



Manufatura mecânica: conformação dos metais

Manufatura mecânica: conformação dos metais

Pedro Donizeti Bolanho

© 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

Alexandre Vieira
Éder Cicero Adão Simêncio

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)

Bolanho, Pedro Donizeti
B687m Manufatura mecânica: conformação dos metais / Pedro
Donizeti Bolanho. – Londrina : Editora e Distribuidora
Educacional S.A., 2017.
256 p.

ISBN 978-85-522-0190-8

1. Engenharia mecânica. 2. Metais. I. Título.

CDD 669

Sumário

Unidade 1 Manufatura mecânica: conformação dos metais	7
Seção 1.1 - Introdução aos processos de conformação plástica	9
Seção 1.2 - Laminação	34
Seção 1.3 - Trefilação	53
Unidade 2 Forjamento e processos correlatos	77
Seção 2.1 - Forjamento – principais conceitos	79
Seção 2.2 - Matrizes de forjamento	99
Seção 2.3 - Processos de forjamento: recalagem, forjamento rotativo e forjamento em cilindros	118
Unidade 3 Estampagem	139
Seção 3.1 - Estampagem – corte	141
Seção 3.2 - Estampagem – dobramento e encurvamento	161
Seção 3.3 - Estampagem profunda	177
Unidade 4 Extrusão e outros processos de conformação	197
Seção 4.1 - Extrusão	199
Seção 4.2 - Outros processos de conformação de metais – cunhagem e repuxamento, conformação com três cilindros, fabricação de tubos	218
Seção 4.3 - Outros processos de conformação de metais – conformação por explosão, estiramento, mandrilagem, calandragem	234

Palavras do autor

Caro estudante, bem-vindo aos estudos referentes à disciplina Manufatura mecânica – conformação dos metais. Esta disciplina vai lhe proporcionar conhecimentos técnicos sobre os processos de fabricação mais utilizados nas indústrias, as quais fabricam milhares de peças e produtos acabados ou semiacabados diariamente. Dessa forma, essa disciplina poderá gerar um diferencial profissional em sua vida. Portanto, aproveite bem cada informação e aprendizado proporcionado e torne-se um profissional a cada dia mais completo.

O conteúdo abordado neste livro vai trazer uma introdução aos processos de conformação plástica, explicando o que é exatamente esse tipo de processo e quais são classificados dentro desse grupo. A partir disso, serão estudados os de conformação plástica, que incluem a laminação, a trefilação, o forjamento, a estampagem, a extrusão e outros processos correlatos.

Na Unidade 1, serão abordados os conceitos e as características dos processos de conformação plástica, o efeito da temperatura nas propriedades mecânicas dos metais, as vantagens e as desvantagens de executar a conformação plástica em diferentes temperaturas (a quente, morno e frio). Nesta unidade, você conhecerá também as principais características dos processos de laminação e trefilação. A Unidade 2 está toda reservada para o processo de forjamento, que é o mais antigo processo utilizado que se tem conhecimento. Nela, você conhecerá os principais tipos de forjamento e suas características. Para a Unidade 3, será apresentado o processo de estampagem, muito utilizado na conformação de peças para indústria automotiva e de eletrodomésticos, entre outras. Nesse processo, serão apresentados o corte, a dobra e a estampagem profunda, além das principais características para um projeto de estampo, que é a ferramenta básica utilizada no processo. E, finalmente, na Unidade 4, os estudos vão se concentrar no processo de extrusão e outros correlacionados, como a cunhagem, o repuxamento, a calandragem e a conformação por explosão.

Os assuntos estão apresentados, e você, aluno, deverá ter empenho e motivação para, de modo ativo, atuar no processo

de aprendizagem. O material apresenta alguns diferenciais e ferramentas que com certeza facilitarão a fixação das informações e o seu aprendizado. Exemplos, situações-problema e as suas resoluções, momentos para reflexão e assimilação de conteúdo, assim como exercícios são algumas dessas ferramentas. Reflita sobre a importância desse aprendizado para sua vida profissional.

Bons estudos!

Manufatura mecânica: conformação dos metais

Convite ao estudo

Bem-vindo à disciplina de *Manufatura mecânica: conformação dos metais*.

Nesta primeira unidade de ensino, você conhecerá os processos de conformação plástica, entendendo o que ela é, quando e como é utilizada, assim como os efeitos térmicos sobre as propriedades mecânicas e o uso do calor como fator facilitador no processo de conformação. Você estudará sobre a conformação plástica a quente, morno e frio e vai conhecer as aplicações, vantagens e desvantagens de cada um desses métodos de conformação. Entre os possíveis processos de conformação plástica, nesta unidade, serão estudados, de forma mais específica, dois desses processos de conformação mecânica: a laminação e a trefilação. A partir desses conteúdos, você vai conhecer e aplicar os conceitos fundamentais utilizados na laminação e trefilação de metais.

Nesta unidade de ensino, você vai adquirir o entendimento técnico sobre o que é um processo de conformação plástica de metais, quais são os processos assim intitulados, como ocorrem e em que condições são realizados, tudo isso no âmbito da manufatura mecânica.

Pronto para o desafio? Você foi contratado por uma empresa metalúrgica de médio porte, a LAMINA Industrial Mecânica Ltda., que produz produtos conhecidos como primários, ou seja, chapas, placas, tarugos, barras, os quais são produzidos por trabalho mecânico primário. Sua função de Analista de Processos Júnior está ligada ao departamento de processos, no qual você exercerá atividades voltadas à

especificação, definição, análise e melhoria de processos. Essa empresa definiu em seu último planejamento estratégico uma projeção do aumento em suas vendas em 30% para os próximos três anos, ganhando algumas posições no mercado em que atua. Para que essa previsão seja alcançada, os processos internos deverão ser melhorados e, assim, há muito trabalho a ser feito. Suas tarefas na unidade estarão ligadas a conhecer os principais tipos de metais que podem ser utilizados para produzir peças por meio do processo de conformação plástica de metais, e, assim, as suas principais características e adequação ao uso no processo para que os processos executados na LAMINA sofram menos problemas em função de material. Outra atividade estará voltada ao plano de ajustes do processo de laminação por meio do controle das principais variáveis, em que será necessário definir e ajustar um processo de laminação a frio de bobinas de chapas SAE 1015, de 0,45 mm de espessura. Na última tarefa na unidade, você será desafiado a elaborar um memorial em que conste todas as características principais e importantes numa linha de trefilação de arames que será um novo investimento para a companhia. Essas situações-problema estarão distribuídas ao longo das três seções da unidade de ensino.

Muitas perguntas surgirão ao longo das três seções da unidade. O que é um processo de conformação plástica? Quais produtos podem ser produzidos por esse processo? O que diferencia esse processo de outros? Qual a importância e o efeito da temperatura na resistência dos metais e nas suas propriedades mecânicas? Quando um produto é produzido por conformação plástica? Existe diferença se a conformação for realizada a quente ou a frio? O que é uma laminação? O que é trefilação? Quais as principais características e quais os produtos produzidos por esses processos?

"Ciência e tecnologia revolucionam nossas vidas, mas a memória, a tradição e o mito moldam nossas respostas".
Arthur Schlesinger – historiador.

Aproveite bastante e bons estudos!

Seção 1.1

Introdução aos processos de conformação plástica

Diálogo aberto

Nesta seção, você conhecerá os processos de conformação mecânica, conhecendo os grupos de processos de fabricação e a definição de conformação plástica. Você aprenderá sobre os efeitos térmicos, as propriedades mecânicas e o uso do calor como fator facilitador no processo de conformação, a conformação plástica a quente e a frio e vai aplicar os conceitos aprendidos na situação-problema proposta.

Você foi contratado como Analista de Processos Jr. por uma empresa metalúrgica de médio porte, a LAMINA Industrial Mecânica Ltda. Sua primeira tarefa, definida pelo supervisor da área, está ligada a avaliar e definir se os materiais propostos para três peças diferentes que serão processadas através de processos de conformação plástica são adequados para esse tipo de processo e quais as melhores condições empregadas em relação à temperatura e aos seus efeitos térmicos sobre o material e o processo. As principais características referentes às três peças que serão utilizadas como matéria-prima pela empresa fictícia no decorrer das unidades de ensino deste livro são: um *blank* redondo com diâmetro 25 mm x 30 mm de comprimento de aço SAE 1008 que será fornecido para uma forjaria; uma chapa de aço SAE 1015 com espessura 0,45 mm a ser fornecida para uma empresa de estampagem na forma de bobina; e um tarugo de SAE 1010 para extrusão com diâmetro de 150 mm x 1000 mm.

A partir dos estudos teóricos com os quais você vai adquirir conhecimentos importantes a respeito da conformação plástica, passará a ter subsídios para análise e definição das principais características dos materiais e deverá ser capaz de responder a algumas perguntas sobre tema, como: os materiais apresentados são os mais indicados para essas peças e processos? Quais os principais materiais a serem utilizados para a conformação de peças por meio da conformação plástica? Para os materiais e tipo de processos indicados, o efeito da temperatura é importante em sua

manufatura? Quais são os efeitos da temperatura nesses materiais e processos de conformação? Como você define se a operação deve ser realizada a quente ou a frio? Quais as características ideais a serem observadas para esses materiais em função do processo? Existem vantagens e desvantagens para um processamento realizado a quente ou a frio?

Bem, essas e outras perguntas poderão ser respondidas a partir do momento que você iniciar seus estudos nesta seção. Então, vamos começar?

Não pode faltar

Durante todas as nossas atividades diárias, utilizamos muitos objetos e peças que fazem parte dos utensílios, dos equipamentos, das máquinas e dos veículos de que necessitamos. Todas essas peças devem ser produzidas de alguma forma, então, para isso, os processos de fabricação foram desenvolvidos. Para a fabricação, são utilizados materiais apropriados que possuem características ideais para o produto a ser fabricado e para o processo que será utilizado. Então, já sabemos que, para manufaturar mecanicamente uma peça, devemos conhecer o tipo de processo e o material que serão utilizados. Além disso, podemos entender que um processo de fabricação mecânica é aquele que tem como objetivo a transformação de um material ou corpo metálico em uma peça ou, ainda, em uma matéria-prima processada, modificando sua forma inicial e lhe conferindo as medidas, as características e a forma especificadas em projeto.

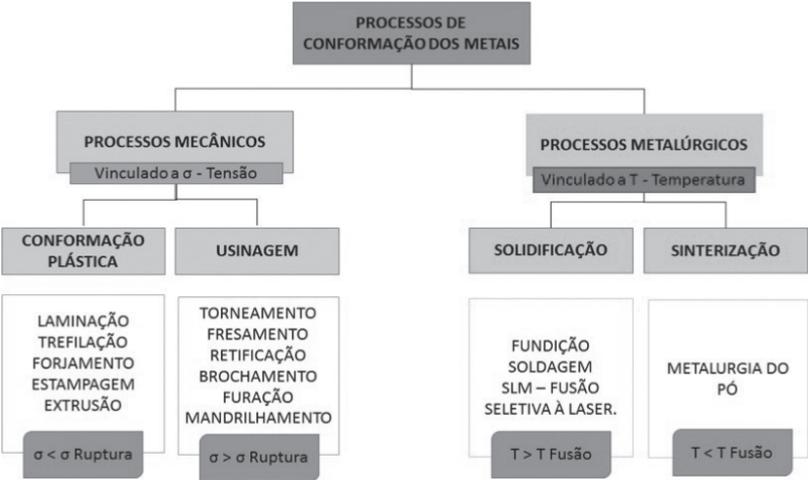
Você conhece todos os tipos de processos de fabricação existentes? Vamos conhecê-los?

São conhecidos dois grupos de processos de fabricação ou conformação de metais: os processos mecânicos cuja característica principal para que ocorra a modificação da forma está ligada à aplicação de tensão externa sobre o corpo metálico, e os processos metalúrgicos em que a característica vinculada à modificação da forma é a aplicação de altas temperaturas para modificação do corpo metálico. Vamos dividir os processos mecânicos em conformação plástica e usinagem e os processos metalúrgicos em solidificação e sinterização. Neste livro, vamos

estudar especificamente os processos mecânicos conhecidos como conformação plástica, que compreendem os processos de laminação, trefilação, forjamento, estampagem, extrusão e outros processos correlatos.

Na Figura 1.1 apresentada a seguir, você pode entender esquematicamente como se dividem os processos de conformação dos metais e onde a conformação plástica se posiciona.

Figura 1.1 | Processos de conformação dos metais



Fonte: elaborada pelo autor (2017).

Você sabe o que é a conformação plástica de metais? Vamos entender?

Um processo é conhecido como de conformação plástica sempre que for realizado utilizando um material no estado sólido e sempre que os esforços aplicados para conferir a modificação da forma gerarem tensões abaixo da tensão limite de resistência do material. Isso nos indica que o trabalho realizado no processo deve ocorrer dentro da região plástica do material.



Você se lembra o que são **ductilidade**, **tenacidade** e **encruamento**?

Não? Então vamos relembrar esses conceitos, pois serão utilizados no decorrer desse aprendizado.

A capacidade que um material possui em aceitar a deformação plástica quando submetido a um esforço é a **ductilidade**. Assim, quanto maior for o grau de deformação plástica sem que esse material se rompa, maior é a sua ductilidade.

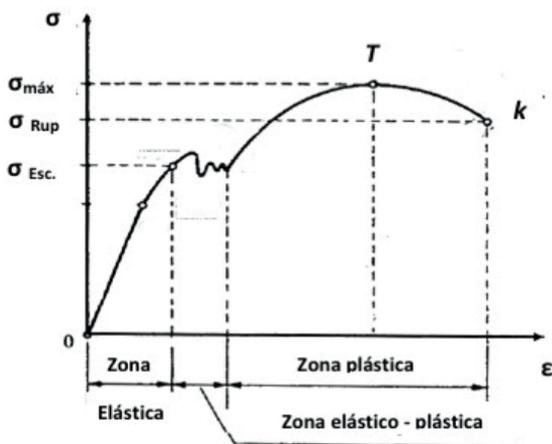
A capacidade que o material tem de absorver energia durante um impacto e transformá-la em deformação plástica é a **tenacidade**. Assim, entende-se que a tenacidade é uma medida de quantidade de energia que um material pode absorver antes de se fraturar.

O fenômeno que modifica a estrutura dos metais através da deformação plástica quando esta é realizada abaixo da temperatura de recristalização e que causa o endurecimento e aumento de resistência do metal é o **encruamento**.

Ao longo desta seção de aprendizagem, você entenderá qual a importância dessas propriedades.

Para entender a região plástica do material, é importante estudarmos o diagrama tensão x deformação ($\sigma \times \epsilon$), pois é através desse estudo que enxergamos o comportamento do material quando submetido a um determinado estado de tensão. Você se recorda desse diagrama? Já o estudamos anteriormente em outras disciplinas. Veja na Figura 1.2 o diagrama tensão x deformação ($\sigma \times \epsilon$) com suas características e fases.

Figura 1.2 | Diagrama tensão x deformação ($\sigma \times \epsilon$).



Fonte: adaptada de <<https://pt.wikipedia.org/wiki/Ficheiro:Fluencia.jpg>>. Acesso em: 26 fev. 2017.

No gráfico apresentado, é possível observarmos três zonas ou fases de resistência: a zona elástica, a zona elástico-plástica (ou região de escoamento) e a zona plástica. A zona elástica pode ser facilmente percebida, pois é representada por uma reta. Nessa fase, ocorre a deformação elástica, que é aquela em que, quando retirados os esforços que estão atuando em determinado corpo metálico, ele retorna à sua forma inicial. Essa fase é delimitada pela região de escoamento ou zona elástico-plástica, momento em que a estrutura do material atinge o limite de elasticidade que representa a tensão máxima que pode ser aplicada ao material sem que apareçam deformações residuais.

