

## 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.

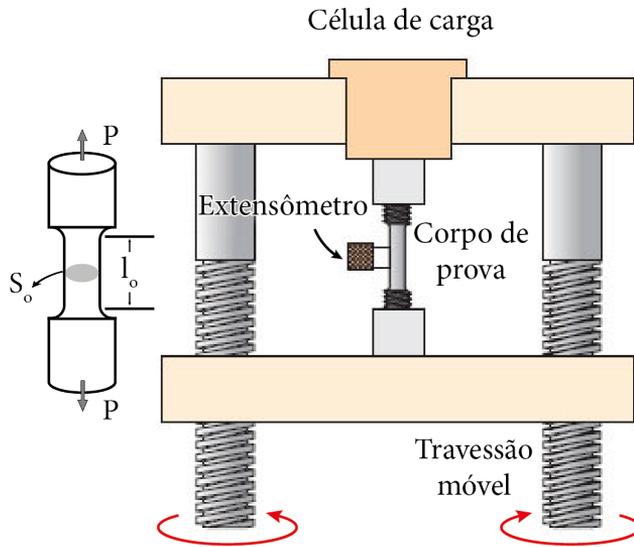
O cobre e suas ligas são materiais dúcteis, sendo, portanto, viáveis para processos de fabricação mecânica que conformam por deformação plástica e podem ser realizados em temperatura ambiente e em altas velocidades. Dessa forma, o ensaio de tração é uma ferramenta importante para determinar importantes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

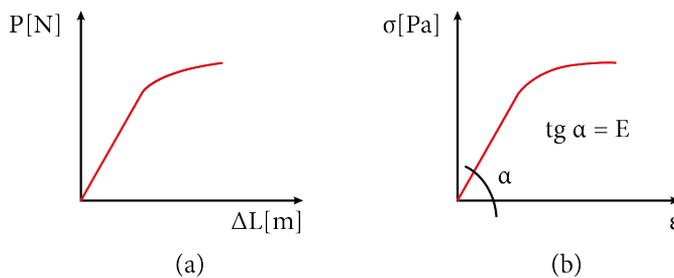
Na Figura 2.1 é apresentada uma ilustração do mecanismo utilizado para a realização do ensaio de tração, que consiste na aplicação de uma carga uniaxial crescente em um corpo de prova específico até a ruptura.



**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 ( $\Delta l$ ) 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 ( $\Delta l$ ). Os resultados de  $P \times \Delta l$  são transformados em gráficos de tensão ( $\sigma$ )  $\times$  deformação ( $\epsilon$ ) de engenharia, como podemos observar na Figura 2.2b.



**Figura 2.2** – (a) Curva carga ( $P$ )  $\times$  variação do comprimento ( $\Delta l$ ) e (b) curva tensão ( $\sigma$ )  $\times$  deformação ( $\epsilon$ ) de engenharia.

A *tensão de engenharia* ( $\sigma$ ) 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:

$\sigma$  = tensão (N/mm<sup>2</sup>);

$P$  = carga aplicada (N); e

$S_0$  = seção transversal inicial (mm<sup>2</sup>).

A *deformação de engenharia* ( $\epsilon$ ) é dada por:

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

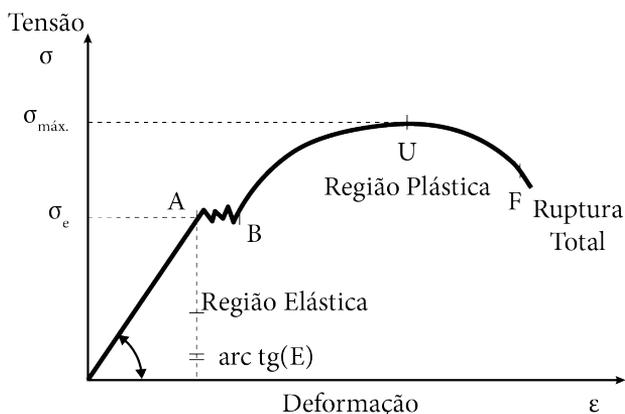
Em que:

$\epsilon$  = 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 ( $\sigma$ ) x deformação ( $\epsilon$ ) 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.

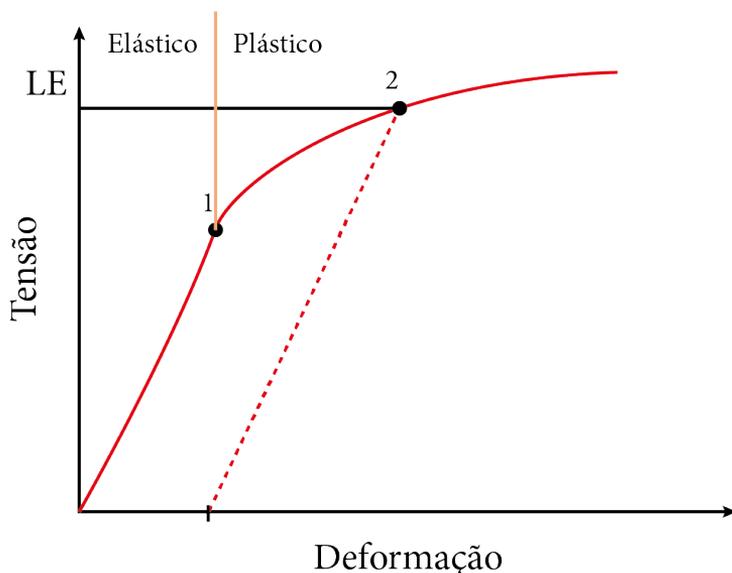
A lei de Hooke pode ser considerada válida abaixo da tensão de escoamento ( $\sigma_e$ ). A *tensão de escoamento* ou *limite de escoamento* é o nível de tensão em que a deformação plástica tem início. Abaixo desse nível, a tensão média é proporcional à deformação média, ou seja:

