



# Processo de Fabricação



# Processos de fabricação

Carla Isabel dos Santos Maciel

© 2017 por Editora e Distribuidora Educacional S.A.  
Todos os direitos reservados. Nenhuma parte desta publicação poderá ser reproduzida ou transmitida de qualquer modo ou por qualquer outro meio, eletrônico ou mecânico, incluindo fotocópia, gravação ou qualquer outro tipo de sistema de armazenamento e transmissão de informação, sem prévia autorização, por escrito, da Editora e Distribuidora Educacional S.A.

**Presidente**

Rodrigo Galindo

**Vice-Presidente Acadêmico de Graduação**

Mário Ghio Júnior

**Conselho Acadêmico**

Alberto S. Santana  
Ana Lucia Jankovic Barduchi  
Camila Cardoso Rotella  
Cristiane Lisandra Danna  
Danielly Nunes Andrade Noé  
Emanuel Santana  
Grasiele Aparecida Lourenço  
Lidiane Cristina Vivaldini Olo  
Paulo Heraldo Costa do Valle  
Thatiane Cristina dos Santos de Carvalho Ribeiro

**Revisão Técnica**

Alessandra Cristina Santos Akkari  
Igor Polezi Munhoz

**Editorial**

Adilson Braga Fontes  
André Augusto de Andrade Ramos  
Cristiane Lisandra Danna  
Diogo Ribeiro Garcia  
Emanuel Santana  
Erick Silva Griep  
Lidiane Cristina Vivaldini Olo

---

**Dados Internacionais de Catalogação na Publicação (CIP)**

Maciel, Carla Isabel dos Santos  
M152p Processos de fabricação / Carla Isabel dos Santos Maciel.  
– Londrina : Editora e Distribuidora Educacional S.A. 2017.  
200 p.

ISBN 978-85-522-0193-9

1. Processos de fabricação. 2. Engenharia de produção. I. Título.

CDD 670

---

# Sumário

<b>Unidade 1   Fundição</b>	<b>7</b>
Seção 1.1 - Introdução à fundição	9
Seção 1.2 - Processos de fundição	25
Seção 1.3 - Fundição de precisão	42
<b>Unidade 2   Processos de usinagem e soldagem</b>	<b>57</b>
Seção 2.1 - Processos de usinagem	59
Seção 2.2 - Operações de corte	73
Seção 2.3 - Processos de soldagem	89
<b>Unidade 3   Processos de conformação mecânica</b>	<b>107</b>
Seção 3.1 - Introdução à conformação plástica dos metais	109
Seção 3.2 - Tipos de conformação mecânica: laminação, forjamento e estampagem	122
Seção 3.3 - Tipos de conformação mecânica: extrusão e trefilação	137
<b>Unidade 4   Processos de fabricação de peças plásticas e cerâmicas</b>	<b>153</b>
Seção 4.1 - Introdução aos processos de fabricação de peças plásticas	155
Seção 4.2 - Processos de fabricação de peças plásticas	170
Seção 4.3 - Processos de fabricação de peças cerâmicas	184



# Palavras do autor

Fabricar é transformar matérias-primas em produtos acabados com dimensões e propriedades mecânicas adequadas ao seu uso. Tais produtos podem ser desde utensílios domésticos simples até componentes mecânicos de alta tecnologia utilizados nas indústrias aeronáutica e aeroespacial. O desenvolvimento dessas tecnologias pelos mais diversos tipos de processos de fabricação ocorre devido à incessante busca pelo aprendizado, com muita dedicação e por último, mas não menos importante, a atualização de informações, uma vez que o desenvolvimento tecnológico é constante e o autoestudo deve ser um hábito para o profissional da área.

A fabricação de um produto tem início na elaboração do projeto, que determinará suas propriedades físicas (dimensões e tolerâncias), químicas (material e ligações químicas) e claro, mecânicas (resistência, tenacidade, dureza, entre outros). Estas propriedades são selecionadas e baseadas de acordo com requisitos técnicos e econômicos, visando sempre a otimização de procedimentos que forneçam produtos com excelente qualidade, baixo custo e alta competitividade no mercado.

É importante que o profissional da área conheça os diferentes métodos de fabricação de componentes, com o objetivo de escolher o melhor procedimento a ser empregado. Sendo assim, esta disciplina está dividida em quatro unidades de ensino que abrangem os seguintes métodos de processamento:

Unidade 1 – Fundição: estudando este processo você conhecerá os diferentes métodos de fabricação por vazamento e solidificação de materiais metálicos fundidos.

Unidade 2 – Processos de Usinagem e Soldagem: com os estudos sobre o processo de usinagem você aprenderá as diferentes operações que visam conferir forma aos componentes mecânicos a partir da remoção de cavacos, enquanto que na soldagem você entenderá sobre diferentes técnicas de união de peças com e sem a deposição de materiais.

Unidade 3 – Processos de Conformação Mecânica: neste processo você descobrirá como o fenômeno de conformação plástica resulta em produtos acabados com excelente acabamento, ótimo controle dimensional e, em sua maioria, melhora nas propriedades mecânicas.

Unidade 4 – Processos de Fabricação de Peças Plásticas e Cerâmicas: com este conteúdo você aprenderá diversas formas de processamento de peças a partir de polímeros e de peças cerâmicas, que são fabricadas a partir de pós.

O estudo de processos associados à aplicação de materiais, tem-se dado praticamente em todos os campos de fabricação, desenvolvendo e aprimorando técnicas que beneficiam os fabricantes, os trabalhadores e a população em geral. Portanto, caro aluno, entre nesse fantástico universo de transformação e descubra como é fabricado tudo o que lhe fornece conforto, facilita seus afazeres diários e auxilia na sua locomoção constantemente. Bons estudos!

## Fundição

### Convite ao estudo

Dentre todos os processos de fabricação, a fundição é a etapa inicial e se destaca por permitir a produção de peças com grande variedade de formas e tamanhos que, ainda, podem sofrer os mais diversos tipos de modificações posteriores, como torneamento, lixamento, soldagem, tratamentos térmicos, laminação, extrusão, entre outros.

Estudaremos as etapas dos processos de fundição assim como os fenômenos presentes que influenciam diretamente na qualidade do produto final. Por exemplo, serão expostos conceitos iniciais de fusão e solidificação de uma liga metálica e a partir daí você descobrirá quais são os diferentes métodos de construção de moldes a partir de um modelo e suas aplicações de acordo com o tipo de fundição empregada, por exemplo, para fundição em areia você verá que a partir de um modelo de madeira será construído um molde com material refratário, entretanto, esse modelo pode ser reutilizado centenas de vezes enquanto que na fundição por cera perdida o modelo é construído em cachos e antes do vazamento do metal líquido o modelo cera é derretido e descartado. Por fim, você identificará quais descontinuidades podem aparecer e quais os melhores métodos para evitá-las ou solucioná-las.

O objetivo desta unidade é ajudar você, que acabou de se formar e foi contratado por uma empresa, chamada F&A Fundição, muito conceituada no mercado. Esta empresa fabrica produtos de Ferros Fundidos em areia verde, mas precisa adaptar-se a um novo segmento de produção de utensílios de cozinha e neste caso martelos de cozinha em alumínio. Seu maior desafio será o de definir se o processo de fabricação desse utensílio de cozinha é

viável em areia verde, desenvolver todo o projeto do processo de fundição e determinar o melhor método de controle de qualidade do produto final.

Para tanto, você aprenderá de forma teórica e prática a desenvolver esse procedimento e determinar qual técnica de fundição será adotada e descreverá como será a preparação do molde a partir de um modelo, o posicionamento do canal de vazamento e do massalote, a preparação e análise química do material a ser fundido, o vazamento, o desmolde e, por fim, o acabamento.

Ao final, seu parecer será de extrema importância na implementação deste novo segmento na F&A Fundição, que visa expandir seus negócios, aumentar a quantidade de mão de obra contratada e, ainda, fornecer aos clientes um produto de excelente qualidade. Logo, todo o desenvolvimento do seu trabalho deverá responder às seguintes perguntas: O material a ser utilizado é adequado? Quais as etapas de desenvolvimento do projeto de fundição do martelo de cozinha? A qualidade do produto fabricado atende aos padrões e requisitos necessários?

# Seção 1.1

## Introdução à fundição

### Diálogo aberto

Caro aluno, nesta seção, aprenderemos sobre os conceitos iniciais de fenômenos que ocorrem durante a fundição de um metal, sobre o desenvolvimento das etapas do processo de fundição como fusão do material, fabricação de molde, entre outros, e sobre o método de fundição em areia verde.

Milhares de anos depois da descoberta do fogo e do seu uso para transformar minérios em metais e ligas metálicas, a fundição é uma tecnologia de extrema importância para produzir componentes a partir do estado líquido e para o desenvolvimento de novos materiais de engenharia.

Segundo dados cedidos pelo Ministério de Minas e Energia (2009), a tendência mundial é que a produção de fundidos se concentre em países do terceiro mundo, favorecendo a exportação e o aumento de postos de trabalho. No cenário brasileiro, a produção em destaque é do ferro fundido (82,8%), seguido do aço (9,7%), alumínio (6,7%) e outras ligas (0,8%). O padrão tecnológico de fundição nacional abrange tecnologias de fusão adaptadas que vão desde sistemas de preparação de areia e moldagem mecanizados até peças brutas que necessitam apenas serem rebarbadas (CASOTTI; BEL FILHO; CASTRO, 2011).

Neste cenário, considere que você acabou de se formar e foi contratado por uma empresa, chamada F&A Fundição, muito conceituada no mercado. Esta empresa fabrica produtos de ferros fundidos em areia verde, mas precisa adaptar-se a um novo segmento de produção de martelos de cozinha em alumínio. Seu maior desafio será o de definir se o processo de fabricação desse utensílio de cozinha é viável em areia verde e, para isso, você desenvolverá toda a metodologia de processamento executando um projeto de fundição que envolve a escolha do material e cálculos para elaboração do molde a partir do modelo e do massalote.

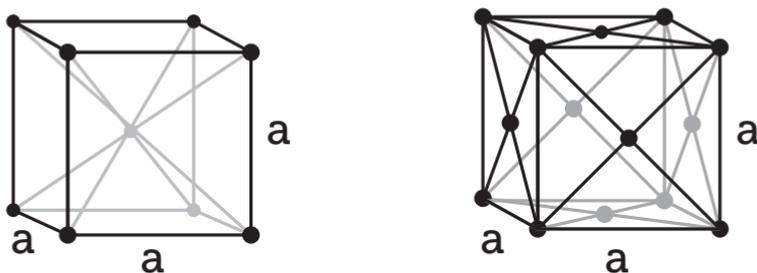
Para tanto, nesta primeira seção, você desenvolverá as primeiras etapas para a fundição de um martelo de cozinha de alumínio em areia verde. Nesse momento você determinará se o material escolhido é adequado sob os aspectos físico, químico e mecânico e fará os primeiros cálculos de projeto do molde a partir de um modelo preestabelecido.

## 1. Conceitos Iniciais de Fundição

O princípio básico de fundição envolve conceitos de fusão, onde o material está no estado líquido (acima da temperatura de fusão), e de solidificação, onde o material passa para o estado sólido com início na formação de núcleos (ASKELAND, 2008).

Após a fusão completa do material, à medida que o líquido esfria, inicialmente ocorre a nucleação com o surgimento de células unitárias e quando atinge a temperatura abaixo da solidificação, os átomos se aglomeram e formam um arranjo cúbico cristalino, que podem ser cúbico de corpo centrado (CCC), que possui átomos localizados em cada um dos vértices e um no centro do cubo, cúbico de face centrada (CFC), que possui átomos localizados em cada um dos vértices e um no centro de todas as faces, entre outros, como mostrado na Figura 1.1.

Figura 1.1 | Representação de estruturas cristalinas nos metais, em (a) cúbica de corpo centrado e em (b) cúbica da face centrada



Fonte: <[https://pt.wikipedia.org/wiki/Sistema\\_cristalino\\_c%C3%BAbico](https://pt.wikipedia.org/wiki/Sistema_cristalino_c%C3%BAbico)>. Acesso em: 28 mar. 2017.

A transformação de um líquido em produtos sólidos com dimensões e formatos desejados é chamada de solidificação (CHIAVERINI, 1995; ASKELAND, 2008; CALLISTER JÚNIOR, 2012). Tal fenômeno só ocorre devido à cristalização que consiste no aparecimento das primeiras células unitárias, que servem como núcleos que dão origem aos grãos, formando assim a estrutura típica dos metais (CHIAVERINI, 1995).

Como resultado desse processo tem o início da formação da dendrita, que se refere à expansão de cada núcleo de cristalização com o formato similar ao de uma árvore com seus ramos. Elas se formam

em quantidades cada vez maiores que avançam para dentro do líquido em busca de condições ideais de crescimento (COLPAERT, 2008), até se encontrarem, originando assim os grãos cristalinos e os contornos de grãos, que nada mais são do que o contorno que separa dois pequenos grãos ou cristais com diferentes orientações cristalográficas, formando por fim a massa sólida (CHIAVERINI, 1995).



## Assimile

A transição do estado líquido para o estado sólido de um metal a ser fundido só é possível devido à ocorrência de alguns fenômenos. O fluxograma mostrado na Figura 1.2 vai lhe ajudar a identificar essa progressão de maneira bem simples. Fique atento!

Figura 1.2 | Sequência de transição de um metal no estado líquido para o estado sólido



Fonte: elaborada pela autora.

## 2. Fenômenos de Solidificação

### 2.1 Segregação

As ligas metálicas são compostas por elementos químicos adicionados a um metal base, por exemplo, no aço SAE 4340, que possui uma matriz ferrítica, há adição de Carbono (C), Manganês (Mn), Fósforo (P), Enxofre (S), Silício (Si), Níquel (Ni), Cromo (Cr) e Molibdênio (Mo). Cada um destes elementos de liga possui uma função específica tanto para melhorar os processos de fusão e fundição quanto nas propriedades finais da liga (COLPAERT, 2008).

Quando o metal está no estado líquido e homogêneo, os elementos de liga ou as impurezas estão totalmente dissolvidas, mas, durante a solidificação, elas se tornam menos solúveis e acompanham o metal líquido remanescente, acumulando-se na parte sólida formada, ocorrendo assim a segregação (CHIAVERINI, 1995).

A adição de cada um desses elementos deve ser rigorosamente controlada, utilizando-se técnicas de análises química. Essas técnicas avaliam o percentual em peso de cada elemento de liga, além de identificar a presença de impurezas indesejáveis que devem ter seu

percentual em peso sempre muito pequeno. As impurezas mais comuns em ligas ferrosas são fósforo (P), o enxofre (S), o manganês (Mn), o silício (Si) e o próprio carbono (C) (CHIAVERINI, 1995; COLPAERT, 2008).



## Pesquise mais

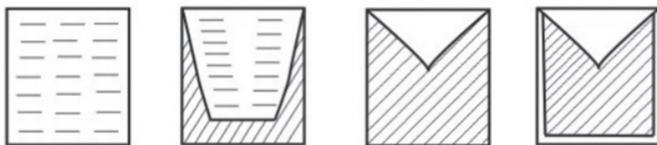
Quando se trata de avaliar ligas metálicas é de extrema importância saber a influência de cada elemento químico presente, portanto pesquise mais sobre esse assunto. Visite: <[http://www.cimm.com.br/portal/material\\_didatico/6362-elementos-quimicos-presentes-e-sua-influencia#.WMG0m\\_ythE](http://www.cimm.com.br/portal/material_didatico/6362-elementos-quimicos-presentes-e-sua-influencia#.WMG0m_ythE)>. Acesso em: 9 mar. 2017.

## 2.2 Contração

Contração é a diminuição de volume que as peças sofrem durante a solidificação que tem seu início nas extremidades do fundido onde a temperatura é menor. A solidificação segue em direção ao centro da peça e quando termina ocasiona uma diminuição geral das dimensões da peça solidificada e cria um vazio ou "chupagem" localizada como mostrado na Figura 1.3.

Essa heterogeneidade é compensada pelo uso dos massalotes, que são reservatórios de metal líquido que também auxiliam na liberação de gases que, quando retidos, podem formar bolhas no interior das peças. Mais adiante você terá mais informações sobre os massalotes.

Figura 1.3 | Representação esquemática do fenômeno de contração, com o vazio ou "chupagem" resultante



Fonte: Chiaverini (1995, p. 4).

A contração ocorre em três etapas no estado líquido, durante a solidificação e no estado sólido. Esse fenômeno varia de material para material; o aço, por exemplo, contrai cerca de 4% do seu volume devido à diferença de densidade entre o aço sólido e líquido (COLPAERT, 2008).

- *Contração no estado líquido*: desde a temperatura em que o metal está completamente fundido até o início da solidificação.

- *Contração durante a solidificação*: desde o início até o final da solidificação.

- *Contração no estado sólido*: desde o final da solidificação até a temperatura ambiente. Esta é a etapa considerada no desenvolvimento de projetos de modelos cujos valores estão descritos na Tabela 1.1 abaixo.

Tabela 1.1 | Dimensões recomendadas nos modelos para prever contração do metal

Ligas Fundidas	Dimensão do Modelo (cm)	Contração aproximada (mm/cm)
<b>Ferro fundido cinzento</b>	Até 60	0,1
	De 63,5 a 20	0,08
	Acima de 120	0,07
<b>Aço Fundido</b>	Até 60	0,2
	De 63,5 a 183	0,15
	Acima de 183	0,13
<b>Ferro Maleável</b>	—————	0,01 a 0,10 dependendo da espessura da seção
<b>Alumínio</b>	Até de 120	0,13
	De 124 a 183	0,12
	Acima de 183	0,10
<b>Magnésio</b>	Até 48	0,28
	Acima de 48	0,13
<b>Latão</b>	—————	0,15
<b>Bronze</b>	—————	0,1 a 0,2

Fonte: adaptada de Chiaverini (1995, p. 13).

### 3. Projeto de Modelos e Moldes para Fundição

O sucesso da fabricação de produtos por fundição depende da organização e do bom desenvolvimento do projeto. Como já vimos, ao se projetar uma peça para ser fundida, em primeiro lugar deve-se considerar os fenômenos que ocorrem na solidificação do metal líquido de modo que não resultem em descontinuidades no produto final. Entretanto, algumas etapas devem ser cuidadosamente elaboradas e desenvolvidas, Chiaverini (1995) as descreve da seguinte maneira:

1. *Desenho das peças a serem fundidas*: além dos fenômenos de solidificação e contração esta etapa inicial deve levar em consideração a espessura das paredes que será mencionada abaixo.

2. *Posicionamento adequado das seções das peças*: a melhor indicação é que se evite cantos vivos (arestas agudas) e mudanças bruscas.

3. *Espessura mínima das paredes*: em metais como ferro fundido, por exemplo, as extremidades das peças, também conhecidas como paredes, resfriam muito rápido, resultando em pontos duros devido à influência que a velocidade de resfriamento exerce sobre a estrutura da liga. Para ferros fundidos cinzentos produzidos em areia recomenda-se espessuras entre 3,175 mm a 6,35 mm, enquanto que para esse mesmo material feito em fundição de molde metálico recomenda-se 4,76 mm. A Tabela 1.2 mostra algumas recomendações de seções mínimas em ligas metálicas para os processos de fundição em areia, molde metálico e sob pressão.

Tabela 1.2 | Seções mínimas recomendadas em peças fundidas

Liga	Fundição em Areia	Fundição em Molde Metálico	Fundição sob pressão	
			Grandes áreas	Pequenas áreas
<b>Alumínio</b>	3,175 a 4,76	3,175 em áreas pequenas	1,905	1,143
<b>De cobre</b>	2,38	3,175 em áreas pequenas	2,54	1,524
<b>Ferros fundidos cinzentos</b>	3,175 a 6,35	4,76 em áreas pequenas	—	—
<b>De chumbo</b>	—	—	1,905	1,016
<b>De magnésio</b>	4,00	4,00 a 4,176	2,032	1,27
<b>Ferro maleável</b>	3,175	—	—	—
<b>Aço</b>	4,76	—	—	—
<b>Estanho</b>	—	—	1,524	0,762
<b>Ferro fundido branco</b>	3,175	—	—	—
<b>Zinco</b>	—	—	1,143	0,38

Fonte: adaptada de Chiaverini (1995, p. 11).

4. *Dimensões mínimas de orifícios*: os furos devem ser feitos na peça pronta e suas localizações devem ser precisas. As localizações desses orifícios são determinadas com posicionamento de machos, entretanto, este assunto será abordado na Seção 1.2 deste livro.

5. *Ângulo de saída*: é um ângulo ao qual o molde deve ser fabricado para facilitar a saída do modelo. Recomenda-se que ângulo de saída seja feito entre 1 a 3 graus de inclinação.

6. *Projeto do modelo*: geralmente feito em madeira ou metal, normalmente são utilizados em uma única peça, entretanto, quando são fundidas peças muito grandes são bipartidos e montados em placas. Quando projetados devem considerar a contração do material, ou seja, o modelo precisa ser maior do que a peça esperada. Retorne à Tabela

1.1, que mostra as dimensões recomendadas para os modelos, prevendo assim a contração do metal.

7. *Sobremetal*: são dimensões maiores em produtos que serão usinados posteriormente. A Tabela 1.3 mostra as faixas de valores para sobremetal em ferros, aços e metais não ferrosos. Vale a pena ressaltar que o trabalho de usinagem deve ser indicado no projeto.

Tabela 1.3 | Dimensões recomendadas nos modelos para prever a usinagem de acabamentoo

Liga	Dimensões do Modelo (cm)	Margens (mm)	
		Orifício	Superfície
<b>Ferro Fundido</b>	Até 15,2	3,175	2,38
	De 15,2 até 30,5	3,175	3,175
	De 30,5 até 50,8	4,76	4,0
	De 50,8 a 91,4	6,35	4,76
	De 91,4 a 152,4	7,94	4,76
<b>Aço Fundido</b>	Até 15,2	3,175	3,175
	De 15,2 até 30,5	6,35	4,76
	De 30,5 até 50,8	6,35	6,35
	De 50,8 a 91,4	7,14	6,35
	De 91,4 a 152,4	7,94	6,35
<b>Não ferrosos</b>	Até 76	1,59	1,59
	De 76 até 20,3	2,38	2,38
	De 20,3 até 30,5	2,38	3,175
	De 30,5 a 50,8	3,175	3,175
	De 50,8 a 91,4	3,175	4,0
	De 91,4 a 152,4	4,0	4,76

Fonte: adaptada de Chiaverini (1995, p. 15).

8. *Localização dos machos*: sempre que uma peça fundida for vazada ou apresentar furo passante é necessário prever a utilização e posição dos machos. Machos são elementos colocados no molde, antes do vazamento do metal líquido, para criar uma cavidade ou espaço vazio no interior da peça fundida. Para melhor entendimento esse assunto será abordado na Seção 1.2 deste livro.

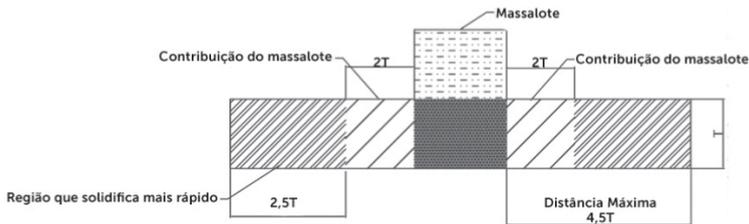
### 3.1 Projeto do Massalote

Como já mencionado, o massalote, também chamado de alimentador, é um reservatório do metal ainda no estado líquido, fundamental durante o processo de fundição, esse reservatório retém o calor por mais tempo e é a última seção a solidificar. Sua função envolve compensar as contrações no estado líquido e de solidificação dos metais, garantindo assim que o molde seja preenchido completamente e a peça produzida sem defeitos dimensionais (KIMINAMI; CASTRO; OLIVEIRA, 2013).



A "zona de ação do massalote" corresponde à parte da peça que solidificará por último. Independentemente do seu posicionamento que pode ser em cima da peça (de topo) ou na lateral, sua dimensão se dá com relação direta à espessura ( $T$ ) da peça fundida. Analisando a Figura 1.4 é possível perceber que o massalote utilizado é de topo e a região adjacente à sua posição é influenciado pelo calor absorvido no material refratário, sendo assim, o metal que preenche as extremidades do molde solidificam mais rápido.

Figura 1.4 | Representação esquemática da zona de ação do massalote



Fonte: elaborada pela autora.

Determinada a posição do massalote, o próximo passo é determinar os módulos que especificam o resfriamento da peça e que permitirão uma boa atuação de todo o sistema durante o vazamento. Para tanto, serão calculados o módulo de resfriamento da peça, módulo do massalote e relação de dimensão do pescoço do massalote.

O módulo de resfriamento da peça  $M_p$  é calculado com o volume da peça  $V_p$  e a superfície da peça  $S_p$  que está em contato com o molde.

$$M_p = \frac{V_p}{S_p}$$

O próximo passo é o cálculo do módulo de massalote que também considera o fator de segurança  $K$ , para que atue com pressão máxima durante a solidificação.  $M_m = K \times M_p$

O coeficiente de segurança do material **K** é dado pelos valores tabelados da relação entre o fator de posição do massalote pelo tipo de liga. Para os casos mais comuns de fundição a Tabela 1.4 mostra esses valores.

Tabela 1.4 | Fator de segurança K para ligas fundidas em areia verde com massalotes de topo

Material	(K)
Ferro fundido cinzento	1,09
Aço baixo carbono	1,29
Bronze	1,12
Ligas de alumínio	1,20

Fonte: adaptada de Fischer et al. (2011, p. 163).

Por fim, o dimensionamento do pescoço deve apresentar um módulo de resfriamento intermediário entre o módulo da peça e do massalote, sendo assim, aplica-se a relação:  $M_p : M_{pesc} : M_m$

#### 4. Fundição em Areia Verde

A Fundição em areia verde é o processo mais simples e mais barato de produção de peças a partir de um metal líquido. Esse método consiste em compactar, manualmente ou com máquinas automatizadas, uma mistura de elemento refratário, normalmente areia silicosa, aglomerantes e um plastificante (SOARES, 2000).

Inicialmente, a areia deve ser misturada com argila e água como aglomerante, até que se torne firme, moldável e fácil de ser compactada em caixas, preferencialmente de madeira. Em seguida, coloca-se o modelo para gerar o formato da peça a ser fundida, dos modelos do alimentador e do canal de vazamento chamado massalote (SOARES, 2000). Finalizada a preparação do molde, retira-se todos os modelos e a caixa é fechada novamente, colocando as duas metades uma sobre a outra e o material líquido é vazado de tal forma que preencha todos os espaços do molde. Quando a peça estiver solidificada e resfriada é feita a desmoldagem, a limpeza e o acabamento (TORRES, 2004).

##### 4.1 Areias para Fundição

Também conhecidas como areias de moldagem, as areias de fundição devem ser refratárias, ou seja, devem ser capazes de suportar as temperaturas do metal líquido sem que os moldes se rompam (TORRES, 2004). Adicionalmente outras propriedades importantes envolvem boa resistência mecânica, permeabilidade e plasticidade (CHIAVERINI, 1995; SOARES, 2000).

As areias e os aglomerantes precisam ser cuidadosamente escolhidos para garantir a moldagem fácil, reprodutibilidade e segurança. Seu uso se dá em diversos tipos de fundição, por exemplo, Areia Verde e Molde Permanente, sendo assim, são classificadas quanto à origem que pode ser natural ou semissintética, quanto ao uso (nova ou reciclada), quanto ao emprego (molde ou macho) e quanto ao estado de umidade, se seca é estufada ou se úmida é verde (SOARES, 2000).

As areias naturais são compostas basicamente de sílica que compõem entre 75 a 90% da mistura e se fundem em aproximadamente 1.650°C, outro componente é a argila que deve compor entre 25 a 10% e atua como aglutinante que ao se adicionar a água forma uma massa plástica facilmente moldável. As areias muito argilosas são utilizadas na fundição de materiais não ferrosos, pois seu ponto de fusão é de aproximadamente 700 °C (TORRES, 2004). A composição das areias sintéticas é preparada à base de areias sílica e aglomerantes minerais como bentonita, aglomerante cereal, pó de carvão, melaço e azeite, por exemplo, uma boa composição é de 60% em peso de areia sílica reciclada, de 34 a 37% de areia nova, de 1 a 4% de bentonita e 2% de pó de carvão (TORRES, 2004). Uma das grandes vantagens da fundição em areia é a possibilidade de sua reutilização e isso torna o processo interessante sob ponto de vista de custos e, obviamente, na preservação do meio ambiente. A reciclagem da areia consiste em peneirar, colocar aditivos químicos e em retirar a camada aglomerante que envolve os grãos da areia (SOARES, 2000).



### Pesquise mais

Veja como a fundição em areia verde é fácil e eficiente, assista ao vídeo indicado abaixo e aumente seu conhecimento a respeito desse assunto. Disponível em: <<https://www.youtube.com/watch?v=sYID9Z7vuzs>>. Acesso em: 16 mar. 2017.



### Refleta

A temperatura de fusão de um aço hipoeutetoide se dá em torno de 1.530 °C, considere que está fundindo o aço muito comum 4.340 e verifique a composição química e a influência de cada elemento de liga. A partir do percentual em peso do carbono encontrado, qual será a fase microconstituente resultante se o resfriamento da peça for em atmosfera ambiente?

## Sem medo de errar

Retomando ao desenvolvimento das suas funções na empresa F&A Fundição, vamos dar andamento ao trabalho a que você foi designado. Seu desafio é definir se o processo de fabricação de martelos de carne de alumínio é viável em fundição por areia verde. No entanto, para desenvolver suas atividades preliminares considere que o tipo de martelo já foi preestabelecido, como mostra a Figura 1.5.

Figura 1.5 | Martelo de carne fundido em alumínio



Fonte: Wikimedia (2016).

Nesse primeiro momento, suas atividades consistem em avaliar se as propriedades químicas, físicas e mecânicas do material são pertinentes à aplicação e iniciar o projeto do molde.

Como sabemos, o produto de alumínio será um martelo de carne fundido em areia verde e por isso você precisa descobrir suas principais propriedades químicas, físicas e mecânicas. Esse material passará por transformações do estado sólido para fundido e depois de vazado se tornará sólido novamente, sendo assim, a composição química da liga e o ponto de fusão precisam ser conhecidos.

Outra informação importante a ser considerada é a solicitação mecânica que o martelo sofrerá. É muito claro que sofrerá impactos durante o trabalho, o que nos leva a concluir que o seu material deverá ter excelente absorção de energia sem apresentar deformação plástica, ou seja, deverá ter boa tenacidade.

De acordo com a Associação Brasileira de Normas Técnicas – ABNT (2006) e ABNT (2015), todas essas informações preliminares estão listadas na Tabela 1.5 abaixo.

Tabela 1.5 | Martelo de carne fundido em alumínio

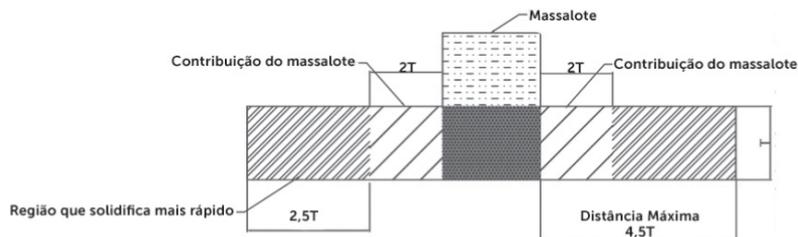
Propriedades	Valores
Densidade	2,7 g/cm <sup>3</sup>
Temperatura de Fusão	660°C
Limite de Escoamento	255 MPa
Módulo de Elasticidade	70 GPa
Elementos de Liga	Cu; Si; Mn; Mg; Sn, Zn e Li

Fonte: ABNT (2006, p. 5); ABNT (2015, p. 2).

Agora que as propriedades do material estão definidas você precisa dar início ao projeto de fundição. Vamos começar com o projeto do massalote que, como você já sabe, é fabricado de material refratário diferente do molde e da caixa de molde para que seja a última seção do conjunto a resfriar, favorecendo a concentração das heterogeneidades como o rechupe, a segregação e contração.

Para iniciar o projeto de fundição você deve responder à seguinte pergunta: Qual será a parte da peça fundida que solidificará por último? Para responder essa pergunta você precisará retomar as especificações da Figura 1.4 e determinar a zona de ação do massalote mostrada na Figura 1.6, em função da maior espessura da peça (T) a ser alimentada. Para o projeto do martelo de carne considere o esquema dado abaixo:

Figura 1.4 | Representação esquemática da zona de ação do massalote para o martelo de carne a ser fundido



Fonte: elaborada pela autora.

Portanto, a partir das especificações em função da espessura (T) mostradas na Figura 1.6, determina-se:

$$\text{Comprimento máximo} - 4,5 \times T = 4,5 \times 4,5 = 20,5\text{cm}$$

$$\text{Contribuição do massalote} - 2 \times T = 2 \times 4,5 = 9\text{cm}$$

$$\text{Região de solidificação rápida} - 2,5 \times T = 2,5 \times 4,5 = 11,25\text{cm}$$

Em seguida, determina-se o módulo de resfriamento do martelo

de cozinha, e como este será fundido com duas seções, o cabo e o batedor, então, o módulo da peça será calculado a partir da soma dos módulos de ambas as seções.

Como o objetivo desse procedimento é desenvolver projeto para fundição, para delimitamento do projeto de fundição considere:

$$V_{cabo} = 45,5625\text{cm}^3 \quad V_{batedor} = 197,4375\text{cm}^3$$

$$S_{cabo} = 91,125\text{cm}^2 \quad S_{batedor} = 43,65\text{cm}^2$$

$$M_p = M_{cabo} + M_{batedor} = \frac{V_{cabo} + V_{batedor}}{S_{cabo} + S_{batedor}} = \frac{45,5625 + 197,4375 \text{ (cm}^3\text{)}}{91,125 + 43,65 \text{ (cm}^2\text{)}} = \frac{243}{134,9} = 18,01\text{mm}$$

Portanto, para o cálculo do módulo de massalote considera-se um coeficiente de segurança, a fim de que este atue com pressão máxima durante o tempo de solidificação determina-se:

$$M_m = K + M_p = 1,20 \times 18,01 = 21,612\text{mm}$$

Dimensionamento do pescoço:

$$M_p : M_{pesc} : M_m \rightarrow 18,01 : M_{pesc} : 21,612$$

Sendo assim, o pescoço do massalote deverá ter dimensão entre 18,01 mm e 21,612 mm.

## Avançando na prática

### Conhecendo o material

#### Descrição da situação-problema

Você foi contratado por uma empresa de fundição de peças automotivas produzidas em ligas de alumínio. Seu gerente está desconfiado que a qualidade do material fundido não está dentro das especificações da empresa, portanto, ele pede que você verifique o material o mais rápido possível e lhe dê um parecer, pois a produção foi parada. Dentre todas as técnicas de análise química possíveis, a mais rápida ao seu alcance é a espectrometria de centelha. Esse equipamento é dotado de filamentos dos mais diversos tipos de elementos químicos que identificam a composição química de uma amostra sólida queimada por centelha e fornece um relatório técnico. Os resultados estão mostrados na Tabela 1.6 e com base nos valores especificados pela norma da liga avalie se a composição química está dentro dos padrões exigidos e caso haja alguma inconsistência faça os devidos apontamentos.

Tabela 1.6 | Composição química e resultado de uma possível análise química da liga ABNT 1050

Composição (%peso)	Al	Si	Fe	Cu	Mn	Cr	Zn	Ti
Max		0,25	0,4	0,05	0,05	-	0,05	0,030
Min	99,5		-	-	-	-	-	-
Encontrado	99,52	0,12	0,2	0,05	0,05	-	0,04	0,020

Fonte: ABNT (2007)

## Resolução da situação-problema

Analisando os valores encontrados nos ensaios de espectrometria por centelha pode ser observado que todos os elementos estão dentro dos valores especificados pela norma da liga de alumínio ABNT 1050. Segundo a norma, a matriz de alumínio deve ter uma composição mínima de 99,5% de peso, para tanto, os resultados apresentaram um valor superior de 99,52% de peso. Os elementos de liga como Si e Fe apresentaram valores bem inferiores ao máximo estipulado, entretanto, como o valor mínimo para esses elementos é isento, considera-se que suas porcentagens são adequadas. As quantidades de Cu, Mn, Zn e Ti também estão de acordo com o especificado, portanto, avalia-se o material fundido como adequado.

## Faça valer a pena

**1.** O processo de fabricação por fundição só pode ser executado com o desenvolvimento eficiente de todas as suas etapas. Sendo assim, quando se trata da fusão de material alguns fenômenos, como a cristalização, contração de volume e segregação, devem ser cuidadosamente monitorados.

Escolha a alternativa correta que representa a teoria sobre os fenômenos que ocorrem durante a fusão e solidificação de metais:

- A nucleação é subsequente à cristalização, solidificando o metal, formando uma ordem de arranjo atômico de curto alcance.
- Em ligas metálicas a solidificação ocorre apenas a partir de nucleação homogênea que resultam na formação de dendritas a partir de cristais de dimensões nanométricas.
- A solidificação nos metais resulta em uma estrutura cristalina amorfa (desordenada) que podem ser CCC, CFC ou HC.
- A contração ocorre em três etapas no processo de fundição: a contração no estado líquido que ocorre desde a temperatura de até o início de solidificação, a contração durante a solidificação, que ocorre desde o início da solidificação até o final e contração no estado sólido que ocorre desde o final da solidificação até que o material atinja a temperatura ambiente.

e) A segregação só ocorre com o metal ainda no estado líquido, impedindo assim a solidificação e por consequência a contração dimensional.

**2.** Durante o processo de fundição regiões mais espessas e mudanças de seção transversal são partes do produto final que merecem especial atenção no projeto de peças fundidas para evitar a ocorrência de vazios associados à contração de solidificação (COLPAERT, 2008).

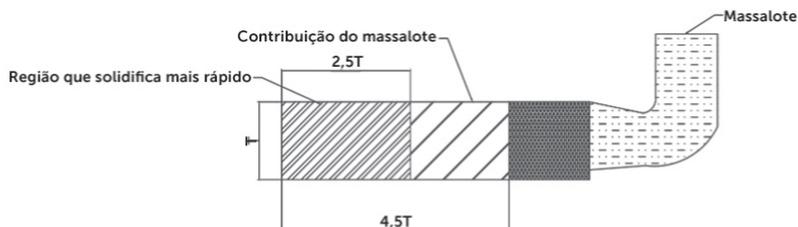
Com base no texto acima, sobre a contração é correto afirmar:

- a) A contração do material metálico ocorre devido à presença da interface líquido-sólido apenas para regiões com o resfriamento brusco das extremidades.
- b) A contração dá origem a uma heterogeneidade chamada rechupe, que deve ser direcionada a uma determinada parte do lingote ou do fundido.
- c) A contração só acontece em materiais ferrosos devido à sua alta densidade e quantidade de elementos de liga.
- d) O rechupe é a descontinuidade gerada pelo processo de contração que tem seu início ainda na nucleação e sua conclusão apenas quando há formação de dendritas.
- e) A contração ocorre apenas quando as impurezas presentes no material líquido se tornam menos solúveis e acompanham o metal líquido remanescente acumulando-se na parte sólida formada.

**3.** Como já mencionado, o massalote é um reservatório de metal líquido fundamental durante o processo de fundição, retém o calor por mais tempo e, portanto, corresponde à seção chamada zona de ação do massalote, que solidifica por último. Sua função envolve compensar as contrações no estado líquido e de solidificação dos metais, garantindo assim que o molde seja preenchido completamente e a peça produzida sem defeitos dimensionais.

Considere a Figura 1.7 abaixo e determine as dimensões (I) da região de contribuição do massalote e (II) da região que solidificará mais rápido para a fundição de ferro fundido cinzento para uma espessura de 6,3 cm.

Figura 1.7 | Representação esquemática da zona de ação do massalote localizado na lateral para o ferro fundido cinzento



Fonte: elaborada pela autora.

- a) (I) 12,6 mm; (II) 15,75 mm.
- b) (I) 12,6 cm; (II) 15,75 mm.
- c) (I) 15,75 cm; (II) 12,6 cm.
- d) (I) 12,6 cm; (II) 15,75 cm.
- e) (I) 15,75 mm; (II) 12,6 mm.

# Seção 1.2

## Processos de fundição

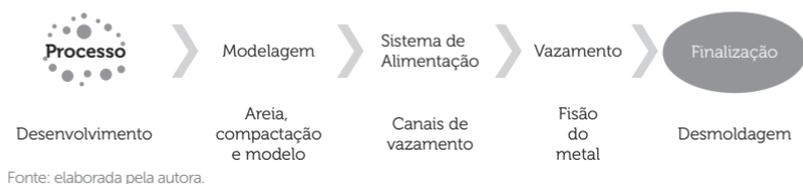
### Diálogo aberto

Na seção anterior, você desenvolveu as primeiras etapas de projeto para fundir um martelo de carne de alumínio. Uma vez que o modelo e o material do martelo foram preestabelecidos, sua principal atividade foi caracterizar o material quanto às propriedades químicas, físicas e mecânicas e calcular os módulos dimensionais do massalote. Quanto às propriedades o material selecionado mostrou-se adequado, pois sua temperatura de fusão a 660 °C é considerada baixa no processo de fundição em areia verde, o que resulta em maior confiabilidade no processo no que se diz respeito à qualidade e estabilidade do molde, além de que, as propriedades mecânicas de tenacidade, como limite de escoamento e módulo de elasticidade, são adequadas aos esforços mecânicos de impacto que o martelo sofrerá durante o uso. Adicionalmente, o massalote foi devidamente dimensionado e foram definidas as regiões de sua contribuição, ou seja, locais que solidificarão por último limitando os defeitos provenientes dos fenômenos de solidificação.

Dando continuidade ao seu trabalho de desenvolvimento do novo segmento de fabricação do martelo de carne em alumínio utilizando o processo de fabricação de fundição em areia verde na empresa F&A Fundição, nesse momento sua atividade consistirá em elaborar um relatório a ser entregue ao seu superior, com as etapas a serem executadas de tal maneira que o processo seja eficiente e resulte em um produto de excelente qualidade.

A sequência do processo de fundição em areia está mostrada na Figura 1.8, portanto, para cada etapa você criará um memorial descritivo relatando sua especialidade. Por exemplo, no desenvolvimento da modelagem você deverá discriminar a mistura da areia e dimensionar o sistema de vazamento com o cálculo da área total dos canais e do tempo de vazamento e as demais etapas como compactação da areia, utilização do modelo, vazamento e desmoldagem deverão ser mencionadas e descritas.

Figura 1.8 | Etapas para o desenvolvimento de fundição em areia verde do martelo de carne de alumínio

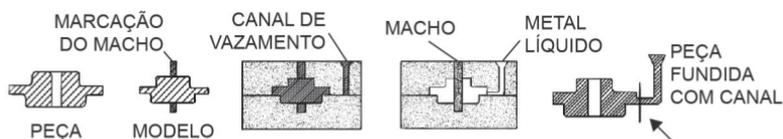


## Não pode faltar

### *Macharia*

Para a fundição de peças com cavidades é necessária a utilização de machos simples, localizados na caixa de moldar, que delimitam a parte interna de uma peça formando furos e/ou reentrâncias (CHIAVERINI, 1995). Assim como os moldes, os machos podem ser fabricados em madeira, metal, areias e resinas e devem ser colocados nos moldes antes de serem fechados para receber o metal líquido. Segundo Casotti, Bel Filho e Castro (2011), durante o vazamento o macho fica completamente envolto em metal líquido, por isso é importante considerar que, para os machos feitos em areia, a presença da resina como aglomerante influencia na formação de gases que podem resultar na formação de bolhas internas na peça. A Figura 1.9 mostra o desenvolvimento de uma fundição de peça com cavidade. Inicialmente, o modelo da peça deve prever o posicionamento do macho (Figura 1.9 (a)), sendo assim, uma marcação deve ser feita, como mostra a Figura 1.9 (b). Feito o modelo da peça, a próxima etapa consiste em preparar o molde onde também é inserido o modelo do canal de vazamento (Figura 1.9 (c)). Com a moldagem finalizada o macho é colocado no lugar e o metal líquido é vazado (Figura 1.9 (d)). Na Figura 1.9 (e) a peça fundida e solidificada foi desmoldada e o macho retirado.

Figura 1.9 | Etapas de fundição de uma peça com macho



Fonte: Chiaverini (1995, p. 23).

## Processo em Caixa Fria (Cold box)

Existem duas classificações de processo de macharia: em caixa fria (*cold box*) e cura a quente (*heat cured*). Entende-se processo de macharia ou moldagem em caixa fria como qualquer processo de fundição realizado com areia aglomerada com resinas ou silicato de sódio cuja cura é realizada em temperatura ambiente (SOARES, 2000; VILHENA, 2009).



### Assimile

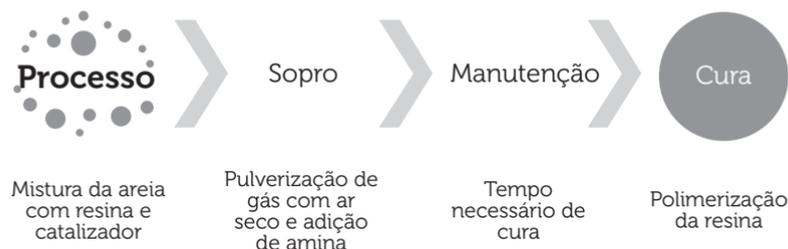
O processo de cura na fundição refere-se à secagem das areias (cura a frio) ou endurecimento de resinas (cura a quente). Veja separadamente cada situação:

A cura a frio utiliza substâncias químicas como catalizadores para favorecer a secagem e estabilidade dos moldes de areia.

A cura a quente é utilizada para o endurecimento de moldes compostos de materiais poliméricos, por exemplo, as resinas misturadas às areias de fundição. Esses materiais são colocados e aquecidos em estufas entre as temperaturas de 350 °C a 450 °C por aproximadamente três minutos.

As etapas do processo de fabricação de machos com areia resina estão mostradas na Figura 1.10 e consistem na mistura da areia com resinas do tipo uretâmica/amina, furânica/SO<sup>2</sup> ou acrílica/epóxi, adensada dentro de uma caixa de macho seguindo-se pela passagem de ar seco ou com gaseamento de CO<sub>2</sub> e adição de um tipo básico de amina que é pulverizado junto ao gás de arraste, polimerizando a resina (SOARES, 2000; VILHENA, 2009).

Figura 1.10 | Sequência de fabricação de machos ou modelos em caixa fria



Fonte: elaborada pela autora.

Esse método é utilizado na produção em pequenas e grandes quantidades e tem como principais vantagens precisão dimensional; elevada colapsidade, ou seja, devem ser facilmente destruídos após a solidificação

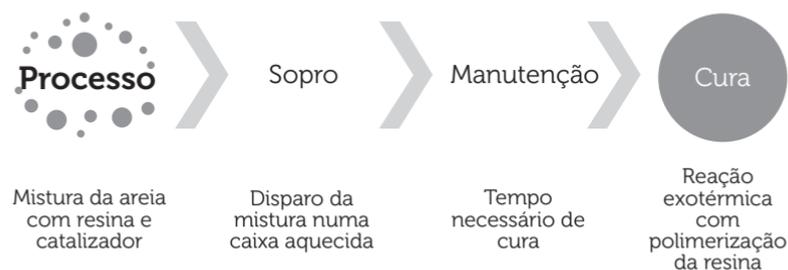
da peça; boa produtividade; fluidez na mistura; excelente acabamento superficial; baixa pressão de compactação, ou seja, pressionar a areia de forma que se ajuste firmemente na caixa de fundição; não requer cura; e utilização imediata após a extração. Suas desvantagens são atribuídas ao alto custo de resinas e catalizadores, necessidade de controle de qualidade da areia e temperatura de trabalho, ambiente com controle de exaustão e baixo tempo de estocagem (KIMINAMI; CASTRO; OLIVEIRA, 2013).

Quando a macharia é feita com silicato de sódio como aglomerante a qualidade final do macho e da peça fundida depende da distribuição homogênea do gás ou do ar por todas as regiões do macho, pois as reações químicas são praticamente instantâneas, o que requer um projeto cuidadoso dos filtros para respiro das caixas de macho. Como resultado são obtidos moldes com excelente estabilidade dimensional, mas difícil de serem destruídos após a peça ser solidificada (SOARES, 2000; VILHENA, 2009). Sua resistência também é dependente do módulo do silicato ( $\text{SiO}_2:\text{Na}_2\text{O}$ ), do tempo de que fica exposto à concentração de gases e estocado e da adição de aditivos orgânicos, por exemplo, serragem. Normalmente os machos são estocados por um dia ou mais, e esse tempo deve ser levado em conta a fim de se evitar que ocorra queda na resistência devido ao armazenamento em estufas onde há presença de gases (SOARES, 2000).

### ***Processo em Cura Quente (heat cured)***

Os processos de fabricação em cura a quente consistem em provocar uma reação química entre o aglomerante e os grãos de areia com aplicação de calor. A Figura 1.11 mostra a sequência desse que inicia na mistura de areia, resina e catalizador em uma caixa metálica previamente aquecida por um determinado período de tempo. O calor do ferramental favorece a reação exotérmica que endurece o macho de forma progressiva, de fora para dentro, polimerizando a resina (KIMINAMI; CASTRO; OLIVEIRA, 2013).

