no processo de preparação de amostras metalográficas, principalmente no caso de micrografias. O polimento tem como objetivo deixar a amostra sem riscos, permitindo boa visualização ao microscópio óptico. Pode ser manual ou automático, em politrizes rotativas, e ambos os polimentos são efetuados em um disco coberto com pano e uma suspensão abrasiva.

O abrasivo deve ter um tamanho de partícula uniforme e específico, apresentar alta dureza, ser inerte e ter baixo coeficiente de atrito, sendo o abrasivo à base de diamante o mais empregado em laboratórios metalográficos. Outros abrasivos comumente utilizados são os óxidos de alumínio (alumina em suspensão), de magnésio e de cromo, usando água como agente lubrificante. O óxido de alumínio (alumina) é amplamente utilizado e está disponível em duas categorias: levitado e pó sintético de alta pureza, também encontrados em diversas granulometrias.

Curiosidade

Existe a possibilidade da realização de polimentos eletrolíticos, baseando-se na dissolução anódica da amostra em eletrólito apropriado. Geralmente, esse tipo de polimento é realizado após o lixamento com granulometria 600 *mesh* e, se a amostra estiver embutida, essa deve ser condutora ou permitir a conexão elétrica. Os eletrólitos a base de ácido perclórico e anidrido acético apresentam perigo de explosão e devem ser evitados.

Armazenamento

O armazenamento das amostras deve ser feito em locais isentos de umidade e poeira, bem como de choques com outros materiais e aquecimento excessivo. O ideal é armazenar as amostras em dissecadores, ou seja, recipientes apropriados para a armazenagem e estocagem das amostras, evitando a oxidação e deterioração delas.

6.1.2.1 Ataque químico

O ataque químico é definido como um processo para revelar a estrutura de um material por meio do ataque preferencial sobre a superfície da amostra previamente preparada, utilizando uma solução química ácida ou básica, que irá destacar, dissolver ou colorir regiões distintas do material, permitindo definir as diversas fases ou constituintes do material a ser analisado.

O ataque químico é realizado para revelar ou realçar detalhes da estrutura (macro e microestrutura) do material metálico, a olho nu ou por meio de microscopia. Cada material necessita de determinado tipo de ataque químico para revelar os detalhes de sua estrutura ou os defeitos que se deseja observar. Muitas vezes, faz-se necessário uma consulta bibliográfica para a escolha mais adequada dos reagentes.

Uma amostra bem-preparada, mesmo antes do ataque químico, pode revelar inclusões, porosidade, trincas, corrosão irregular e condições superficiais, podendo também utilizar artifícios como campo escuro, luz polarizada e contraste de fase.

Na microscopia óptica (MO), a luz “passeia” pelo sistema, que tem que ser o mais reflexivo possível. Essa técnica é recomendada para aumentos de até 1000 vezes, permitindo resoluções de cerca de 0,0002 mm (200 nm). Nos microscópios ópticos convencionais, a luz visível é focada por meio de lentes ópticas para proporcionar imagens ampliadas de objetos muito pequenos, com comprimento de onda da luz visível no intervalo de 400 a 700 nm, maior que as dimensões dos objetos nanométricos.

Na Figura 6.5, ilustra-se o princípio do ataque químico pelos reagentes na superfície de uma amostra de latão (cobre e zinco) para análise por microscópio óptico. Inicialmente, tem-se uma superfície bem-preparada após o polimento, e a superfície age como um espelho para o feixe de luz que incide sobre ela – nenhuma estrutura pode ser observada. Após o ataque químico, o reagente ataca regiões preferenciais, como grãos e contornos de grãos, tornando possível a observação da estrutura com o auxílio de um microscópio óptico.

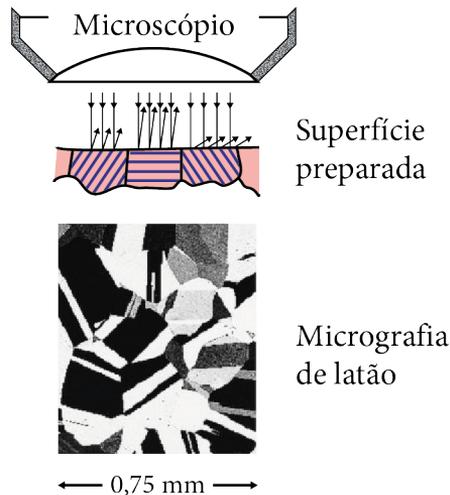


Figura 6.5 – Princípio esquemático do ataque químico em amostra de latão. Adaptado de Callister Jr. e Rethwisch (2014).

Existem várias técnicas para a realização do ataque químico em uma amostra, sendo a técnica de imersão da superfície a ser analisada na solução química a mais usual e simples. O tempo de ataque varia desde alguns segundos até minutos ou dias, dependendo do material, da qualidade dos reagentes e do ataque empregado. No Quadro 6.1, são mostrados os principais métodos de ataque químico em amostras metálicas.

Quadro 6.1 – Principais métodos de ataques químicos

Método	Descrição e notas
Ataque por imersão	A superfície da amostra é imersa na solução de ataque. É o método mais usado.
Ataque por gotejamento	A solução de ataque é gotejada sobre a superfície da amostra. É usado com soluções reativas dispendiosas.
Ataque por lavagem	A superfície da amostra é enxaguada com a solução de ataque. Usado em casos de amostras muito grandes ou quando existe grande desprendimento de gás durante o ataque.
Ataque alternativo por imersão	A amostra é imersa alternadamente em duas soluções de ataque. As camadas oriundas do ataque com a primeira solução são removidas pela ação do segundo reagente.
Ataque por esfregação	A solução de ataque, embebida em uma porção de algodão ou pano, é esfregada sobre a superfície da amostra, o que serve para remover as camadas oriundas da reação.
Ataque-polimento	O polimento é efetuado com a amostra imersa na solução de ataque, a fim de evitar a formação de camadas oriundas da reação química. Esse processo é usado com o polimento mecanoletrolítico.
Ataque múltiplo e duplo	A amostra é tratada com dois ou mais meios reativos, em que várias fases subsequentes são enfatizadas.
Ataque de identificação	Meios de ataque específicos são utilizados para realçar certas fases de uma forma característica.

Observação:

É importante destacar que é possível a realização de inspeção metalográfica sem ataque para determinados materiais metálicos, porém isso requer nível adequado de preparação da amostra a ser analisada até a visualização da sua respectiva microestrutura. Em determinados materiais metálicos, também é possível a inspeção da macroestrutura sem ataque.

Macroataques

Objetivam a visualização da macroestrutura dos materiais metálicos e, conseqüentemente, suas características, como a estrutura resultante de um processo de solidificação de uma liga de cobre.

Curiosidade

Para visualização da macroestrutura de um bronze de alumínio-níquel, especificamente CuAl10Ni5Fe5, resultante de um processo de solidificação unidirecional, um lingote foi seccionado longitudinalmente em duas partes. Na sequência, metade do lingote foi lixada com lixas de granulação 220, 400 e 600 *mesh*. O ataque químico foi feito com o reagente composto por 50% de HNO₃ (ácido nítrico) e 50% de água, em um tempo de aproximadamente 7 segundos de imersão.

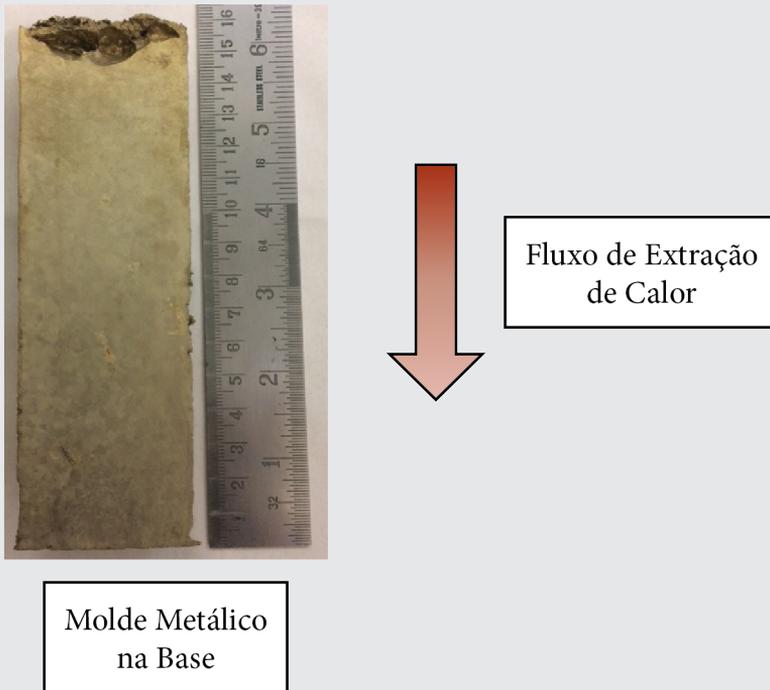


Figura 6.6 – Macroestrutura da liga CuAl10Ni5Fe5 (aumento: 1X). Adaptado de Santos (2017).

Após a análise da macroestrutura resultante (Figura 6.6), percebe-se que há predominância de grãos equiaxiais, o que caracteriza o material praticamente isotrópico. Vale destacar que se trata de uma liga enquadrada em um sistema quaternário, composto por cobre, alumínio, níquel e ferro (refinador de grão), o que auxilia no mecanismo de formação da zona equiaxial. Além disso, a formação do rechupe no extremo da parte superior do lingote, que é fruto da contração do material metálico e se concentra na região que se solidificou derradeiramente. Percebe-se muitas porosidades visíveis a olho nu na região do rechupe, sendo, portanto, uma região frágil do material. Fica evidente que as observações obtidas por meio do exame da macroestrutura possibilitam compreender o comportamento do material.

Microataques

Objetivam a visualização da microestrutura dos materiais metálicos e, consequentemente, suas características, como a estrutura resultante de solidificação de uma liga de cobre.

Curiosidade

Para visualização da microestrutura da liga bronze-alumínio-níquel CuAl14Ni5Fe5, resultante de um processo de solidificação unidirecional, amostras foram obtidas por meio de corte do lingote. As amostras foram retiradas para embutimento, no qual a baquelite foi o termorrígido utilizado, lixadas (100, 220, 320, 400, 600, 1.000 *mesh*) e polidas em pano com pasta de diamante de 6 μm . O reagente utilizado para revelar a microestrutura consistiu em uma solução de 10,7% de HCl, 3,4% de Fe_3Cl e 85,9% de água destilada. O tempo de reação foi de 25 s, dependendo da revelação da microestrutura. As micrografias são mostradas na Figura 6.7.

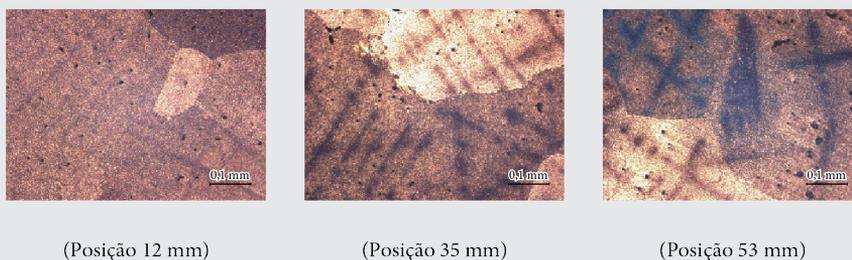


Figura 6.7 – Micrografias da liga CuAl14Ni5Fe5 e respectivas posições relativas ao ponto de extração de calor (paredes de um molde metálico), com o mesmo aumento óptico (50 X), evidenciando o refinamento da estrutura dendrítica nas posições iniciais (barra de medida com 0,1 mm). (Teram *et al.*, 2020)

As microestruturas típicas resultantes são dendritas, observadas ao longo da seção longitudinal da liga CuAl14Ni5Fe5. As microestruturas são as obtidas nas posições 12 mm (próxima da região de extração de calor), 35 mm e 53 mm (distante da região de extração de calor), a partir da interface metal/molde.

Nota-se que a estrutura na posição 12 mm é mais refinada do que a da posição 35 mm, por apresentar taxa de resfriamento maior, uma vez que está mais próxima da região de extração de calor. A posição 53 mm é a mais grosseira, por apresentar a menor taxa de resfriamento das posições consideradas.

Para comparar o grau de refinamento de microestrutura, é imprescindível que se utilize o mesmo aumento para as micrografias consideradas (no caso, utilizou-se um aumento de 50 X). Percebe-se que, em função disto, as três micrografias apresentam a mesma barra de referência, com 0,1 mm.

A microestrutura é a característica mais importante de uma liga metálica, pois as propriedades mecânicas são controladas pelas características microestruturais. Por meio de análise de gráfico de dureza em escala Brinell (HB) por espaçamento dendrítico secundário (EDS), observa-se que a microestrutura mais refinada apresenta maior dureza (Figura 6.8).

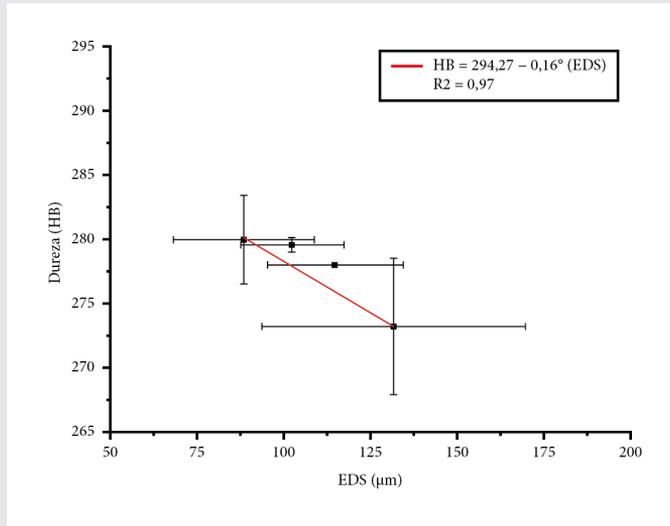


Figura 6.8 – Correlação entre microestrutura e dureza (HB), evidenciando maior dureza para a microestrutura dendrítica mais refinada. (Teram *et al.*, 2020)

Observação:

O tamanho de grão influencia as propriedades dos materiais metálicos e pode ser determinado por análises quantitativas conforme norma específica. Os métodos utilizados são apresentados na Figura 6.9.

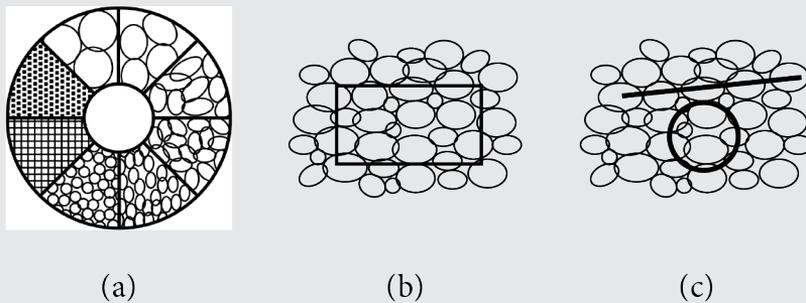


Figura 6.9 – Métodos de determinação de tamanho de grão: (a) comparação, (b) planimétrico e (c) intersecção.

6.2 IMAGENS METALÓGRÁFICAS

A Figura 6.10 apresenta exemplos de macrografias em ligas, destacando as diferentes estruturas brutas de fusão (ou solidificação), formadas em função do processo de solidificação unidirecional.

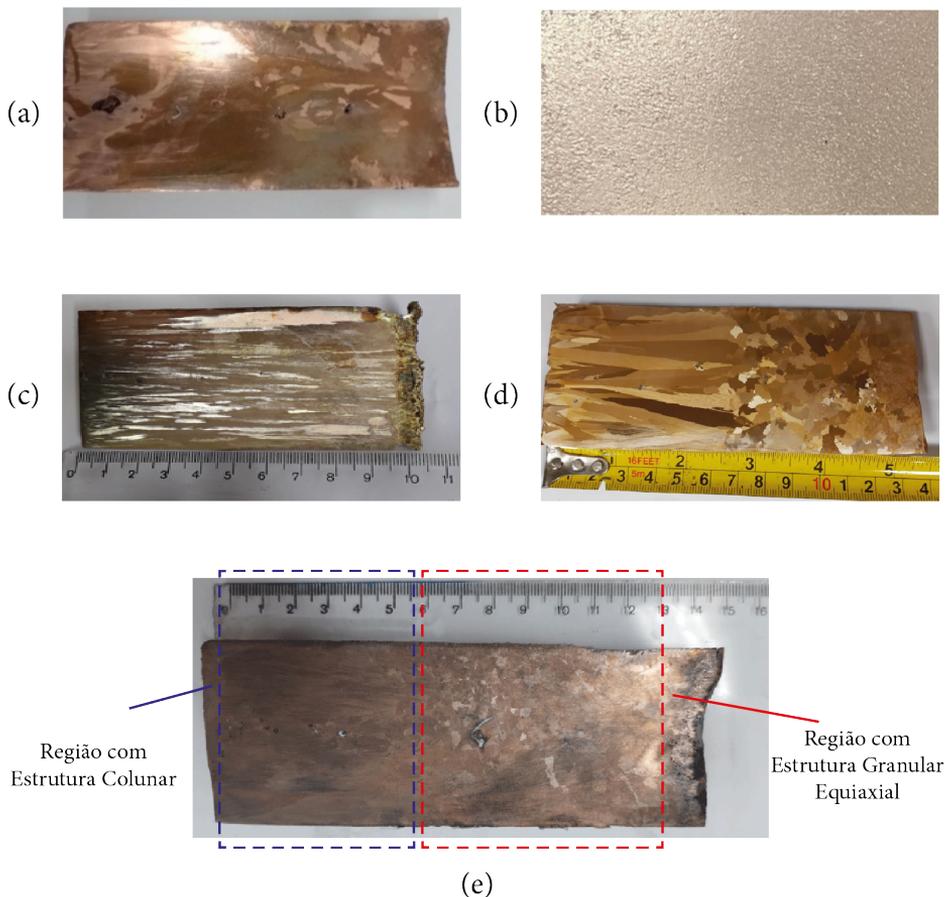


Figura 6.10 – Macrografias: (a) cobre-ferro UNS C19400, (b) bronze-alumínio-manganês CuMn11Al8Fe-3Ni3, (c) alpaca 2 com Pb, (d) liga UNS C65500 e (e) liga UNS C90200. Aumento de 1X. (Ataque: 50% de ácido nítrico e 50% de água).

A Figura 6.11 mostra micrografias de bronze-alumínio-níquel, em que, à esquerda, há imagens da liga que contém 10%, em massa, de alumínio (chamada de Cu10Al); à direita, há a liga com 14%, em massa, de alumínio (chamada de Cu14Al). São mostradas micrografias das duas ligas nas posições 4, 8, 12, 16, 35 e 53 mm, em relação à superfície de extração de calor, a denominada interface metal-molde. Por meio da análise metalográfica, é possível observar que ambas as ligas apresentam a fase α de morfologia Widmanstätten. A liga Cu14Al apresenta morfologia

difusa com pequenas microestruturas dentro do grão. Na posição $P = 4$ mm, observamos que os grãos da liga Cu14Al possuem dimensões menores do que os grãos da liga Cu10Al. Na posição $P = 53$ mm, os braços dendríticos foram observados na cor escura para a liga Cu14Al. Os espaçamentos dendríticos ficam cada vez mais evidentes e grosseiros, conforme o valor de P aumenta para a liga Cu14Al.