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

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.

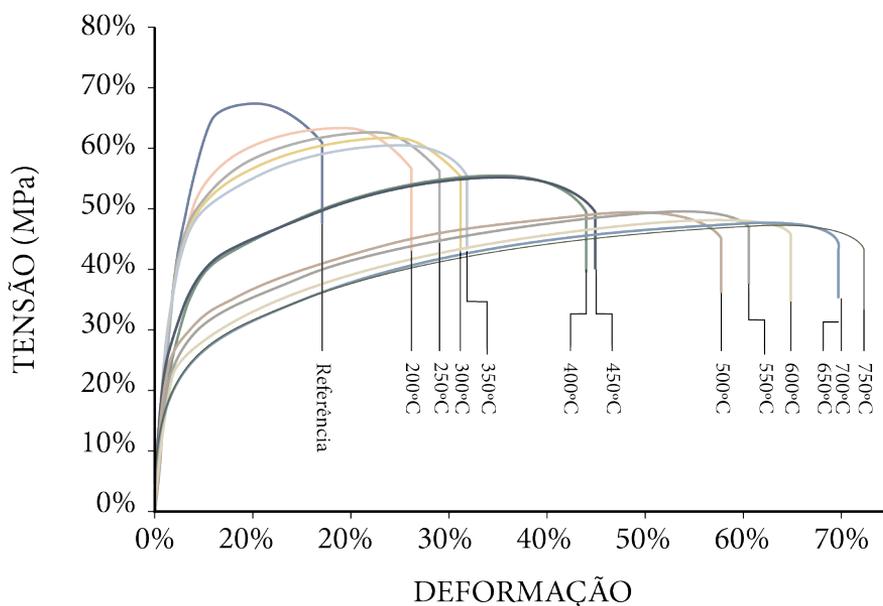
Em termos de processos por conformação mecânica, o LE e o LRT do cobre e suas ligas são informações tecnológicas muito importantes. Ambos compreendem o intervalo entre o início do escorregamento das discordâncias, determinado pelo limite de escoamento, e o início do empescoamento (estricção localizada), 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.

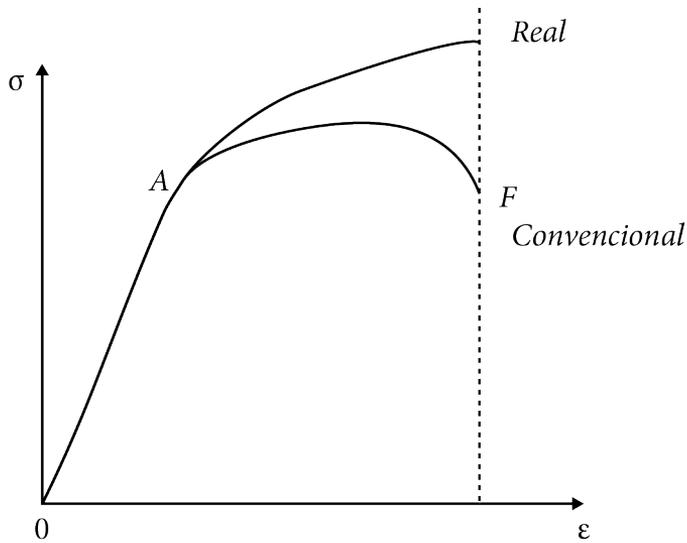
Os autores utilizaram em sua pesquisa os resultados de tensão-deformação de engenharia de treze corpos de prova, incluindo o denominado como referência, processado com 34% de trabalho a frio. Todos os corpos de prova sofreram fratura no centro do comprimento útil. Na Figura 2.5, pode-se observar o efeito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



**Figura 2.5** – Curvas tensão ( $\sigma$ ) x deformação ( $\varepsilon$ ) 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 ( $\sigma_r$ ) é dada por:

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

Em que:

P = carga (N); e

S = área da seção transversal instantânea (m<sup>2</sup>).

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 ( $\epsilon_r$ ) 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  $\varepsilon_r$  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.