Figura 1.11 | Sequência de fabricação de machos ou modelos por cura quente



Fonte: elaborada pela autora.

Esse método é amplamente utilizado na produção de machos maciços, complexos e de espessura reduzida fundidos com ligas de alumínio (Al), magnésio (Mg), Ferros Fundidos e Aços, pois possui alta fluidez que permite a excelente reprodução de detalhes, bom acabamento, dispensa a cura e utiliza-se menor quantidade de resinas, quando comparado ao método de caixa fria (FISCHER et al., 2011). Suas desvantagens consistem na necessidade de ferramental caro, a vida útil da mistura é de aproximadamente 4h, há desprendimento de gases tóxicos durante a cura e há dificuldade de cura em paredes espessas (KIMINAMI; CASTRO; OLIVEIRA, 2013). Um processo de fundição muito conhecido feito em cura quente é o *Shell Molding*.

### ***Cálculos para Projeto dos Canais de Vazamento (Sistema de Alimentação)***

Os canais de vazamento, também chamados de sistema de alimentação, devem ser devidamente dimensionados, pois assim o metal líquido terá um escoamento adequado e permitirá que os fenômenos de solidificação, como segregação, contração e rechupe, já discutidos na Seção 1.1, sejam direcionados para o massalote, como desejado.

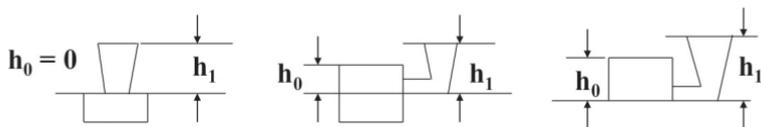
#### ***Velocidade Média de Vazamento e Tempo de Vazamento***

Inicialmente, duas variáveis importantes a serem calculadas são o tempo e a velocidade de vazamento, sendo assim, para cálculo de tempo de vazamento de aços e ligas de alumínio é aplicada a Equação 1.1 (BALDAM, 2014, p. 136).

$$t = K_f (1,4 + 0,7144 \times T) \times \sqrt{m \times 10^{-3}} \quad (\text{Equação 1.1 onde: } t = \text{tempo}(s),$$

$$F = \text{fluidez}(cm), T = \text{espessura}(cm), m = \text{massa}(g), K_f = \frac{F}{40} \text{ é o coeficiente de segurança, corresponde à razão entre a fluidez e a composição e o grau de superaquecimento. Ambos os valores são tabelados de acordo com o tipo de material adotado. A velocidade média de vazamento é calculada com relação direta da altura (h), em cada momento do preenchimento do molde e de acordo com os posicionamentos dos canais. A Figura 1.12 mostra três situações de posicionamento e suas respectivas relações geométricas. Durante o vazamento o metal líquido sempre exerce uma força contrária à pressão gerada pelo sistema, portanto o cálculo de velocidade média de vazamento é dado pela Equação 1.2.}$$

Figura 1.12 | Representação esquemática da altura total e altura da peça no sistema de vazamento



Fonte: Fischer (2011, p. 163).

$$V_m = \frac{\sqrt{2 \times g}}{2} \times \left( 1 + \sqrt{1 - \frac{h_0}{h_1}} \right) \times \sqrt{h_1} \quad (\text{Equação 1.2}) \text{ onde } h_1 = \text{altura}$$

total disponível no sistema,  $h_0$  = altura da peça acima do nível de ataque e  $g$  = gravidade.

### Área de Vazão, Volume da Peça e Vazão do Metal

Outros critérios importantes a serem dimensionados para garantir o vazamento eficiente do metal líquido são a área de vazão, o volume da peça e a vazão do metal, pois o vazamento do metal líquido deve ser controlado de tal maneira que o preenchimento seja realizado com velocidade adequada, uma vez que se for feito lentamente poderá resultar na solidificação do metal antes do preenchimento completo do molde, mas se for muito rápido pode levar à segregação de inclusões de partículas sólidas ou à formação de bolhas ou poros na peça (TORRES, 2004).

O cálculo da área de vazão ( $a$ ) é dado pela Equação 1.3:

$$a = \frac{m}{(\rho \times V_m \times t)} \quad (\text{Equação 1.3}) \text{ onde: } m = \text{massa (kg)}.$$

$V_m$  = velocidade (m/s) e  $a$  = área (mm)

Antes do cálculo de vazão do metal ( $V$ ) é necessário que se determine o volume da peça ( $v$ ), e para isso aplica-se a Equação 1.4, onde  $\rho$  = densidade.

$$v = \frac{m}{\rho} \quad (\text{Equação 1.4}). \text{ Por fim, calcula-se a vazão do metal (V)}$$

aplicando a equação 5.  $V = \frac{v}{t}$



Veja o vídeo indicado abaixo e descubra como é feita a desmoldagem de um macho produzido em caixa fria vertical. Disponível em: <[https://www.youtube.com/watch?v=7RA\\_udFvUo0](https://www.youtube.com/watch?v=7RA_udFvUo0)>. Acesso em: 17 mar. 2017.

### **Shell Molding (Moldagem em Casca)**

O aperfeiçoamento na utilização de areia para a produção de moldes e machos de fundição teve um grande avanço tecnológico, com a aplicação de resinas como aglomerante associadas ao aquecimento no processo, eliminando assim, a etapa de compactação (KIMINAMI; CASTRO; OLIVEIRA, 2013). Em meio a toda essa melhoria de sistematização surgiu um processo de fundição chamado *Shell Molding* ou fundição em casca, cuja cura é feita a quente e são utilizadas areias de excelente qualidade sem argila ou impurezas e entre 3% a 10% de resinas do tipo poliéster, ureia formaldeído ou fenolformaldeído que atuam como aglomerantes e facilitam a formação da casca (SOARES, 2000).

São seis etapas que devem ser desenvolvidas para fundir uma peça com esse método, como mostra a Figura 1.13.

a) Os modelos da peça, dos canais de vazamento e do massalote são feitos em metal e fixados em uma placa que é presa na máquina e aquecida por meio de bicos de gás até atingir a temperatura de trabalho entre 200 °C e 250 °C.

b) A placa é girada contra um reservatório contendo a mistura de areia/resina, envolvendo todo o modelo pela mistura.

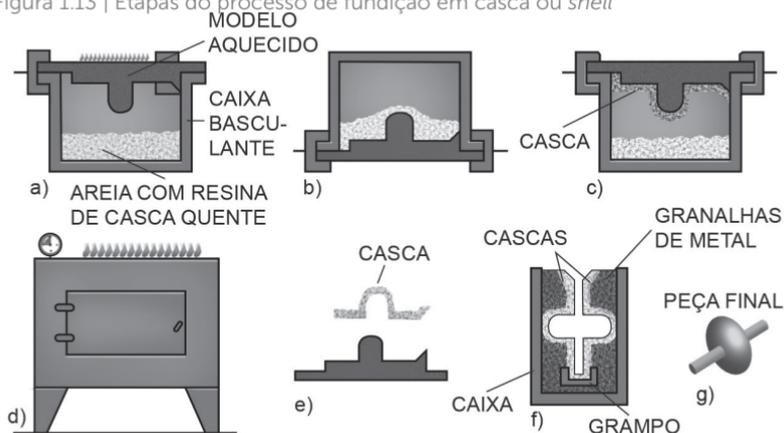
c) O calor funde a resina que envolve os grãos de areia e depois de aproximadamente 15 minutos forma uma casca (*shell*) sobre o modelo.

d) O endurecimento da resina (cura) se completa quando a placa é colocada em uma estufa com temperaturas entre 350 °C a 450 °C.

e) Após 2 ou 3 minutos, a casca é extraída do modelo por meio de pinos extratores.

f) Essa sequência corresponde à produção da metade de um molde, sendo assim, para obter um molde inteiro é necessário colar duas metades e inserir os machos quando necessário e o vazamento é feito por gravidade.

Figura 1.13 | Etapas do processo de fundição em casca ou *shell*



Fonte: Kiminami, Castro e Oliveira (2013, p. 46).

As peças fundidas por *Shell Molding* apresentam excelente acabamento superficial, o molde apresenta boa estabilidade dimensional, a liberação de gases é fácil e ocorre durante a solidificação do metal e o método é adequado para produzir peças pequenas e de formatos complexos, mas, em contrapartida, possui um custo mais elevado.



**Refleta**

O processo de fundição em casca por *Shell Molding* apresenta características muito diferentes do processo de fundição em areia verde. Reflita sobre essas diferenças, compare e responda quais são as principais vantagens e desvantagens de ambos os processos? Com base nas informações encontradas, para a fabricação de uma estátua em bronze, usada como enfeite mesa, qual dos dois processos (areia verde e *Shell Molding*) seria mais adequado?

### **Controle de Qualidade de Peças Fundidas**

Depois de solidificadas as peças fundidas são desmoldadas e passam por acabamento. As etapas de acabamento envolvem a retirada dos canais de vazamento e do massalote, seguidos da retirada do excesso de material na superfície, tratamento térmico e/ou usinagem (SOARES, 2000). Sempre que uma etapa é finalizada a peça deve passar por um tipo de inspeção, ou seja, controle de qualidade que pode ser por ensaios não destrutivos, dimensional, pesagem, comportamento mecânico e microestrutural. Os ensaios não destrutivos são inspeção visual, líquido penetrante e partícula magnética que avaliam a possibilidade de existir

descontinuidades superficiais. Adicionalmente também podem ser por ultrassom ou raio X, que fazem avaliação no interior da peça.

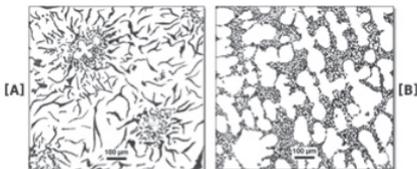
As inspeções dimensionais e pesagem são feitas por amostragem tanto durante ajuste de projeto quanto em produção seriada (SOARES, 2000). Para a avaliação por ensaios mecânicos é necessária a extração de corpos de prova, que são amostras com geometria e dimensões normatizadas da região de massalote (SOARES, 2000). Esses ensaios podem ser de tração, compressão, dureza, fluência, flexão, fadiga, tenacidade, entre outros e podem ser executados em temperatura ambiente ou em simulação de algum tipo de ambiente agressivo, como corrosão, baixa temperatura, aquosa e/ou em alta temperatura. A microscopia tem como principal objetivo avaliar a microestrutura resultante bem como avaliar tamanho de grão, formação de precipitados e descontinuidades internas e podem ser microscopia ótica (MO), microscopia eletrônica de varredura (MEV) ou microscopia eletrônica de transmissão (MET).



## Exemplificando

A técnica metalográfica é uma ferramenta teste de viabilização de produto, pois amostras são extraídas do massalote logo após a solidificação e são lixadas, polidas, embebidas em algum reagente químico para revelar a microestrutura e analisadas. Com essa técnica avaliam-se as fases resultantes do processo de fundição ou até de tratamentos térmicos em metais, em ferros fundidos, por exemplo, avalia-se formação de um determinado tipo de grafita, formação de cementita, perlita, austenita, que são fases resultantes da ligação entre ferro e carbono. A formação dessas fases influencia diretamente na resistência mecânica do material, pois uma região com maior concentração de grafita torna-se mais dura que outra, gerando uma concentração de tensão localizada que pode, em casos extremos, desqualificar o produto fundido. A Figura 1.14 (a) mostra grafita do tipo B, que apresenta essas linhas radiais chamadas de veios em volta de núcleos com aspecto eutético, enquanto que na Figura 1.14 (b) está mostrada a grafita do tipo D, que apresenta esses veios pequenos e curtos no espaço interdendrítico em uma morfologia eutética.

Figura 1.14 | Imagens por microscopia ótica de ferros fundidos cinzentos em (a) grafita do tipo B e em (b) grafita do tipo D



Fonte: adaptada de Colpaert (2008, p. 571; 573).

Vamos continuar o processo de fundição do martelo de carne de alumínio em areia verde? Agora que o material escolhido já foi validado e o massalote foi devidamente projetado vamos desenvolver um memorial descritivo, para seu superior, com todas as etapas a serem desenvolvidas. Você já sabe que a empresa F&A Fundição, pela qual foi contratado, tem seu ramo consolidado em fundição em areia verde, e para tal procedimento cinco etapas devem ser desenvolvidas conforme a metodologia descrita abaixo:

**1ª Etapa – Preparação da areia:** como vimos na seção anterior, a fabricação dos moldes em areia verde deve ser feita com a mistura entre 75% a 90% de areia, 25% a 10% argila e água formando uma massa moldável e fácil de ser compactada. De acordo com as especificações dadas por Torres (2004) para a fundição de ligas de alumínio em areia verde, as características da areia reparada estão descritas na Tabela 1.7.

Tabela 1.7 | Características recomendadas de areias de moldagem para fundição de ligas de alumínio em areia verde

Umidade (%)	Permeabilidade	Compressão Inicial (kg/cm <sup>2</sup> )	Argila (%)	Grão N°
6,5 a 8,5	7 a 13	0,4 a 0,5	10 a 16	220 a 160

Fonte: Torres (2004, p. 44).

A umidade é uma característica dada devido à presença de água, que atua como um aglomerante para a mistura de areia e argila, de tal maneira que se forme uma massa de moldagem fácil, já a permeabilidade é requerida para que os gases resultantes da entrada no metal do molde sejam expulsos e é adquirida de acordo com o tamanho do grão da areia, sendo assim, quanto maior a granulação maior a permeabilidade e para o caso em questão a granulação deve ser entre 220 a 160. A porcentagem de argila a ser agregada na mistura deve ser entre 10% a 16% com referência na quantidade de areia e quando a etapa de compactação for iniciada, a pressão inicial deve ser a mencionada na Tabela 1.7.

Com a areia devidamente misturada seguimos para a próxima etapa, de preparação do molde.

**2ª Etapa – Preparação do Molde:** considere que a F&A Fundição sempre trabalhou com caixa de molde em madeira devido à sua boa funcionalidade e baixo custo e é dividida em duas partes: a superior e a inferior. Inicialmente, a areia deve ser compactada na parte inferior e o modelo do martelo predefinido na seção anterior posicionado, em seguida a caixa superior é encaixada, a areia colocada e compactada, dando assim o formato da peça a ser fundida.

**3ª Etapa – Canais de Vazamento (Sistema de Alimentação):** com a areia da caixa superior compactada é chegada a hora de posicionar os modelos dos canais de vazamento. Para tal atividade, depois que o molde estiver estável, ou seja, seco e resistente, a caixa superior e o modelo devem ser retirados e os canais de vazamento e massalote são moldados. Para tanto, todo o sistema de alimentação deve ser devidamente calculado, pois assim o metal líquido terá um vazamento adequado e permitirá que os fenômenos de solidificação sejam direcionados para o massalote, como desejado. Variáveis importantes a serem calculadas aqui são: o tempo, a velocidade e a área de vazamento. Vamos iniciar os cálculos a partir do tempo de vazamento utilizando a equação (1), onde o fator de segurança é calculado pela razão entre a fluidez ( $F$ ) da liga de alumínio, que é um valor constante e tabelado pelo grau de superaquecimento é obtido pelas mesmas condições e Torres (2004, p. 45) sugere os seguintes valores para tais variáveis:

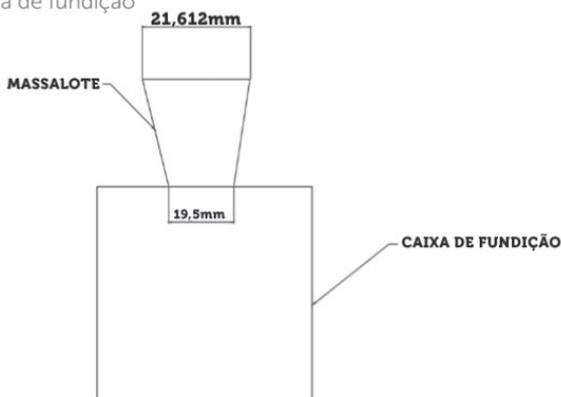
$K_f = \frac{F}{40} = \frac{50}{40} = 1,25$  A maior espessura ( $T$ ) a ser considerada é de 4,5 cm, que foi dada na situação-problema 1.1 e, em suma, para a fundição de um martelo de carne a massa ( $m$ ) a ser considerada é de aproximadamente 0,600 kg, portanto calcula-se:

$$t = K_f (1,4 + 0,7144 \times T) \times \sqrt{m \times 10^{-3}} = 1,25 (1,4 + 0,7144 \times 4,5) \times \sqrt{0,6}$$
$$t = 3,57s$$

O próximo passo consiste em determinar a área de vazão ( $a$ ) e para isso você precisa determinar a velocidade média de

vazamento ( $V_m$ ) de acordo com o posicionamento dos canais de vazamento localizado na parte superior da caixa de fundição, como mostra Figura 1.15. Esse posicionamento indica que o sistema de vazamento atuará diretamente sobre o local onde a peça será formada no molde e foi escolhido por não se tratar de peças grandes e complexas permitindo, assim, um vazamento rápido, direto e que preencherá todos os espaços vazios do molde. Assim, pela Figura 1.15, constata-se que a altura da peça acima do nível de ataque é igual a 0 - considere a altura total disponível no sistema igual a 50 cm.

Figura 1.15 | Representação da posição do canal de vazamento na parte superior da caixa de fundição



Fonte: elaborada pela autora.

Assim, aplica-se a Equação 1.2:

$$V_m = \frac{\sqrt{2 \times g}}{2} \times \left(1 + \sqrt{\frac{h_0}{h_1}}\right) \times \sqrt{h_1} = \frac{\sqrt{2 \times 980 \text{ cm/s}^2}}{2} \times \left(1 + \sqrt{\frac{1 - 0}{50}}\right) \times \sqrt{50}$$

$$V_m = 22,13 \times (2) \times 7,07 = 312,97 \text{ cm/s}$$

Por fim, calcula-se a área de vazão ( $a$ ) considerando a massa de 0,600 kg e a densidade da liga ( $\rho$ ) de alumínio já definida na Seção 1.1 de

$$a = \frac{m}{(\rho \times V_m \times t)} = \frac{600 \text{ g}}{\left(2,7 \left(\frac{\text{g}}{\text{cm}^3}\right) \times 312,97 \left(\frac{\text{cm}}{\text{s}}\right) \times 3,57 \text{ s}\right)} = \frac{600}{3.016,71} = 0,20 \text{ cm}^2$$

**4ª Etapa – Vazamento do metal líquido:** com o molde pronto chegou o momento de vazarem o material fundido. Para que não haja influência da composição química entre o material da panela, a liga de alumínio deve ser derretida em uma panela de aço que possui temperatura de fusão muito superior, em torno de 1.538 °C. A descida desse metal líquido pelo sistema de alimentação é determinada com cálculo de vazão do metal líquido ( $v$ ), determinado pela razão entre o volume da peça e o tempo de vazamento ( $t$ ), portanto aplica-se:

$$V = \frac{m}{\rho} = \frac{600g}{2,7 \left( \frac{g}{cm^3} \right)} = 222,22 cm^3. \text{ Assim: } V = \frac{v}{t} = \frac{222,22 cm^3}{3,57s} = 62,25 \frac{cm^3}{s}$$

**5ª Etapa – Desmoldagem e Acabamento:** com o material solidificado e resfriado, as caixas devem ser abertas e o martelo desmoldado. Em seguida, os canais de vazamento e o massalote devem ser retirados e podem ser extraídos corpos de prova que são amostras com dimensões padronizadas por normas, para a realização de ensaios mecânicos e análise química.

## Avançando na prática

### Sistema de Alimentação na Fundição

#### Descrição da situação-problema

Considere que você trabalha em uma empresa de fundição que fabrica peças de ferro fundido. Durante o processo de fabricação foi identificado uma falha no sistema de alimentação durante o vazamento do metal líquido. Como você sabe, o vazamento do metal líquido nas cavidades de moldagem só é possível com um sistema de alimentação devidamente projetado e instalado de tal forma que o vazamento do metal líquido deve ser calmo e permita que a contração por solidificação e a formação do rechupe seja direcionado para o massalote, resultando em produto final sem defeitos. Diante do problema seu gerente acredita que durante a elaboração do projeto de fundição a velocidade média de vazão, o volume da peça e a área de vazão foram calculados errados e, portanto, o molde está mal projetado. Por isso ele solicita que você refaça estes cálculos e entregue um relatório. Considere o posicionamento do sistema de vazamento mostrado na Figura 1.16 e os dados de densidade ( $\rho$ ) e a massa da liga ( $m$ ), fluidez ( $F$ ) e a espessura ( $T$ ) estão dados abaixo. A partir das fórmulas dadas acima determine a velocidade de vazamento ( $V_m$ ), o volume ( $v$ ), a área e a vazão ( $a$ ) desse material.

$$\begin{array}{lll}
 m=25\text{kg} & h_0=400\text{mm} & g=980\text{cm/s}^2 \\
 \rho=7,25\text{g/cm}^3 & h_1=550\text{mm} & F=40\text{cm} \\
 & & T=3\text{cm}
 \end{array}$$

Figura 1.16 | Representação da posição do sistema de vazamento na lateral esquerda da caixa de fundição



Fonte: elaborada pela autora.

O primeiro passo é o dimensionamento dos sistemas de canais a partir das Equações 1.1, 1.2, 1.3, 1.4, e 1.5:

$$t = K_f (1,4 + 0,7144 \times T) \times \sqrt{m \times 10^{-3}} \quad (1.1)$$

$$V_m = \frac{\sqrt{2 \times g}}{2} \times \left(1 + \sqrt{\frac{h_0}{h_1}}\right) \times \sqrt{h_1} \quad (1.2)$$

$$a = \frac{m}{\rho \times V_m \times t} \quad (1.3)$$

$$V = \frac{m}{\rho} \quad (1.4)$$

$$V = \frac{v}{t} \quad (1.5)$$

### Resolução da situação-problema

Diante do erro de projeto identificado, perceba que você deve refazer os cálculos solicitados para que você entregue o memorial de cálculos ao seu gerente. Avaliando os valores dados de altura total disponível no sistema ( $h_1$ ), e altura da peça acima do nível de ataque ( $h_0$ ) mostrados na Figura 1.16, podemos determinar a velocidade média por:

$$V_m = \frac{\sqrt{2 \times g}}{2} \times \left(1 + \sqrt{1 - \frac{h_0}{h_1}}\right) \times \sqrt{h_1}$$

$$V_m = \frac{\sqrt{2 \times 980 \text{ cm/s}^2}}{2} \times \left(1 + \sqrt{1 - \frac{40}{55 \text{ (cm)}}}\right) \times \sqrt{55 \text{ (cm)}}$$

$$V_m = 22,13 \times 1,5223 \times 7,4161 = 249,84 \text{ cm/s}$$

O volume é determinado pela relação entre a massa e a densidade do material.

$$V = \frac{m}{\rho} = \frac{25000}{7,25} = 3448,28 \text{ cm}^3$$

Para o cálculo da área de fundição é necessário que estime o tempo e vazamento que está diretamente relacionado com a fluidez do material. Para ferros fundidos o valor do coeficiente de segurança é 1, o que corresponde ao valor da fluidez, portanto:

$$K_f = \frac{F}{40} = \frac{40}{40} = 1$$

Sendo assim, o cálculo do tempo de vazamento é dado por:

$$t = K_f (1,4 + 0,7144 \times T) \times \sqrt{m \times 10^{-3}} = 1 (1,4 + 0,7144 \times 3) \times \sqrt{25000 \times 10^{-3}} = 17,71 \text{ s}$$

A partir de agora temos todas as variáveis para o cálculo da área total dos canais:

$$a = \frac{m}{(\rho \times V_m \times t)} = \frac{25000 \text{ (g)}}{\left(7,29 \frac{\text{g}}{\text{cm}^3} \times 249,84 \frac{\text{cm}}{\text{s}} \times 17,71 \text{ (s)}\right)} = \frac{2500}{32.255,81} = 0,77 \text{ cm}^2$$

## Faça valer a pena

**1.** A fundição de peças com cavidades e reentrâncias é feita com a utilização de machos que podem ser fabricados em metal, madeira e areia. Eles precisam ser previstos em projeto e previamente localizados na caixa de moldar (CHIAVERINI, 1995).

Escolha a alternativa correta sobre a sequência de fundição de uma peça com a utilização de um macho simples:

- Projeto, marcação, molde, vazamento e macho.
- Marcação, projeto, molde, macho e vazamento.

- c) Molde, marcação, projeto, macho e vazamento.
- d) Projeto, marcação, molde, macho e vazamento.
- e) Molde, projeto, macho, marcação e vazamento.

**2.** O processo de fabricação de macho pode ser executado por dois métodos: em caixa fria (*cold box*) e em cura quente (*heat cured*). Ambos métodos são empregados com a mistura de areia aglomerada com resinas (SOARES, 2000). Considere as afirmações de I a V:

I. O processo de macharia em caixa fria é realizado com areia aglomerada com resinas ou silicato de sódio cuja cura é realizada em temperatura ambiente.

II. O método de cura quente é utilizado na fundição de metais que possuem alto índice de fluidez, pois permite a reprodução de detalhes, entretanto, resultam em um acabamento mediano.

III. A fabricação de machos em caixa fria consiste na mistura da areia com resinas do tipo uretêmica/amina, furânica/SO<sub>2</sub> ou acrílica/epoxy, adensada dentro de uma caixa de macho, seguindo-se pela passagem de ar seco ou com gaseamento de CO<sub>2</sub> e adição de um tipo básico de amina que é pulverizado junto ao gás de arraste polimerizando a resina.

IV. O método de fundição em Shell Molding é proveniente do processo por caixa fria.

V. Na produção de machos por cura quente utiliza-se menor quantidade de resinas, quando comparado com o método de caixa fria.

Marque a alternativa que apresenta todas as afirmações verdadeiras:

- a) II – III – V
- b) II – IV – V
- c) II – III – IV
- d) I – II – IV
- e) I – III – V

**3.** O aperfeiçoamento na utilização de areia para a produção de moldes e machos de fundição teve um grande avanço tecnológico, com a aplicação entre 3% a 10% de resinas como aglomerante, associadas ao aquecimento e para o processo de fundição por Shell Molding são utilizadas areias de excelente qualidade sem argila e resinas do tipo poliéster, ureia formaldeído (SOARES, 2000; KIMINAMI; CASTRO; OLIVEIRA, 2013). Portanto, considere as afirmações de I a V:

I. Devido ao avanço tecnológico do método de fabricação de machos e moldes com cura quente a etapa de compactação foi eliminada.

II. Os modelos e os sistemas de canais de alimentadores são feitos em metal e fixados em uma placa que é presa na máquina e aquecida por meio de bicos de gás até atingir a temperatura de trabalho entre 200 °C

e 250 °C.

III. O calor separa a resina que envolve os grãos de areia e depois de aproximadamente 15 minutos forma uma casca sobre o modelo.

IV. O processo de Shell Molding corresponde à produção de metade de um molde, sendo assim, a outra metade deve ser colada e o vazamento feito por gravidade.

V. O endurecimento da resina (cura) se completa quando a placa é colocada em uma estufa com temperaturas entre 350 °C a 450 °C.

Marque a alternativa correta que apresenta todas as afirmações verdadeiras:

- a) Somente a afirmação I.
- b) As afirmações I – II – III – V.
- c) As afirmações I – III – IV – V.
- d) As afirmações I – II – IV - V.
- e) Somente a afirmação V.

# Seção 1.3

## Fundição de Precisão

### Diálogo aberto

Nas seções anteriores, você desenvolveu o projeto para fundir um martelo de carne de alumínio e determinou que o material estava adequado sob os pontos de vista químico, físico e mecânico e que o método de fundição em areia verde é adequado. O início desse processo de fabricação se dá com a execução do projeto de fundição e para isso você dimensionou o massalote e descreveu as suas etapas a partir da preparação da areia com quantidades entre 75% a 90% de areia, 25% a 10% argila e água para formar uma massa moldável e fácil de ser compactada. Em seguida, descreveu a fabricação do molde, dimensionou o sistema de alimentação, determinou a vazão necessária do metal líquido e, por fim, a desmoldagem e o acabamento. Considere que todos os parâmetros foram apresentados em um memorial descritivo para seu gerente, que aprovou todos os resultados e metodologias propostas. Agora, dando sequência ao desenvolvimento de suas atividades na empresa F&A Fundição, considere que para finalizar a avaliação do procedimento e melhor controle de qualidade foram vazados dois martelos de carne, um com o metal líquido vazado em torno de 670 °C e outro a 770 °C. Uma das peças apresentou defeitos de fundição internos, como bolhas e trincas, segregação de sílica e de escória em camadas logo abaixo da superfície e falta de preenchimento em regiões distantes à posição do massalote no modelo. A outra peça apresentou-se de boa qualidade em que será necessário apenas limpeza e acabamento. Com base nos conhecimentos adquiridos nesta seção considere que seu gestor solicitou um relatório de avaliação completa de todo o processo de fundição elaborado e desenvolvido e do controle de qualidade das peças fundidas, portanto será necessário que você responda às seguintes perguntas: Quais são as possíveis causas das descontinuidades resultantes nos martelos? Quais são os melhores métodos de avaliação e identificação dessas descontinuidades? Quais os métodos para evitar cada uma delas?

### Não pode faltar

#### *Fundição de Precisão (Microfusão)*

O processo de microfusão é utilizado na fundição de peças com

precisão dimensional, por isso também é chamado de fundição de precisão. Nesse processo podem ser fundidas ligas de alumínio, níquel, cobre, magnésio, aço e aço inoxidável para produção de peças estruturais para a indústria aeronáutica, equipamentos do ramo alimentício, médico e odontológico, peças de automóvel, peças de decoração, joias e utensílios domésticos.

Assim como os demais processos, a fundição de precisão consiste em produzir um molde a partir de um modelo, em seguida o metal líquido é vazado e quando solidificado é desmoldado, entretanto, sua diferença consiste em que tanto o molde como o modelo são destruídos depois da produção das peças. Adicionalmente, esse processo tem como principais características a fabricação de peças com formatos complexos, acabamento perfeito e tolerâncias estreitas.

O processo de fundição de precisão tem seu início na fabricação dos modelos de cera, que podem ser feitos com duas técnicas: em matriz metálica ou por prototipagem rápida. A matriz metálica é fabricada após a elaboração do projeto da peça a ser fundida, nesse momento deve ser considerado sua vida útil, qualidade e eficácia na produção de modelos (BRASIL; MARTINEZ; NASCIMENTO FILHO, 2002). Depois de pronta é feita a injeção da cera líquida na cavidade da matriz, que possui a forma e as dimensões da peça a ser fundida.

No processo de prototipagem rápida os modelos são obtidos por adição sucessiva de material, camada por camada, até se obter o modelo pretendido. As peças obtidas por esses processos apresentam irregularidades na superfície, esse defeito é diretamente proporcional à espessura da camada, podendo ser reduzido com operações de acabamento (LINO; LEMOS NETO, 2000).

A utilização desse processo aumenta os custos diretos de produção, pois utiliza um software de desenho em 3D e o equipamento de prototipagem tem custo bem relevante (LINO; LEMOS NETO, 2000), portanto seu uso ainda não é tão promissor quanto em molde metálico.



**Pesquise mais**

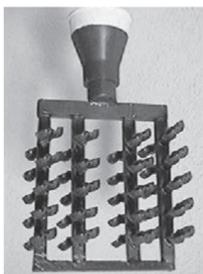
Acesse o link abaixo e veja como são fabricados por prototipagem rápida os modelos para fundição de precisão. Disponível em: <<https://www.youtube.com/watch?v=bf7Hlbe8sc>>. Acesso em: 12 abr. 2017.

Os modelos feitos em cera serão derretidos assim que os moldes para fundição estiverem prontos e, por isso, esse processo também pode ser chamado de Fundição em Cera Perdida. Segundo Brasil, Martinez e Nascimento Filho (2002), os modelos devem possuir dimensões cerca de 3% maiores que da peça final devido a 1,5% da contração da cera e 1,5% da contração do material da matriz metálica.

As principais propriedades exigidas para a cera estão correlacionadas principalmente com seu comportamento no estado líquido, ou seja, deve ser líquida ou viscosa o suficiente para ser injetada facilmente no molde metálico de tal maneira que preencha todo o molde, facilidade na montagem e baixo ponto de fusão para ser derretida, realizar a deceragem do modelo e ser reciclada.

São produzidos separadamente modelos de cera das peças e dos canais de vazamento e são unidos utilizando um ferro quente ou espátula, formando assim o "modelo árvore". A Figura 1.17 mostra esse modelo pronto onde foram fixados 40 modelos de peças em quatro modelos de canais de vazamento.

Figura 1.17 | Modelo árvore onde foram fixados os modelos de cera



Fonte: Brasil, Martinez e Nascimento Filho (2002, p. 69).

### ***Fabricação dos Moldes de Fundição de Precisão***

Os moldes de fundição de precisão são feitos pela imersão do modelo árvore em uma pasta ou lama refratária. Os modelos devem ser mergulhados em excesso nesse material para que se forme uma camada uniforme e resistente e, em seguida é recoberto por pulverização com um material cerâmico granulado mais grosso, chamado estuco, formando uma casca refratária mais espessa.

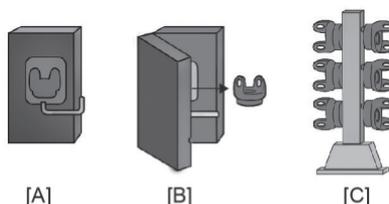
Esse processo é repetido de 5 (cinco) a 10 (dez) vezes de tal forma que a casca refratária obtenha uma espessura entre 5 (cinco) a 15 (quinze) milímetros e que resista aos esforços gerados pela saída da cera

derretida durante a deceragem e pela entrada do metal líquido, sendo que este último deve ser suportável até a solidificação das peças (BRASIL; MARTINEZ; NASCIMENTO FILHO, 2002).

As Figuras 1.18; 1.19 e 1.20 mostram as etapas do processo de fundição por cera perdida a partir da matriz (CHIAVERINI, 1995; BRASIL; MARTINEZ; NASCIMENTO FILHO, 2002; KIMINAMI, CASTRO, OLIVEIRA, 2013).

Inicialmente, na Figura 1.18 (a) a cera líquida é injetada na matriz para a produção do modelo e dos canais de vazamento. A Figura 1.18 (b) mostra que quando o modelo é endurecido é retirado da matriz e os modelos são montados nos modelos de canal de alimentação formando um conjunto chamado árvore, como mostrado na Figura 1.18 (c).

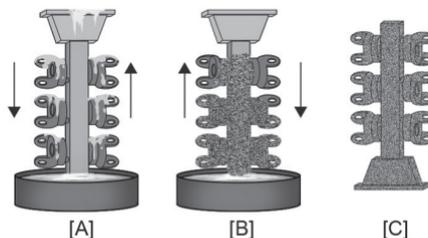
Figura 1.18 | Ilustrações das etapas do processo de fundição de precisão. (a) Injeção da cera, (b) modelo de cera, (c) montagem dos modelos (árvore)



Fonte: Adaptada de Kiminami, Castro e Oliveira (2013, p. 49).

A Figura 1.19 (a), (b) e (c) mostra as etapas subsequentes da preparação do molde, sendo que em (a) o modelo é mergulhado em uma pasta ou lama refratária, em (b) o modelo é pulverizado com partículas cerâmicas granuladas chamada estuco. Essa etapa é chamada de estucagem e é repetida várias vezes até que a casca refratária tenha espessura o suficiente para resistir aos esforços gerados durante a deceragem e o vazamento do metal.

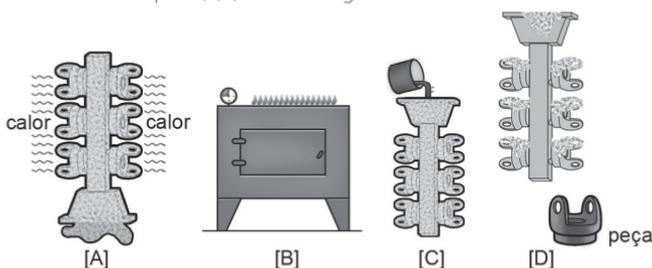
Figura 1.19 | Ilustrações das etapas do processo de fundição de precisão. (a) recobrimento com suspensão cerâmica, (b) pulverização com partículas cerâmicas, (c) molde completo



Fonte: Adaptada de Kiminami, Castro e Oliveira (2013, p. 49).

Na Figura 1.20 são mostradas as etapas finais do processo de fundição por cera perdida, em (a) o modelo árvore é inserido em um forno de aquecimento sob pressão chamado autoclave, onde os modelos de cera são derretidos. Posteriormente, em (b), o molde é submetido à sinterização, que tem o objetivo de fortalecer a casca cerâmica e a retirada de todo o resíduo de cera que ainda esteja no interior do molde. Em (c), com o molde ainda quente, o metal é vazado e finalmente em (d), depois que a peça se solidifica, o material do molde é quebrado para que as peças sejam retiradas, rebarbadas e limpas.

Figura 1.20 | Ilustrações das etapas do processo de fundição de precisão. (a) fusão da cera em autoclave (deceragem), (b) sinterização do molde cerâmico, (c) vazamento do metal líquido, (d) desmoldagem



Fonte: Adaptada de Kiminami, Castro e Oliveira (2013, p. 49).



## Assimile

A sinterização é um procedimento no qual o modelo, após a compactação, é submetido à temperatura elevada em um forno chamado autoclave. Esse procedimento tem como principal finalidade o aumento dimensional dos grãos e por consequência a redução de vazios, resultando em paredes com menor porosidade e melhor acabamento superficial das peças fundidas.

As principais vantagens da fundição por cera perdida envolvem:

- Possibilidade de produzir grande quantidade de peças.
- Fabricação de peças com formatos complicados, que seriam difíceis de serem produzidos pelos processos convencionais de fundição.
- Reproduz detalhes precisos de construção como cantos agudos e paredes finas.
- As peças fabricadas por esse método apresentam maior precisão dimensional e superfícies bem-acabadas e por isso não há necessidade de se preocupar em utilizar ligas de usinagem fácil.

- Pode ser feito um controle rigoroso da estrutura do material fundido, para garantir o controle preciso das propriedades mecânicas da peça.

Como desvantagem apresentam custo elevado em função da complexidade do produto e das ligas metálicas utilizadas no processo, se forem fabricados pequenos lotes de peças o custo também aumenta, os ciclos de fabricação são mais longos comparados a outros processos de fundição e o peso das peças não deve ser superior a 5 (cinco) quilogramas, pois a produção de peças mais pesadas podem quebrar o molde e prejudicar a produção.



**Pesquise mais**

Accesse o link abaixo e conheça mais sobre a fundição por cera perdida. Disponível em: <<https://www.youtube.com/watch?v=NZ1T-ZXYmzQ&t=632s>>. Acesso em: 15 abr. 2017.

### ***Defeitos de fundição***

A produção de peças em bom estado fabricadas por processos de fundição é possível apenas com excelente controle de qualidade durante o processamento e para que se obtenha bons resultados algumas providências devem ser tomadas:

1. Utilizar matérias-primas selecionadas e calculadas;
2. Avaliar a composição química antes do vazamento;
3. Projetar adequadamente o sistema de alimentação, evitando assim erosões nos moldes ou até explosões;
4. Aumentar o cuidado em relação ao desprendimento de gases.

Além da segregação, formação do rechupe e defeitos de solidificação que já vimos na Seção 1.1, também são defeitos comuns e provenientes da fundição o preenchimento incompleto dos moldes, superfície com excesso de rugosidade, intensa formação de escórias, formação de bolhas e poros, trincas ou excesso de dureza (TORRES, 2004).

O preenchimento incompleto ocorre quando o material é fundido à temperatura mínima de fusão, nestes casos a melhor solução é aumentar a temperatura, no entanto, para ligas ferrosas, esse problema pode ser minimizado aumentando o percentual de carbono e fósforo melhorando a fluidez do metal líquido.

Esse defeito também pode ocorrer em casos em que a areia do molde sofreu compressão excessiva, pois assim as paredes apresentam pouca porosidade e dificultam a saída de ar durante o vazamento do metal líquido. Nessa situação é importante produzir moldes mais altos e evitar a compressão excessiva durante a etapa de compactação de modo a facilitar a saída de ar.

A superfície rugosa pode ser resultado da utilização de areia muito grossa ou pelo fato do molde não ter sido comprimido o suficiente. Dessa forma o metal penetra nas paredes do molde e quando solidificado apresenta uma rugosidade excessiva. Esse problema é facilmente resolvido utilizando areias mais finas.

Na fundição a escória é a impureza que se separa dos metais durante a fusão do metal e deve ser descartada. Esse resíduo se concentra, sobretudo, nas paredes mais grossas da peça fundida e para que isso seja evitado, o sistema de alimentação deve ser projetado de tal maneira que os direcione para o massalote ou com a instalação de filtros na entrada do canal de vazamento.

As bolhas se formam na camada logo abaixo da superfície da peça solidificada chamada "camada subsuperficial" e resultam em regiões ocas. Essa descontinuidade é decorrente dos gases ou ar que ficam retidos dentro do molde devido à pouca porosidade dos moldes, pelo excesso de gases formados durante o vazamento do metal líquido ou pelo excesso de umidade do molde. Vale a pena ressaltar que os poros também se formam por esses mesmos motivos, entretanto, são vasos muito pequenos semelhantes a várias picadas de agulhas e também podem se concentrar na superfície da peça.

É recomendado que os moldes sejam secos adequadamente e que se utilize areias com maior granulação para facilitar o desprendimento e a liberação dos gases e do ar. Essas descontinuidades só são identificadas durante o processo de acabamento da peça ou quando são feitos ensaios não destrutivos de ultrassom ou raios X, que avaliam a parte interna da peça sem a necessidade de extração de amostras.

As trincas ocorrem durante a solidificação do material em peças que apresentam cantos agudos ou regiões com excesso de dureza. A velocidade de resfriamento nessas regiões é mais rápida que as demais e isso resulta na contração excessiva promovendo a formação de trincas.

A dureza de materiais metálicos é o resultado da presença de determinados elementos químicos como o Carbono, o Manganês e o

Fósforo. Para o caso dos aços ou ferros fundidos as regiões com elevada dureza correspondem aos locais que apresentam maior quantidade desses elementos dissolvidos e para que seja reduzida é conveniente que aumente a porcentagem de silício.



## Refleta

Considere que você trabalha em uma empresa de fundição de precisão que produz bases decoradas de abajur feitas de ligas de cobre e que foi identificado o defeito de fundição de falta de preenchimento em determinadas partes dos produtos. Na sua opinião, qual é o problema que está ocorrendo na linha de produção? Qual o melhor método para solucioná-lo?

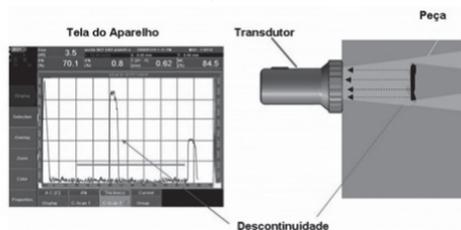


## Exemplificando

Uma técnica eficiente para detectar defeitos internos em uma peça fundida é o Ensaio Não Destrutivo por Ultrassom. Esse ensaio identifica descontinuidades como bolhas e trincas dentro de peças fundidas sem a necessidade de extrair amostras, o que danificaria a estrutura de uma peça pronta. Sua execução deve ser realizada por um inspetor de qualidade certificado, pois essa técnica requer grande conhecimento para preparação da peças, aplicação e interpretação (ANDREUCCI, 2016).

O ensaio consiste utilizar ondas ultrassônicas que incidem sobre uma falha e são captadas por um transdutor que envia o sinal para o aparelho, mostrando na tela em forma de um pulso ou eco como mostra a Figura 1.21.

Figura 1.21 | Princípio básico de inspeção em materiais por ultrassom



Fonte: Andreucci (2016, p. 4).

Observe que o transdutor emite a onda ultrassônica sobre a peça e quando há uma descontinuidade na sua direção, a onda retorna para o transdutor que emite um sinal para o aparelho e o converte em forma de picos mostrados na sua tela. Essa tela é calibrada em função da espessura do material ensaiado, portanto a altura do pico apresentado corresponde à posição da descontinuidade dentro da peça (ANDREUCCI, 2016).

## Sem medo de errar

Finalizadas as etapas de elaboração do projeto na empresa F&A Fundição, lembrando que você determinou que o material escolhido é adequado para a fundição em areia verde sob aspecto químico, físico e mecânico, calculou as dimensões do sistema de alimentação e do massalote, descreveu as etapas de desenvolvimento do processo especificando que a preparação da areia deve ser com quantidades entre 75% a 90% de areia, 25% a 10% de argila e água para formar uma massa moldável e fácil de ser compactada, estudou o desmolde e o acabamento e determinou a vazão necessária do metal líquido. Considere que o projeto foi verificado e aprovado por seus superiores imediatos e que para efeito de testes e avaliação do produto final, dois martelos de carne foram fundidos.

O primeiro martelo de carne a ser avaliado foi vazado com condição próxima à temperatura de fusão do alumínio, em torno de 670 °C e aplicando a técnica de inspeção visual foram identificados defeitos superficiais como trincas, camadas subsuperficiais de areia logo abaixo da superfície e falta de preenchimento formando apenas a metade do cabo. Utilizando a técnica de ultrassom foi detectada a presença de defeitos internos, diagnosticados como a possível formação de bolhas.

O material vazado com temperatura acima da temperatura de fusão, 770 °C, apresentou apenas uma pequena formação de rebarba facilmente extraída durante o procedimento de acabamento. É possível perceber que de maneira geral a temperatura teve influência significativa no vazamento de cada martelo de carne. Então, vamos avaliar cada situação para elaborar o relatório solicitados pelo seu gestor?

### ***1º Martelo de carne (Temperatura de Vazamento 670 °C)***

Como dito, esse martelo de carne apresentou os seguintes defeitos:

#### ***Trincas superficiais***

São defeitos de solidificação provenientes da concentração de dureza em algumas regiões ou da diferença de velocidade de resfriamento em relação às demais partes da peça.

Para ligas de alumínio a redução de dureza pode ser adquirida adicionando elementos de liga com Cobre e Estanho que aumentam a tenacidade, a resistência à corrosão e melhora a usinabilidade. Já a velocidade de resfriamento está diretamente ligada ao projeto do

sistema de alimentação, no entanto, considerando que a segunda peça se mostrou perfeita é possível que a localização do massalote e dos canais de vazamento não tenham sido posicionados ou dimensionados de acordo com as especificações do projeto.

### ***Excesso de areia na camada subsuperficial***

A segregação da areia na camada logo abaixo da superfície da peça indica que o molde sofreu erosões durante o vazamento e isso indica que a areia utilizada na fabricação do molde não estava adequada ou que não foram utilizadas as proporções adequadas de areia/argila/água. Esse problema não pode ser atribuído à compactação inadequada, pois a peça também apresentou a formação de bolhas internas, provenientes do excesso de compactação da areia entre outros motivos que vamos avaliar a seguir.

### ***Bolhas internas***

Esse defeito é resultado da dificuldade de liberação dos gases gerados pelo processo e pela retenção do ar dentro do molde que apresenta pouca porosidade, ou seja, os espaços entre os grãos de areia são muito pequenos ou inexistentes. Esse problema deve ser solucionado com aumento da granulação da areia ou com menos esforços aplicados durante a compactação, pois quando a areia está com compactação intensa não há espaço entre os grãos para a liberação dos gases para fora do molde. Para o caso da produção do martelo de carne pode-se concluir que o problema está no excesso de compactação, pois a areia utilizada foi a mesma para ambos os produtos.

### ***Falta de preenchimento no cabo***

É fato que esse defeito no martelo de cozinha foi desencadeado pela temperatura que o material foi vazado, associado com o mal dimensionamento do sistema de alimentação já mencionado anteriormente como fator causador das trincas superficiais. Para esse caso não será necessário alterar a composição química, pois o simples ajuste na produção do molde e o aumento da temperatura do material vazado a 770 °C resolverá esse e os demais problemas.

De maneira geral, pode-se concluir que aumentar a temperatura de vazamento do metal para 770 °C e seguir adequadamente as especificações do projeto de fundição resultará em martelos de carne adequados ao uso doméstico.

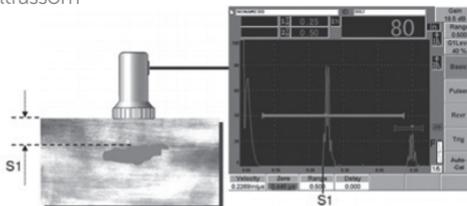
### Sistema de alimentação na fundição

#### Descrição da situação-problema

Após a fundição de blocos algumas técnicas de controle de qualidade devem ser realizadas tanto na superfície quanto no interior de cada produto. Considere que você trabalha em uma empresa de fundição de blocos de ferro fundido, como o responsável pelo controle de qualidade. Seu supervisor solicitou a inspeção interna de blocos do lote atual utilizando a técnica de Ensaio Não Destrutivo por Ultrassom, para evidenciar a possível presença de descontinuidades. Assim, um bloco foi cortado e foi verificada a presença de um defeito, como mostra a Figura 1.22.

Como a linha de produção da empresa produz em larga escala, se torna inviável o corte de todos os blocos e para evitar grandes perdas você decide solicitar a inspeção de todos os blocos, pois havia grandes chances de poucos apresentarem o mesmo defeito. Um dos blocos inspecionados apresentou defeito semelhante ao bloco cortado, cujo resultado também está mostrado na Figura 1.22, onde S1 corresponde à distância da superfície até o início da descontinuidade. Avalie o resultado mostrado abaixo de tal forma que evidencie conhecimentos sobre a técnica e entregue um relatório consistente ao seu supervisor.