A zona plástica é visualizada na forma de uma curva no gráfico. Essa fase é limitada pelas tensões de escoamento e a tensão máxima admissível (ponto **T** no gráfico). Esse ponto define que o grau de tensão é menor que o de ruptura e adequado aos processos de conformação plástica. Assim, na fase plástica, ocorre a deformação plástica, que é aquela em que, quando são retirados os esforços, o material permanece deformado, ou seja, não recupera a forma original. Em uma deformação plástica não ocorre variação do volume, assim, o volume inicial de um corpo metálico submetido ao processo é igual ao volume final já na forma de peça. Ainda

deve ser observado que, para os processos em que é necessária a ruptura do material, deve-se utilizar a região da tensão de ruptura, indicada pelo ponto *K* no gráfico.



Assimile

Os processos de conformação plásticos ou mecânicos podem ser classificados de acordo com os tipos de esforços aplicados. Essa classificação divide a conformação em: processos de compressão direta, processos de compressão indireta, processos de tração, processos de dobramento e processos de cisalhamento. Veja, no Quadro 1.1 que segue, alguns exemplos típicos das categorias dos processos em função dos tipos de esforços aplicados.

Quadro 1.1 | Exemplos de processos por tipo de esforço

Processos	Exemplos de processos da classificação	Esquema
Compressão direta	Laminação e forjamento	<p>O diagrama mostra dois tipos de processos de compressão direta. À esquerda, a laminação (LAMINAÇÃO) é ilustrada com dois cilindros rotacionando em sentidos opostos, comprimindo uma peça metálica entre eles. À direita, o forjamento (FORJAMENTO) é mostrado com uma peça metálica sendo comprimida entre duas matrizes planas por meio de um punção.</p>
Compressão indireta	Trefilação de fios e tubos, extrusão e estampagem profunda	<p>O diagrama ilustra três processos de compressão indireta. No topo esquerdo, a trefilação (TREFILAÇÃO) mostra um fio sendo puxado através de uma matriz. No topo direito, a extrusão (EXTRUSÃO) mostra um material sendo empurrado através de uma matriz. Na base, a estampagem profunda (ESTAMPAGEM PROFUNDA) mostra uma peça sendo moldada em uma matriz por meio de um punção.</p>
Tração	Tracionamento de chapas	<p>O diagrama mostra o tracionamento (TRACIONAMENTO) de uma chapa metálica. A chapa é puxada por duas pinças em uma matriz plana.</p>

Processos	Exemplos de processos da classificação	Esquema
Dobramento	Dobramento na cahapas	
Cisalhamento	Corte do metal	

Fonte: adaptado de <http://mmborges.com/processos/sub_conformacao_intro.htm>. Acesso em: 4 mar. 2017.



Refleta

Refleta sobre o que as propriedades mecânicas **ductilidade**, **tenacidade** e **encruamento** representam em um processo de conformação plástica. Uma conformação plástica está diretamente ligada à deformação e à necessidade de energia? Como essas propriedades auxiliam durante o processo de conformação?

Você acha que a temperatura é uma variável que pode influenciar a resistência dos metais e suas propriedades? A resposta é sim. Então, vamos entender sobre o efeito da temperatura na resistência dos metais e nas suas propriedades mecânicas.

Uma variável muito importante na conformação plástica é a temperatura, pois, se pensarmos no aspecto das características do produto proveniente da conformação, essa variável é determinante. Devido a essa variável, classificamos o processo de conformação

em três grupos: trabalho a quente, morno e frio. A característica que distingue esses três grupos é a temperatura de recristalização, que é específica em cada um dos casos. São gerados efeitos na estrutura e nas propriedades mecânicas dos metais devido a essa variação nas condições de trabalho. A temperatura de fusão do metal – T_m , dada em K (escala *Kelvin*), é usualmente utilizada como um fator limitante entre trabalho a quente (acima de $0,5 T_m$), morno (entre $0,3$ e $0,5 T_m$) e a frio (entre 0 e $0,3 T_m$). Deve ficar claro que os três processos apresentam também diferenças devido às temperaturas empregadas. Podemos citar a oxidação superficial e as distorções da peça que são associadas a variações de temperatura como exemplos dessas diferenças, que ocorrem em produtos de metais conformados a temperaturas elevadas. Já produtos de metais conformados a frio permitem a manufatura de produtos com melhor acabamento e obtenção de características dimensionais e geométricas com maior reprodutibilidade.

Figura 1.3 | Trabalho a quente em prensa



Fonte: <<http://www.fcolombo.it/pt/galeria/>>. Acesso em: 28 fev. 2017.

Vamos entender um pouco mais sobre o trabalho a quente?

No trabalho a quente, o efeito sobre a resistência mecânica se dá devido ao aumento da temperatura de trabalho, que gera

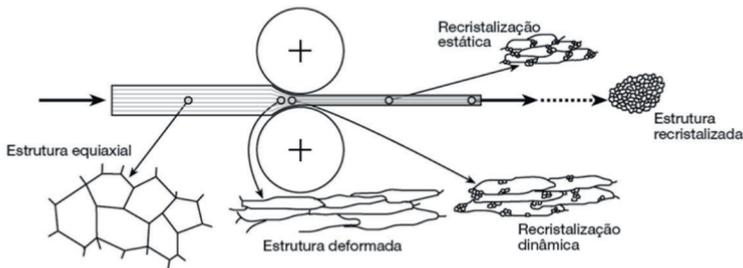
a redução da resistência mecânica e, assim, resulta em energia necessária para a deformação. Essa característica permite o uso de equipamentos para conformação de menor potência em relação ao mesmo trabalho realizado em temperaturas ambiente ou menores, conforme pode ser observado na Figura 1.3. O trabalho sob temperatura elevada facilita a difusão, fazendo com que heterogeneidades químicas do material sejam reduzidas. Outro fator que favorece a homogeneização por difusão do material é a redução de distância ou espaços entre os braços das dendritas originadas no processo de solidificação causado quando ocorre a alteração de forma do material, em conjunto com a redução das dimensões normais ao sentido de deformação, como em espessuras ou diâmetros, de acordo com o tipo de produto. O efeito sobre fases insolúveis com inclusões não metálicas, carbonetos ou nitretos estáveis está na alteração da forma e a distribuição que é alterada em função do trabalho a quente. A macroestrutura formada evidencia que o material foi submetido à deformação a quente. A microestrutura e o tamanho de grão do material também sofrem alterações por meio da recristalização. Nesse caso, são provocados pela energia de deformação, que é armazenada no material, e, ao atingir certo nível, em função do material e da temperatura, ocorre a chamada nucleação de novos grãos não deformados, fenômeno chamado de recristalização. A recristalização é responsável por eliminar o aumento de resistência que está associada ao encruamento e a produzir novos grãos.



Exemplificando

Veja, na Figura 1.4, o exemplo de um processo de conformação plástica por laminação em que é possível observar a evolução da microestrutura no decorrer do trabalho a quente. Pode ser observado que, no início da recristalização, que ocorre durante a deformação, há a "recristalização dinâmica", e que, quando é necessário um intervalo de tempo pós-deformação para ocorrer a recristalização inicial, há a "recristalização estática".

Figura 1.4 | Trabalho a quente em prensa



Fonte: Colpaert (2008, p. 357).

Outro efeito do trabalho a quente é o bandeamento. Esse termo dá significado a uma microestrutura que se manifesta, na maioria das vezes, pela formação de bandas alternadas de ferrita e perlita, ou ainda, de outros constituintes com variação significativa do teor de carbono.

Você sabe quais são as vantagens, desvantagens e defeitos do trabalho a quente? Vamos conferir?

Nos processos de deformação a quente ocorrem as alterações microestruturais, as quais resultam na modificação estrutural, eliminando em grande parte a energia introduzida no material pelos processos de recuperação e recristalização.

No trabalho a quente, como apresentado na Figura 1.5, podem ocorrer alguns defeitos, como dobras, trincas, material superaquecido e queimado que podem gerar defeitos nos produtos finais, ou ainda, quando forem realizados processos subsequentes, como o tratamento térmico. Quando ocorrem trincas e dobras, como apresentado na Figura 1.6, e for detectada a presença de óxidos e a ocorrência de descarbonetação no interior de dobras, fica claro que as peças foram trabalhadas em altas temperaturas ou em atmosferas oxidantes se as descontinuidades já existirem. O que determina se as trincas são provenientes do trabalho a quente ou a frio, ou ainda, se ocorreram após a fase de conformação, como em um tratamento térmico, é a presença de óxidos e a ocorrência de descarbonetação, que pode ser percebida no interior de dobras ou trincas.

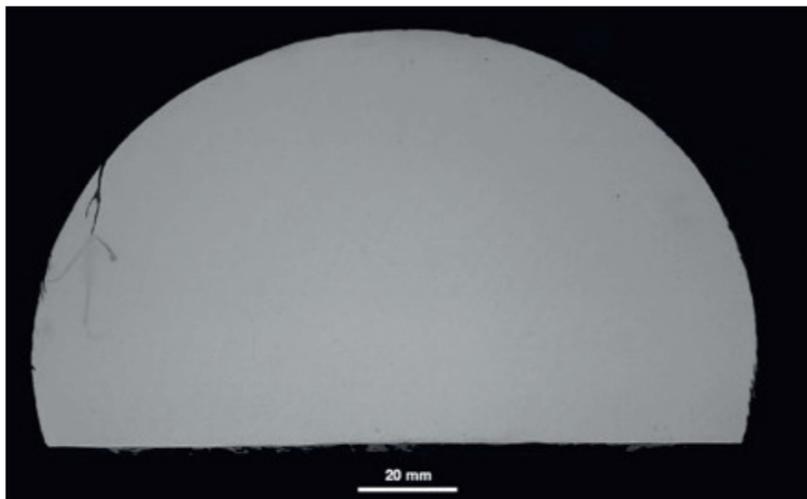
Problemas como o superaquecimento e queimado, conforme a Figura 1.7, são gerados devido ao aquecimento excessivo no início do trabalho a quente, em que as temperaturas muito elevadas são percebidas. A falha conhecida como queimado aparece quando ocorrem fusão e oxidação nos contornos de grãos austeníticos. Quando essa falha ocorre, é praticamente impossível recuperá-la, e, na maioria das vezes, o material se torna sucata. Já o superaquecimento pode aparecer de diversas formas e por meio de muitos fenômenos, como a dissolução e a reprecipitação de sulfetos de manganês, que fragilizam o material. Outra forma de manifestação do superaquecimento é quando ocorre aquecimento de regiões e, por consequência, crescimento de grão austenítico excessivo.

Figura 1.5 | Trabalho a quente em prensa



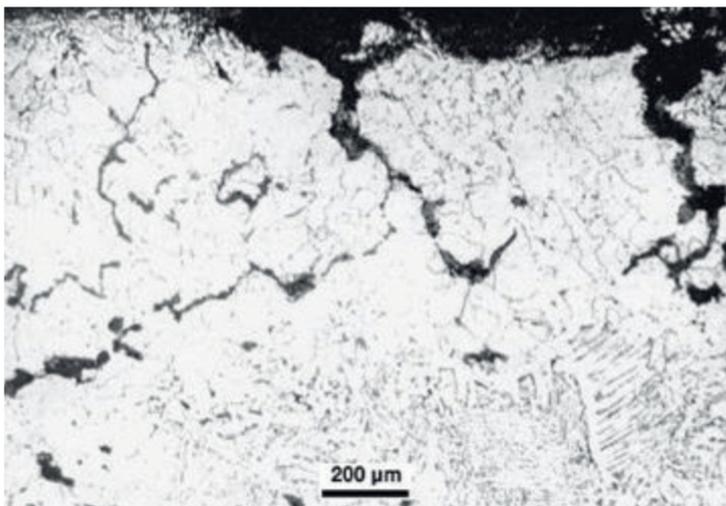
Fonte: <<https://goo.gl/mKlg9V>>. Acesso em: 28 fev. 2017.

Figura 1.6 | Dobras de forjamento em barras de aço inoxidável, seção transversal



Fonte: Colpaert (2008, p. 370).

Figura 1.7 | Seção transversal próxima à superfície de aço superaquecido e queimado



Fonte: Colpaert (2008, p. 373).



Para que você possa entender cada vez mais e conhecer todos os detalhes referentes à conformação a quente, morno e frio, assim como materiais apropriados para conformação, como o aço avançado, segue sugestão de livro.

COLPAERT, Hubertus. **Metalografia dos produtos siderúrgicos comuns**. 4. ed. São Paulo: Blucher, 2008.

E na conformação plástica a frio, você conhece quais as vantagens, desvantagens e defeitos do processo? Vamos verificar?

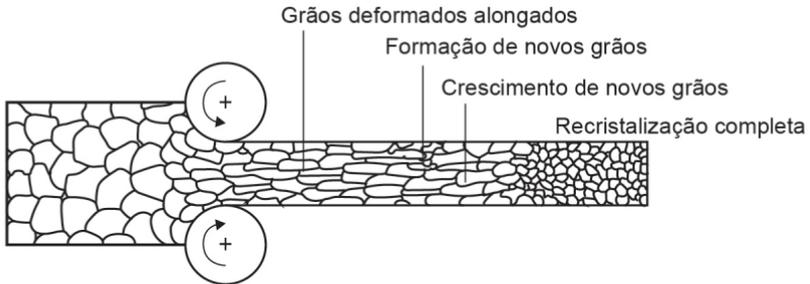
Uma deformação a frio ocorre na condição em que o material trabalha sob uma temperatura em que a energia de deformação é armazenada no material, não ocorrendo processos de recuperação ou recristalização. Essa temperatura, conforme já citamos, deve ser limitada pela temperatura de fusão do metal – T_m , que está entre 0 e $0,3 T_m$.

No trabalho a frio também se evidenciam alguns defeitos, como o encruamento, a casca de laranja e as linhas de distensão. O encruamento é entendido como um fenômeno que altera a estrutura dos metais ao serem submetidos à deformação plástica abaixo da temperatura de recristalização e causará o endurecimento e aumento da resistência do metal. Assim, uma definição apropriada para o encruamento de um metal, verificada na Figura 1.8, pode ser simplificada apenas em: é o seu endurecimento por deformação plástica. Esse fenômeno ocorre principalmente devido aos metais se deformarem plasticamente por meio de movimento de discordâncias, as quais interagem diretamente entre si ou com outras imperfeições, ou indiretamente com o campo de tensões internas de várias imperfeições e obstáculos.

A casca de laranja (Figura 1.9) está relacionada ao tamanho do grão do material e ocorre eventualmente na estampagem de chapas de metal quando sua granulação é muito grande. Ela pode ser reconhecida e caracterizada no material devido a sua superfície apresentar grau de rugosidade muito alto, podendo ser visualizada mesmo após um recobrimento da superfície com pintura, por exemplo. As linhas de distensão podem ocorrer em materiais,

principalmente em chapas que apresentam baixo carbono quando o material passa por deformação na faixa do escoamento, gerando uma superfície áspera. Essa superfície áspera se origina quando ocorrem depressões ao longo dos planos de máxima tensão de cisalhamento. Na continuidade dessa deformação, as depressões se espalham e acabam se juntando, produzindo a superfície áspera.

Figura 1.8 | Encruamento em uma operação de laminação



Fonte: Kiminami. (2013. p. 73.)

Figura 1.9 | Falha casca de laranja em chapa pintada



Fonte: <<http://forum.monzeiros.com/viewtopic.php?t=26838&start=80>>. Acesso em: 1 abr. 2017.

No Quadro 1.2 são apresentadas as vantagens e desvantagens dos processos de conformação realizados a quente e a frio. Vamos conhecer?

Quadro 1.2 | Vantagens e desvantagens dos dois processos de trabalho mecânico

CARACTERÍSTICAS	TRABALHO A QUENTE		TRABALHO A FRIO	
	VANTAGENS	DESADVANTAGENS	VANTAGENS	DESADVANTAGENS
Esforço empregado	Menor esforço mecânico.			Maior esforço mecânico.
Capacidade de máquina, considerando-se uma mesma quantidade de deformação	Máquinas são de menor capacidade.			Máquinas com maior capacidade.
A estrutura do metal	Refinada, de modo que sua tenacidade melhora.		Deforma em maior ou menor profundidade, conforme a extensão do trabalho.	
Propriedades mecânicas	Melhora a tenacidade porque refina a estrutura e elimina a porosidade e segrega as impurezas.		As alterações nas propriedades indicadas a seguir podem ser úteis em certas aplicações, tornando-se vantagens, ou podem ser uma desvantagem, devendo, assim, serem eliminadas por recozimento.	
	Escória e outras inclusões são comprimidas na forma de fibras, com orientação definida, tornando o metal mais resistente em uma certa direção.		Pode alterar sensivelmente a resistência.	
			Dureza aumenta.	
		Ductilidade diminui.		
Deformação	Mais profunda devido à continuada recristalização que ocorre durante o processo.			Menos profunda.
Ferramental		Os cilindros, matrizes, dispositivos de adaptação etc. devem possuir boa resistência ao calor, o que pode afetar o custo da operação.	Custo menor com relação ao ferramental.	