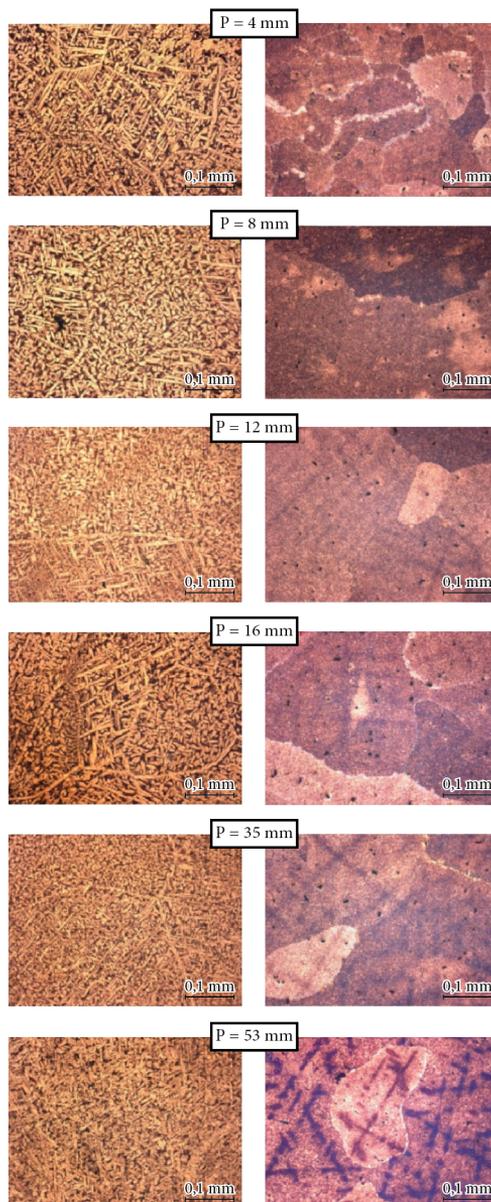


Figura 6.11 – Micrografias de amostras retiradas de diferentes posições em relação à interface metal-molde: (à esquerda) Cu10Al e (à direita) Cu14Al. Ataque: solução de 10,7% HCl, 3,4% Fe_3Cl e 85,9% de água destilada. (Nascimento *et al.*, 2019)

Nas Figuras 6.12 a 6.20, são mostradas imagens metalográficas, considerando cobre eletrolítico e ligas de relevância comercial, destacando o processo de fabricação ou tratamento térmico utilizado e a respectiva escala adotada. De forma geral, o procedimento utilizado para preparação das micrografias está em conformidade com a norma ASTM E3. A imersão dos corpos de prova foi feita em reagente composto por 10,7% de ácido clorídrico e 3,4% de cloreto férrico por cerca de 25 segundos.

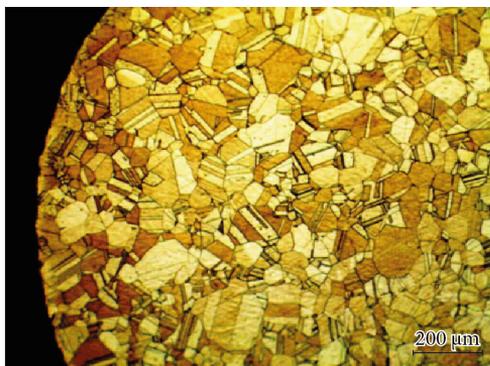


Figura 6.12 – Alpacas CuNi12Zn12 recristalizadas – aumento de 100 x – barra de referência de 200 µm.

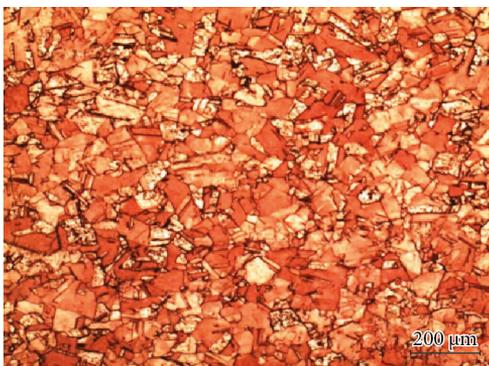


Figura 6.13 – Cobre eletrolítico recristalizado – aumento de 100 x – barra de referência de 200 µm.

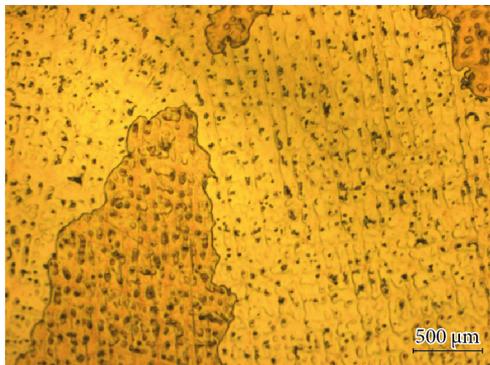


Figura 6.14 – Bronze TM 620 – aumento de 50 x – barra de referência de 500 µm.

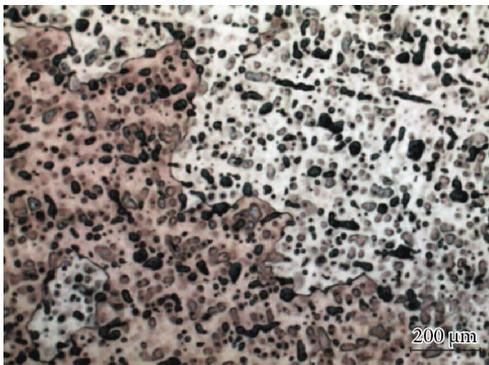


Figura 6.15 – Bronze TM23 – aumento de 100 x – barra de referência de 200 µm.

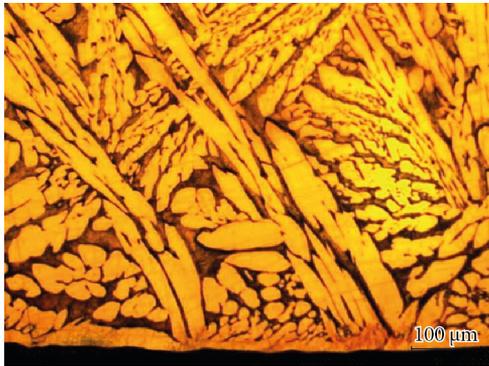


Figura 6.16 – Latão 60/40 fundido – aumento de 50 x – barra de referência de 100 µm.

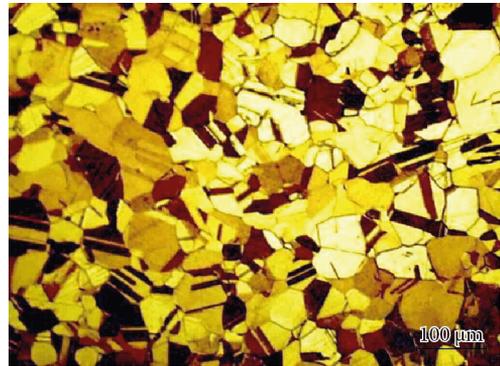


Figura 6.17 – Latão 70/30 recristalizado – aumento de 50 x – barra de referência de 100 µm.

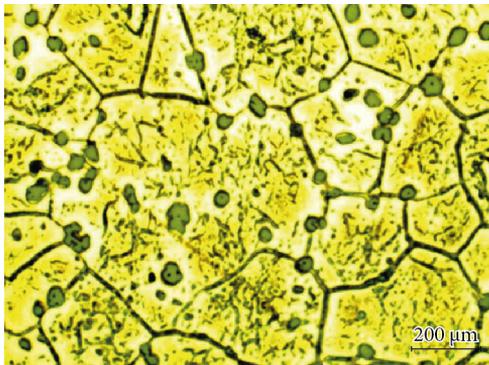


Figura 6.18 – Latão-alumínio-ferro 488 para anéis sincronizadores – aumento de 100 x – barra de referência de 200 µm.

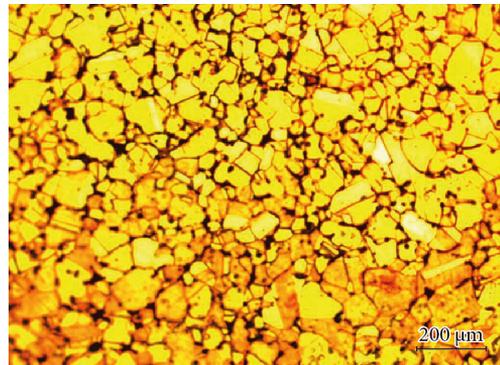


Figura 6.19 – Latão corte livre americano extrudado a quente – aumento de 100 x – barra de referência de 200 µm.

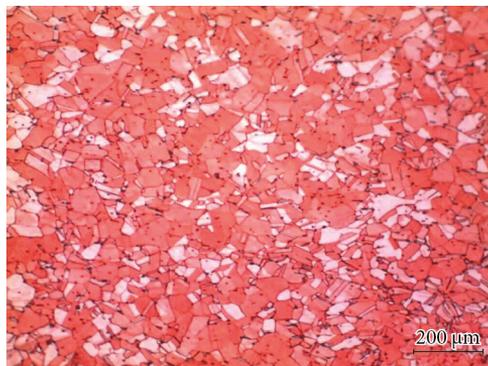


Figura 6.20 – Cobre-telúrio extrudado a quente – aumento de 100 x – barra de referência de 200 µm.

Existem outras técnicas de análise microestrutural para obter aumentos superiores aos alcançados por microscopia óptica. Uma técnica de grande destaque é a microscopia eletrônica: de varredura (MEV ou SEM, do inglês *Scanning Electron Microscopy*), com resoluções com variações de 10 até 50 mil vezes, e de transmissão (MET ou TEM, do inglês *Transmission Electron Microscopy*), com resolução de até 1 milhão de vezes, chegando a um nanômetro. Na microscopia eletrônica, utiliza-se feixe de elétrons incidindo sobre a amostra em vez do feixe de luz utilizado na microscopia óptica.

Na microscopia eletrônica de varredura, uma imagem de superfície é obtida a partir de elétrons retroespalhados ou refletidos, em que o feixe de elétrons percorre a superfície de um objeto em um padrão de varredura, similar à varredura do raio catódico na superfície de uma tela de televisor. Na microscopia eletrônica de transmissão, utilizada com frequência no estudo das discordâncias, a imagem vista é formada por um feixe de elétrons que atravessa a amostra ultrafina, interagindo com ela enquanto é espalhado e/ou difratado.

Na Figura 6.21, são mostradas as imagens obtidas por microscopia eletrônica de varredura de bronze-alumínio-níquel; à esquerda está a liga que contém 10% em massa de alumínio (chamada de Cu10Al); e à direita, a liga tem 14%, em massa, de alumínio (chamada de Cu14Al). Por meio da análise das imagens por MEV e da literatura especializada sobre bronze-alumínio-níquel (HASAN *et al.*, 1982; JAHANAFROOZ *et al.*, 1983; PISAREK, 2013), podemos observar que a liga Cu14Al apresenta um número maior de microconstituintes, e que a liga Cu10Al apresenta mais fase α (alfa).

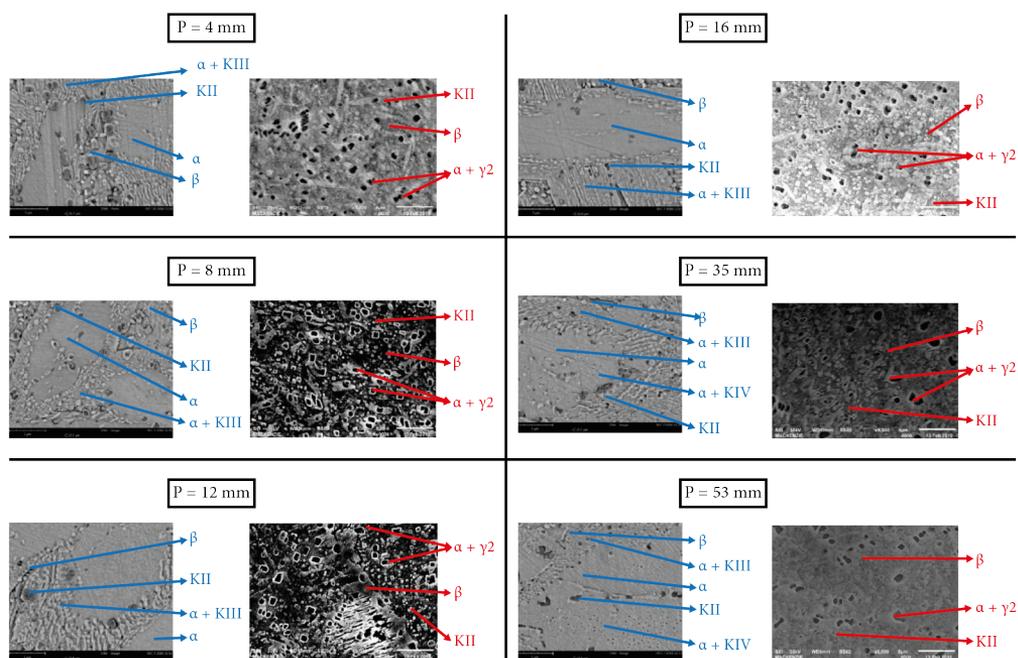


Figura 6.21 – Análise por microscopia eletrônica de varredura (MEV) de amostras retiradas de diferentes posições em relação à interface metal-molde: (à esquerda) Cu10Al e (à direita) Cu14Al. (Nascimento *et al.*, 2019)

Em comparação à liga Cu10Al, a Cu14Al apresenta uma microestrutura mais refinada, com grãos menores – o que influencia na sua resistência mecânica maior – e mais microconstituintes, conforme análise por MEV. Isso sugere que o teor maior de alumínio da liga influencia nessas características. Podemos observar que a liga Cu14Al apresenta a fase γ_2 (gama dois), característica do alto teor de alumínio na liga. Tecnologicamente, essa fase é prejudicial porque reduz o desempenho da liga em termos de resistência à corrosão. Pelo fato da liga Cu14Al possuir na sua composição ferro e níquel, a fase γ_2 aparece em pequenas quantidades, desde que esses elementos se liguem ao alumínio, formando microconstituintes κ (kappa's). Também é possível observar o surgimento da fase β (beta) retida, que é a fase martensítica da liga. Isso é causado por altas taxas de resfriamento durante a solidificação da liga, e essa fase propicia incremento da dureza no material.

A Figuras 6.22 (a) e (b) mostra micrografias ópticas (MO) do bronze de manganês (liga UNS C67600), indicando que essa liga consiste basicamente em fase α e fase β . A fase α apresenta um longo formato de ilha, típico do bronze de manganês. Na microestrutura, as áreas claras correspondem a α , que possui estrutura cristalina cúbica de face centrada (CFC); enquanto as áreas escuras correspondem a fase β , que é cúbica de corpo centrado (CCC). Na Figura 6.22 (c) e (d), são mostradas micrografias obtidas por MEV. De forma específica, a Figura 6.22 (d) mostra tipos de pequenas precipitações intermetálicas não dissolvidas que contêm partículas mais escuras na fase α e mais claras na fase β . É importante destacar que as diferentes ampliações usadas nos exames MO e MEV e a orientação cristalográfica dos grãos produzem variações na análise microestrutural e que tais condições devem ser descritas na figura considerada. A microestrutura da liga foi revelada por meio de ataque com solução de 5 g FeCl_3 , 16 mL HCl, e 60 mL etanol (95%), conforme a norma ASTM E407-07.

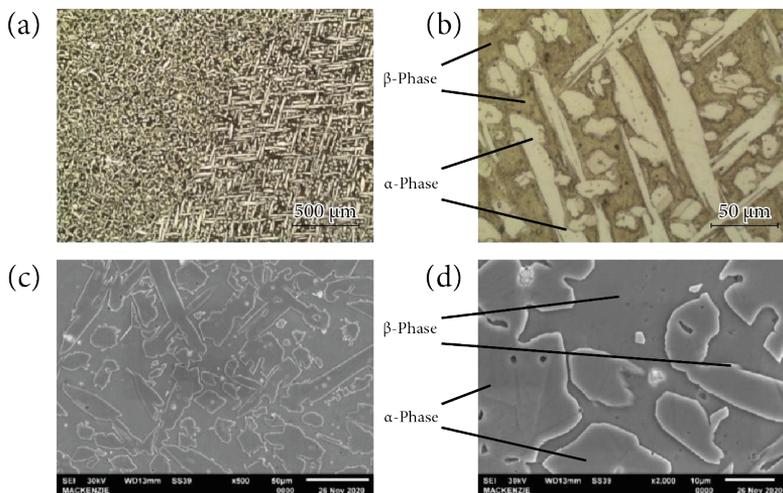


Figura 6.22 – Análise por microscopia óptica (MO), mostrando a microestrutura da liga UNS C67600 após trabalho a frio e tratamento térmico a 650 °C, com (a) a presença de agulhas de fase α (áreas claras) na fase β escura, (b) Detalhe de (a), com a presença de partículas escuras de Pb e partículas mais claras de Fe, (c) Micrografia por MEV, mostrando a fase α na fase β escura e (d) Detalhe aproximado de (c). (Lobo *et al.*, 2022)

Para fazer observações em escala nanométrica, permitindo aplicação em nanotecnologia, ou seja, a ciência aplicada em objetos cujas características têm dimensões que variam de menos de 1 nm a 100 nm ($1 \text{ nm} = 10^{-3} \mu\text{m} = 10^{-6} \text{ mm} = 10^{-9} \text{ m}$), um aprimoramento em relação ao microscópio eletrônico é o grupo de microscópios de varredura por sonda, com capacidade de ampliação aproximadamente 10 vezes maior que a de um microscópio eletrônico. Em um microscópio de varredura por sonda (MVS ou SPM, do inglês *Scanning Probe Microscope*), a sonda consiste em uma agulha com uma ponta bastante afiada. O tamanho dessa ponta é próximo do tamanho de um único átomo. Durante a operação, a sonda movimenta-se ao longo da superfície de uma amostra a uma distância de apenas um nanômetro, e qualquer uma das várias características da superfície é medida, dependendo do tipo de dispositivo de varredura por sonda. Os dois microscópios de varredura por sonda de maior interesse são o microscópio de varredura por tunelamento e o microscópio de força atômica.

O *microscópio de varredura por tunelamento* (STM, do inglês *Scanning Tunneling Microscope*) é chamado de microscópio de tunelamento, porque sua operação se baseia no fenômeno da mecânica quântica que leva o mesmo nome; nele, cada elétron em um material sólido salta além da superfície do sólido para o espaço. A probabilidade de os elétrons estarem nesse espaço além da superfície diminui exponencialmente a proporção da distância da superfície. Essa sensibilidade à distância é explorada nesse microscópio, posicionando a ponta da sonda a 1 nm da superfície e aplicando uma pequena diferença de potencial elétrico entre elas. Isso faz com que os elétrons dos átomos da superfície sejam atraídos para a pequena carga positiva da ponta e formem um túnel através do *gap* até a sonda. Conforme a sonda movimenta-se ao longo da superfície, ocorrem variações na corrente resultante, devido às posições de cada átomo na superfície. Por outro lado, se a elevação da ponta acima da superfície puder variar, mantendo uma corrente constante, então a deflexão vertical da ponta pode ser medida enquanto ela atravessa a superfície. Essas variações na corrente ou na deflexão podem ser utilizadas para criar imagens da superfície em uma escala atômica ou molecular. Ressaltando que o STM só pode ser utilizado em superfícies de materiais condutores.