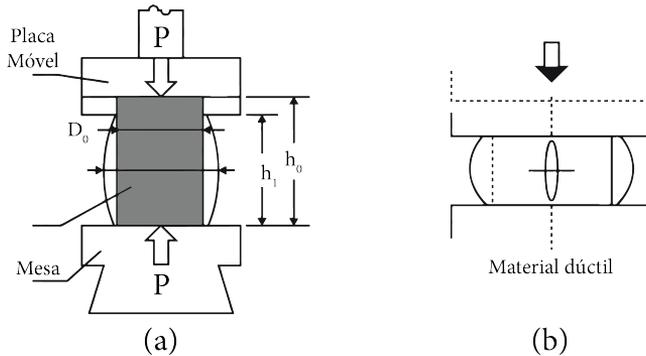


Figura 2.7 – (a) Ensaio de compressão e (b) comportamento dúctil.

A deformação de engenharia ( $\epsilon$ ) é dada por:

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

Em que:

$\epsilon$  = 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.

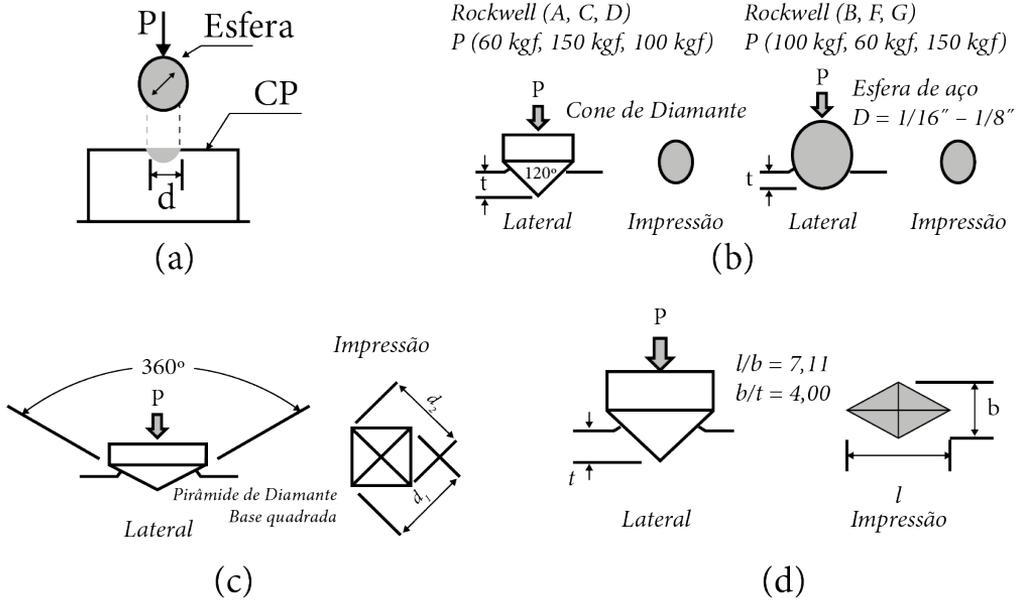


Figura 2.8 – Ensaios de dureza: (a) Brinell, (b) Rockwell, (c) Vickers e (d) Knoop.

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/mm<sup>2</sup>, mas em geral as unidades são normalmente omitidas ao expressá-lo. Multiplicando o número de dureza Brinell por

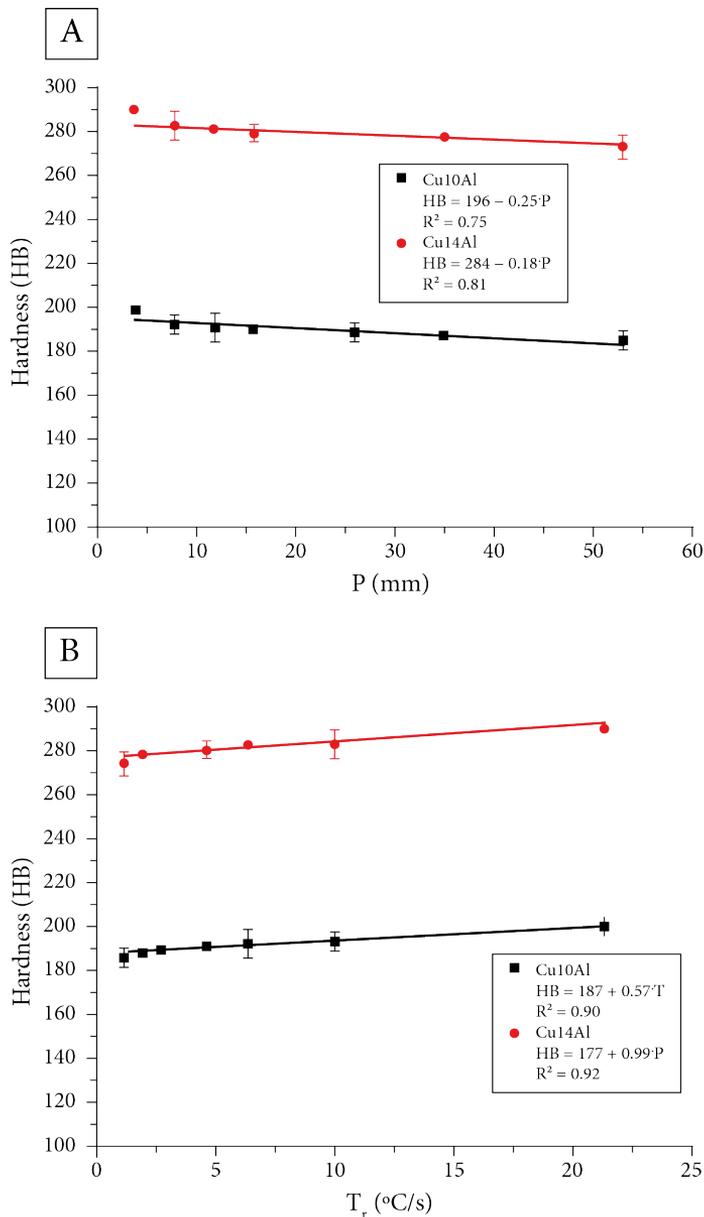
0,102, ele pode ser expresso em termos de tensão em Pa, o que permite estabelecer relação entre dureza Brinell e limite de resistência à tração (LRT, em MPa) da seguinte forma:

