

## 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<sup>-1</sup>) 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  $v_c = \pi \cdot d \cdot n / 1.000$ , 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:  $v_c = 130$  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  $v_c$ , temos:

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

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

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

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

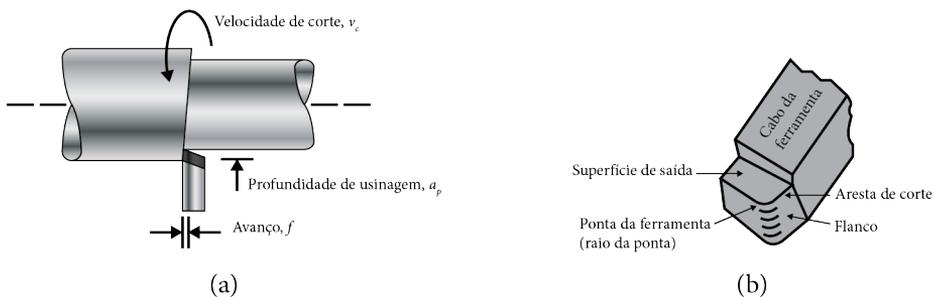
Resposta:

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).

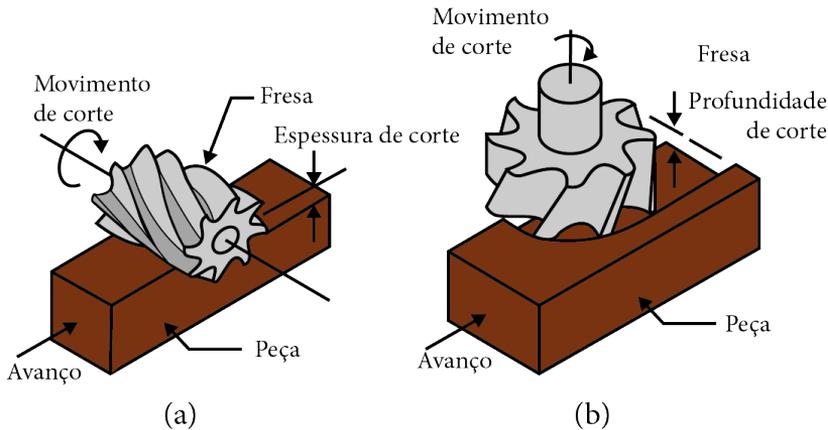


Figura 4.2 – Fresamento: (a) tangencial (horizontal) e (b) frontal (vertical).

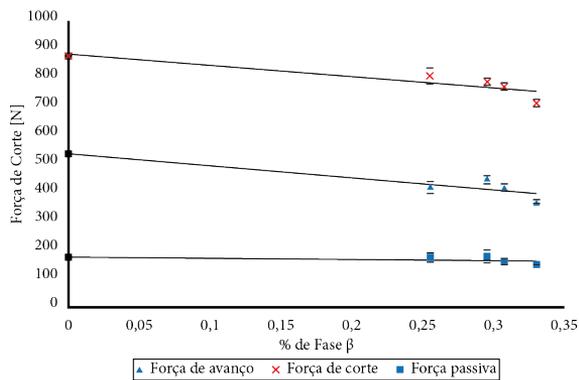
A usinagem no fresamento pode ser concordante ou discordante. No *fresamento concordante*, a direção da passagem do dente da ferramenta de corte pela peça coincide com a direção do avanço quando o dente corta a peça, ocorrendo a espessura máxima do cavaco no início do corte. No *fresamento discordante*, 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.

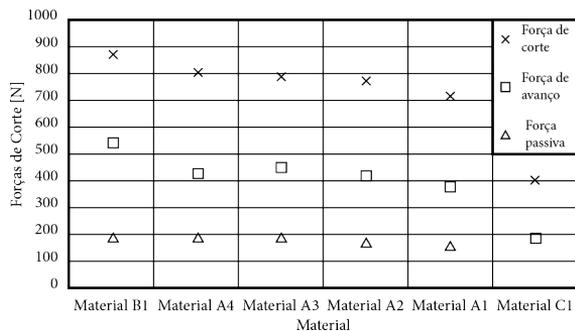
Silva (2015) desenvolveu um estudo sobre a usinagem de ligas de cobre sem chumbo de relevante importância comercial. De forma específica, analisou o efeito da microestrutura na liga 60/40 (latão) isenta de chumbo, com quatro diferentes frações volumétricas e morfologias de fase  $\beta$ , em termos de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