O *microscópio de força atômica* (AFM, do inglês *Atomic Force Microscope*) pode ser aplicado em qualquer material. Ele usa uma sonda fixa a uma haste (viga) que sofre deflexão com a força exercida pela superfície na sonda conforme ela passa pela superfície da amostra. O AFM responde a forças que incluem as forças mecânicas, em virtude do contato físico da sonda com a superfície da amostra, e as forças de não contato, como as de van der Waals – forças de capilaridade, magnéticas e outras. A deflexão vertical da sonda é medida de forma óptica, baseando-se no padrão de interferência de um feixe de luz ou na reflexão de um feixe de laser pela viga.

Curiosidade

Em termos tecnológicos, a aplicação dos microscópios de varredura por sonda não se limita a observação de superfícies. Esses instrumentos servem também para a *nanofabricação*, que é a fabricação de itens em escala nanométrica. Os itens incluem filmes (películas), revestimentos, pontos, linhas, fios, tubos, estruturas e sistemas. O microscópio de varredura por tunelamento (STM) e o microscópio de força atômica (AFM) podem ser utilizados para manipular átomos individuais, moléculas ou aglomerados (clusters) de átomos ou moléculas que aderem à superfície de um substrato pelas forças de adsorção (ou pelas ligações químicas fracas). Outra técnica de varredura por sonda é a nanolitografia tipo caneta-tinteiro (DPN, do inglês *Dip-pen Nanolithography*), em que a ponta de um microscópio de força atômica age como a ponta de uma caneta para transferir moléculas para a superfície de um substrato por meio de um menisco do solvente.

Outra técnica de caracterização microestrutural é a difração de raios X, que é usada para determinar a estrutura cristalina e o espaçamento interplanar. Nessa técnica, os átomos de um material cristalino, em função da regularidade de seus espaçamentos, podem causar um padrão de interferência construtiva das ondas presentes em um feixe incidente de raios X, que pode sofrer difração como resultado da sua interação com uma série de planos atômicos paralelos.

REFERÊNCIAS

- ASKELAND, D. R.; WRIGHT, W. J. **Ciência e engenharia dos materiais**. São Paulo: Cengage Learning, 2014.
- ASTM E3. **Standard guide for preparation of metallographic specimens**. West Conshohocken: ASTM International, 2017.
- ASTM E407 (2007). **Standard practice for microetching metals and alloys**. West Conshohocken: ASTM International, 2007.
- 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.
- DE LUCA, R. **Correlação entre as variáveis térmicas de solidificação, microestrutura, microdureza e dureza da liga bronze alumínio manganês CuMn11Al8Fe-3Ni3**. Dissertação (Mestrado) – Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de São Paulo. São Paulo, 2022.
- DOS SANTOS, G. A.; NASCIMENTO, M. S.; COUTO, A. A.; DOS SANTOS, V. T.; DA SILVA, M. R.; TERAM, R. **Influência do espaçamento dendrítico secundário na dureza da liga Cu-14Al-5Ni-5Fe obtida por processo de solidificação unidirecio-**

nal. In: TULLIO, F. B. M. (org). Engenharia na Prática: Importância Teórica e Tecnológica. São Paulo: Atena Editora, 2020. p. 199-210.

FERRANTE, M.; WALTER, Y. **A materialização da ideia:** noções de materiais para design de produto. Rio de Janeiro: LTC, 2010.

GARCIA, A. **Solidificação: fundamentos e aplicações.** 2. ed. Campinas: Editora da Universidade Estadual de Campinas, Unicamp, 2007.

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.

HASAN, F.; JAHANAFROOZ, A.; LORIMER, G. W.; RIDLEY, N. The morphology, crystallography, and chemistry of phases in as-cast nickel aluminum bronze. **Metallurgical Transactions A**, v. 13, n. 8, p. 1337–1345, 1982.

JAHANAFROOZ, A.; HASAN, F.; LORIMER, G. W.; RIDKEY, N. Microstructural development in complex nickel-aluminum bronze. **Metallurgical Transactions A**, v. 14, n. 10, p. 1951–1956, 1983.

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.

MARTURANO, J. L. M.; DOS SANTOS, G. A.; TERAM, R.; NASCIMENTO, M. S.; DOS SANTOS, V. T.; DA SILVA, M. R.; COUTO, A. A. **Estudo das variáveis térmicas da liga uns C90200.** Disponível em: <https://www.even3.com.br/anais/2ndicaic2ndim msem2020/434658/>. Acesso em: 25 nov. 2023.

MATTOS, M. V. R.; DOS SANTOS, G. A.; TERAM, R.; NASCIMENTO, M. S.; DOS SANTOS, V. T.; DA SILVA, M. R.; COUTO, A. A. Obtenção das variáveis térmicas de solidificação da liga Alpaca 2 c/ Pb. Disponível em: <http://repositorio.ipen.br/handle/123456789/32848>. Acesso em: 17 nov. 2023.

NASCIMENTO, M. S.; DOS SANTOS, G. A.; TERAM, R.; DOS SANTOS, V. T.; DA 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, n. 8, p. 1267, 2019.

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

OHNO, A. **Solidificação dos Metais.** Tradução de Paulo da Silva Pontes e Nivaldo Lemos Cupini. São Paulo: Livraria Ciência e Tecnologia, 1988.

Pisarek, B. Model of Cu–Al–Fe–Ni Bronze Crystallization. **Archive of Foundry Engineering**, v 13, p. 72–79, 2013.

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

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

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

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

CAPÍTULO 7

A corrosão na seleção do cobre e suas ligas

7.1 CORROSÃO

O comportamento químico do cobre merece ênfase por se tratar de um material com elevada resistência à corrosão, o que o torna imprescindível para aplicações que requerem tal comportamento e, muitas vezes, que combinem com seu comportamento elétrico e/ou térmico.

A taxa de deterioração do cobre é menor quando comparada a de outros elementos, pois, em condições de exposição ao meio atmosférico comum, é formada uma camada protetora, cuja coloração esverdeada é característica em diversas construções, como a estátua da liberdade em Nova York e a Catedral da Sé em São Paulo.

Basicamente, a *corrosão* pode ser definida como um processo de destruição do material pela ação do meio ambiente, em maior ou menor intensidade, quer se refira a meio gasoso, líquido ou sólido. O *meio gasoso* pode ser a atmosfera rural, marítima ou urbana, a atmosfera limpa ou poluída e os gases químicos; o *meio líquido* pode ser água doce ou salgada, pura ou poluída, soluções químicas aquosas, chuva ácida, produtos químicos orgânicos e inorgânicos líquidos; e o *meio sólido* pode ser solo seco ou úmido, natural ou poluído e substâncias químicas sólidas.

Algumas definições básicas sobre corrosão são:

- 1) os materiais orgânicos são menos corrosivos do que os inorgânicos quando em contato com os materiais metálicos, que são muito reativos;
- 2) condições de temperatura e pressão mais elevadas aceleram o processo corrosivo, propiciando maiores taxas de corrosão; e

- 3) determinado meio pode ser extremamente corrosivo para um material e inofensivo para outro (por exemplo, os ácidos são muito corrosivos para a maioria dos metais, mas não para o cobre). Uma exceção é o ácido nítrico (HNO_3), uma vez que o nitrogênio é um oxidante para o cobre, o que propicia sua corrosão. Isso explica por que a maioria dos reagentes utilizados nos ataques químicos para revelar a microestrutura do cobre e suas ligas contém ácido nítrico na composição. Ressaltando que o princípio básico do ataque químico é corroer determinadas regiões da microestrutura para posterior visualização com auxílio de microscópio adequado.

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

Especificamente, o fenômeno corrosivo representa uma situação em que duas ou mais reações eletroquímicas diferentes ocorrem simultânea e espontaneamente, sendo pelo menos uma de natureza *anódica* e outra *catódica*. A reação anódica de *dissolução do metal* fornece elétrons à reação catódica de *redução*, gerando uma carga elétrica transferida por unidade de tempo. Para que a reação de dissolução do metal tenha prosseguimento é necessário que os elétrons produzidos sejam removidos; caso contrário, ocorre equilíbrio eletroquímico. A reação de redução de hidrogênio que ocorre simultaneamente só tem prosseguimento se receber elétrons. Dessa forma, os elétrons produzidos pela reação de dissolução do metal são utilizados pela reação de redução do hidrogênio, e as reações têm prosseguimento.

A Figura 7.1 mostra o mecanismo eletroquímico de corrosão, envolvendo eletrodos de dois metais, cobre e ferro (base para os aços e ferros fundidos). Os eletrodos estão expostos a um eletrólito, uma solução aquosa capaz de formar cátions e ânions, e contém indicadores das áreas catódica e anódica, provenientes do processo eletroquímico. A conexão entre os eletrodos foi realizada por um fio de cobre. É importante destacar que os eletrodos de ferro e cobre são imersos em uma solução eletrolítica ácida sem metais inicialmente.

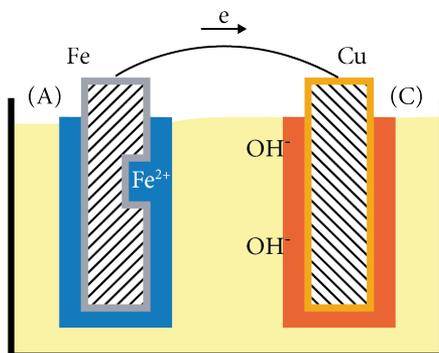


Figura 7.1 – Mecanismo eletroquímico de corrosão do cobre e ferro. Adaptado de Gentil (2011).

Em termos de reação de oxidação (corrosão), o potencial-padrão para o ferro oxidar é $-0,440\text{ V}$ e para o cobre oxidar é $+0,340\text{ V}$ (Figura 7.3). O cobre é muito mais catódico que o ferro e, por isso, apresenta menor tendência a corroer. O eletrodo de ferro é o ânodo (A), no qual ocorre a oxidação (perda de elétrons), destacada pela região em azul; e o cátodo (C) é o eletrodo de cobre, no qual ocorre a redução (ganho de elétrons), formando uma região protetora com coloração alaranjada.

A perda de elétrons do ferro consiste em corrosão (oxidação) e ocorre devido à diferença de potencial entre os eletrodos de ferro e de cobre. Em função disso, verifica-se um fluxo de elétrons do ferro (ânodo) para o cobre (cátodo), gerando, portanto, uma reação química de oxirredução com envolvimento de elétrons, o que caracteriza um processo eletroquímico. A pilha com eletrodos metálicos diferentes é conhecida como pilha galvânica; portanto, é usual o termo corrosão galvânica ou bimetálica para esses casos.

Os possíveis problemas gerados pela corrosão de materiais metálicos aos produtos incluem perda de qualidade na aparência, interrupção do funcionamento, contaminação, perda em manufatura ou já fabricados, redução da segurança, elevação do custo de manutenção etc.

Em termos gerais, as cerâmicas são materiais que apresentam menor reatividade química do que os polímeros, e os metais são os mais reativos quimicamente. Estes merecem destaque na análise de corrosão de materiais, porque possuem elétrons livres que podem gerar pilhas eletroquímicas dentro de suas estruturas, o que normalmente gera corrosão. A corrosão dos metais é uma forma de extração metalúrgica ao contrário, cujo processo é favorecido pelas menores energias dos metais na condição de óxidos, sulfitos, carbonatos ou silicatos.

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

Por ser irregular, é muito difícil medir a corrosão. A unidade mais comum utilizada é polegadas, centímetros ou milímetros de superfície perdida por ano. Outra forma de medida está relacionada à profundidade de penetração (por exemplo, nas unidades de milímetros por ano).

A necessidade de utilização de metais em altas temperaturas e em meios altamente corrosivos, como a água do mar para a indústria petrolífera, tem levado à obtenção de novas ligas especiais e à utilização de tratamentos superficiais específicos para essas aplicações, com destaque para ligas especiais de cobre, como o bronze-alumínio-níquel.

Além da deterioração por corrosão, as reações eletroquímicas estão presentes em processos industriais como a eletrodeposição (ou galvanoplastia), que adiciona um revestimento fino de um metal (por exemplo, cobre) na superfície de outros (aço ou zinco, por exemplo) para fins de proteção superficial.

Curiosidade

Do ponto de vista da área da saúde, o *cobre* é um metal com espetacular habilidade de matar germes. Os íons de cobre possuem elevada capacidade de eliminar microrganismos nocivos à saúde humana. Por exemplo, quando a membrana de uma superbactéria que contém carga elétrica entra em contato com o cobre, ocorre um tipo de curto-circuito. Nesse caso, o cobre invade esse microrganismo e destrói seu DNA (ácido desoxirribonucleico); sem o DNA, não há crescimento nem mutação. Em contrapartida, em função de seu comportamento químico, o cobre não pode ser aplicado como biomaterial (em próteses, por exemplo).

7.2 TIPOS DE CORROSÃO

Os processos corrosivos de natureza eletroquímica apresentam mecanismos idênticos uns aos outros, porque constituem áreas anódicas e catódicas, entre as quais circulam uma corrente de elétrons e uma de íons. Entretanto, a perda de massa e o modo de ataque sobre o material se dão por formas diferentes. Os principais tipos de corrosão são mostrados na Figura 7.2 e descritos na sequência: uniforme, intergranular, em placas, alveolar, por pites e filiforme. Adicione a corrosão galvânica, que recebe destaque neste capítulo.

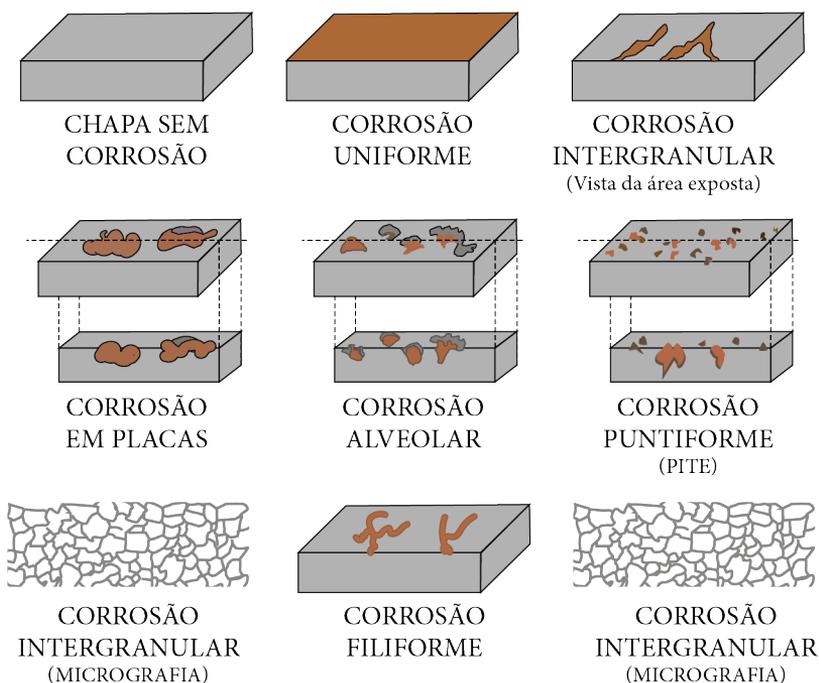


Figura 7.2 – Principais tipos de corrosão. Adaptado de Zurlo (2016).

A *corrosão uniforme* consiste no ataque de toda a superfície metálica em contato com o meio corrosivo e na conseqüente perda de material, evidenciada pela diminuição da espessura. Esse tipo de corrosão se processa de modo generalizado em toda a superfície e é uma forma comum em metais que não formam películas protetoras, como resultado do ataque. A corrosão uniforme ocorre em geral devido a micropilhas de ação local e é provavelmente o tipo mais comum de corrosão, em particular nos processos corrosivos de estruturas expostas à atmosfera e outros meios que ensejam uma ação uniforme sobre a superfície metálica. A corrosão uniforme é uma forma de desgaste de mais fácil acompanhamento, em especial quando se trata de corrosão interna em equipamentos ou instalações, tendo em vista que a perda de espessura é aproximadamente a mesma em toda a superfície metálica.

A *corrosão intergranular* ocorre quando existe um caminho preferencial para a corrosão na região dos contornos de grão. Nesse caso, os grãos vão sendo destacados à medida que a corrosão se propaga. O principal fator responsável pela diferença na resistência à corrosão da matriz (material no interior do grão) e do material vizinho ao contorno é a diferença na composição química nesses locais. Esse tipo de corrosão ocorre com maior frequência em aços inoxidáveis e ligas de alumínio. No caso das ligas alumínio-cobre, os precipitados Al_2Cu são mais nobres que a matriz e aparentemente agem como cátodos, acelerando a corrosão da região vizinha ao contorno de grão, empobrecida em cobre. Eliminando os precipitados, elimina-se a causa da corrosão intergranular. Entretanto, no caso das ligas de alumínio mencionadas, os precipitados são imprescindíveis para a elevação da resistência mecânica e da dureza.

A *corrosão em placas* ocorre quando os produtos de corrosão formam placas que se desprendem de forma progressiva. É um tipo de corrosão comum em metais que formam película inicialmente protetora, mas que, ao se tornarem espessas, fraturam e perde aderência, expondo o metal a um novo ataque.

A *corrosão alveolar* ocorre quando o desgaste provocado pela corrosão se dá de forma localizada, com o aspecto de crateras. É um tipo de corrosão frequente em metais formadores de películas semiprotetoras ou em corrosão sob depósito, como no caso da corrosão por aeração diferencial.

A *corrosão por pites* (ou *puntiforme*) é uma forma de corrosão localizada que consiste na formação de cavidades de pequena extensão e razoável profundidade. Ocorre em determinados pontos da superfície; no entanto, o restante pode permanecer quase sem ataque. É um tipo característico de corrosão de materiais metálicos formadores de películas de proteção e resulta, de modo geral, da atuação de sítios ativos-passivos em pontos onde a camada passiva é rompida. O mecanismo de formação dos pites inicia-se em pontos de fragilidade ou defeitos da película de óxido passivante, e o pH no interior do pite altera-se substancialmente no sentido ácido, o que dificulta a restituição da passivação inicial. Surge a pequena área ativa diante de uma grande área catódica, provocando corrosão intensa e localizada. Exemplos típicos são os aços inoxidáveis e as ligas de alumínio em meios que contém cloretos.

A *corrosão filiforme* ocorre sob filmes de revestimentos, especialmente de pintura, que se propagam em direções variadas e não se cruzam. É um tipo de corrosão que se processa muito quando a umidade relativa do ar é maior que 85% e em revestimentos mais suscetíveis à penetração de oxigênio e água ou apresentando falhas.

A *corrosão galvânica*, discutida inicialmente no item 7.1 deste capítulo, é o processo corrosivo resultante do contato elétrico de materiais dissimilares. Quanto mais distantes são os materiais na tabela de potenciais eletroquímicos, em termos de nobreza no meio considerado, mais intenso é o mecanismo. Ele apresenta também grande influência entre as áreas catódica e anódica.

A Figura 7.3 exibe uma série de potenciais-padrão (E_o) de eletrodos, na qual se pode observar seus respectivos potenciais de oxidação. Quanto mais negativo é o potencial-padrão do eletrodo, mais anódico e maior é a tendência para sofrer corrosão (oxidação). Observa-se que o cobre (Cu) é muito catódico em comparação com o ferro (Fe), o que explica porque ele sofre redução enquanto o ferro é corroído, ratificando o fenômeno explicado no mecanismo eletroquímico entre esses dois metais.