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

Em que  $\alpha$  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  $\alpha$  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:

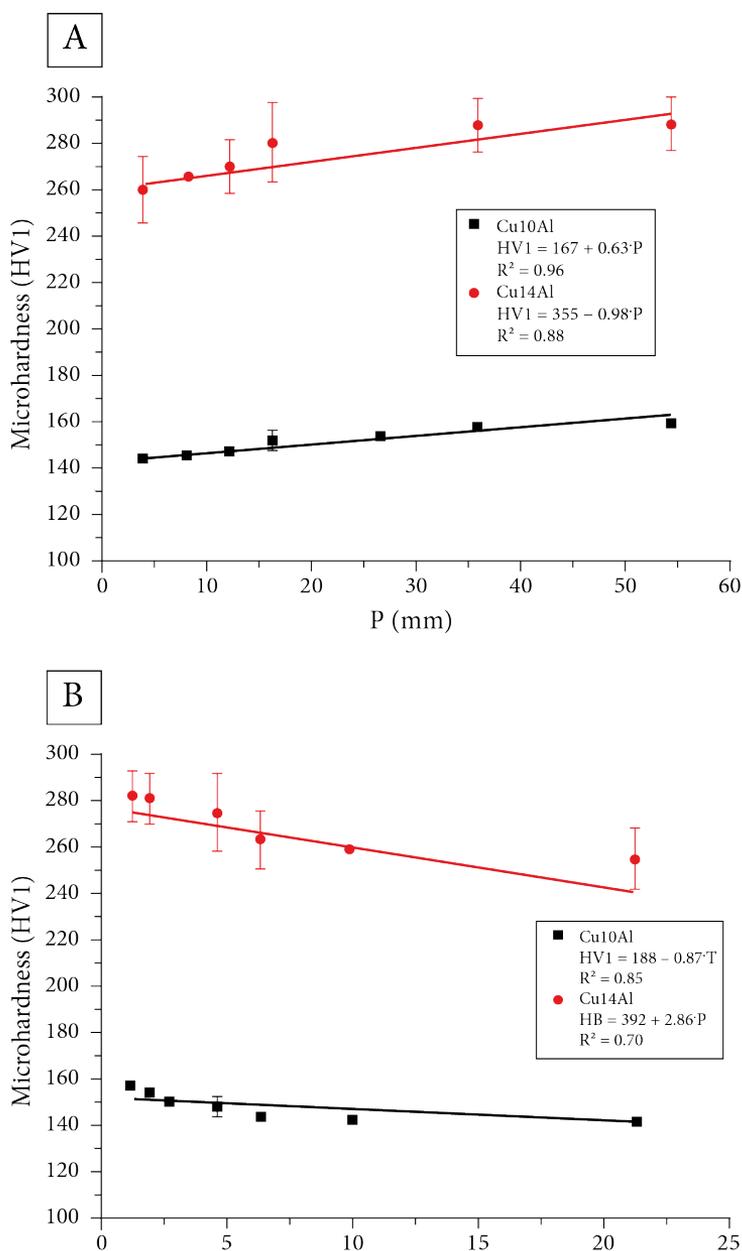
$P$  = carga aplicada (kgf); e

$d_1$  = 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:

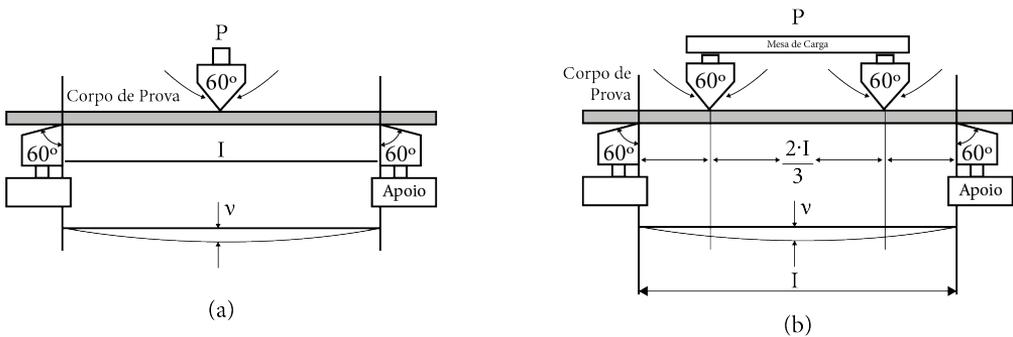
$P$  = carga (gf); e

$l$  = maior diagonal do penetrador ( $\mu\text{m}$ ).