**Tabela 4.1** – Fração de fase  $\beta$  e propriedades mecânicas das ligas de cobre estudadas. Adaptado de Silva (2015)

Grupo	Liga	Fração de fase $\beta$ (%)	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)



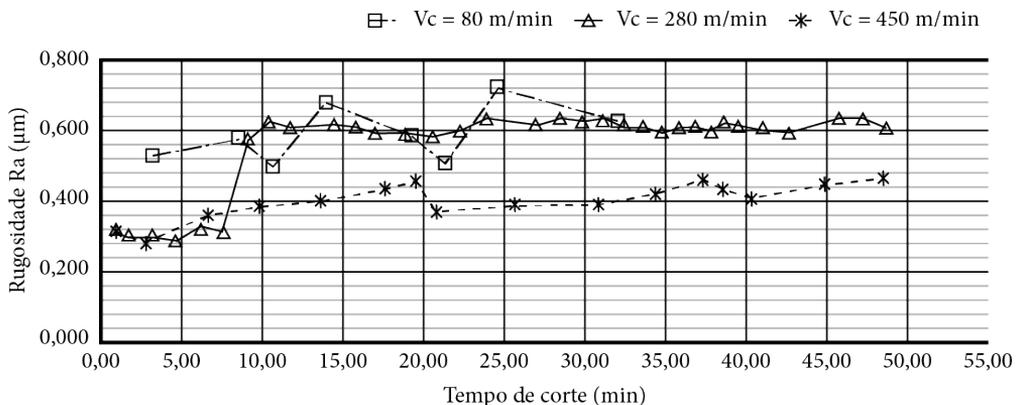
(b)

**Figura 4.3** – (a) Influência da fase  $\beta$  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  $\beta$  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  $\beta$ , 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  $\mu m$ .

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.

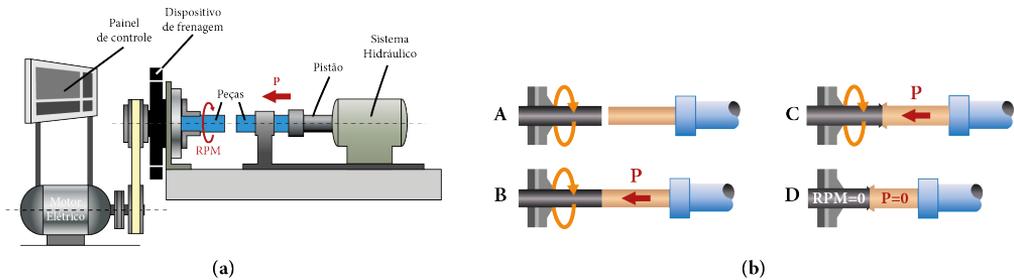
A *soldagem por oxigás* (OFW, do inglês *Oxyfuel Gas Welding*) consiste no processo de soldagem por fusão realizada por meio da queima de vários combustíveis misturados com oxigênio. O gás oxicombustível também é utilizado frequentemente em maçaricos para cortar e separar placas metálicas e outras peças. 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

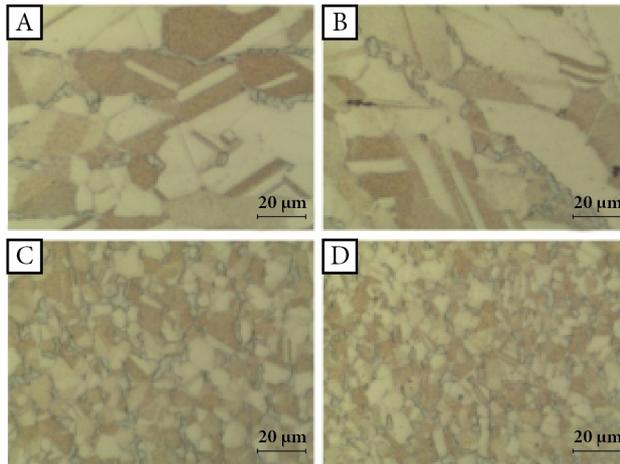
Na Figura 4.7, é mostrada a disposição dos seis corpos de prova soldados, em sequência crescente da esquerda para a direita. Dos seis experimentos realizados, notou-se que E1 apresentou boa soldabilidade, porém, pela rebarba gerada da conformação mecânica, apresentou também uma perda muito grande de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