	Metal	E_o (V)
Mais Catódico ↑	Au	+1,420
	Cu	+0,340
	Pb	-0,126
	Sn	-0,136
	Ni	-0,250
	Co	-0,277
↓ Mais Anódico	Cd	-0,403
	Fe	-0,440
	Cr	-0,744
	Zn	-0,763
	Al	-1,662
	Mg	-2,262
	Na	-2,714
	K	-2,924

Figura 7.3 – Série de potenciais-padrão de eletrodos de importantes metais, em temperatura ambiente. Adaptado de Callister e Rethwisch (2014).

Por meio da análise da Figura 7.3, compreendemos por que, em uniões bimetálicas com contato direto entre cobre e aço (liga à base de ferro), o aço está propício à corrosão (oxidação) e o cobre à redução. A diferença de potencial de redução entre o cobre e o alumínio é ainda maior; logo, em aplicações de contato, o alumínio está propício ao processo de oxidação (corrosão).

Outra observação importante é que a área corroída em um par galvânico de metais dissimilares é denominada área anódica, e que uma área maior significa corrosão menos concentrada. Também é possível constatar também que o cobre não pode ser utilizado como material de sacrifício para um componente ou peça de aço e que, em termos de comportamento mais anódico do que o ferro, o magnésio é mais recomendável para essa finalidade do que o alumínio, por exemplo.

A Tabela 7.1 apresenta, de baixo para cima, materiais catódicos relevantes, como o bronze de silício, o bronze fosforoso, o latão almirantado, o cuproníquel e o latão vermelho. Isso evidencia o importante comportamento químico do cobre e suas ligas no que diz respeito à resistência à corrosão.

Tabela 7.1 – Série galvânica prática de materiais em água de mar. Adaptado de Callister e Rethwisch (2014)

Anódico	Magnésio Revestimento de zinco	Anódico	Latão naval 464
↑	Berílio	↑	Latão amarelo
↑	Cádmio	↑	Revestimento de latão
↑	Urânio (puro)	↑	Latão vermelho
↑	Alumínio	↑	Molibdênio
↑	Índio	↑	Cuproníquel
↑	Estanho	↑	Latão almirantado
↑	Chumbo	↑	Bronze fosforoso
↑	Aço	↑	Monel 400
↑	Ferro fundido	↑	Aço inoxidável 316 (ativo)
↑	Níquel (ativo)	↑	Bronze de silício
↑	Cobre	↑	Aço inoxidável 304 (passivo)
↑	Níquel (passivo)	↑	Aço inoxidável 316 (passivo)
↑	Revestimento de cromo	↑	Titânio
↑	Tântalo	↑	Prata
↑	Aço inoxidável 304 (ativo)	↑	Ouro
↑	Tungstênio	↑	Platina
↑	Nióbio com 1% de zircônio	↑	Paládio
↑	Urânio com 8% de molibdênio	↑	Grafite
↓		↓	
Catódico		Catódico	

Dentro da corrosão galvânica, pode-se localizar a *dezincificação*. Ela está relacionada ao processo corrosivo que se observa nas ligas com zinco, especialmente nos latões com alto teor de zinco, nos quais a corrosão resulta na destruição do material (mais anódico), restando o cobre na região atacada e apresentando na superfície do latão regiões avermelhadas, locais onde ocorre a corrosão seletiva do zinco. De forma rara, a *desniquelação* consiste na corrosão seletiva do níquel em ligas de cobre (70%) e níquel (30%) em temperaturas acima de 100 °C.

Os principais tipos de corrosão já foram mencionados anteriormente. Contudo, existem mecanismos de corrosão associados ao escoamento de fluidos, podendo citar-se a *corrosão-erosão*, a *corrosão com cavitação* e a *corrosão por turbulência e tribo-corrosão*. Além disso, existe a *corrosão associada a uma tensão* (ou *corrosão sob tensão*), quando um

material é submetido a tensões trativas em um meio corrosivo específico. As condições metalúrgicas do material, como dureza, encruamento e fases presentes, são fatores decisivos. Na corrosão associada a uma tensão, formam-se trincas no material, que podem assumir comportamento intergranular ou transgranular. A corrosão sob tensão intergranular ocorre de preferência nos contornos de grãos, geralmente em decorrência da precipitação de segundas fases nos contornos ou devido a fenômenos de segregação.

7.3 TESTES DE CORROSÃO

É perceptível que o fenômeno corrosivo gera danos, muitas vezes irreparáveis – sem mencionar os gastos que empresas de todo o mundo têm despendido para repará-los. Para evitar esses transtornos, os testes de corrosão são essenciais, porque simulam condições variadas nas quais as peças são aplicáveis. Eles podem ser realizados de diferentes formas, envolvendo intervalos de tempo variados e agregam considerável confiabilidade nos resultados obtidos.

De forma geral, os ensaios de corrosão simulam condições artificiais em laboratórios com aproximações da composição química do meio de ataque ou ainda são realizados em condições de exposição natural no campo de trabalho, onde efetivamente o material é aplicado. Em último caso, os tempos para a obtenção dos resultados são relativamente longos, o que representa, de modo indireto, maiores custos de estudo e pesquisa. No setor industrial, os testes de corrosão acelerada em diversos meios de ataque são utilizados no intuito de reduzir o tempo de resposta dos ensaios.

A seleção do tipo de ensaio depende do objeto de aplicação, do tipo do material aplicado, do tipo de meio ou atmosfera de ensaio e dos parâmetros desejados. Com o processo de globalização e as normalizações de métodos e técnicas no setor industrial, os testes de resistência à corrosão são executados segundo normas apresentadas na Tabela 7.2.

Tabela 7.2 – Testes de corrosão normalizados

Norma	Título	Aplicação
ASTM B117	Prática para operações em câmara salina	Alumínio, exposição marinha
ASTM B 368	Teste acelerado para cobre em ácido acético	Liga Cu-Ni-Cr para decoração
ASTM D 2247	Teste de revestimentos em 100% de umidade	Resistência à água
ASTM G 85	Ácido acético	Teste de esfoliação para ligas de alumínio
ASTM G 85	Teste em ciclos em câmara salina com atmosfera acidificada	Teste de esfoliação para ligas de alumínio

ASTM G 85	Teste em câmara salina utilizando água do mar sintética	Alumínio
ASTM G 85	Teste em câmara salina utilizando NaCl e SO ₂	Componentes de aeronaves
ASTM G 85	Teste em câmara salina utilizando ciclo úmido/seco	Manutenção de revestimentos
ASTM G 87/ DIN 50018	Orvalho de SO ₂	Contatos elétricos e telhado
CCT IV	Novo teste de corrosão acelerada	
GM9540P/ B	Novo teste de corrosão acelerada	
MIL H 6088G	Corrosão intergranular	Indústria aeronáutica
SAE J2334	Novo teste cíclico de corrosão	

O desenvolvimento relativamente crescente de novos métodos de produção de componentes resistentes à corrosão requer testes que avaliem o desempenho dos materiais em um curto intervalo. Além disso, os testes acelerados de corrosão podem mascarar ou equivocar o real desempenho e resposta do material, devido à agressividade excessiva da solução. Apesar de os testes de *salt spray* apresentarem boa correlação com os resultados reais, as técnicas eletroquímicas têm sido mais utilizadas para avaliação do desempenho dos materiais frente ao fenômeno corrosivo.

Entre as técnicas eletroquímicas mais utilizadas estão as *curvas de polarização de Tafel* [ASTM G59]. Quando essa técnica não traz informações suficientes ou explícitas, referentes à natureza e tipo do ataque, faz-se necessário o uso de outra técnica, conhecida como *espectroscopia de impedância eletroquímica* (EIE ou EIS, do inglês *Electrochemical Impedance Spectroscopy*) [ASTM G106], que tem demonstrado aplicabilidade em uma ampla gama de trabalhos com soluções aquosas.

Lobo (2023) realizou uma pesquisa sobre a influência das variáveis térmicas de solidificação sobre a microestrutura e a resistência à corrosão da liga Cu-24%Zn-6%Al-4%Mn-3%Fe. O estudo do comportamento de corrosão foi realizado por meio de ensaios de polarização potenciodinâmica linear. Esse método utiliza um potenciostato que impõe um potencial ao eletrodo de trabalho (que corresponde ao material estudado) em relação a um contraeletrodo fabricado com material inerte e mede a corrente gerada entre os dois.

Na Figura 7.4, são mostradas as curvas de polarização potenciodinâmica de todas as posições do lingote fundido unidirecionalmente, sendo os potenciais de corrosão e as densidades de correntes de corrosão obtidos por meio extrapolação de Tafel em cada uma dessas curvas.

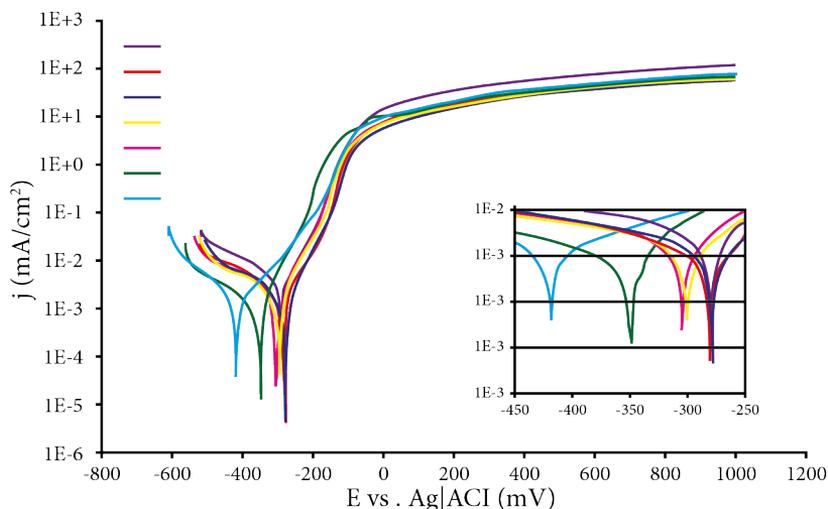


Figura 7.4 – Curvas de polarização potenciodinâmica. (Lobo, 2023)

Os ensaios de polarização potenciodinâmica linear mostraram que menores taxas de resfriamento, que ocorrem de acordo com a distância da parede do molde, proporcionam amostras mais instáveis, com menores potenciais de corrosão e maiores taxas de corrosão, o que pode estar relacionado com a maior heterogeneidade da microestrutura das amostras ao se afastarem da base de troca térmica, devido à maior tendência de acoplamento galvânico entre a matriz e a fase κ rica em ferro e alumínio.

7.4 CONTROLE DA CORROSÃO

Conforme discutido, o cobre e suas ligas normalmente são materiais que possuem melhores comportamentos eletroquímicos frente à corrosão (oxidação) que outros. Os materiais metálicos que não possuem um razoável desempenho frente à corrosão podem apresentar resultados melhores de resistência à corrosão pela utilização de métodos ou técnicas de proteção anticorrosiva, que minimizam a ação e os efeitos corrosivos. No Capítulo 5 desta obra, foram discutidas importantes tecnologias de tratamentos de superfícies que podem ser empregadas em materiais de engenharia para melhoria de resistência à corrosão.

Além da preocupação com as melhorias das propriedades mecânicas, existe também uma preocupação ainda maior no que diz respeito à proteção ou à inibição da ação corrosiva. Uma variedade de peças de cobre ou de suas ligas são aplicadas nos mais diversos setores industriais em função de elevada resistência à corrosão.

Em relação ao combate à corrosão, recomenda-se a adoção de estratégias para o controle da corrosão, as quais são: *bom projeto*, com a seleção de materiais baseada em informações, geometria e configurações; *revestimentos de proteção*, que podem ser

passivos (o revestimento simplesmente exclui o meio corrosivo) e *ativos* (o revestimento protege mesmo quando incompleto); *inibidores de corrosão*, que são produtos químicos adicionados ao meio corrosivo para retardar a taxa da reação da corrosão; e *monitoramento*, que consiste na manutenção preventiva ou substituição regular.

Um exemplo de cuidado no projeto para evitar ou mitigar a corrosão galvânica é a adoção de elementos como buchas, arruelas e gaxetas de isolamento, para que não ocorra o contato direto de peças de cobre e aço. Dessa forma, evita-se o ataque galvânico e a oxidação (corrosão) do aço. Outros exemplos de cuidados com projeto incluem mudanças para evitar fluidos aprisionados, fissuras (que acumulam umidade) e outras complicações.

A tecnologia existente permite a utilização dos materiais em praticamente todos os meios corrosivos com durabilidade dentro de certos períodos desejados. Alguns materiais de elevado uso industrial possuem baixa resistência à corrosão na maioria dos meios, porém ela pode ser melhorada utilizando técnicas ou métodos de proteção anticorrosiva que promovem a *apassivação* ou a *polarização* do material. Regular a corrosão consiste em um razoável controle das *taxas de corrosão* por intermédio da aplicação de inibidores, proteção catódica ou anódica, aplicação e desenvolvimento de revestimentos, modificação estrutural da superfície e modificações e controle do meio corrosivo, como o controle do pH.

Entre as tecnologias de processamento de superfície destaca-se a *galvanoplastia* (*eletrodeposição*), e o *cobre* possui aplicações importantes, como metal de revestimento nobre. Ele é amplamente utilizado sobre aço e zinco, isoladamente ou formando liga, como chapa de latão (zinco).

O *laser* é outro exemplo de tecnologia que pode ser utilizada para atingir melhorias de resistência à corrosão em materiais metálicos. Entre as técnicas com aplicação do laser, destacam-se *LSM* (do inglês *Laser Surface Melting*), *LSA* (do inglês *Laser Surface Alloying*) e a *deposição física a vapor* (PVD, do inglês *Physical Vapor Deposition*).

7.5 CONSIDERAÇÕES SOBRE CORROSÃO NO COBRE E SUAS LIGAS

Como mencionado, o cobre é catódico em um par galvânico com a maioria dos materiais metálicos, por exemplo aços e alumínio. Existem importantes elementos de liga que podem ser adicionados ao cobre na formação de ligas, gerando incremento de resistência à corrosão, entre eles arsênio (As), que atua como inibidor de corrosão em água do mar, níquel (Ni) ou estanho (Sn), que aumentam a resistência mecânica e a resistência à corrosão.

O *cobre* desoxidado com fósforo (DHP, do inglês *Deoxidized High Phosphorus*), mais conhecido como cobre P122, é utilizado na fabricação de tubos em sistemas de refrigeração e em aplicações cujo controle da corrosão seja importante e não se tenha preocupação com perda da condutividade elétrica.

Os *tombacks* são ligas binárias constituídas por cobre e zinco, que apresentam teores mássicos de zinco de até 20%. São ligas monofásicas (fase alfa) e possuem elevada resistência à corrosão, sobretudo a dezincificação, que ocorre principalmente em soluções salinas, com maior intensidade em meios ácidos.

O *tomback 95/05*, liga UNS C21000 (ou liga 210), trata-se de uma liga binária de cobre formada por 95% de cobre e 5% de zinco, em massa. Possui nome comercial de *Gilding Metal* ou "liga para enfeite e douração". Suas aplicações consistem na fabricação de terminais elétricos, bijuterias, medalhas e adornos, moedas, emblemas, placas, material usado como base para aplicação de ouro e de esmaltes vítreos.

O *tomback 90/10*, liga UNS C22000 (ou liga 220), trata-se de uma liga de cobre formada por 90% de cobre e 10% de zinco, em massa. Conhecida como "bronze comercial" ou "latão vermelho", apresenta características similares ao *tomback 95/05*, com menor custo de matéria-prima, uma vez que o teor de cobre da liga 220 é menor. As aplicações incluem espelhos de fechaduras (peças nobres), componentes náuticos, rebites, parafusos, recobrimento de projéteis, bijuterias em geral, decorações ornamentais, artigos esmaltados, telas, cantoneiras, canaletas, dentre outras aplicações.

O *tomback 85/15*, liga UNS C23000 (ou liga 230), é formado por 85% de cobre e 15% de zinco, em massa, e conhecido comercialmente também como "latão vermelho". Entre os três *tombacks* mencionados, trata-se do mais utilizado, em função da relação custo-benefício, levando em consideração seu menor teor de cobre. Suas aplicações abarcam liga utilizada em munições, frisos, guarnições, cantoneiras, molduras, mangueiras flexíveis, tubulações, recipientes para cosméticos, mostradores para relógios e instrumentos, bijuterias, chapas gravadas, peças destinadas a brasagem, fechaduras, *zípers*, tubulações químicas, soquetes, contadores, dentre outras.

O *latão 70/30*, liga UNS C26000 (ou liga 260), é o latão mais conhecido e utilizado em escala industrial. Recebe a designação 70/30 por ser formado por 70% de cobre e 30% de zinco, em massa. Esta liga é conhecida comercialmente como "latão cartucho", pela sua grande utilização na fabricação de cartuchos de munição. Apesar de ser uma liga monofásica, já possui características bem diferentes dos *tombacks*, começando por sua coloração amarelada. Pode apresentar problemas de dezincificação, dependendo do ambiente de aplicação; em compensação, apresenta a mais favorável combinação de valores elevados de resistência mecânica e ductilidade entre todos os latões. Além da fabricação de cartuchos de munição, outras aplicações incluem a fabricação de moedas, instrumentos musicais, adornos e objetos de decoração.

O *latão 65/35*, liga UNS C27000 (ou liga 270), e o *latão 63/37*, liga UNS C27200 (ou liga 272), referem-se a latões que já podem apresentar uma pequena quantidade de fase beta e não podem ser utilizados em ambientes corrosivos. Entre as aplicações destacam-se peças de veículos automotivos, ferragens residenciais e terminais elétricos.

O *latão 60/40*, liga UNS C28000 (ou liga 280), compreende uma típica liga bifásica (fases alfa e beta), composta por 60% de cobre e 40% de zinco, em massa. A fase beta limita a aplicações em condições não muito corrosivas. As aplicações incluem

fabricação de placas, barras e perfis, na arquitetura em seções estruturadas e painéis espessos, na indústria química em placas de tubos de condensadores e trocadores de calor e componentes mecânicos fabricados por forjamento.

Os *latões especiais* são ligas de cobre e zinco com adição de um ou mais elementos específicos, em que cada elemento de liga lhe confere propriedades específicas, possibilitando incremento na gama de aplicações. O latão aluminado, o latão almirantado arsenical e o latão naval são exemplos de latões especiais com elevada resistência à corrosão.

O *latão aluminado*, liga UNS C68700 ou liga 687, compreende um latão com cerca de 2% de alumínio, em massa. O alumínio melhora a resistência à corrosão da liga, que pode conter ou não arsênio na sua composição, um elemento que aumenta a proteção à corrosão em água salobra. Suas aplicações abarcam trocadores de calor para aplicações em plataforma de petróleo no mar (*offshore*).

O *latão naval*, liga UNS C46400 ou liga 464, compreende uma liga de cobre-zinco-estanho (Cu-Zn-Sn), em que o estanho, apesar de mais fraco do que o alumínio, aumenta a resistência à corrosão da liga. As aplicações incluem material utilizado em peças fundidas de aplicações navais, hélices e lemes de navios, rotores para turbinas movidas à água, buchas, engrenagens e eixos.