CARACTERÍSTICAS	TRABALHO A QUENTE		TRABALHO A FRIO	
	VANTAGENS	DESvantagens	VANTAGENS	DESvantagens
Oxidação e inserções		Gera oxidação e formação de casca de óxido, devido às elevadas temperaturas envolvidas no processo.		
Dimensões, tolerâncias e acabamentos obtidos		Não permite, a obtenção de dimensões dentro de estreitas tolerâncias, e os acabamentos podem apresentar distorções.	Permite a obtenção de dimensões dentro de estreitos campos de tolerância, além de produzir melhor acabamento superficial.	

Fonte: elaborado pelo autor.

Sem medo de errar

Para começar, vamos montar um quadro para cada tipo de material para organizarmos as informações. Com os conhecimentos adquiridos nesta unidade de ensino, é possível chegar às conclusões apontadas nos quadros referentes aos três materiais.

Material	Aço SAE 1008 - <i>blank</i> redondo com diâmetro de 25 mm x 30 mm.
Trabalho	Forjamento.
Material adequado?	Sim
Características principais	Praticamente todos os materiais metálicos podem ser forjados, desde que a liga seja ajustada para obter a necessária conformabilidade. Quando as aplicações demandarem elevada resistência mecânica, tenacidade, ductilidade e resistência à fluência, é necessário utilizar os aços. Existem soluções que auxiliam as forjarias na competitividade, como fornecer barras com comprimentos predeterminados, que evitam perdas por sobra, enviar em comprimentos múltiplos diretamente do laminado a quente, ou então, agregando serviços de cortes com comprimentos a partir de 8 mm em <i>bolachas</i> ou <i>blanks</i> .
Tipo de operação – quente ou frio?	Frio. O tamanho do <i>blank</i> a ser trabalhado e o tipo de conformação por forjamento permitem o trabalho a frio.

Material	Chapa de aço SAE 1015 – Esp. 0,45 mm – Bobina
Trabalho	Laminação.
Material adequado?	Sim
Características principais	Como a temperatura de trabalho situa-se abaixo da temperatura de recristalização, o material da peça apresenta uma maior resistência à deformação e um aumento dessa resistência com a deformação (encruamento), não permitindo, com isso, intensidades elevadas de redução de seção transversal.
Tipo de operação – quente ou frio?	Frio. Uma produção de chapa nessa espessura final requer dimensão, grau de acabamento e tolerância que só são possíveis por meio do trabalho a frio. Esse tipo de peça passa por vários outros passes antes de atingir essa medida final e, no início do processo, quando se tem maiores espessuras, o processo a quente também será utilizado.

Material	Tarugo – SAE 1010 – com diâmetro de 150 mm x 1000 mm.
Trabalho	Extrusão.
Material adequado?	Sim
Características principais	As propriedades do extrudado na direção da seção transversal são diferentes das propriedades na direção da seção longitudinal (ou de extrusão), caracterizando uma anisotropia do material. Um dos resultados é que a resistência mecânica é menor na direção transversal, e essa diferença é mais acentuada para os metais de estrutura mais heterogênea.
Tipo de operação – quente ou frio?	Quente. Os esforços que demandam esse processo e o material de partida necessitam que os esforços sejam reduzidos por meio do trabalho a quente.

Podemos pesquisar no catálogo de fornecedores os tipos de aço mais adequados para trabalhar a quente e a frio. Seguem alguns links que poderão ajudar na pesquisa.

- Gerdau. Disponível em: <<https://www.gerdau.com/br/pt/produtos/catalogos-e-manuais#k=#s=31>>. Acesso em: 2 abr. 2017.
- Gerdau Aços Finos Piratini, Manual de Aços, 2003. Disponível em: <http://www.feis.unesp.br/Home/departamentos/engenhariamecanica/maprotec/catalogo_acos_gerdau.pdf>. Acesso em: 2 abr. 2017.
- Usiminas. Catálogo on-line. Disponível em: <<http://www.usiminas.com/solucoes/wp-content/uploads/sites/5/2013/12/su-catalogo-online.pdf>>. Acesso em: 2 abr. 2017.
- Villares Metals, catálogos. Disponível em: <<http://www.villaresmetals.com.br/pt/villares/Downloads?type=23529>>. Acesso em: 2 abr. 2017.

De acordo com o catálogo do fornecedor pesquisado, são comercializados três tipos de aço específicos: para trabalho a frio, para trabalho a quente e os mistos, ou seja, são aços que servem para trabalho a frio e a quente.

Os **aços para trabalho a frio** são aços que devem ser utilizados em trabalho à temperatura ambiente ou pouco elevada na usinagem, na conformação e no processamento de metais, madeiras, minerais e outros materiais. Suas principais características são: alta dureza, tenacidade e resistência à abrasão. Alguns tipos apresentam pequena deformidade. Essas propriedades, muitas vezes, não ocorrem simultaneamente, devendo a escolha do aço levar em consideração a melhor combinação possível caso a caso.

Veja, na Tabela 1.1, uma dessas especificações referentes ao fornecedor de aços Gerdau.

Tabela 1.1 | Aços para deformação a frio

QUAL. GERDAU	ABNT/SAE AISI/ASTM	DIN	UNI	JIS	BS	AFNOR
1010	1010	Cq10	CB10FF	S10C	(045A10)	(CC10)
1015	1015	Cq15	-	S15C	(050A15)	-
1035Cr	ABNT 1035	(Cq35)	-	-	-	-
1038Cr	ABNT 1038	-	(38Cr1KB)	-	-	-
4140	4140	(42CrMo4)	-	(SCM 4H)	(708M40)	(42CD4)
5016M	(5016)	-	-	-	-	-
5135	5135	(34Cr4)	34Cr4KB	(SCr 3H)	(530A36)	-
41Cr4	ABTN 5141	41Cr4	41Cr4KB	SCr 4H	530M40	42C4
NORMAS	NBR 6325/7003	1654	7536	-	-	-

Fonte: Gerdau Aços Finos Piratini (2003).

Podemos observar que os aços indicados em nosso projeto estão de acordo com as faixas apresentadas na tabela do fornecedor, considerando Aço 1010 e 1015. Assim, a especificação está adequada, podendo ser realizado algum ajuste de acordo com o fornecedor, por exemplo: substituir 1008 por 1010.

Os **aços para trabalho a quente** são preparados para serem utilizados em trabalhos com temperaturas maiores que 200 °C, em que, nas condições de operação, apresentam elevada resistência mecânica, dureza e resistência ao desgaste, assim como elevada tenacidade, temperabilidade, resistência à fadiga, condutividade e à formação de trincas térmicas. Esses aços foram especialmente desenvolvidos para suportar condições combinadas de pressão, calor e abrasão associadas com cisalhamento, puncionamento ou conformação de metais em alta temperatura. Muitos aços-liga são especificados pela sua endurecibilidade quando essa característica

é exigida, e sua identificação ocorre com a aplicação do sufixo "H" originária de *hardenability* para distingui-los de outros tipos de aço sem essa característica. Esses aços do grupo H normalmente apresentam médios teores de carbono, que podem variar de 0,35 a 0,45%, e teores combinados de tungstênio, cromo, vanádio e molibdênio, com variação de 6 a 25%. O grupo é dividido em aços ao cromo, ao tungstênio e ao molibdênio. Esses aços podem ser aplicados em matrizes de forjamento, punções, mandris e matrizes de extrusão. Esses componentes são comuns no forjamento em aço, bronze e latão, na extrusão de ligas de cobre e ligas de níquel e extrusão e injeção de alumínio.

O Quadro 1.3 a seguir apresenta a composição química dos aços para trabalho a quente.

Quadro 1.3 | Aços para trabalho a quente (Classe H)

Composição dos aços para trabalho a quente - Classe H										
Designação		Composição % (*)								
AISI	UNS	C	Mn	Si	Cr	Ni	Mo	W	V	Co
Aço Cromo para trabalho a quente										
H11	T20811	0,33-0,43	0,20-0,50	0,80-1,20	4,75-5,50	0,30 máx	1,10-1,60	...	0,30-0,60	...
H19	T20819	0,32-0,45	0,20-0,50	0,20-0,50	4,00-4,75	0,30 máx	0,30-0,55	3,75-4,50	1,75-2,20	4,00-4,50
Aço Tungstênio para trabalho a quente										
H21	T20821	0,26-0,36	0,15-0,40	0,15-0,50	3,00-3,75	0,30 máx	...	8,50-10,00	0,30-0,60	...
H23	T20823	0,25-0,35	0,15-0,40	0,15-0,60	11,00-12,75	0,30 máx	...	11,00-12,75	0,75-1,25	...
H26	T20826	0,45-0,55(**)	0,15-0,40	0,15-0,40	3,75-4,50	0,30 máx	...	17,25-19,00	0,75-1,25	...
Aço Molibdênio para trabalho a quente										
H42	T20842	0,55-0,70(**)	0,15-0,40	...	3,75-4,50	0,30 máx	4,50-5,50	5,50-6,75	1,75-2,20	...
(*) todos os aços contêm: 0,25 máx Cu, 0,03 máx P, e 0,03 máx S. O enxofre pode ser aumentado para 0,06 a 0,15% para melhorar a usinabilidade										
(**) Disponível em vários teores de carbono										

Fonte: <<https://goo.gl/lclV28>>. Acesso em: 10 mar. 2017.

Os aços para trabalho a frio e quente, conforme indica sua especificação, podem trabalhar a frio ou a quente de acordo com as aplicações específicas, como ferramentas para conformação a quente em martelos e prensas, furação, corte e cunhagem a frio, estamparia, mandris e moldes para fundição sob pressão e extrusão de metais leves.

Avançando na prática

Produção de peças automotivas de ligas de alumínio através do forjamento

Descrição da situação-problema

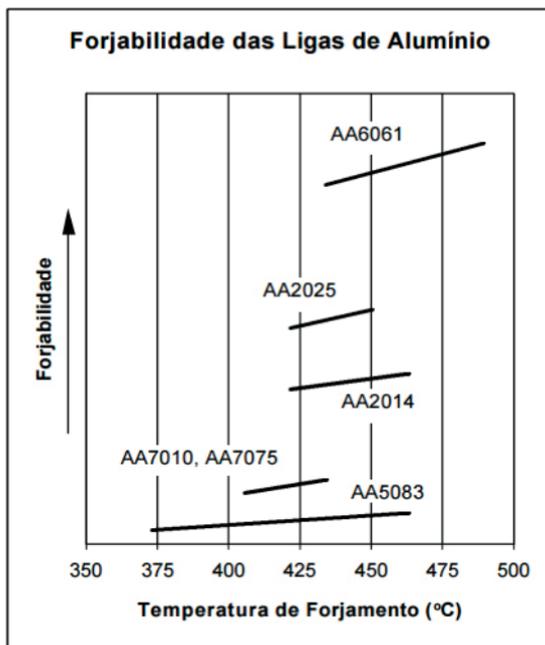
Para a indústria automotiva, a produção de peças em alumínio, que tem baixo peso-específico, traz muitas vantagens, como a obtenção de peças com baixo peso, o que gera uma economia comprovada de combustível e, automaticamente, colabora para os aspectos ambientais. Imagine que você trabalha em uma empresa metalúrgica acostumada a produzir peças de aço de baixo carbono pelo processo de forjamento e que, agora, está investindo na produção de peças automotivas de ligas de alumínio produzidas pelo mesmo processo de forjamento que a empresa já tem domínio. Você deve ajudar essa empresa a esclarecer algumas dúvidas sobre o forjamento de ligas de alumínio. As ligas de alumínio podem ser conformadas através do forjamento com características similares a um aço de baixo carbono? Os efeitos térmicos têm influência no forjamento das diversas ligas de alumínio?

Resolução da situação-problema

Sim, as ligas de alumínio podem ser fabricadas por meio do forjamento utilizando os mesmos perfis geométricos das peças de aço de baixo carbono, porém deve ser observado que, dependendo da geometria da peça, a força necessária para realizar o processo adequadamente pode ser muito diferente e ter muita variação. Essa variação depende da composição química da liga e da temperatura de forjamento. Um exemplo dessa variação pode ser demonstrado através de uma liga de alumínio ABNT 1100 que, em uma comparação com um aço ABNT SAE 1020, precisa de uma pressão de trabalho menor. Nessa mesma linha de comparação,

e utilizando a mesma geometria e peça, se tomarmos como exemplo uma liga de alumínio de alta resistência mecânica, a ABNT 7075, as pressões utilizadas em um forjamento deverão ser muito maiores. A Figura 1.10, apresentada na sequência, mostra a forjabilidade das ligas de alumínio considerando a deformação por unidade de energia absorvida versus a faixa de temperatura que o forjamento deve ser executado por liga.

Figura 1.10 | Forjabilidade das ligas de alumínio

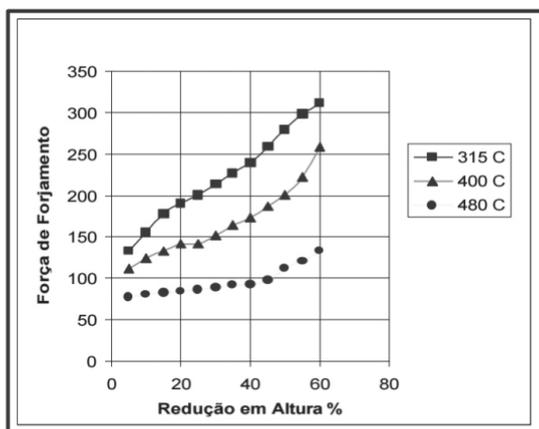


Fonte: <<https://goo.gl/kaJNuS>>. Acesso em: 2 abr. 2017.

Quanto ao efeito da temperatura na forjabilidade das ligas de alumínio, devemos observar que a resistência ao escoamento reduz muito com o aumento da temperatura, facilitando assim a deformação plástica. Vamos ver um exemplo desse efeito térmico em uma liga ABNT 6061, apresentada na Figura 1.11, que demonstra uma variação nas cargas utilizadas no forjamento em temperaturas diferentes, o que nos leva a concluir que devemos estabelecer pequenas faixas de temperatura para o forjamento para que

possamos controlar perfeitamente a força necessária durante o forjamento. Na Figura 1.12 são apresentadas as temperaturas ideais para as ligas de alumínio mais utilizadas para forjamento.

Figura 1.11 | Carga em liga de alumínio 6061 forjada em diferentes temperaturas



Fonte: <<https://goo.gl/BdJPel>>. Acesso em: 2 abr. 2017.

Figura 1.12 | Temperaturas de forjamento para ligas Al

Liga	Temperatura (°C)
1100	315 – 404
2014	418 – 460
2219	425 – 470
6061	430 – 480
7010	370 – 440
7039	380 – 440
7049	360 – 440
4032	415 – 460
5083	405 – 460
7075	380 – 440

Fonte: <<https://goo.gl/XEhJAH>>. Acesso em: 2 abr. 2017.

Faça valer a pena

1. Uma variável muito importante na conformação plástica dos metais é a temperatura, pois essa variável é determinante na formação das características do produto proveniente da conformação.

Analise as afirmações referentes às vantagens e desvantagens do trabalho a quente na conformação de metais.

I. No trabalho a quente, a estrutura do metal é refinada, de modo que sua tenacidade melhora, possibilitando que o material absorva energia durante um impacto e transforme em deformação plástica.

II. O trabalho a quente permite a obtenção de dimensões que possuam tolerâncias apertadas, além de produzir melhor acabamento superficial que se trabalharmos a frio.