Figura 1.22 | Medição da posição da descontinuidade utilizando o Ensaio Não Destrutivo de Ultrassom



Fonte: Andreucci (2016, p. 78).

#### Resolução da situação-problema

O Ensaio Não Destrutivo de Ultrassom consiste em detectar descontinuidades internas em produtos fundidos, soldados e conformados, e consiste em emitir ondas ultrassônicas que incidem sobre uma falha e são captadas por um transdutor que envia o sinal para o aparelho (ANDREUCCI, 2016). A Figura 1.22 mostra o transdutor posicionado de forma a detectar a posição da descontinuidade interna

cuja distância da superfície está representada pela distância  $S_1$ , mas como não é possível identificar a posição e a dimensão da descontinuidade sem o uso da técnica, o transdutor deve percorrer toda a superfície da peça com movimentos lentos para a direita ou para a esquerda e sempre que um pico aparecer na tela do equipamento, uma marca com giz deve ser feita na peça. Com uma avaliação baseada apenas na posição atual do transdutor é possível concluir que essa peça apresenta uma descontinuidade interna, sendo assim, ela deve ser retida do lote de blocos fundidos e descartada.

## Faça valer a pena

**1.** No processo fabricação de microfusão podem ser fundidas ligas de alumínio, níquel, cobre, magnésio, aço e aço inoxidável para produção de peças estruturais ou de decoração. Sobre esse processo é correto afirmar:

I. São fundidas peças com precisão dimensional e excelente acabamento superficial, o que reduz custos de produção por muitas vezes não serem usinados.

II. O processo é muito eficiente na produção de peças pequenas do ramo alimentício, médico e odontológico, pois produz peças de formatos complexos.

III. Assim como os demais processos de fundição, suas etapas consistem em produzir um molde a partir de um modelo de metal, em seguida o metal líquido é vazado e quando solidificado o molde é destruído.

IV. Seus modelos podem ser fabricados com a injeção de cera em um molde metálico ou por prototipagem rápida.

As afirmativas corretas são:

a) I – II – III – IV.

b) I – II – III.

c) I – II – IV.

d) I – III – IV.

e) Apenas a afirmação II.

**2.** Os modelos de peças para a fundição de precisão são feitos em cera e suas propriedades estão correlacionadas principalmente com seu comportamento no estado líquido, pois deve ser injetada facilmente no molde metálico. Sobre os modelos de peças de cera é correto afirmar:

- a) São produzidos em conjunto com os canais de vazamento, formando uma única peça de fundição.
- b) São derretidos apenas depois do procedimento de sinterização do molde e sempre que possível a cera é reutilizada.
- c) São produzidos separadamente em conjunto com os modelos de canais de vazamento e depois que o molde está pronto são derretidos e a cera reutilizada.
- d) São fáceis de serem produzidos, pois não há preocupação com suas dimensões, uma vez que o processo de fabricação por cera perdida não apresenta contrações durante o resfriamento.
- e) São produzidos separadamente dos modelos de canais de vazamento e devem ser montados utilizando um ferro quente ou espátula formando o modelo árvore.

**3.** O processo de fundição de cera perdida, assim como os demais processos de fundição, consiste em produzir um molde a partir de um modelo, vazamento do metal líquido, solidificação, desmoldagem e acabamento. Seu diferencial está na precisão dimensional e nas tolerâncias estreitas dos produtos prontos. A sequência das etapas do processo de fundição de cera perdida é:

- a) Modelos de cera – estucagem – conjunto árvore – deceragem – sinterização – vazamento – desmoldagem – acabamento.
- b) Modelos de cera – conjunto árvore – estucagem – sinterização – deceragem – sinterização – vazamento – desmoldagem – acabamento.
- c) Modelos de cera – conjunto árvore – estucagem – sinterização – deceragem – vazamento – desmoldagem – sinterização – acabamento.
- d) Modelos de cera – conjunto árvore – estucagem – deceragem – sinterização – vazamento – desmoldagem – acabamento.
- e) Modelos de cera – conjunto árvore – deceragem – estucagem – sinterização – vazamento – desmoldagem – sinterização – acabamento.

# Referências

ASKELAND, Donald R. **Ciência e engenharia de materiais**. Cengage Learning. São Paulo, 2008. Cap.9, p. 246-271.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 6834**: Alumínio e suas ligas – classificação da composição química. Rio de Janeiro: ABNT, 2006.

\_\_\_\_\_. **NBR 7823**: Alumínio e suas ligas – chapas – propriedades mecânicas. Rio de Janeiro: ABNT, 2015.

ANDREUCCI, Ricardo. **Ensaio por ultrassom**. São Paulo: Abendi, 2016.

Baldam, R. de L. **Fundição**: processos e tecnologias correlatas. 2. ed. São Paulo: Érica, 2014.

BRASIL, Alex Nogueira; MARTINEZ, Carlos Barreira; NASCIMENTO FILHO, Jair. Projeto e construção de um modelo de turbina Pelton em escala reduzida. In: **2º Encontro Nacional do Colégio de Engenharia Mecânica da Ordem dos Engenheiros**, João Pessoa, 2002, p. 1-10.

CALLISTER Jr., Willian D. **Ciência e engenharia de materiais**: uma introdução. 8. ed. São Paulo: LTC, 2012. Cap. 14. p. 435-437.

CASOTTI, Bruna, P.; BEL Fº, Egmar D.; CASTRO, Paulo, C. **Indústria de fundição**: situação atual e perspectivas. BNDES. Biblioteca Digital. Metalurgia, 2011. p. 141-160.

CHIAVERINI, Vicente. **Tecnologia mecânica**: processos de fabricação e tratamento. 2. ed. São Paulo: Pearson, 1995. Vol. II, p. 1-25.

COLPAERT, Hubertus. **Metalografia dos produtos siderúrgicos comuns**. Rio de Janeiro: COPPEUFRJ, 2008.

FISCHER, Ulrich; GOMERINGER, Roland; HEINZLER, Max; KILGUS, Roland; OESTERLE, Stefan; PARTZOLD, Heinz; STEPHAN, Andreas. **Manual de tecnologia metal mecânica**. 2. ed. São Paulo: Edgard Blucher, 2011.

KIMINAMI, Claudio Shyinti; CASTRO, Walman Benício; OLIVEIRA, Marcelo Falcão. **Introdução aos processos de fabricação dos produtos metálicos**. São Paulo: Edgard Blucher: 2013. Cap. 2, p. 29-45.

LINO, Fernando Jorge; LEMOS NETO, Rui Jorge de. **A prototipagem rápida na indústria nacional**. 2º Encontro Nacional do Colégio de Engenharia Mecânica da Ordem dos Engenheiros, Coimbra: 2000, p. 4.15-4.22.

MINISTERIO DE MINAS E ENERGIA – MME. **Elaboração do plano duodecenal (2010-2013) de geologia, mineração e transformação mineral**. Secretaria de Geologia, Mineração e Transformação Mineral – SGM. Relatório Técnico 61 – perfil da Fundição. [s.l.] 2009. p. 9-18.

SOARES, Gloria Almeida. **Fundição**: Mercado, processos e metalurgia. Rio de Janeiro: Ed. COPPEUFRJ. 2000. 123p. ISBN: 852850.

TORRES, Jorge. **Manual prático de fundição e elementos de prevenção da corrosão**. São Paulo: Hemus, 2004.

VILHENA, Pedro Miguel Cirurgião Leite. **Resinas de caixa-fria modificadas estruturalmente com propriedades técnicas e meio ambientais melhoradas – sistema biodiesel**. Dissertação de Mestrado. Universidade do Porto. Departamento de Engenharia Metalúrgica e de Materiais. Porto:2009. 96p.

WIKIMEDIA. **Martelo de carne**. Metal; sem local; década de 1940; Doação Lydia S. Dniprovey; Acervo Museu da Imigração. Magda Leão Pires, 2016. Disponível em: <[https://commons.wikimedia.org/wiki/File:MI00850\\_Martelo\\_de\\_carne.jpg](https://commons.wikimedia.org/wiki/File:MI00850_Martelo_de_carne.jpg)>. Acesso em: 28 mar. 2017.

# Processos de usinagem e soldagem

### Convite ao estudo

Dentre tantos processos de fabricação existentes destacam-se as operações de usinagem e soldagem que, por muitas vezes, a qualidade de um produto final depende da aplicação de ambos.

A usinagem é um procedimento que consiste na remoção de material por deformação plástica de tal maneira que confere ao material uma forma predefinida em projeto, utilizando matéria-prima, ferramentas e máquinas-ferramentas, como tornos, fresas, retificas e furadeiras. Ao abordarmos esse tema serão apresentados os principais processos de usinagem, como torneamento, furação, alargamento, fresamento, roscamento e retificação. Adicionalmente serão descritos os principais materiais de ferramentas de corte como aço-carbono, aços-rápidos, ligas fundidas, metal duro e uma rápida apresentação das ferramentas fabricadas de cerâmicas, de diamante e os cermets. Você também aprenderá a identificar que para cada tipo de processo de usinagem e material a ser usinado é necessário aplicar um método de refrigeração e lubrificação, evitando assim desgaste da ferramenta e excelente acabamento superficial da peça. Por fim, e não menos importante, a respeito dos processos de usinagem, você aprenderá a fazer os cálculos necessários para desenvolver um plano de usinagem considerando o tipo de usinagem e de ferramenta a serem adotados.

O processo de fabricação de soldagem nada mais é do que a junção por fusão de metais no estado sólido. Nesta seção você aprenderá sobre os diferentes tipos de soldagem e a avaliação do controle de qualidade de produtos fabricados por esse método. Serão apresentadas as diferentes regiões resultantes

para o processo realizado com deposição de material, ou seja, quando há utilização de insumos e para o processo feito por esforço mecânico, como solda por atrito ou por fricção.

Nesse contexto, o objetivo desta unidade é ajudar você, que trabalha em uma empresa chamada BigTruck Ltda., que atua na fabricação de carretas. Por se tratar de uma empresa de grande porte todas as etapas de fabricação de seus produtos são desenvolvidas dentro da empresa que se dividiu em setores de produção. Considere que você foi contratado para ser o responsável pela fabricação do eixo traseiro que faz a conexão dos conjuntos de rodagens nas duas extremidades laterais do veículo. Esses eixos são maciços e têm sua seção transversal circular, contando com degraus e encostos que servem para a montagem dos elementos mecânicos como rolamentos, retentores, cubos, buchas, rodas, entre outros. Portanto, sua função será desenvolver e avaliar o processo de fabricação desses eixos, para isso você aprenderá a escolher o melhor método de usinagem, desenvolverá o plano de usinagem especificando os seus parâmetros e as ferramentas para a operação de cada seção e a possibilidade de fazer algum tipo de solda de reparo ou junção de partes. Para que seu trabalho seja eficiente e conclusivo você deverá responder às seguintes perguntas: para o produto fabricado, qual é o melhor tipo de usinagem a ser empregado? Quais são os parâmetros e ferramentas que devem ser utilizados no processo? Caso surja alguma avaria no produto posso corrigir o problema aplicando uma solda de reparação e, se sim, qual procedimento devo seguir?

# Seção 2.1

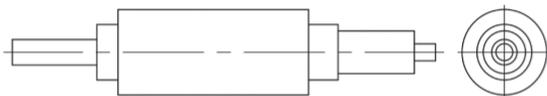
## Processos de usinagem

### Diálogo aberto

Caro(a) aluno(a), nesta seção você aprenderá sobre os diferentes métodos de usinagem e soldagem como alternativas eficientes de fabricação. Dentre tantas técnicas de usinagem serão abordados os métodos mais comuns e utilizados em empresas do ramo metalomecânico, como furação, alargamento, retificação e, claro, os que mais se destacam, torneamento e fresamento. De maneira geral é importante que você também conheça os materiais utilizados para a fabricação das ferramentas, pois sabe-se que há interação química entre a peça e a ferramenta durante a retirada do material, devido à intensidade do atrito gerado, a tendência é que haja aumento de temperatura, sendo necessária a refrigeração e a lubrificação. Assim, é importante que você entenda a importância da aplicação do fluido de corte para cada processo e da escolha do material de ferramenta correto.

Com base nessas informações, considere que você trabalha em uma empresa que atua na fabricação de carretas chamada BigTruck Ltda. Trata-se de uma empresa de grande porte que executa todas as etapas de produção dos seus produtos, que vai desde a seleção e preparação dos materiais até a montagem e acabamento final das carretas. Considere que você foi contratado para ser o encarregado pela fabricação do eixo auxiliar que faz a conexão dos conjuntos de rodagens nas duas extremidades laterais do veículo. Esses eixos são maciços e têm sua seção transversal circular, contando com degraus e encostos que servem para a montagem dos elementos mecânicos como rolamentos, retentores, cubos, buchas, rodas, entre outros. A primeira etapa do seu trabalho, conforme solicitado pelo seu gestor, será verificar qual o melhor processo de usinagem a ser adotado, listar e propor os procedimentos iniciais do plano de usinagem do eixo a partir da matéria-prima que a empresa fornece e para isso você deverá elaborar o plano de usinagem com as especificações do projeto do eixo auxiliar mostrado na Figura 2.1.

Figura 2.1 | Projeto inicial do eixo auxiliar



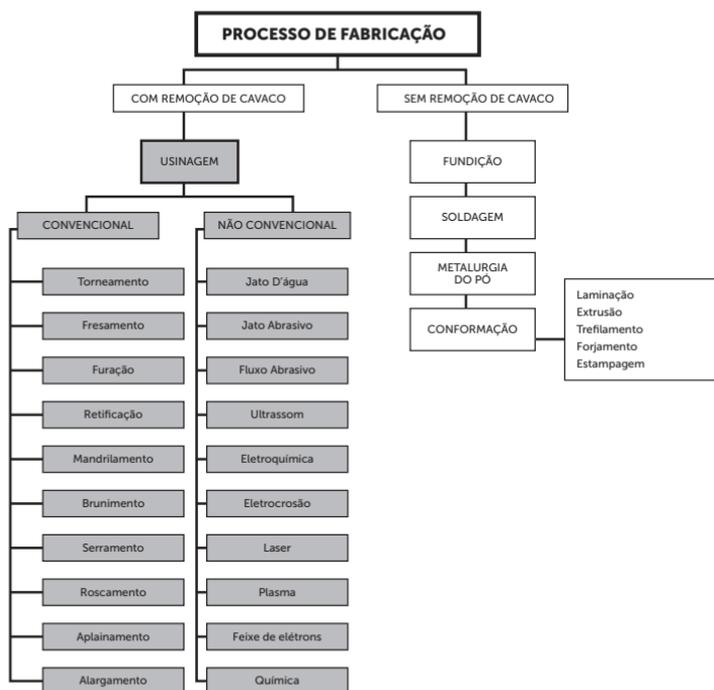
Fonte: elaborada pela autora.

## 1 Introdução aos processos de usinagem

Fabricar é transformar matérias-primas em produtos acabados utilizando os mais diversos tipos de processos envolvendo a seleção de requisitos técnicos, por exemplo, a escolha de materiais, tipos de processos e insumos, sempre considerando o aspecto econômico de tal forma que os custos sejam minimizados para que o produto seja de boa qualidade e competitivo no mercado (COSTA, 2006; MACHADO et al., 2015).

De maneira geral, no que se diz respeito à fabricação de produtos metálicos, tais conceitos se baseiam em processos de fabricação com e sem a remoção de cavaco (COSTA, 2006). A Figura 2.2 mostra um fluxograma com a classificação dos processos de fabricação, destacando as principais operações de usinagem. Vale a pena ressaltar que aqui estudaremos apenas os métodos convencionais de usinagem.

Figura 2.2 | Classificação dos processos de fabricação



Fonte: Costa (2006, p. 5).

Os processos de fabricação com remoção de cavaco têm por objetivo conferir à peça forma, dimensões, acabamento ou ainda a combinação desses itens através da produção de cavacos.



## Assimile

Entende-se por cavaco a porção de material da peça, retirada pela ferramenta de corte, caracterizando-a por apresentar forma irregular. A Figura 2.3 mostra os possíveis tipos de cavacos formados durante o processo de usinagem de materiais metálicos. Os cavacos mais longos são desfavoráveis ao processo, pois podem se enrolar na peça e danificar o acabamento ou até a ferramenta, a situação mais favorável para evitar essas avarias é a produção de cavacos quebradiços e curtos. Adicionalmente, vale a pena ressaltar que quanto maior o comprimento e mais deformado for o cavaco, maior a ductilidade do material, por exemplo, o cavaco de hélice longa que apresenta extensa deformação plástica.

Figura 2.3 | Classificação dos processos de fabricação

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
FITA		HÉLICE					OUTROS		
FITA	EMARANHADO	HÉLICE PLANA	HÉLICE OBLÍQUA	HÉLICE LONGA	HÉLICE CURTA	HÉLICE ESPIRAL	ESPIRAL	VÍRGULA	ARRANCADOS
desfavorável		médio			favorável		médio		

Fonte: Costa (2006, p. 5).

## 2 Processos mecânicos de usinagem

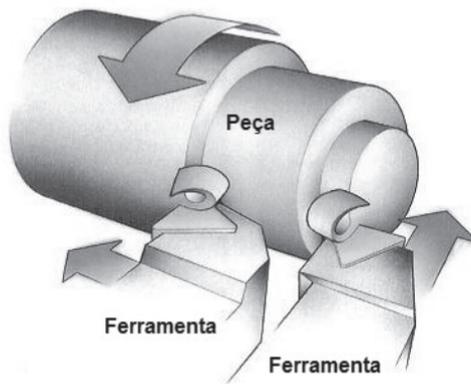
Na Figura 2.1 foram apresentados os tipos de usinagem convencionais que são executadas em máquinas-ferramentas por meio da movimentação mecânica de ferramentas e usinagem não convencional executada com a utilização de máquinas-ferramentas por meio de programação de comandos numéricos com o uso de ferramentas ou técnicas diversas, como jatos d'água, laser, plasma, entre outros (CHIAVERINI, 1995; COSTA, 2006).

A seguir serão descritos os principais processos de usinagem utilizados, como torneamento, furação, fresamento, roscamento e retificação (FERRARESI, 2014).

## 2.1 Torneamento

É o processo utilizado no desenvolvimento de produtos cilíndricos e/ou cônicos com auxílio de ferramentas que possuem uma superfície de saída do cavaco chamada de monocortante. A peça gira em torno de um eixo fixo de rotação da máquina e a ferramenta se desloca simultaneamente seguindo uma trajetória coplanar com o eixo referido (FERRARESI, 2014), como mostrado na Figura 2.4.

Figura 2.4 | Demonstração do processo de torneamento com movimentos de ferramenta axial e radial



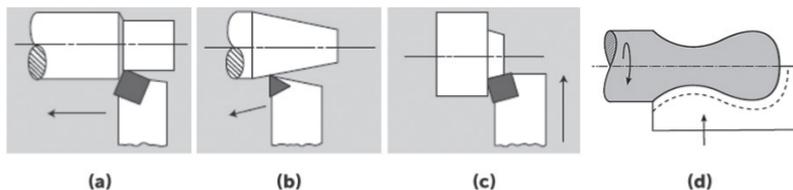
Fonte: <<http://www.usinagem-brasil.com.br/44-o-que-e-torneamento-/>>. Acesso em: 24 abr. 2017.

A ferramenta devidamente presa no porta-ferramentas penetra na peça seguindo uma trajetória que associada ao movimento rotativo de seu eixo permite o corte regular e contínuo do material devido à aplicação de uma força necessária para retirar o cavaco (FERRARESI, 2014; MACHADO et al., 2015; KIMINAMI; CASTRO; OLIVEIRA, 2013). A trajetória da ferramenta pode ser classificada em:

- Retilíneo – processo no qual a ferramenta se desloca seguindo uma trajetória retilínea de tal forma que o torneamento seja: cilíndrico, onde a ferramenta se desloca em uma trajetória paralela ao eixo principal de rotação da máquina (Figura 2.5 (a)), cônico, cuja ferramenta se desloca inclinada em relação ao eixo principal de rotação da máquina (Figura 2.5 (b)) ou radial, também chamada de faceamento, onde a trajetória da ferramenta é perpendicular ao eixo principal de rotação da máquina (Figura 2.5(c)).

- Curvilíneo – processo no qual a ferramenta se desloca seguindo uma trajetória curvilínea (Figura 2.5 (d)).

Figura 2.5 | Trajetórias da ferramenta durante a usinagem por de torneamento em (a) retilíneo cilíndrico, (b) retilíneo cônico, (c) retilíneo radial e (d) curvilíneo

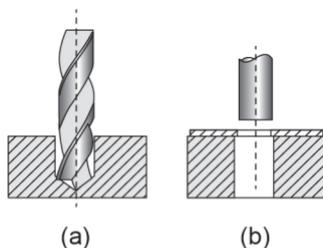


Fonte: Machado et al. (2015, p. 6).

## 2.2 Furação

É destinado à abertura de um furo cilíndrico numa peça com o auxílio de ferramentas chamadas de broca ou punção, acopladas a uma ferramenta (COSTA, 2006; FERRARESI, 2014; MACHADO et al., 2015; KIMINAMI; CASTRO; OLIVEIRA, 2013). A Figura 2.6 mostra uma representação desse processo de usinagem, a ferramenta ou a peça gira e se desloca simultaneamente em uma trajetória retilínea coincidente ou paralela ao eixo principal de rotação da ferramenta.

Figura 2.6 | Forma de furação de materiais em (a) furação com broca helicoidal, (b) furação com punção



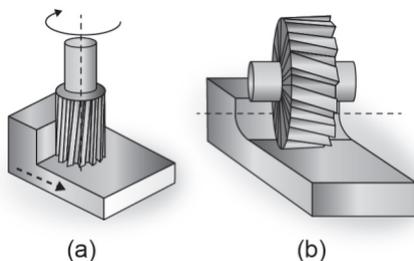
Fonte: Kiminami, Castro e Oliveira (2013, p. 120).

## 2.3 Fresamento

É a usinagem destinada à obtenção de superfícies utilizando ferramentas que possuem mais de uma saída de cavacos, por isso são chamadas de ferramentas multicortantes (FERRARESI, 2014). Nesse processo de usinagem a ferramenta faz movimentos de rotação e translação ao longo do material, ou seja, a ferramenta gira e a peça ou ferramenta se desloca em uma trajetória qualquer que podem ser:

- Cilíndrica de topo – destinado à usinagem de superfície plana e paralela ao eixo de rotação da ferramenta (Figura 2.7 (a)).
- Frontal – destinado à usinagem de superfície plana perpendicular ao eixo de rotação da ferramenta (Figura 2.7 (b)).

Figura 2.7 | Exemplos de fresamento em (a) de topo e em (b) frontal

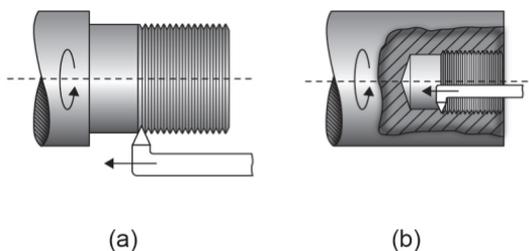


Fonte: Machado et al. (2015, p. 6).

## 2.4 Roscamento

Processo de usinagem destinado à obtenção de roscas internas ou externas executados em superfícies cilíndricas ou cônicas (FERRARESI, 2014). Nesse processo de usinagem são produzidos filetes com o objetivo de fixar uma peça na outra. A Figura 2.8 exemplifica em (a) o roscamento externo e em (b) o roscamento interno.

Figura 2.8 | Exemplos de roscamento em (a) externo e em (b) interno



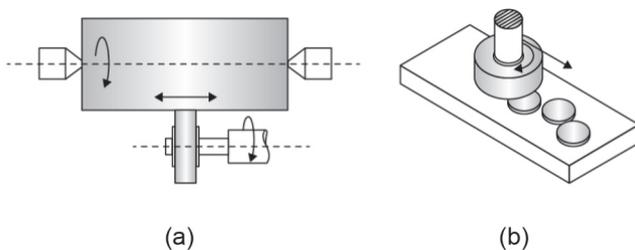
Fonte: Machado et al. (2015, p. 13).

## 2.5 Retificação

É utilizada para a usinagem por abrasão, ou seja, a remoção do material é feita esfregando a ferramenta chamada rebole, contra a peça de tal maneira que o atrito remove material da peça. Basicamente a retificação pode ser tangencial e frontal.

A retificação tangencial é executada nas partes internas ou externas em superfícies cilíndricas, cônicas, planas ou em perfis, a Figura 2.9 (a) mostra a retificação tangencial em uma peça cilíndrica. A retificação frontal mostrada na Figura 2.9 (b) é executada com a face do rebolo em uma superfície plana com movimentação retilínea ou circular.

Figura 2.9 | Exemplos de retificação em (a) tangencial e em (b) frontal



Fonte: Ferraresi (2014, p. XLII).

### 3 Materiais para ferramentas e refrigeração

O uso adequado de ferramentas de corte é muito importante em todos os tipos de processos de usinagem, por essa razão suas características e condições precisam ser criteriosamente avaliadas e conhecidas (COSTA, 2006; FERRARESI, 2014). Uma das principais características é a escolha do material da ferramenta, que de maneira geral deve apresentar a resistência à compressão, excelente dureza à quente, tenacidade, resistência ao desgaste e estabilidade química. Os principais materiais utilizados em ferramentas de usinagem são aço-carbono, aço rápido, ligas fundidas, metal duro, cerâmicas, diamante e as pastilhas de usinagem compostas de materiais cerâmicos e metálicos chamadas cermets.

#### 3.1 Aço-carbono

São ferramentas produzidas com teores de Carbono entre 0,5% a 1,4% com adições de Cromo (Cr), Vanádio (V) e Tungstênio (W), são de baixo custo, executam a usinagem com facilidade, possuem elevada dureza e resistência ao desgaste (FERRARESI, 2014).

Quando sua composição química vai de 0,5% até 0,75% de carbono são utilizados, por exemplo, na usinagem de madeira que requerem grande tenacidade e dureza conveniente. As ferramentas com composição entre 0,75% a 0,90% de Carbono são utilizadas

para usinagem de materiais duros e por isso precisam apresentar boa resistência ao desgaste e ao choque (COSTA, 2006; FERRARESI, 2014).

Para as ferramentas compostas com teor de Carbono entre 0,90% a 1,10% a sua ponta de corte apresenta grande dureza, boa resistência ao desgaste e relativa tenacidade e, por fim, mas não menos importante, para ferramentas com 1,10% a 1,4% de Carbono a ponta de corte apresenta máxima dureza e excelente resistência ao desgaste (COSTA, 2006; FERRARESI, 2014).

### 3.2 Aços-rápidos

Os aços-rápidos com adição de Cobalto são conhecidos como os aços super-rápidos, pois possuem alta resistência ao desgaste, excelente dureza à quente e baixa tenacidade. Para as ferramentas de aço-rápido com adição de Nitreto de Titânio (TiN) quando utilizados com temperaturas abaixo de 550 °C possuem alta dureza, estabilidade química e mínima adesão e baixo atrito na ponta de corte da ferramenta (FERRARESI, 2014).

Os aços-rápidos sinterizados possuem estrutura uniforme e fina em toda seção transversal da ferramenta, além do controle rigoroso da composição química. Essas ferramentas dificilmente apresentam a formação de trincas, o que confere maior vida útil e ótimas condições de usinagem (COSTA, 2006).



#### Refleta

Caro aluno, quais seriam as principais diferenças entre aço-carbono e aços-rápidos, pensando em materiais para ferramentas e refrigeração?

### 3.3 Ligas fundidas

São ligas compostas com baixos teores de Ferro com até 18% de Tungstênio, 34% de Cromo, 45% de Cobalto e 3% de Ferro. Quando aquecido a temperaturas extremas o material amolece e quando resfria retoma a sua dureza original (COSTA, 2006; FERRARESI, 2014).

### 3.4 Metal duro

Esse material de ferramenta apresenta uma excelente combinação de dureza quando utilizado em temperatura ambiente e em altas temperaturas, possui excelente resistência ao

desgaste e boa tenacidade. Sua composição básica é de Carbeto de Tungstênio (WC), Carbeto de Titânio (TiC), carbeto de Tântalo (TaC) e Carbeto de Nióbio (NbC) (COSTA, 2006; FERRARESI, 2014).

Devido à grande variedade de composições que esse material pode ter essa classificação de ferramentas é dividida em grupos chamados P, M e K. As ferramentas do grupo P são empregadas na usinagem de metais e ligas ferrosas que apresentam cavacos contínuos, já o grupo M para usina de metais e ligas ferrosas que apresentam cavacos longos e curtos, e por fim o grupo K para usinas de metais ferrosos e não ferrosos que apresentam cavacos curtos (COSTA, 2006).



**Pesquise mais**

Conheça mais sobre a classificação e seleção das ferramentas de metal duro. Disponível em: <[http://www.cimm.com.br/portal/material\\_didatico/4816#.WRG9fOErLIU](http://www.cimm.com.br/portal/material_didatico/4816#.WRG9fOErLIU)>. Acesso em: 24 abr. 2017.

Algumas ferramentas apresentam elevada dureza e excelente resistência em altas temperaturas e a grandes esforços gerados durante o processo de usinagem (MACHADO et al., 2015; KIMINAMI; CASTRO; OLIVEIRA, 2013). Essas ferramentas apresentam resistência ao desgaste e podem ser empregadas em operações de corte intensas. São ferramentas de cerâmica que apresentam baixa condutividade térmica, de diamante que também podem ser utilizadas na usinagem de metais não ferrosos e os cermets, que são ferramentas compostas de material cerâmico e metálico, que além da dureza também têm tenacidade considerável e resistência ao desgaste (FERRARESI, 2014).

Como já mencionado, o processo de usinagem gera grandes esforços devido ao atrito gerado entre a peça e a ferramenta. Esse atrito em altas velocidades de corte gera aquecimento e pode danificar a peça ou a ferramenta, sendo assim, para evitar tais problemas são utilizados fluidos de corte, que além de refrigerar a peça e a ferramenta têm por objetivo remover cavacos, melhorar o acabamento superficial e reduzir os parâmetros de usinagem e a dilatação térmica da peça (CHIAVERINI, 1995).

A seleção do fluido de corte é feita de acordo com o material a ser usinado e a operação de usinagem, como mostra o Quadro 2.1. Por exemplo, se você for torneiar uma peça de ferro fundido podem ser utilizados óleos solúveis em água, óleos de corte ou até ser usinado a seco.

Quadro 2.1 | Seleção do fluido de corte para usinagem de materiais metálicos

Graus de Severidade	Material Operação	Aços	Ferro fundido e temperado	Cu e ligas	Al e ligas	Ligas de Mg
1	Brochar	A ou B	B	A	A	A
2	Roscar	A	A ou B	A	A	A ou D
3	Alargar	A ou B	D ou A	D ou A	A	A
4	Furar	B ou A	D ou B	D, A ou B	A ou B	D ou A
5	Fresas topo cilíndrico	A	A ou B	-	-	-
6	Fresas	B, C ou A	D ou B	D, B ou A	A ou B	D ou A
7	Tornear	A, B ou C	D, B ou A	D ou B	B, A ou D	D ou A
8	Aplainar	B	B	B	B	B
9	Brunir / Lapidar	A	A	-	-	-
10	Retificar	B, C ou A	C ou B	C ou B	B	-
11	Serrar	B	D ou B	D ou A	A ou B	D ou A

**Legenda:** A – óleo de corte (óleos compostos com alto, médio e baixos teores de enxofre e/ou substâncias); B – emulsão (óleos solúveis em água); C – soluções (fluidos sintéticos); D – a seco (sem adição de fluidos).

Fonte: adaptado de Fischer et al. (2011, p. 292).



## Exemplificando

O dimensionamento de peças durante os processos de usinagem é um fator importante a ser considerado para tanto, instrumentos de medição devidamente calibrados como paquímetros, micrômetros são usados.

O paquímetro é utilizado para verificar dimensões lineares internas, externas e de profundidade. Os micrômetros têm como principal característica a precisão para medição de peças cilíndricas e de formas complexas.

## Sem medo de errar

Iniciando as suas funções na empresa BigTruck Ltda., conforme solicitado pelo seu gestor, vamos realizar seu trabalho de avaliação e desenvolvimento da usinagem dos eixos auxiliares de carretas. Inicialmente você precisa avaliar o projeto do eixo mostrado na Figura 2.1 e a matéria-prima para usinagem para iniciar a elaboração do plano de usinagem.

Em seguida dará início à elaboração do plano de trabalho, mostrado no Quadro 2.2, que deve fornecer todas as informações necessárias para que o operador da máquina usine o material de maneira adequada. Lembre-se que nesta primeira etapa você fará

as considerações iniciais sobre o procedimento, então, atente-se às informações em destaque.

O produto, como você já sabe, é um eixo auxiliar de carretas que será fabricado pelo processo de usinagem de torneamento, pois trata-se de uma peça cilíndrica que pode ser torneado com movimento retilíneo.

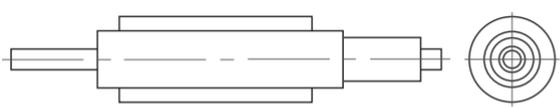
As operações que deverão ser executadas devem ser preenchidas na seção de operações realizadas e como de praxe a primeira etapa de usinagem de um material no torneamento é de acertar suas faces, portanto, ambas extremidades da barra de aço devem ser acertadas por faceamento.

Primeiramente é feito um movimento de corte chamado de desbaste (comumente também chamado de “passe”), ou seja, uma camada pequena do material é retirada da seção longitudinal e como um lado da peça ficará presa na máquina e outra sofrerá a usinagem, inicialmente se executa o passe na parte que ficará presa e depois na parte livre para torneamento, sendo assim, a ação consiste em cilindrar na placa universal e posteriormente entre a placa e a ponta.

Os processos subsequentes consistem em desbastar o material de um lado até chegar na geometria e dimensões necessárias e posteriormente será torneado o lado que ficou preso na máquina.

Com base nesses dados, a parte inicial do plano de usinagem deve ser preenchido como as colunas mostradas em destaque abaixo:

Quadro 2.2 | Plano de usinagem do eixo auxiliar

<b>BIGTRUCK LTDA</b>		<b>Data:</b>
<b>Produto</b>	Eixo auxiliar	
<b>Tipo de procedimento</b>	Torneamento entre pontas	
<b>Operações a serem realizadas</b>	<ul style="list-style-type: none"><li>- Facear e fazer furo de centro</li><li>- Cilindrar entre a placa e ponta</li><li>- Desbastar o material nas medidas de cada seção</li></ul>	
<b>Máquina e acessórios</b>	Torno mecânico	
<b>Projeto:</b>		

Fonte: elaborado pela autora.

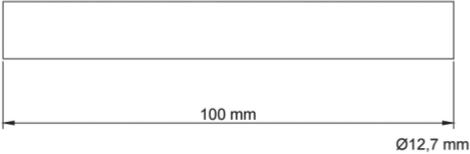
## Avançando na prática

### Eixo faceado

#### Descrição da situação-problema

Considere que você foi contratado por uma empresa metalomecânica especializada em usinagem por torneamento. Sua função será de facear uma barra de seção circular, como mostra a Figura 2.10, no entanto, ainda é necessário especificar o procedimento de usinagem, operações e os tipos de instrumentos de medição que você precisará para verificar se as medidas do material estão corretas. Com base nos seus conhecimentos sobre usinagem e de metrologia especifique cada um desses itens e apresente em um relatório para o seu gestor, conforme plano abaixo (Quadro 2.3).

Quadro 2.3 | Plano de usinagem de um eixo faceado a ser preenchido

Empresa:	Data:
Produto	Eixo faceado
Tipo de Procedimento	
Operações a serem realizadas	
Máquinas e Acessórios	
Instrumentos de Medição	
Características Técnicas:	
Projeto:	<p>Figura 2.10   Projeto do eixo faceado</p>  <p>O diagrama mostra um retângulo representando o eixo. Abaixo dele, uma linha horizontal com setas em ambas as extremidades indica o comprimento de 100 mm. Na parte inferior direita do retângulo, o diâmetro é especificado como Ø12,7 mm.</p>

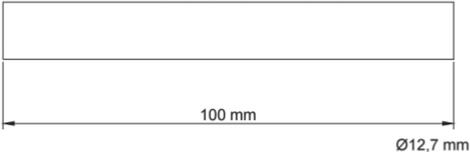
Fonte: elaborado pela autora.

#### Resolução da situação-problema

No relatório a ser entregue para o seu gestor, inicialmente você deve considerar que o processo de usinagem mais adequado é o torneamento, pois trata-se de facear as faces de um componente

cilíndrico. Por se tratar de redução de medida longitudinal você usará apenas o paquímetro como instrumento de medição e como a peça tem comprimento de 100 mm o paquímetro ideal é o de 150 mm. Assim o plano de usinagem requerido é preenchido, como mostram as colunas em destaque no Quadro 2.4:

Quadro 2.4 | Plano de usinagem de um eixo faceado a ser preenchido

Empresa:	Data:
Produto	Eixo faceado
Tipo de Procedimento	- Torneamento entre pontas
Operações a serem realizadas	- Facear 1° lado - Facear 2° lado
Máquinas e Acessórios	Torno Mecânico Horizontal Marca Magnum Cut Modelo BLC-1224B, Placa Universal de Três Castanhas
Instrumentos de Medição	- Paquímetro de 150 mm
Características Técnicas:	- Diâmetro admissível sobre o barramento: 320 mm - Distância entre as pontas: 600 mm - Curso do carro transversal: 100 mm - Diâmetro do furo do eixo árvore: 38 mm - Gama de velocidades: (6) 60 a 1.050 rpm - Número de roscas: 17 - Motor principal: 750 W
Projeto:	<p>Figura 2.10   Projeto do eixo faceado</p> 

Fonte: elaborado pela autora.

## Faça valer a pena

**1.** Usinagem é um procedimento que consiste na remoção de material por deformação plástica. Esse material removido é chamado de cavaco que apresentam formas irregulares e podem ser longos ou curtos. Os processos de fabricação de metais e ligas metálicas com remoção de cavaco envolvem:

- Fresamento, furação, torneamento, brunimento, plasma e soldagem.
- Aplainamento, serramento, brunimento, furação, conformação.
- Torneamento, fresamento, retificação, aplainamento e roscamento.
- Torneamento, retificação, ultrassom, eletroerosão e metalurgia do pó.

e) Serramento, mandrilamento, fundição, fluxo abrasivo e soldagem.

**2.** O torneamento é o processo utilizado no desenvolvimento de produtos cilíndricos ou cônicos com auxílio de ferramentas monocortantes.

I. Processo de usinagem destinado à produção de superfícies de revolução utilizando uma ou mais ferramentas.

II. Usinagem por torneamento no qual a ferramenta se movimenta segundo uma trajetória paralela ao eixo que a máquina gira é denominada Torneamento Curvilíneo de Desbaste.

III. O Torneamento Retilíneo Cônico é o processo de usinagem no qual a ferramenta se movimenta seguindo uma trajetória retilínea, inclinada em relação ao eixo de rotação da máquina.

IV. O Torneamento Curvilíneo é uma operação de usinagem destinada a obter nas peças as dimensões de desbaste iniciais.

Quanto ao processo de usinagem por torneamento pode-se dizer:

- a) I e IV estão corretas.
- b) I e III estão corretas.
- c) II e III estão corretas.
- d) III e IV estão corretas.
- e) Apenas IV está correta.

**3.** O \_\_\_\_\_ é o processo de usinagem destinado à obtenção de superfícies utilizando ferramentas \_\_\_\_\_ com movimentos de rotação e \_\_\_\_\_ onde a ferramenta se desloca em uma \_\_\_\_\_ qualquer.

Assinale a alternativa que completa corretamente a afirmativa acima:

- a) torneamento, multicortantes, translação, superfície.
- b) retificação, multicortantes, rotação, trajetória.
- c) furação, monocortantes, cilíndrico, superfície.
- d) fresamento, multicortantes, translação, trajetória.
- e) aplainamento, monocortantes, curvilíneo, trajetória.

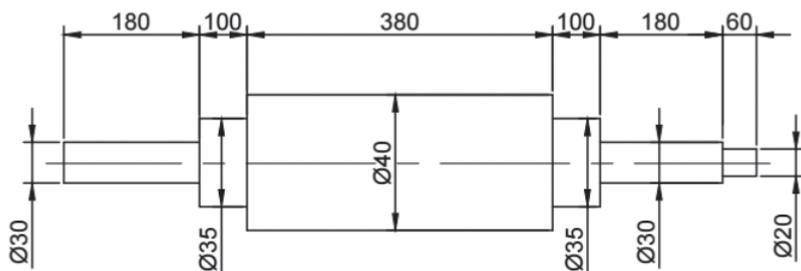
## Seção 2.2

### Operações de corte

#### Diálogo aberto

Nesta seção, você aprenderá como determinar os movimentos, direções e parâmetros de usinagem, dessa maneira, você poderá dar continuidade aos seus trabalhos na empresa BigTruck Ltda., onde você foi contratado para ser o encarregado da fabricação de eixos auxiliares que fazem conexão dos conjuntos de rodagens nas duas extremidades laterais do veículo. Esses eixos são maciços e têm sua seção transversal circular, contando com degraus e encostos que servem para a montagem dos elementos mecânicos como rolamentos, retentores, cubos, buchas, rodas, entre outros. Sua função será desenvolver e avaliar o processo de fabricação desses eixos. Na primeira demanda você determinou que o processo de usinagem a ser utilizado é o torneamento, por se tratar de uma peça cilíndrica e deu início ao plano de usinagem, entregando essa solicitação ao seu gestor. A sequência desse trabalho, conforme relatório pedido pelo supervisor da área, consiste em calcular os parâmetros de usinagem, como número de passes ( $N_p$ ), avanço ( $a$ ), penetração ( $P_n$ ), rotação ( $n$ ), potência de corte ( $P_c$ ) e tempo de corte ( $T_c$ ) para cada seção do eixo auxiliar especificado no projeto mostrado na Figura 2.11 e finalizar o plano de usinagem.

Figura 2.11 | Geometria e dimensões do eixo auxiliar a ser usinado



Dimensões em cm

Fonte: elaborada pela autora.

Para a entrega do seu relatório, é interessante que se desenvolva, de forma detalhada, os passos para os cálculos desses parâmetros e se utilize uma planilha de cálculos para facilitar seu trabalho, como mostra o Quadro 2.5. Note que para cada redução de seção do eixo auxiliar deverá ser dado um passe de acabamento.

Quadro 2.5 | Planilha para cálculo dos parâmetros de usinagem do eixo auxiliar

Planilha de cálculos para elaboração de plano de usinagem													
Produto	Material	d Inicial	a (mm/rev)		<b>BIGTRUCK LTDA</b>								
Comprimento total	Resistência (N/mm <sup>2</sup> )	Vc (1) (m/min)	Vc (2) (m/min)										
Operação	Ferramenta	d (mm)	n (rpm)	NP	L (mm)	Tc (min)	Pn (mm)	S	Senos X	h	Ks	Fc (N)	Pc (W)
Facear 1º lado	Desbaste e Facear (45°)		0			0,00	0		0,00	0	0	0	0
Facear 2º lado (na medida)	Desbaste e Facear (45°)		0			0,00	0		0,00	0	0	0	0
Desbaste Ø400 x 570mm	Desbaste e Facear (90°)		0			0,00	0		0,00	0	0	0	0
Desbaste Ø400 x 430mm	Desbaste e Facear (90°)		0			0,00	0		0,00	0	0	0	0
Cilindrar Ø360 x 340mm	Desbaste e Facear (90°)		0			0,00	0		0,00	0	0	0	0
<b>Acabamento Ø350 x 340mm</b>	<b>Desbaste e Facear (90°)</b>		<b>0</b>			<b>0,00</b>	<b>0</b>		<b>0,00</b>	<b>0</b>	<b>0</b>	<b>0</b>	<b>0</b>
Cilindrar Ø310 x 240mm	Desbaste e Facear (90°)		0			0,00	0		0,00	0	0	0	0
<b>Acabamento Ø300 x 240mm</b>	<b>Desbaste e Facear (90°)</b>		<b>0</b>			<b>0,00</b>	<b>0</b>		<b>0,00</b>	<b>0</b>	<b>0</b>	<b>0</b>	<b>0</b>
Cilindrar Ø210 x 60mm	Desbaste e Facear (90°)		0			0,00	0		0,00	0	0	0	0
<b>Acabamento Ø200 x 60mm</b>	<b>Desbaste e Facear (90°)</b>		<b>0</b>			<b>0,00</b>	<b>0</b>		<b>0,00</b>	<b>0</b>	<b>0</b>	<b>0</b>	<b>0</b>
Cilindrar Ø360 x 280mm	Desbaste e Facear (90°)		0			0,00	0		0,00	0	0	0	0
<b>Acabamento Ø350 x 280mm</b>	<b>Desbaste e Facear (90°)</b>		<b>0</b>			<b>0,00</b>	<b>0</b>		<b>0,00</b>	<b>0</b>	<b>0</b>	<b>0</b>	<b>0</b>
Cilindrar Ø310 x 180mm	Desbaste e Facear (90°)		0			0,00	0		0,00	0	0	0	0
<b>Acabamento Ø300 x 180mm</b>	<b>Desbaste e Facear (90°)</b>		<b>0</b>			<b>0,00</b>	<b>0</b>		<b>0,00</b>	<b>0</b>	<b>0</b>	<b>0</b>	<b>0</b>

d = diâmetro	n = rotação	Tc = tempo de corte	Ks = força Específica
X = ângulo de posição da ferramenta	NP = número de passes	Pn = penetração	h = espessura do cavaco
Fc = força de corte	PC = potência de corte	S = área de corte	a = avanço
Vc (1) = velocidade de corte para desbaste	Vc (2) = velocidade de corte para acabamento	Valor Calculado =	Valor Inserido =

Ferramenta metal duro	Avanço 0,2 - Vc 236
-----------------------	---------------------

Fonte: elaborado pela autora.

## Não pode faltar

**Máquinas-ferramentas convencionais e por controle numérico (CN)**

A execução dos processos de usinagem só é possível com o emprego das máquinas-ferramentas, que são próprias para cada uma das operações, por exemplo: para o torneamento podem ser utilizados os tornos convencionais, que são operados manualmente ou por comando numérico (CN) onde o torno é operado através de uma programação de computador, assim como para o fresamento utiliza-se a fresadora convencional ou por CN, para realizar furação a furadeira, para retificar a retificadora e assim por diante.



**Pesquise mais**

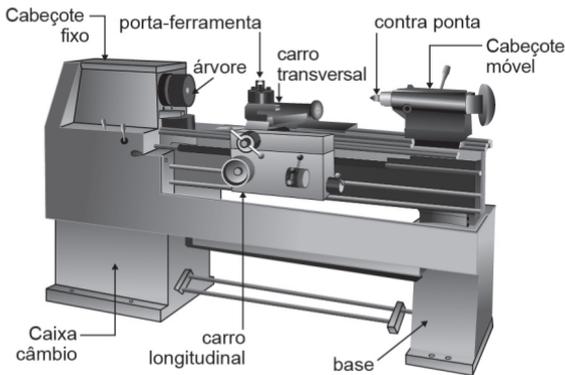
Máquinas automatizadas são amplamente utilizadas nos processos de usinagem com a utilização de máquinas-ferramentas comandadas por Controle Numérico (CN). Acesse o link indicado e aprenda sobre essa categoria de equipamentos. Disponível em: <<https://www.youtube.com/watch?v=0tzczaUc0e0s>>. Acesso em: 21 maio 2017.

## Torneamento

O torno convencional é uma ferramenta que possui um eixo e barramentos horizontais, destinada a trabalhar com uma ferramenta de corte e uma matéria-prima cilíndrica com movimento de rotação (CHIAVERINI, 1995; LOSEKANN, 2001; COSTA, 2006).

Barramentos são as superfícies planas e paralelas que suportam as partes principais dos tornos, seguindo como guia para o carro e o cabeçote móvel no deslizamento longitudinal (MACHADO et al., 2015). A Figura 2.12 mostra as principais partes de um torno convencional.

Figura 2.12 | Principais partes de um torno convencional

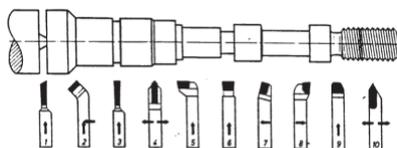


Fonte: <<http://mmborges.com/processos/USINAGEM/TORNEAMENTO.htm>>. Acesso em: 17 maio 2017.

A árvore, também conhecida como placa, é composta por três castanhas onde é fixado o material a ser usinado. Quando o material é muito comprido faz-se um furo de centro na face e são apoiados na contraponta (COSTA, 2006).

As ferramentas utilizadas na obtenção de peças no processo de torneamento possuem movimentos e avanços característicos para cada tipo de solicitação. A Figura 2.13 e o Quadro 2.6 mostram as ferramentas adequadas para cada operação de torneamento.

Figura 2.13 | Representação das geometrias das ferramentas utilizadas em operações de torneamento



Fonte: adaptado de Fundação Roberto Marinho (1998, p. 3).