O *latão almirantado*, liga UNS C44300 ou liga 443, é similar ao latão naval, também contendo estanho entre seus componentes, além de cobre e zinco. Possui ótima resistência à corrosão, mesmo em águas salgadas, mas pode ser utilizado para aplicações de água doce, salgada ou salobra.

O *bronze* é uma liga formada principalmente de cobre e estanho (tipicamente com cerca de 90% de Cu e 10% Sn, em massa). Outras ligas de cobre do grupo dos bronzes têm sido desenvolvidas, compostas com outros elementos além do estanho, por exemplo o alumínio ou o silício.

De forma geral, o bronze apresenta elevada resistência à corrosão, uma vez que possui o estanho na composição, incrementando essa propriedade. Entretanto, quanto mais estanho presente na composição do bronze, mais dura se torna a liga e mais difícil de ser conformada a quente.

Na sequência, são apresentados bronzes fosforosos (que apresentam determinado teor de fósforo) definidos pela quantidade de estanho e que possuem boa resistência à corrosão. Tratam-se de bronzes dúcteis, que são trabalháveis de forma mecânica por processos de conformação, possibilitando a obtenção de formas de chapas, barras, fios e tubos.

O *bronze fosforoso 511*, liga UNS C51100 ou liga 511, compreende uma liga de cobre com 4% de estanho, em massa, e com pequenos teores de fósforo. Possui uma microestrutura monofásica (fase alfa) e propicia uma boa combinação de trabalhabilidade a frio, resistência mecânica e dureza. Apresenta boa resistência à corrosão, inclusive em condição de corrosão sob tensão. Trata-se de uma liga comumente utilizada em aplicações elétricas como molas condutoras, componentes de interruptores, chaves, contatos e tomadas.

O *bronze fosforoso 510*, liga UNS C51000 ou liga 510, compreende uma liga de cobre com 5% de estanho, em massa, e com pequenos teores de fósforo. Também possui uma microestrutura monofásica, mas sua resistência mecânica é um pouco superior. Trata-se de uma liga utilizada na fabricação de ganchos de chapas de revestimento, tubos para condução de águas ácidas, componentes para a indústria têxtil, química e de papel, molas condutoras e componentes de interruptores e tomadas, molas e diafragmas, parafusos, rebites, porcas, escovas, tubos de manômetros, varetas e eletrodos de soldagem.

O *bronze fosforoso 519*, liga UNS C51900 ou liga 519, compreende uma liga de cobre com 6% de estanho, em massa, e com pequenos teores de fósforo, apresentando também uma microestrutura monofásica. Em termos de propriedades, possui elevada capacidade de trabalhabilidade, excelente resistência à corrosão e maior resistência à fadiga e ao desgaste do que os bronzes 510 e 511. Trata-se de uma liga que pode ser utilizada na fabricação de componentes para as indústrias química, têxtil e de papel, na construção elétrica para molas condutoras e componentes de interruptores; e na construção mecânica em molas e membranas, escovas, tubos de manômetros, engrenagens, componentes de bombas e eletrodos de soldagem.

O *bronze fosforoso 521*, liga UNS C52100 ou liga 521, compreende uma liga de cobre com 8% de estanho, em massa, e com teores de fósforo. É uma liga monofásica, apenas com fase alfa, que, dependendo das condições de processamento, pode conter pequenas quantidades de fase delta. Em função de elevados teores de estanho e de fósforo, apresenta elevada resistência à fadiga e ao desgaste e comportamento de antifricção (diminuindo os efeitos do atrito), além de boa resistência à corrosão. Possui aplicações similares às do bronze fosforoso 519.

Já os *cuproníqueis* são ligas de cobre com 10%, 20% ou 30% de níquel, em massa. São ligas monofásicas (fase alfa) que apresentam elevada resistência à corrosão, principalmente em água marinha. Em relação à composição, contém em geral 2% de ferro e manganês, em massa, com o intuito de elevar a resistência à corrosão. As aplicações dessas ligas de cobre incluem a indústria naval, tubos para condensadores e aquecedores e moedas.

As ligas ternárias cobre-níquel-zinco (Cu-Ni-Zn) também são conhecidas como *alpacas*. Em sua composição em termos mássicos, essas ligas apresentam de 10% a 30% de níquel, com valor típico de 8%, 12% e 18%; 45% a 70% de cobre; e o restante de zinco. De forma geral, as alpacas são constituídas de soluções sólidas homogêneas e apresentam elevada resistência à corrosão.

As *ligas especiais de cobre* são aquelas cujas composições e os processos de fabricação devidamente associados possibilitam aplicações tecnológicas de elevado desempenho em termos de propriedades mecânicas e de resistência à corrosão, por exemplo. Essas ligas apresentam propriedades tecnológicas superiores às de muitos aços, até mesmo os inoxidáveis. O bronze-alumínio (Cu-Al) e o bronze-silício (Cu-Si) fazem parte do grupo de ligas especiais de cobre.

A liga do sistema cobre-alumínio também é conhecida como *bronze-alumínio* (ou *bronze de alumínio*). É um tipo de bronze no qual o alumínio é o principal elemento de liga, em que o teor mássico de até 5% faz com que a liga apresente uma estrutura monofásica que, em termos de propriedades, possua uma combinação de elevada resistência mecânica e à corrosão. Ressalta-se que esses tipos de ligas precisam estar com suas tensões residuais aliviadas; caso contrário, a corrosão sob tensão ocorre de forma rápida quando expostas a meios agressivos.

Outros elementos também podem ser considerados na composição de ligas cobre-alumínio, como o níquel, que eleva a resistência mecânica e à corrosão. Em função dessa adição, a liga passa a ser classificada como *bronze-alumínio-níquel* (NAB, do inglês *Nickel Aluminium Bronze*).

A liga de cobre com silício é conhecida como *bronze-silício* (ou *bronze de silício*). A adição de silício ao cobre propicia elevada soldabilidade e excelente resistência à corrosão por ácidos. As ligas trabalháveis (dúcteis) possuem no máximo 3% de silício e podem conter em torno de 1% de manganês, em massa. As ligas para fundição apresentam 4% a 5% de silício, em massa, e pequenos teores de zinco, ferro e manganês.

Como elemento de liga em importantes materiais de engenharia, o cobre diminui a resistência à corrosão nas ligas de alumínio, porém possibilita o ganho de resistência mecânica e dureza por meio de endurecimento por precipitação. Em relação aos aços, a inserção de cobre destaca-se por aumentar a resistência à corrosão marinha, além de melhorar um pouco a resistência mecânica.

REFERÊNCIAS

ASHBY, M. F. **Materias**: engenharia, ciência, processamento e projeto. Rio de Janeiro: Elsevier, 2012.

ASKELAND, D. R.; WRIGHT, W. J. **Ciência e engenharia dos materiais**. São Paulo: Cengage Learning, 2014.

ASTM G3. **Standard recommended practice for conventions applicable to electrochemical measurements in corrosion testing**. West Conshohocken: ASTM International, 2019.

ASTM G15. **Standard recommended definitions of terms relating to corrosion and corrosion testing**. West Conshohocken: ASTM International, 2017.

ASTM G59. **Standard recommended practice for conducting potentiodynamic polarization resistance measurements**. West Conshohocken: ASTM International, 2020.

ASTM G82. **Standard guide for development and use of a galvanic series for predicting galvanic corrosion performance**. West Conshohocken: ASTM International, 2021.

ASTM G102. **Standard recommended practice for calculation of corrosion rates and related information from electrochemical measurements**. West Conshohocken: ASTM International, 2015.

ASTM G106. **Standard recommended practice for verification of algorithm and equipment for electrochemical impedance measurements.** West Conshohocken: ASTM International, 2015.

CALLISTER JR., W. D.; RETHWISCH, D. G. **Fundamentos da ciência e engenharia de materiais:** uma abordagem integrada. 4. ed. Rio de Janeiro: LTC, 2014.

FERRANTE, M.; WALTER, Y. **A materialização da ideia:** noções de materiais para design de produto. Rio de Janeiro: LTC, 2010.

GENTIL, V. **Corrosão.** 6. ed. Rio de Janeiro: LTC, 2011.

GROOVER, M. P. **Fundamentos da moderna manufatura** (v. 1). 5. ed. Rio de Janeiro: LTC, 2017.

GROOVER, M. P. **Fundamentos da moderna manufatura** (v. 2). 5. ed. Rio de Janeiro: LTC, 2017.

LOBO, F.G. Influência das variáveis térmicas de solidificação sobre a microestrutura e propriedades da liga Cu-24%Zn-6%Al-4%Mn-3%Fe. Dissertação (Mestrado). Universidade Federal do ABC, Grande ABC (SP), 2023.

OSÓRIO, W. R. R. **Análise da influência de parâmetros estruturais da solidificação de metais e ligas na resistência à corrosão.** (Tese de Doutorado). Universidade Estadual de Campinas, Campinas, 2004.

RICHARDSON, I. **Guide to nickel aluminum bronze for engineers** (v. 222). Birmingham, MI: Copper Development Association, 2010.

ROMANN, T. **Corrosion of copper.** Disponível em: https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Corrosion_of_copper.jpg. Acesso em: 21 nov. 2023.

SANTOS, G. A. **Correlação entre microestrutura, resistência mecânica e resistência à corrosão da liga ZA27.** (Dissertação de Mestrado). Instituto Tecnológico de Aeronáutica, São José dos Campos, 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.

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

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

ZURLO, M. N. **Influência da microestrutura na resistência à corrosão da liga Al-3%Cu-1%Li.** (Dissertação de Mestrado). Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de São Paulo, São Paulo, 2016.

A tribologia na seleção de ligas de cobre

8.1 TRIBOLOGIA

A durabilidade é uma das principais características para a seleção de ligas de cobre nas aplicações de engenharia, e as propriedades tribológicas desses materiais são cruciais para ratificar sua seleção para utilizações em condições que exigem elevada resistência ao desgaste. Em termos de comparação com a corrosão, que foi discutida no capítulo anterior, o desgaste mecânico pode fazer com que uma máquina (ou equipamento) tenha seu funcionamento comprometido ou até mesmo interrompido antes dos efeitos deletérios da corrosão.

O *desgaste* está associado ao atrito entre superfícies que deslizam entre si. De forma mecânica, compreende a progressiva perda de material de um corpo sólido causada pelo movimento relativo com outra substância. A *tribologia* é uma palavra de origem grega, na qual *tribos* significa *esfregar* (atritar) e *logia* significa *estudo de*. Ela pode ser definida como a ciência que estuda o atrito e o desgaste, sendo parte importante da engenharia mecânica, e que considera os fenômenos de lubrificação.

Do ponto de vista econômico, o desgaste propicia custos de manutenção e de reposição de componentes desgastados pelo atrito, em função da geração de folgas e de energia dissipada. De forma geral, com a mitigação do atrito, é possível obter equipamentos com maiores eficiências energéticas e durabilidade, como motores e caixas de transmissão. Entretanto, o atrito é primordial para muitas aplicações, como o deslocamento de veículos pelo atrito entre os pneus e o solo, os processos de usinagem pelo atrito entre a ferramenta de corte e o material a ser usinado e de soldagem por atrito de elementos para soldar, e exemplos corriqueiros, como o atrito que gera o desgaste do lápis no papel e do giz na lousa para que ocorra a escrita.

Uma observação importante é que um atrito elevado não significa necessariamente um desgaste maior. Por exemplo, no caso de um veículo automotivo, os pneus sofrem elevado atrito com o piso considerado e baixo desgaste; já o grafite de um lápis em uma folha de papel, elevado desgaste e baixo atrito. Em casos nos quais o desgaste acarreta efeitos deletérios, é possível mitigá-lo modificando as propriedades da superfície do material por meio de processos de engenharia de superfície (eletrodeposição, por exemplo), adoção de lubrificantes e/ou seleção de materiais com boas propriedades tribológicas (bronzes, por exemplo).

A seleção das ligas de cobre com elevada resistência ao desgaste é uma alternativa extremamente relevante e adotada em aplicações de engenharia. Neste capítulo, é dada ênfase aos conceitos relacionados a adoção desses materiais em mancais de deslizamento, que constituem uma de suas principais utilizações.

8.2 MANCAIS DE DESLIZAMENTO

Um mancal de deslizamento é um ótimo exemplo de *tribossistema*, ou seja, um sistema tribológico composto de pelo menos dois corpos em contato e qualquer fator ambiental que afete sua interação. As ligas de cobre são comumente aplicadas em condições que requerem bom comportamento tribológico, por exemplo uma bucha de bronze para mancal de deslizamento, conforme mostrado na Figura 8.1. A bucha de um mancal pode ser definida como um elemento de máquina projetado para transmitir cargas ou forças de reação de um eixo em rotação.

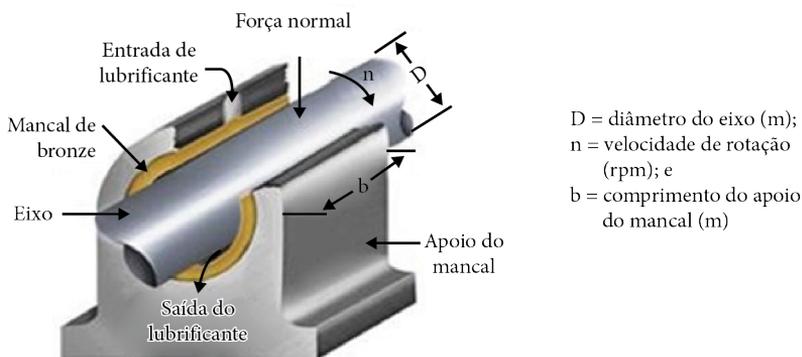


Figura 8.1 – Representação esquemática de um mancal de deslizamento.

Em muitas aplicações, as buchas de mancais oferecem vantagens sobre os rolamentos, principalmente quanto ao menor custo relativo e menores requisitos de espaço. Em conjuntos mecânicos desse tipo, cuja tecnologia de montagem envolve a adoção de pequenas folgas radiais, a interação entre as duas superfícies que estão em deslizamento relativo (eixo e mancal) pode ser classificada como uma condição de

contato, caracterizada pela geometria do eixo côncavo e do mancal convexo e pelas grandes áreas de contato (WANG e CHUNG, 2013).

Para a redução do coeficiente de atrito e do desgaste oriundo da interação dessas superfícies, é comum o uso de lubrificantes, cujo comportamento pode ser avaliado pela curva de Stribeck (Figura 8.2). A consolidação de uma camada de lubrificante suficiente para separar as asperezas superficiais do mancal e do eixo, definida como condição hidrodinâmica, eliminaria totalmente a necessidade do uso de materiais especiais para os mancais. Porém, essa condição ideal raramente é atingida na prática, e o uso de um material adequado é importante para minimizar as consequências de um filme lubrificante insuficiente, o que fundamenta uma das principais justificativas para a seleção de ligas de cobre na fabricação de buchas para mancais de deslizamento.

O regime de lubrificação insuficiente pode ser subdividido em um estado de *lubrificação limítrofe*, definido pela formação de uma fina camada de lubrificante incapaz de separar totalmente as asperezas, e de *deslizamento a seco*, um estado no qual não existe lubrificante entre as superfícies, com conseqüente contato direto dos materiais do eixo e do mancal. Devido à maior interação das superfícies, é natural esperar que o deslizamento a seco apresente maior coeficiente de atrito e desgaste das superfícies em comparação à condição de lubrificação limítrofe.

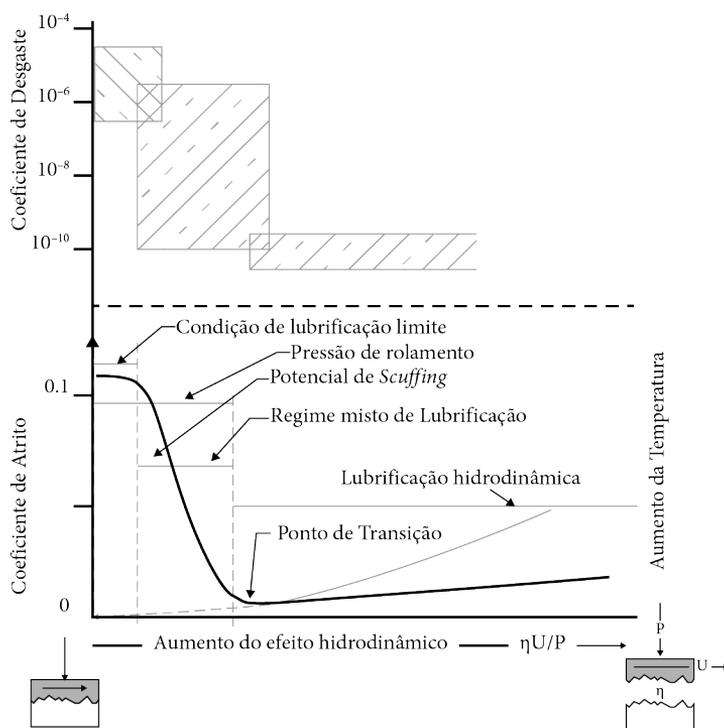


Figura 8.2 – Curva de Stribeck modificada para superfícies lubrificadas. (NON-FERROUS FOUNDERS' SOCIETY, 1997)

Em função da importância dos aspectos relacionados aos materiais em condições de lubrificação insuficiente, faz-se necessário um maior detalhamento das relações existentes no regime de deslizamento a seco.

8.3 PROPRIEDADES TRIBOLÓGICAS

Considerando duas superfícies em contato sob uma força normal (F_n , em N) e que uma desliza sobre a outra (contraface) em regime de deslizamento a seco (Figura 8.3), F_s (em N) é a força de oposição ao movimento, sendo proporcional a força normal e independente da área de superfície. Em função disso, o coeficiente de atrito (μ , adimensional) é definido como:

$$\mu = \frac{F_s}{F_n} \quad (8.1)$$

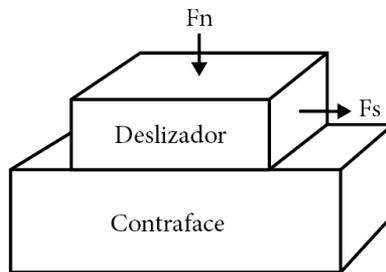


Figura 8.3 – Duas superfícies em contato em regime de deslizamento a seco.

O deslizamento a seco resulta em atrito com um coeficiente $\mu = 0,5$, aproximadamente. Quando metais macios deslizam um sobre o outro (estanho sobre estanho, por exemplo), as junções são fracas, mas a área de contato entre eles é grande e o coeficiente de atrito também. Em relação a dois metais duros deslizando um sobre o outro (aço sobre aço, por exemplo), gerando junções pequenas, mas fortes, o coeficiente de atrito é grande. A forma de conciliar baixo atrito com elevada resistência mecânica é suportar um metal macio com um metal duro, resultando em junções fracas de pequenas áreas.

Os mancais de deslizamento (ou mancais planos) não são projetados para funcionamento a seco, mas o material macio salva esses sistemas por determinado tempo, caso necessário. A taxa de desgaste (W , em m^2) pode ser definida da seguinte forma:

$$W = \frac{\text{Volume de material removido da superfície de contato (m}^3\text{)}}{\text{Distância de deslizamento (m)}} \quad (8.2)$$

Uma forma bastante útil de análise de desgaste de materiais é a *taxa de desgaste específica* (Ω , adimensional), definida em W por unidade de área de superfície (A_n , em m^2):

$$\Omega = \frac{W}{A_n} \quad (8.3)$$

O valor de Ω aumenta com a pressão de mancal (p , em $N.m^{-2}$), a relação entre a força normal F_n e A_n , de forma que:

$$\Omega = k_a \frac{F_n}{A_n} = k_a p \quad (8.4)$$

Em que k_a é a constante de desgaste de Archard, cuja unidade é $(MPa)^{-1}$. Trata-se de uma medida de propensão ao desgaste de um par deslizante, em que k_a alto representa rápido desgaste a dada pressão de mancal.