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:

$\sigma_{rf}$  = 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.

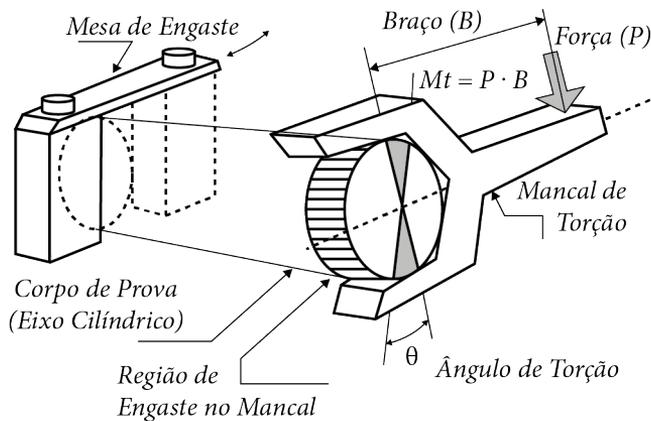
### Curiosidade

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  $P \times$  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:

$\tau$  = 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:

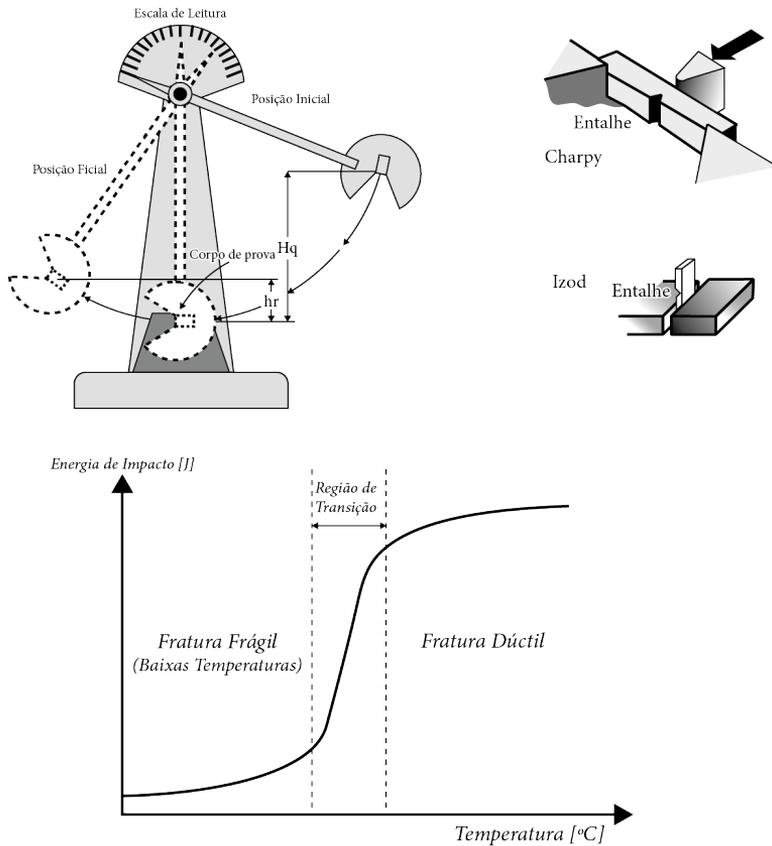
$\theta$  = deflexão angular ou ângulo de torção (radianos).

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.

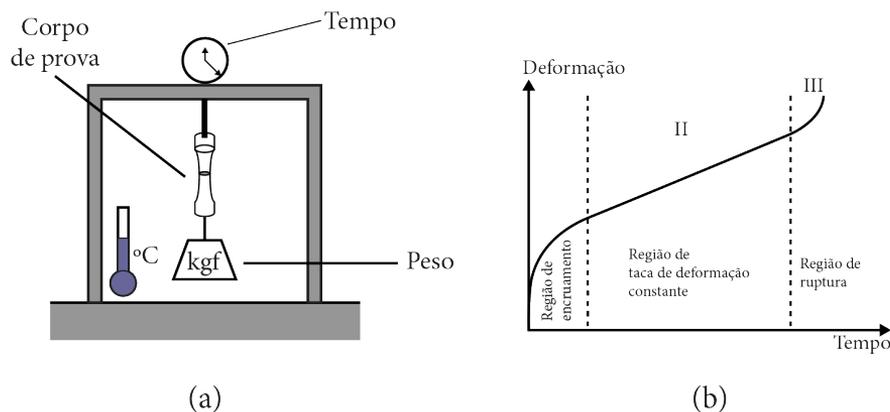


Figura 2.14 – Esboços de (a) máquina de ensaio de fluência e (b) curvas de ensaio de fluência.