III. Para um trabalho a quente, é necessário um menor esforço mecânico e, dessa forma, podem ser utilizadas máquinas de menor capacidade em relação ao trabalho a frio, considerando-se uma mesma quantidade de deformação.

IV. Em uma conformação por meio de trabalho a quente, a deformação é menos profunda, a dureza do material aumenta e a ductilidade diminui. Assinale a alternativa que apresenta as afirmações CORRETAS.

a) As afirmações I e IV apenas.

b) As afirmações I e III apenas.

c) As afirmações II e IV apenas.

d) As afirmações I, II e IV apenas.

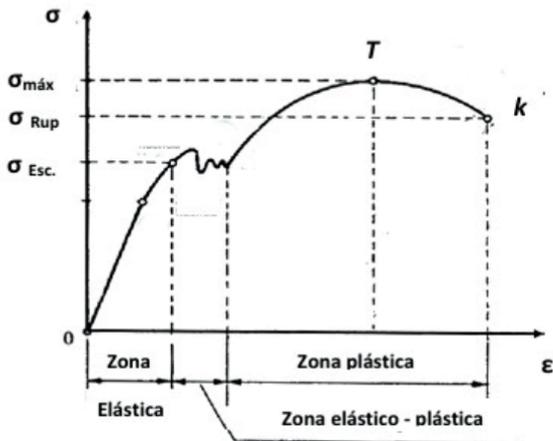
e) Todas as afirmações são corretas.

2. Um processo é conhecido como de conformação plástica quando for realizado utilizando um material no estado sólido e quando os esforços aplicados para conferir a sua modificação de forma gerarem tensões abaixo da tensão limite de resistência do material. Isso nos indica que o trabalho realizado no processo deve ocorrer dentro da região plástica do material.

O diagrama tensão x deformação ($\sigma \times \epsilon$) é utilizado para entender a região plástica do material, pois é por meio dele que enxergamos o comportamento do material quando submetido a um determinado estado de tensão.

Observe o diagrama tensão x deformação apresentado a seguir e analise as afirmações que seguem, indicando se são verdadeiras (V) ou falsas (F).

Diagrama tensão x deformação ($\sigma \times \epsilon$)



Fonte: adaptado de <<https://pt.wikipedia.org/wiki/Ficheiro:Fluencia.jpg>>. Acesso em: 26 fev. 2017.

() Os processos de conformação plástica devem ser realizados com materiais que apresentem características postadas dentro da chamada zona plástica do diagrama tensão x deformação.

() A zona elástica é representada por picos e vales. Nessa fase, ocorre o escoamento dos metais quando submetidos aos esforços.

() A zona plástica é visualizada na forma de uma curva no gráfico, e é nessa zona que ocorre a deformação plástica dos metais, ou seja, o material permanece deformado após a aplicação do esforço.

() O ponto T indicado no gráfico define a maior tensão admissível, e que é adequado aos processos de conformação plástica, enquanto o ponto K define a tensão que gera o rompimento do material.

Agora, assinale a alternativa que apresenta a sequência CORRETA de V para verdadeiro e F para falso.

- V – F – F – V.
- V – V – F – F.
- V – V – V – F.
- V – F – V – V.
- F – V – V – V.

3. No trabalho a frio também se evidenciam alguns defeitos, como o encruamento, a casca de laranja e as linhas de distensão. No quadro que segue estão apresentados esses três defeitos citados e as características que mais os evidenciam, mas fora de ordem.

Associe os vários defeitos apresentados na conformação plástica a frio com as suas características.

Defeitos apresentados na conformação a frio	Características
1 - Casca de laranja	I - Ocorrem principalmente em chapas que apresentam baixo carbono, gerando uma superfície áspera.
2 - Encruamento	II - A sua superfície apresenta um grau de rugosidade muito alto, e a falha está relacionada ao tamanho do grão do material.
3 - Linhas de distensão	III - Essa falha causará o endurecimento e o aumento da resistência do metal.

Assinale a alternativa que apresenta a associação CORRETA entre os defeitos apresentados na conformação a frio e suas respectivas características.

- a) 1 – II; 2 – I; 3 – III.
- b) 1 – I; 2 – III; 3 – II.
- c) 1 – II; 2 – III; 3 – I.
- d) 1 – III; 2 – II; 3 – I.
- e) 1 – III; 2 – I; 3 – II.

Seção 1.2

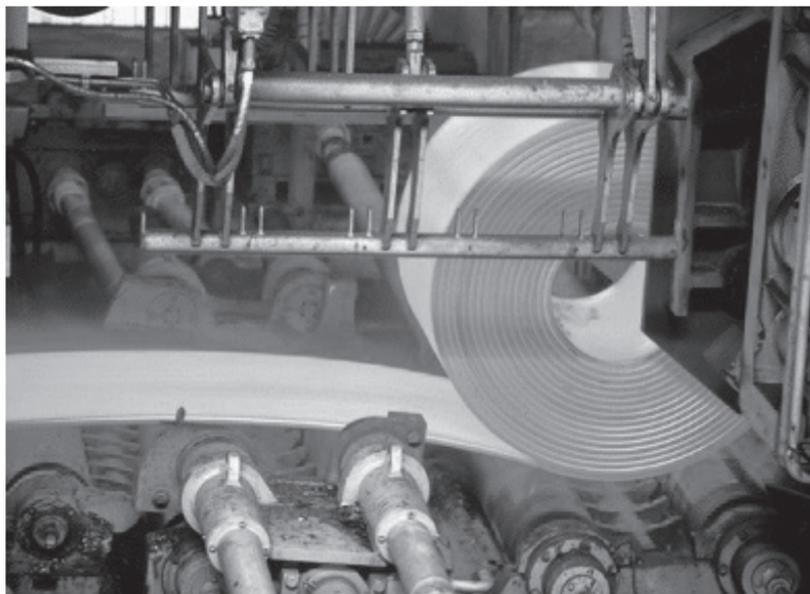
Laminação

Diálogo aberto

Esta segunda seção da primeira unidade de ensino está reservada para o aprendizado referente ao processo de conformação plástica conhecido como “laminação”. Aqui serão apresentados todos os conceitos iniciais para esse processo, as forças empregadas na laminação, os principais tipos de laminadores, as operações de laminação, além das aplicações e dos defeitos de laminação. E como será a situação-problema sobre a laminação? Vamos conhecer?

Agora, mais adaptado na LAMINA Industrial Mecânica Ltda., sua tarefa terá um grau de dificuldade um pouco maior. Você já conhece todos os processos disponíveis na fábrica e deverá definir e ajustar o processo de laminação de bobinas de chapas SAE 1015 de 0,45 mm de espessura. Sabendo-se que o produto que será produzido nesse processo — a bobina de chapa — necessita de qualidade, níveis de tolerância $\leq 0,05$ mm, acabamento e uniformidade, qual a melhor opção para processá-la: a frio ou a quente? Essa opção de processo permite obter as características mecânicas apropriadas ao uso da peça ou produto? Qual tipo de processo de laminação deve ser escolhido considerando-se o tipo e os números de rolo laminador e de cadeiras de laminação? Ao fazer essa definição, lembre-se de que vamos produzir bobinas. Você consegue apresentar um planejamento de uma linha de laminação contendo layout e a lista dos principais itens e componentes que são utilizados nesta linha de laminação? Quais são os principais cuidados a serem observados quando se planeja ou se projeta uma linha de laminadores? Durante esta seção, você aprenderá muito sobre a laminação e, então, aproveite bastante e se prepare bem para resolver a situação-problema.

Figura 1.13 | Processo de laminação

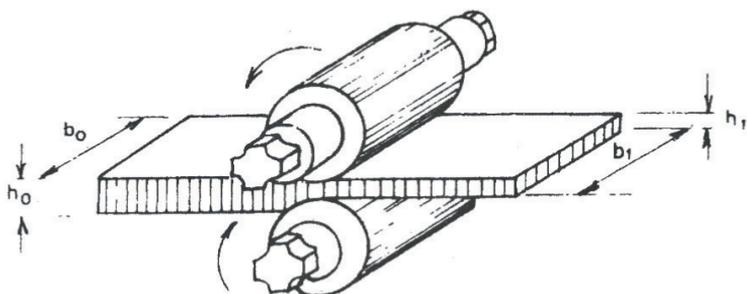


Fonte: <<http://camacam.com.br/servicos/laminacao/>>. Acesso em: 3 maio 2017.

Não pode faltar

O processo de laminação tem algumas características muito particulares. Sua definição é pautada na forma mais simples do processo, em que o metal é forçado a passar entre dois cilindros que giram em sentidos opostos, utilizando a mesma velocidade superficial e que estão dispostos com uma distância menor que a espessura da peça a ser deformada. Durante essa passagem através dos cilindros, ocorre a deformação plástica do metal, em que a espessura é reduzida e o comprimento e largura são aumentados, conforme é possível observar na Figura 1.14.

Figura 1.14 | Representação esquemática em perspectiva do processo de laminação



Fonte: Chiaverini (1986, p. 59).

Assim temos:

Redução total = diferença entre espessura inicial e a final.

$$\Delta h = h_0 - h_1$$

Alargamento total = diferença entre largura inicial e final.

$$\Delta b = b_1 - b_0$$

Alongamento total = diferença entre comprimento inicial e final.

$$\Delta l = l_1 - l_0$$

E não podemos deixar de perceber que o resultado principal da redução de espessura de metal é o seu alongamento.

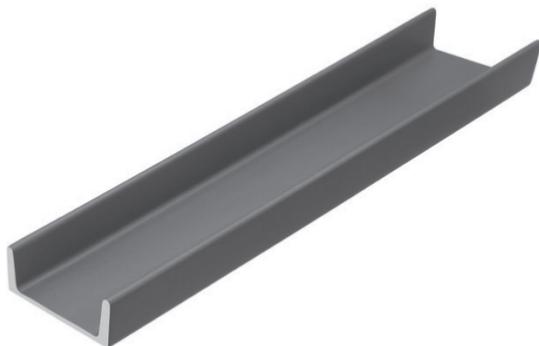
Alguns produtos e perfis obtidos pelo processo de laminação são acabados e prontos para o uso, como trilhos similares aos apresentados na Figura 1.15 e vigas, conforme a Figura 1.16.

Figura 1.15 | Trilho laminado



Fonte: <<https://pixabay.com/pt/gleise-antigos-trilhos-de-trem-1555348/>>. Acesso em: 13 mar. 2017.

Figura 1.16 | Viga U laminada



Fonte: <<http://www.ferrominas.com.br/produtos/ampliada/perfilulaminado.jpg>>. Acesso em: 14 mar. 2017.

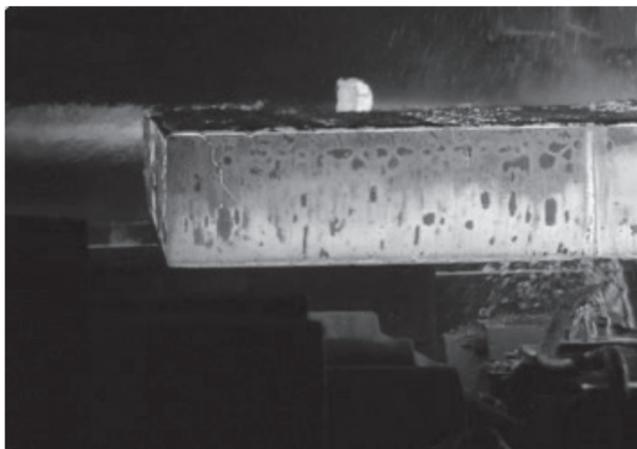
O produto intermediário que é empregado como matéria-prima em outros processos é um outro tipo de produto possível de ser fabricado através da laminação. Alguns exemplos são as chapas para estampagem profunda, conforme Figura 1.17, e tarugos para forjamento, conforme a Figura 1.18.

Figura 1.17 | Bobinas de aço



Fonte: <<https://goo.gl/NJjQiM>>. Acesso em: 14 mar. 2017.

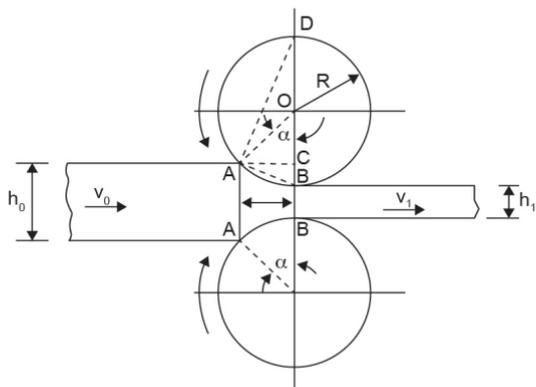
Figura 1.18 | Tarugo laminado



Fonte: <<http://camacam.com.br/wp-content/uploads/2016/04/laminacao3-1.jpg>>. Acesso em: 14 mar. 2017.

Podemos verificar, na Figura 1.19, que o contato entre cilindros e o metal em laminação se dá através do arco AB e que existe um ângulo de ataque, o α , também conhecido como ângulo de contato. A região limitada pelas seções \overline{AA} , \overline{BB} , e arco \overline{AB} formam a chamada zona de deformação e contém o volume do metal em processo de deformação.

Figura 1.19 | Zona de deformação e ângulo de contato durante a laminação



Fonte: Chiaverini (1986, p. 60).

O ângulo de contato está diretamente relacionado com a redução de espessura, $h_0 - h_1$ e ao diâmetro do cilindro laminador representado na fórmula por $2R$. Vamos conhecer a fórmula para o ângulo de contato: $\cos \alpha = 1 - \left(\frac{h_0 - h_1}{2R} \right)$.



Refleta

O que você acha? Os volumes e as velocidades antes e depois de o metal passar pelos cilindros laminadores serão os mesmos?

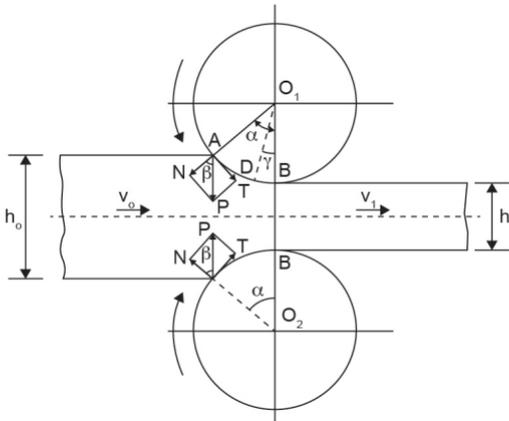
Considerando que um determinado ponto do metal passa pelos cilindros laminadores por unidade de tempo, deve-se entender que o volume antes e depois de o metal passar sempre deve ser o mesmo. Veja a representação: sabendo que b é a largura de uma placa, h é a sua espessura e v é a sua velocidade, então temos:

$$b_0 \cdot h_0 \cdot v_0 = b \cdot h \cdot v = b_1 \cdot h_1 \cdot v_1$$

Assim, para manter os volumes iguais, a velocidade de saída v_1 é maior que a velocidade de entrada v_0 .

Devemos observar também que, na zona de deformação do metal, existe um único ponto em que a velocidade periférica é nula, ou seja, a velocidade dos cilindros é igual à velocidade da placa. Esse ponto é o chamado ponto neutro ou ponto de não deslizamento, formado com o ângulo neutro α .

Figura 1.20 | Esquema de forças atuantes no momento de contato do metal com os cilindros do laminador



Fonte: Chiaverini (1986, p. 61).

Observe, na Figura 1.20, que existem duas forças principais que atuam sobre o metal, tanto na entrada, como em qualquer ponto da superfície de contato, que são a força radial N e a força tangencial de atrito. A carga de laminação P , ou força de separação, é a força que os cilindros laminadores exercem sobre o metal e o seu inverso, ou seja, a força que o metal exerce sobre os laminadores a fim de separá-los tem praticamente o mesmo valor.

Já a pressão específica de laminação é dada pela fórmula:

$$p = \frac{\text{Carga de Laminação}}{\text{Área de contato}} = \frac{P}{b.Lp}, \text{ em que } b \text{ é a largura da chapa, e } Lp \text{ é o}$$

comprimento projetado do arco de contato.