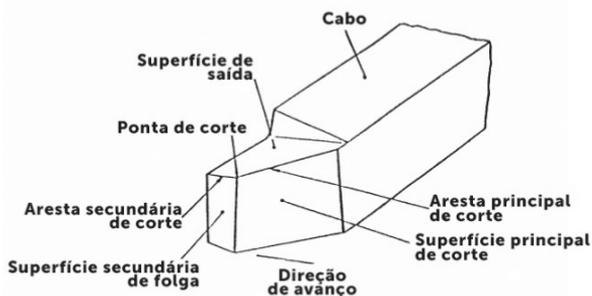
Quadro 2.6 | Classificação das ferramentas de torneamento

Ferramenta	Operações	Ferramenta	Operações
1	Cortar	6	Sangrar com grande dimensão
2	Cilindra à direita	7	Desbastar à direita
3	Sangrar	8	Cilindrar e facear à esquerda
4	Alisar	9	Formar
5	Facear à direita	10	Roscar

Fonte: adaptado de Fundação Roberto Marinho (1998, p. 3).

As ferramentas de torneamento devem apresentar excelente dureza à quente, ou seja, manter a resistência mecânica mesmo em altas temperaturas e também parâmetros geométricos e ângulos que determinam a direção do plano de remoção do material adequados (FERRARESI, 2014). A Figura 2.14 mostra os elementos da região de corte de uma ferramenta de usinagem.

Figura 2.14 | Elementos da região de corte de uma ferramenta de torneiar



Fonte: adaptada de Machado et al. (2015, p. 25).



**Refleta**

A intersecção entre as regiões de corte formam ângulos na ferramenta, sendo assim, quais são as características para cada plano de referência?

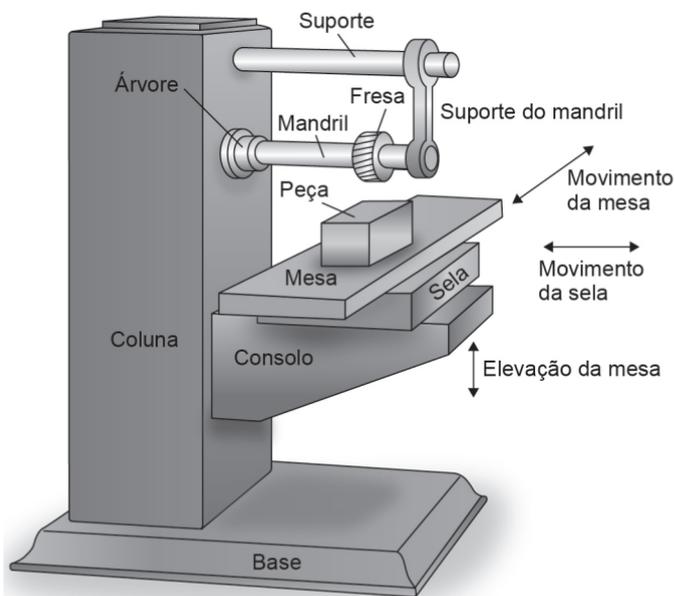
## Fresamento

A diferença entre o torneamento e o fresamento está na movimentação da máquina-ferramenta, enquanto que para o torneamento a peça cilíndrica gira e a ferramenta faz um movimento retilíneo, no fresamento convencional a peça prismática se movimenta

e a ferramenta que possui uma série de pontas de corte, chamadas de dentes, que removem o material da matéria bruta gira sem sair do lugar (MACHADO et al., 2015).

A fresadora é uma máquina-ferramenta especializada em cortar materiais com uma ferramenta chamada fresa, que possui diversas pontas de corte que em movimento rotativo e contínuo para pela matéria-prima e retira cavacos fragmentados até que a peça obtenha a geometria e dimensões necessárias (FERRARES, 2014). A Figura 2.15 mostra os componentes e os movimentos específicos de uma fresadora convencional. Essa máquina-ferramenta é basicamente composta por um mandril onde é fixada a fresa e a mesa que movimenta a peça tanto no sentido longitudinal e a sela faz o movimento transversal.

Figura 2.15 | Representação esquemática de fresa convencional

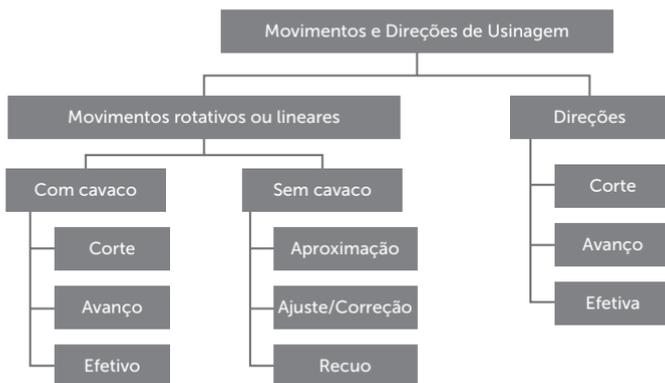


Fonte: Fundação Roberto Marinho (1998, p. 35).

## Movimentos e direções de corte nos processos de usinagem

O funcionamento das máquinas-ferramenta parte do princípio de que para se obter a peça desejada necessita-se realizar movimentos entre a peça e a ferramenta, portanto, ações como movimentos e suas direções devem ser definidos. A Figura 2.16 mostra um fluxograma sobre tais ações, que serão descritas a seguir.

Figura 2.16 | Classificação dos movimentos e direções de usinagem



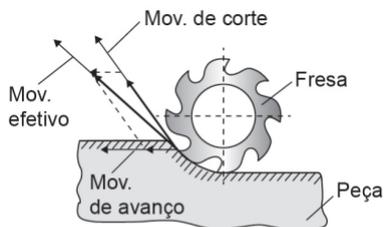
Fonte: elaborada pela autora.

Como você pode ver, o fluxograma classifica os movimentos nas operações de usinagem de acordo com a remoção ou não de cavacos. Os movimentos que causam a remoção de cavacos são conhecidos como movimento de corte, movimento de avanço e movimento efetivo.

O movimento de corte é realizado entre a ponta de corte e a peça, o movimento de avanço é realizado entre a peça e a ponta de corte e quando associado ao movimento de corte provoca a retirada contínua de cavaco, e por fim o movimento efetivo é a resultante dos movimentos de corte e de avanço realizados ao mesmo tempo (MACHADO et al., 2015).

Os movimentos que não formam cavacos são conhecidos como o movimento de aproximação da ponta cortante na peça, movimento de ajuste que determina a espessura de material a ser retirado, movimento de correção para compensar o desgaste da ferramenta e movimento de recuo, que é realizado após o término da usinagem (MACHADO et al., 2015). A Figura 2.17 exemplifica as direções dos movimentos de corte e de avanço e efetivo no fresamento.

Figura 2.17 | Classificação dos movimentos e direções de usinagem



Fonte: elaborada pela autora.

As direções dos movimentos que causam a retirada do cavaco são as direções de corte, de avanço e efetiva. A direção de corte corresponde à direção instantânea do movimento de corte, a direção de avanço à direção instantânea do movimento de avanço e, por fim, a direção efetiva corresponde à direção efetiva de toda a movimentação.



### Assimile

Todo método de processo de fabricação deve ser realizado de forma segura e com o máximo de atenção do trabalhador e do supervisor. Quando se trata dos processos de usinagem o operador da máquina sempre deve verificar se as ferramentas e as peças estão devidamente fixadas e assim que a máquina-ferramenta estiver em movimento não deve haver contato físico.

O operador não deve trabalhar com camisas de mangas compridas, joias e principalmente relógios, pulseira e anéis e, por fim, não se esqueça de usar os equipamentos de proteção individual (EPI) designados pelo técnico de segurança da empresa.

## Parâmetros de usinagem

Para a produção de peças usinadas é necessário que o material ou a ferramenta se movimente um em relação ao outro de acordo com parâmetros inseridos na máquina-ferramenta, como a velocidade de corte ( $V_c$ ), velocidade de avanço ( $V_a$ ), avanço ( $a$ ), tempo de corte ( $T_c$ ), penetração ( $P_n$ ), força de corte ( $F_c$ ) e potência de corte ( $P_c$ ).

**Velocidade de Corte ( $V_c$ ):** representa a rapidez com que essa operação é realizada e seu cálculo se dá de acordo com o tipo de operação, material da peça e da ferramenta, refrigeração e condições da máquina-ferramenta, portanto, é dada pela Equação 2.1.

$$V_c = \pi \times d \times n \left[ \frac{m}{\min} \right] \quad (2.1)$$

Onde  $d$  é o diâmetro da peça ou da ferramenta em milímetros e  $n$  é o número de rotação por minuto (rpm). Vale a pena ressaltar que a unidade de velocidade de corte é dada em ( $m/\min$ ), portanto, é necessária a conversão de unidades diâmetro ( $d$ ) para metro.

**Velocidade de Avanço ( $V_a$ ):** essa velocidade exerce forte influência na qualidade do acabamento superficial da peça e

corresponde à velocidade do ponto de referência da ponta cortante da ferramenta, seguindo uma direção e sentido de movimento:

$$V_a = a \times n \left[ \frac{mm}{min} \right] \quad (2.2)$$

A velocidade de avanço é obtida com cálculos de avanço ( $a$ ) diferentes para ferramentas monocortantes e multicortantes. O avanço ( $a$ ) de ferramentas monocortantes é dado pelo deslocamento da ferramenta ou a peça seguindo uma direção e é expresso em cada volta ( $\frac{mm}{volta}$ ) ou em cada curso da ferramenta ( $\frac{mm}{golpe}$ ) enquanto que o avanço para ferramentas multicortantes ( $ad$ ) é dado pelo número de facas ou de dentes presentes na ferramenta, portanto, a partir de então é calculado o avanço por dente expresso em ( $\frac{mm}{volta \times dente}$ ) ou ( $\frac{mm}{volta \times faca}$ ) dado pela Equação 2.3.

$$ad = \frac{a}{z} \quad (2.3)$$

Onde  $a$  é o avanço em ( $\frac{mm}{volta}$ ) e  $z$  corresponde ao número de dentes ou facas da ferramenta.

**Tempo de Corte ( $T_c$ ):** corresponde ao intervalo de tempo para a usinagem da peça e seu valor é expresso em minutos. O cálculo desse parâmetro é diferente para movimentos rotativos ou lineares. Para movimentos rotativos é dado pela Equação 2.4 onde  $N_p$  corresponde ao número de passes que é o número de vezes em que o percurso de avanço ( $L$ ) é realizado. Vale a pena ressaltar que deve ser adicionada uma folga de posicionamento da ferramenta no comprimento do percurso de avanço ( $L$ ), em geral cerca de 30 mm.

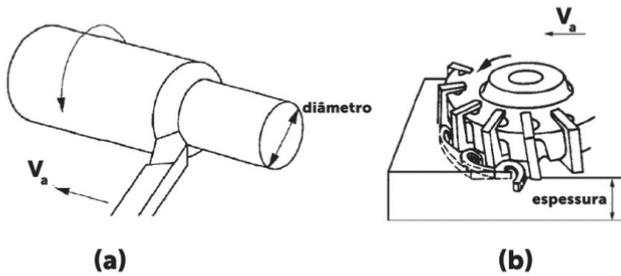
$$T_c = \frac{L \times N_p}{V_a} \quad (2.4)$$



### Exemplificando

Nas operações de usinagem a determinação do número de passes ( $N_p$ ) é combinada de acordo com a redução necessária do material para que atinja a forma desejada. Por se tratar da usinagem de peças cilíndricas, no torneamento a redução a cada passe é no diâmetro, enquanto que no fresamento a redução é na espessura, como mostra a Figura 2.18 a seguir.

Figura 2.18 | Representação da redução de seções de peças usinadas. (a) Torneamento; (b) Fresamento



Fonte: ABNT (2015, p. 8).

O tempo de corte para movimentos lineares é dado pela Equação 2.5 onde é incluído o número de passadas ( $N_s$ ) que é o coeficiente do percurso de avanço ( $p_a$ ) pelo avanço ( $a$ ) dado pela Equação 2.6, assim:

$$T_c = \frac{L \times N_p \times N_s}{V_c} \quad (2.5)$$

$$\text{Onde, } N_s = \frac{p_a}{a} \quad (2.6)$$

**Profundidade de Corte ( $P_n$ ):** é a profundidade de penetração definida pelo operador possibilitando a remoção de certa quantidade de cavaco.

**Força de Corte ( $F_c$ ):** é a força de usinagem sobre a direção do corte dada pela Equação 2.7 onde  $S$  é a área de corte dada pela Equação 2.8 e  $K_s$  é um valor tabelado dependente da seção da espessura do cavaco ( $h$ ) e da resistência específica do material a ser usinado.

$$F_c = K_s \times S \quad (2.7)$$

A área de corte ( $S$ ) é calculada da seção do cavaco que será retirado e é dada por:

$$S = a \times P_n \quad (2.8)$$

A determinação de  $K_s$  representa o valor da força específica para um cavaco com espessura ( $h$ ) dada por:

$$h = a \times \text{sen}X \quad (2.9)$$

Onde  $X$  é o ângulo de posição da ferramenta. A partir de então com valor de  $h$  utiliza-se a Tabela 2.1 para determinar  $K_s$  e calcular a força de corte ( $F_c$ ).

Tabela 2.1 | Força específica de corte  $K_s$  e  $N/mm^2$  de seção de cavaco

Material conforme norma DIN	Espessura h do cavaco em mm (h = a . Sen X)											
	0,10	0,125	0,16	0,20	0,25	0,315	0,40	0,50	0,63	0,80	1,25	1,6
St 42	3 090	2 920	2 750	2 600	2 450	2 320	2 190	2 060	1 950	1 830	1 640	1 540
St 50	3 550	3 360	3 140	2 960	2 800	2 640	2 480	2 330	2 200	2 070	1 840	1 730
St 60	3 060	2 940	2 830	2 710	2 620	2 520	2 420	2 330	2 240	2 150	1 990	1 900
St 70	3 440	3 330	3 200	3 080	2 970	2 860	2 760	2 620	2 570	2 470	2 300	2 200
C 22	2 550	2 460	2 360	2 290	2 210	2 130	2 040	1 970	1 900	1 830	1 700	1 640
C 45	2 700	2 560	2 400	2 280	2 150	2 030	1 910	1 800	1 710	1 610	1 440	1 350
gS 20	1 970	1 930	1 880	1 840	1 810	1 770	1 720	1 680	1 650	1 610	1 530	1 500
34 Cr 4	3 930	3 640	3 340	3 080	2 850	2 630	2 420	2 240	2 060	1 900	1 630	1 490
GG-20	1 800	1 700	1 600	1 510	1 430	1 340	1 280	1 200	1 140	1 070	950	900
GG-30	2 210	2 070	1 920	1 800	1 380	1 680	1 460	1 360	1 280	1 190	1 040	960
GTW-35	1 910	1 820	1 730	1 650	1 580	1 500	1 420	1 360	1 290	1 240	1 130	1 070
GS-45	2 320	2 240	2 140	2 060	1 990	1 910	1 840	1 770	1 700	1 630	1 510	1 450
Cu Zn 40	1 010	930	840	770	720	660	600	550	500	460	390	350
Cu Sn 8	1 430	1 350	1 280	1 210	1 140	1 070	1 010	960	900	850	770	720
Al Mg 5	640	620	590	570	550	530	510	490	470	460	420	410
Mg Al g	520	480	440	400	370	350	320	290	270	260	220	200

Fonte: Fundação Roberto Marinho (1998).

**Potência de Corte ( $P_c$ ):** é a grandeza, dada em watts (W), a ser colocada na máquina-ferramenta para um máximo de rendimento, sem prejuízo de seus componentes, e é dada pela Equação 2.10.

$$P_c = \frac{F_c \times V_c}{60} \quad (2.10)$$

## Sem medo de errar

Dando continuidade nos seus trabalhos na BigTruck Ltda., você precisa entregar um relatório ao supervisor da área, obtendo os parâmetros de usinagem para finalizar a elaboração do plano de usinagem e assim dar andamento no processo de fabricação do eixo.

Perceba que a determinação desses parâmetros deve ser feita de maneira minuciosa, pois é necessário que se especifique cada seção a ser usinada com seus respectivos parâmetros de tal forma que se

obtenha as dimensões especificadas no projeto do eixo.

Para tal atividade você precisa correlacionar, de forma empírica, parâmetros como velocidade de corte, avanço e força específica utilizando dados de tabelas cedidas pelos fabricantes da matéria-prima e das ferramentas utilizadas.

Então vamos pôr a mão na massa e desenvolver cada uma das etapas descritas abaixo, considere que as ferramentas de usinagem são de Metal Duro 2020 P30 e foram especificadas de acordo com a disponibilidade da empresa.

**1º Passo – Especificar propriedades físicas, químicas e mecânicas da matéria-prima:** barra cilíndrica com  $\varnothing 406 \times 1.010$  mm de aço ASTM A36 cuja composição química apresenta aproximadamente 0,25% de Carbono e resistência específica de  $500 \text{ N/mm}^2$ .

**2º Passo – Determinar a penetração ( $P_n$ ) da ferramenta no material:** esse parâmetro é determinado de tal maneira que as medidas sejam adquiridas com a menor quantidade de passes possível.

Por exemplo, o diâmetro inicial da matéria-prima é de 406 mm e o projeto do eixo especifica que o maior diâmetro exigido é de 400 mm, sendo assim, é necessária a redução de 6 mm no diâmetro.

Lembre-se que a cada 1 mm que a ferramenta penetra na peça, são reduzidos 2 mm no diâmetro, portanto, para que sejam reduzidos 6 mm do diâmetro é necessário penetrar 3 mm com a ferramenta.

A redução do diâmetro deve acontecer sempre do maior valor para o menor, ou seja, primeiro o material será desbastado na medida de 400 mm, em seguida reduz-se os diâmetros de cada seção do eixo: 350 mm, 300 mm, 200 mm para seus respectivos comprimentos ( $L$ ) especificados no projeto.

**3º Passo – Determinar o avanço ( $a$ ) necessário para cada operação de usinagem do material:** esse parâmetro é determinado de forma empírica a partir da correlação com a velocidade de corte.

**4º Passo – Determinar a Velocidade de Corte:** esse parâmetro é fornecido por tabelas de fabricantes de ferramentas e é escolhido de acordo com o material a ser usinado e o avanço determinado.

Por convenção em metais ferrosos com resistência específica de

500 N/mm<sup>2</sup>, avanço de aproximadamente 0,2 mm/rot e ferramenta de Metal Duro P30 utiliza-se  $V_c = 236 \text{ m/min}$ .

**5º Passo – Determinar a rotação (n) da ferramenta:** aplica-se a equação 2.1.

**6º Passo – Determinar o tempo de corte (T<sub>c</sub>) de cada operação de corte:** aplica-se a equação 2.4.

**7º Passo – Determinar a força de corte (F<sub>c</sub>) de cada seção da ferramenta:** aplicam-se as equações 2.7; 2.8 e 2.9.

Quando a espessura do cavaco (h) é determinada, a força específica  $K_s$  é determinada utilizando-se a Tabela 2.1 onde o material está especificado segundo a norma DIN e, portanto, o material ASTM A36 corresponde ao C22 da Tabela 2.1.

**8º Passo – Determinar a potência de corte (P<sub>c</sub>) de cada seção da ferramenta:** aplica-se a Equação 2.10.

Suponha que você desenvolveu uma planilha de cálculos de cada passo descrito acima para facilitar seu trabalho, assim obtém-se o Quadro 2.5:

Quadro 2.5 | Planilha preenchida com os parâmetros de usinagem do eixo auxiliar

Planilha de cálculos para elaboração de plano de usinagem													
Produto	Material	d Inicial		a (mm/rot)		<b>BIGTRUCK LTDA</b>							
Eixo Auxiliar	Aço ABNT A36	406mm		0.2									
Comprimento total	Resistência (N/mm <sup>2</sup> )	Vc (1) (m/min)		Vc (2) (m/min)									
1010mm	500	236		300									
Operação	Ferramenta	d (mm)	n (rpm)	NP	L (mm)	Tc (min)	Pc (mm)	S	Seno X	h	Ks	Fc (N)	Pc (W)
Facear 1º lado	Desbaster e Facear (45°)	406	185	2	203	10,97	2	0,4	0,7071	0,14	2460	984	3870,4
Facear 2º lado (na medida)	Desbaster e Facear (45°)	406	185	3	203	18,46	2	0,4	0,7071	0,14	2460	984	3870,4
Desbatar Ø400 x 370mm	Desbaster e Facear (90°)	406	185	3	570	46,21	2	0,4	0,7071	0,14	2460	984	3870,4
Desbatar Ø400 x 430mm	Desbaster e Facear (90°)	406	185	3	430	34,86	2	0,4	0,7071	0,14	2460	984	3870,4
Cilindrar Ø360 x 340mm	Desbaster e Facear (90°)	400	188	9	340	81,47	5	1	1	0,20	2290	2290	9007,3
<b>Acabamento Ø350 x 340mm</b>	<b>Desbaster e Facear (90°)</b>	<b>360</b>	<b>265</b>	<b>1</b>	<b>340</b>	<b>6,41</b>	<b>5</b>	<b>1</b>	<b>1</b>	<b>0,20</b>	<b>2290</b>	<b>2290</b>	<b>9007,3</b>
Cilindrar Ø310 x 240mm	Desbaster e Facear (90°)	350	215	9	240	50,32	5	1	1	0,20	2290	2290	9007,3
<b>Acabamento Ø300 x 240mm</b>	<b>Desbaster e Facear (90°)</b>	<b>310</b>	<b>308</b>	<b>1</b>	<b>240</b>	<b>3,90</b>	<b>5</b>	<b>1</b>	<b>1</b>	<b>0,20</b>	<b>2291</b>	<b>2291</b>	<b>9011,1</b>
Cilindrar Ø310 x 60mm	Desbaster e Facear (90°)	300	250	11	60	13,18	8	1,6	1	0,20	2290	3664	14412
<b>Acabamento Ø200 x 60mm</b>	<b>Desbaster e Facear (90°)</b>	<b>210</b>	<b>455</b>	<b>1</b>	<b>60</b>	<b>0,66</b>	<b>8</b>	<b>1,6</b>	<b>1</b>	<b>0,20</b>	<b>2290</b>	<b>3664</b>	<b>9007,3</b>
Cilindrar Ø360 x 280mm	Desbaster e Facear (90°)	400	188	9	280	67,09	5	1	1	0,20	2290	2290	9007,3
<b>Acabamento Ø350 x 280mm</b>	<b>Desbaster e Facear (90°)</b>	<b>360</b>	<b>265</b>	<b>1</b>	<b>280</b>	<b>5,28</b>	<b>5</b>	<b>1</b>	<b>1</b>	<b>0,20</b>	<b>2290</b>	<b>2290</b>	<b>9007,3</b>
Cilindrar Ø310 x 180mm	Desbaster e Facear (90°)	350	215	9	180	37,74	5	1	1	0,20	2290	2290	9007,3
<b>Acabamento Ø300 x 180mm</b>	<b>Desbaster e Facear (90°)</b>	<b>310</b>	<b>242</b>	<b>1</b>	<b>180</b>	<b>3,71</b>	<b>5</b>	<b>1</b>	<b>1</b>	<b>0,20</b>	<b>2290</b>	<b>2290</b>	<b>9007,3</b>

d = diâmetro	n = rotação	Tc = tempo de corte	Ks = força Específica
X = ângulo de posição da ferramenta	NP = número de passes	Pn = penetração	h = espessura do cavaco
Fc = força de corte	Pc = potência de corte	S = área de corte	a = avanço
Vc (1) = velocidade de corte para desbaste	Vc (2) = velocidade de corte para acabamento	Valor Calculado =	Valor Inserido =

Ferramenta metal duro	Avanço 0,2 - Vc 236
-----------------------	---------------------

Fonte: elaborado pela autora.

Observe que para cada seção usinada foi calculada uma operação de acabamento, onde a velocidade de corte adotada é de  $V_c = 300 \text{ m/min}$  e por fim o Quadro 2.7 mostra um exemplo de parte do plano de usinagem preenchido com os parâmetros calculados na planilha.

Quadro 2.7 | Plano completo de usinagem do eixo auxiliar

# BIGTRUCK LTDA

Data: \_\_\_\_\_

Ordem Nº: \_\_\_\_\_

<b>Produto</b>	Eixo Auxiliar	
<b>Tipo de Procedimento</b>	Torneamento entre Pontas	
<b>Operações a Serem Realizadas</b>	Facear	
	Cilindrar na placa universal	
	Cilindrar entre placa e ponta	
	Desbastar material nas medidas de cada seção	
<b>Máquinas e Acessórios</b>	Torno Mecânico Horizontal Marca Magnum Cut Modelo BLC-1224B	
	Placa Universal de Três Castanhas	
<b>Características Técnicas</b>	Diâmetro admissível sobre o barramento: 320mm	
	Distância entre as pontas: 600 mm	
	Curso do carro transversal: 100mm	
	Diâmetro do furo do eixo árvore: 38 mm	
	Gama de velocidades: {6} 60 a 1050 rpm	
	Número de roscas: 17	
	Motor principal: 750W	
<b>Projeto</b>	<p style="text-align: center;">Dimensões em cm</p>	
<b>Informações Gerais</b>	Material - Aço ABNT A36 Vc (I) - 236 m/min Vc (II) - 300 m/min	Resistência - 500 N/mm <sup>2</sup> a - 0,2 mm/rot Ø inicial - 406 mm
<b>Ordem de Execução</b>	<b>Ferramentas e Instrumentos</b>	<b>Parâmetros Tecnológicos</b>
<b>Facear 1º Lado</b>	Instrumentos: Paquímetro	<b>Facementos Ciclo de Desbaste</b>
	Ferramentas: Desbastar e Facear (45º)	NP - 2
		Pn - 2 mm
		n (RPM) - 185
		Pc - 3870,4 W
	Tc - 10,97 min	
	Fc - 984 N	
<b>Facear 2º Lado (Na medida)</b>	Instrumentos: Paquímetro	<b>Facementos Ciclo de Desbaste</b>
	Ferramentas: Desbastar e Facear (45º)	NP - 3
		Pn - 2 mm
		n (RPM) - 185
		Pc - 5805,6 W
	Tc - 10,97 min	
	Fc - 1476 N	
<b>Desbastar Ø400 x 570mm</b>	Instrumentos: Paquímetro	<b>Ciclo de Desbaste</b>
	Ferramentas: Desbastar e Facear (90º)	NP - 1
		Pn - 5 mm
		n (RPM) - 185
		Pc - 5805,6 W
	Tc - 15,40 min	
	Fc - 1476 N	
<b>Desbastar Ø400 x 430mm</b>	Instrumentos: Paquímetro	<b>Ciclo de Desbaste</b>
	Ferramentas: Desbastar e Facear (90º)	NP - 1
		Pn - 5 mm
		n (RPM) - 185
		Pc - 5805,6 W
	Tc - 11,62 min	
	Fc - 1476 N	
<b>Cilindrar Ø360 x 340mm</b>	Instrumentos: Paquímetro	<b>Ciclo de Desbaste</b>
	Ferramentas: Desbastar e Facear (90º)	NP - 4
		Pn - 5 mm
		n (RPM) - 265
		Pc - 9007,3 W
	Tc - 36,21 min	
	Fc - 2290 N	
<b>Acabamento Ø350 x 340mm</b>	Instrumentos: Paquímetro	<b>Ciclo de Desbaste</b>
	Ferramentas: Desbastar e Facear (90º)	NP - 1
		Pn - 5 mm
		n (RPM) - 265
		Pc - 9007,3 W
	Tc - 6,41 min	
	Fc - 2290 N	
<b>Cilindrar Ø310 x 240mm</b>	Instrumentos: Paquímetro	<b>Ciclo de Desbaste</b>
	Ferramentas: Desbastar e Facear (90º)	NP - 4
		Pn - 5 mm
		n (RPM) - 215
		Pc - 9007,3 W
	Tc - 22,36 min	
	Fc - 2290 N	
<b>Acabamento Ø300 x 340mm</b>	Instrumentos: Paquímetro	<b>Ciclo de Desbaste</b>
	Ferramentas: Desbastar e Facear (90º)	NP - 1
		Pn - 5 mm
		n (RPM) - 308
		Pc - 9011,3 W
	Tc - 3,90 min	
	Fc - 2291 N	
<b>Cilindrar Ø210 x 60mm</b>	Instrumentos: Paquímetro	<b>Ciclo de Desbaste</b>
	Ferramentas: Desbastar e Facear (90º)	NP - 5
		Pn - 8 mm
		n (RPM) - 250
		Pc - 14412 W
	Tc - 5,99 min	
	Fc - 3664 N	

<b>Acabamento Ø200 x 60mm</b>	Instrumentos: Paquímetro	<b>Ciclo de Desbaste</b>
	Ferramentas: Desbastar e Facear (90°)	NP - 2
		Pn - 5 mm
		n (RPM) - 455
		Pc - 9007,3 W
		Tc - 1,32 min
	Fc - 2290 N	
<b>Cilindrar Ø360 x 280mm</b>	Instrumentos: Paquímetro	<b>Ciclo de Desbaste</b>
	Ferramentas: Desbastar e Facear (90°)	NP - 4
		Pn - 5 mm
		n (RPM) - 168
		Pc - 9007,3 W
		Tc - 29,82 min
	Fc - 2290 N	
<b>Acabamento Ø350 x 280mm</b>	Instrumentos: Paquímetro	<b>Ciclo de Desbaste</b>
	Ferramentas: Desbastar e Facear (90°)	NP - 1
		Pn - 5 mm
		n (RPM) - 265
		Pc - 9007,3 W
		Tc - 5,28 min
	Fc - 2290 N	
<b>Cilindrar Ø310 x 180mm</b>	Instrumentos: Paquímetro	<b>Ciclo de Desbaste</b>
	Ferramentas: Desbastar e Facear (90°)	NP - 4
		Pn - 5 mm
		n (RPM) - 215
		Pc - 9007,3 W
		Tc - 16,77 min
	Fc - 2290 N	
<b>Acabamento Ø350 x 280mm</b>	Instrumentos: Paquímetro	<b>Ciclo de Desbaste</b>
	Ferramentas: Desbastar e Facear (90°)	NP - 1
		Pn - 5 mm
		n (RPM) - 242
		Pc - 9007,3 W
		Tc - 3,71 min
	Fc - 2290 N	
<b>Legenda</b>	Vc (1) - Velocidade de corte desbaste	Vc (2) - Velocidade de corte acabamento
a - avanço	Pn - Penetração	Tc - Tempo de corte
NP - número de passes	Pc - potência de corte	n - rotação

Fonte: elaborado pela autora.

## Avançando na prática

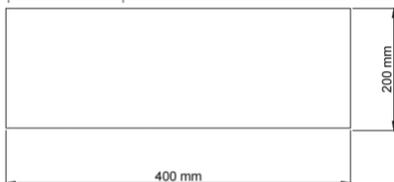
### Calculando Tempo de Corte

#### Descrição da situação-problema

Considere que você é o responsável pelo setor de usinagem de uma empresa de grande porte no ramo metalomecânico. Ao avaliar os cálculos de um plano de usinagem por aplainamento de uma peça você verificou que não foi calculado o tempo de corte, que é um parâmetro importante para o cálculo de custos de usinagem. Assim, você decide fazer o cálculo, pois é a ação mais rápida do que retornar ao setor de projeto, uma vez que devido ao grande fluxo de trabalho da empresa pode ser que seu pedido entre na fila de espera.

Assim, você precisa calcular o tempo de corte necessário para aplainar uma placa retangular mostrada na Figura 2.19 com  $400\text{mm} \times 200\text{mm}$  cuja velocidade de corte calculada é de  $V_c = 20\text{m/min}$ , avanço  $a = 0,5\text{mm}$  em 4 passes.

Figura 2.19 | Matéria-prima a ser plainada



Fonte: elaborada pela autora.

## Resolução da situação-problema

Por se tratar de uma peça retangular conclui-se que o tempo de corte deve ser estimado com a equação 2.5 para movimentos lineares onde é incluído o número de passadas ( $N_s$ ) que é o coeficiente do percurso de avanço ( $p_a$ ) pelo avanço ( $a$ ) dado pela Equação 2.6.

O percurso de avanço corresponde à largura da peça de  $200\text{mm}$  e deve ser adicionada a folga de posicionamento da ferramenta de  $30\text{mm}$ , assim, substituindo os valores dados pela situação aplica-se:

$$N_s = \frac{p_a}{a} = \frac{200\text{mm} + 30\text{mm}}{0,5\text{mm}} = \frac{230\text{mm}}{0,5\text{mm}} = 460\text{ mm/mm}$$

No percurso de avanço  $L$  também deve ser adicionada a folga de posicionamento da ferramenta, pois assim será considerado todo o tempo de usinagem que vai desde o início de movimentação da ferramenta até o desbaste final. Dado que o número de passes  $N_p = 4$  passes e a velocidade de corte  $V_c = 20\text{m/min}$  calcula-se:

$$T_c = \frac{L \times N_p \times N_s}{V_c} = \frac{430(\text{mm}) \times 460(\text{mm/mm}) \times 4(\text{passes})}{20(\text{m/min})} = 39,56\text{ min}$$

### Faça valer a pena

**1.** O cálculo do avanço em ferramentas multicortantes é dado pelo número de facas ou dentes  $ad$  que a compõem. Considere que uma fresa com 14 dentes trabalha com o avanço de  $a = 2,8\text{mm/volta}$ . Utilizando a equação abaixo obtém-se o avanço por dente onde  $z$  corresponde ao número de dentes da fresa.

$$ad = \frac{a}{z}$$

Aplicando a equação dada acima, valor de avanço por dente é de:

- a)  $0,2\text{ mm/volta}$
- b)  $2\text{ mm/volta}$
- c)  $20\text{ mm/volta}$
- d)  $0,2\text{ m/volta}$
- e)  $2\text{ m/volta}$

**2.** Os movimentos que não formam \_\_\_\_\_ são conhecidos como o movimento de \_\_\_\_\_, movimento de ajuste, movimento de \_\_\_\_\_ e movimento de recuo sendo que este último é realizado após o \_\_\_\_\_ da usinagem para \_\_\_\_\_ a ferramenta da peça.

Assinale a alternativa que preenche corretamente as lacunas:

- a) furos, aproximação, correção, término, distanciar.
- b) cavacos, recuo, correção, início, distanciar.
- c) cavacos, aproximação, correção, término, distanciar.
- d) vazios, aproximação, correção, término, aproximar.
- e) vazios, recuo, correção, início, aproximar.

**3.** Um eixo com comprimento  $L = 250\text{mm}$  e diâmetro  $d = 150\text{mm}$  deve ser torneado em 3 passes, utilizando uma velocidade de corte  $V_c = 40\text{m/min}$  e um avanço de  $a = 0,2\text{mm/volta}$ . Considere que:

Tempo de corte ( $T_c$ )

$$T_c = \frac{L \times N_p}{V_a}$$

Velocidade de avanço ( $V_a$ )

$$V_a = a \times n$$

Velocidade de corte ( $V_c$ )

$$V_c = \pi \times d \times n$$

Assinale a alternativa que apresenta corretamente o tempo de corte necessário para se executar essa operação:

- a) 5,00 min
- b) 0,5 min
- c) 0,05 min
- d) 4,94 min
- e) 49,4 min

## Seção 2.3

### Processos de soldagem

#### Diálogo aberto

Caro aluno, nesta seção vamos dar um enfoque nos processos de soldagem. Logo, vamos dar continuidade aos seus trabalhos na empresa BigTruck Ltda., onde você foi contratado para ser o encarregado da fabricação de eixos auxiliares que fazem conexão dos conjuntos de rodagens nas duas extremidades laterais do veículo. Nas Seções 2.1 e 2.2 você aprendeu a elaborar e preencher o plano de usinagem de um eixo auxiliar, que faz conexão dos conjuntos de rodagens nas duas extremidades laterais do veículo. Inicialmente você determinou que o processo de usinagem adequado é o torneamento por se tratar de uma peça cilíndrica.

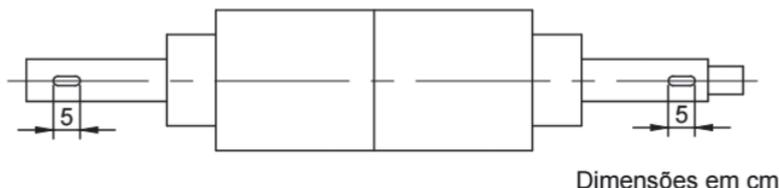
Na sequência foi desenvolvida, a partir do projeto do eixo, uma planilha de cálculos para definir, de maneira prática e eficiente, os parâmetros a serem utilizados durante cada operação de usinagem e finalmente você preencheu, adequadamente, o plano de usinagem mostrado no Quadro 2.7, com todas as informações necessárias para que o operador possa fabricar o produto em questão.

É muito comum que ocorram falhas de equipamento, ferramentas ou até do operador durante o processo de fabricação. Nas condições mais favoráveis é possível recuperar a peça, por exemplo, em casos onde as dimensões finais da peça estão acima da tolerância especificada, pode ser dado mais um passe de usinagem até que se obtenham as dimensões necessárias.

Para situações em que são feitos furos em excesso ou desnecessários, estes podem ser preenchidos com solda desde que não concentre tensão levando o componente à falha prematura.

Nessas condições suponha que o operador, erroneamente, fez um rasgo de chaveta no eixo, como mostra a Figura 2.20. Como não está previsto em projeto e o custo de usinagem é alto é necessária a recuperação do eixo com o preenchimento de solda.

Figura 2.20 | Representação do eixo com rasgo de chave



Fonte: elaborada pela autora.

Por ser o responsável pela fabricação, você precisa encaminhar o eixo para o setor de soldagem e solicitar a recuperação, no entanto você precisará especificar todas as condições de soldagem como: tipo de solda, o eletrodo de acordo com as propriedades mecânicas do material e das condições de soldagem e as especificações para simbologia, como tipo de junta, acabamento, quantidade de passes, comprimento de solda e ensaios não destrutivos para avaliar a qualidade superficial da solda.

Em um primeiro momento considere que a empresa possui disponíveis as técnicas de soldagem por eletrodo revestido, MIG/MAG e TIG.

Então vamos pôr a mão na massa, aprender sobre todos esses conceitos e critérios e desenvolver esse trabalho.

## Não pode faltar

### Características dos processos de soldagem

Soldar é considerado o processo de união com o aquecimento da superfície de materiais metálicos de tal modo que sejam levados a um estado de fusão ou plasticidade resultam na junta soldada, visando a fabricação de um componente e/ou estrutura e, também, a recuperação de peças desgastadas (CHIAVERINI, 1995; MARQUES; MODENESI; BRACARENSE, 2009).

A soldagem é aplicada em quase todos os ramos de fabricação de estruturas, como nas indústrias mecânica, aeronáutica, aeroespacial, automobilística, naval, serralheria e na construção civil.

Os processos de soldagem são classificados de acordo com as condições do metal e da superfície de contato e da fonte de energia

a ser aplicada que podem ser mecânica, química, elétrica ou radiante (WAINER; BRANDI; MELLO, 1992; CHIAVERINI, 1995), de maneira geral todos esses métodos visam gerar calor concentrado em uma região de tal forma que favoreça a união do material.

O calor gerado por fonte mecânica refere-se ao aquecimento por atrito ou deformação plástica enquanto que por fonte química o calor é gerado por reações exotérmicas, por exemplo, a queima de combustível. Com a fonte elétrica o calor é gerado pela passagem da corrente elétrica ou formação de um arco elétrico e pela fonte radiante o calor é gerado pela radiação a laser (WAINER; BRANDI; MELLO, 1992).

As fontes de calor comumente utilizadas são as mecânicas e elétricas. Com a soldagem por fontes mecânicas os materiais devem apresentar boa condutibilidade térmica, pois a união do material ocorre pela inteiração simultânea entre o atrito e o aquecimento do metal. Os principais processos mecânicos de soldagem classificados pela American Welding Society (AWS) são: por fricção, pressão à quente, laminação, forjamento e explosão entre outros.

Nos processos de soldagem cuja fonte de calor é elétrica a região a ser soldada é aquecida com calor concentrado que leva à fusão inicial do material a ser soldado e do metal adicionado (MARQUES; MODENESI; BRACARENSE, 2009). Fazem parte desse método a soldagem por eletrodo revestido, MIG/MAG (*Metal Inert Gas / Metal Active Gas*), TIG (*Tungsten Inert Gas*), arco submerso, arame tubular, entre outros. Mais adiante esses processos serão apresentados com mais detalhes.



### Refleta

Caro aluno, uma vez compreendidas as características do processo de soldagem, quais são os elementos de soldagem?

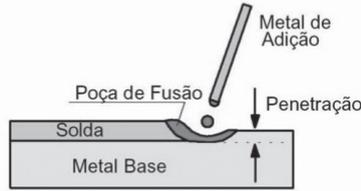
## Terminologia da soldagem

A terminologia de soldagem refere-se à abordagem de termos técnicos de indicação de elementos de soldagem, como tipos de juntas, chanfros, cordões de soldas, posição de soldagem e símbolos.

A Figura 2.21, mostra os conceitos iniciais de soldagem e apresenta o metal-base que forma a junta a ser soldada por fusão, com um material

chamado de metal de adição aquecido e fundido pelo calor da fonte formando assim a poça de fusão.

Figura 2.21 | Representação do metal-base, de adição e poça de fusão



Fonte: Marques, Modenesi e Bracarense (2009, p. 30).

Existem vários tipos de juntas que são designadas de acordo com o posicionamento do metal-base e, por muitas vezes, devem ser preparadas criando uma abertura ou reentrâncias na superfície, chamadas de chanfros, de tal forma que haja espaço para a adição da solda. Esses chanfros são escolhidos em função do processo de soldagem, espessura da peça, dimensões e facilidade de acesso como exemplifica a Figura 2.22.

Figura 2.22 | Tipos de junta

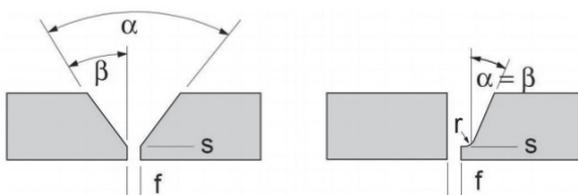
JUNTAS DE TOPO		
JUNTAS DE CANTO		
JUNTAS DE ARESTA		
JUNTAS SOBREPOSTAS		
JUNTAS DE ÂNGULO		

Fonte: adaptada de Marques, Modenesi e Bracarense (2009, p. 31).

Os elementos que são um chanfro são definidos por suas dimensões e devem ser projetados de tal forma que seja de fácil acesso e que a quantidade de adição de metal para o enchimento da junta seja a menor possível.

A Figura 2.23 representa os elementos de um chanfro onde (S) representa a face da raiz ou nariz que é a parte não chanfrada, (f) a abertura da raiz, folga ou fresta que deve possuir a menor distância possível entre as peças a serem soldadas ( $\beta$ ) ângulo de abertura da junta ou ângulo de bisel, que é a parte chanfrada, ( $\alpha$ ) ângulo do chanfro representado pela soma dos ângulos do bisel dos componentes da junta e (r) raio do chanfro.

Figura 2.23 | Características dimensionais dos chanfros usados em soldagem

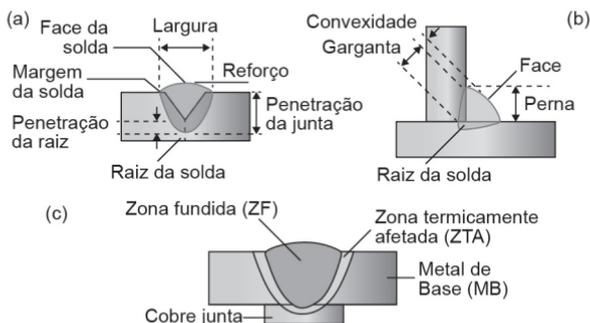


Fonte: adaptada de Marques, Modenesi e Bracarense (2009, p. 32).

A região soldada também possui diferentes seções cujos nomes estão mostrados nas Figuras 2.24 (a) e (b). Essa região é formada pelo metal de adição depositado sobre a junta, formando assim o cordão de solda.

Na região adjacente ao cordão de solda (Figura 2.24 (c)) surge a zona termicamente afetada (ZTA), que tende a ser mais frágil que o metal-base e o cordão de solda devido à mudança microestrutural gerada pelo aporte térmico do processo de soldagem.

Figura 2.24 | Dimensões e regiões soldadas em (a) de topo; (b) de filete; (c) regiões resultantes de uma solda por fusão



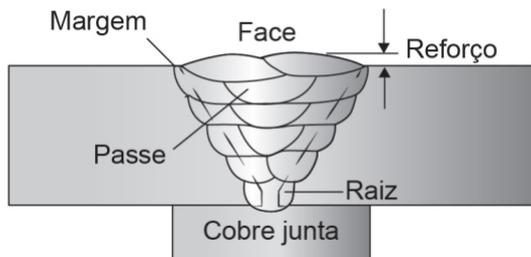
Fonte: adaptada de Marques, Modenesi e Bracarense (2009, p. 33).



## Exemplificando

A deposição de metal de adição deve ser feita em camadas que é o conjunto de passes localizados em uma mesma altura no chanfro. Cada passe é formado por um deslocamento da poça de fusão na região da junta, como mostra a Figura 2.25.

Figura 2.25 | Composição de um cordão de solda em vários passes



Fonte: adaptada de Marques, Modenesi e Bracarense (2009, p. 34).



## Pesquise mais

A posição de soldagem é determinada de acordo com o tipo de junta e com a posição do metal-base. Aprenda mais sobre esse assunto acessando o link indicado. Disponível em: <[http://www.esab.com.br/br/pt/education/blog/processo\\_soldagem\\_eletrodo\\_revestido\\_mma\\_smaw.cfm](http://www.esab.com.br/br/pt/education/blog/processo_soldagem_eletrodo_revestido_mma_smaw.cfm)>. Acesso em: 27 maio 2017.

## Simbologia de soldagem

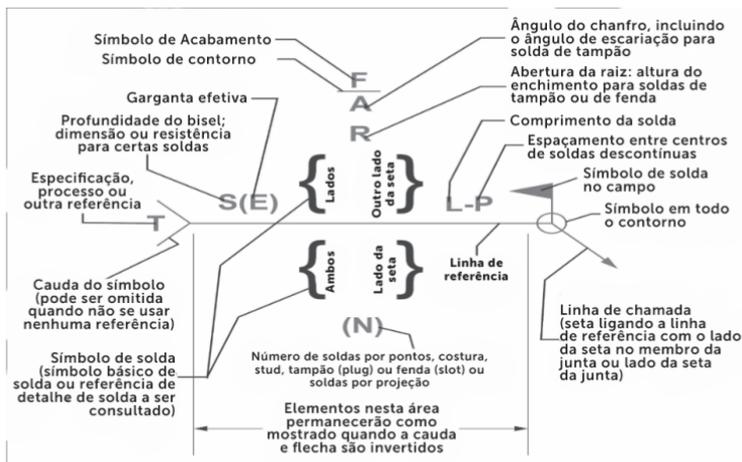
A simbologia de soldagem é especificada pelas normas AWS A2.1, AWS A2.4 e NBR 5874 e consiste em números, sinais e símbolos com o objetivo de fornecer informações sobre a soldas e operações a serem realizadas.

Basicamente a norma AWS A2.4 diz que a simbologia deve ser representada por uma linha de referência, uma seta indicativa, símbolo básico de solda, dimensões, símbolos suplementares e cauda. A Figura 2.25 mostra a localização de cada elemento a ser indicado.

O símbolo básico é uma representação da seção transversal da solda e indica o tipo de chanfro a ser usado. Esses símbolos são característicos e, em sua maioria, são representados com a mesma forma do chanfro que podem ser em ângulo, em "V", em meio "V", em "K", entre outros (ANSI/AWS, 2012).

Seu posicionamento na linha de referência mostra a posição que a solda deve ser realizada. Se o símbolo estiver posicionado abaixo da linha de referência a solda deve ser realizada no mesmo lado, entretanto, se o símbolo estiver posicionado acima da linha de referência a solda deve ser realizada do lado oposto à indicação da seta (ANSI/AWS, 2012).

Figura 2.26 | Regulamentação da posição dos elementos de simbologia de soldagem



Fonte: ANSI/AWS (2012, p. 3).



### Pesquise mais

Acesse o link abaixo e aprenda como representar os símbolos de soldagem na linha de referência. Disponível em: <[http://www.fbts.org.br/quantum/cursos/000071/downloads/M1\\_D3\\_T1\\_s%C3%ADmbolos%20b%C3%A1sicos.pdf](http://www.fbts.org.br/quantum/cursos/000071/downloads/M1_D3_T1_s%C3%ADmbolos%20b%C3%A1sicos.pdf)>. Acesso em: 28 maio 2017.

Os símbolos suplementares são usados em posições estratégicas no símbolo quando necessários e são mostrados na Figura 2.27. Adicionalmente, o tipo de acabamento na superfície da solda também deve ser representado da seguinte maneira: rebarbamento (C), esmerilhamento (G), martelamento (H), usinagem (M) e laminação (R), (ANSI/AWS, 2012).