8.4 MECANISMOS E REGIME DE DESGASTE NO DESLIZAMENTO A SECO

O desgaste no deslizamento a seco pode ser associado a diversos mecanismos, e os principais estão esquematizados na Tabela 8.1. A diferença fundamental entre eles está no conceito de formação dos *debris* (detritos ou partículas de desgaste), que podem ocorrer por eventos mecânicos ou químicos. Esse desgaste pode ocorrer em diferentes regimes, associados à taxa específica de desgaste (Ω), sendo denominados regime moderado não lubrificado e desgaste severo e devidamente distinguidos na Tabela 8.2. A transição dos regimes ocorre em função da mudança da natureza do contato entre as faces e a consequente mudança no mecanismo de desgaste (HUTCHINGS e SHIPWAY, 2017; LIM e ASHBY, 1987).

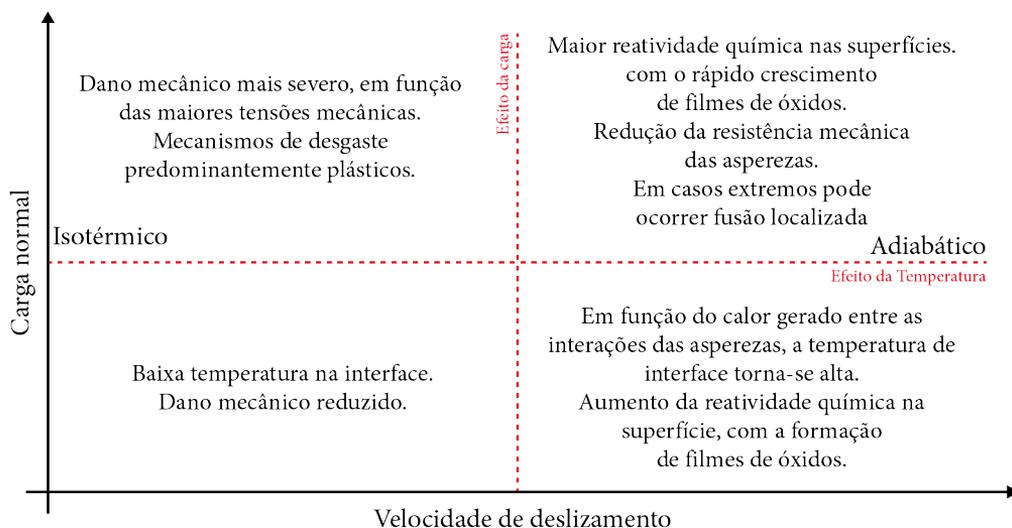
Tabela 8. 1 – Principais mecanismos de desgaste propostos para o deslizamento a seco

Mecanismo	Conceito de formação dos debris	Representação esquemática	Fontes
Desgaste predominantemente plástico	Deformação plástica na ponta de uma asperidade em contato, com posterior des-tacamento por cisalhamento		(KAYABA; KATO, 1979) apud (HUTCHINGS; SHIPWAY, 2017)
Desgaste pela adesão de partículas de transferência	Adesão de partículas à contraface, assumindo a forma de placas		(HUTCHINGS; SHIPWAY, 2017)
Desgaste por delaminação	Nucleação de trincas subsuperficiais, originadas dentro do material plasticamente deformado abaixo da superfície (Zona 2 da TTZ), que se propagam, interconectam e estendem até a superfície		(SUH, 1977; Li <i>et al.</i> , 2019)
Desgaste oxidativo	Remoção de óxidos superficiais, expondo metal não oxidado na superfície e podendo desencadear um processo de remoção/formação contínua de óxidos superficiais		(HUTCHINGS; SHIPWAY, 2017)

Tabela 8.2 – Diferentes regimes de desgaste (HUTCHINGS e SHIPWAY, 2017)

Característica	Desgaste moderado	Desgaste severo
Taxa de desgaste específica	10^{-6} a 10^{-4}	10^{-3} a 10^{-2}
Morfologia superficial	Lisa, com baixa rugosidade	Elevada rugosidade
Material presente na região de contato	Óxidos, geralmente oriundos de ambas as superfícies	Material altamente deformado, tipicamente de ambas superfícies, com partículas de óxido incorporadas
Formato dos debris	Partículas finas de óxidos	Placas metálicas grosseiras
Resistência elétrica do contato	Alta, pela presença de óxidos na superfície	Baixa, pela exposição de superfície de metal desprotegido, pelo mecanismo predominantemente plástico

Os três fatores principais para ocorrência dos mecanismos de desgaste são tensões mecânicas, temperatura e fenômenos de oxidação, sendo interdependentes e influenciados pela combinação da carga aplicada e pela velocidade de deslizamento, conforme Figura 8.4 (HUTCHINGS e SHIPWAY, 2017).

**Figura 8.4** – Diagrama ilustrativo da influência da carga e velocidade de deslizamento no processo de desgaste em metais. Adaptado de Hutchings e Shipway (2017).

8.5 TRANSFORMAÇÕES MICROESTRUTURAIS NO DESLIZAMENTO A SECO

O desgaste por deslizamento em metais pode ser verificado por intermédio da análise microestrutural de amostras preparadas no sentido longitudinal ao deslizamento, o que possibilita avaliar as deformações subsuperficiais da direção de deslizamento em decorrência das forças de atrito (RICE, NOWOTNY e HAYNE, 1989).

Nessa região, se caracteriza a formação de uma *zona tribologicamente transformada* (TTZ, do inglês *Tribologically Transformed Zone*), representada esquematicamente na Figura 8.5 e que contém três regiões principais: *zona 1*, constituída por material *bulk* não deformado; *zona 2*, que contém material plasticamente deformado por cisalhamento com intensidade maior em direção à superfície e associada (ou não) a uma recristalização em decorrência da dissipação da energia de atrito; e *zona 3*, que pode ser formada predominantemente por óxidos metálicos, contendo elementos químicos de ambos os materiais do contato, ou por uma natureza predominantemente metálica, com grãos muito finos, frequentemente submicrométricos, contendo elementos químicos não presentes no material *bulk* oriundos de uma mistura de óxidos e partículas (HUTCHINGS e SHIPWAY, 2017; RICE, NOWOTNY e HAYNE, 1989).

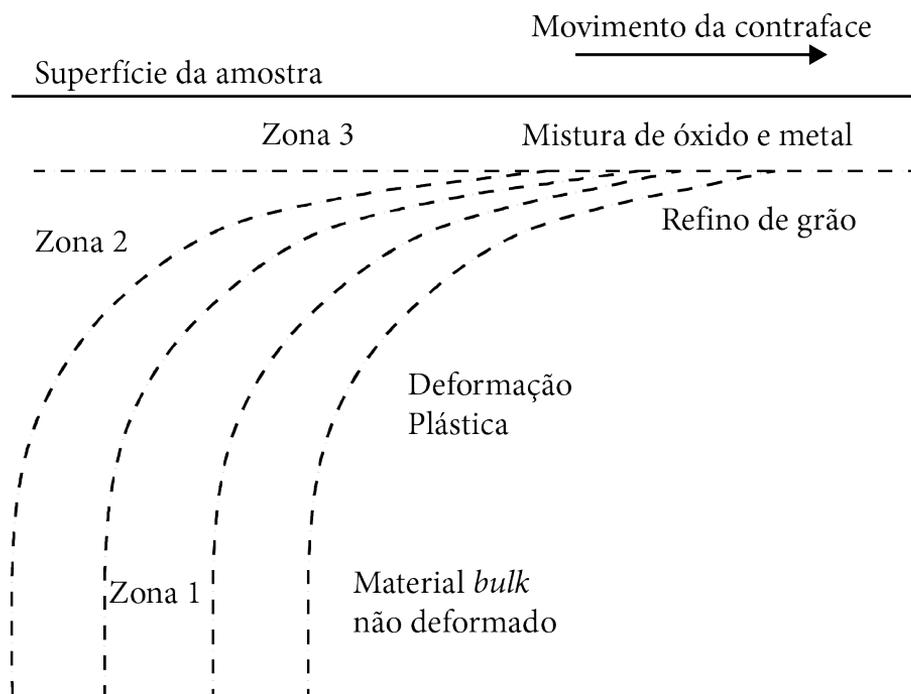


Figura 8.5 – Representação esquemática da transformação microestrutural na TTZ. (RICE, NOWOTNY e HAYNE, 1989)

8.6 PROPRIEDADES IMPORTANTES PARA MANCAIS DE DESLIZAMENTO

No que diz respeito à aplicação em mancais de deslizamento, considerando um tempo de vida adequado e a complexidade dos contatos entre superfícies, é importante que os materiais selecionados apresentem propriedades mecânicas que confirmem resistência satisfatória aos mecanismos simultâneos de desgaste do sistema, entre eles fadiga superficial, abrasivo, adesivo, erosivo e corrosão. Além disso, esses efeitos podem ser intensificados pelas condições de operação do sistema, como a intensidade das cargas específicas, presença de cargas cíclicas, velocidade de deslizamento, temperatura do sistema, acabamento da superfície do eixo, alinhamento mecânico e rigidez do conjunto (KINGSBURY, 1990; NON-FERROUS FOUNDERS' SOCIETY, 1997).

É importante destacar que é possível prolongar a vida de um mancal de deslizamento em serviço por meio do controle dos mecanismos de desgaste, o que é favorecido com a aplicação de materiais que possuam algumas características e propriedades mecânicas importantes. As principais são mostradas na Tabela 8.3 e relacionadas ao respectivo mecanismo de desgaste de maior efetividade (KINGSBURY, 1990).

A maioria dos eixos utilizados em máquinas (ou equipamentos) é fabricada com aços. A *compatibilidade* é uma característica superficial importante para a liga empregada na bucha de um mancal de deslizamento e é diretamente relacionada com o coeficiente de atrito (μ), cuja intensidade auxilia na avaliação da resistência à adesão superficial excessiva durante a interação de superfícies entre o aço do eixo e o material do mancal (KINGSBURY, 1990; CDA, 1992).

Diante da dificuldade em manter uma perfeita limpeza do lubrificante de um mancal de deslizamento durante toda a sua vida em serviço, é necessário que o material empregado na bucha seja capaz de permitir a incorporação de debris gerados durante o processo de deslizamento. Essa propriedade é conhecida como *embutibilidade* e é dependente das características superficiais e subsuperficiais, porém também fortemente relacionada às propriedades de *bulk* de resistência mecânica e dureza (KINGSBURY, 1990; CDA, 1992).

Tabela 8.3 – Influência das principais propriedades do mancal de deslizamento com os mecanismos de desgaste controláveis (KINGSBURY, 1990)

Característica/propriedade do material do mancal	Mecanismo de desgaste a ser controlado	Prováveis causas
Compatibilidade	Desgaste adesivo	Contato entre as asperezas Rugosidade superficial Filme de óleo inadequado
Conformabilidade	Desgaste adesivo Desgaste superficial por fadiga	Desalinhamento Carregamento mal distribuído Falha de montagem ou de fabricação
Embutibilidade	Desgaste abrasivo Desgaste adesivo	Sujidades no óleo
Resistência à fadiga	Desgaste superficial por fadiga	Cargas dinâmicas excessivas Sobrecarga localizada
Dureza	Deformação plástica Desgaste erosivo	Sobreaquecimento Carga excessiva
Resistência à corrosão	Desgaste por corrosão	Deterioração do lubrificante por sobreaquecimento Contaminação do lubrificante por água ou outros fluidos corrosivos

A importância de o material da bucha para mancal apresentar boa *conformabilidade* está no reconhecimento da existência de desalinhamentos entre o eixo e os mancais, bem como das irregularidades no apoio e distribuição das cargas. Dessa forma, é comum que os materiais permitam ser suavemente conformados ou desgastados para compensar essa condição. É uma característica diretamente dependente das características superficiais e subsuperficiais, mas também relacionada às propriedades de *bulk* de resistência mecânica e dureza (KINGSBURY, 1990; CDA, 1992).

A *resistência à fadiga* tem relação diretamente proporcional com a resistência ao escoamento do material de *bulk* e naturalmente com a capacidade de carga admissível do conjunto considerado. A *dureza*, dependente das propriedades de *bulk*, também tem papel importante na determinação do coeficiente de desgaste do sistema. A *resistência à corrosão* influencia na vida do sistema, principalmente em aplicações com situações ambientais críticas, como equipamentos expostos por longos períodos a intempéries (KINGSBURY, 1990; GLAESER, 1992; CDA, 1992).

8.7 CARACTERÍSTICAS MICROESTRUTURAIS IMPORTANTES PARA MANCAIS

As propriedades mecânicas e tribológicas citadas até o momento dependem, de forma direta, das características microestruturais, como quantidade, fração volumétrica, distribuição, tamanho e morfologia, bem como das propriedades de cada uma das fases presentes (KINGSBURY, 1990; CDA, 1992).

Tal importância é mais evidente ao perceber que, com exceção das ligas de prata, todos os materiais comerciais utilizados para esse tipo de aplicação são formados por mais de uma fase, evidenciando a necessidade de um estudo microestrutural mais detalhado. As microestruturas para essa finalidade podem ser classificadas nos seguintes grupos específicos: tipo I, tipo II e tipo III. (KINGSBURY, 1990; CDA, 1992)

A *microestrutura tipo I* (Figura 8.6) é composta por uma matriz de baixa dureza com precipitados duros dispersamente distribuídos. A presença de precipitados aumenta efetivamente a resistência mecânica da peça, com pequena influência nas características de compatibilidade, conformabilidade e embutibilidade (KINGSBURY, 1990; GLAESER, 1992).

Matriz de baixa dureza

Precipitados de maior dureza relativa

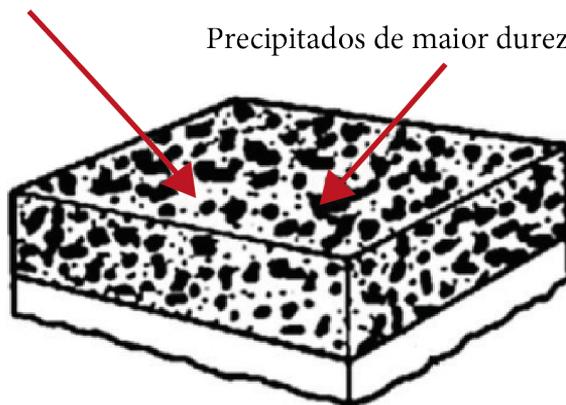


Figura 8.6 – Microestrutura tipo I. (KINGSBURY, 1990)

A *microestrutura tipo II* (Figura 8.7) é formada por duas fases (bifásica), sendo uma com dureza moderada e outra de menor dureza relativa, dispostas de forma intertravada. Em geral, a fase de menor dureza contribui com a compatibilidade, enquanto a conformabilidade, a embutibilidade, a dureza e as propriedades mecânicas são compostas por valores intermediários entre as duas fases (KINGSBURY, 1990; GLAESER, 1992).

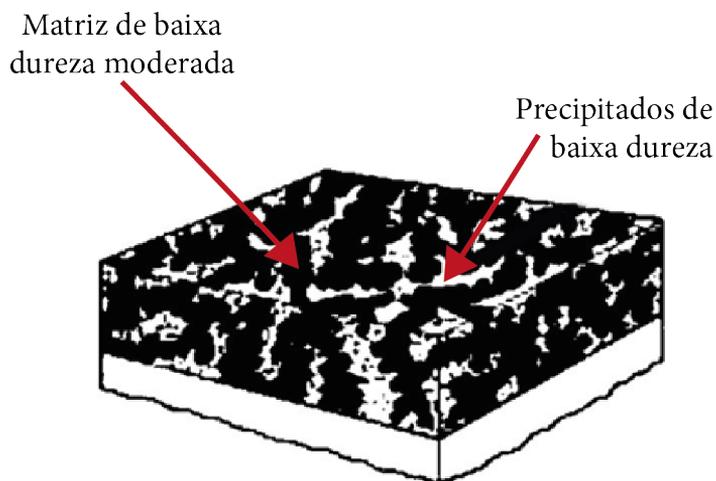


Figura 8.7 – Microestrutura tipo II. (KINGSBURY, 1990)

A *microestrutura tipo III* (Figura 8.8) é composta por uma matriz de elevada resistência mecânica com precipitados de baixa dureza dispersos. A conformabilidade, a embutibilidade, a resistência mecânica e a dureza são definidas pela resistência mecânica da matriz. A compatibilidade é melhorada pelo material de baixa dureza que está exposto na superfície de contato (KINGSBURY, 1990; GLAESER, 1992).

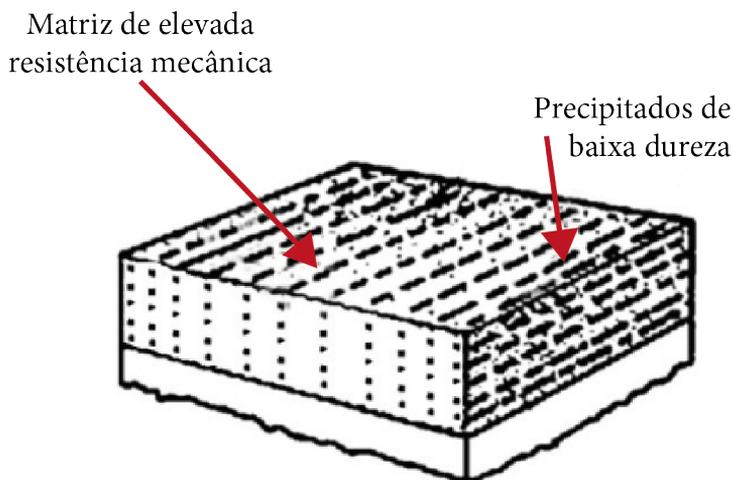


Figura 8.8 – Microestrutura tipo III. (KINGSBURY, 1990)

8.8 LIGAS DE COBRE PARA BUCHAS DE MANCAIS DE DESLIZAMENTO

De forma geral, as ligas de cobre constituem uma escolha adequada para projetos que envolvam aplicações com exigência de bom comportamento em condições de contato entre componentes ou peças. A Figura 8.9 mostra importantes elementos de liga que incrementam a resistência ao desgaste nas ligas de cobre: alumínio (Al), silício (Si), estanho (Sn), prata (Ag) e cádmio (Cd).

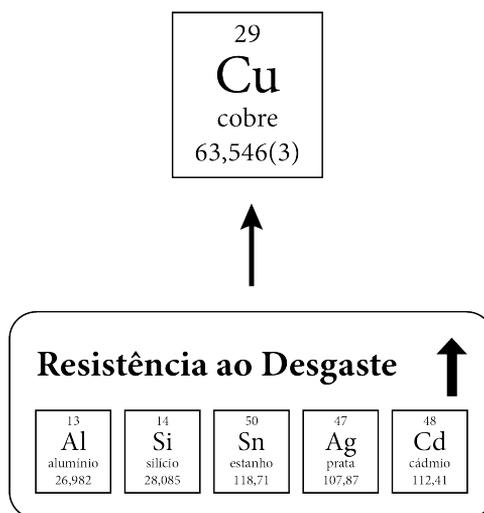


Figura 8.9 – Importantes elementos de liga que elevam a resistência ao desgaste das ligas de cobre.