Os tipos de laminadores.



Assimile

Você sabe como são classificados os laminadores?

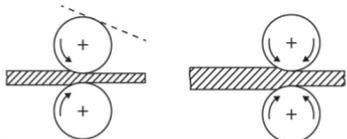
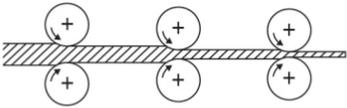
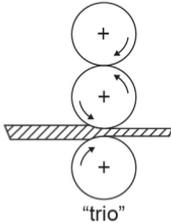
Vamos entender. Uma das classificações é realizada pela condição de trabalho, que pode ser a quente e a frio, isto é, o processo é classificado de acordo com a temperatura de trabalho do metal: se é superior ou inferior à temperatura de recristalização do metal.

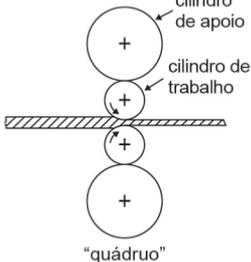
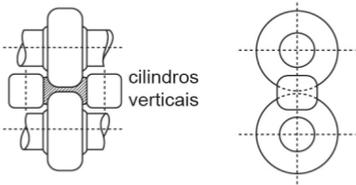
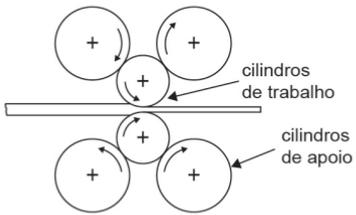
Ainda temos classificações que se encontram dentro dessas duas categorias de laminadores, quente e frio, e que geram vários tipos de classificação como: em função do produto que está sendo laminado, do número de cilindros, do seu diâmetro, da disposição das cadeiras etc.

A mais conhecida das classificações é aquela que se dá pelo número de cilindros em conjunto com a disposição desses cilindros.

Você conhece os tipos de laminadores existentes? A seguir, veremos todos os tipos.

Quadro 1.4 | Tipos de laminador

Tipo de laminador	Características
<p>Figura 1.21 Laminador duo</p>  <p>“duo” com retorno por cima</p> <p>“duo” reversível</p> <p>Fonte: Chiaverini (1986, p. 64).</p>	<p>Esse laminador possui dois cilindros com diâmetros iguais, girando em sentidos opostos, que apresentam a mesma velocidade periférica e posicionados um sobre o outro. Na modalidade duo com retorno por cima, o material sempre entra por um dos lados, assim, não existe reversão dos cilindros, e os cilindros se aproximam gradativamente. Para o modelo duo reversível, ocorre a reversão e a aproximação dos cilindros a cada passe.</p>
<p>Figura 1.22 Laminador contínuo</p>  <p>laminador contínuo</p> <p>Fonte: Chiaverini (1986, p. 64).</p>	<p>Nesse tipo de laminador, é montado um conjunto de cadeiras duo em série, ou seja, uma após a outra, de maneira que a peça sob laminação avance de forma contínua, e é laminada em vários passes, saindo após a última cadeira, totalmente acabada.</p>
<p>Figura 1.23 Laminador trio</p>  <p>“trio”</p> <p>Fonte: Chiaverini (1986, p. 64).</p>	<p>Três cilindros são dispostos um sobre o outro. O metal a ser laminado é alimentado entre o cilindro inferior e o médio, por onde passa inicialmente, sendo o seu retorno realizado entre o superior e o médio. Para realizar a mudança de posição do metal em laminação em relação aos conjuntos de cilindros, são utilizadas mesas elevatórias ou basculante.</p>

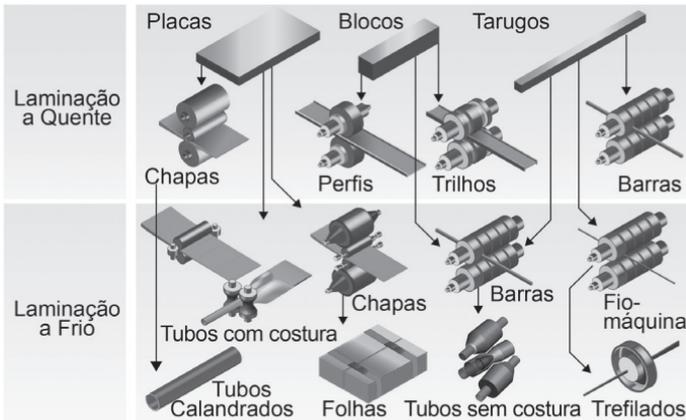
Tipo de laminador	Características
<p>Figura 1.24 Laminador quádruo</p>  <p>Fonte: Chiaverini (1986, p. 64).</p>	<p>É o conjunto de quatro cilindros montados uns sobre os outros, sendo que os dois posicionados no centro e que apresentam o diâmetro menor são os cilindros de trabalho, e os dois de diâmetro maior posicionados externamente são os de apoio ou suporte. O laminador quádruo é utilizado para laminar e relaminar chapas, tendo como vantagem a uniformidade da espessura por toda a seção transversal em função da ação dos cilindros de suporte.</p>
<p>Figura 1.25 Laminador universal</p>  <p>Fonte: Chiaverini (1986, p. 65).</p>	<p>Sua configuração apresenta um conjunto de cilindros horizontais e verticais. A figura mostra um laminador universal tipo Grey que é utilizado para fabricar perfilados pesados, como uma viga I, por exemplo. O conjunto garante as dimensões do perfilado, sendo importante a montagem dos cilindros verticais, os quais têm a função de garantir a uniformidade da seção do perfilado, no mesmo plano vertical dos cilindros horizontais.</p>
<p>Figura 1.26 Laminador Sendzimir</p>  <p>Fonte: Chiaverini (1986, p. 65).</p>	<p>Esse tipo de laminador é utilizado para obtenção de grandes reduções na espessura por meio dos cilindros menores de trabalho que são suportados por dois cilindros maiores cada um.</p>

Fonte: <<https://goo.gl/rvicQf>>. Acesso em: 3 maio 2017.



Vamos ver alguns exemplos de produtos laminados na Figura 1.27 apresentada na sequência.

Figura 1.27 | Exemplos de laminação

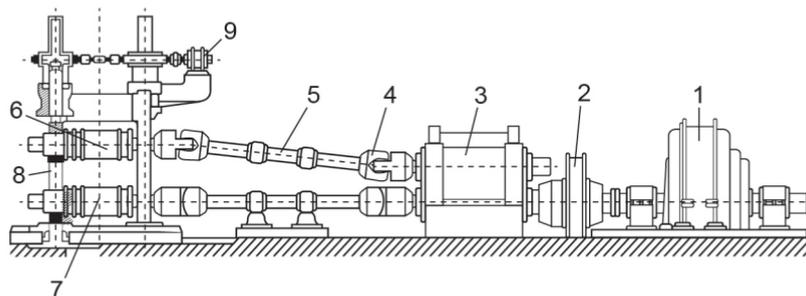


Fonte: adaptada de <<https://goo.gl/B8uWEo>>, (p. 42). Acesso em: 25 mar. 2017.

Você já conheceu o cilindro laminador, que é a principal ferramenta do laminador. Como é constituído o mecanismo de um laminador? Quais suas principais peças e componentes?

Vamos conhecer os órgãos mecânicos de um laminador? Veja a Figura 1.28, que apresenta os principais órgãos mecânicos de um laminador. Nessa figura, você pode identificar os seguintes componentes: 1 – Motor de acionamento; 2 – Embreagem; 3 – Transmissão de engrenagens (cilindros de pinhão); 4 – Acoplamento; 5 – Eixo intermediário; 6 – Cilindro Superior; 7 – Cilindro Inferior; 8 – Colunas; 9 – Motor de acionamento para ajuste do cilindro superior.

Figura 1.28 | Órgãos mecânicos de um laminador

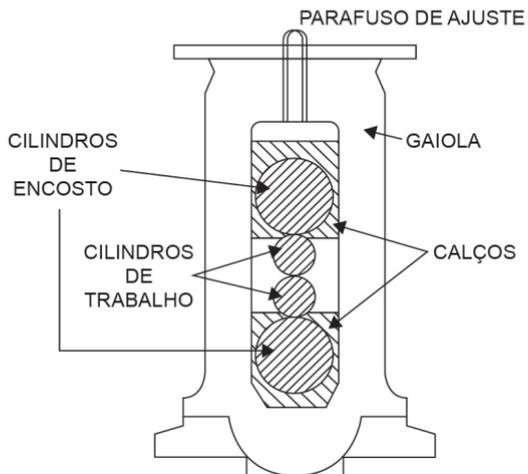


Fonte: adaptada de <<https://goo.gl/dKlFSG>> (p. 26). Acesso em: 21 mar. 2017.

O que sustenta os cilindros laminadores com seus mancais e os demais componentes e acessórios do conjunto é a cadeira de laminação, que é composta por uma estrutura metálica que são as gaiolas fabricadas em aço fundido e compostas por duas estruturas montadas a partir de peças forjadas ou fundidas.

Os cilindros de laminação são fabricados em uma peça única e produzidos por meio de outros processos de conformação mecânica, especificamente o forjamento e a fundição. O cilindro é formado pelo corpo, que é a parte central do eixo e que executa o esforço direto de deformação, podendo ser liso, para laminação de chapas e bobinas, e com reentrâncias, para perfis diversos e reduções. Outra parte é o pescoço, em que os mancais são apoiados, e nas pontas existe o trevo, que é utilizado para receber o acoplamento ou as juntas universais para rotação. Os cilindros ainda são divididos em de trabalho e de apoio, conforme a Figura 1.29. Os de trabalho sempre são compostos por duas unidades para cada cadeira e são os que possuem diâmetro menor que os cilindros de apoio. Sua manutenção e troca ocorrem com frequência devido ao desgaste gerado pelo atrito e ao calor promovido pelas altas temperaturas a que ele é submetido. O cilindro de apoio tem a função de apoiar os cilindros de trabalho e, por isso, possui diâmetro e resistência mecânica maiores. Um cilindro de apoio serve para garantir que o cilindro de trabalho não flexione, influenciando diretamente no dimensional e no acabamento da peça em laminação.

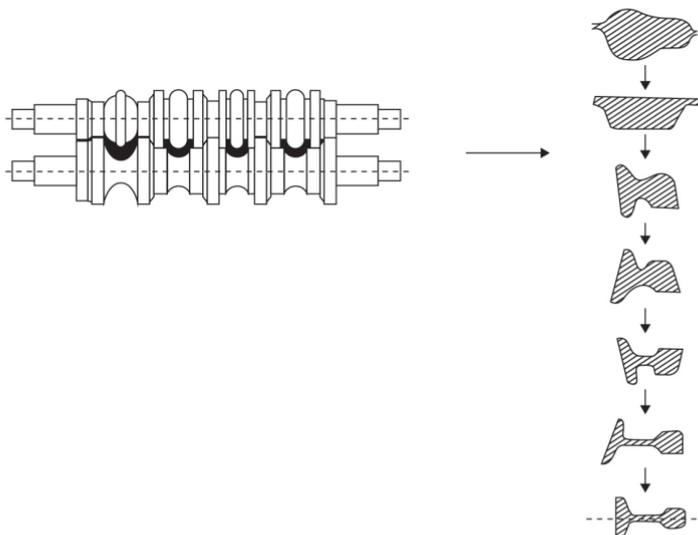
Figura 1.29 | Os cilindros de laminação



Fonte: <<http://wiki.ued.ipleiria.pt/wikiEngenharia/index.php/Laminagem>>. Acesso em: 24 mar. 2017.

Observe a sequência de operações de laminação para o perfil da Figura 1.30: são dados vários passes até que o metal chegue às medidas e à forma final.

Figura 1.30 | Laminação: perfil trilho



Fonte: adaptada de Laminação (2014, p. 15).

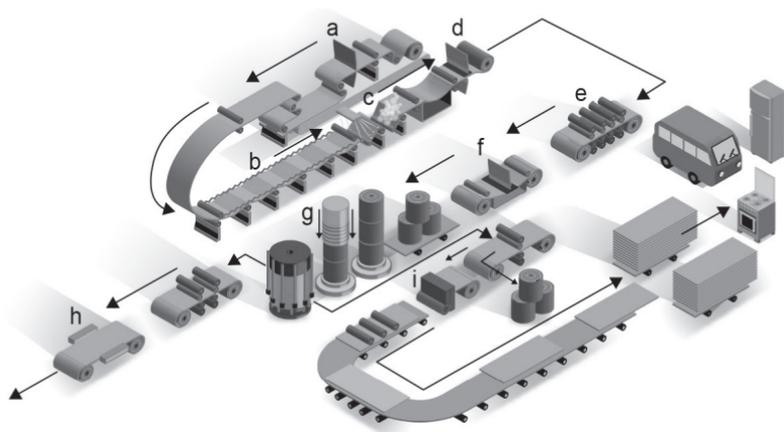
Você acha que os produtos manufaturados por meio de um processo de laminação são isentos de defeitos e falhas? A resposta é não, pois esses produtos podem apresentar alguns defeitos. Vamos conhecer algumas dessas falhas. O defeito “vazio” reduz a resistência mecânica do produto e é caracterizado por furos em determinados pontos do laminado, que normalmente surgem devido a rechupes (marcas na superfície do material) ou por gases retidos no metal-base. Outro defeito conhecido é a “trinca”, que surge devido ao uso de temperaturas inadequadas durante o processo. O defeito conhecido como “dobra” ocorre devido a reduções de espessura bruscas na laminação. As “inclusões” são, na maioria das vezes, óxidos metálicos vindos com a matéria-prima do processo de fundição e que geram marcas ou deformações nos rolos laminadores por serem mais duros que eles. Outro defeito proveniente da fundição é a “gota fria”, que é um pingo de metal solidificado na parede da lingoteira, o qual adere ao metal em vazamento, gerando o defeito posteriormente no material laminado.

Sem medo de errar

Primeiramente, vamos avaliar a situação considerando o tipo de produto a ser laminado, o qual foi definido como bobina de chapas, SAE 1015, com 0,45 mm de espessura final. Pelas características apresentadas, verificamos nossa parte teórica e concluímos que o processo deve ser realizado a frio em função do acabamento, da planeza e da espessura a serem trabalhados, pois somente esse processo é possível para uma espessura tão fina quanto a especificada. O trabalho a quente pode compor o processo, dependendo da espessura de partida utilizada. Definida essa primeira característica, devemos definir o tipo e disposição das cadeiras laminadoras. Sabendo que o produto deve ser produzido em bobinas, isso nos leva a considerar o laminador contínuo como o mais adequado. Vamos relembra como é esse laminador: é montado um conjunto de cadeiras duo em série, ou seja, uma após a outra, de maneira que a peça sob laminação avance de forma contínua, a qual é laminada em vários passes, saindo, após a última cadeira, totalmente acabada. Os conjuntos de cilindros em cada cadeira devem ser o quádruplo, gerando maior uniformidade e planeza no produto laminado. Com relação às propriedades

mecânicas, devemos observar que, como a temperatura de trabalho situa-se abaixo da temperatura de recristalização, o material da peça apresenta uma maior resistência à deformação e um aumento dessa resistência com a deformação (encruamento), não permitindo, com isso, intensidades elevadas de redução de seção transversal, dando mais um motivo para trabalhar com laminador contínuo. Uma opção de layout é apresentada na Figura 1.31 que segue, a qual mostra a laminação a frio. Lembrando que, se for necessário, deve-se incluir uma linha a quente no início.

Figura 1.31 | Diagrama: linha de produção laminação de chapas a frio



Fonte: Laminação (2014, p. 13).

No diagrama apresentado, é possível verificar as principais etapas numa linha de laminação de bobinas de chapa de aço. Vamos entender as etapas: a) Emenda das bobinas; b) Decapagem; c) Secagem; d) Corte; e) Laminação contínua a frio; f) Corte; g) Recozimento; h) Apartamento lateral e embalagem das bobinas; i) Corte transversal e montagem dos fardos.