Figura 2.27 | Símbolos suplementares de soldagem

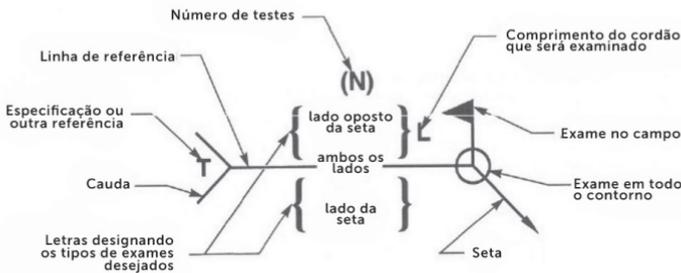
Solda em todo o contorno	Solda de campo	Fusão no reverso	Contorno da solda		
			Plano	Convexo	Côncavo

Fonte: ANSI/AWS (2012, p. 3).



Após a soldagem é muito importante que se realizem ensaios para verificar a qualidade da solda, ou seja, se surgiram descontinuidades internas ou superficiais, sendo assim o projeto da solda deve indicar os ensaios não destrutivos a serem realizados. A simbologia dessas técnicas é semelhante à de soldagem, como especificado pela AWS A2.4. A Figura 2.28 representa alguns desses símbolos.

Figura 2.28 | Regulamentação da posição dos elementos de simbologia de ensaios não destrutivos



Fonte: ANSI/AWS (2012, p. 4).

A abreviação dos ensaios a serem indicados estão mostradas no Quadro 2.8.

Quadro 2.8 | Abreviação de ensaios não destrutivos

Raios-X	Ultrassom	Partícula Magnética	Líquido Penetrante	Estanqueidade	Ensaio Visual
RAD	US	PM	LP	ES	EV

Fonte: ANSI/AWS (2012, p. 3)

### Tipos de soldagem

As soldagens por fonte de calor elétrica são realizadas com a abertura de um arco elétrico, ou seja, o processo o metal-base participa da fusão na constituição da solda (CHIAVERINI, 1995).

O arco elétrico é formado pela passagem da corrente elétrica entre uma barra de metal chamada de eletrodo que atua como polo negativo, enquanto que o metal a ser soldado corresponde ao polo positivo. Para abrir o arco o eletrodo é encostado no metal a ser soldado de tal modo que a corrente comece a fluir.

## Soldagem a arco elétrico com eletrodos revestidos

A soldagem com eletrodos revestidos é um processo que produz a união do material pelo aquecimento por um arco elétrico estabelecido entre o eletrodo metálico revestido e a peça que está sendo soldada.

O eletrodo revestido consiste em uma vareta metálica chamada de "alma", que conduz a corrente elétrica e fornece metal de adição para o enchimento da junta. Essa vareta é recoberta com uma mistura de diferentes materiais, numa camada que forma o revestimento do eletrodo (MARQUES; MODENESI; BRACARENSE, 2009).

O revestimento tem funções importantes, como estabilizar o arco elétrico, ajustar a composição química do cordão pela adição de elementos químicos, proteger a poça de fusão e o metal da contaminação da atmosfera e garantir a integridade do cordão de solda. O Quadro 2.9 mostra a composição dos principais tipos de revestimentos e suas características.

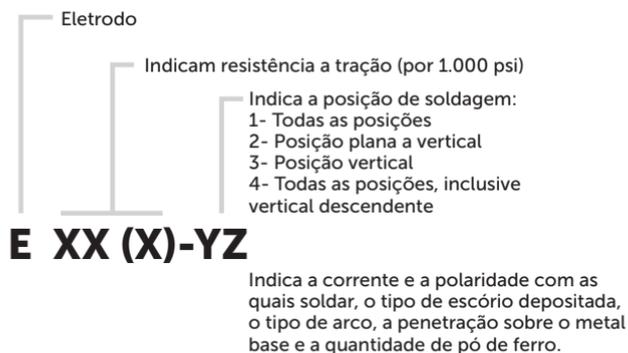
Quadro 2.9 | Principais tipos de eletrodos revestidos e suas características

Principais tipos de eletrodos e suas características			
Características \ Tipo	Básico	Rutilico	Celulósico
<b>Espessura de revestimento</b>	Geralmente grosso, eventualmente médio	Geralmente grosso ou médio, eventualmente delgado	Médio
<b>Formação de gotas</b>	Normalmente gotas de tamanho médio.	Grossas quando o revestimento é delgado, médias quando for médio e pequenas quando o revestimento for grosso	De médias até grandes
<b>Posição para soldar</b>	Em todas as posições	Em todas as posições	Em todas as posições
<b>Profundidade de penetração</b>	Mediana	Conforme a espessura do revestimento	Muito boa
<b>Manejo</b>	O arco deve ser mantido custo	Fácil produzindo um arco suave e tranquilo	De fácil manejo com arco curto
<b>Aplicações</b>	Própria para grandes espessuras, aços de baixa liga e aços de baixo teor de carbono.	Os revestimento delgado em espessuras finas, os médios e grossos para preenchimento.	Para condições difíceis e trabalhos de grande resistência.

Fonte: Fortes (2005, p. 10-11).

A norma AWS A5 indica as especificações para a aplicação dos eletrodos revestidos adequados a cada tipo de material a ser soldado, no que se diz respeito à soldagem de aços carbono a especificação recomendada está na seção AWS A5.1. Para ambas classificações são utilizados números e letras que fornecem informações a respeito do eletrodo, como mostrado na Figura 2.29.

Figura 2.29 | Designação para a identificação do eletrodo revestido



Fonte: Fortes (2005, p. 10-11).

Vale a pena ressaltar que para a grande quantidade de combinações entre materiais e tipos de eletrodo é de extrema importância que sempre se consulte o catálogo do fabricante para identificar a melhor aplicação.

## Soldagem a arco elétrico MIG/MAG

A soldagem a arco elétrico com proteção gasosa é um processo de união de metais estabelecido entre um eletrodo metálico consumível nu e a peça a ser soldada (SCOTTI; PONOMAREV, 2008; MARQUES; MODENESI; BRACARENSE, 2009). A contaminação pela atmosfera é evitada com um gás ou a mistura de gases que podem ser inativos ou ativos, portanto, daí define-se a diferença entre o processo MIG (*Metal Inert Gas*) onde é usado um gás de proteção inativo e MAG (*Metal Active Gas*), como o próprio nome diz, o gás de proteção utilizado é ativo. Normalmente o gás utilizado é o Argônio, Argônio associado ao Oxigênio ou Hélio (WAINER; BRANDI; MELLO, 1992; SCOTTI; PONOMAREV, 2008).

A soldagem MIG/MAG é um processo semiautomático onde a alimentação do arame eletrodo é mecânica sempre que acionado

pelo operador. O calor gerado pelo arco é usado para fundir as peças e o arame eletrodo que é transferido para a junta como metal de adição (SCOTTI; PONOMAREV, 2008).

Assim como para os eletrodos revestidos a AWS possui especificações para os tipos de arames eletrodos para a soldagem de diferentes materiais como mostra o Quadro 2.10.

Quadro 2.10 | Especificações AWS para classificação de eletrodos revestidos

Especificação	Eletrodo Consumível	Especificação	Eletrodo Consumível
AWS A5.7	Aço cobre e suas ligas	AWS A5.19	Magnésio e suas ligas
AWS A5.9	Aço inoxidável	AWS A5.20	Tubulares de aço carbono com fluxo interno
AWS A5.10	Alumínio e suas ligas	AWS A5.21	Para revestimento
AWS A5.14	Níquel e suas ligas	AWS A5.22	Tubulares para soldagem do aço inoxidável
AWS A5.15	Para soldagem de ferro fundido	AWS A5.24	Soldagem de zircônio
AWS A5.16	Titânio e suas ligas	AWS A5.28	Aços de baixa liga
AWS A5.18	Tubulares de aço carbono com pó metálico interno		

Fonte: adaptada de Marques, Modenesi e Bracarense (2009, p. 187).

## Sem medo de errar

Para finalizar suas atividades na BigTruck Ltda., após desenvolver os passos descritos na Seção 2.2 e calcular os parâmetros de execução de todas as operações de torneamento do eixo auxiliar e preencher o plano de usinagem, você se deparou com um problema muito comum em chão de fábrica e precisa solicitar o reparo de um eixo onde o operador, por engano, fez um rasgo de chaveta em cada extremidade do eixo.

Assim agora é necessário que especifique as condições de soldagem para o preenchimento desse vazio.

**1º Passo – Determinar o tipo de solda a ser utilizado:** para exercer essa atividade é necessário que avalie o custo-benefício da solda, pois o custo de produção do eixo aumenta com o retrabalho. Você viu nesta seção que a soldagem por eletrodo revestido é o mais barato e simples quando comparado aos demais, entretanto como a região soldada é apenas para reparação essa técnica é a mais viável.

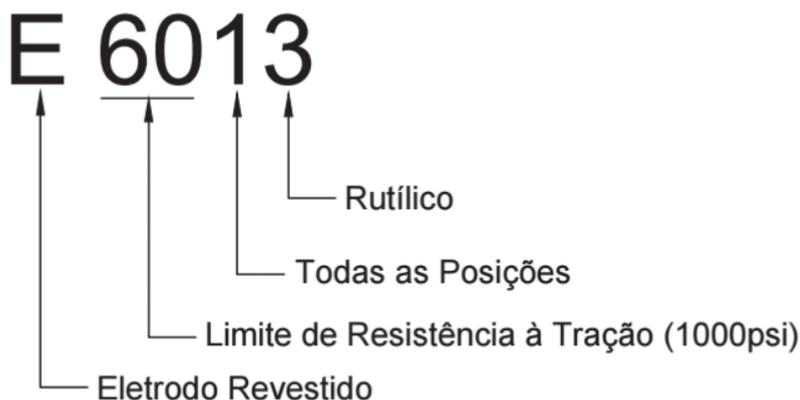
**2º Passo – Escolha do eletrodo revestido adequado:** como especificado na Figura 2.28 a escolha do eletrodo é feita a partir da propriedade mecânica de limite de resistência à tração do aço ASTM A36, tipo de revestimento e posição de soldagem.

Analisando o Quadro 2.9 observa-se que o revestimento para esse trabalho é o rutilico, pois sua aplicação é adequada para preenchimentos, pode ser manuseado em todas as posições e produz um arco simples e suave que tem pouca influência nas regiões adjacentes ao cordão de solda, criando assim uma ZTA pequena.

Lembre-se que a ZTA é a zona termicamente afetada que tem sua microestrutura modificada e fragilizada, sendo a região que tem a maior tendência a falhar.

Quanto ao limite de resistência à tração do Aço ASTM A36 é de 60.000 psi, portanto, define-se que o eletrodo adequado está mostrado na Figura 2.30:

Figura 2.30 | Eletrodo escolhido para a soldagem do aço ASTM A36



Fonte: adaptada de Marques, Modenesi e Bracarense (2009, p. 187).

**3º Passo – Controle de qualidade:** devem ser solicitados o Ensaio Visual e por Líquido Penetrante (LP) em toda a superfície soldada, pois tratam-se de técnicas que verificam se existem defeitos superficiais que tendem a nuclear trincas durante o trabalho do eixo. Ambos os ensaios devem ser indicados na simbologia.

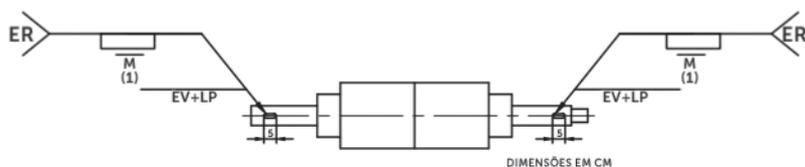
**4º Passo – Simbologia:** inicialmente define-se o tipo de junta, entretanto, a região a ser preenchida é classificada pela simbologia como solda tampão ou em fenda cujo comprimento da solda é igual à dimensão do rasgo de chaveta, portanto, não precisa ser indicado.

O acabamento deve ser usinado e sua representação na simbologia é um "M". Esse processo deve ser executado de tal forma que a superfície fique semelhante ao restante do eixo.

Finalmente, por se tratar de uma área pequena deduz-se que a solda seja realizada em apenas um passe.

Portanto, a simbologia está mostrada na Figura 2.31:

Figura 2.31 | Simbologia de soldagem no eixo a ser recuperado



Fonte: elaborada pela autora.

## Avançando na prática

### Fabricação de Caçamba de Transporte

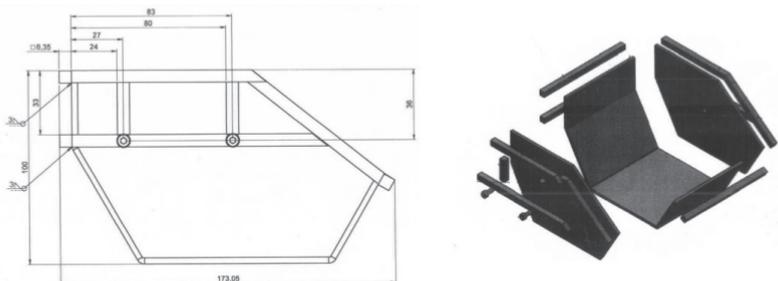
#### Descrição da situação-problema

Suponha que você trabalha em uma empresa especialista na fabricação de caçambas de transporte e uma das atividades do seu cargo é supervisionar os projetos e avaliar os critérios e procedimentos de soldagem dos produtos. Sabendo que a empresa participará de um evento em feira de negócios, a empresa presenteará seus clientes mais assíduos com caçambas em miniaturas cujo projeto está mostrado na Figura 2.32.

Nesse projeto são usadas chapas de aço ASTM A36 com espessura de 1/8" e todas as juntas devem ser soldadas por eletrodo revestido, cuja especificação da AWS corresponde ao eletrodo AWS E 6013.

Ao avaliar o projeto você identificou que o desenhista não especificou corretamente as simbologias de soldagem que estão destacadas em vermelho, e não fez a indicação da simbologia de ensaios não destrutivos, sendo assim, você precisa identificá-las para dar seguimento à execução do trabalho.

Figura 2.32 | Projeto de miniaturas de caçamba de transporte. Dimensões em milímetros



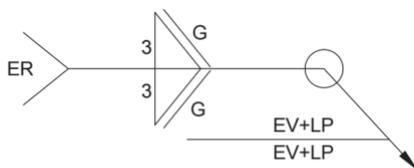
Fonte: elaborada pela autora.

Por se tratar de peças para brindes é necessário que elas sejam bem-feitas de tal forma que o cliente avalie a qualidade do produto a partir do protótipo e para isso, quando finalizados, os cordões de solda deverão ser esmerilhados para apresentarem um bom acabamento e Ensaios Visual e por Líquido Penetrante deverão ser realizados em todas as regiões soldadas a fim de que sejam identificadas possíveis descontinuidades superficiais.

## Resolução da situação-problema

As indicações pertinentes que devem aparecer na simbologia de soldagem são: tipo de soldagem, indicação da solda como locais e área, tipo de acabamento, tipo e dimensões de junta. Assim, a simbologia correta a ser indicada no projeto está mostrada na Figura 2.33.

Figura 2.33 | Simbologia de soldagem para o projeto de caçamba em miniatura



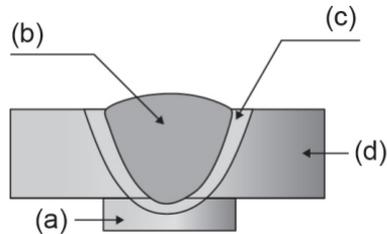
Fonte: elaborada pela autora.

## Faça valer a pena

**1.** A região da solda é formada pela adição do metal depositado sobre a junta formando o cordão de solda que possui diferentes regiões, como mostrado na Figura 2.34.

Regiões de uma solda.

Figura 2.34 | Regiões típicas de uma solda por fusão



Fonte: adaptada de Marques, Modenesi e Bracarense (2009, p. 33).

Pode-se dizer que:

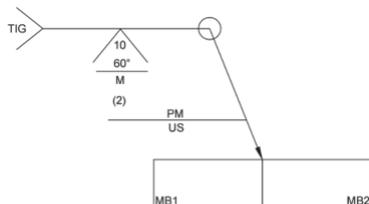
- I. O item (a) corresponde à cobre junta e (b) corresponde à zona fundida.
- II. O item (c) corresponde à zona termomecanicamente afetada e (d) corresponde ao metal-base.
- III. O item (b) corresponde à zona fundida e (d) corresponde ao metal-base.
- IV. O item (b) corresponde à zona termicamente afetada e (c) corresponde à zona fundida.

Estão corretas as asserções:

- a) I – II apenas.
- b) II – III apenas.
- c) III – IV apenas.
- d) I – III apenas.
- e) II – IV apenas.

**2.** A simbologia de soldagem mostrada na Figura 2.35 representa que deve ser realizada uma solda com o processo TIG, em uma junta de topo com chanfro em "V", com ângulo de  $60^\circ$  na junta formada pelos metais base MB1 e MB2.

Figura 2.35 | Representação de simbologia de soldagem em um projeto de soldagem



Fonte: elaborada pela autora.

As demais informações da simbologia correspondem à:

- a) Nariz e 10 mm, com a solda realizada em dois passes na montagem, acabamento esmerilhado, ensaios não destrutivos de ultrassom do lado oposto da solda e partícula magnética no lado da solda.
- b) Nariz e 10 mm, com a solda realizada em dois passes em todo contorno da peça, acabamento usinado, ensaios não destrutivos de ultrassom na solda e partícula magnética do lado oposto à solda.
- c) Abertura de raiz de 10 mm, com a solda realizada em dois passes em todo contorno da peça, acabamento usinado, ensaios não destrutivos de ultrassom na solda e partícula magnética do lado oposto à solda.
- d) Abertura de raiz de 10 mm, com a solda realizada nos dois lados, acabamento laminado, ensaios não destrutivos de ultrassom na solda e partícula magnética do lado oposto à solda.
- e) Abertura de raiz de 10 mm, com a solda realizada nos dois lados, acabamento laminado, ensaios não destrutivos de ultrassom na solda e partícula magnética do lado oposto à solda.

**3.** Durante a soldagem por \_\_\_\_\_ as gotas de metal são transferidas através do \_\_\_\_\_ para a \_\_\_\_\_ e são protegidas da atmosfera pelos gases produzidos durante a decomposição do \_\_\_\_\_.

Marque a alternativa que preenche corretamente a frase:

- a) MIG – insumo – poça de fusão – revestimento.
- b) Eletrodo Revestido – arco – poça de fusão – revestimento.
- c) TIG – revestimento – poça de fusão – arco.
- d) Eletrodo Revestido – revestimento – proteção – arco.
- e) MIG – arco – poça de fusão – revestimento.

# Referências

AMERICAN WELDING SOCIETY. ANSI/AWS A2.4. **Standard symbols for welding, brazing and nondestructive examination**. Miami, FL, EUA: ANSI/AWS, 2012.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 6175**: Usinagem – Processos Mecânicos. Rio de Janeiro: ABNT, 2015.

CHIAVERINI, Vicente. **Tecnologia mecânica**: processos de fabricação e tratamento. 2. ed., v. 2. São Paulo: Pearson, 1995. Cap. 8. p. 193-238.

COSTA, Eder Silva. **Processos de usinagem**. Divinópolis, MG: CEFET-MG, 2006.

FERRARESI, Dino. **Fundamentos da usinagem dos metais**. São Paulo: Edgard Blucher: 2014. Cap. 1. p. 25-43.

FISCHER, Ulrich; GOMERINGER, Roland; HEINZLER, Max; KILGUS, Roland; OESTERLE, Stefan; PARTZOLD, Heinz; STEPHAN, Andreas. **Manual de tecnologia metal mecânica**. 2. ed. São Paulo: Edgard Blucher, 2011. Cap. 6. p. 287-312.

FORTES, Cleber. **Apostila de eletrodos revestidos**. São Paulo: ESAB, 2005.

FUNDAÇÃO ROBERTO MARINHO. **Mecânica**: metrologia. Telecurso 2000. Rio de Janeiro: Globo, 1995.

\_\_\_\_\_. **Mecânica**: processos mecânicos de usinagem. Telecurso 2000. Rio de Janeiro: Globo, 1998.

KIMINAMI, Claudio Shyinti; CASTRO, Walman Benício; OLIVEIRA, Marcelo Falcão. **Introdução aos processos de fabricação dos produtos metálicos**. São Paulo: Edgard Blucher, 2013. Cap. 2. p. 29-45.

LOSEKANN, Claudio Roberto. **Processos de Fabricação I**: unidade 1. Itajaí, SC: Universidade do Vale do Itajaí (UNIVALI), 2001. Cap. 1.

MACHADO, Alisson Rocha; COELHO, Reginaldo Teixeira; ABRÃO, Alexandre Mendes; SILVA, Márcio Bacco. **Teoria da usinagem dos materiais**. 3. ed. São Paulo: Edgard Blucher, 2015. Cap. 1 e 2. p. 1-40.

MARQUES, Paulo Villani; MODENESI, Paulo José; BRACARENSE, Alexandre Queiroz. **Soldagem**: fundamentos e tecnologia. 3. ed. Belo Horizonte, MG: Aufmg, 2009.

SCOTTI, Américo; PONOMAREV, Vladimir. **Soldagem MIG/MAG**: melhor entendimento, melhor desempenho. São Paulo: Artliber, 2008.

WAINER, Emílio; BRANDI, Sérgio Duarte; MELLO, Fábio Décourt Homem. **Soldagem processos e metalurgia**. 6. reimp. São Paulo: Edgard Blucher, 1992.



# Processos de conformação mecânica

## Convite ao estudo

Desde a sua extração a partir dos minérios e a sua aplicação os metais são sujeitos aos mais diversos tipos de processos de fabricação. Como já estudamos, esses materiais podem estar sujeitos a temperaturas tão altas que se encontram no estado líquido e são processados por fundição, outras técnicas de produção de peças e componentes mecânicos e estruturais envolvem a usinagem e a soldagem.

Agora, o presente capítulo tem por objetivo apresentar os métodos de fabricação por conformação mecânica que fornecem produtos que vão desde a aplicação metalomecânica até utensílios de uso doméstico como barras, chapas, fios, perfis, bacias copos, entre outros.

A conformação mecânica consiste na mudança de geometria e dimensões de materiais metálicos por deformação plástica, ou seja, são aplicados esforços mecânicos de tal maneira que o metal não retorne às suas dimensões iniciais. Dessa forma, inicialmente abordaremos conceitos importantes sobre a correlação de comportamento mecânico de materiais metálicos associado com a microestrutura.

Em seguida serão apresentados os critérios para a escolha da temperatura de trabalho de conformação mecânica que podem ser a morno, a quente e a frio. Finalizados esses conceitos gerais serão apresentados os principais tipos de processos que são laminação, forjamento, estampagem, extrusão e trefilação.

Com base na didática abordada você será inserido em uma situação-problema onde fará parte do setor de pesquisa

e desenvolvimento (P&D) de uma empresa especializada na produção de arames, cabos, fios e perfis de aço chamada P&T Produtos Industriais.

A atividade consistirá em avaliar a viabilização de criar um novo setor de produção de barras cilíndricas de aço AISI 1020, considerando que essa é a matéria-prima dos produtos da empresa, a ideia é reduzir custos com essa compra, além de criar um novo segmento de venda.

Portanto, você precisará desenvolver um método de avaliação que responda às seguintes perguntas: Qual o método de conformação mecânica e temperatura de trabalho adequada para a fabricação de barras cilíndricas de aço AISI 1020? Segundo uma avaliação na literatura, qual o comportamento mecânico e microestrutural desse material para os possíveis processos e temperaturas de fabricação? Para o processo e temperatura escolhidos há possibilidade de substituição do material a ser conformado?

# Seção 3.1

## Introdução à conformação plástica dos metais

### Diálogo aberto

Caro aluno, nesta seção, você aprenderá sobre os conceitos fundamentais de conformação mecânica associados aos critérios de elasticidade e plasticidade dos metais. Para tanto serão retomados conceitos sobre a determinação das propriedades mecânicas de materiais metálicos a partir de um gráfico tensão x deformação de onde serão extraídas as principais tensões atuantes em solicitações mecânicas como limite de escoamento, limite de resistência à tração, módulo de elasticidade, ductilidade e encruamento.

Você aprenderá a determinar as faixas de temperaturas de trabalho a quente, a morno e a frio de materiais metálicos e correlacionar a microestrutura resultante com as propriedades mecânicas obtidas ou não por aplicação de tratamentos térmicos.

Assim, considere que você trabalha em uma empresa chamada P&T Produtos Industriais especializada na produção de arames, cabos, perfis de aço por conformação mecânica a frio que desenvolve produtos e projetos sob medida, otimizando os investimentos do cliente de acordo com a necessidade.

Suponha que você faz parte do setor de pesquisa e desenvolvimento (P&D) da empresa, e vem estudando as possibilidades de implantação de uma nova área de produção de produtos conformados como barras laminadas ou trefiladas de aço AISI 1020. Essa necessidade se dá devido ao alto custo que a empresa tem para comprar as barras de aço conformadas para em seguida serem trefiladas resultando nos produtos finais da empresa.

Segundo uma pesquisa de mercado realizada por você ao implantar o setor de fabricação de barras cilíndricas, a empresa terá um lucro significativo com a fabricação da própria matéria-prima, além de fornecer uma nova linha de produtos para a venda.

Portanto, nessa primeira etapa, o gestor de P&D lhe solicita, em um relatório, para escolher o processo a ser adotado quanto à viabilidade do material empregado, temperatura de trabalho e tipo de conformação.

Vamos dar continuidade aos estudos e aprimorar nosso conhecimento e desenvolver o trabalho solicitado.

### Introdução à conformação dos metais

Entende-se por conformação mecânica a modificação da geometria e das dimensões de forma permanente de um corpo por deformação plástica (BRESCIANI et al., 2011), ou seja, essa modificação ocorre devido à movimentação de grandes quantidades de discordâncias na microestrutura do metal em resposta a uma tensão de cisalhamento (CALLISTER JÚNIOR, 2012).

Para o estudo da conformação mecânica de materiais metálicos é importante que se retomem os conceitos básicos de propriedades mecânicas dos materiais, pois nesse processo de deformação permanente as tensões aplicadas são inferiores ao limite de resistência à ruptura (BRESCIANI et al., 2011) e conferem maior resistência mecânica ao material devido ao encruamento.

Assim, vamos retomar, brevemente, esses conceitos importantes sobre as propriedades mecânicas de um material metálico que dependem da sua composição química, estrutura cristalina, como já mencionado na Seção 1.1, e dos defeitos na rede cristalina (ASKELAND, 2008). Esses fatores afetam o comportamento mecânico do material para os mais diversos tipos de solicitações.

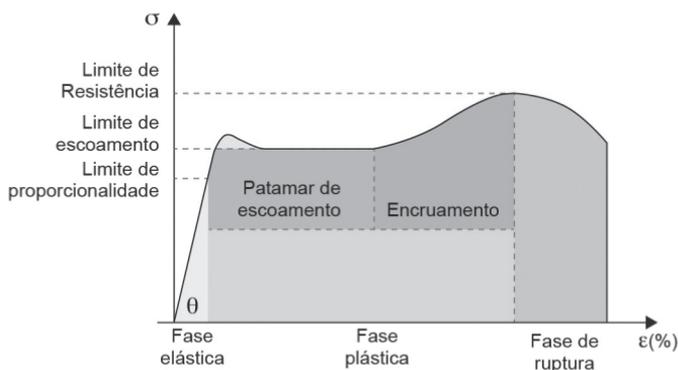


#### Pesquise mais

Assista ao vídeo mostrado no link abaixo e aprenda mais sobre defeitos na estrutura cristalina. Disponível em: <<https://www.youtube.com/watch?v=7H3xjWAKToc>>. Acesso em: 22 jun. 2017.

A maneira mais simples para acompanhar o comportamento mecânico de um material metálico é através de um ensaio de tração e, segundo a norma ASTM E8/E8M-13<sup>a</sup> (2013), a apresentação comum dos resultados é sob a forma de uma curva gráfica de tensão x deformação, mostrada na Figura 3.1, de onde é possível extrair propriedades mecânicas de elasticidade e plasticidade que são consideradas durante o processo de conformação mecânica.

Figura 3.1 | Diagrama genérico de um aço qualquer, mostrando as informações fornecidas por um gráfico de tensão x deformação



Fonte: <<http://grupo2metalica.no.comunidades.net/3-prop-dos-acos-estruturais>>. Acesso em: 22 jun. 2017.

Dentre os conceitos iniciais é necessário definir a deformação de um material para que ocorra a aplicação de uma tensão, ou seja, uma força deve ser atuante sobre uma área:

$$\sigma = \tau = \frac{F}{A}$$

A deformação na fase elástica é definida como reversível e proporcional à tensão aplicada, ou seja, quando a tensão aplicada é retirada o material retoma suas dimensões e geometria iniciais.

Nessa fase a propriedade do material é quantificada pelo limite de escoamento ( $\sigma_y$ ) e pelo limite de proporcionalidade corresponde ao módulo de elasticidade ( $E$ ) do material (GARCIA; SANTOS).

Durante a deformação plástica são quantificados o patamar de escoamento onde o material se deforma muito sem um aumento significativo da força aplicada e encruamento onde a estrutura cristalina do material se movimenta e se rearranja, aumentando a resistência mecânica, à medida que a tensão aumenta o material volta a se deformar (CALLISTER JÚNIOR, 2012).

Na fase de ruptura é mensurado o limite de resistência à tração ( $\sigma_r$ ), que corresponde à máxima tensão de deformação plástica que o material sofre antes de falhar.

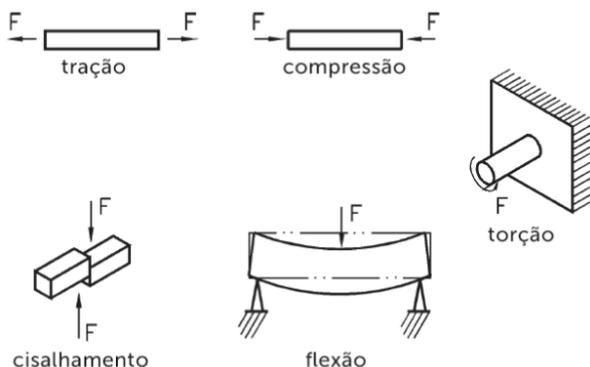
Sob aspecto geral é possível determinar se o material avaliado possui boa tenacidade que nada mais é do que a capacidade que o material tem de absorver energia antes de se romper, portanto, ao avaliar um gráfico tensão x deformação, quanto maior for a área abaixo do gráfico maior é a tenacidade do material, indicando que o material se deforma muito plasticamente.



## Assimile

De maneira geral os esforços mecânicos são classificados em tração, flexão, compressão e cisalhamento, conforme Figura 3.2.

Figura 3.2 | Tipos de solicitações mecânicas em componentes



Fonte: <<http://miscelaneadoconhecimento.com/ResMat/tracao.html>>. Acesso em: 24 jun. 2017.

## Conceitos fundamentais para a conformação dos metais

As operações de conformação mecânica são processos de trabalho dentro da fase plástica do metal e os principais são: a laminação, que consiste basicamente em passar o material entre dois cilindros reduzindo sua espessura e aumentando o comprimento; a extrusão, que consiste em forçar a passagem do material por um orifício de uma matriz sob alta pressão, de modo a ter sua seção transversal reduzida.

Outros métodos também conhecidos são a estampagem, que compreende um conjunto de operações onde uma chapa plana é submetida a transformações para adquirir forma geométrica plana ou oca; a trefilação, que tem por objetivo fabricar fios, cabos; e o forjamento que consiste na fabricação de produtos por martelamento ou prensagem.

A temperatura em que essas técnicas de conformação mecânica são realizadas também é uma variável importante, sendo assim, as atividades são divididas em trabalho a quente, a morno e a frio.

### **Trabalho a quente**

É definido como a deformação sob condições de alta temperatura e taxas de deformações elevadas em que os processos de recuperação e recristalização ocorrem simultaneamente com a conformação.

A recuperação de um material metálico é o processo ao qual o material se rearranja e elimina parcialmente as discordâncias introduzidas durante a deformação plástica, restaurando parcialmente as propriedades mecânicas aos valores antes da deformação, enquanto que a recristalização é a formação de uma nova estrutura cristalina com um novo conjunto de grãos isentos de deformação, no interior de um material.

O trabalho a quente é realizado com valores pouco acima da temperatura de fusão do material, para o processamento de peças grandes e com geometrias complexas que sofrerão deformações intensas de tal maneira que resultem em baixas qualidades dimensional e superficial.

A determinação da temperatura de trabalho para este procedimento é dada por:

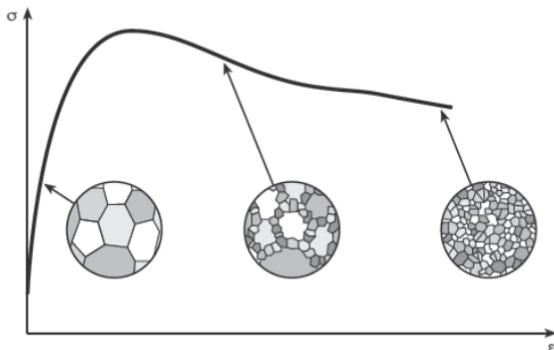
$T_i = 0,5T_f$  (Equação 3.2) onde,  $T_i$  é a temperatura de trabalho e  $T_f$  é a temperatura de fusão do material.

### **Alterações microestruturais**

Quando a energia de deformação armazenada no material é associada ao aumento de temperatura, ocorre a nucleação de novos grãos não deformados, ou seja, a recristalização que consiste na redução do tamanho de grão em relação ao produto fundido.

A Figura 3.3 mostra uma curva de tensão x deformação quando a recristalização ocorre eliminando o encruamento e mantendo a carga necessária para a deformação plástica em níveis razoáveis ao longo do processo de conformação mecânica a quente (COLPAERT, 2008).

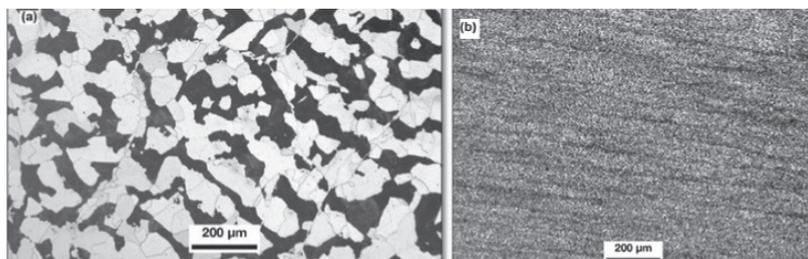
Figura 3.3 | Ilustração esquemática da curva tensão x deformação quando a recristalização ocorre



Fonte: Colpaert (2008, p. 358).

A Figura 3.4 mostra um exemplo do aço AISI 1045, em (a) observa a microestrutura do material bruto após a fundição, composto basicamente por ferrita (região branca composta majoritariamente por ferro) e perlita (região escura composta principalmente por carbono com pequenos percentuais de ferro). Em (b) o mesmo aço conformado a quente por forjamento com redução de 4:1 cujo produto final apresenta grãos recristalizados e alinhados com microestrutura uniforme.

Figura 3.4 | Microestrutura do aço AISI 1045 em (a) material bruto e em (b) material conformado a quente por forjamento com redução 4:1



Fonte: adaptada de Colpaert (2008, p. 359-360).

### Vantagens do trabalho a quente

- Com essa temperatura de trabalho as tensões utilizadas para deformar o material são menores, pois seu limite de escoamento tende a decrescer aumentando a ductilidade.
- Com a recristalização há redução do tamanho de grão, eliminando

a microestrutura grosseira, melhorando as propriedades mecânicas do produto final.

### **Desvantagens do trabalho a quente**

- São necessários equipamentos especiais, como fornos de alta capacidade e alto gasto de energia para o aquecimento da peça.
- As reações do metal com a composição do ar ou gases gerados dentro do forno resulta na perda de metal por oxidação.
- Há maior desgaste das ferramentas, pois a lubrificação para redução do atrito é difícil.
- É necessário determinar grandes tolerâncias dimensionais devido à expansão durante o aquecimento e a contração durante o resfriamento.
- As propriedades mecânicas do material só podem ser restabelecidas mediante aplicação de tratamentos térmicos apropriados.

### **Trabalho a morno**

Os métodos de conformação a morno visam aliar as vantagens das conformações a quente e a frio, pois são aplicados com temperaturas de trabalho mais brandas, favorecendo a recuperação do material simultaneamente com a deformação plástica.

A faixa de temperatura de trabalho a morno é estabelecida entre 30% a 50% da temperatura de fusão do material, então determina-se:

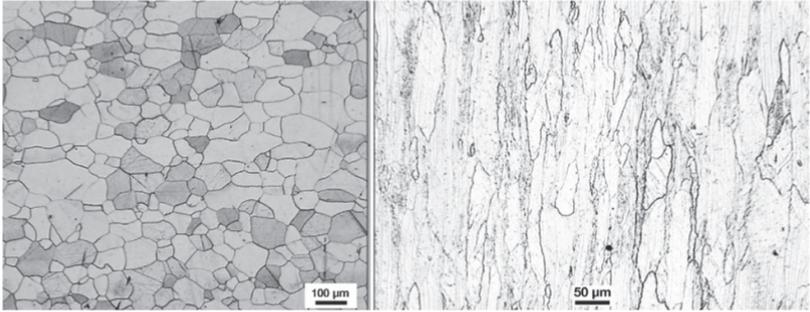
$$0,5T_f \geq T_t \geq 0,3T_f \quad (3.3)$$

### **Alterações microestruturais**

A Figura 3.5 mostra a micrografia de um aço silício recozido utilizado para fins elétricos em transformadores ou motores elétricos. Esse material apresenta forte textura microestrutural e aumento significativo de grãos durante o tratamento térmico, como mostra a Figura 3.5 (a).

Quando processados por conformação mecânica a morno o grão é recristalizado durante pequenas deformações plásticas e possuem aspecto microestrutural mostrado na Figura 3.5 (b), onde os grãos aparecem alongados, assim como aspecto característico de um aço encruado.

Figura 3.5 | Aço para fins elétricos em (a) recozido e em (b) conformado a morno



Fonte: adaptada de Colpaert (2008, p. 99; 405).

### Vantagens do trabalho a morno

Em relação ao trabalho a quente os produtos feitos pelo processo de conformação a morno apresentam melhor acabamento superficial e precisão dimensional devido à redução da formação de óxidos.

Quando essa comparação é feita com o trabalho a frio, o processo a morno reduz os esforços de deformação atuantes, o que permite que a conformação de peças com geometrias complexas seja realizada facilmente.

A conformação a morno melhora ainda a ductilidade do material e elimina a necessidade de aplicações de tratamentos térmicos, o que aumentaria o custo final do produto.

### Desvantagem do trabalho a morno

A maior desvantagem desse método é o aumento do limite de escoamento devido à redução da temperatura de deformação, pois com a necessidade de aumento da força aplicada há aumento de atrito e, portanto, são necessários equipamentos mais potentes e ferramentas mais resistentes.

### Trabalho a frio

A deformação é considerada a frio quando se passa a temperaturas em que a energia de deformação é armazenada no material, não ocorrendo processos de recuperação e recristalização.

Esse procedimento ocorre devido à alta intensidade de atrito gerada no sistema com temperaturas de trabalho ( $T_f$ ) de até 30% da temperatura de fusão ( $T_f$ ) do material, dada por:

$$T_i = 0,3T_f \quad (3.4)$$

Os produtos conformados a frio ou em baixas temperaturas têm, em geral, menor índice de deformação do material resultando em melhor acabamento superficial e tolerâncias dimensionais mais rígidas (COLPAERT, 2008). Adicionalmente há aumento de resistência e dureza e decréscimo na ductilidade do material.

### Alterações microestruturais

Durante a deformação plástica a frio ocorre um aumento no número de discordâncias, as quais, em virtude de sua interação, resultam num elevado estado de tensão interno na rede cristalina, em função disso, após o processo de conformação mecânica a frio, é comum a aplicação de tratamentos térmicos para recuperar as propriedades do material.

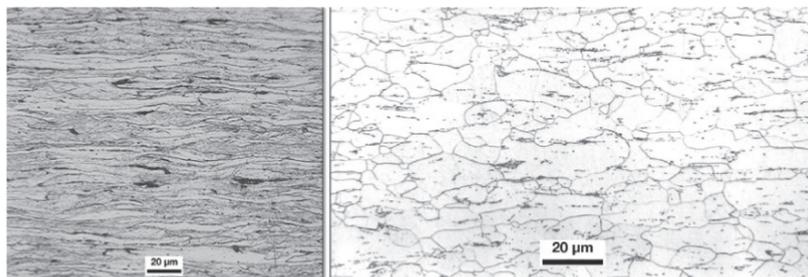


#### Refleta

Você já percebeu que a aplicação de tratamentos térmicos em peças conformadas é uma atividade comum? Sendo assim, pesquise e responda: Quais são os métodos de tratamentos térmicos mais comuns para o alívio de tensões e recuperação de propriedades mecânicas em produtos fabricados por conformação mecânica?

As Figuras 3.6 (a) e (b) mostram a microestrutura de um aço de baixo carbono após a conformação a frio. Na Figura 3.6 (a) está mostrada a microestrutura do aço encruada antes do recozimento, apresentando os grãos muito alongados e a Figura 3.6 (b) mostra o mesmo aço após recristalização obtida por um tratamento térmico a 660 °C mostrando grãos maiores e alinhados.

Figura 3.6 | Folha de aço baixo carbono em (a) conformado a frio e em (b) recristalizado



Fonte: adaptada de Colpaert (2008, p. 387; 396).



## Exemplificando

A temperatura de fusão de metais corresponde ao ponto de temperatura ao qual um material metálico passa do estado sólido para o estado líquido. Considerando que para a execução de processos de conformação mecânica como laminação, trefilação, extrusão, entre outros, a temperatura de trabalho define se o método será executado a quente, a morno ou a frio. Sendo assim, para um Ferro Fundido Cinzento cuja temperatura de fusão, em graus Celsius, é de  $T_f = 1290$  determina-se:

Para o trabalho a quente, a temperatura deve ser pouco acima de 50% de  $T_f$ :

$$T_i = 0,5T_f \rightarrow T_i = 0,5 \times 1290 \rightarrow 645 \text{ graus Celsius}$$

Para trabalho a morno a temperatura deve ser entre 50% a 30% de  $T_f$ :

$$0,5T_f \geq T_i \geq 0,3T_f \rightarrow 0,5 \times 1290 \geq T_i \geq 0,3 \times 1290 \rightarrow 645 \geq T_i \geq 387$$

Para trabalho a frio deve ser de até 30% de  $T_f$ :

$$T_i = 0,3T_f \rightarrow 0,3 \times 1290 \rightarrow 387 \text{ graus Celsius.}$$

## Sem medo de errar

Iniciando suas atividades na empresa P&T Produtos Industriais especializada na produção de arames, cabos, perfis de aço por conformação mecânica a frio, considere que você integra o setor de P&D da empresa, que vem estudando a viabilidade de implantação de uma nova área de produção de barras cilíndricas em aço AISI 1020, reduzindo assim os custos com a compra de matéria-prima para a fabricação de seus produtos, além de criar um novo segmento de produtos para venda.

Portanto, nessa primeira etapa, sua função no grupo é de escolher o processo a ser adotado quanto à viabilidade do material empregado, temperatura de trabalho e tipo de conformação.

Assim, no relatório solicitado pelo gestor de P&D, considere que o aço utilizado é um AISI 1020 cuja temperatura de fusão é  $1.515 \text{ }^\circ\text{C}$  e devido à sua alta densidade a temperatura de trabalho a quente é a mais adequada, pois será necessária a aplicação de grandes esforços mecânicos para a deformação plástica do material.

Dessa forma, define-se a temperatura de trabalho aplicando a equação abaixo:

$$T_i = 0,5T_f \rightarrow T_i = 0,5 \times 1515^0 C \rightarrow 757,5^0 C$$

Uma vez determinada a temperatura de trabalho pouco acima de 757,5 °C você avalia que os processos de conformação mais viáveis seriam a laminação ou a extrusão, pois são técnicas aptas a produzir a matéria-prima de barras cilíndricas utilizadas na produção de arames, cabos, fios e perfis.

Assim, sua avaliação consistirá em pesquisa na literatura sobre a aplicação de laminação e extrusão a quente e a frio, sob ponto de vista de microestrutura e comportamento mecânico, além de refletir sobre os custos dessas aplicações.

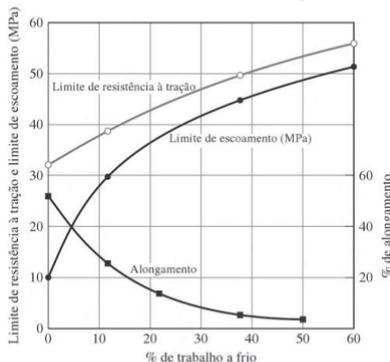
## Avançando na prática

### Análise de material conformado a frio

#### Descrição da situação-problema

Considere que você trabalha no setor de desenvolvimento de uma empresa que produz chapas laminadas de ligas de cobre. Suponha que de tempos em tempos uma de suas atividades é avaliar o material realizando ensaios de tração. Foram realizados ensaios de tração e os resultados para análise foram plotados em um gráfico do comportamento mecânico para várias porcentagens de redução por conformação cujos resultados estão mostrados na Figura 3.7. Sendo assim, faça uma avaliação dos resultados obtidos e correlacione com a movimentação de discordâncias para as condições de 30% e 50% de deformação, conforme solicitado pelo seu supervisor.

Figura 3.7 | Porcentagem de deformação a frio em função do limite de resistência à tração e do alongamento até a fratura de uma liga de cobre



Fonte: Smith e Hashemi (2012, p. 182).

## Resolução da situação-problema

Avaliando os resultados obtidos na Figura 3.7 determina-se que quando metais dúcteis, como ligas de cobre, sofrem deformações a frio, novas discordâncias surgem e irão interagir com as já existentes. Como a densidade de discordâncias aumenta com a deformação, suas movimentações se tornam cada vez mais difíceis e dessa maneira o metal encrua, ou seja, endurece por deformação.

Percebe-se que com uma deformação a frio de 30% há aumento da resistência à tração do cobre de aproximadamente 200MPa para 320MPa. Entretanto, associada ao aumento da resistência à tração, ocorre uma redução do alongamento até a quebra, ou seja, a ductilidade é reduzida.

Conforme pode-se observar, para a deformação a frio do cobre de 50% faz com que o alongamento até o rompimento diminua cerca de 52 para 10% devido ao encruamento.

### Faça valer a pena

**1.** Materiais de alta densidade e resistência mecânica são melhores conformados com temperatura de trabalho a quente. Para um ferro fundido nodular, cuja temperatura de fusão é de  $T_f = 1536^{\circ}\text{C}$  e considerando que esse material poderá ser conformado a quente e a frio, os valores da temperatura de trabalho ( $T_i$ ) para esse material são dados por:

$T_i = 0,5T_f$  para trabalho a quente.

$T_i = 0,3T_f$  para o trabalho a frio.

São valores aplicados na conformação a quente e a frio do ferro fundido nodular:

- Exatamente  $768^{\circ}\text{C}$  e  $460,8^{\circ}\text{C}$ , respectivamente.
- Exatamente  $768^{\circ}\text{C}$  e pouco acima de  $460,8^{\circ}\text{C}$ , respectivamente.
- Valores pouco abaixo de  $768^{\circ}\text{C}$  e pouco acima de  $460,8^{\circ}\text{C}$ , respectivamente.
- Valores pouco abaixo de  $768^{\circ}\text{C}$  e pouco abaixo de  $460,8^{\circ}\text{C}$ , respectivamente.
- Valores pouco acima de  $768^{\circ}\text{C}$  e até  $460,8^{\circ}\text{C}$ , respectivamente.

**2.** O trabalho a quente é definido como a deformação sob condições de alta temperatura e taxas de deformações elevadas em que os processos de recuperação e recristalização ocorrem simultaneamente com a conformação. São vantagens desse processo de conformação mecânica:

I. Com essa temperatura de trabalho as tensões utilizadas para deformar o material são menores, pois seu limite de escoamento tende a decrescer aumentando a ductilidade.

II. Os produtos conformados apresentam menor índice de deformação do material resultando em melhor acabamento superficial e tolerâncias dimensionais mais rígidas.

III. Com a recristalização há redução do tamanho de grão, eliminando a microestrutura grosseira, melhorando as propriedades mecânicas do produto final.

IV. Melhora ainda a ductilidade do material e elimina a necessidade de aplicações de tratamentos térmicos, o que aumentaria o custo final do produto.

São verdadeiras as asserções descritas acima:

a) I, II e III apenas.

b) I, II e IV apenas.

c) I e III apenas.

d) II e IV apenas.

e) III e IV apenas.

**3.** Durante a deformação plástica a frio ocorre um aumento no número de discordâncias, as quais, em virtude de sua inteiração, resultam num elevado estado de tensão interno na rede cristalina chamado \_\_\_\_\_.

A alternativa que completa corretamente a frase é:

a) Encruamento.

b) Limite de escoamento.

c) Limite de resistência à tração.

d) Ductilidade.

e) Temperatura de trabalho.

## Seção 3.2

### Tipos de conformação mecânica: laminação, forjamento e estampagem

#### Diálogo aberto

Nesta seção, você aprenderá sobre as técnicas e características de conformação mecânica por laminação, forjamento e estampagem. Serão apresentadas as particularidades de cada processo, como esforços e possíveis temperatura de trabalho aplicados, o que lhe fornecerá maior confiabilidade na solução da situação-problema. Dando continuidade nas suas atividades no setor de pesquisa e desenvolvimento da empresa P&T Produtos Industriais especializada na produção de arames, cabos, perfis de aço por conformação mecânica a frio, sua função é a de avaliar a possibilidade de implantação de uma nova área de produção de barras cilíndricas em aço AISI 1020 com o objetivo de reduzir os custos com a compra de matéria-prima, além de criar um novo segmento de produtos para a venda.