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.

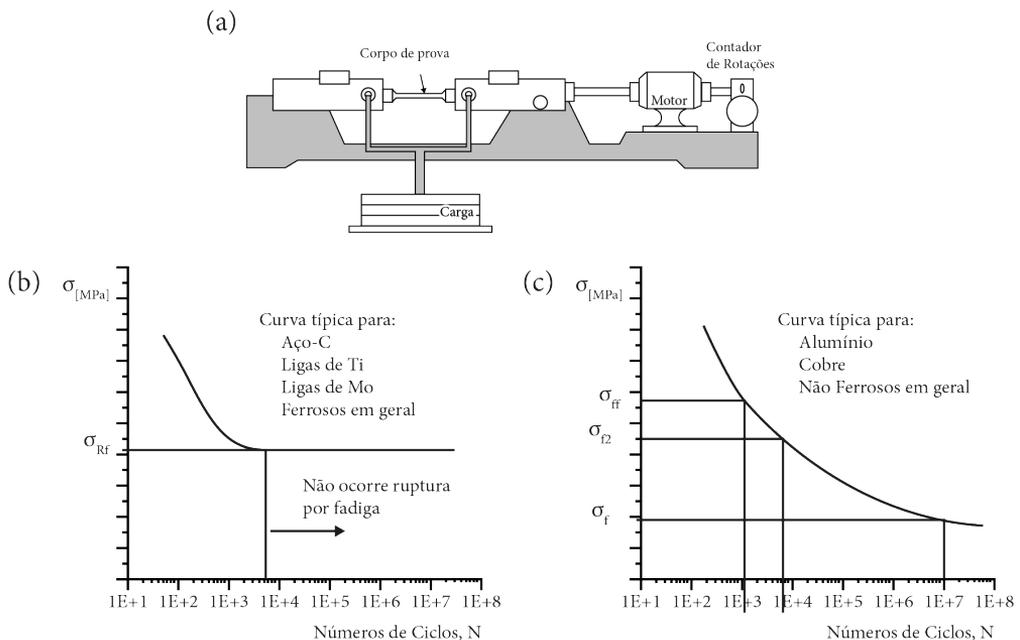
Entre os principais materiais ensaiados em fluência, podem ser citados os utilizados em indústria aeroespacial, instalações de refinarias petroquímicas, usinas nucleares, tubulações e turbinas. Esse ensaio não constitui um ensaio de rotina devido à

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.

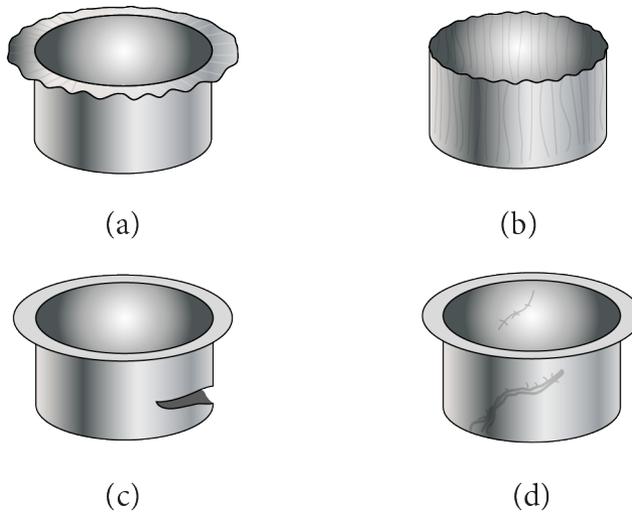
O ensaio de fadiga pode fornecer dados quantitativos relativos às características de um material ou componente ao suportar cargas repetitivas e/ou cíclicas por longos períodos sem que ocorra a fratura (ou ruptura). Analisando a *curva S-N* (ou *curva de Wohler*) de materiais ferrosos, ligas de molibdênio e ligas de titânio, representada por  $\sigma$ -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 ( $\sigma_{Rf}$ ), 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 ( $\sigma_f$ ), 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

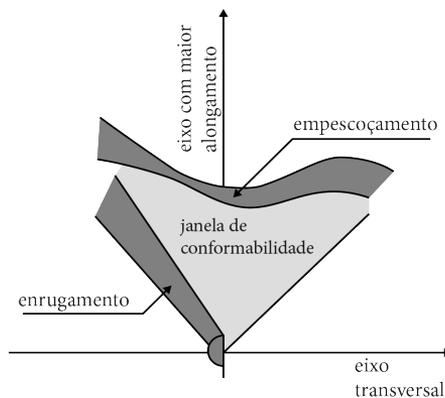
Os *ensaios de fabricação* avaliam características intrínsecas do material na etapa de manufatura. Em geral, são empregados para análise do comportamento de materiais metálicos diretamente durante o processo de conformação mecânica por deformação plástica. Os materiais a serem conformados normalmente 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.