De forma geral, as principais ligas de cobre para aplicações em buchas para mancais são fabricadas por fundição; em algumas situações as ligas são conformadas, o que permite a obtenção de diferentes microestruturas. Essas ligas são oriundas principalmente de seis famílias de ligas de cobre: bronzes ao estanho, bronzes ao estanho de alto chumbo, bronzes-alumínio e, em menor quantidade, bronzes-manganês, latões e ligas de alto cobre. Na Tabela 8.4, é mostrada uma comparação de propriedades importantes de ligas de cobre para aplicação em mancais de deslizamento (PRATT, 1973; CDA, 1992; NON-FERROUS FOUNDERS' SOCIETY, 1997).

Tabela 8.4 – Comparação de propriedades importantes para mancais para diversas ligas de cobre. Adaptado de Non-Ferrous Founders' Society (1997) e CDA (1992)

Família de liga	Capacidade de carga e resistência à Fadiga	Temperatura máxima de operação	Conformabilidade e embutibilidade	Compatibilidade	Dureza e resistência ao desgaste
Bronzes ao Estanho	Alto	Alto	Moderado	Moderado	Alto
Bronzes Estanho de Alto Pb	Moderado / Alto	Alto	Bom	Bom	Alto
Bronze Alumínio	Muito Alto	Muito Alto	Não adequado	Moderado	Muito Alto
Bronze Manganês	Moderado	Moderado	Não adequado	Moderado	Alto
Latões	Moderado	Moderado	Baixo	Baixo	Bom
Cobre-Berílio	Alto	Alto	Não adequado	Não adequado	Muito Alto
Cobre com Chumbo	Moderado	Alto	Muito Bom	Muito Bom	Moderado

Na sequência, são discutidos, considerando a avaliação das características microestruturais e sua influência em importantes propriedades desses materiais, os três principais grupos de ligas de cobre: bronzes ao estanho, bronzes de alumínio e bronzes ao estanho de alto chumbo.

8.8.1 BRONZES AO ESTANHO

As principais ligas de bronze ao estanho utilizadas para aplicação em buchas para mancais possuem teores de estanho de 5% a 15%, em massa, com pequenas adições de zinco. Por meio da análise do diagrama de fases Cu-Sn, mostrado na Figura 8.10 (a), observamos a baixa solubilidade do estanho à matriz de cobre. Entretanto, dependendo do método de fabricação adotado, no qual o controle das condições de equilíbrio pode ser complexo, determinadas condições indicam a possibilidade de obtenção de microestruturas monofásicas alfa (α) para concentrações de até 8% de estanho, em massa. A adição desse material promove um mecanismo de endurecimento por solução sólida na matriz de cobre, porém sem ganhos significativos de propriedades mecânicas em teores abaixo de 5%, em massa. Por outro lado, acima de 15%, a liga torna-se frágil e difícil de ser usinada (GLAESER, 1992; CDA, 1992).

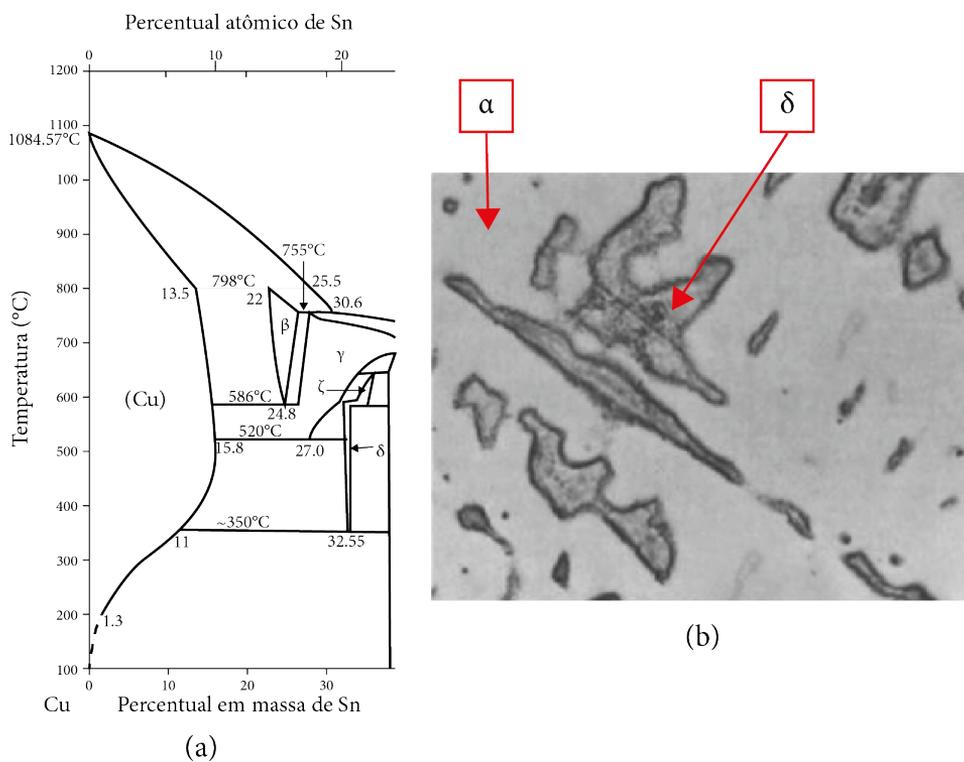


Figura 8.10 – (a) Diagrama de fases do sistema Cu-Sn e (b) microestrutura típica de um bronze ao estanho. Adaptado de ASM Metals Handbook (1992) e Glaeser (1992).

De forma típica, os processos industriais de solidificação em molde ocorrem em taxas de resfriamentos maiores do que para as condições de equilíbrio previstas nos diagramas de fases, e as composições químicas com estanho superiores a 8% apresentam uma microestrutura do tipo I, com a fase α caracterizada como uma matriz de CuSn. Essa fase apresenta menor dureza relativa comparada aos precipitados dispersos de um composto intermetálico de $\text{Cu}_{31}\text{Sn}_8$ (duro), denominado de fase delta (δ). Ambas as fases estão devidamente destacadas na Figura 8.10 (b) (GLAESER, 1992; CDA, 1992).

8.8.2 BRONZES DE ALUMÍNIO

As ligas de bronze de alumínio possuem percentual de alumínio de 5% a 13%, em massa ou em peso, e são as ligas de cobre para buchas de maior resistência mecânica e complexidade microestrutural. Essas ligas são tratáveis termicamente, o que propicia alterações microestruturais e, conseqüentemente, de propriedades.

Pelo diagrama de fases do sistema cobre-alumínio, mostrado na Figura 8.11 (a), notamos que para até 8% de alumínio, em massa, a microestrutura é formada por

uma única fase α . As ligas com concentrações superiores a esse valor são sensíveis à formação de uma fase beta (β), rica em alumínio, tornando-as ligas com maior resistência mecânica e dureza. Ao se resfriar lentamente essas ligas a partir de um patamar de aquecimento de 565 °C, a fase β sofre uma transformação eutetoide, na qual se formam lamelas finamente distribuídas, contendo a fase α e uma fase frágil denominada gama dois (γ_2), ambas representadas na Figura 8.12. A fase γ_2 , apesar de auxiliar na resistência ao desgaste, costuma ser evitada, principalmente pela redução da resistência à corrosão da liga (RICHARDSON, 2016; MEIGH, 2000).

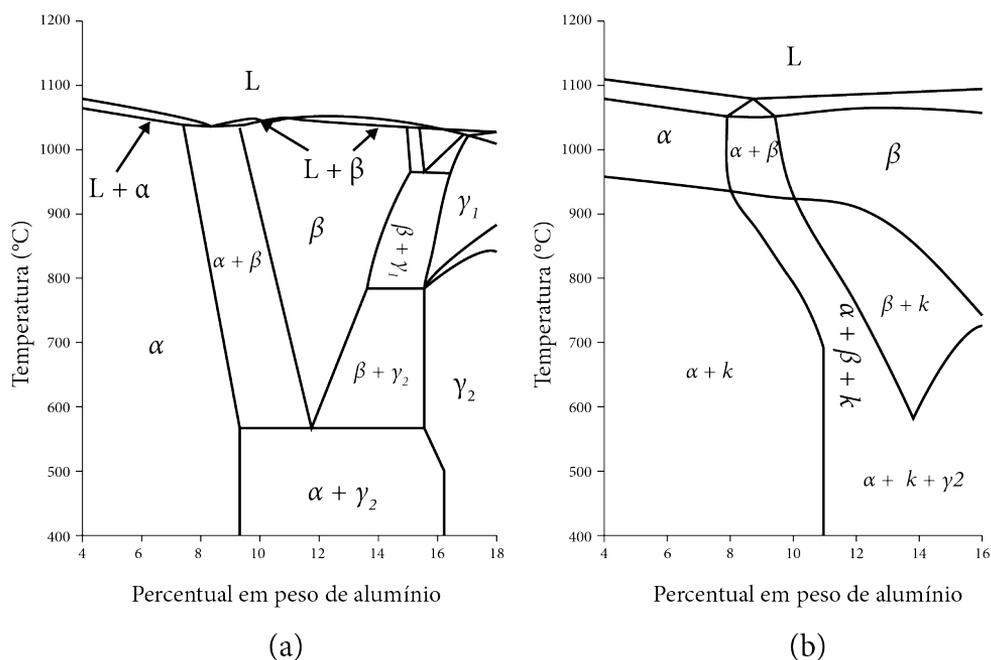


Figura 8.11 – Diagrama de fases: (a) binário do sistema Cu-Al, e (b) Cu-Al modificado com 5% de Fe e 5% de Ni. (MEIGH, 2000; RICHARDSON, 2016)

A adição de níquel e ferro ao bronze alumínio, considerando ambos a uma proporção de aproximadamente 5%, em massa, altera o equilíbrio das fases da liga. Isso está detalhado no diagrama de fases da Figura 8.11 (b), reduzindo consideravelmente a formação da fase γ_2 indesejada, que é substituída por uma fase denominada κ (kappa), mais benéfica para o comportamento mecânico da liga. As ligas de Cu-Al-Ni-Fe são chamadas comercialmente de bronze-alumínio-níquel (NAB, do inglês *Nickel Aluminum Bronze*) (MEIGH, 2000; RICHARSON, 2016).

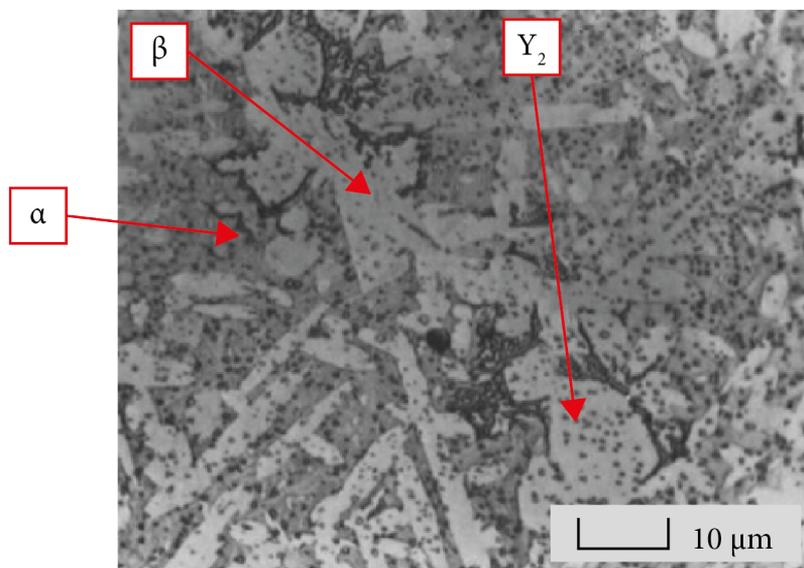


Figura 8.12 – Microestrutura de Bronze Alumínio. (GLAESER, 1992)

As ligas NAB com mais de 10% de alumínio, em massa, são passíveis de transformações martensíticas ao sofrer resfriamento rápido a partir de altas temperaturas. Em condições de têmpera, a microestrutura é formada por cristais α , β em morfologia agulhada (martensítica) e um percentual de fase κ primária. Nessa situação, a liga apresenta alta resistência mecânica, porém ductilidade muito baixa. Em função disto, é comum adotar um processo de revenimento, a uma faixa de temperaturas de 500 °C a 715 °C, para que ocorra a decomposição da fase β em α + κ eutetoide, com posterior precipitação de fases κ secundárias (MEIGH, 2000; RICHARDSON, 2016).

As fases κ secundárias são visíveis na condição polida, sem ataque metalográfico, e são numeradas de acordo com sua ordem de precipitação com a redução da temperatura. Embora existam similaridades, elas podem ser distinguidas por sua morfologia, sua localização e suas distribuição na microestrutura. Na Figura 8.13, é mostrada uma representação esquemática dessas fases (HASAN *et al.*, 1982; RICHARDSON, 2016; JAHANAFROOZ *et al.*, 1983).

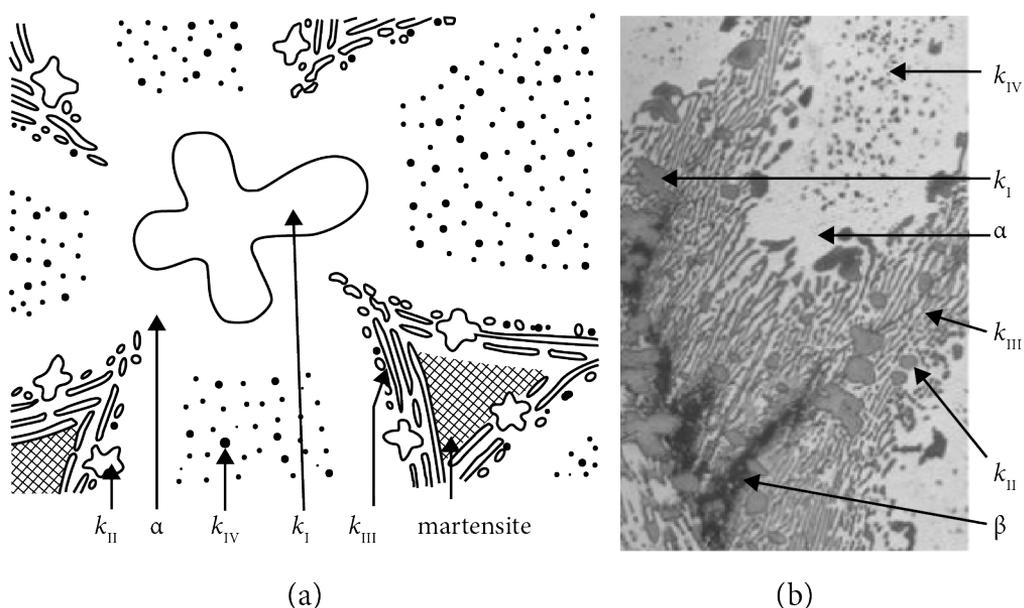


Figura 8.13 – Representação esquemática da microestrutura com as distribuições de fases em um bronze alumínio níquel, (a) adaptado de HASAN *et al.* (1982), (b) adaptado de WHARTON *et al.* (2005).

A fase κ_I apresenta formato de roseta de aspecto mais grosseiro e é rica em ferro e alumínio, na formação de Fe_3Al ou FeAl . Tem efeito adverso na ductilidade da liga e na tenacidade ao impacto, e sua quantidade pode ser reduzida mantendo o teor de ferro abaixo de 4,5%, em massa, ou assegurando uma relação níquel-ferro maior do que 1. A fase κ_{II} é caracterizada como um precipitado rico em ferro e alumínio (Fe_3Al) em forma de roseta, porém é menor e de aspecto mais esferoidizado do que κ_I . A fase κ_{III} tem característica lamelar e compreende o único precipitado rico em níquel e alumínio (NiAl), considerado o principal responsável pela alta resistência à corrosão do NAB; sua fração volumétrica é proporcional ao teor de níquel presente na liga. A fase κ_{IV} é rica em ferro e alumínio (Fe_3Al) e tem o aspecto de precipitados finamente dispersos dentro dos grãos (HASAN *et al.*, 1982; JAHANAFROOZ *et al.*, 1983; MEIGH, 2000).

Uma questão importante do tratamento térmico do NAB citado é que, de forma proporcional à decomposição da fase β , as fases κ precipitadas são formadas pela difusão do alumínio, aumentando o campo de fase α , com consequente ganho de ductilidade, porém é associado ao ganho de resistência mecânica e dureza. Esse efeito de endurecimento por precipitação controlada da fase κ também é muito vantajoso para o aumento da resistência ao desgaste para a aplicação em buchas (MEIGH, 2000; RICHARDSON, 2016).

De forma geral, as ligas de bronze alumínio apresentam elevada resistência à corrosão e capacidade de operar em maiores temperaturas, em faixas acima de 260 °C. No entanto, devido a sua alta resistência mecânica, apresentam ductilidade reduzida e consequentemente menor conformabilidade e embutibilidade. Isso demanda

cuidados específicos com o acabamento superficial, o alinhamento do conjunto e a limpeza do óleo lubrificante. Além disso, essas ligas não possuem a mesma compatibilidade que os bronzes ao estanho de alto chumbo (CDA, 1992; GLAESER, 1992).

8.8.3 BRONZES AO ESTANHO DE ALTO CHUMBO

O chumbo é adicionado aos bronzes ao estanho em valores de até 30% de concentração em massa e, devido a sua insolubilidade à matriz CuSn, observa-se a formação de uma microestrutura composta por contínuas sucessões de matriz rica em cobre com “esponjas” de chumbo. A Figura 8.14 mostra os precipitados de chumbo de baixa dureza, que aumentam significativamente a conformabilidade e a compatibilidade do material (ASM METALS HANDBOOK, 1990; CDA, 1992; EQUEY; HOURIET; MISCHLER, 2011).

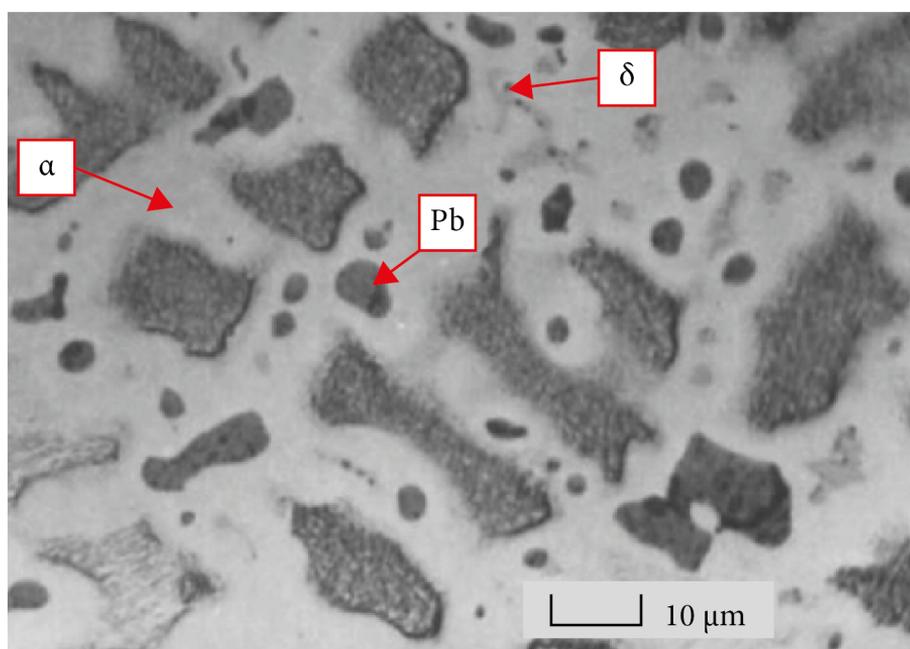


Figura 8.14 – Microestrutura típica de um bronze ao estanho com chumbo. (GLAESER, 1992)

Em sistemas com condições limítrofes de lubrificação, é comum o uso de ligas de cobre com o maior teor possível de chumbo, que produz um mecanismo de *autolubrificação*, devido à extrusão das inclusões de chumbo. Isso está evidenciado pela alteração da morfologia dos precipitados mais claros da Figura 8.15 (ASM METALS HANDBOOK, 1990; CDA, 1992; EQUEY; HOURIET; MISCHLER, 2011; DE GEE; VAESSEN; BEGELINGER, 1969).