Sua proposta é de avaliar qual processo e em qual temperatura é a mais adequada para investimento da empresa, sendo assim você já avaliou que as melhores condições são a laminação ou a trefilação com temperaturas de trabalho a quente ou a frio.

Para as condições de laminação a quente você determinou que a temperatura de trabalho ideal é de pouco acima de  $T_f = 757,5$  graus Celsius, agora sua estratégia consiste em avaliar as propriedades mecânicas e microestruturais do aço AISI 1020 laminado a quente e a frio encontrados na literatura.

Portanto, vamos seguir com nossos estudos e desenvolver tal estratégia?

#### Não pode faltar

##### Laminação

Como mencionado, a conformação mecânica é definida como operações onde se aplicam solicitações de deformações permanentes nas dimensões e alteram as propriedades mecânicas do metal. Em todos

os processos de conformação aplica-se uma solicitação esperando uma resposta, e na laminação uma solicitação aplicada é a redução da espessura como resposta (CELTIN; HELMAN, 2013).

Define-se laminação como a passagem forçada de uma peça ou barra de metal entre dois cilindros, girando em sentido oposto com a mesma velocidade, distanciados entre si a uma distância menor que o valor da espessura a ser (CHIAVERINI, 1995; CELTIN; HELMAN, 2013).

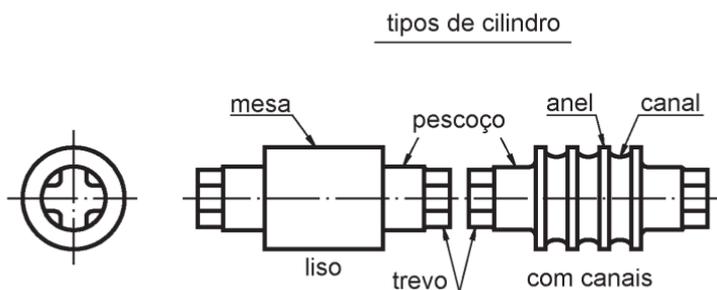
Ao passar entre os cilindros do laminador, o metal sofre deformação plástica, a espessura é reduzida e o comprimento e a largura são aumentados, entretanto, esse processo é obtido de maneira gradual e, portanto, o equipamento de laminação deve ser capaz de submeter o material a uma sequência de passes (BRESCIANI et al., 2011).

### Cilindros de laminação

Os cilindros são as ferramentas principais do laminador, pois são eles que conformam diretamente o material. São fabricados em ferro fundido ou em aço e quanto à geometria podem ser lisos para a produção de placas, chapas e barras ou podem possuir canais para a produção de vigas e perfis. A Figura 3.8 mostra esses dois tipos com suas respectivas geometrias.

A região onde ocorre o processo de laminação é chamada de mesa, enquanto que o pescoço é a área projetada para suportar o peso do cilindro e a carga de laminação e, por fim, no trevo é onde o eixo do cilindro é acoplado ao motor do laminador para que se inicie o processo de rotação (BRESCIANI et al., 2011; CELTIN; HELMAN, 2013).

Figura 3.8 | Partes de um cilindro de laminação em (a) cilindros lisos e em (b) cilindros com canais



Os cilindros podem ser montados em grupos formando o trem de laminação, que consiste no conjunto de cilindros acoplados a equipamentos auxiliares formando os laminadores.

Segundo Bresciani et al. (2011), um projeto de cilindro deve ser feito com as seguintes recomendações:

1. A redução do material a ser laminado deve ser adequada aos diâmetros dos cilindros e à capacidade de aplicação de tratamento térmico para reduzir as fraturas do cilindro e a potência necessária do laminador;

2. As seções transversais resultantes ao longo da peça devem ser as mais uniformes possíveis;

3. A quantidade de metal laminado por cilindro é um fator de custo importante e o desgaste dos cilindros deve ser minimizado, ou seja, o custo de fabricação do cilindro será menor se for menor o número de passes necessários à condução do processo de laminação;

4. As deformações da peça nas direções longitudinal e transversal devem ser consideradas;

5. Uma velocidade de laminação elevada restringe o espalhamento lateral e a intensidade de redução;

6. Quanto maior a temperatura de trabalho, maior a intensidade de redução do material;

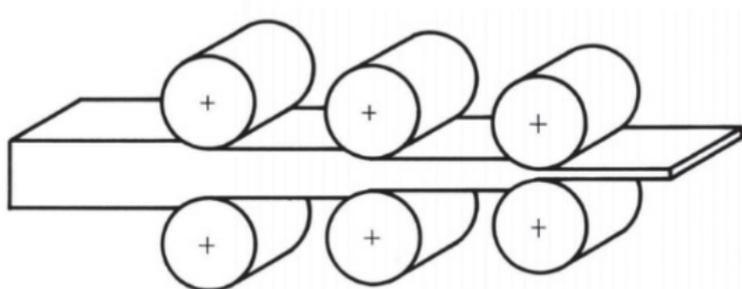
7. Quanto maior o diâmetro do cilindro, maior a intensidade de redução, sem fratura deste e maior a facilidade de entrada da peça devido a maior área de contato, contudo, para esta condição torna-se necessário o aumento da potência motora para provocar o espalhamento e reduzir a deformação na direção de laminação.

## **Tipos de laminadores**

Os laminadores são equipamentos que consistem em um conjunto de cilindros de laminação dispostos de várias formas e se classificam em laminadores duo, trio, quádruplo, universal e sendzimir (CHIAVERINI, 1995; BRESCIANI et al., 2011).

A Figura 3.9 representa uma sequência das operações de laminação de redução de uma barra metálica com um laminador duo.

Figura 3.9 | Representação de um trem contínuo de laminação a frio



Fonte: Celdin e Helman (2013, p. 194).

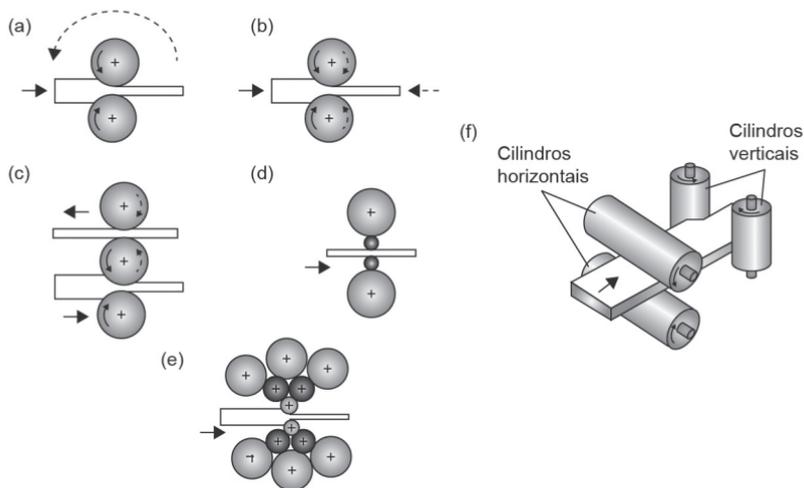
O laminador duo possui dois cilindros de mesmo diâmetro posicionados um em cima do outro, girando em sentidos opostos e com a mesma velocidade. Esse equipamento é encontrado em duas variedades: no laminador duo com retorno para cima, após a deformação a peça é devolvida para o passe seguinte passando sobre o cilindro superior, como representa a Figura 3.10 (a) enquanto que no laminador duo reversível, Figura 3.10 (b), o sentido de rotação dos cilindros é invertido e os cilindros aproximados após cada passe do material.

O laminador trio possui três cilindros dispostos um sobre o outro, a peça é introduzida no laminador passando entre o cilindro inferior e o intermediário e em seguida retorna entre os cilindros superior e intermediário como representado na Figura 3.10 (c).

O laminador quádruplo é composto por quatro cilindros, montados uns sobre os outros, como mostra a Figura 3.10 (d), os dois cilindros menores são chamados de trabalho e os dois maiores são chamados de apoio. Esses laminadores são utilizados na laminação e relaminação de chapas de tal forma que o material adquira espessura uniforme em toda seção transversal.

O laminador sendzimir, Figura 3.10 (e), possui os cilindros de trabalho suportados por dois cilindros de apoio permitindo que sejam realizadas grandes reduções de espessura em cada passagem e o laminador universal possui cilindros horizontais e verticais que são empregados na produção de perfilados e vigas, como representa a Figura 3.10 (f).

Figura 3.10 | Tipos de laminadores em (a) laminador duo; (b) laminador duo reversível; (c) laminador trio; (d) laminador quádruo; (e) laminador sendzimir; (f) laminador universal



Fonte: <[http://www.cimm.com.br/portal/material\\_didatico/6476-laminadores#.WVP2E\\_krLIU](http://www.cimm.com.br/portal/material_didatico/6476-laminadores#.WVP2E_krLIU)>. Acesso em: 26 jun. 2017.

Os produtos laminados são classificados em: produtos semiacabados como blocos e placas, e produtos acabados, que são chapas grossas e finas, tiras para a fabricação de tubos, fios, perfis, barras circulares entre outros.

### Laminação a quente

A laminação a quente consiste em aquecer e reaquecer o material em fornos e em seguida são direcionados, ainda quentes, aos trens de laminação. Esse método é realizado com temperaturas que favorecem a recristalização do metal e, portanto, a deformação plástica não apresenta acúmulo do encruamento, pois durante o processo é resultado de uma tensão de escoamento sensivelmente constante em que o material adquire comportamento líquido viscoso.

Normalmente a laminação a quente é aplicada em operações iniciais onde são necessárias grandes reduções de seções de barras ou placas fundidas e para que sejam deformadas a temperatura de trabalho deve estar acima de 50% da temperatura de recristalização, como já descrito na Seção 3.1.

Esse método possui como principal característica a elevada produtividade, entretanto, exige altos custos de investimentos, pois são necessários conjuntos de equipamentos compostos de fornos para aquecimento e reaquecimento, acoplados aos trens de laminação de tal maneira que haja o mínimo de perda de energia. Outra desvantagem é a presença de óxidos superficiais na chapa laminada e quando houver processamentos posteriores há necessidade de remoção.



**Pesquise mais**

Assista ao vídeo do link indicado e veja como é realizada a laminação a quente. Disponível em: <[https://www.youtube.com/watch?v=7tAR\\_sw1OZU](https://www.youtube.com/watch?v=7tAR_sw1OZU)>. Acesso em: 26 jun. 2017.

### **Laminação a frio**

Praticamente todas as chapas de aço carbono laminadas a frio são provenientes de chapas semiacabadas laminadas a quente. Esse método ocorre em duas etapas, uma para redução da espessura e aumento do comprimento e outra para acabamento (BRESCIANI et al., 2011).

A laminação a frio consiste em uma deformação da rede cristalina por encruamento onde a temperatura de trabalho pode chegar até a 30% da temperatura de fusão do material, devido à ação das forças de atrito geradas entre as peças laminadas e os cilindros.

Além do aumento de resistência mecânica, bom acabamento superficial e tolerâncias dimensionais superiores, nesse processo não há formação de óxidos na superfície do produto, porém, são necessários maiores níveis de forças aplicadas no sistema.

Como também há aumento de dureza, em geral as chapas laminadas são submetidas a tratamentos térmicos para recuperar a ductilidade e controlar as propriedades mecânicas de acordo com as especificações.



**Assimile**

Na conformação mecânica o atrito está presente em todos os processos e no que diz respeito à laminação as forças de atrito são o que causa o arrastamento do material através dos cilindros de laminação. Essa força pode resultar em tensões residuais no material, acabamento superficial ruim e desgaste excessivo dos cilindros, portanto, é de

extrema importância que as superfícies dos corpos em contato sejam previamente lubrificadas.

Os lubrificantes aplicados podem ser secos como sólidos, polímeros, sabões, entre outros, ou podem ser líquidos como óleos.

## Forjamento

É um processo de conformação mecânica com temperatura de trabalho a quente, a morno ou a frio que consiste em deformar plasticamente o metal com equipamentos como martelo ou prensa. É utilizado para fabricar produtos acabados ou semiacabados de alta resistência mecânica.

No forjamento por martelamento o material é deformado por impacto com golpes rápidos e sucessivos no material enquanto que no forjamento por prensagem o metal é sujeito a uma força de compressão em baixa velocidade com a força aplicada gradativamente (BRESCIANI et al., 2011; CELTIN; HELMAN, 2013). Em suma, enquanto o martelamento produz deformação principalmente nas camadas superficiais, a prensagem atinge as camadas mais profundas (CHIAVERINI, 1995).

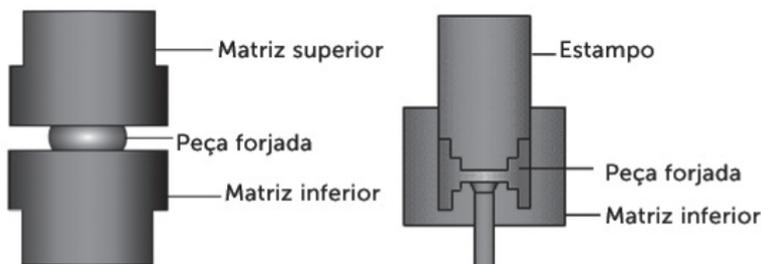
Na maioria das aplicações o forjamento é realizado a quente, com peças aquecidas uniformemente em temperatura adequada. A maioria dessas operações são realizadas em múltiplos passes e resultam em peças com poucas descontinuidades e de boa qualidade, todavia, quanto às propriedades mecânicas há aumento na ductilidade e na tenacidade quando comparado com o estado fundido (BRESCIANI et al., 2011).

Em relação ao trabalho a quente, o trabalho a morno é realizado em temperaturas mais brandas e possuem melhor acabamento dimensional e superficial, porém, tem seu valor de limite de escoamento aumentado implicando no aumento da carga aplicada no processo (BRESCIANI et al., 2011).

O forjamento a frio é utilizado para conformar o material dúctil por encruamento sem que ocorra a formação de rebarbas. Devido à baixa temperatura os esforços aplicados são maiores do que nos forjamentos a quente e a morno, em contrapartida, após o processo as peças apresentam suas dimensões acabadas (CELTIN; HELMAN, 2013).

O processo de forjamento pode ser subdividido em matriz aberta (Figura 3.11 (a)) ou fechada (Figura 3.11 (b)). A matriz é uma peça, usualmente de aço-ferramenta, que possui o formato da peça a ser fabricada.

Figura 3.11 | Exemplo de forjamento com matriz em (a) matriz aberta e em (b) matriz fechada

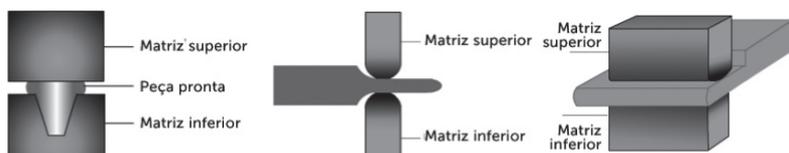


Fonte: adaptada de: <<http://forjasmocam.com.br/forjamento.html>>. Acesso em: 27 jun. 2017.

O forjamento matriz aberta também é conhecido como forjamento simples ou livre e é um processo de preparação de produtos com geometria simples que sofrerão deformações posteriores em matriz fechada ou outro processo de conformação (CHIAVERINI, 1995), como eixos de navios, turbinas e anéis de grande porte.

As operações básicas de forjamento com matriz aberta são recalque, estiramento e alargamento, representadas nas Figuras 3.12 (a), (b) e (c). No recalque é feita a compressão do material com o objetivo de aumentar sua seção transversal; no estiramento a peça é alongada devido às pancadas sucessivas a que é submetido, sendo que a barra de seção circular é transformada em uma barra de geometria diferente como hexagonal ou quadrada; e no alargamento a largura da peça é aumentada reduzindo sua espessura.

Figura 3.12 | Operações básicas de forjamento com matriz aberta. Em (a) recalque, (b) estiramento e em (c) alargamento



Fonte: adaptada de: <<http://forjasmocam.com.br/forjamento.html>>. Acesso em: 27 jun. 2017.

No forjamento em matriz fechada o material adquire o formato da cavidade esculpida na matriz e por isso existe uma restrição ao escoamento do material para as laterais e quanto à extensão e direção nas quais o metal vai escoar são pequenas.



### Pesquise mais

Aprenda mais sobre forjamento, acesse o link indicado abaixo e aprenda mais. Disponível em: <<https://www.youtube.com/watch?v=M5KZGzm3eH4>>. Acesso em: 27 jun. 2017.

## Estampagem

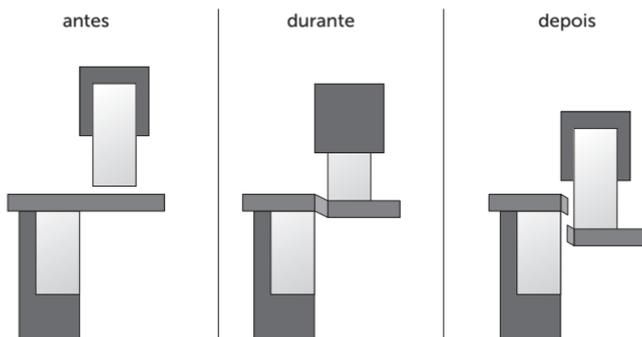
É o processo de conformação mecânica a frio, que compreende um conjunto de operações em que uma chapa plana é submetida à deformação plástica de modo a adquirir uma nova forma geométrica, plana ou oca (CHIAVERINI, 1995).

É realizada com uma prensa munida de uma ferramenta chamada estampo ou matriz e compreende as operações de corte, dobramento e encurvamento e estampagem profunda.

### Cortes das chapas

Através de um punção de corte as chapas apoiadas na matriz são submetidas a uma pressão e cortadas (CHIAVERINI, 1995). A Figura 3.13 representa a ação de corte de uma chapa e para que essa ação seja executada adequadamente, é muito importante que o punção esteja devidamente afiado e a chapa esteja alinhada na matriz.

Figura 3.13 | Representação de corte de chapa para estampagem

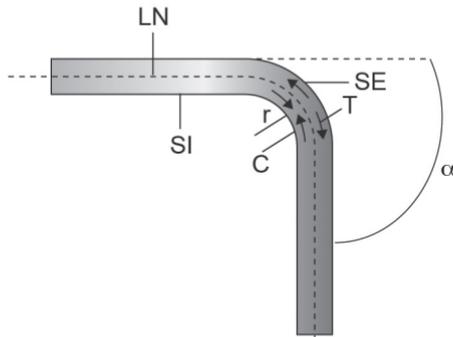


Fonte: <<https://davidkond.wordpress.com/2010/08/10/processo-de-corte-de-chapa/>>. Acesso em: 28 jun. 2017.

## Dobramento

Ao dobrar uma chapa ou tira é preciso avaliar os esforços atuantes na região de curvatura para evitar falhas. A Figura 3.14 mostra os esforços atuantes em uma tira dobrada. Observa-se que na superfície interna (SI) a ação é de compressão (C), enquanto que na superfície externa a ação é de tração (T) em relação ao raio de curvatura ( $r$ ) para o ângulo ( $\alpha$ ). A superfície externa é representada por (SE).

Figura 3.14 | Representação dos esforços atuantes em uma tira dobrada



Fonte: <[http://mmborges.com/processos/Conformacao/cont\\_html/dobramento.htm](http://mmborges.com/processos/Conformacao/cont_html/dobramento.htm)>. Acesso em: 28 jun. 2017.

A linha neutra (LN) corresponde à seção transversal cujo material não é exposto a qualquer ação de tração ou de compressão e por consequência não sofre deformações.



### Exemplificando

Ao se dobrar uma chapa ou tira metálica para aplicação mecânica ou estrutural é de extrema importância que se leve em consideração o raio de curvatura associado à dureza do material.

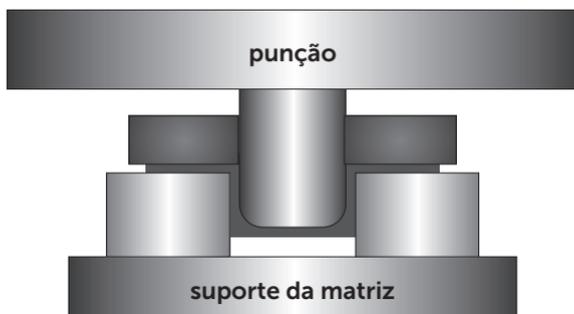
Segundo Chiaverini (1995), devem-se evitar cantos vivos que podem concentrar tensões, formar uma trinca e levar o componente à falha, portanto, determinam-se raios de curvaturas que correspondem a 1 a 2 vezes a espessura da chapa para materiais dúcteis e de 3 a 4 vezes para materiais duros.

## Estampagem profunda

É o processo utilizado para transformar uma chapa plana em um objeto oco como canecas, caixas, tubos, obtidas pela deformação de um disco metálico cortado a partir de uma chapa.

A deformação é realizada com o auxílio de ferramentas de estampo a frio e quando a profundidade de embutimento é grande são necessárias várias operações sucessivas chamadas de reestampagem (CHIAVERINI, 1995). A Figura 3.15 representa o processo de estampagem profunda.

Figura 3.15 | Matriz para estampagem profunda



Fonte: <<http://forjasmocam.com.br/forjamento.html>>. Acesso em: 28 jun. 2017.



**Refleta**

A estampabilidade é a capacidade que a chapa metálica tem de adquirir a forma de uma matriz pelo processo de estampagem, sem se romper ou apresentar qualquer outro tipo de defeito. Sendo assim, esse critério é validado por meio de testes, quais são eles e como são executados?

## Sem medo de errar

Retomando as suas atividades na empresa P&T Produtos Industriais, sua proposta é de avaliar qual processo e temperatura são os mais adequados para investimento da empresa. Você já avaliou que as melhores condições são a laminação ou a trefilação com temperaturas de trabalho a quente ou a frio.

Após determinar a temperatura de trabalho do aço AISI 1020, sua estratégia foi a de pesquisar na literatura as propriedades mecânicas e microestruturais do material em questão laminadas a quente e a frio.

Você encontrou os seguintes resultados de ensaios e análise microestrutural para as seguintes condições:

Material 1 – Aço AISI 1020 laminado a quente.

## Material 2 – Aço AISI 1020 laminado a frio.

Portanto, na Tabela 3.1 você listou os resultados obtidos por ensaio de tração e também avaliou suas respectivas microestruturas mostradas nas Figuras 3.16 (a), (b) e (c). Nela mostra-se a microestrutura do material bruto, ou seja, sem operações de conformação mecânica posteriores.

Tabela 3.1 | Resultados obtidos em ensaios de tração do aço AISI 1020 laminado a frio e a quente

Laminação	$\sigma_y$ (MPa)	$\sigma_r$ (MPa)	E (GPa)	%Al
Frio	280	450	240	22
Quente	210	380	170	28

Fonte: elaborada pela autora.

Onde:

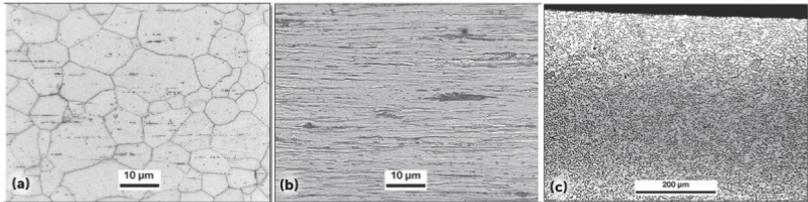
$\sigma_y$  (MPa) - limite de escoamento

$\sigma_r$  (MPa) - limite de resistência à tração

E (GPa) - módulo de elasticidade

%Al - ductilidade

Figura 3.16 | Micrografias do aço AISI 1020. (a) Material bruto; (b) Laminado a frio; (c) Laminado a quente



Fonte: adaptada de Colpaert (2008, p. 401-402).

Na Figura 3.16 (b) você encontrou a microestrutura desse material laminado a frio e é possível perceber o sentido de laminação com os grãos alinhados e orientados no mesmo sentido, indicando alto índice de encruamento, que aumenta a resistência mecânica do material e consequentemente a dureza, como indicam os resultados da Tabela 3.1.

Neste material seria indicado um tratamento térmico de alívio de tensões em baixa temperatura para recuperar suas propriedades mecânicas.

Na Figura 3.16 (c) está mostrada a microestrutura desse material laminado a quente, é possível perceber os grãos recrystalizados no

interior do material e grãos mais alongados na superfície. Esta micrografia indica que esse material precisará de um tratamento térmico para a recuperação do material com aumento de grão e posteriormente alívio de tensões.

Esse material apresenta resultado melhor de ductilidade indicando que não houve acúmulo de encruamento devido ao processo de conformação plástica.

Comparando e avaliando ambas as questões os dois processos são adequados, entretanto, para o processo de laminação a quente será necessário o desenvolvimento de maior número de etapas de tratamento térmico, o que associado aos custos de equipamento para laminação a quente aumentaria o custo final do produto. Assim, entre as laminações avaliadas, a temperatura de trabalho a frio é a mais adequada.

## Avançando na prática

### Cálculo do raio de curvatura de uma panela de alumínio

#### Descrição da situação-problema

Suponha que você é o responsável pelo setor de estampagem profunda de uma empresa que fabrica painéis de aço cuja espessura da chapa é de 10 mm. Todavia, o setor de pesquisa e desenvolvimento está avaliando a possibilidade de substituir o material por ligas de alumínio comum, que são mais leves, baratas e fáceis de serem conformadas. Foi solicitado que você avalie qual seria o raio de curvatura adequado para este material com a mesma espessura de 10 mm. Para tanto, é interessante que você determine o raio de curvatura de ambos os materiais e avalie se será necessária a fabricação de uma matriz nova para a panela estampada em liga de alumínio.

#### Resolução da situação-problema

Considerando que os materiais são diferentes, o aço deve ser considerado como material duro e o alumínio um material dúctil.

A relação para o cálculo do raio de curvatura está diretamente relacionada com a dureza ou ductilidade dos materiais, ou seja, se o material é duro o raio de curvatura é maior, mas se o material é dúctil o raio de curvatura pode ser menor, pois dessa maneira evita-se concentração de tensão intensa nessa região, portanto, tem-se que:

1. Os raios de curvaturas para materiais dúcteis correspondem de 1 a 2 vezes a espessura da chapa.

2. Os raios de curvaturas para materiais duros correspondem de 3 a 4 vezes a espessura da chapa.

Assim, determina-se:

Para o aço, considerado duro com espessura de 10 mm, o raio de curvatura deve ser entre 30 a 40 mm.

Para o alumínio, considerado dúctil com espessura de 10 mm, o raio de curvatura deve ser entre 10 a 20 mm.

Portanto, os valores são muito diferentes para ambos os materiais, a panela de aço tem um raio de curvatura muito superior à panela de alumínio, para tanto será necessário providenciar uma matriz para esta última.

## Faça valer a pena

**1.** A laminação de materiais com alta resistência mecânica e densidade possui melhores resultados quando realizadas a quente, sobre esse processo de conformação mecânica pode-se dizer:

I. Na prática esse método é o mais complexo, pois intervém no resfriamento da chapa laminada.

II. Para altas velocidades de laminação há influência direta na condição de escoamento do material e no seu acabamento.

III. O efeito do encruamento não é predominante e a deformação ocorre com uma tensão sensivelmente constante, para uma velocidade de deformação constante.

Assinale a alternativa que contém as afirmações corretas:

- a) I e II apenas.
- b) II e III apenas.
- c) I e III apenas.
- d) I apenas.
- e) I, II e III.

**2.** O forjamento pode ser realizado de duas formas quanto aos equipamentos, por martelamento, onde o material é deformado por impacto ou por prensagem, que a deformação ocorre lentamente.

Sobre os métodos de conformação mecânica por forjamento, assinale a alternativa correta:

a) O método de martelamento que atinge as camadas mais profundas do

material em poucos passes.

b) O método por prensagem deforma plasticamente as camadas superficiais do material de maneira gradual e progressiva.

c) O método por martelamento é realizado com impactos sucessivos onde a deformação ocorre principalmente nas camadas superficiais.

d) O método por prensagem é adequado para trabalho a frio com materiais de baixa ductilidade.

e) O método por martelamento prensagem é adequado para trabalho a frio com materiais de baixa ductilidade.

**3.** Considere que você precisa dobrar uma chapa de um aço considerada de elevada dureza e baixa tenacidade com espessura é 40 mm. No entanto, sabe-se que os raios de curvatura são determinados em função da espessura de tal modo que não sejam criados cantos vivos que podem concentrar tensões e levar o componente à falha.

Para este tipo de material a correlação adequada para determinar o raio de curvatura é:

I. Duas vezes a espessura, portanto, o raio de curvatura é de 80 mm.

II. De 1 a 2 vezes a espessura, portanto, o raio de curvatura fica entre 40 mm a 80 mm.

III. Três vezes a espessura, portanto, o raio de curvatura é de 240 mm.

IV. O raio de curvatura corresponde à metade da espessura, portanto, é de 20 mm.

Está(ão) correta(s) a(s) asserção(ões):

a) I apenas.

b) III apenas.

c) IV apenas.

d) I e II apenas.

e) III e IV apenas.

## Seção 3.3

### Tipos de conformação mecânica: extrusão e trefilação

#### Diálogo aberto

Suas atividades de pesquisa para a implantação de um novo setor de produção na empresa P&T Produtos Industriais está a caminho da terceira etapa. Lembre-se de que você faz parte do setor de pesquisa e desenvolvimento (P&D) da empresa e estuda a viabilidade de instalar o setor de produção de barras cilíndricas de aço AISI 1020 que são utilizadas como matéria-prima dos produtos fabricados, além das grandes chances de serem consideradas como uma nova linha de produtos. Lembre-se que você já determinou que o melhor processo de conformação mecânica é a laminação a frio através de pesquisa na literatura.

Você fez uma avaliação microestrutural e de propriedades mecânicas do aço AISI 1020 laminado a quente e a frio e concluiu que, apesar de ambos os processos serem adequados, a laminação a quente vai requerer maior gasto com equipamentos e etapas de processamento, o que aumentaria o custo final do produto, portanto, você determinou que a laminação a frio será o tipo de conformação plástica aplicada.

Agora, considere que uma nova questão foi levantada em uma das reuniões de desenvolvimento desse novo segmento, a possibilidade de laminar a frio a liga de alumínio comercial AA 1100, para que dessa maneira a empresa possa ampliar significativamente seu segmento de vendas e de seus produtos.

A possibilidade deve ser determinada de acordo com todos os aspectos avaliados para o aço AISI 1020, sob ponto de vista de tipo de processo, temperatura de trabalho, propriedade mecânica e microestrutura.

Então, vamos finalizar nossos estudos e resolver mais essa solicitação?

#### Não pode faltar

##### Extrusão

A conformação plástica por extrusão consiste em forçar uma

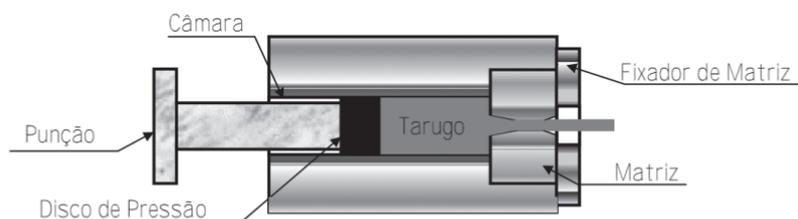
barra metálica cilíndrica, também chamada de tarugo ou lingote, através de um orifício em uma matriz por meio da ação de compressão aplicada sobre um pistão (CALLISTER JÚNIOR, 2012; CELTIN; HELMAN, 2013).

Em sua maioria os processos de extrusão são realizados a quente, o que diminui os efeitos de encruamento e, portanto, a peça extrudada, ou seja, produzida pela técnica em questão possui a forma desejada e uma seção reta transversal reduzida (CHIAVERINI, 1995). Dentre os produtos resultantes desse processo estão os perfis, tubos e barras que possuem geometrias de seção reta e complexas especialmente em materiais de alta ductilidade que resultam em produtos com excelentes tolerâncias dimensionais e qualidade superficial (CELTIN; HELMAN, 2013). Existem quatro tipos de extrusão: direta, indireta, lateral e hidrostática.

### Extrusão direta

Na extrusão direta o material é colocado em uma câmara e impelido através da matriz pela ação do pistão como mostra a Figura 3.17. Um disco de pressão é colocado no final do pistão, também chamado de êmbolo, em contato com o tarugo e quando a carga compressiva é aplicada o material é forçado contra a matriz.

Figura 3.17 | Representação de extrusão direta



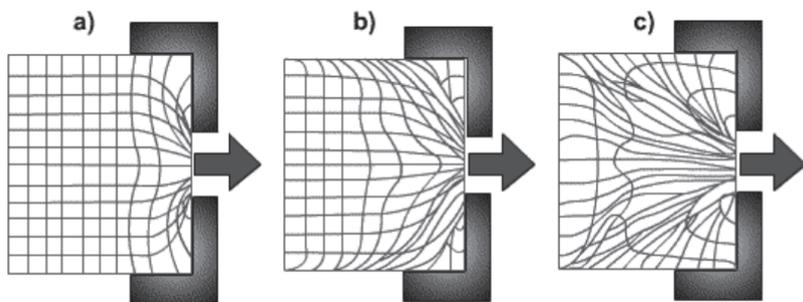
Fonte: Palmeira (2005a, p. 4).

A passagem do material pela matriz provoca atrito entre este e a superfície da câmara. Esse atrito resulta em aumento da força necessária para extrudar o metal, além de retardar o fluxo do metal na região periférica da barra (PALMEIRA, 2005a; CELTIN; HELMAN, 2013).

A Figura 3.18 (a), (b) e (c) mostra a movimentação do fluxo de metal que é semelhante a um fluido escoando por um canal. Na Figura 3.18 (a) está representado um material em matriz quadrada indicando um sentido de aplicação de compressão; (b) e (c) mostram que o metal

fica estacionado nas extremidades enquanto o material escoo na região central formando uma textura preferencial na seção longitudinal (PALMEIRA, 2005a). Nesse método a redução do atrito na câmara pode ser obtida como uso de lubrificantes resistentes a temperaturas elevadas.

Figura 3.18 | Etapas de escoamento do material em uma extrusão com matriz quadrada



Fonte: Palmeira (2005a, p. 7).



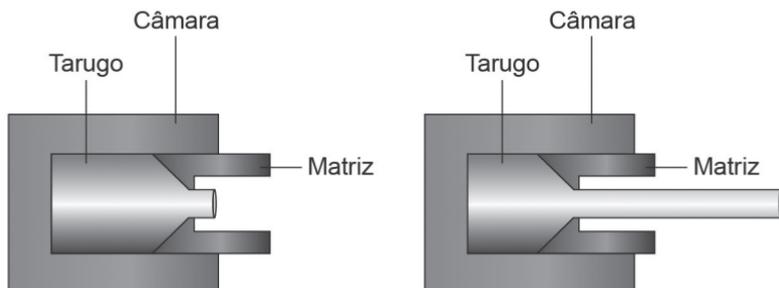
Pesquise mais

Assista ao vídeo indicado e veja como são extrudados tubos e perfis de alumínio. Disponível em: <<https://www.youtube.com/watch?v=SSEBI2BQ8tY>>. Acesso em: 30 jun. 2017.

## Extrusão indireta

A extrusão indireta também pode ser chamada de extrusão inversa, onde é a matriz que se desloca em relação ao metal. As forças de atrito são menores e as pressões requeridas para a extrusão são bem menores do que na extrusão direta. A Figura 3.19 mostra uma sequência desse processo de extrusão.

Figura 3.19 | Representação da extrusão indireta



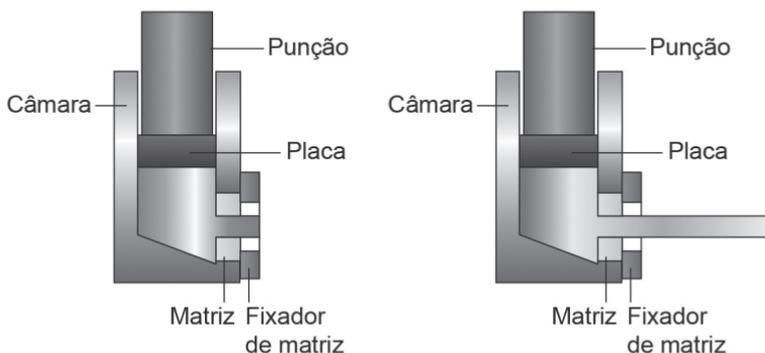
Fonte: Palmeira (2005a, p. 4).

Esse tipo de trabalho mecânico diminui a formação de vazios centrais na parte posterior do produto extrudado e também a quantidade de descarte da extremidade, em contrapartida uma desvantagem é a má qualidade superficial do produto.

### Extrusão lateral

Na extrusão lateral o material é forçado através de abertura lateral da câmara, sendo assim, os eixos do punção e da peça têm diferentes direções, normalmente, formando um ângulo reto, como mostra a Figura 3.20.

Figura 3.20 | Representação da extrusão lateral

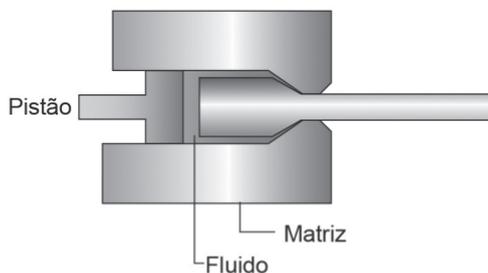


Fonte: Palmeira (2005a, p. 5).

### Extrusão hidrostática

Pode ser realizada pela atuação de um êmbolo e fluido hidráulico. Esse processo de conformação mecânica emprega um fluido sob pressão para empurrar o material através da matriz, o que reduz a ação do atrito, como mostra a Figura 3.21.

Figura 3.21 | Representação da extrusão hidrostática



Fonte: Palmeira (2005a, p. 11).

Em geral é realizada a temperatura ambiente, usando óleo vegetal com boa viscosidade e lubrificação, mas para trabalho em alta temperatura utiliza-se ceras, polímeros ou vidro.

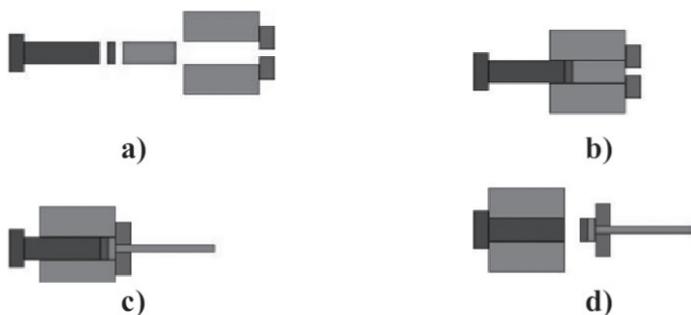
Como não há atrito entre o material e a matriz os produtos apresentam boa ductilidade, tornando-se um método favorável para extrudar materiais frágeis ou de longos comprimentos. Sua maior desvantagem é a dificuldade do controle da velocidade de extrusão, pois quando alta leva a um aquecimento do produto.



### Exemplificando

Basicamente, as etapas de extrusão estão mostradas na Figura 3.22:

Figura 3.22 | Etapas de extrusão



Fonte: Palmeira (2005a, p. 37).

- Alinhamento da peça;
- Início da extrusão com avanço do pistão;
- Fim da extrusão;
- Retirada da ferramenta e do extrudado com o resíduo do tarugo.

## Trefilação

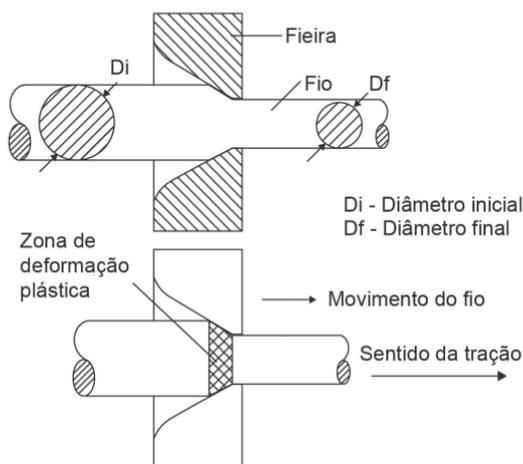
A trefilação é um processo de conformação plástica que consiste em forçar a passagem de uma barra através de uma ferramenta chamada feira, de formato cilíndrico. Neste processo é possível produzir tubos de pequenos diâmetros, fios, cabos e arames (PALMEIRA, 2005b; CELTIN; HELMAN, 2013).

A passagem do material pela feira provoca a redução de seu

diâmetro (Figura 3.23), para o caso dos fios também pode ser chamado de bitola, e como esse processo é executado a frio ocorre o encruamento com alteração das propriedades mecânicas, como a redução da ductilidade e aumento da resistência mecânica.

Os esforços gerados durante esse processo estão relacionados à redução da bitola do fio, ou seja, como mostrado na Figura 3.23, há esforços compressivos exercidos pelas paredes do furo da ferramenta, associados à tração aplicada na direção axial do fio e de origem externa por onde está sendo puxado.

Figura 3.23 | Esforços predominantes na trefilação



Fonte: Palmeira (2005b, p. 2).



### Assimile

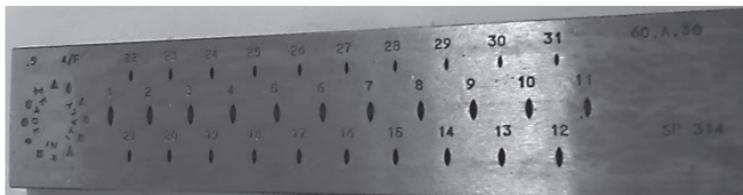
Os produtos trefilados são classificados como: fio, arame, tubo e barra. Observe que são produto de seção circular. As barras podem ser produzidas com diâmetro menor que 5 mm e a partir de então também podem ser chamados de arames.

Sempre há redução de diâmetro desses produtos ao longo de uma mesma linha de produção na mesma máquina. Isso é feito devido ao posicionamento de várias fieiras com diâmetros de abertura cada vez menores de tal maneira que se obtenha o produto com as dimensões desejadas ao passar pela última ferramenta.

A Figura 3.24 mostra um exemplo de fieira com várias medidas de

aberturas para trefilação. Note que em uma mesma ferramenta o fio pode ser reduzido em vários diâmetros.

Figura 3.24 | Exemplo de ferramenta de trefilação



Fonte: <[https://3.bp.blogspot.com/CdjjIKUxEy5Q/WLtf250uvFI/AAAAAAAAItg/rGaEASHoFlcpc9KY\\_Acy2P96cu8wtC\\_OQCLeB/s1600/Fieira%2BNavete%2BItaliana.jpg](https://3.bp.blogspot.com/CdjjIKUxEy5Q/WLtf250uvFI/AAAAAAAAItg/rGaEASHoFlcpc9KY_Acy2P96cu8wtC_OQCLeB/s1600/Fieira%2BNavete%2BItaliana.jpg)>. Acesso em: 10 jul. 2017.

Existe uma condição para redução máxima dos fios com a passagem por uma gama de fieiras e pode ser calculada com a relação de redução da seção a cada passe dada por:

$$R = \sqrt[n]{\left(\frac{D_n}{D_i}\right)^2} \quad \text{Eq. (3.5)}$$

Onde:  $R$  é a relação de redução de seção,  $D_n$  é o diâmetro de passe,  $D_i$  diâmetro inicial e  $n$  número de passadas.

E para cálculo de redução de seção ( $D_n$ ) aplica-se:

$$D_n = \sqrt{D_{n-1}^2 \times R} \quad \text{Eq. (3.6)}$$

Onde  $D_{n-1}$  é o valor do diâmetro anterior calculado em uma sequência de fieiras.

### Máquinas de trefilação

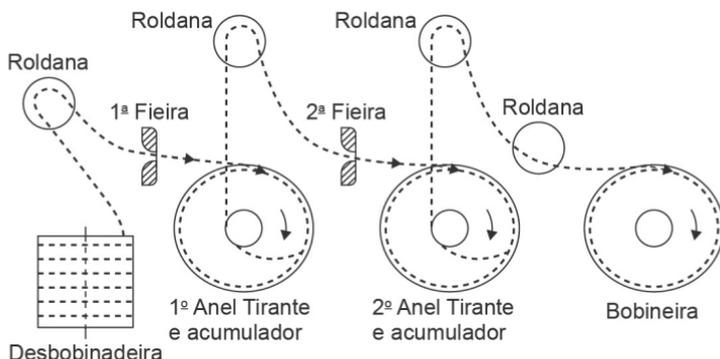
A classificação das máquinas de trefilação se dá quanto ao esforço aplicado e são divididas em máquina de trefilar sem deslizamento e máquina de trefilar com deslizamento.

A Figura 3.25 representa um esquema de máquinas de trefilar sem deslizamento que contém sistemas de tração do fio que o conduz através do furo da fieira constituído de um anel tirante que acumula o fio trefilado e depois permite seu movimento em direção a uma segunda fieira e assim por diante (PALMEIRA, 2005b).

É importante salientar que as velocidades de bobinamento de

cada anel tendem a aumentar para compensar o aumento do comprimento do fio. Entretanto, se a quantidade do fio acumular em um anel deve-se reduzir a velocidade desse anel ou aumentar a velocidade do próximo anel.

Figura 3.25 | Representação de máquina de trefilar sem deslizamento



Fonte: Palmeira (2005b, p. 6).

Máquina de trefilar com deslizamento são utilizadas para trefilação de fios com pequenos diâmetros. A Figura 3.26 representa uma máquina desse tipo.

Para seu funcionamento o fio parte de uma bobina e passa por uma roldana e se dirige para a primeira fieira. Em seguida o fio é tracionado por um anel tirante de tal maneira que fique alinhado com a segunda fieira. Após passar pela segunda fieira é direcionado com maior velocidade para o segundo anel tirante e em seguida o fio é bobinado.

Figura 3.26 | Representação de máquina de trefilar com deslizamento



Fonte: Palmeira (2005b, p. 6).

## Lubrificação na trefilação

O aumento do atrito provoca maior desgaste da ferramenta e pode causar o aparecimento de defeitos superficiais no fio, além de exigir maior esforço de trefilação e elevar a temperatura de trabalho, sendo assim é importante que esse atrito seja controlado pela ação de um lubrificante que deve ter as seguintes características:

- Evitar a soldagem entre as superfícies em contato.
- Aumentar a resistência à deterioração às temperaturas de trefilação.
- Aumentar a resistência química à ação desagregadora.
- Capacidade de manter a superfície do fio limpa.
- Podem ser líquidos ou sólidos emulsionáveis em água.

## Ferramentas de trabalho

Os materiais comumente utilizados em feira são os diamantes para produtos de diâmetro menor ou até de 2 mm e metal duro para produtos com diâmetro maior que 2 mm. Durante o trabalho essas ferramentas sofrem alto índice de desgaste devido ao intenso atrito gerado e, portanto, algumas recomendações devem ser adotadas:

- O material deve permitir a trefilação de grande quantidade de fios sem que ocorra desgaste.
- A feira deve suportar altas velocidades de produção.
- O produto deve ser conferido constantemente.
- Entre as paradas a feira deve ser substituída e inspecionada.



**Refleta**

Ferramentas de diamante são utilizadas em todos os ramos de fabricação mecânica, por exemplo, na usinagem e na trefilação. Avalie suas propriedades físicas, químicas e mecânicas e responda: Quais são suas principais aplicações e finalidades de aplicação?

## Sem medo de errar

Você precisa avaliar a possibilidade de utilizar o mesmo tipo de processo para um material diferente, nesse caso ligas de alumínio

comercial 1100, sem custos adicionais. Utilizando os mesmos critérios de avaliação do processo para o aço AISI 1020, desenvolve-se:

**Avaliação do material:**

Ligas e alumínio são metais não ferrosos que possuem alta ductilidade e excelente resistência mecânica principalmente quanto à tenacidade. São consideradas ligas leves, facilmente deformáveis e possuem temperatura de fusão de 665 °C.

A Tabela 3.2 compara as propriedades da liga AISI 1020 com a liga de alumínio AA 1100, ambas laminadas a frio. Observa-se que os limites de escoamento, de resistência à tração e módulo de elasticidade da liga de aço são superiores à liga de alumínio, como esperado e, portanto, os esforços aplicados no laminador serão proporcionalmente menores para fabricar as barras cilíndricas de alumínio.

Tabela 3.2 | Comparação com as propriedades mecânicas e térmicas do Aço AISI 1020 e da liga de alumínio AA 1100

<b>Material</b>	$\sigma_y (MPa)$	$\sigma_r (MPa)$	$E (GPa)$	$T_f (^{\circ}C)$	$T_t (^{\circ}C)$	$\sigma_y (MPa)$
Aço	210	380	170	28	1515	454,5
Alumínio	115	142	69	9	665	196,5

Fonte: elaborada pela autora.

Onde:

$\sigma_y (MPa)$  - limite de escoamento       $\sigma_r (MPa)$  - limite de resistência à tração

$E (GPa)$  - módulo de elasticidade      %Al - ductilidade

$T_f$  - temperatura de fusão do material       $T_t$  - temperatura de trabalho a frio

Sabemos que a conformação mecânica é considerada a frio para a temperatura de trabalho de até 30% da temperatura de fusão do material devido à ação do atrito. A Tabela 3.2 também mostra esses valores para ambas as ligas e como a temperatura de trabalho, para qual o equipamento será projetado, é de aproximadamente  $T_t = 454,5$  graus Celsius, a laminação do alumínio não será um problema quanto à temperatura.