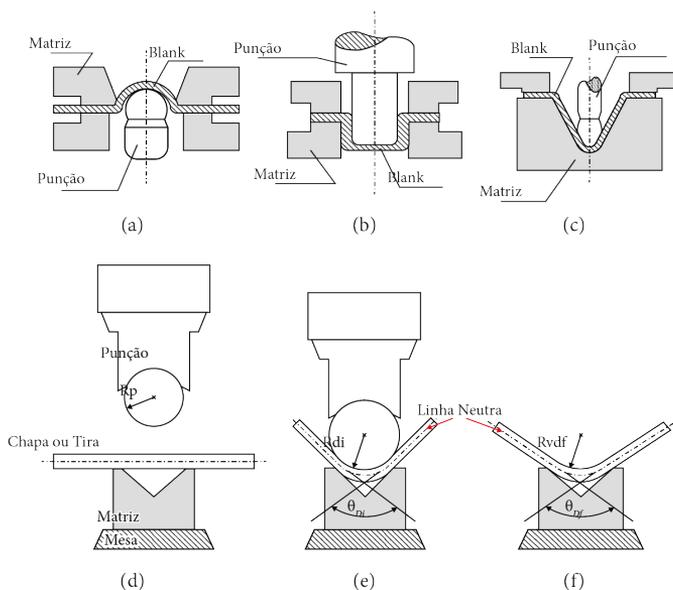
**Figura 2.16** – Defeitos possíveis em estampagem profunda: (a) enrugamento da flange, (b) enrugamento da parede, (c) rasgamento do fundo e (d) faixas de Lüders.

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.



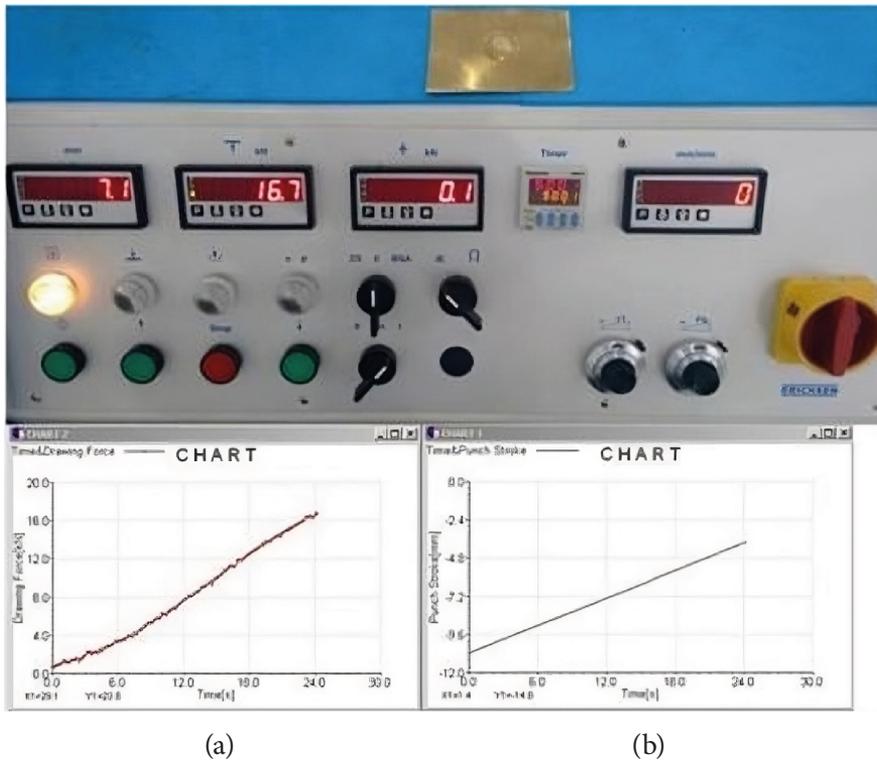
**Figura 2.17** – Diagrama obtido por ensaio de conformabilidade. (Banabic, 2010)

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 Termomecânica 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).