Na preparação de um arranjo físico para uma linha de laminação, é necessário observar os seguintes itens: o posicionamento das cadeiras de laminação, assim como de todos os acessórios; o melhor local para posicionar e distribuir as cabines de controle, dos operadores e inspetores; o posicionamento dos equipamentos de resfriamento, de corte, de inspeção e de acabamento dos produtos; o planejamento de outros ambientes que completam a linha de

laminação, como a localização para os laboratórios de ensaios e de controle de qualidade dos produtos, de oficinas de manutenção de cilindros e guias, assim como as de cadeiras reservas, incluindo pré-montagem dos conjuntos, salas de automação, elétricas, as centrais de lubrificação e de manutenção; unidades de tratamento de água de processo; a localização das redes de distribuição de utilidades e insumos como de energia elétrica, gases, água e outros; o local para o estoque de matéria-prima no início da linha, dos materiais em processo, e, se for necessário, para os acabados e materiais não conforme.

Alguns objetivos devem ser observados no planejamento e projeto de um layout de uma linha de laminação, como: a adequação do processo e equipamentos para se obter segurança de todo o pessoal envolvido, seja direta ou indiretamente; reduzir ao máximo os custos de instalação, de produção e de movimentação durante o processo; a garantia de que o processo tenha flexibilidade nos momentos de mudança de *mix* de produtos e que propicie expansão da capacidade produtiva da laminação quando isso for necessário; e, finalmente, que a intercambiabilidade dos conjuntos seja prevista, gerando uma troca do programa de produção em tempos menores ou quando houver necessidade de manutenção.

Avançando na prática

Controle automatizado de um processo de laminação

Descrição da situação-problema

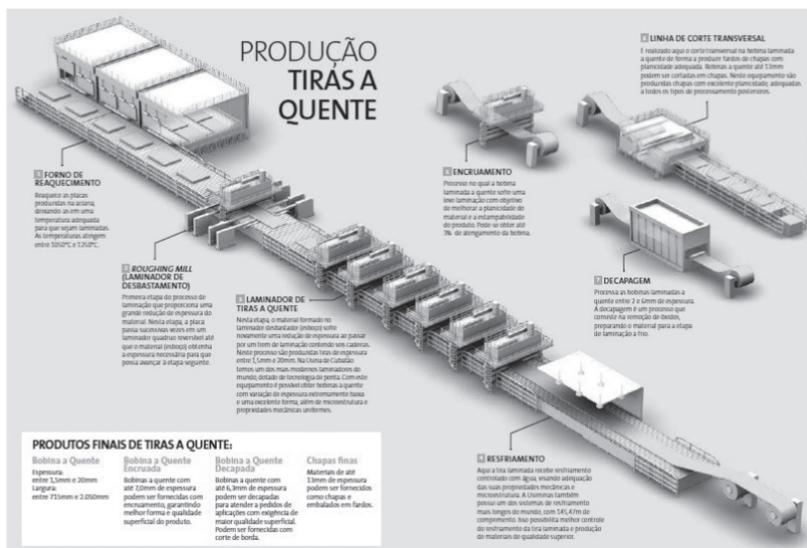
Imagine que você trabalha em um grande complexo siderúrgico que é líder no mercado de aços planos. Um dos segmentos da companhia, o de laminados – tiras a quente – produz e oferece uma ampla gama de produtos.

Em uma das suas linhas, conforme link apresentado a seguir, existe a necessidade de automatização do processo para obter um aumento da precisão da largura e espessura das chapas e placas metálicas, além de obter uma melhoria na rugosidade superficial e na planeza do produto e melhorar as propriedades mecânicas dos materiais produzidos por meio dessa laminação. É nesse ponto que você foi solicitado a atuar por meio de um estudo para entender quais características podem ter seus controles automatizados

e como esse processo pode ser automatizado. Então, surgem algumas questões que devem ser respondidas. Existe algum sistema que automatize e controle as características e variáveis do processo, por exemplo, um controle de espessura da chapa? Você consegue explicar quais são o funcionamento e os ajustes obtidos por esse tipo de sistema? Automatizar uma linha de laminação não é uma tarefa simples e fácil. Existem muitas variáveis que interferem no processo e influem na qualidade do produto final. Além disso, essas variáveis estão relacionadas umas às outras, o que aumenta o grau de dificuldade.

Segue link para pesquisa: Usiminas – Produção – Laminação tiras a quente. Disponível em: <<http://www.usiminas.com/wp-content/uploads/2013/11/us-0073-15f-cat-tiras-a-quente.pdf>> (p. 5). Acesso em: 24 mar. 2017.

Figura 1.32 | Produção: laminação de tiras a quente



Fonte: <<https://goo.gl/hhDD0D>>. Acesso em: 24 mar. 2017.

Resolução da situação-problema

Sim, a automatização e o controle das variáveis indicadas na situação-problema são possíveis de serem realizadas para manter as variáveis sob controle durante o processo, assim como melhorar a qualidade e propriedades mecânicas do produto. É bastante

comum a utilização de sensores e atuadores hoje em dia ao longo de toda a linha de laminação. Outros sistemas utilizados são os óticos, que se baseiam em câmeras digitais ou raio laser, e podem ser utilizados em laminadores de desbaste, assim como nos de acabamento, e que medem a espessura e largura do metal em laminação. As informações são registradas ao serem enviadas para computadores que geram relatórios e gráficos.

Outras características e variáveis que podem ser medidas através da automação e sistemas apropriados são: a força que os cilindros de laminação exercem sobre a tira, bem como as velocidades desses cilindros, e para os casos de laminação a quente, pode-se medir e controlar a temperatura da tira metálica. Os sensores utilizados comumente são: as células de carga, que são utilizadas para medir as forças; os tacogeradores, que medem as velocidades dos cilindros de laminação; e os pirômetros, que servem para medir as temperaturas. As informações geradas por esses sensores são transformadas em sinais elétricos e enviados aos computadores.

Nesse sistema supervisório, no qual temos um controle de malha fechada, os computadores trabalham com programas específicos, nos quais já existem as especificações de como deve funcionar uma linha de laminação. O computador compara os dados recebidos do processo com as especificações predefinidas para a linha de laminação e, se for detectado algum desvio, os atuadores são acionados para agir e prover as correções. Os principais atuadores aqui são os motores elétricos e os motores hidráulicos, que são responsáveis pela força exercida pelos cilindros de laminação sobre a tira de metal, assim como pela velocidade com que a tira metálica se desloca pela linha. E na laminação a quente, a temperatura da tira de metal também aparece como uma variável. Essa variável influencia na estrutura cristalina do metal e, assim, interfere nas propriedades mecânicas do material.

A temperatura é controlada através de medição, com a utilização de pirômetros e atuação dos aquecedores de indução.

Faça valer a pena

1. Os laminadores são classificados comumente em duas categorias: a quente e a frio. Vários outros tipos de classificação também existem, como: em função do produto que está sendo laminado, em relação ao número de cilindros, pelo seu diâmetro, pela disposição das cadeiras etc. A mais conhecida das classificações é aquela que se dá pelo número de cilindros em conjunto com a disposição deles. Avalie as afirmações a seguir, referentes aos tipos de laminadores.

- I. O laminador Sendzimir é utilizado para a obtenção de grandes reduções na espessura.
- II. O laminador contínuo apresenta um conjunto de cilindros montados na horizontal e na vertical.
- III. Em um laminador trio, o metal a ser laminado é alimentado entre o cilindro inferior e o médio, por onde passa inicialmente, sendo o seu retorno realizado entre o superior e o médio.
- IV. O laminador quádruplo é utilizado para laminar e relaminar chapas, tendo como vantagem a uniformidade da espessura por toda a seção transversal em função da ação dos cilindros de suporte.

Assinale a alternativa que apresenta as afirmações CORRETAS

- a) As afirmações II e IV são corretas.
- b) As afirmações I, II e III são corretas.
- c) As afirmações I, III e IV são corretas.
- d) As afirmações I, II e IV são corretas.
- e) Todas as afirmações são corretas.

2. Em um determinado ponto do metal que passa pelos cilindros laminadores por unidade de tempo, o volume antes e depois de o metal passar sempre deve ser o mesmo. Veja a fórmula a seguir e considere que b é a largura de uma placa, h é a sua espessura, e v é a sua velocidade.

$$b_0 \cdot h_0 \cdot v_0 = b \cdot h \cdot v = b_1 \cdot h_1 \cdot v_1$$

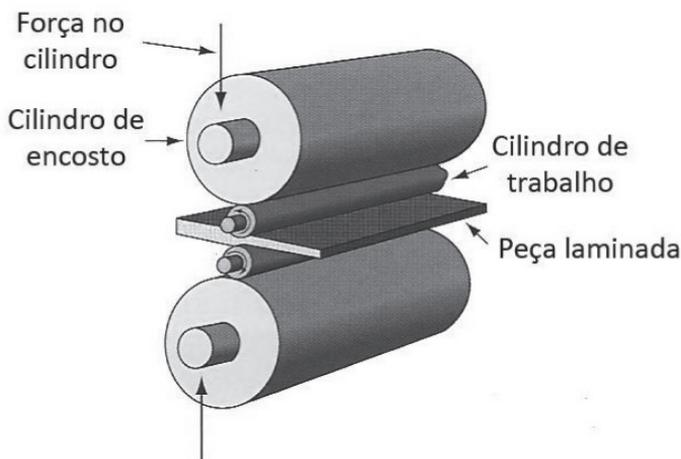
Assim, para manter os volumes iguais, a velocidade de saída v_1 é maior que a velocidade de entrada v_0 .

Sabendo que uma placa de 2 mm de espessura e 1,2 m de largura deve ser laminada até atingir 0,58 mm de espessura e 1,21 m de largura e que sua velocidade final máxima é de 1.080 m/min, pergunta-se: qual deve ser a velocidade de entrada do metal no laminador em metros por minuto?

- a) 188,5 m/min.
- b) 315,8 m/min.
- c) 565,8 m/min
- d) 845,7 m/min.
- e) 934,9 m/min.

3. Os cilindros de laminação podem ser classificados em: cilindro de trabalho e cilindro de apoio ou encosto. Veja figura a seguir.

Cilindros de laminação



Fonte: Laminação (2014, p. 6.)

A vida útil do cilindro de apoio é bem maior que os cilindros de trabalho, pois ele não está exposto a um atrito tão elevado. Já os de trabalho são mais frequentemente trocados, pois estão sujeitos a um maior desgaste por estarem em contato direto com o material a ser laminado e, portanto, mais sujeitos ao atrito e ao calor. Os dois tipos de cilindros se completam para realização de uma laminação apropriada.

Analise as duas asserções que seguem e a relação entre elas.

I. Um cilindro de apoio possui um maior diâmetro e uma resistência mecânica superior quando comparado ao cilindro de trabalho.

PORQUE

II. Sua função é apoiar os cilindros de trabalho, evitando que flexionem, o que geraria uma variação dimensional no material laminado.

Assinale a alternativa que apresenta a análise CORRETA em relação às asserções apresentadas.

- a) As duas asserções são verdadeiras, e a II justifica a I.
- b) As duas asserções são verdadeiras, porém a II não justifica a I.
- c) A asserção I é verdadeira, e a asserção II é falsa.
- d) A asserção I é falsa, e a asserção II é verdadeira.
- e) As duas asserções são falsas.

Seção 1.3

Trefilação

Diálogo aberto

Nesta terceira seção da primeira unidade de ensino, estudaremos o processo de conformação plástica conhecido como “trefilação”. Nele serão estudados os parâmetros gerais do processo, os equipamentos empregados, o processo de trefilação de tubos e dos arames de aço e os defeitos da trefilação.

A LAMINA Industrial Mecânica Ltda. está interessada agora em entrar no ramo de trabalho mecânico secundário, especificamente para produzir arames de diâmetro 1 mm. Para isso, definiu uma equipe — da qual você faz parte — para contatar um fabricante de máquinas de trefilar parceiro e conhecer e pesquisar sobre o processo, assim como fazer um levantamento prévio dos equipamentos e definir uma linha de produção para trefilação de arames.

Você é capaz de apresentar um memorial no qual constem todas as características principais e importantes numa linha de trefilação de arames? Que tipo de matéria-prima você indica para esse produto e processo? Com as informações recebidas, você consegue definir o tipo de processo que deve ser utilizado, considerando o equipamento a ser empregado e suas principais características? Quais os tipos de trefiladoras são mais comumente utilizados nessa situação? Você prevê utilizar algum tipo de lubrificante no processo? Se sim, qual o mais indicado? Numa linha de trefilação de arames existe a necessidade de processos anteriores à trefilação, como a limpeza do material? Você pode desenhar um fluxo mínimo de processos a ser utilizado?

Nesta seção, você conhecerá os parâmetros gerais do processo de trefilação, como o apresentado na Figura 1.33, os equipamentos empregados e muito mais sobre o assunto. Aproveite bem e tenha muita atenção para resolver a situação-problema.

Figura 1.33 | Processo de trefilação



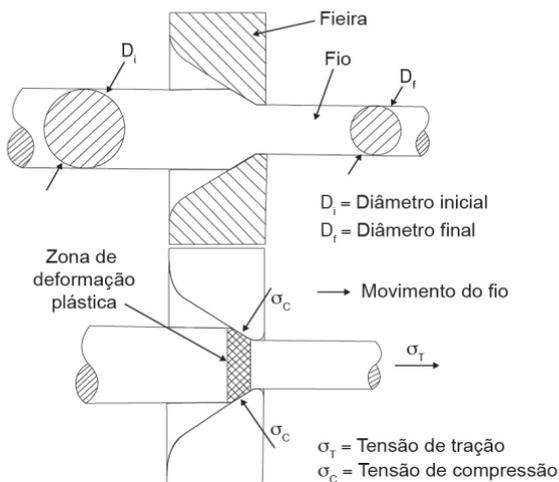
Fonte: <<https://goo.gl/fVXxNc>>. Acesso em: 3 abr. 2017.

Não pode faltar

Você conhece o processo de “trefilação”? Você acha que seria possível exercer algumas atividades rotineiras, como falar ao telefone, acender uma luz, ligar um aparelho eletroeletrônico como uma televisão ou um computador, ou ainda, fazer uso de um eletrodoméstico como uma geladeira sem a trefilação? A resposta é não, pois esse processo é único na manufatura de fios elétricos de alumínio ou cobre necessários para conseguirmos levar energia para esses equipamentos, além de fabricar cabos e arames de aço, tubos e barras.

Uma trefilação é um processo de conformação plástica no qual a matéria-prima é puxada em direção a uma matriz, também chamada de fieira ou trefila, por meio da aplicação de uma força de tração gerada no lado da saída da matriz. Essa operação é realizada a frio na maioria das vezes, excesso de espaço e o escoamento plástico do material que ocorre durante a manufatura é produzido pelas forças de compressão promovidas pela parede da matriz, que possui o formato de um funil, sobre o material em deslocamento, conforme pode ser visto na Figura 1.34, na região indicada como zona de deformação plástica. Assim, o material entra na matriz com o diâmetro inicial D_i e sai com o diâmetro final D_f .

Figura 1.34 | Matriz de trefilação



Fonte: <<https://prezi.com/rqg-cbbojg3t/trefilacao/>> (p. 7). Acesso em: 6 maio 2017.

Os principais produtos da trefilação são os arames e fios, conforme apresentado nas Figuras 1.35 e 1.36, que apresentam uma característica específica na qual a sua seção transversal é muito menor que seu comprimento, transformando esse tipo de processo em único. Outros produtos típicos da trefilação são os tubos e as barras. Assim, algumas características da trefilação são: obtenção de produtos de grande comprimento contínuo, com seções transversais pequenas que podem variar de 0,02 a 25 mm, que apresentem baixa rugosidade, podendo chegar aos últimos passes a 0,3 $\mu\text{m Ra}$, apresentando, assim, boa qualidade de superfície, além de um excelente controle dimensional que pode chegar a até centésimos de milímetros.

A matéria-prima para a trefilação de arames e fios é o fio-máquina, que é um material semiacabado, produzido pela laminação e com diâmetro máximo de 6,35 mm.

Figura 1.35 | Arame galvanizado



Fonte: <<http://fg.com.br/arames-galvanizado-mole-277mm-1kg-12-bwg/p>>. Acesso em: 3 abr. 2017.