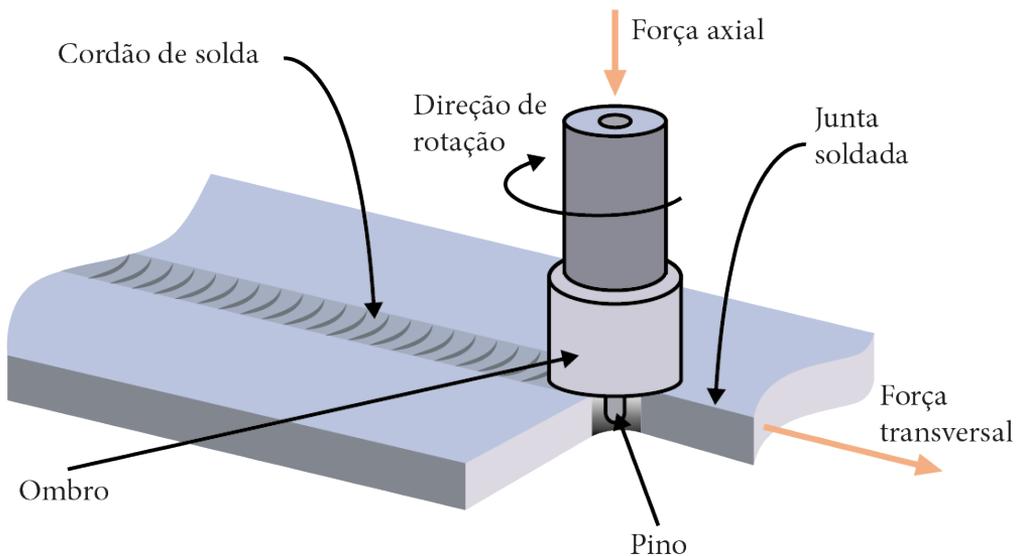
De acordo com as aferições realizadas, nenhum dos valores de dureza ficou abaixo do mínimo estabelecido por norma, sendo observada uma dureza média de 89,4 HRB, o que comprova a diminuição do grão e aumento da dureza em relação à dureza do metal na condição de fornecimento, que é 86,5 HRB.

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).

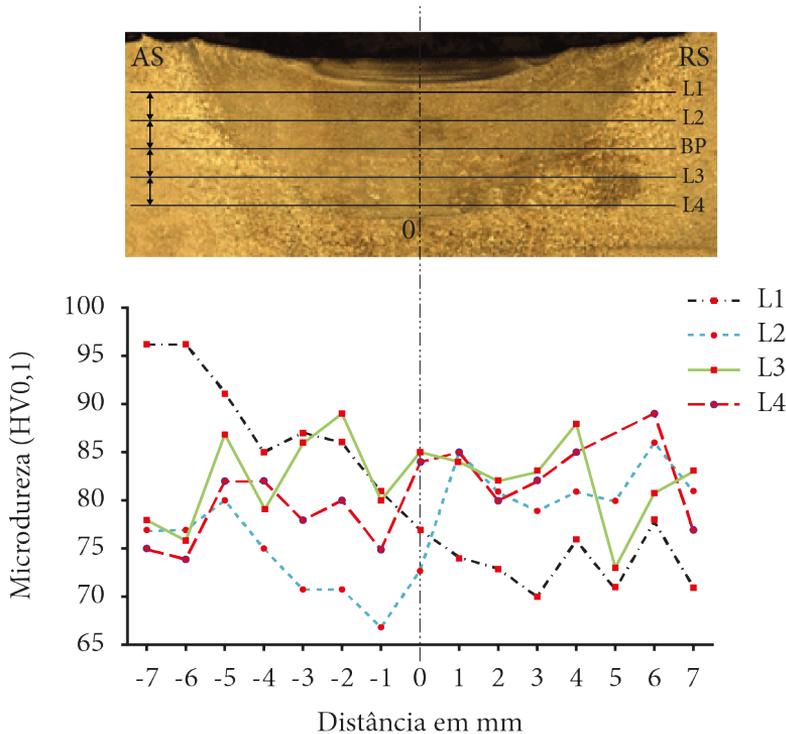
A ferramenta rotativa é escalonada, consistindo em uma base (“ombro” cilíndrico) e um pequeno pino central projetado abaixo do ombro, como mostrado na Figura 4.9. Durante o processo FSW, a base entra em atrito com as superfícies de topo das duas peças, desenvolvendo uma grande parte do calor de atrito, 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