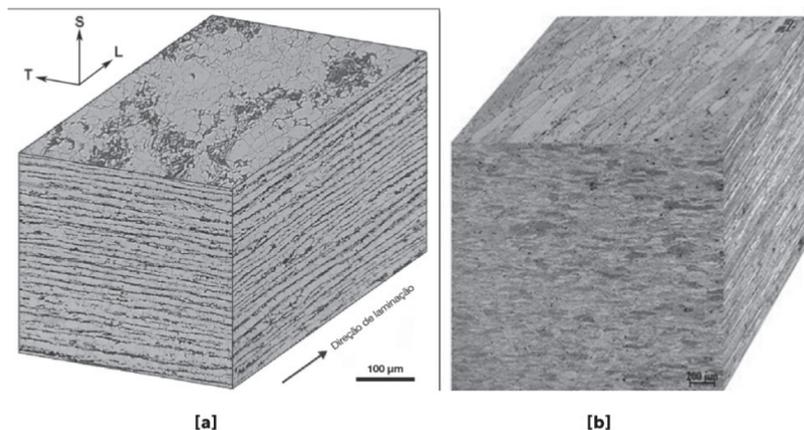
A Figura 3.27 (a) e (b) mostra um cubo montado com as micrografias de ambos materiais laminados a frio onde L representa a seção longitudinal, T a seção transversal e S a seção de topo.

Ambas micrografias mostram forte texturização nos planos S-L e S-T. A direção L apresenta, em maior escala que a direção T, uma microestrutura bandeada típica do processo de laminação a frio. Isso indica que a direção L corresponde à direção de laminação dos materiais.

Estrutura bandeada é a definição do surgimento de “bandas” alternadas das fases constituintes na microestrutura, por exemplo, para a Figura 3.27 (a) é possível ver as bandas de perlita (mais escuras) e ferrita (mais claras) nas direções T e L.

Na Figura 3.27 (b) o bandeamento tem menor intensidade, entretanto, esse aspecto é característico do material e da quantidade de vezes que foi laminado, ou seja, conclui-se que o aço é laminado mais vezes que o alumínio devido à sua alta resistência e densidade.

Figura 3.27 | Cubo tridimensional mostrando as microestruturas nas direções longitudinal (L), transversal (T) e de topo (S). Em (a) Aço AISI 1020 e em (b) alumínio AA 1100



Fonte: adaptada de Colpaert (2008, p. 387); em (b) Maciel (2013, p. 117).

Sob ponto de vista de processamento por deformação plástica é possível concluir que ambos materiais possuem microestrutura semelhante, indicando que podem ser processadas pela mesma técnica de conformação mecânica.

Avaliando todos os aspectos conclui-se que a liga de alumínio AA 1100 é adequada para aplicação de laminação a frio, pois serão aplicados menores esforços aos laminadores e a temperatura

de trabalho será relativamente baixa quando comparada com a temperatura de trabalho do aço.

Sob ponto de vista de produto final, o alumínio laminado também apresenta microestrutura laminada semelhante ao aço, indicando que não serão necessários tratamentos térmicos complexos para recuperar as propriedades do material.

Parabéns, mais um desafio vencido!

## Avançando na prática

### Trefilação de fio de cobre para motor elétrico

#### Descrição da situação-problema

Motores elétricos são fabricados com bobinas de fio de cobre para transformar energia elétrica em energia mecânica. A potência do motor é estipulada de acordo com a bitola (diâmetro) de fio e a quantidade de voltas necessárias para fabricar a bobina.

Considere que você é o responsável pela linha de produção dos fios de cobre em uma empresa de trefilação e que foi feita uma venda de um fio de bitola de diâmetro igual a  $\phi$  1,30mm. Ao avaliar se o estoque percebeu que a menor bitola produzida é de diâmetro igual a  $\phi$  4,80mm e como a venda foi feita com ordem expressa, o produto deve ser entregue em até 3 dias. Devido à urgência de entrega sua avaliação é de que a melhor solução é reduzir o diâmetro da bitola em estoque para o diâmetro solicitado.

Você decide que a redução será feita com o processamento do fio em estoque em 10 feiras e para isso é necessário que calcule o diâmetro requerido para cada feira. Para o cálculo da relação de redução da seção a cada passe aplica-se a equação 3.5:

Onde:  $R$  é a relação de redução de seção,  $D_n$  é o diâmetro de passe,  $D_i$  diâmetro inicial e  $n$  número de passadas.

$$R = \sqrt[n]{\left(\frac{D_n}{D_i}\right)^2}$$

E para cálculo de  $D_n$  aplica-se a equação 3.6:

$D_n = \sqrt{D_{n-1}^2 \times R}$  onde  $D_{n-1}$  é o valor do diâmetro anterior calculado em uma sequência de feiras.

## Resolução da situação-problema

Assim, temos os seguintes valores  $n = 10$  passes:  $D_1 = 4,80\text{mm}$  ;  $D_{10} = 1,30\text{mm}$  ;

Calcula-se para cada passada

$$R = \sqrt[n]{\left(\frac{D_n}{D_1}\right)^2} = \sqrt[10]{\left(\frac{1,30}{4,80}\right)^2} ; 0,77 \text{ e aplica-se:}$$

$$D_n = \sqrt{D_{n-1}^2 \times R} \rightarrow D_1 = \sqrt{4,80^2 \times 0,77} = 4,21\text{mm}$$

$$D_2 = \sqrt{D_1^2 \times R} \rightarrow D_2 = \sqrt{4,21^2 \times 0,77} = 3,69\text{mm}$$

$$D_3 = \sqrt{D_2^2 \times R} \rightarrow D_3 = \sqrt{3,69^2 \times 0,77} = 3,24\text{mm}$$

$$D_5 = \sqrt{D_4^2 \times R} \rightarrow D_5 = \sqrt{2,84^2 \times 0,77} = 2,49\text{mm}$$

$$D_6 = \sqrt{D_5^2 \times R} \rightarrow D_6 = \sqrt{2,49^2 \times 0,77} = 2,19\text{mm}$$

$$D_7 = \sqrt{D_6^2 \times R} \rightarrow D_7 = \sqrt{2,19^2 \times 0,77} = 1,92\text{mm}$$

$$D_8 = \sqrt{D_7^2 \times R} \rightarrow D_8 = \sqrt{1,92^2 \times 0,77} = 1,68\text{mm}$$

$$D_9 = \sqrt{D_8^2 \times R} \rightarrow D_9 = \sqrt{1,68^2 \times 0,77} = 1,48\text{mm}$$

$$D_{10} = \sqrt{D_9^2 \times R} \rightarrow D_{10} = \sqrt{1,48^2 \times 0,77} = 1,30\text{mm}$$

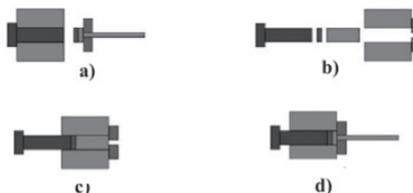
Portanto, foram determinados os diâmetros de abertura de cada feira para a redução da bitola do arame até que se obtenha a medida desejada.

## Faça valer a pena

**1.** A extrusão é um processo de conformação plástica que produz produtos como tubos e barras de seção retas e com geometrias complexas. As figuras abaixo representam esse processo de fabricação:

1. Alinhamento da peça.
2. Início da extrusão com avanço do pistão.
3. Fim da extrusão.
4. Retirada da ferramenta e do extrudado com o resíduo do tarugo.

Figura | Representação do processo de conformação mecânica de extrusão a frio



Fonte: adaptada de Palmeira (2005a, p. 37).

A associação de cada etapa com suas respectivas figuras é:

- a) 1 – b; 2 – c; 3 – d; 4 – a
- b) 1 – c; 2 – b; 3 – d; 4 – a
- c) 1 – a; 2 – b; 3 – d; 4 – c
- d) 1 – d; 2 – c; 3 – b; 4 – a
- e) 1 – b; 2 – d; 3 – c; 4 – a

**2.** Para a redução de diâmetro por trefilação de um arame de bitola de  $\phi 4,80\text{mm}$  para  $\phi 3,30\text{mm}$  aplicam-se as equações de relação de redução de seção e o valor do diâmetro a cada passada como mostrado abaixo:

$$R = \sqrt[n]{\left(\frac{D_n}{D_0}\right)^2}$$

onde R é a relação de redução de seção,  $D_n$  é o diâmetro de

passee,  $D_0$  diâmetro inicial e  $n$  número de passadas.

E para cálculo de  $D_n$  aplica-se:

$$D_n = \sqrt{D_{n-1}^2 \times R}$$

onde  $D_{n-1}$  é o valor do diâmetro anterior calculado em uma sequência de feiras.

Para chegar no diâmetro requerido para o arame pode-se dizer:

- I. São necessárias 4 passadas para resultar no diâmetro requerido.
  - II. Para 4 passadas o valor da relação de redução de seção é de  $R=0,83$ .
  - III. Na terceira passada o valor obtido de diâmetro é de 3,98 mm.
- Ao aplicar o valor de  $D_{n-1} = 3,62$  obtém-se o diâmetro desejado.

Assinale a alternativa que apresenta as asserções corretas:

- a) I e IV apenas.
- b) II e III apenas.
- c) I, II e III apenas.
- d) I, II e IV apenas.
- e) I, II, III e IV.

**3.** As máquinas de trefilação são classificadas quanto ao esforço aplicado, quando o funcionamento parte de uma bobina e passa por uma roldana e se dirige para a fieira, em seguida o fio é tracionado por um anel tirante de tal maneira que fique alinhado com a segunda fieira. Esse método trata-se de uma máquina de trefilar \_\_\_\_\_.

Assinale a alternativa que completa a frase acima:

- a) Com cilindros acoplados.
- b) Sem cilindros acoplados.
- c) Sem lubrificação.
- d) Sem deslizamento.
- e) Com deslizamento.

# Referências

- ASKELAND, Donald R. **Ciência e engenharia de materiais**. São Paulo: Cengage Learning, 2008. Cap.9, p. 214-240.
- ASTM E8 / E8M-13, Standard Test Methods for Tension Testing of Metallic Materials, ASTM International, West Conshohocken, PA, 2013.
- BRESCIANI, Ettore Filho; SILVA, Iris Bento; BATALHA, Gilmar Ferreira; BUTTON, Sérgio Tonini. **Conformação plástica dos metais**. 6. ed. São Paulo: EPUSP, 2011.
- CALLISTER JÚNIOR, William D. **Ciência e engenharia de materiais: uma introdução**. 8. ed. São Paulo: LTC, 2012. Cap. 14, p. 435-437.
- CELTIN, Paulo Roberto; HELMAN, Horácio. **Fundamentos da conformação mecânica dos metais**. 2. ed. São Paulo: Artiber, 2013.
- CHIAVERINI, Vicente. **Tecnologia mecânica: processos de fabricação e tratamento**. 2. ed. São Paulo: Pearson, 1995. Vol. II, p. 55-136.
- COLPAERT, Hubertus. **Metalografia dos produtos siderúrgicos comuns**. 4. ed. São Paulo: Edgard Blucher, 2008. Cap. 11, p. 331-448.
- GARCIA, Amauri; SPIM, Jaime Alvares; SANTOS, Carlos Alexandre. **Ensaio dos materiais**. Rio de Janeiro: LTC, 2000.
- LOSEKANN, Claudio Roberto. **Processos de fabricação I**. Apostila, Unidade 1. Itajaí, SC: Universidade do Vale do Itajaí (UNIVALI), 2001. Cap. 1.
- MACIEL, Carla Isabel Santos. **Estudo da tenacidade e propagação de trinca por fadiga em meio assistido da liga AA 2050-T84**. 2013. 208 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) – Escola de Engenharia de São Carlos, USP, São Carlos, 2013.
- PALMEIRA, Alexandre Alvarenga. **Processos de fabricação IV: processos de extrusão**. Apostila. Resende, RJ: UERJ, 2005a. Cap. 4.
- \_\_\_\_\_. **Processos de Fabricação IV: processos de trefilação**. Apostila. Resende, RJ: UERJ, 2005b. Cap. 5.
- SCHAEFFER, Lírio; ROCHA, Alexandre Silva. **Conformação mecânica: cálculos aplicados em processos de fabricação**. Porto Alegre, RS: Imprensa Livre, 2007.
- SMITH, William F.; HASHEMI, Javad. **Fundamentos de engenharia e ciência dos materiais**. 5. ed. São Paulo: McGraw-Hill, 2012. Cap.6.
- SOUZA, Sérgio Augusto. **Ensaio mecânicos de materiais metálicos**. 5. ed. São Paulo: Edgard Blucher, 2015.



# Processos de fabricação de peças plásticas e cerâmicas

### Convite ao estudo

Nas seções anteriores, foram estudadas todas as técnicas de fabricação e aplicação de materiais metálicos, desde a sua fundição, passando pela usinagem, soldagem e, por fim, técnicas de conformação mecânica. Entretanto, com o desenvolvimento contínuo de tecnologias, materiais alternativos que substituem os metais têm sido cada vez mais utilizados.

Já observou que pelo menos uma vez por dia você utiliza algum utensílio ou instrumento composto inteira ou parcialmente de plástico? Este material surgiu com o objetivo de facilitar a vida do ser humano quanto à fabricação e utilização de produtos leves, resistentes e duradouros.

O plástico facilita a sua vida desde o ato de beber água em um copo até no seu banho quente e relaxante no final do dia, pois reveste e isola os fios que levam eletricidade ao seu chuveiro. Nesse sentido, você pode observar que esse material, em todos os aspectos, é predominante na sociedade, entretanto seu ponto negativo está na quantidade de lixo plástico gerado todos os dias, pois esse material é fabricado e descartado em grande volume todos os dias e nem sempre são facilmente recicláveis.

Outro material comumente utilizado é a cerâmica, também facilmente aplicada na construção civil, utensílios domésticos e componentes mecânicos que possam ser submetidos a altas temperaturas, compressão e necessitem de resistência ao desgaste. São exemplos triviais de aplicação da cerâmica em: telhas, ferramentas de usinagem, xícaras, painéis, entre outros.

Por muitas vezes você pode optar por comprar um mesmo produto fabricado de plástico ou de cerâmica, por exemplo, ao

construir uma casa, você pode optar por comprar telhas de plástico reciclado ou de barro. Para realizar tal escolha só precisa avaliar as características importantes como: o plástico é mais leve, entretanto, a telha de barro retém com maior facilidade o calor do sol, reduzindo a temperatura interna. Atualmente, tem-se desenvolvido telhas de plástico com maior retenção de calor, entretanto, tais produtos fazem parte de uma outra classe de materiais, chamada de compósitos, que não será tratada aqui.

Assim, na presente unidade estudaremos as características, tipos e comportamentos de peças plásticas e cerâmicas, bem como os métodos de processamento desses materiais e fabricação de produtos.

Com base nesses critérios, considere um contexto no qual você é contratado pela empresa PolyCer Utilidades Domésticas, para solucionar um problema na linha de produção de copos de plástico. Considere que os copos são fabricados a partir de materiais reciclados e que têm apresentado defeitos de formação nas laterais dos copos, em alguns casos apresentam paredes muito finas e até orifícios, o que os deixa completamente inutilizados.

Neste contexto, você deverá avaliar quais são os possíveis motivos das falhas e qual seu melhor método de solução, avaliando as possibilidades de substituição do processo ou do material tanto por outro plástico ou cerâmico. Por fim, será proposta, de maneira definitiva, a substituição do processo de fabricação dos copos plásticos para cerâmicos. Logo, você deverá avaliar se esta ação é viável e funcional para a empresa.

Para tanto, você deverá responder às seguintes perguntas: Quais podem ser os motivos que resultem nos defeitos dos produtos? Com quais ações é possível resolver tal problema? Qual a viabilidade de troca do material plástico para cerâmico?

# Seção 4.1

## Introdução aos processos de fabricação de peças plásticas

### Diálogo aberto

Caro aluno, nesta seção, você aprenderá sobre os conceitos fundamentais iniciais sobre a fabricação de plásticos a partir dos polímeros e suas características físicas e químicas.

Também serão apresentados os fenômenos de fabricação que ocorrem nos termoplásticos, termofixos e elastômeros de acordo com a influência da temperatura a que são sujeitos, como a cristalização, fusão e transição vítrea. Por fim, serão apresentados, de maneira breve, os principais processos de conformação de peças plásticas e suas características.

Com base nesses critérios, para assimilar o aprendizado desta seção, considere que você foi contratado pela empresa PolyCer Utilidades Domésticas para solucionar um problema na linha de produção de copos de plástico. Essa empresa tem como prioridade a responsabilidade social e ambiental de produzir copos descartáveis a partir de material reciclado, pois, segundo Machado (2013), o tempo de decomposição de resíduos sólidos domésticos é de aproximadamente 400 anos para garrafas de bebidas (PET), 150 anos para isopor (poliestireno expandido ou EPS) e 50 anos para copos plásticos.

Considere que a empresa exerce coleta de garrafas de bebidas (PET) de todos os tipos e cores e faz a reciclagem mecânica. Esse método de reciclagem consiste na moagem dos plásticos, lavagem, aglutinação e fabricação dos copos por extrusão. No entanto, os copos têm apresentado defeitos como paredes finas ou até orifícios em determinadas regiões, inutilizando o produto final. Sua função nesse momento é a de descrever o procedimento e enumerar os possíveis motivos da falha, colocando essas informações em um relatório técnico para o seu gestor.

Como você começaria a elaborar esse documento a fim de descrever o procedimento e apresentar as potenciais falhas?

Para que você possa solucionar esse problema vamos começar seu aprendizado e em seguida desenvolver o seu trabalho!

Bons estudos!

### Introdução ao processo de fabricação de peças plásticas

A palavra plástico é um sinônimo comum para o termo polímeros, que estão disponíveis na indústria, como fibras, filmes, folhas, espumas, roupas, brinquedos, tintas, adesivos e peças de utilidade doméstica e da indústria civil (ASKELAND, 2008; SHACKELFORD, 2008).

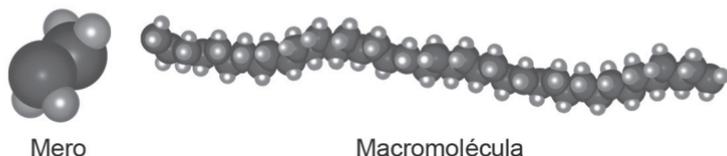
Inicialmente, vamos discutir sobre as características estruturais dos polímeros, que por muitas vezes substituem materiais tradicionais, como a madeira e o metal, devido à sua excelente resistência mecânica e leveza (MICHAELI et al., 1995).

O termo polímero significa “muitos meros”, onde mero é o bloco de montagem da cadeia longa ou da rede e está mostrado na Figura 4.1. De maneira geral, esses materiais são compostos pelo encadeamento ou enovelamento de longas cadeias de moléculas grandes chamadas macromoléculas.

Essas macromoléculas, chamadas de monômeros, ordenada uma após a outra de modo similar a um colar de pérolas como também mostra a Figura 4.1.

A fabricação do polímero se dá através de uma técnica chamada de polimerização ou síntese de polímeros, que consiste em um conjunto de reações químicas que formam estruturas moleculares e consistem na repetição de pequenas unidades, chamadas meros (ASKELAND, 2008).

Figura 4.1 | Exemplo de um “mero” e uma cadeia polimérica com macromoléculas



Fonte: Adaptado de <<https://error23fnord.wordpress.com/2016/06/19/polimeros-e-macromoleculas/>>. Acesso em: 17 jul. 2017.

As matérias-primas do polímero são: principalmente o petróleo, gás natural, madeira, carvão e até gás carbônico ( $CO_2$ ), pois o principal componente do processo de fabricação é o carbono, entretanto, estes três últimos são pouco usados, pois a fabricação com gás e petróleo

é mais barata (MICHAELI et al., 1995). O processo de transformação dos polímeros em plásticos podem ser por compressão, onde o material é comprimido até resultar na forma desejada; injeção, onde o material é inserido em moldes; extrusão, onde o material é aquecido progressivamente; plastificado, comprimido e laminação, onde as folhas do material são sobrepostas e comprimidas (MACHADO, 2013).



### Pesquise mais

Para cada tipo de monômero, existem três tipos de reações básicas que formam as macromoléculas, através das quais os plásticos são sintetizados: polimerização, poliadicação e policondensação. Acesse o link indicado, leia o documento e aprenda mais sobre esse assunto. Disponível em: <<http://garrastazupolimeros.blogspot.com.br/2010/10/polimeros-detalhadamente.html>>. Acesso em: 17 jul. 2017.

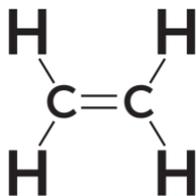
## Moléculas dos polímeros

Para dar continuidade ao aprendizado sobre os polímeros vamos fazer uma breve revisão sobre a estrutura de suas moléculas. Como já dito, o polímero é produzido a partir de materiais orgânicos compostos basicamente de carbono e hidrogênio, ou seja, são hidrocarbonetos.

Esses materiais possuem ligação química covalente onde cada átomo de carbono possui quatro elétrons que podem fazer ligações simples ou duplas (CALLISTER JÚNIOR, 2012). Vamos utilizar como exemplo o polietileno, utilizado na fabricação de garrafas e copos descartáveis, por exemplo.

O monômero do polietileno é o etileno, cuja fórmula estrutural apresenta ligação dupla, como mostra a Figura 4.2.

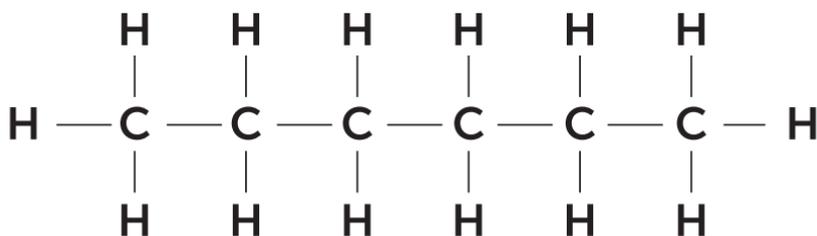
Figura 4.2 | Fórmula estrutural do etileno



Fonte: <<http://a-quimica-no-cotidiano.blogspot.com.br/2014/03/hidrocarbonetos-1.html>>. Acesso em: 18 jul. 2017.

A reação de formação de macromolécula, que são ativadas uma após a outra e dão origem à sequência de ligações simples, formando o polietileno, é demonstrada na Figura 4.3.

Figura 4.3 | Fórmula estrutural do polietileno



fórmulas estruturais



Fonte: <<http://mundoeducacao.bo.uol.com.br/quimica/nomenclatura-alcenos.htm>>. Acesso em: 18 jul. 2017.

Normalmente, essas macromoléculas (meros) são compostas de mais de 10.000 elementos individuais, que formam os polímeros em longas cadeias individuais. Essas longas cadeias de polímeros não são ligadas umas às outras, apenas se entrelaçam surgindo assim o plástico.



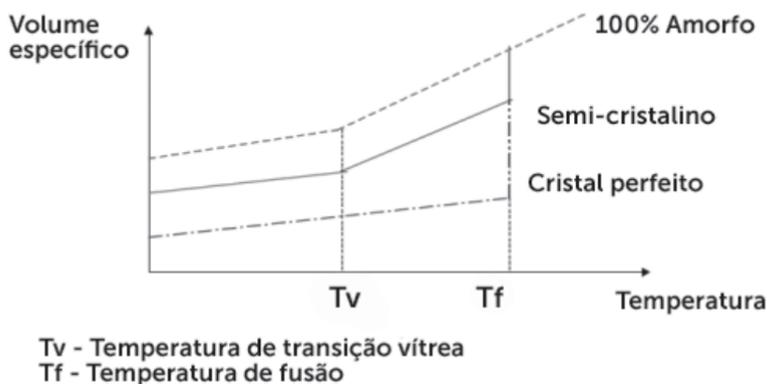
**Pesquise mais**

Acesse o link indicado, leia o documento e aprenda mais sobre os hidrocarbonetos. Disponível em: <<http://a-quimica-no-cotidiano.blogspot.com.br/2014/03/hidrocarbonetos-1.html>>. Acesso em: 18 jul. 2017.

### Cristalização, fusão e transição vítrea em polímeros

Os polímeros apresentam comportamentos diferentes de acordo com sua composição microestrutural quando tratados pelo calor (PEREIRA, 2009), ou seja, de acordo com a temperatura o material pode se apresentar cristalizado, fundido ou vítreo, como mostra a Figura 4.4.

Figura 4.4 | Comportamento das curvas de transição térmica em função do volume específico e polímeros



Fonte: Pereira (2009, p. 49).

A cristalização e as temperaturas de fusão e de transição vítrea são parâmetros importantes relacionados aos processos de síntese e aplicação dos polímeros. Sendo assim, vamos estudar sobre cada uma delas.

## Cristalização

A cristalização ocorre mediante o resfriamento do polímero amorfo ainda no estado líquido, formando assim uma fase sólida ordenada e compactada chamada de cristalitos. Esses polímeros apresentam maior resistência, pois durante a deformação o escorregamento entre as moléculas é inibido (CALLISTER JÚNIOR, 2012).

Nenhum polímero é completamente cristalino, por isso é definido um índice de cristalinidade ( $IC$ ) dado por:

$$IC = \frac{V_c}{V_t} \times 100 \quad (4.1)$$

Em que:

$V_c$  - Volume do material na forma cristalina.

$V_t$  - Volume total considerado.

O índice de cristalinidade também está relacionado à quantidade de ramificações da cadeia molecular do polímero, se a ramificação for longa e numerosa há maior tendência de inibição da formação de cristalitas.

## Fusão

A fusão de um material polimérico corresponde à transformação de um material sólido e semicristalino em um líquido viscoso, em que a estrutura torna-se amorfa. Esse fenômeno ocorre quando o material é aquecido até a sua temperatura de fusão ( $T_f$ ) e é influenciado pela química e estrutura molecular que compõem a cadeia polimérica (CALLISTER JÚNIOR, 2012).

Por exemplo, uma cadeia com ligação dupla apresenta muita rigidez, pois tende a restringir a flexibilidade de movimentação da moléculas, sendo necessário o aumento da temperatura de fusão para transformar o material em líquido viscoso.

## Transição vítrea

A transição vítrea ocorre em polímeros amorfos ou que não podem ser cristalizados. Esse fenômeno ocorre a partir do resfriamento gradual de um líquido fundido fornecendo ao material uma transformação de estado rígido para um estado de borracha (CALLISTER JÚNIOR, 2012). A temperatura a qual o material sofre essa transformação chama-se temperatura de transição vítrea ( $T_g$ ).

O valor da temperatura de transição vítrea também depende das características moleculares que afetam a rigidez da cadeia polimérica, por exemplo, a presença de ligações químicas duplas.



Refleta

Quanto à estrutura os polímeros podem ser amorfos ou semicristalinos. Os polímeros amorfos apresentam as moléculas orientadas aleatoriamente de forma semelhante a um novelo de lã, daí vem o termo enovelamento, enquanto que os polímeros cristalinos apresentam moléculas com empacotamento ordenado em algumas regiões,

resultando em materiais mais duros e resistentes. Com base nessa teoria apresentada, reflita sobre a pergunta abaixo:

Por que os polímeros amorfos são, geralmente, transparentes e os polímeros semicristalinos são opacos?

## Classificação dos polímeros

Os polímeros são classificados de acordo com sua sintetização realizada com aplicação de forças mecânicas em condições e temperaturas elevadas. Esse processo de sintetização é aplicado de acordo com a estrutura molecular ou família química do polímero. O Quadro 4.1 apresenta os três principais tipos de polímeros e seus respectivos comportamentos. Mais adiante vamos estudar com mais detalhes cada um desses tipos de polímeros.

Quadro 4.1 | Comportamento e estrutura dos polímeros

Comportamento	Estrutura Geral
Termoplásticos	Cadeias lineares flexíveis (ramificadas ou não).
Termofixo	Rede tridimensional rígida (as cadeias podem ser lineares ou ramificadas).
Elastômeros	Termoplásticos ou termofixos ligeiramente reticulados, elasticidade com efeito "mola" importante.

Fonte: adaptada de Askeland (2008, p. 481).



### Exemplificando

O polímero também pode ser classificado em linear, que apresenta suas cadeias poliméricas dispostas aleatoriamente como se fossem espaguetes; em polímero ramificado, onde há cadeias poliméricas principais e ramificações secundárias na forma de cadeias menores. Por fim, o polímero com ligações cruzadas ou reticuladas complexas é formado por cadeias individuais de polímeros ligados por correntes laterais. A Figura 4.5 exemplifica essa classificação.

Figura 4.5 | Comportamento e estrutura dos polímeros



Fonte: <<http://www.revistaespacios.com/a17v38n17/17381710.html>>. Acesso em: 18 jul. 2017.

## Termoplásticos

Os termoplásticos amolecem quando são aquecidos até atingirem um estado líquido e endurecem quando resfriados. Esse processo pode ser repetido inúmeras vezes, favorecendo a reciclagem desse material e por consequência auxiliando na preservação do meio ambiente. São amplamente utilizados em sacolas plásticas, embalagens e engradados de bebidas, brinquedos, pratos e copos descartáveis, entre outros.

Podem apresentar estrutura semicristalina ou amorfa e suas propriedades variam de acordo com a temperatura que são sujeitos. Normalmente, a cristalização dos termoplásticos pode ser obtida por aquecimento e posteriormente resfriamento lento ao mesmo tempo que uma força trativa é aplicada. Essa movimentação é chamada de cristalização induzida por tensão que desentrelaça as cadeias e as orienta.

Esses materiais apresentam boa resistência mecânica, bons resultados de impacto, maior dureza e temperaturas mais altas de síntese que os materiais polimerizados por adição. Alguns exemplos descritos por Machado (2013) de termoplásticos são:

- Policloreto de vinila ou Cloreto de polivinila (PVC) – possui alta densidade, amolece em temperaturas entre 80 °C a 100 °C. É um plástico rígido, transparente e impermeável. Utilizado em sacolas, filmes para embalagens, fraldas descartáveis, tubulação de água, telhas translúcidas, persianas, divisórias, molduras, entre outros.

- Policarbonato (PC) – suas principais aplicações são discos compactos (CD), componentes de regiões internas de aeronaves, vitrines, cobertura translúcidas, entre outros.

- Polipropileno (PP) – tem baixa densidade, queima de modo semelhante a uma vela, tem aparência transparente, brilhante, resiste a mudanças de temperatura. Muito utilizado em material hospitalar esterilizável, recipientes para alimentos, remédios, seringa de injeção, lanternas, ventiladores, peças para máquina de lavar, entre outros.

- Poliestileno (PS) – possui alta densidade, é esterilizável, queima facilmente, é quebradiço e amolece em baixas temperaturas. Utilizado na fabricação de grades de ar-condicionado, peças de automóveis, gavetas de geladeira, brinquedos, pratos, isopor, entre outros.

- Polietireno de Tereftalato (PET) – possui alta densidade, boa resistência e é utilizado em embalagens de bebidas gasosas, óleo

vegetal, água, entre outros. É transparente, inquebrável, impermeável e leve. Também é utilizado na fabricação de frascos e embalagens de alimentos, produtos de limpeza, tecidos, embrulhos de presente, fios, sacarias, entre outros.

- Polietileno de alta densidade (PEAD) – material leve e inquebrável, rígido e com excelente resistência à corrosão. Muito utilizado em embalagens de óleos, produtos químicos, tambores de tintas, entre outros.

- Polietileno de baixa densidade (PEBD) – material flexível, leve, transparente e impermeável. É usado em embalagens como sacolas, embalagens têxteis, de leites, iogurtes.

### **Termofixo**

Os termofixos são rígidos e frágeis, ou seja, tornam-se duros de maneira permanente e não amolecem com um aquecimento subsequente. Durante o tratamento térmico inicial são formadas ligações cruzadas covalentes entre as cadeias moleculares adjacentes e somente quando o material é aquecido a temperaturas excessivas ocorrerá o rompimento dessas ligações e por consequência a degradação do polímero (CALLISTER JÚNIOR, 2012).

De maneira geral, os termofixos são mais duros que os termoplásticos e possuem melhor estabilidade dimensional.

São exemplos de termorrígidos a baquelite, muito usada no embutimento de amostras metalográficas e fabricação de tomadas; e o poliéster, usado na fabricação de caixa d'água, piscinas e carrocerias.

### **Elastômeros**

Os elastômeros são polímeros naturais ou sintéticos que apresentam deformação elástica de até 200% quando uma tensão é aplicada (ASKELAND, 2008). São exemplos desses materiais o látex extraído da seringueira, que é a matéria-prima para a fabricação de tintas, borrachas, luvas, entre outros; e o poli-isopreno, que é uma borracha semelhante à borracha natural.

### **Reciclagem dos plásticos**

Os plásticos são produtos fabricados em grande escala e utilizados em aplicações de baixo custo. Devido à sua ampla utilização a quantidade de lixo plástico reciclado aumenta a cada dia e por isso há uma grande

preocupação com a presença desse material nos aterros sanitários. Segundo Machado (2013), em média, sacolas plásticas levam cerca de 500 anos para a decomposição, enquanto que as fraldas levam 450 anos e as garrafas de bebidas (PET) cerca de 400 anos.

O processo de reciclagem tem início na coleta seletiva, onde o material é separado e são identificados os diferentes tipos de materiais. Segundo Pereira (2009), essa separação pode ser feita através da densidade dos plásticos.



### Assimile

Durante o processo de coleta de reciclados, uma das etapas envolve a seleção do tipo de plástico. Uma das técnicas de separação consiste em verificar de maneira simples se o material flutua ou afunda na água, ou seja, o material é caracterizado por sua densidade.

O termoplástico é o material polimérico mais reciclado, pois é facilmente fundido e quando resfriado retoma as suas características iniciais. No Brasil, os plásticos também são identificados por símbolos designados pela Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT – NBR 13230:2008), impressos no rótulo dos produtos ou estampados na peça. Essa norma indica a reciclabilidade e identificação dos plásticos conforme mostrado na Figura 4.6.

Figura 4.6 | Simbologia de identificação de plásticos para reciclagem



Fonte: adaptada de ABNT (2008, p. 1-2).

A reciclagem dos plásticos é uma solução viável tanto sob ponto de vista econômico quanto para a preservação do meio ambiente, por isso alguns países adotam plásticos descartados como fonte de energia (MACHADO, 2013; BARBOSA et al., 2017).

A reciclagem mecânica é o processo em que há conversão do resíduo plástico em material granulado para ser novamente fundido. A Figura 4.7 mostra as etapas dessa técnica, em que a secagem, também chamada de aglutinação, consiste em secar e compactar o material, com redução do volume direcionado à extrusora. A extrusão é a fundição do plástico em que o material é homogeneizado e transformado em matéria-prima na forma de tiras de plástico a serem enviadas para a fabricação de produtos plásticos.

Figura 4.7 | Sequência do processo de reciclagem mecânica dos plásticos



Fonte: elaborada pela autora.

Um dos maiores problemas da reciclagem é a presença de sujeiras que aderem aos resíduos, pois são fundidos como corpos estranhos no material e podem resultar em defeitos ou má-formação do produto final. O melhor resultado da reciclagem de termoplásticos é obtido quando os resíduos utilizados encontram-se no estado puro, entretanto, isso é de extrema dificuldade, uma vez que há adição de aditivos e corantes para a identificação das respectivas marcas dos produtos.

## Sem medo de errar

Suas atividades na empresa PolyCer Utilidades Domésticas consistem em solucionar um problema na linha de produção de copos feitos a partir de plásticos reciclados. Esses produtos têm apresentado defeitos, como paredes finas ou até orifícios em determinadas regiões, inutilizando o produto final. Você foi informado que a empresa exerce a coleta de todos os tipos de garrafas de bebida (PET) e as utiliza como matéria-prima para a

reciclagem mecânica.

Para o relatório a ser apresentado ao gestor, sua análise tem início avaliando a linha de produção, pois cada etapa da reciclagem mecânica deve ser cuidadosamente executada. Sendo assim, descrevem-se os procedimentos:

- Coleta – seleção do material a ser reciclado, nesse caso são utilizados todos os tipos de garrafas PET.
- Moagem – os plásticos são moídos.
- Lavagem – após a moagem o plástico deve ser lavado com água, com ou sem a aplicação de detergente.
- Aglutinação – corresponde à secagem e compactação do material. Nesta etapa há redução do volume e o material é direcionado para a extrusora.
- Fabricação por extrusão – fundição do material reciclado e extrudado em forma de tiras de plástico e finalmente é direcionado para o setor de fabricação dos copos plásticos.

A reciclagem de resíduos plásticos torna-se difícil uma vez que eles se encontram, muitas vezes, sujos e misturados. Observe que nas etapas descritas não há separação de garrafas PET por cor ou densidade, indicando que são coletados PETs em todas as condições.

Os produtos de coloração dos plásticos tornam-se sujeiras durante o processo de fusão que aderem aos resíduos e, portanto, devem ser eliminadas, pois são fundidas como corpos estranhos e reduzem a qualidade do produto.

Portanto, o melhor resultado de reciclagem de termoplásticos será obtido com a utilização de materiais semelhantes, elevando assim o grau de pureza e a redução da probabilidade de defeitos no produto final.

Em suma, pode-se concluir que possivelmente as falhas nos copos podem ser provenientes da utilização de materiais com densidade diferente, uma vez que a temperatura de fusão é maior para polímeros mais densos associado ao baixo índice de pureza dos materiais reciclados.

## Avançando na prática

### Avaliação de cristalinidade de PETs

#### Descrição da situação-problema

Um polímero pode apresentar uma estrutura, que pode ser desde completamente amorfo até cerca de 95% cristalino. Durante a etapa de cristalização, o polímero fundido está com as cadeias poliméricas entrelaçadas e à medida que resfriam devem assumir posições ordenadas. A densidade de um polímero amorfo é menor que de um polímero cristalino, feito a partir de um mesmo material e com o mesmo peso molecular, pois as cadeias estão densamente compactadas nas regiões cristalinas.

O índice de cristalinidade pode ser atribuído aplicando a equação abaixo, dada por:

$$IC = \frac{V_c}{V_t} \times 100$$

Em que:

$V_c$  - Volume do material na forma cristalina.

$V_t$  - Volume total considerado.

Sendo assim, considere que você trabalha em uma empresa que produz matéria-prima para a fabricação de peças plásticas feitas a partir do polietileno. Sua função é avaliar a qualidade dos produtos produzidos pela empresa e seu supervisor solicitou que verificasse os valores do volume adequado para o material na forma cristalina em duas amostras de PET, cujos índice de cristalinidade e o volume total a ser considerado estão descritos no Quadro 4.2.

Quadro 4.2 | Valores de índice de cristalinidade e volume total a ser considerados de duas amostras de polietileno (PET)

Amostra	IC (%)	$V_t$ (cm <sup>3</sup> )
1	76,8	0,0097
2	46,4	

Fonte: elaborada pela autora.

Determine o volume adequado para o material na forma cristalina e explique qual das duas possui maior densidade.

## Resolução da situação-problema

Para determinar o volume adequado para o material na forma cristalina ( $V_c$ ) da amostra 1 aplica-se:

$$IC = \frac{V_c}{V_t} \times 100 \rightarrow V_c = \frac{IC \times V_t}{100} \rightarrow V_c = \frac{76,8 \times 0,0097}{100} \rightarrow V_c = 0,00745 \text{ cm}^3$$

Para determinar o volume adequado para o material na forma cristalina ( $V_c$ ) da amostra 2 aplica-se:

$$IC = \frac{V_c}{V_t} \times 100 \rightarrow V_c = \frac{IC \times V_t}{100} \rightarrow V_c = \frac{46,4 \times 0,0097}{100} \rightarrow V_c = 0,00450 \text{ cm}^3$$

É sabido que para um mesmo material, quanto maior o índice de cristalinidade maior a densidade do material, pois com a redução da quantidade de cadeias poliméricas entrelaçadas há aumento do peso molecular do material. Sendo assim, ao analisar a equação de IC define-se que o aumento do índice de cristalinidade do material é proporcional ao aumento do volume do material na forma cristalina.

### Faça valer a pena

**1.** As propriedades dos \_\_\_\_\_ variam de acordo com a temperatura aplicada. A \_\_\_\_\_ corresponde à temperatura que um \_\_\_\_\_ torna-se semicristalino, duro, frágil e parecido com um vidro orgânico.

Analise o texto acima e assinale a alternativa que preenche correta e respectivamente as lacunas:

- a) Elastômeros; temperatura de fusão; termoplástico reticulado; amorfo.
- b) Termofixos; temperatura de cristalização; termoplástico linear; cristalino.
- c) Termoplásticos; transição vítrea; termoplástico linear; amorfo.
- d) Elastômeros; temperatura de fusão; termoplástico ramificado; cristalino.
- e) Termoplásticos; transição vítrea; termoplástico reticulado; amorfo.

**2.** Leia o texto abaixo:

A. São polímeros naturais ou sintéticos que apresentam deformação elástica de até 200% quando uma tensão é aplicada.

B. Amolecem quando aquecidos até atingirem um estado líquido e endurecem quando resfriados.

C. São rígidos e frágeis, tornam-se duros de maneira permanente e

degradam ao ser aquecidos em altas temperaturas.

Estes termos referem-se a:

I. Elastômero.

II. Termofixos.

III. Termoplásticos.

Associe as definições descritas com seus respectivos polímeros:

a) A – I; B – II; C – III.

b) A – I; B – III; C – II.

c) A – II; B – III; C – I.

d) A – II; B – I; C – II.

e) A – III; B – I; C – II.

**3.** A reciclagem de plástico é uma atividade de extrema importância na redução de lixo plástico gerado todos os dias. Em alguns países o lixo é incinerado para gerar energia, entretanto, no Brasil a atividade comum consiste na reciclagem mecânica, principalmente de materiais termoplásticos. A simbologia mostrada abaixo refere-se à reciclagem de um polímero em especial.

Figura 4.8 | Simbologia de plástico reciclável



Fonte: adaptada de ABNT (2008, p. 1).

Escolha a alternativa correta sobre o tipo de material reciclável:

a) Policarbonato.

b) Polietileno de baixa densidade.

c) Poliestileno.

d) Polietileno de alta densidade.

e) Policloreto de vinila.

## Seção 4.2

### Processos de fabricação de peças plásticas

#### Diálogo aberto

Caro aluno, nesta seção, você aprenderá sobre os conceitos fundamentais em relação aos processos de fabricação de peças plásticas. Serão apresentadas as técnicas de preparação dos plásticos que serão posteriormente extrudados, injetados ou termoformados.

O processo de extrusão será apresentado a partir da técnica básica em que há alimentação, compressão e dosagem do plástico fundido, passando pela coextrusão e pela extrusão por sopro, que é muito utilizada na fabricação de garrafas para líquidos.

Quando se trata de injeção, o primeiro material que se vem à mente é o termoplástico, uma vez que a maioria dos produtos injetados são feitos com essa classe de polímero. No entanto, esta técnica também produz peças a partir de termofixos, termoplásticos e elastômeros.

E por fim, você aprenderá sobre a termoformagem, muito utilizada na fabricação de copos descartáveis, produtos planos e de espessura fina.

Ao adquirir esses conhecimentos você será capaz de continuar o desenvolvimento das suas atividades na empresa PolyCer Utilidades Domésticas, que consiste em avaliar e solucionar um problema na linha de produção de copos plásticos.

Como você já sabe, a empresa fabrica copos a partir da reciclagem de garrafas PET por extrusão e esses produtos têm apresentado defeitos, como paredes finas e até orifícios em determinadas regiões.

Na seção anterior, você analisou cada etapa da reciclagem, desde a coleta, moagem, lavagem, aglutinação e o processo de fabricação propriamente dito. Concluiu que as falhas podem ter início na seleção inadequada dos produtos coletados, uma vez que não são separados por cor ou densidade, resultando assim em baixo índice de pureza do material.

Sua função agora é de avaliar qual o melhor método de solução na linha de produção e indicar a substituição do tipo de processo e/ou do material utilizado.

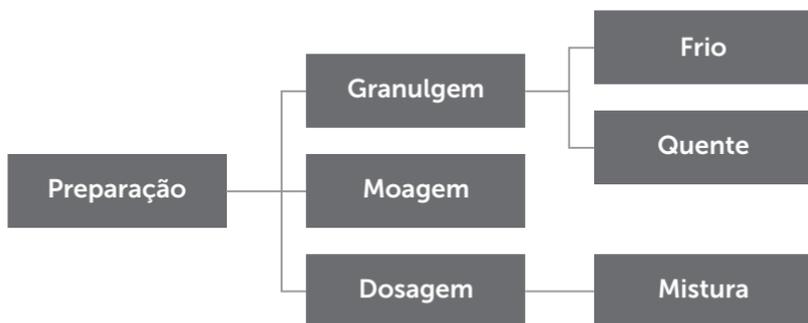
Então, vamos aprender mais sobre as técnicas de processos de fabricação de peças plásticas?

Bons estudos!

### Processos de fabricação de peças plásticas

Com o conhecimento prévio sobre síntese e fabricação de polímeros, a etapa inicial para a fabricação de peças plásticas é a preparação do plástico de tal maneira que se obtenha as propriedades, físicas e mecânicas, desejadas no produto. A Figura 4.9 mostra um fluxograma que envolve as etapas de preparação desses materiais.

Figura 4.9 | Maneiras de preparação do plástico



Fonte: adaptada de Michaeli et al. (1995, p. 80).

Em suma, o polímero é processado sob ação de temperatura de trabalho igual à temperatura de fusão, e para tanto utiliza-se uma resistência elétrica para aquecimento (LIRA, 2017). Na granulagem, o plástico é cortado em pequenos pedaços e pode ser realizado a quente ou a frio. Na granulagem a quente, o plástico é plastificado em forma de cordas, que são cortadas e resfriadas em água, e na granulagem a frio o plástico é resfriado antes de ser cortado. Uma vez que o plástico foi granulado, segue para a moagem, onde é dada a forma que facilite o processamento do plástico.

A preparação do plástico tem como principais objetivos a aditivação e dosagem. A aditivação corresponde ao acréscimo de aditivos, que tem o objetivo de variar as propriedades dos plásticos, por exemplo, os antioxidantes, também chamados de termoestabilizantes, que impedem a degradação do plástico por oxidação; os fotoestabilizantes, que reduzem a incidência luminosa (luz UV) e são muito utilizados em embalagens do ramo alimentício; os pigmentos, que colorem os plásticos; os diluentes, que reduzem o módulo de elasticidade e de modo análogo, os reforços que aumentam essa mesma propriedade mecânica (MICHAELI et al., 1995).

A dosagem é a medida dos aditivos utilizados no processamento dos plásticos. Essa medição pode ser feita por volume ou por peso do plástico. A dosagem por volume é imprecisa, pois como esses materiais são usados em grãos, os espaços entre eles são diferentes, de forma que para um mesmo volume a quantidade de componentes é diferente. No entanto, quando a medição é feita por peso os valores obtidos são mais precisos, mas os equipamentos são mais caros.

A mistura da matéria-prima deve ser homogênea, de tal forma que os aditivos estejam bem distribuídos. Para tanto, utilizam-se máquinas que permitem que o processo seja realizado a quente ou a frio. Na mistura a quente o equipamento pode atingir uma temperatura de até 140 °C, que pode resultar na fusão do plástico. A mistura a frio acontece em temperatura ambiente, na qual os componentes são apenas misturados entre si.

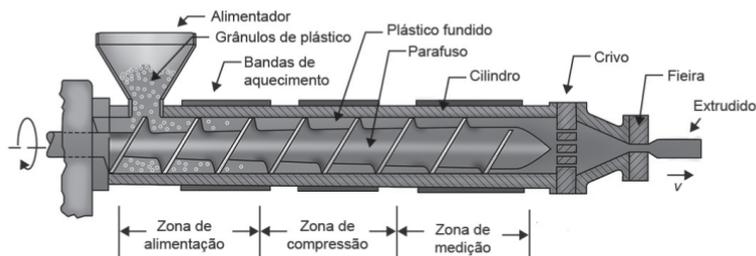
Uma vez preparados, os plásticos seguem para a etapa de fabricação de produtos por moldagem chamados de extrusão, injeção ou termoformação.

### **Processo de extrusão de peças plásticas**

A extrusão é um processo de fabricação contínuo onde o plástico moldado é completamente fundido e adquire uma forma específica. No que diz respeito ao material, os termoplásticos, PP (polipropileno), PVC (policloreto de vinila), PC (policarbonato), PET (politereftalato de etileno) são os mais utilizados na moldagem por extrusão. São produzidos materiais-base que serão processados por outras técnicas de fabricação ou produtos finais como filmes, placas, perfis, fitas, revestimentos, tablet e tubos (MICHAELI et al., 1995; LIRA, 2017).

A extrusora é o equipamento-padrão desse processo de fabricação e tem como função produzir peças plásticas fundidas e homogêneas a partir de matéria-prima granulada ou em pó. Seu princípio de funcionamento é semelhante a um moedor de carne. A Figura 4.10 mostra a composição de uma extrusora, cujos principais componentes são o funil, que tem a função de alimentar a extrusora com o material a ser processado; e o parafuso rosca, que tem as funções de puxar, transportar, fundir e homogeneizar o plástico.