Figura 1.36 | Fios produzidos por trefilação



Fonte: <<http://www.dedcompany.com.br/arames-fios-fitas.html>>. Acesso em: 3 abr. 2017.

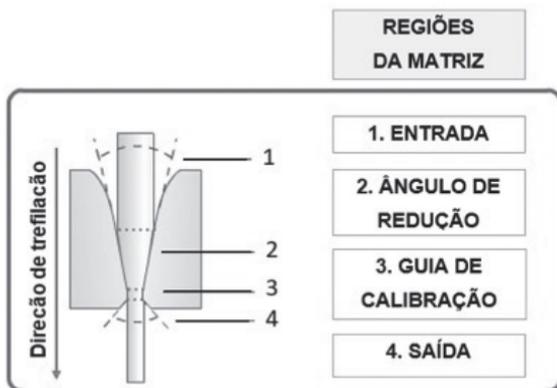
Os fios e arames produzidos pela trefilação podem ser os comuns e os especiais. Os comuns são divididos em três categorias: os grossos, que apresentam diâmetro entre 5 e 25 mm; os médios, que variam de 1,6 a 5 mm; e os finos, que têm entre 0,7 a 1,6 mm. Os especiais possuem diâmetros menores que 0,02 mm. Os tubos podem ser trefilados em diferentes formas.

Você imagina qual é a ferramenta que consegue manufaturar, com qualidade e precisão, esses produtos tão específicos? A ferramenta empregada na trefilação é a matriz, que também é bastante conhecida como fieira ou trefila. A matriz é fundamental ao processo, pois é por meio dela que se realiza a deformação do metal. O perfil interno, constituído por cones e cilindros, influencia a variação dos parâmetros de trefilação como a força necessária para deformação do metal, o atrito entre fio e matriz e o modo de

deformação. Isso porque, ao variarmos os ângulos desses cones e o campo de tolerância do diâmetro do cilindro, aumentamos ou reduzimos essas variáveis.

A matriz apresenta uma geometria, conforme pode ser verificado na Figura 1.37, que é dividida em quatro regiões: a entrada, o ângulo de abordagem ou redução, a guia de calibração ou acabamento e a saída. Uma matriz típica apresenta um furo afunilado com três regiões cônicas e uma cilíndrica. A primeira região é o cone de entrada, utilizada para direcionar o fio-máquina; a segunda região é a de redução, na qual ocorre o trabalho de deformação do metal por meio do contato entre o metal e a parede do cone dessa região da matriz, a qual possui um ângulo entre 5° e 25° ; na terceira região, que é a de calibração, ocorre o ajuste do diâmetro do fio. O comprimento da região cilíndrica é definido com base no diâmetro do fio e pode variar entre zero a duas vezes o valor do diâmetro. A última região cônica é utilizada como alívio para saída do fio-máquina e age de maneira a facilitar a saída.

Figura 1.37 | Regiões de uma matriz



Fonte: adaptada de <<https://goo.gl/Qd61dR>>. Acesso em: 6 maio 2017.

A matriz é fabricada com materiais que ofereçam grande resistência ao desgaste e ao impacto, evitando, assim, trocas frequentes. Também é preciso observar as exigências do processo, como os esforços envolvidos, as dimensões e o material a ser trefilado. Os materiais mais comuns na fabricação da matriz são o metal duro, que é o mais utilizado, o diamante ou mesmo a combinação dos dois, além dos materiais cerâmicos.



Você sabe quais são os materiais mais apropriados para construção de uma matriz? Que tal conhecer? Os materiais mais utilizados para produção das matrizes são:

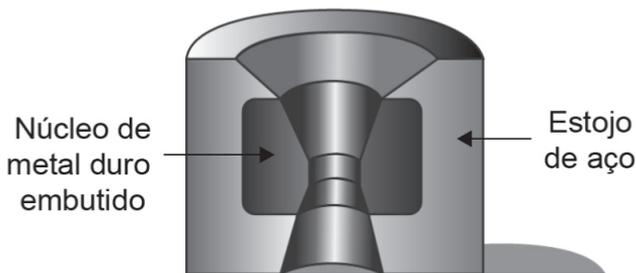
Quadro 1.5 | Materiais para construção de matriz

Material	Características.
Metal duro	Carboneto de tungstênio sinterizado aglomerado com cobalto. Apresenta elevada dureza, resistência a compressão e ao desgaste.
Aços de alto C revestidos de Cromo – Cr	Cromagem dura. Resistência ao desgaste e dureza superficial elevada.
Carbonetos sinterizados	Principalmente WC – Widia. Resistência à compressão e ao desgaste a quente. Ótimo para insertos intercambiáveis.
Aços especiais	Cr-Ni, Cr-Mo, Cr-W entre outros. Resistência à tração e à corrosão, dureza elevada.
Cerâmicos	Pós de óxidos metálicos sinterizados. Óxidos de zircônio, carbeto de titânio. Alta dureza e resistência mecânica.
Diamante	Natural ou policristalino sintético – utilizado para fios finos ou de ligas duras. Grau de dureza elevadíssimo e resistência ao desgaste.
Ferro fundido branco	C + Fe – Resistente à abrasão e dureza elevada.

Fonte: adaptado de Chiaverini (1986, p. 133).

Normalmente, a matriz é construída com o núcleo e um estojo (veja a Figura 1.38). O núcleo na forma de inserto é construído com o material apropriado à trefilação, enquanto o estojo é produzido com um aço de baixo carbono, igual ou menor a 0,3% de C, gerando uma vantagem em relação ao custo de produção.

Figura 1.38 | Detalhe construtivo de uma matriz com núcleo de metal duro



Fonte: adaptada de <<https://goo.gl/CE7P8P>>. Acesso em: 6 maio 2017.

Agora que você já conhece bem a principal ferramenta utilizada na trefilação, que tal conhecer quais são os equipamentos empregados nesse tipo de conformação?

Na trefilação, os equipamentos são definidos de acordo com os produtos a serem fabricados. São conhecidos dois grupos básicos de equipamentos de trefilação: as trefiladoras de bancada e as trefiladoras de tambor.

No trabalho com arames, as reduções proporcionadas pela matriz são dadas em função do diâmetro a ser trefilado e, geralmente, estão na faixa de 20% a 50% por passe para bitolas grossas e de 15% a 25% por passe para bitolas de arames finos. Vamos então conhecer um pouco mais sobre cada um desses grupos de trefiladoras.

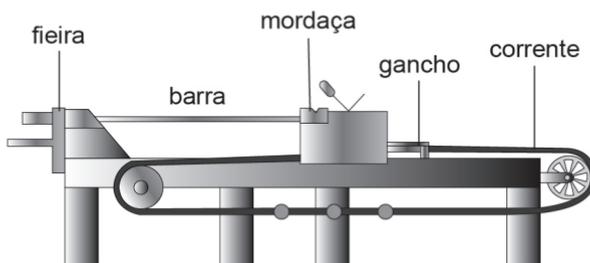
Como é uma trefiladora de bancada? Como esse equipamento funciona?

Uma trefiladora de bancada deve ser utilizada para produzir peças não bobináveis, como barras e tubos, cujo comprimento final é definido e limitado. As forças de tração utilizadas nos bancos de estiramento podem ser superiores a 100 toneladas, e as velocidades empregadas possuem um amplo campo, podendo variar de 10 a 100 metros por minuto nas trefiladoras de bancada.

Esses equipamentos são constituídos, como pode ser visto na Figura 1.39, por algumas partes principais: estrutura, fieira (matriz), mordaza, gancho e corrente sem-fim. Para alimentar o equipamento com o fio-máquina, é necessário construir uma ponta no início material, o que pode ser feito através de uma operação de forjamento rotativo ou por usinagem. Ela é utilizada para passar

o fio-máquina através do orifício da matriz, que é fixado nas garras de tração ou mordça existentes no banco de estiramento e tracionado quando um mecanismo hidráulico ou mecânico existente é acionado. Nesse momento, o carro que fixa a mordça inicia um deslocamento linear através de barramentos ou trilhos, no sentido oposto à matriz, tracionando o fio-máquina em direção a essa matriz e, assim, forçando a passagem do metal através do orifício da matriz, gerando sua redução e, automaticamente, o produto acabado.

Figura 1.39 | Bancada de trefilação



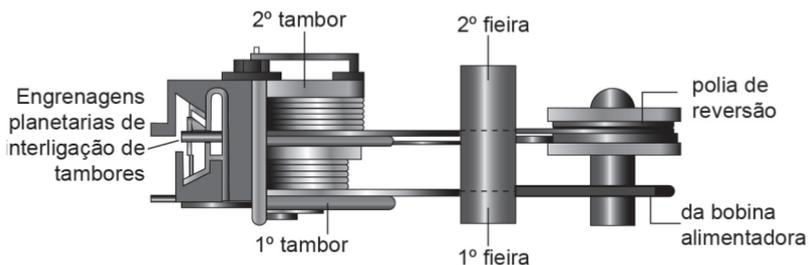
Fonte: <<https://goo.gl/4nBCgh>>. Acesso em: 6 maio 2017.

E as trefiladoras de tambor, como são constituídas? Como funcionam? Vamos conhecê-las?

As trefiladoras de tambor são utilizadas para os produtos bobináveis, cujo grupo é composto por fios e arames. As forças de tração utilizadas nos bancos de estiramento também podem ser superiores a 100 toneladas, e as velocidades empregadas possuem um amplo campo, podendo variar de 9 a 1.500 metros por minuto.

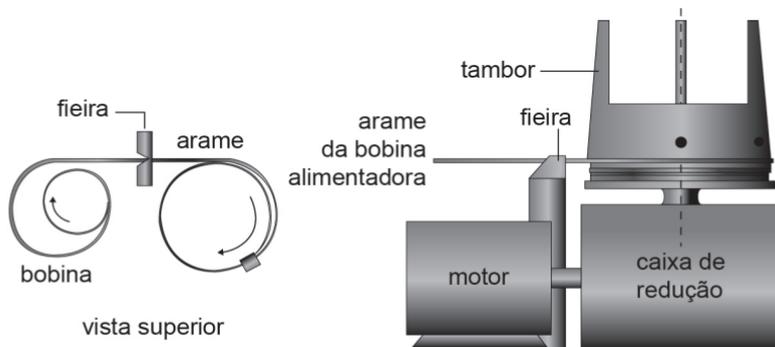
As trefiladoras de tambor são classificadas em três grupos distintos: a simples, que possui apenas um tambor e é utilizada para trefilar arames grossos; a dupla, que serve para trefilar arames médios; e as múltiplas ou contínuas, que manufaturam arames médios e finos. Veja esses três grupos de trefiladoras nas Figuras 1.40, 1.41, 1.42 e 1.43.

Figura 1.40 – Trefiladora de tambor simples



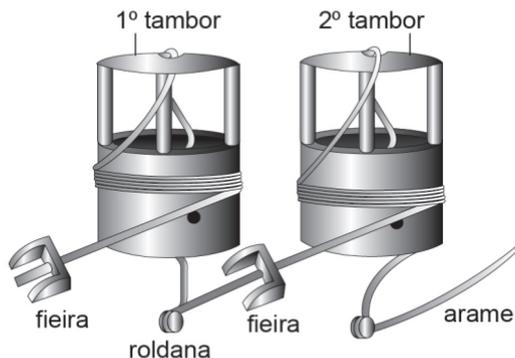
Fonte: <http://www.uff.br/ief/index.php?pagina=conformacao_trf_equipamentos>. Acesso em: 6 maio 2017.

Figura 1.41 | Trefiladora de tambor dupla



Fonte: <http://www.uff.br/ief/index.php?pagina=conformacao_trf_equipamentos>. Acesso em: 6 maio 2017.

Figura 1.42 | Trefiladora de tambor múltipla



Fonte: <<https://goo.gl/5GmY6X>>. Acesso em: 6 maio 2017.

Figura 1.43 | Trefiladora tambor múltipla



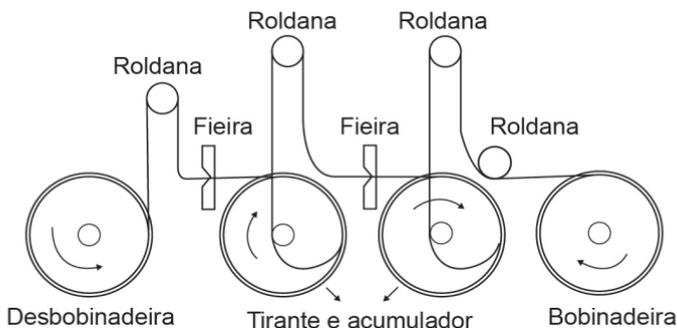
Fonte: <<http://jw-burton.com/profile/customizing/214801/0>>. Acesso em: 6 maio 2017.

No processo de trefilação em que são utilizadas as trefiladoras de tambor, as máquinas são tipicamente rotativas. Dependendo do seu grupo, elas podem operar de forma simples ou por meio de vários conjuntos de fieira e matriz, como é o caso da múltipla. Ainda sobre esse grupo de trefiladoras, existem máquinas de trefilar sem e com deslizamento, conforme apresentado nas Figuras 1.44 e 1.45 respectivamente. Na máquina sem deslizamento, o fio é tracionado através do orifício da fieira com a utilização de um anel tirante, também conhecido como tambor, que inicialmente acumula o fio trefilado e só então libera o seu movimento em direção à próxima fieira, daí o termo sem deslizamento, conforme se pode ver na Figura 1.44.

Já na máquina com deslizamento, o fio-máquina que parte de uma desbobinadeira é alinhado em uma roldana e se desloca à primeira fieira. Ao sair dessa fieira, o fio recebe o tracionamento proveniente de um anel tirante, ou tambor, e dá algumas voltas em formato de hélice nesse anel, lembrando que o passo utilizado equivale ao diâmetro do fio e que deve existir um alinhamento do início da hélice com a primeira fieira e do fim da hélice com a segunda fieira. O segundo anel, que gira com uma velocidade maior que o primeiro devido ao aumento do comprimento do fio-máquina obtido no processo, trabalha para que o fio passe

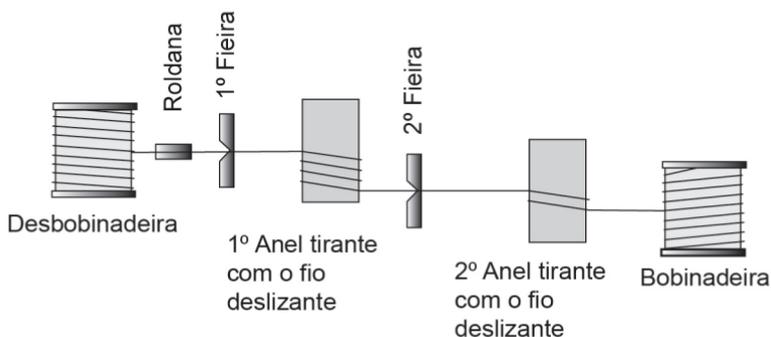
pela segunda fieira, observando-se as mesmas características citadas quanto ao primeiro conjunto de fieira-anel tirante. Para outros conjuntos postados em série no processo de trefilação, as características citadas deverão se repetir.

Figura 1.44 | Máquina de trefilar sem deslizamento com duas fieiras



Fonte: Kiminami (2013, p. 91).

Figura 1.45 | Máquina de trefilar com deslizamento com duas fieiras



Fonte: Kiminami (2013, p. 92).

Você acredita que, em um processo de trefilação, é necessária a lubrificação do fio-máquina? A resposta é sim, pois a lubrificação tem a finalidade de reduzir o atrito existente entre o fio-máquina e o cone de redução e, assim, facilitar a passagem do fio-máquina através da matriz. O ângulo de entrada da matriz também tem como finalidade facilitar a lubrificação e a passagem do metal. O

fio-máquina deve ser inicialmente decapado em solução de ácido sulfúrico (H₂SO₄) ou ácido muriático (HCl) para que qualquer sujeira seja eliminada, como impurezas inorgânicas e camadas formadas por óxidos na superfície do material, e para que a lubrificação possa aderir melhor no metal. Em uma produção de fios de aço, na maioria das vezes, deve-se revestir o material de partida com cal, que tem a função de absorvente e fixador do lubrificante no estiramento, quando for realizado a seco, e como neutralizador dos ácidos procedentes da decapagem. Outros lubrificantes que podem ser utilizados no fio-máquina, além da cal, são o fosfato, o bórax (um mineral alcalino derivado da mistura de um sal hidratado de sódio e ácido bórico) ou a combinação deles. Já na matriz de trefilação são utilizados graxa, óleo ou sabão.