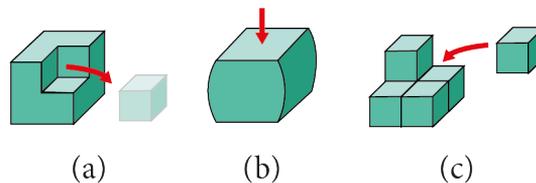
ação capilar do metal de adição e, geralmente, utiliza-se um fluxo para evitar a oxidação e auxiliar na remoção de óxidos quando formados para, assim, reduzir a fumaça. Exemplos de metais de adição usados na brasagem são cobre para aço doce e ligas de cobre (latões e bronzes) para cobre.

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

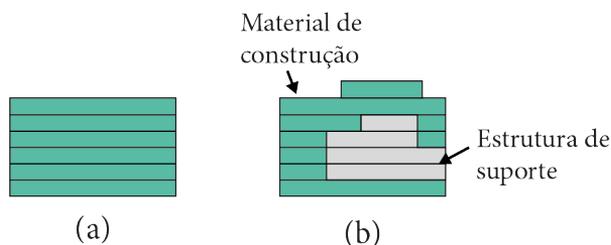
Em processos de fabricação de produtos, é comum se deparar com a manufatura subtrativa, na qual se utilizam os processos de usinagem tradicionais e não tradicionais para a remoção de materiais e, dessa forma, obter as dimensões e qualidade superficial desejadas nas peças ou componentes. Nesta seção, 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).

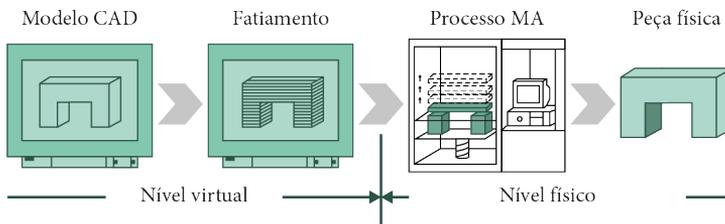
A norma brasileira ABNT NBR ISO/ASTM 52900:2018 baseia-se na norma ISO para definir que os processos de manufatura aditiva são classificados nas categorias descritas na Tabela 4.3.

**Tabela 4.3** – Sete categorias dos processos de manufatura aditiva

<b>Categoria</b>	<b>Descrição</b>
<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.

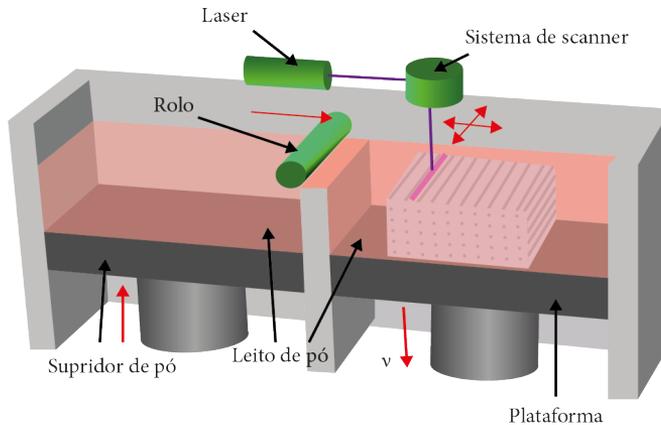
A SL por *processamento de luz digital* em manufatura aditiva (DLP, do inglês *Digital Light Processing*) é uma das variações da estereolitografia convencional e consiste na exposição de uma só vez da camada inteira do fotopolímero líquido a uma fonte de luz ultravioleta por meio de uma máscara, em vez 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  $\mu\text{m}$ . 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  $\beta$  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.