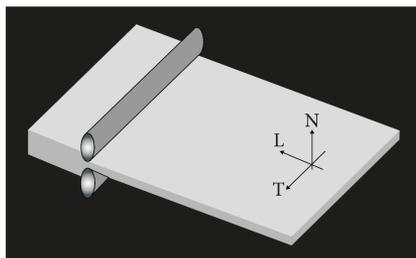
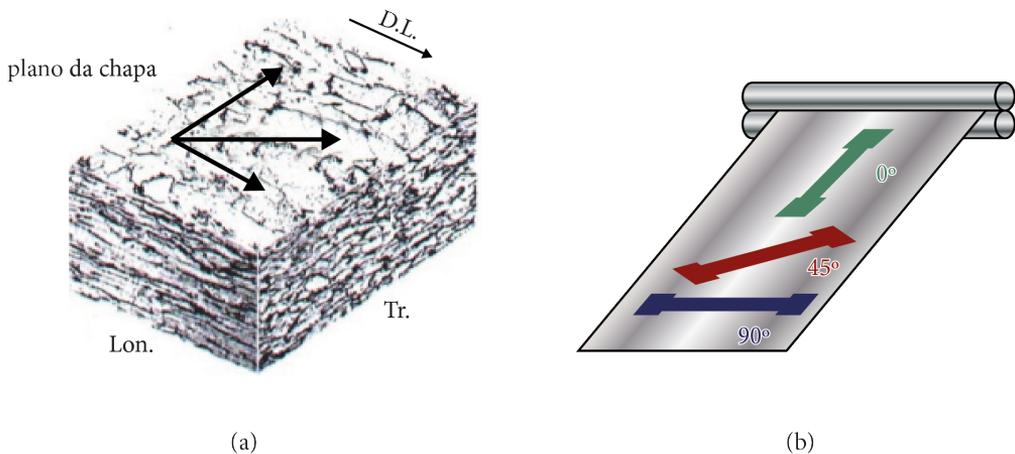


Figura 2.20 – Laminação convencional com indicação dos eixos.

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 ( $\varepsilon_w$ ) e na espessura ( $\varepsilon_t$ ) 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* ( $\Delta r$ ), 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  $0^\circ$ ,  $45^\circ$  e  $90^\circ$ , respectivamente, com a direção de laminação, para ambos os coeficientes ( $r_n$ ) e ( $\Delta r$ ).

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.

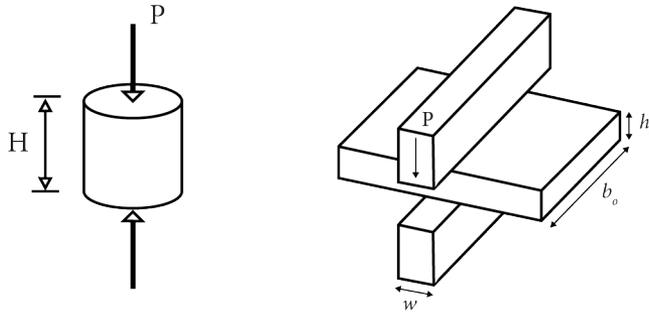
A tendência à formação de defeitos como “orelhas” (enrugamento da flange) na estampagem é função da anisotropia planar. Esses defeitos se formam a  $0$  e  $90^\circ$  com a direção de laminação, quando o coeficiente de anisotropia planar ( $\Delta r$ ) é maior que 0 e a  $45^\circ$  e  $135^\circ$  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 siderúrgicas, 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  $10^{-3} \text{ s}^{-1}$ , 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 ( $\sigma$ ).

$Z$  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

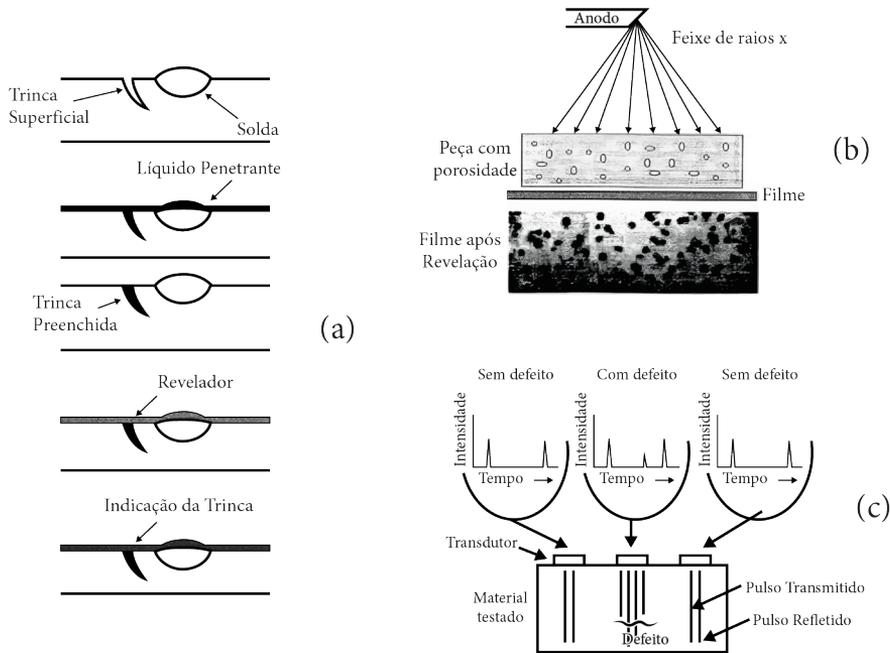
fabricação, montagem e manutenção. São importantes testes em diversos setores industriais, incluindo metalomecânica, de manutenção e inspeção de máquinas e motores; dependendo do tipo de ensaio a ser utilizado, ele pode proporcionar baixos custos de uso, praticidade e rapidez de realização.

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  $\gamma$* . 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  $\gamma$  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  $\gamma$  (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.