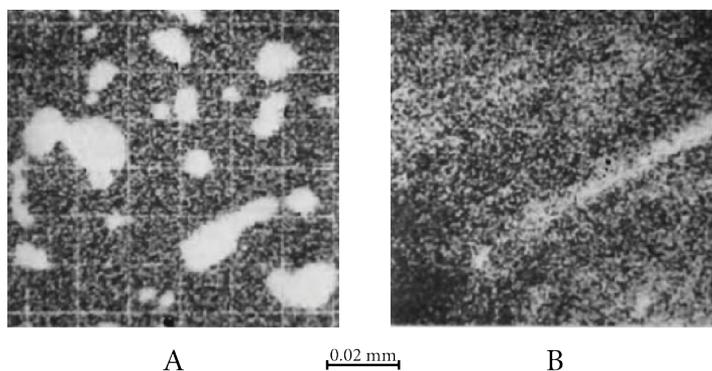


Figura 8.15 – Imagem de raios X da superfície de uma liga CuSn6Pb10 antes (A) e depois (B) de um experimento de desgaste por deslizamento. (DE GEE; VAESSEN; BEGELINGER, 1969)

Em função das vantagens anteriormente citadas, a adição de chumbo aos materiais para mancais tem sido uma solução tecnológica extensivamente utilizada. No entanto, o chumbo é um metal pesado, com conhecidas restrições à saúde humana, e, em função da sua toxicidade, são despendidos esforços para a redução sistemática do uso deste elemento.

8.9 ENSAIOS DE DESGASTE

A *dureza* é a propriedade mecânica característica de um material sólido de resistir à penetração, ao desgaste e às deformações permanentes. É comum adotar os valores de dureza como parâmetro de resistência ao desgaste de componentes ou peças, mas a forma mais adequada de analisar o comportamento tribológico dos materiais é por meio dos ensaios de desgaste.

É importante destacar que caracterizações mecânicas de tribossistemas (ou sistemas tribológicos) são essenciais para avaliar o desempenho das superfícies de materiais, visando a validação de propriedades da superfície de um material, bem como a evolução e o desenvolvimento de materiais que suportem condições de trabalho requeridas. O equipamento utilizado para análise tribológica de materiais é denominado tribômetro.

O *método microabrasivo de esfera rotativa (Ball Cratering)* e o *ensaio de desgaste disco-contra-disco* são dois tipos de testes (ou ensaios) adotados para análise de desgaste de materiais. O método microabrasivo de esfera rotativa (Figura 8.16) é um tipo de ensaio de desgaste no qual uma pasta abrasiva é inserida entre uma esfera e um corpo de prova (ou amostra). A esfera é forçada contra o corpo em forças normais que variam de 0,1 a 5 N, e as dimensões da cratera gerada são utilizadas como análise do nível de desgaste, sendo normalmente denominadas crateras de desgaste.

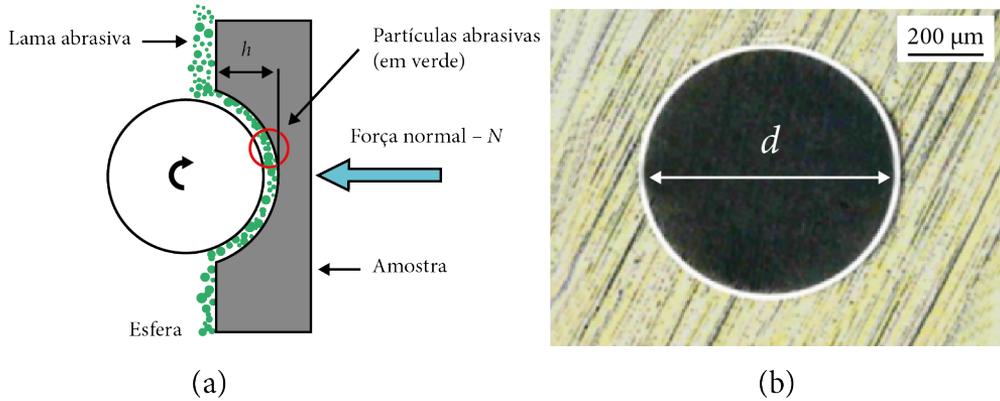


Figura 8.16 – (a) Princípio do ensaio de desgaste microabrasivo por espera rotativa e (b) cratera de desgaste, com indicação do diâmetro d .

O ensaio de desgaste disco-contra-disco é realizado em uma máquina de desgaste por rolamento/deslizamento, que possui uma configuração disco-contra-disco e simula a fadiga de contato por rolamento com deslizamento. O sistema de operação da máquina é automático, e, após iniciado o ensaio, um *software* faz o monitoramento e controle dos dados obtidos pelos sensores. A máquina possui um sistema de segurança que interrompe o funcionamento do ensaio quando as variáveis de controle extrapolam os limites estipulados. Os parâmetros controlados são a rotação do eixo superior e inferior independentes e a carga aplicada. As regiões dos discos analisadas pelas diferentes técnicas são mostradas na Figura 8.17.

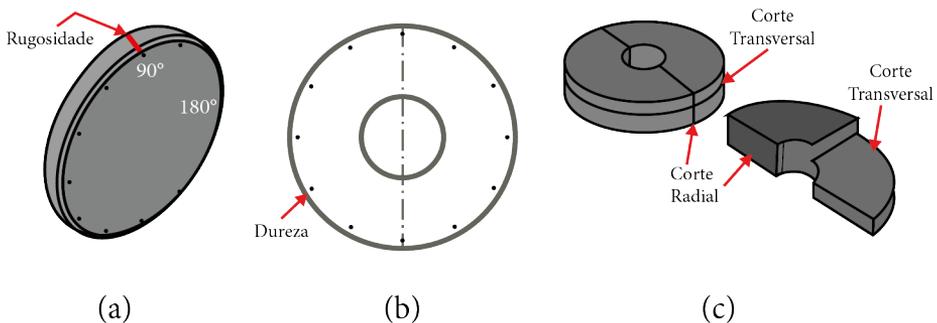


Figura 8.17 - Regiões utilizadas para análise no disco do ensaio de desgaste: (a) rugosidade superficial, perfilometria, MO e MEV, (b) dureza circunferencial na face do disco e (c) corte radial: dureza e MEV e corte transversal: MO e MEV.

Antes e depois de todos os ensaios de desgaste disco-contra-disco, os discos passam por um processo de limpeza, com lavagem com água e sabão, e posterior banho de ultrassom; finalmente, para secar, usa-se ar quente. As análises necessárias para avaliação do

desgaste e fadiga de contato por rolamento são medidas para a perda de massa, a rugosidade superficial, a perfilometria óptica, a microdureza circunferencial e radial, a microscopia óptica (MO) e a microscopia eletrônica de varredura (MEV) da superfície e subsuperfície (radial e transversal), que avaliam a nucleação e a propagação das trincas.

Outros importantes ensaios de desgaste são *pino sobre disco* (*pin on disc*), um tribômetro capaz de mensurar grandezas físicas como a força normal, a força de atrito, a temperatura, a distância e a velocidade de deslizamento; e *reciprocating wear*, teste no qual o desgaste progride pela aração de uma esfera em contato com superfície da amostra.

REFERÊNCIAS

ASHBY, M. F. **Materiais**: engenharia, ciência, processamento e projeto. Rio de Janeiro: Elsevier, 2012.

ASM METALS HANDBOOK. **Friction, lubrication and wear technology** (v. 18). [S.I.]: ASM Internacional, 1990.

ASM METALS HANDBOOK. **Properties and selection: Nonferrous alloy and special-purpose materials** (v. 2). [S.I.]: ASM International, 1990.

ASM METALS HANDBOOK. **Alloy phase diagrams** (v. 3). [S.I.]: ASM Internacional, 1992.

ASTM B150/B150M. **Standard specification for aluminum bronze rod, bar, and shapes**. West Conshohocken: ASTM International, 2019.

ASTM B505 / B505M. **Standard specification for copper alloy continuous castings**. West Conshohocken: ASTM International, 2018.

ASTM E3. **Standard guide for preparation of metallographic specimens**. West Conshohocken: ASTM International, 2011.

ASTM E92. **Standard test method for vickers hardness of metallic materials**. West Conshohocken: ASTM International, 2003.

BAIMING, C.; QINLING, B.; JUN, Y.; YANGIU, X.; JINGCHENG, H. Tribological properties of solid lubricants (graphite, h-BN) for Cu- based P/M friction composites. **Tribology International**, v. 41, p. 1145-1152, 2008.

BILLINGS, S. A.; ZHENG, G. L. Radial basis function networks configurations using genetic algorithms. **Neural Networks**, v. 8, p. 877, 1995.

BOIDI, G.; FUKUMASU, N. K.; MACHADO, I. F. Wear and friction performance under lubricated reciprocating tests of steel powder mixtures sintered by Spark Plasma Sintering. **Tribology International**, v. 121, p. 139-147, 2018.

BOSE, A. Bootstrap in moving average models. **Annals of Institute of Statistical Mathematics**, v. 42, p. 756-768, 1990.

BS EN 12163. **Copper and copper alloys**. Rod for general purposes, 2016.

CALLISTER JR., W. D.; RETHWISCH, D. G. **Fundamentos da ciência e engenharia de materiais**: uma abordagem integrada. 4. ed. Rio de Janeiro: LTC, 2014.

CDA. **Cost-effective manufacturing**: copper alloy bearings. Hempstead: Copper Development Association, 1992.

DE GEE, A. W. J.; VAESSEN, G. H. G.; BEGELINGER, A. The influence of composition and structure on the sliding wear of copper-tin-lead alloys. **ASLE Transactions**, v. 12, p. 44-54, 1969.

EQUEY, S.; HOURIET, A.; MISCHLER, S. Wear and frictional mechanisms of copper-based bearing alloys. **Wear**, v. 273, p. 9-16, 2011. Doi: 10.1016/j.wear.2011.03.030.

FURLAN, K. P.; MELLO, J. D. B.; KLEIN, A. N. Self-lubricating composites containing MoS₂: A review. **Tribology International**, v. 120, p. 280-298, 2018.

GLAESER, W. A. **Materials for tribology** (v. 20). Amsterdã: Elsevier Science Publishers, 1992.

HASAN, F.; JAHANAFROOZ, A.; LORIMER, G. W.; RIDLEY, N. The morphology, crystallography, and chemistry of phases in as-cast nickel-aluminum bronze. **Metalurgical Transactions A**, v. 13A, p. 1982-1337, 1982.

HUTCHINGS, I.; SHIPWAY, P. **Tribology: friction and wear of engineering**. 2. ed. Oxford: Butterworth-Heinemann, 2017.

JAHANAFROOZ, A.; HASAN, F.; LORIMER, G. W.; RIDLEY, N. Microstructural development in complex nickel-aluminum bronzes. **Metalurgical Transactions A**, v. 14A, p. 1951-1956, 1983.

KAYABA, T.; KATO, K. Theoretical Representation of the coefficient of friction for multiple contact points. **Wear**, v. 52, p. 117-132, 1979.

KINGSBURY, G. R. **Friction and wear of sliding bearing materials**. [S.I.]: ASM International, 1990.

LIM, S. C.; ASHBY, M. F. Wear-mechanism maps. **Acta metall.**, v. 35, p. 1-24, 1987.

MAHANTA, S.; CHANDRASEKARAN, M.; SAMANTA, S.; ARUNACHALAM, R. Multi-response ANN modelling and analysis on sliding wear behavior of Al7075/B4C/fly ash hybrid nanocomposites. **Mater. Res. Express**, v. 6, p. 1-18, 2019.

MEIGH, H. J. **Cast and wrought aluminum bronzes properties, processes and structure**. Hants: CRC Press, 2000.

NEIKOV, O. D.; NABOYCHENKO, S. S.; DOWSON, G. **Handbook of non-ferrous metal powders**: Technologies and Applications. Oxford: Elsevier, 2009.

RICE, S. L.; NOWOTNY, H.; HAYNE, S. F. A survey of the development of subsurface zones in the wear of materials. **Key Engineering Materials**, v. 33, p. 77- 100, 1989.

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

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

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

SHANGGUAN, B.; ZHANG, Y.; XING J.; SUN L.; HU, D.; QIU M. Effects of content of mos2 on sliding tribological behavior of copper- based powder metallurgy materials under electrical current. **Proceedings of CIST2008 & ITS-IFToMM2008**, p. 239-241, 2008.

SOBRE OS AUTORES

LUIZ HENRIQUE CAVEAGNA

Graduado em Produção Industrial e pós-graduado em Gestão Empresarial, atua, há 41 anos na indústria, área pela qual é apaixonado. Orgulha-se de ter construído toda a sua trajetória na Termomecânica São Paulo SA. Iniciou na empresa bastante jovem, em 1983, como *office boy* e foi construindo sua jornada em diversas áreas, o que proporcionou um abrangente conhecimento técnico e estratégico da operação. Atuou como gerente geral, diretor de operações até chegar à diretoria geral, posição que assumiu em 2020. Além da paixão pelos metais, principalmente cobre e suas ligas, carrega a incrível experiência de ter trabalhado com o Eng. Salvador Arena, fundador da empresa e, posteriormente com a Dra. Regina C. Venâncio, que assumiu a presidência após o seu falecimento, há 25 anos.

MÁRCIO RODRIGUES DA SILVA

Mestre em Engenharia Mecânica de Projeto e Fabricação pela Escola Politécnica da Universidade de São Paulo (USP), graduado em Engenharia Mecânica, pelo Centro Universitário da FEI (2009). Atua na Termomecânica São Paulo SA desde 2004 e, atualmente exerce a função de gerente de pesquisa e desenvolvimento e laboratórios do Centro de Pesquisas, Desenvolvimento e Ensaio da Termomecânica São Paulo AS. Possui experiência em processos de fundição, conformação mecânica, usinagem, metalurgia do pó, tribologia e caracterização de materiais não ferrosos. É coordenador pedagógico dos cursos Técnicos em Mecânica e Informática do Colégio Engenheiro Salvador Arena e docente do curso de Engenharia da Computação da Faculdade Engenheiro Salvador Arena, ministrando disciplinas na área de Ciência dos Materiais, Ensaio dos Materiais, Mecânica dos Sólidos, Cálculo Numérico e Física. É autor e coautor de diversos artigos científicos e capítulos de livros que abordam aprofundamentos técnicos e desenvolvimentos de ligas de cobre.

VINICIUS TORRES DOS SANTOS

Doutor em Engenharia de Materiais pela Universidade Presbiteriana Mackenzie, Mestre em Engenharia Mecânica pelo Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de São Paulo, com pós-graduação em Processos Metalúrgicos de Fabricação pela Universidade Presbiteriana Mackenzie (UPM) e graduado em Engenharia de Processos de Produção pelo Centro Universitário de Santo André. Desde 2004 faz parte do grupo de colaboradores da Termomecânica São Paulo S.A., onde atualmente exerce a função de Engenheiro Sênior de Pesquisa e Desenvolvimento no Centro de Pesquisas, Desenvolvimento e Ensaios da Termomecânica, atuando diretamente em projetos tecnológicos de inovação relacionados ao desenvolvimento de novas ligas metálicas de cobre nos processos de fundição, conformação mecânica e caracterizações das ligas de Cobre. Atuou como docente no Centro Educacional da Fundação Salvador Arena entre os anos de 2016 e 2022 ministrando as disciplinas de Ciências dos Materiais, Processos de Fabricação Mecânica, Ensaios dos Materiais e Elementos de Máquinas no curso Técnico em Metalurgia e no curso Técnico em Mecânica. É autor e coautor de diversos artigos científicos e capítulos de livros que abordam aprofundamentos técnicos e desenvolvimentos de ligas de cobre.

GIVANILDO ALVES DOS SANTOS

Livre-docente em Engenharia Mecânica pela Escola Politécnica da Universidade de São Paulo (EPUSP), doutor e mestre em Engenharia Aeronáutica e Mecânica pelo Instituto Tecnológico de Aeronáutica (ITA), com pós-doutorado em Ciência e Tecnologia dos Materiais pelo Instituto de Pesquisas Energéticas e Nucleares (IPEN), especialista em Gestão Pública pela Universidade Católica Dom Bosco (UCDB), graduado em Engenharia de Produção pela Universidade Virtual de São Paulo (UNIVESP), com formação específica em Fundamentos de Tecnologia e Ciências Exatas pela Universidade Virtual de São Paulo (UNIVESP), graduado em Tecnologia Mecânica, modalidade processos de produção, pela Faculdade de Tecnologia de São Paulo (Fatec - SP), com Formação Pedagógica em Mecânica pelo Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de São Paulo (IFSP - Campus São Paulo) e formação técnica em Mecânica pelo Serviço Nacional de Aprendizagem Industrial (Senai - SP). Na área de mecânica, desenvolveu atividades técnicas em montadora multinacional e foi professor e coordenador de curso na Faculdade de Tecnologia da Zona Leste (Fatec). Atualmente, no Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de São Paulo (IFSP), é professor do Departamento de Mecânica, de cursos técnicos, tecnológicos, de engenharia e do programa de pós-graduação em Engenharia Mecânica, área de concentração: materiais e processos de fabricação, na qual é coordenador de pesquisas. É autor de artigos e outros trabalhos técnicos e científicos relacionados à tecnologia do cobre e suas ligas.

O cobre, um dos metais mais antigos conhecidos pela humanidade, é utilizado há mais de 10 mil anos para criar soluções que mudaram o curso da história. Nobre e de cor quente e brilhante, ele fascina pelo seu poder – afinal, sem o cobre, o mundo como conhecemos hoje não existiria.

Sua versatilidade e características ímpares foram decisivas para o desenvolvimento da tecnologia moderna e a construção da sociedade globalizada. Além de ser um excepcional condutor de energia graças à sua maleabilidade, o cobre é utilizado para criar uma infinidade de objetos, artefatos, ferramentas, utensílios domésticos e até joias e peças de arte.

Sua mais importante contribuição, no entanto, está ligada à indústria. Todos os sistemas de produção mundial utilizam o cobre, incluindo os setores de construção civil, de eletricidade e de refrigeração, além das indústrias naval, aeroespacial, de petróleo, de máquinas e de equipamentos. Nesta obra, trazemos uma rica jornada pelo universo do cobre e da tecnologia envolvida em sua obtenção. Ao longo do conteúdo, você aprenderá sobre a produção desse valioso metal, sua história, curiosidades, características e aplicações técnicas.