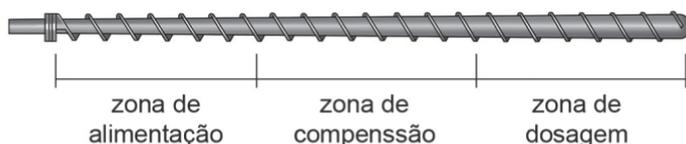
Figura 4.10 | Principais componentes de uma máquina extrusora



Fonte: Pereira (2009, p. 53).

A geometria mais comum do parafuso rosca está mostrada na Figura 4.11 e possui a zona de entrada, a zona de compressão e a zona de dosagem.

Figura 4.11 | Representação de geometria de parafuso de uma extrusora



Fonte: <<http://www.tudosobreplasticos.com/perifericos/roscas.asp>>. Acesso em: 26 jul. 2017.

Na zona de entrada é feita a alimentação do material ainda na forma rígida e é transportado para a zona de compressão, onde o material é compactado e fundido pela variação do diâmetro do parafuso. Por fim, na zona de saída é feita a calibragem do material fundido, ou seja, o plástico é homogeneizado e elevado à temperatura de trabalho desejada.

O sistema de aquecimento é feito com o emprego de resistências ou serpentinas de líquidos, no entanto, quando são processados materiais termicamente sensíveis utilizam-se parafusos aquecidos. Na extremidade do parafuso é montada a matriz de extrusão.



**Pesquise mais**

Assista ao vídeo indicado e veja detalhadamente como funciona uma extrusora de material plástico. Disponível em: <<https://www.youtube.com/watch?v=HCAoG1qANHM>>. Acesso em: 28 jul. 2017.

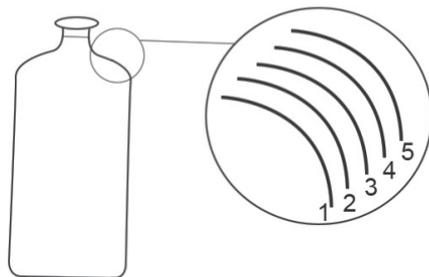
## Coextrusão

Cabos e filmes de embalagens para produtos alimentícios são exemplos de materiais que devem apresentar propriedades de retenção de irradiação UV e permeabilidade de vapor, líquidos, aromas e solventes. Para tanto, precisam ser processados por coextrusão que consiste em fabricar um composto com várias camadas de diferentes materiais (LIRA, 2017).

Para adotar a técnica de coextrusão, cada material é plastificado em uma extrusora separada onde cada camada é formada no seu distribuidor próprio e são unidas pouco antes da saída do produto final do equipamento (MICHAELI et al., 1995).

Os polímeros comumente utilizados na fabricação de camadas dos frascos para líquidos são PP (polipropileno) e o EVOH (etileno vinil álcool) é utilizado como barreira. Atualmente, podem ser produzidos materiais com até sete camadas (MICHAELI et al., 1995), a Figura 4.12 exemplifica um frasco com cinco camadas de polímeros.

Figura 4.12 | Representação de um recipiente com cinco camadas de polímeros



Fonte: Lira (2017, p. 149).

Lira (2017) descreve que a camada (1) representa a camada em contato com o produto envazado, (2) consiste em um adesivo compatibilizante com o PP e o EVOH. A camada (3) é o material barreira EVOH (4), é novamente o adesivo compatibilizante com o PP e o EVOH, e finalmente (5) a camada externa de material PP utilizado também para contato com resistência mecânica.

## Extrusão por sopro

Nesse método de moldagem é utilizada uma extrusora com cabeçote móvel e uma ferramenta de sopro. Através dessa técnica

são fabricados garrafas, frascos, tanques de combustível de PEAD (polietileno de alta densidade), PEBD (polietileno de baixa densidade), PVC (policloreto de vinila), PP (polipropileno), PET (politereftalato de etileno), PC (policarbonato), entre outros.

A extrusora é composta por duas metades móveis que contém a geometria do produto a ser soprado. Inicialmente, o plástico é fundido e homogeneizado com uma pré-forma, que é direcionada para a extração de sopro onde recebe uma pressão de ar que a expande e confere a forma desejada.



## Exemplificando

Pré-formas são pequenos moldes de plásticos utilizados como matéria-prima para a fabricação de garrafas, por exemplo. São introduzidas em um molde de uma embalagem e há introdução de ar, fazendo com que adquira a forma desejada. A Figura 4.13 mostra pré-formas de garrafas PET.

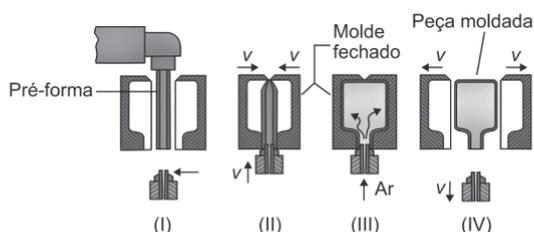
Figura 4.13 | Exemplos de pré-formas para garrafas PET



Fonte: <<http://www.tetrapet.com.br/template/images/embalagens-garrafa-preformas-pet-pvc-05.jpg>>, p. 20. Acesso em: 26 jul. 2017.

A sequência desse procedimento é mostrada na Figura 4.14 e consiste em (I) extrusão da pré-forma, (II) posicionamento da ferramenta de sopro, (III) agarramento e separação da pré-forma, (IV) moldagem e resfriamento, (V) desmoldagem e extração.

Figura 4.14 | Sequência da extrusão por sopro



Fonte: adaptada de Pereira (2009, p. 56).



Veja como são produzidas as garrafas PET desde a pré-forma até as garrafas. Disponível em: <<https://www.youtube.com/watch?v=TO7r7laPris>>. Acesso em: 27 jul. 2017.

O processo de extrusão por sopro tem como principais vantagens alta velocidade de produção, controle de espessura da parede, geometrias complexas, possibilidade de maior número de camadas, fabricação de vários produtos ao mesmo tempo (PROVENZA, 1976).

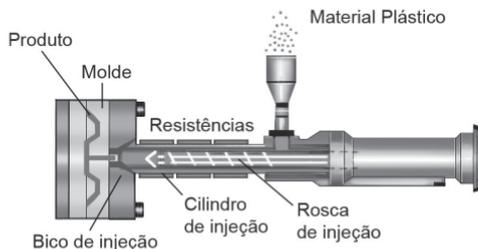
### Processo de injeção de peças plásticas

A moldagem por injeção é uma técnica que permite obter produtos por meio da introdução de uma quantidade dosada de material plástico, fundido de forma homogênea e em seguida o plástico é injetado em um molde e adquire a forma desejada quando resfriado (PROVENZA, 1976; MICHAELI et al., 1995). Nesse processo de fabricação podem ser processados produtos de termoplásticos, termofixos e elastômeros.

O processo de injeção é simples, automatizado, possui alto índice de reprodutividade e seus produtos apresentam bom acabamento. Sendo assim, para atingir o máximo de rendimento devem ser utilizadas máquinas injetoras com capacidade de injeção o suficiente para as dimensões do produto fabricado, moldes bem projetados e bem-acabados, controle da temperatura e da pressão de injeção e resfriamento lento e progressivo.

Em geral, a máquina injetora é composta basicamente por: funil de alimentação, cilindro de injeção, rosca de injeção e molde, como mostra a Figura 4.15.

Figura 4.15 | Representação de uma injetora de peças plásticas



Fonte: <<http://www.teclasplasticos.com.br/servicos.html>>. Acesso em: 28 jul. 2017.

Ao ser injetado, o material plástico sofre um contração volumétrica, o que pode gerar peças defeituosas devido à mudança do estado de líquido ou pastoso, para o estado sólido. Esse inconveniente é evitado injetando maior quantidade de material nas cavidades do molde. Para que isso seja feito adequadamente é necessário que se reserve material adicional ainda no estado líquido nos canais de alimentação (SORS; BARDÓCZ; RADNÓTI, 2002).

### Injeção de termofixos

A moldagem por injeção é reservada quase que exclusivamente aos termoplásticos, entretanto, quando esse processo é aplicado a termofixos, geralmente é realizado em duas etapas. Inicialmente, há preparação de um polímero linear que inicialmente está em forma de pó e em seguida é aquecido tornando-se líquido (LIRA, 2017). Em seguida, o termofixo é depositado em um molde para, após a cura, obter a peça dura e rígida.

Um exemplo muito comum de termofixo trabalhado é a preparação de amostras metalográficas embutidas em baquelite, que você já executou ao estudar a Unidade 3 deste livro.

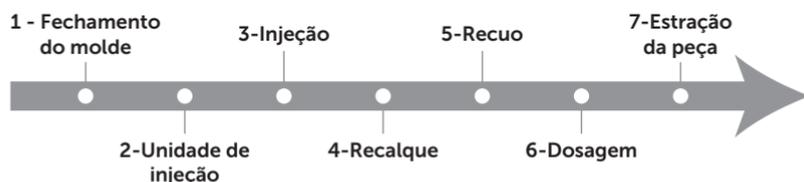
A injeção com termofixos possui como principais vantagens a redução de rebarba com melhor aspecto de produto acabado, facilidade de moldagem de partes delicadas como entalhes, furos de pequenos diâmetros e melhor homogeneidade do material com melhores características mecânicas ou elétricas (PROVENZA, 1976; LIRA, 2017).

Os termofixos, que se acumulam nos canais de injeção, não podem ser reutilizados, pois são duros e degradam com facilidade quando expostos a altas temperaturas (LIRA, 2017).

### Injeção de termoplásticos

A injeção de termoplásticos é realizada em um ciclo composto por 7 etapas (SORS; BARDÓCZ; RADNÓTI, 2002; LIRA, 2017), como mostra a Figura 4.16.

Figura 4.16 | Etapas de injeção de termoplásticos



Fonte: elaborada pela autora.

O fechamento do molde (1) dá início ao processo de produção seguido pelo avanço da unidade de fechamento acionando o bico de injeção do plástico do molde (2). Uma vez que tudo esteja devidamente posicionado é feita a injeção do plástico fundido (3). O recalque (4) tem a função de manter o plástico no interior de molde e a pressão exercida nessa etapa tem a função de homogeneizar a peça e tem a função de eliminar as marcas de extração no produto. Finalizado o recalque há o recuo da unidade de injeção (5) e se inicia a dosagem (6), onde a rosca de injeção gira para que o material plástico no estado sólido seja introduzido no cilindro de injeção alimentando novamente o sistema com o plástico a ser injetado no próximo ciclo. Por fim, ocorre a extração da peça (7) após seu resfriamento. Nos processos de injeção utiliza-se um sistema de resfriamento lento com água ligeiramente aquecida a temperaturas menores que o sistema ou gelada.

### Injeção de elastômeros

A injeção dos elastômeros só é possível com a utilização de seções de canais suficientemente grandes para facilitar o fluxo de injeção do material. Em geral, os cilindros de injeção não são aquecidos, pois o calor gerado pelo atrito é o suficiente para desagregar o material bruto. Por muitas vezes recorre-se até ao resfriamento para evitar temperaturas altas que podem favorecer a vulcanização prematura da borracha (PROVENZA, 1976).



#### Assimile

A vulcanização consiste, geralmente, na aplicação de calor e pressão em um plástico, a fim de dar a forma apropriada e propriedades no produto final. Em 1839, Charles Goodyear, por acidente, descobriu que ao adicionar enxofre à borracha a tornava mais resistente. Sendo assim, a vulcanização é aplicada em elastômeros e consiste na formação de ligações cruzadas com adição de enxofre formando o dissulfeto de carbono e o cloreto de enxofre. Em suma, dentre as propriedades físicas desse material destacam-se excelentes propriedades mecânicas que são mantidas mesmo com variação de temperatura, boa permeabilidade, entretanto sua reciclagem é difícil, e por isso seu descarte consiste em gerar energia com a sua queima.

São produtos fabricados com borracha vulcanizada: pneus, borrachas de vedação, tapetes de automóveis, sapatos, entre outros.

Para evitar que parte do material injetado retroceda é necessário que a pressão seja mantida até que a vulcanização se complete.



Refleta

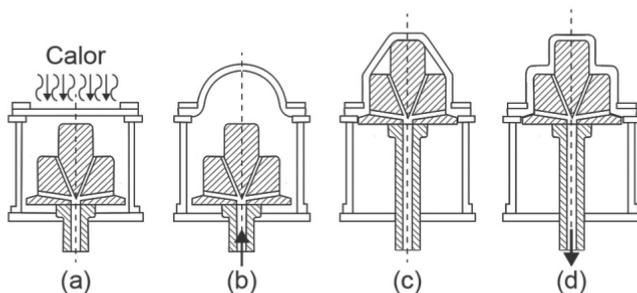
O pneu é um produto composto por diferentes partes, uma delas é a lona de corpo, a lona estabilizadora e a parede lateral e cada uma dessas partes são produzidas com o mesmo material, mas de maneiras diferentes. Avaliando as características do produto por inteiro, que material é esse? Quais suas principais características?

## Termoformagem

Termoformagem é a transformação do plástico sob ação de calor e de força com o objetivo de moldar termoplásticos em formas de folhas planas e filmes, cujas peças são abertas e de espessuras finas. Este método consiste na moldagem de uma placa previamente extrudada, introduzida em um molde fixado em uma prensa (MICHAELI et al., 1995; LIRA, 2017).

Esse processo, mostrado na Figura 4.17, é simples e consiste basicamente em quatro passos, inicialmente, a placa é fixada na máquina e aquecida (a), em seguida o material é puxado e posicionado (b), e na sequência pressionado contra as paredes do molde (c), ocorrendo assim a termoformagem (LIRA, 2017). Então, o molde fecha e fica posicionado por alguns segundos, efetivando assim a moldagem (d). Depois é realizado o resfriamento rápido, o molde abre e o material é cortado.

Figura 4.17 | Etapas de termoformação



Essa técnica pode ser realizada inúmeras vezes a vácuo ou pressão e uma vez produzido o produto pode ser sujeito à coextrusão para melhorar as propriedades (MICHAELI et al., 1995; LIRA, 2017). São produzidas embalagens, formas, bandejas, entre outros.



### Pesquise mais

Assista ao vídeo indicado e aprenda sobre a termoformagem de copos. Disponível em: <<https://www.youtube.com/watch?v=A1fPd-2gcqQ>>. Acesso em: 29 jul. 2017.

## Sem medo de errar

Retomando suas atividades na empresa PolyCer Utilidades Domésticas, na seção anterior você foi informado da necessidade de resolver um problema na linha de produção de copos feitos a partir de plásticos reciclados.

Estes produtos têm apresentado defeitos, como paredes finas e orifícios, em determinadas regiões que inutilizam o produto. Em um primeiro momento você verificou a etapa da reciclagem e concluiu que um dos fatores de falhas está ligado à coleta e seleção do produto reciclado, pois a grande diversidade de produtos recolhidos e reciclados dificultam a determinação de temperatura de fusão para a fabricação de pré-formas, além de reduzir o grau de pureza desses produtos, pois a produção de garrafas PET permite a utilização de pigmentos e elementos químicos diferentes para cada aplicação ou marca, ou seja, algumas garrafas podem apresentar camadas adicionais de polímeros, ou podem ser coloridas com diferentes tipos de pigmentos.

Nessa etapa você deve avaliar qual o melhor método de solução na linha de produção e indicar a substituição do tipo de processo e/ou do material utilizado. Já foi mencionado que o processo de fabricação dos copos de plástico é por extrusão, e para que seja eficiente, o material deve ser devidamente preparado, processado e por fim extrudado.

Com base nos conhecimentos aduzidos nesta seção, você pode ressaltar que as paredes finas e os orifícios resultantes nos

copos também podem ser provenientes da quantidade insuficiente de plástico direcionado ao molde.

Sua proposta para a solução dos problemas poderia ser:

- Seleção adequada do material reciclado quanto ao tipo, cor e composição. Esse método pode ser facilmente implementado, pois esses produtos são classificados com as devidas simbologias de identificação de plásticos para reciclagem.
- Aumentar a quantidade de material extrudado inserido no molde.
- Substituir a técnica de extrusão pela técnica de injeção, pois esse processo de fabricação tem melhor controle na quantidade de material injetado no molde.

Portanto, com a aplicação de um controle de qualidade adequado e ajuste de parâmetros de fabricação, como a quantidade de material inserido no processo, por exemplo, a produção das garrafas retornáveis será eficiente em todos os aspectos, pois haverá redução na produção de lixo plástico, além de aumentar o incentivo à população de utilizar garrafas retornáveis.

Ótimo trabalho!

## Avançando na prática

### Fabricação de garrafas de plástico retornáveis

#### Descrição da situação-problema

Considere que você foi contratado por uma empresa fabricante de bebidas que engarrafa seus produtos em recipientes de vidro. Um estudo realizado pelo setor de pesquisa e desenvolvimento fez uma avaliação do custo-benefício da utilização dessas garrafas retornáveis. Os relatórios elaborados apresentaram números assustadores, para um curto período de tempo, com os gastos de lavagem, esterilização, rotulagem, além do grande volume de perdas desses recipientes devido a quebras e trincas.

Com estudos feitos por especialistas de produção, foi concluído que será mais lucrativo para a empresa adotar e produzir garrafas retornáveis de plásticos. Sendo assim, sua função será de indicar, em um relatório, e descrever o processo de fabricação de garrafas de plástico retornáveis a

ser adotado na empresa. O que você colocaria no seu documento sobre a fabricação de garrafas de plástico retornáveis?

### Resolução da situação-problema

Em seu relatório, é importante você dizer que a técnica adequada para a produção de garrafas plásticas é a extrusão por sopro. Nessa técnica pode ser utilizada uma pré-forma de polímero termoplástico de politereftalato de etileno (PET) que pode ser produzido com as cores principais da empresa, a fim de serem facilmente identificadas pelo consumidor. E a sequência de produção é simples e consiste em:

1. Extrusão da pré-forma.
2. Posicionamento da ferramenta de sopro.
3. Agarramento e separação da pré-forma.
4. Moldagem e resfriamento.
5. Desmoldagem e extração.

Vale a pena ressaltar que essas garrafas podem ser coextrudadas, com o objetivo de adicionar camadas para a retenção da incidência de luz protegendo assim o líquido vazado e, adicionalmente, sempre que uma garrafa apresentar algum defeito pode ser reciclada e transformada em pré-forma a ser processada.

### Faça valer a pena

**1.** A extrusão é um processo de fabricação de peças plásticas. Uma modalidade muito utilizada é a coextrusão que consiste em fabricar peças compostas com várias camadas de diferentes materiais e tem como principais características:

I. A possibilidade de utilização de polímeros com a capacidade de barrar a incidência luminosa e, portanto, são chamados de barreira.

II. A utilização de termoplásticos do tipo PC (poli carbonato) e o EVOH (etileno vinil álcool).

III. Os termofixos utilizados nessa técnica possuem o máximo de eficiência quando processados em baixas temperaturas, mas aquecidos durante o uso do produto.

Estão corretas as asserções:

- a) I apenas.
- b) II apenas.
- c) III apenas.

- d) I e II apenas.
- e) II e III apenas.

**2.** Leia os textos abaixo:

A. Como principais desvantagens destacam-se a perda irrecuperável do plástico retirado dos canais de injeção e o material não pode ser reaproveitado como os termoplásticos, pois são duros e degradam com facilidade quando expostos a altas temperaturas.

B. A injeção só é possível com o controle de temperatura e com a utilização de seções de canais suficientemente grandes para facilitar o fluxo de injeção do material.

C. A injeção é realizada em um ciclo cuja etapa final ocorre após a dosagem e preparação de matéria-prima para o próximo ciclo.

Estes textos referem-se a:

I. Injeção de Termoplásticos.

II. Injeção de Termofixos.

III. Injeção de Elastômeros.

Associe as colunas descritas acima com a definição correta para cada material de injetado:

a) A – I; B – II; C – III.

b) A – II; B – III; C – I.

c) A – III; B – II; C – I.

d) A – I; B – III; C – II.

e) A – II; B – II; C – I.

**3.** Termoformagem consiste na transformação do plástico sob ação de calor e de força com o objetivo de moldar termoplásticos produtos como pratos, copos, descartáveis, entre outros.

Escolha a alternativa correta sobre o processo de termoformagem:

a) Ocorre devido ao processamento de elastômeros vulcanizados e aquecidos em temperatura de trabalho acima da temperatura e fusão.

b) É um processo de fabricação semelhante à extrusão por sopro, entretanto, muito utilizado na fabricação de peças termoplásticas.

c) É um processo simples e pode ser realizado inúmeras vezes a vácuo ou pressão e são produzidas formas, embalagens, bandejas, entre outros.

d) Seus produtos são fabricados a partir da coextrusão com pelo menos sete camadas de polímeros diferentes.

e) É um processo de fabricação contínuo em que o plástico é injetado no estado pastoso em um molde chamado matriz.

## Seção 4.3

### Processos de fabricação de peças cerâmicas

#### Diálogo aberto

Caro aluno, até este momento você aprendeu sobre diversos tipos de processos de fabricação de materiais metálicos, como fundição, usinagem, soldagem e conformação mecânica e viu também as técnicas básicas de produção de produtos plásticos, bem como suas classificações e métodos de reciclagem, agora, nesta seção, você aprenderá sobre os conceitos fundamentais sobre os processos de fabricação de peças cerâmicas. Serão apresentadas as técnicas de preparação da matéria-prima a partir de minérios, passando pela preparação dos pós cerâmicos e seu processamento.

Esse processo de fabricação tem início com a síntese do minério que consiste na moagem, separação das impurezas, mistura com outros pós e atomização. Posteriormente, o material é prensado adquirindo o formato do molde e em seguida segue para a sinterização e o acabamento.

Produtos cerâmicos são aplicados em diversas áreas do nosso cotidiano, que vão desde o revestimento em aeronaves até utensílios domésticos. Por se tratar de um material interessante para aplicações simples, foi sugerida a possibilidade de aplicar esse processo de fabricação na empresa PolyCer Utilidades Domésticas, que fabrica copos de plástico a partir de garrafas PET recicladas usando a técnica de extrusão e esses produtos têm apresentado defeitos, como paredes finas e até orifícios, em determinadas regiões.

Assim, retomando o nosso contexto, no primeiro momento você analisou cada etapa da reciclagem desde a coleta, moagem, lavagem, aglutinação e o processo de fabricação propriamente dita. Concluiu que as falhas podem ter início na seleção inadequada dos produtos coletados, uma vez que não são separados por cor ou densidade, resultando assim em baixo índice de pureza do material.

Em seguida, você avaliou e propôs que o melhor método para a solução na linha de produção é realizar a seleção adequada do material reciclado, aumentar a quantidade de material extrudado e/ou substituir a técnica de extrusão pela de injeção.

Neste momento, outra atividade lhe foi solicitada, de modo que você necessita avaliar a possibilidade e viabilidade de substituir o tipo

de material utilizado na fabricação dos copos. Como medida de solução dos problemas na linha de produção ou até mesmo expansão dos negócios lhe foi proposto que substitua o material de polímero pelo cerâmico. Para tanto, alguns aspectos precisam ser elucidados para que você possa entregar um parecer final ao seu supervisor:

1. Escolha da matéria-prima.
2. Escolha do processo de fabricação de tal maneira que seja adequado à ideologia de reciclagem de plásticos como responsabilidade social da empresa.
3. Listar as etapas de produção dos produtos a partir do material cerâmico.

Portanto, vamos iniciar nossos estudos e aprender sobre os materiais cerâmicos?

Bom trabalho!

## Não pode faltar

### Classificação das cerâmicas

A definição de cerâmica vem da palavra grega *keramikos*, que significa material queimado. As matérias-primas usadas na fabricação de produtos cerâmicos são extraídas da natureza, ou seja, são minerais como talcos, calcários, feldspatos, abitas, filitos e argila (ASKELAND, 2008; BORDIGNON, 2013).

A argila é a matéria-prima principal da cerâmica, muito utilizada na fabricação de revestimentos e consiste na composição de partículas coloidais de diâmetro inferior a 0,005 mm que apresentam alta plasticidade quando úmidas e quando secas tornam-se resistentes e difíceis de serem quebradas apenas com as mãos (OLIVEIRA; MAGANHA, 2006).

Os feldspatos são minerais conhecidos como materiais fundentes, que têm a função de diminuir a temperatura de formação da fase líquida durante a etapa da queima. São responsáveis pela redução da porosidade das peças cerâmicas, reduzindo os índices de absorção de água (BAUER, 2000; OLIVEIRA; MAGANHA, 2006).

Os filitos também atuam como fundentes na mistura cerâmica e são rochas metamórficas constituídas de caulinita, quartzo e

mica, apresentam alto teor de potássio e podem ser encontradas na natureza com cores como amarelo, verde-claro, branco-acinzentado a avermelhado e bege (OLIVEIRA; MAGANHA, 2006).

O talco é um silicato de magnésio hidratado, é extraído de rochas moles sensíveis ao toque e que apresentam maior resistência ao choque térmico para ciclos rápidos de queima, menor temperatura de fusão e maior resistência mecânica (BAUER, 2000).

Os materiais cerâmicos são compostos por elementos metálicos e semimetálicos, como óxidos, carbetos, nitretos, sulfetos, fluoretos, entre outros que podem ser a alumina ( $Al_2O_3$ ), o diamante ( $C$ ), a sílica ( $SiO_2$ ), o carbeto de silício ( $SiC$ ), o nitreto de silício ( $Si_3N_4$ ), dióxido de titânio ( $TiO_2$ ) e zircônia ( $ZrO_2$ ) (ASKELAND, 2008; SHACKELFORD, 2008). Esses materiais são utilizados em componentes tecnológicos e como revestimentos em componentes que necessitam boa resistência ao desgaste e a compressão e altas temperaturas.

Outra propriedade da cerâmica é a alta temperatura de fusão, por exemplo, a alumina ( $Al_2O_3$ ) possui temperatura de fusão de 2000 °C e resistência a compressão de 2758 MPa, além de alto módulo de elasticidade, mas em contrapartida, é de péssima qualidade para solicitações mecânicas de impacto e tração. O Quadro 4.3 apresenta as propriedades de algumas cerâmicas.

Quadro 4.3 | Propriedades das cerâmicas

Material	Temperatura de Fusão (°C)	Resistência à Tração (MPa)	Resistência à Compressão (MPa)	Módulo de Elasticidade (MPa)
Alumina ( $Al_2O_3$ )	2000	207	2758	383
Carbeto de Silício ( $SiC$ )	2700	172	3861	414
Nitreto de silício ( $Si_3N_4$ )	1900	552	3447	310
Zircônia ( $ZrO_2$ )	2700	345	1724	200

Fonte: adaptada de Askeland (2008, p. 453-454).

Tipos e aplicações comuns de cerâmicas são os vidros utilizados em recipientes, janelas e fibras, produtos à base de argila, como tijolos, telhas, vasos e louças; refratários, como revestimentos de

fornos, aeronaves e ônibus espaciais, pois são ótimos isolantes térmicos, abrasivos, que são utilizados como material de desgaste, cimentos utilizados na indústria civil e cerâmicas avançadas que são utilizadas em sistemas microeletromecânicos e em fibra ótica (CALLISTER JÚNIOR, 2012).



### Refleta

O cimento é produzido a partir da extração do minério de ferro no Alto Forno. Reflita a respeito e responda: Em qual etapa do processo de fabricação no Alto Forno o cimento é extraído? Qual é o método de processamento subsequente desse material?

### Massas cerâmicas

As massas cerâmicas, também chamadas de biscoito ou suporte, são basicamente compostas por materiais argilosos e não argilosos, fundentes, refratários e aditivos e subdividem-se em massa simples ou natural e massa composta ou artificial (OLIVEIRA; MAGANHA, 2006; ARAÚJO; BRITO, 2015).

A massa simples ou natural é constituída por apenas uma matéria-prima, o que dispensa a dosagem proporcional de minerais. São exemplos de produtos dessas massas a telha, tijolos e revestimentos (BORDIGNON, 2013).



### Pesquise mais

Assista ao vídeo indicado e veja como são fabricados os tijolos. Disponível em: <<https://www.youtube.com/watch?v=MRHzQLPOUr8>>. Acesso em: 5 ago. 2017.

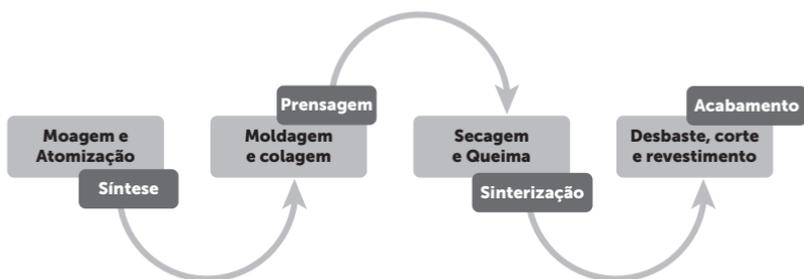
A massa composta ou artificial possui a mistura de várias matérias-primas, com proporções preestabelecidas em peso e volume. São fabricados com esse tipo de massa louças sanitárias, pratos, xícaras, entre outros.

Para o desenvolvimento da massa aspectos importantes devem ser avaliados, como a fabricabilidade, as características do produto final e o aspecto econômico. A fabricabilidade é a aplicação adequada da massa produzida durante o processo de fabricação, pois as características do produto final dependem da sua qualidade de tal forma que apresentem resistência mecânica, absorção de água e estabilidade dimensional adequadas. O aspecto econômico está associado à logística de

produção e transporte de matérias-primas para a produção das massas (BORDIGNON, 2013; ARAÚJO; BRITO, 2015).

Os produtos cerâmicos são fabricados a partir de pós constituídos de partículas finas obtidas por um processo chamado de síntese. O processo de fabricação compreende operações de moagem, atomização, moldagem e colagem, secagem, queima e acabamento como mostra a Figura 4.18.

Figura 4.18 | Sequência de produção de peças cerâmicas



Fonte: elaborada pela autora.

A síntese corresponde à fabricação dos pós cerâmicos finos e compreende as operações de moagem após a extração da matéria-prima a partir do minério, separação das impurezas, mistura com outros pós e atomização.

A moagem consiste em reduzir o tamanho das partículas da matéria-prima de tal forma que garanta a homogeneização da massa cerâmica. Após a moagem o produto é transformado em barbotina, que consiste na solução resultante da matéria-prima moída com adição de água. Em seguida, o material sofre a atomização, onde há evaporação da água da barbotina formando aglomerados esféricos que serão encaminhados para a prensagem.



#### Assimile

Atomização é uma técnica de obtenção de pós utilizada em indústrias de plásticos, resinas, detergentes, corantes (pigmentos), pesticidas, produtos alimentícios (leite em pó), produtos farmacêuticos e na cerâmica. A fabricação de pós cerâmicos consiste na transformação

de uma suspensão aquosa de partículas sólidas em partículas secas a partir da pulverização da suspensão no interior de uma câmara aquecida chamada atomizador (RIBEIRO; VENTURA; LABRINCHA, 2001).

## Prensagem de pós cerâmicos

Nessa etapa os aglomerados são comprimidos até o menor volume possível, com aplicação de pressão obtendo o empacotamento e agregação das partículas cerâmicas. Esse processo também é chamado de compactação e pode se completar em menos de um minuto quando se produz peças pequenas e de geometria simples, chamadas de cerâmica verde.

A prensagem subdivide-se em prensagem isostática a frio e prensagem isostática a quente. A prensagem a frio é utilizada para a fabricação de peças grandes e com formas complexas. Essa técnica consiste na imersão das peças em óleo ao mesmo tempo que uma carga compressiva é aplicada (ASKELAND, 2008).

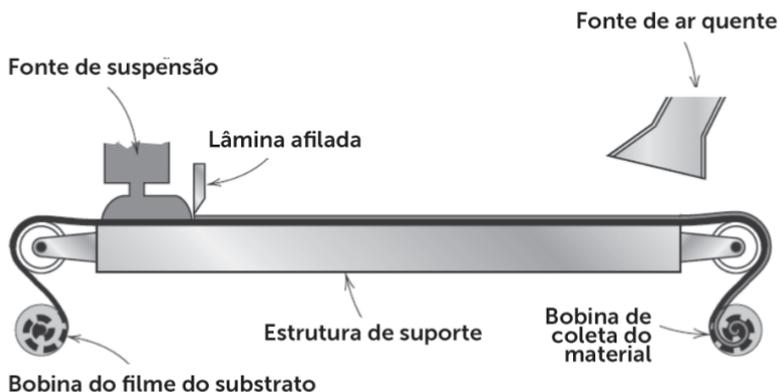
Quando a compressão é realizada simultaneamente com a sinterização em altas temperaturas, diz-se que está realizando a prensagem isostática a quente. A compressão age reduzindo o tamanho dos poros e aumenta a densidade de ligações sem aumentar o tamanho das partículas. Sendo assim, esse método é utilizado para produzir peças com porosidade reduzida.

Outras técnicas utilizadas para a fabricação de peças cerâmicas são as colagens em fita ou de barbotina.

A colagem em fita, também chamada de fundição em fita, é empregada na produção de filmes finos de cerâmica que tem aumento de resistência mecânica devido à sinterização. É utilizada para fabricar grandes quantidades de circuitos microeletrônicos a partir de substratos de alumina ou capacitores de titanato de bário ( $BaTiO_3$ ), por exemplo (ASKELAND, 2008).

A Figura 4.19 representa o procedimento em que a fita é formada pelo derramamento da suspensão sobre uma superfície plana e uma lâmina cirúrgica afilada que espalha de tal maneira que resulte em uma fita delgada e uniforme (CALLISTER JÚNIOR, 2012).

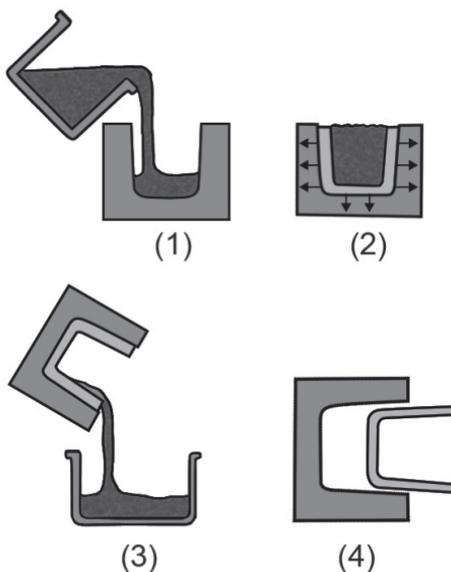
Figura 4.19 | Representação de colagem em fita de materiais cerâmicos utilizando uma lâmina cirúrgica afilada para corte



Fonte: Callister Júnior (2012, p. 458).

Na fundição por suspensão, também chamada de colagem de barbotina, a suspensão é posta em um molde e as etapas de produção se seguem como mostrado na Figura 4.20.

Figura 4.20 | Etapas de colagem de barbotina de cerâmicas



Fonte: adaptada de Askeland (2008, p. 459).

Inicialmente (1), há o enchimento do molde com a solução e à medida que a água é eliminada por capilaridade uma massa espessa se forma nas paredes do molde (2). Após a formação de uma camada espessa de massa o excesso da pasta é vazado (3) e assim é formada a cerâmica verde, que é seca parcialmente e retirada do molde (4).



## Exemplificando

Os vidros são compostos cerâmicos de estrutura amorfa e quando aquecido acima da sua temperatura de fusão e quando resfriado sua viscosidade aumenta, à medida que há um decréscimo a temperatura decresce.

A fabricação de peças de vidro pode ser por prensagem, sopro, estiramento ou conformação de fibra. A moldagem de vidro soprado pode ser feita por processo industrial ou artesanal e é empregado principalmente na produção de garrafas, como mostra a Figura 4.21 de garrafas recém-formadas na linha de produção.

Figura 4.21 | Garrafas recém-formadas na linha de produção



Fonte: <<http://www.anavidro.com.br/vidro-soprado-soprado-e-a-fabricacao-de-garrafas/>>. Acesso em: 7 ago. 2017.

## Sinterização

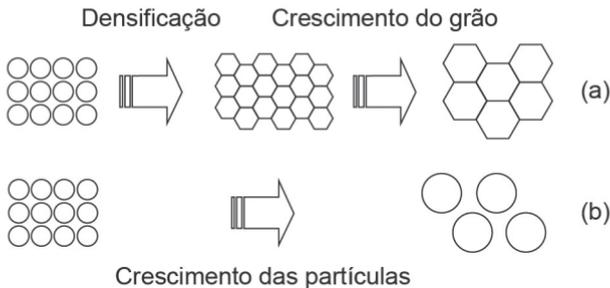
É o processo térmico onde ocorre a secagem e a queima do produto cerâmico, e corresponde ao aquecimento das partículas cerâmicas condensadas. Nesta etapa é eliminada grande parte da água contida na mistura, favorecendo a união e aumentando as forças de ligação entre as partículas.

Segundo Souza (2011), esse método visa diminuir:

- A área e a rugosidade superficial das partículas por condensação.
- O volume dos poros por transporte de material das fronteiras de grão para a superfície dos poros, ou seja, ocorre a densificação.
- A área superficial associada às fronteiras devido ao seu crescimento.
- Os defeitos atômicos como lacunas e deslocamentos.

Para casos em que a densificação prevalece, os poros tornam-se menores ou até desaparecem e o material cerâmico compactado se contrai (Figura 4.22a), entretanto, em situações em que há o crescimento das partículas os poros e os grãos crescem e apresentam aparência semelhante ao mostrado na Figura 4.22b (SOUZA, 2011).

Figura 4.22 | Esquema de redução de energia superficial das partículas: (a) Densificação seguida por crescimento de grão; (b) crescimento de partículas



Fonte: Souza (2011, p. 21).

A sinterização pode ocorrer com ou sem a presença da fase líquida, sendo que no primeiro a composição e a atmosfera de sinterização possibilitam a formação do líquido durante o processo e na segunda a temperatura ideal é de cerca de  $2/3$  a  $3/4$  da temperatura de fusão do material (SOUZA, 2011).

### Moldagem por extrusão e injeção

Ambas técnicas são utilizadas na fabricação de tubos para resistência elétrica de fornos, tijolos, azulejos e isolantes. A extrusão consiste na inserção da barbotina em uma máquina extrusora que realiza a homogeneização da mistura de forma contínua em

um molde para resultar na cerâmica verde. As próximas etapas são o corte das peças em tamanhos adequados, a secagem e a sinterização (ASKELAND, 2008; CALLISTER JÚNIOR, 2012).

A injeção da cerâmica é semelhante ao método utilizado em polímeros, já mostrada na seção anterior. É adicionado plastificante termoplástico ao pó cerâmico, e essa mistura é extrudada e injetada em um molde. Esse método é adequado para a fabricação de peças complexas, pois há o preenchimento de toda a cavidade do molde. O polímero é eliminado pelo calor quando a peça passa pelo processo de sinterização (ASKELAND, 2008).

## Sem medo de errar

No desenvolvimento das seções anteriores, você avaliou e sugeriu soluções pertinentes para resolver o problema de defeitos como paredes finas e até orifícios em determinadas regiões de copos produzidos a partir de garrafas PET recicladas. Agora, sua atividade na PolyCer Utilidades Domésticas consiste em avaliar a possibilidade e viabilidade de produção desses produtos de materiais cerâmicos. Visando à entrega do seu parecer para o supervisor, é necessário você considerar os seguintes itens:

### 1. Escolha da matéria-prima.

A argila é a matéria-prima mais utilizada para a fabricação de produtos cerâmicos, pois se apresenta em grande quantidade na crosta terrestre, indicando tratar-se da matéria-prima de menor custo a ser adquirida e também é facilmente manuseada, sendo assim, para este momento é a escolha mais adequada a ser empregada.

### 2. Escolha do processo de fabricação de tal maneira que seja adequado à ideologia de reciclagem de plásticos como responsabilidade social da empresa.

Apesar de serem excelentes materiais para a produção dos copos, os plásticos PET e as cerâmicas a partir da argila são muito diferentes sob ponto de vista de reciclagem. Lembrando que a PolyCer Utilidades Domésticas tem como prioridade a responsabilidade social de utilizar materiais reciclados para fabricar seus produtos.

Uma solução viável para essa situação será a fabricação dos copos a partir da injeção, pois além de ter sido sugerido a substituição pela extrusão na seção anterior, além do que para a produção de peças cerâmicas é necessária a adição de plastificante termoplástico ao pó cerâmico, ou seja, esse plastificante pode ser produzido a partir do material reciclado, mantendo assim o princípio social da empresa.

### **3. Listar as etapas de produção dos produtos a partir do material cerâmico.**

O processo de extrusão de cerâmica é semelhante ao método utilizado com polímero, sendo assim, aplica-se:

3.1. Preparação da massa cerâmica composta com a mistura da argila com o plastificante termoplástico.

3.2. Fechamento do molde iniciando o processo de produção.

3.3. Injeção do material de tal maneira que preencha o molde completamente.

3.4. Recalque para homogeneizar a peça e retirar marcas de extração da peça.

3.5. Recuo da unidade de injeção.

3.6. Dosagem para a preparação de material para a próxima injeção.

3.7. Extração do copo.

3.8. Sinterização para diminuir a rugosidade e a porosidade do material.

3.9. Acabamento com aplicação de revestimentos e decoração.

Observa-se que podem ser utilizados os equipamentos de injeção já adquiridos pela empresa, entretanto, vale a pena ressaltar que a produção de lixo plástico aumenta a cada dia, sendo assim, o parecer solicitado pelo seu supervisor deve indicar que a produção de copos a partir da argila deve ser implementado como uma nova modalidade de produção na empresa, com o objetivo de expandir os negócios, contratar mão de obra e, acima disso, suprir a demanda de material reciclado coletado todos os dias.

### Fabricação de garrafas de vidro

#### Descrição da situação-problema

Suponha que você trabalha em uma empresa de fabricação de peças de vidro, como pratos, bandejas e peças de decoração. Entretanto, a empresa encontra-se em expansão e quer dar início à fabricação de garrafas de vidro a partir da extrusão por sopro.

O processo de extrusão por sopro tem como principais vantagens alta velocidade de produção, controle de espessura da parede, geometrias complexas, possibilidade de maior número de camadas, fabricação de vários produtos ao mesmo tempo, sendo assim, essa nova modalidade é uma ótima opção para expansão dos negócios e aumento das vendas.

Seu supervisor solicita que você faça um levantamento sobre a técnica de produção e descreva cada etapa do processo de fabricação de garrafas de vidro. Como você começaria a desenvolver esse documento?

#### Resolução da situação-problema

Para iniciar seu parecer, é interessante você ressaltar que o processo de extrusão por sopro de materiais cerâmicos é semelhante ao processo utilizado para a fabricação de peças de plástico. A extrusora é composta por duas metades móveis que contém a geometria do produto a ser soprado. O vidro é produzido pelo aquecimento da matéria-prima até a fusão formando um composto homogêneo e isento de poros.

Portanto, são desenvolvidas as seguintes etapas:

1. A matéria-prima é inserida no pré-molde chamado "parison" e aquecida até a sua fusão.
2. O ar comprimido é injetado dentro do molde parison e forma o gargalo e garante a estabilidade dimensional.
3. O ar comprimido é injetado para dentro da massa de vidro de tal forma que ocupe o espaço interno do molde parison, formando assim a pré-forma.
4. A pré-forma é presa pelo gargalo e transferida para o molde onde a conformação final será realizada.

5. O ar comprimido é injetado forçando a pré-forma ocupar todo o espaço do molde.

6. Após o assopro final a matriz é aberta e as garrafas retiradas e resfriadas.

Assim, uma vez listadas todas as principais etapas do processo de fabricação de garrafas de vidro, a implementação desse novo setor na empresa torna-se prático, seguro e eficiente.

## Faça valer a pena

**1.** Produtos cerâmicos são produzidos a partir de pós constituídos de partículas finas obtidas por um processo chamado de síntese. Quanto à preparação da matéria-prima para a fabricação de peças cerâmicas pode-se dizer:

I. Na etapa de síntese a matéria-prima cerâmica é moída e atomizada formando as partículas finas mencionadas.

II. Após a moagem o produto é transformado em barbotina, que consiste na adição de água às partículas finas de cerâmica, criando assim uma solução.

III. A atomização consiste na técnica para a transformação da barbotina em pós cerâmicos.

Quanto à preparação da matéria-prima para a fabricação de peças cerâmicas pode-se dizer que estão corretas as asserções:

- a) I, II e III.
- b) I apenas.
- c) II apenas.
- d) III apenas.
- e) I e II apenas.

**2.** Peças cerâmicas são obtidas através da aplicação de compressão até que se obtenha o menor valor possível de empacotamento favorecendo a agregação das partículas cerâmicas.

Assinale a alternativa correta sobre a prensagem de pós cerâmicos:

- a) A prensagem hidrostática a frio consiste na fabricação de peças pequenas e no resfriamento contínuo com água durante a produção.
- b) Quando a compressão é realizada simultaneamente com a sinterização aplica-se a prensagem isostática a morno.
- c) A compressão age reduzindo o tamanho dos poros e aumenta a densidade de ligações sem aumentar o tamanho das partículas.
- d) O processo de prensagem pode se completar em um longo período de tempo resultando na fabricação de poucas peças.

e) A técnica mais utilizada de prensagem consiste na imersão isostática a quente onde o material é imerso em óleo quente.

**3.** A sinterização é processo térmico que corresponde ao aquecimento das partículas cerâmicas condensadas, realizando a eliminação de grande parte da água contida na mistura, favorecendo a união e aumentando as forças de ligação entre as partículas.

Com base nessa definição, avalie a Figura 4.23 abaixo:

Figura 4.23 | Esquema de redução de energia superficial das partículas



Fonte: Adaptada de Souza (2011, p. 21).

A figura mostrada acima corresponde a:

- a) Densificação por redução de grão.
- b) Densificação seguida por crescimento de grão.
- c) Crescimento de partículas.
- d) Redução de partículas.
- e) Aumento dos poros.

# Referências

ARAÚJO, Débora Thais Rodrigues; BRITO, Whelson Oliveira. **Avaliação do ciclo de vida na fabricação de tijolos cerâmicos na cidade de Monteiro – PB**. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE GESTÃO AMBIENTAL, 5., 2015. Anais... Porto Alegre: IBÉAS – Instituto Brasileiro de Estudos Ambientais, 2015.

ASKELAND, Donald R. **Ciência e engenharia de materiais**. São Paulo: Cengage Learning, 2008.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DA INDÚSTRIA DO PLÁSTICO – ABIPLAST. **O perfil da indústria brasileira de transformação de material plástico**. 2015. Disponível em: <[http://file.abiplast.org.br/download/links/2015/perfil\\_abiplast\\_2014\\_web.pdf](http://file.abiplast.org.br/download/links/2015/perfil_abiplast_2014_web.pdf)>. Acesso em: 21 jul. 2017.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS – ABNT. **NBR 13230**: embalagens e acondicionamentos plásticos recicláveis – Identificação e simbologia. Rio de Janeiro: ABNT, 2008.

BARBOSA, Luiz Antonio et al. Polietileno de baixa densidade – PEBD: mercado, produção, principais propriedades e aplicações. **Revista Espacios**, v. 38, n. 17, 2017.

BAUER, L. A. Falcão. **Materiais de construção**: novos materiais para construção civil. 5. ed. São Paulo: LTC, 2000. 1 v.

BORDIGNON, Francesco. **Modelo de referência para o desenvolvimento de produtos cerâmicos considerando o ciclo de vida total do produto**. 2013. 188 f. Tese (Doutorado em Engenharia Mecânica) – Escola Politécnica de Universidade de São Paulo, São Paulo, 2013.

CALLISTER JÚNIOR, William D. **Ciência e engenharia de materiais**: uma introdução. 8. ed. São Paulo: LTC, 2012.

LIRA, Valdemir Martins. **Princípios dos processos de fabricação utilizando metais e polímeros**. São Paulo: Edgard Blucher, 2017.

MACHADO, Gleysson B. Reciclagem dos plásticos. **Portal dos resíduos sólidos**, 27 jun. 2013. Disponível em: <<http://www.portalresiduossolidos.com/reciclagem-deplasticos-polimeros/>>. Acesso em: 21 jul. 2017.

MICHAELI, Walter et al. **Tecnologia dos plásticos**. São Paulo: Edgard Blucher, 1995.

OLIVEIRA, Maria Cecília; MAGANHA, Martha Faria Bernils. **Guia técnico ambiental da indústria de cerâmica branca e de revestimento**. São Paulo: CETESB, 2006.

PEREIRA, Francisco Sávio Gomes. **Polímeros**: fundamentos científicos e tecnológicos. Apostila. Recife: Instituto Federal de Pernambuco, 2009.

PROVENZA, Francesco. **Moldes para plásticos**. São Paulo: F. Provenza, 1976.

RIBEIRO, Manuel J.; VENTURA, José M.; LABRINCHA, João A. A atomização como processo de obtenção de pós para a indústria cerâmica. **Revista Cerâmica**

**Industrial**, p. 34-40, 2001.

SHACKELFORD, James F. **Ciência dos materiais**. 6. ed. São Paulo: Pearson Prentice Hall, 2008.

SORS, László; BARDÓCZ, László; RADNÓTI, Isteván. **Plásticos moldes e matrizes**. Budapeste: Hemus, 2002.

SOUZA, Ana Maria. **Sinterização em duas etapas de pós ultrafinos de alumina**. 2011. 116 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia e Ciência da Materiais) – Universidade Estadual de Ponta Grossa, PR, Ponta Grossa, 2011.



ISBN 978-85-522-0193-9



9 788552 201939 >