Quadro 1.6 | Tipos de lubrificantes utilizados no processo de trefilação

Tipo de processo de estiramento	Lubrificante utilizado
Processo a seco	Graxa ou pó de sabão
Processo úmido	O fio é submerso em um fluido lubrificante especial ou numa solução alcalina de sabão.
Para estiramento úmido de fio de aço	Revestimento fino superficial de cobre ou estanho.
Quando se estira cobre	Não se usa revestimento superficial.

Fonte: adaptado de: Chiaverini (1986, p. 133).



Exemplificando

Nesta seção, você conheceu muitos detalhes sobre o processo de trefilação, com essas características utilizadas na manufatura de arames, fios e cabos. Vamos ver um exemplo de linha de produção de arame de aço?

Figura 1.46 | Etapas da trefilação de arame de aço



Fonte: adaptado de: <<https://goo.gl/7A5Q5A>>. Acesso em: 9 abr. 2017.

A trefilação de arames de aço, conforme pode ser visto na Figura 1.46, deve partir do fio-máquina, que é um vergalhão laminado a quente. Esse material deve passar por uma decapagem para remoção de carepas, que pode ser mecânica, na qual o fio é dobrado e escovado, ou química, utilizando composto de ácido clorídrico (HCl) ou ácido sulfúrico (H₂SO₄). Na sequência, o material deve ser lavado em água corrente e recoberto pelo método de imersão em leite de cal Ca(OH)₂ a uma temperatura de 100 °C. A função desse recobrimento é a de neutralizar resíduos de ácidos, ser suporte para a lubrificação e proteger a superfície do metal. A secagem, que é a próxima etapa, deve ser realizada em uma estufa e serve para eliminar o gás hidrogênico (H₂) que está na superfície do material. Finalmente, chegamos à trefilação propriamente dita, que deve, inicialmente, ser realizada a seco e, nos passes seguintes, poderá ser recoberta de estanho (Sn) ou cobre (Cu). Conforme o fio vai reduzindo seu diâmetro, a trefilação deverá ser úmida com a utilização de um lubrificante líquido.

Vamos entender agora um pouco sobre a trefilação de tubos sem costura. Existem quatro tipos de trefilação de tubos que são: sem apoio interno, também conhecido pelos nomes de rebaixamento ou afundamento; com mandril passante; com bucha interna; e com bucha flutuante, todas apresentadas nas Figuras 1.47 a 1.50 disponíveis a seguir. Na trefilação utilizando mandril ou bucha, a grande parte da deformação ocorre na redução de espessura da parede do metal, permitindo produzir tubos com paredes mais finas e com diâmetros menores. Normalmente, esse processo é realizado posteriormente a um processo de laminação não plana utilizando mandril e serve para dar acabamento, finalizar as dimensões e melhorar a microestrutura do metal.

Figura 1.47 | Trefilação tubo sem suporte interno (rebaixamento)

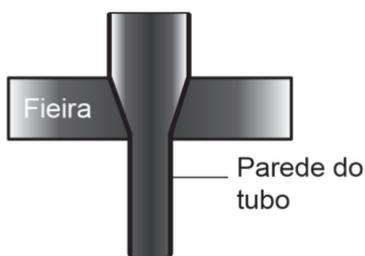


Figura 1.48 | Trefilação tubo com bucha fixa

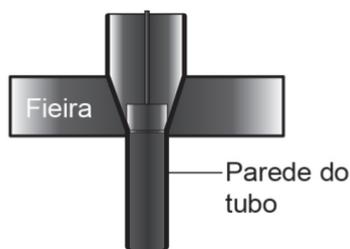


Figura 1.49 | Trefilação tubo com bucha flutuante

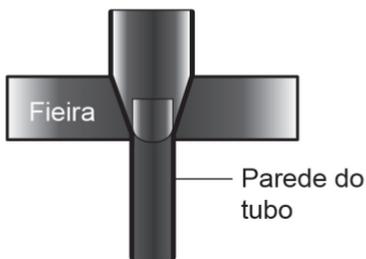
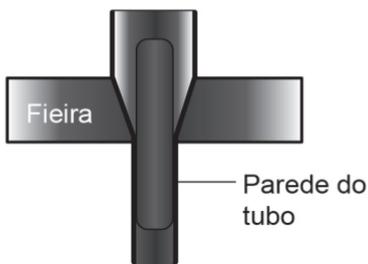


Figura 1.50 | Trefilação tubo com mandril passante



Fonte: <<https://goo.gl/9R21ZK>>. Acesso em: 6 maio 2017.

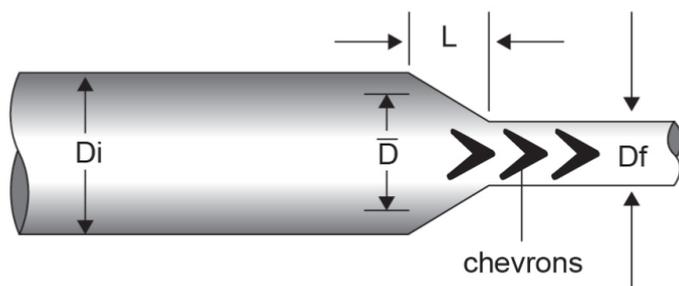


Você já aprendeu sobre a trefilação de tubos e sobre os quatro tipos existentes. Por que existem esses quatro tipos de trefilação de tubos? Quais as diferenças marcantes entre eles? Quais as vantagens de cada tipo? Existe alguma diferença entre os produtos produzidos por cada tipo? Pesquise mais sobre o assunto e tente responder a essas perguntas.

A trefilação pode produzir produtos com defeitos? Como todo tipo de processo, a trefilação também pode apresentar defeitos, e alguns parâmetros devem ser controlados para evitá-los, como qualidade do material, redução entre passes, velocidade, lubrificação e limpeza periódica da matriz. Vamos ver quais são: fratura irregular com estrangulamento, fratura com risco lateral, fratura com trinca aberta, marcas em forma de “v” (também conhecidas como *chevrons*), diâmetro irregular e fratura irregular.

A **fratura irregular com estrangulamento** ocorre devido a esforço em excesso por má lubrificação ou por redução executada em excesso. A **fratura com risco lateral** ao redor da marca de inclusão ocorre devido a uma partícula muito dura impregnada no metal de partida. A **fratura com trinca aberta** em duas partes ocorre devido a trincas provenientes do processo inicial de laminação. As **marcas em forma de “v” (*chevrons*)** ocorrem por várias razões, como por haver reduções grandes e a inclusão de partículas duras estranhas ao metal. O **diâmetro irregular** ocorre em função de partículas duras que impregnam na matriz e depois se soltam com a evolução do processo. A **fratura irregular** forma cones e é gerada por redução pequena ou ângulo de redução demasiadamente grande.

Figura 1.51 | Defeito devido à trefilação: formação de trinca central



Fonte: <<https://goo.gl/LLUuwm>>. Acesso em: 9 abr. 2017.



Pesquise mais

Para entender melhor o processo de trefilação, assista a alguns filmes indicados a seguir.

TORRES, Roberto. Linha de trefilação multipasses para produção de arames de aços BTC, MTC e ATC. Disponível em: <<https://www.youtube.com/watch?v=bXpmoWMN-ZQ>>. Acesso em: 9 abr. 2017.

MARKETING Digital. Máquina para fabricação de arames CA-60. Disponível em: <<https://www.youtube.com/watch?v=49lv0kYm-cA>>. Acesso em: 9 abr. 2017.

POLY. Trefila bifilar para fio de cobre. Disponível em: <<https://www.youtube.com/watch?v=A7iJFf1Lmtg>>. Acesso em: 9 abr. 2017.

Sem medo de errar

Nesta seção, a LAMINA Industrial Mecânica Ltda. está interessada em entrar no ramo de trabalho mecânico secundário, especificamente para produzir arames de diâmetro 1 mm, e definiu uma equipe, da qual você faz parte, para contatar um fabricante de máquinas de trefilar que é parceiro e conhecer e pesquisar sobre o processo, assim como fazer um levantamento prévio dos equipamentos e a definição de uma linha de produção para trefilação de arames. Assim, será necessário apresentar um

memorial no qual constem todas as características principais e importantes numa linha de trefilação de arames, definir a matéria-prima adequada, definir o tipo de processo e o tipo de trefiladora que devem ser utilizados, avaliar a necessidade de utilizar algum tipo de lubrificante no processo e desenhar um fluxo mínimo de processos a ser utilizado.

Existem muitos sites de fabricantes, importadores e distribuidores de máquinas e equipamentos de trefilação. A seguir estão alguns links:

- Niehoff-Herborn Máquinas Ltda. Disponível em: <<http://www.niehoff.com.br/>>. Acesso em: 9 abr. 2017.
- Reichenbach Equipamentos Indústria e Comércio Ltda. Disponível em: <<http://www.reichenbach.com.br/Default.asp>>. Acesso em: 9 abr. 2017.

Para uma linha de trefilação de arames, podemos utilizar aço carbono de baixo e médio carbono, como os materiais SAE 1006, 1010, 1015, 1020, 1030 e 1045, sempre que a sua aplicação for de menor responsabilidade e quando não for necessário o tratamento térmico posterior. Assim, esse tipo de material é utilizado no estado encruado ou no estado recozido, quando submetidos a uma normalização ou recozimento após trefilação. Há de se destacar também que os aços de baixo carbono utilizados para arames, quando recozidos, têm propriedades mecânicas mais uniformes e são mais indicados para conformação mais profunda. A porcentagem de redução na trefilação é compatível com as propriedades mecânicas obtidas por esses materiais. Um aço de alto carbono, que varia entre 0,6 e 1% C, deve ser utilizado para corda ou fio de piano ou de música; para cabos utilizados em serviço pesado e tirantes em que a responsabilidade de trabalho é alta.

Para definir inicialmente o equipamento, devemos verificar o tipo de material. Assim, para arames, que possuem a característica de serem produtos com longos comprimentos bobináveis, devemos fazer a opção pela trefiladora de tambor. Com ou sem deslocamento? Nesse caso, devemos verificar o diâmetro do fio a trefilar, o qual, para essa situação-problema, é de 1 mm, ou seja, é considerado fino. Para os fios de pequeno diâmetro ou que estão no grupo finos, com variação de 0,7 a 1,6 mm, devemos utilizar a máquina de trefilar com deslizamento.

A matriz a ser utilizada deve ser de metal duro, porque oferece elevada dureza, resistência à compressão e ao desgaste e é apta ao diâmetro de 1 mm. Outra opção seria de diamante, porém, devido ao custo, devemos optar pelo metal duro. Quanto à lubrificação, devemos prever que o fio-máquina deve ser inicialmente decapado em solução de ácido sulfúrico ou ácido muriático para que qualquer sujeira seja eliminada, como impurezas inorgânicas e oxidações, e para que a lubrificação possa aderir melhor no metal. A lubrificação deve ser do tipo em que o fio é submerso em um fluido lubrificante especial.

Quanto ao processo, podemos realizar da forma como aprendemos na teoria. Veja:

Figura 1.54 | Etapas da trefilação de arame de aço



Fonte: adaptada de: <<https://goo.gl/kod6sT>>. Acesso em: 9 abr. 2017.

A trefilação de arames de aço, conforme pode ser visto na Figura 1.54, deve partir do fio-máquina, que é um vergalhão laminado a quente. Esse material deve passar por uma decapagem para remoção de carepas, que pode ser mecânica, na qual o fio é dobrado e escovado, ou química, utilizando composto de ácido clorídrico (HCl) ou ácido sulfúrico (H_2SO_4). Na sequência, o material deve ser lavado em água corrente e recoberto pelo método de imersão em leite de cal ($Ca(OH)_2$) a uma temperatura de 100 °C. A

função desse recobrimento é a de neutralizar resíduos de ácidos, ser suporte para a lubrificação e proteger a superfície do metal. A secagem, que é a próxima etapa, deve ser realizada em uma estufa e serve para eliminar o gás hidrogênico (H_2) que está na superfície do material. Finalmente, chegamos à trefilação propriamente dita, que deve, inicialmente, ser realizada a seco e, nos passes seguintes, poderá ser recoberta de estanho (Sn) ou cobre (Cu). Conforme o fio vai reduzindo seu diâmetro, a trefilação deverá ser úmida com a utilização de um lubrificante líquido.

Avançando na prática

As características de barras trefiladas

Descrição da situação-problema

Observe os dados apresentados no Quadro 1.7, que se refere a algumas características mecânicas para barras de aço laminadas a quente e barras de aço trefiladas a frio. Podemos observar que os valores da dureza e das tensões (tração e compressão) indicadas para as barras de aço trefiladas a frio são sempre maiores do que as barras laminadas. Analise todas essas informações e responda: você consegue explicar por que esses valores são maiores para produtos obtidos por trefilação e o que gera esse fato? Existe alguma vantagem de utilizar um material trefilado em função condição?

O quadro completo pode ser acessada através do link:

ARCELOR MITTAL. Guia do aço. 2013. Disponível em: <<http://brasil.arcelormittal.com.br/pdf/quem-somos/guia-aco.pdf>>. Acesso em: 7 maio 2017.

Quadro 1.7 | Propriedades mecânicas estimadas de barras de aço laminadas a quente e trefiladas

SAE/AISI	Processamento	LR (Mpa)	LE(M-pa)	A (2*)%	Z (%)	HB
1006	Laminado	300	170	30	55	86
	Trefilado	330	280	20	45	95
1015	Laminado	340	190	28	50	101
	Trefilado	390	320	18	40	111
1025	Laminado	400	220	25	50	116
	Trefilado	440	370	15	40	126
1030	Laminado	470	260	20	42	137
	Trefilado	520	440	12	35	149
1045	Laminado	570	310	16	40	163
	Trefilado	630	530	12	35	179

LR = Limite de resistência.
LE = Limite de escoamento.
A (2*)% = Alongamento.

Z (%) = Redução em área.
HB = Dureza Brinell.

Fonte: adaptado de: <<https://goo.gl/zjXtue>> (p. 60). Acesso em: 7 maio 2017.

Resolução da situação-problema

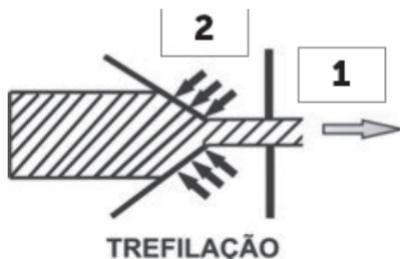
Um material processado por trefilação a frio tem um aumento da resistência mecânica por encruamento (limite de escoamento e limite de resistência) que gera uma perda de ductilidade, distorções internas e tensões residuais. Em muitas ocasiões, é necessário fazer um tratamento para alívio de tensões no material. O valor ou grau de encruamento está ligado diretamente ao grau de redução por passe de trefilação executado, ou seja, quanto maior a redução, maior o encruamento obtido. Assim, uma boa saída é aumentar o número de passes e trabalhar com menores reduções.

Essa condição de encruado é desejável quando for necessário aumentar a resistência mecânica, tornar o material mais adequado para tratamentos térmicos posteriores devido à sua microestrutura e, em conjunto com um bom acabamento, pode aumentar a vida do produto em relação à fadiga.

Faça valer a pena

1. Sabemos que uma trefilação é um processo de conformação plástica no qual a matéria-prima é puxada em direção a uma matriz. Nesse tipo de processo, são envolvidas forças e tensões, com uma que envolve a execução do trabalho de deslocamento do material e outra que é ligada diretamente ao processo de deformação do metal. Veja a figura a seguir.

Forças e tensões



Fonte: adaptada de <<https://goo.gl/GwuNZc>>. Acesso em: 8 abr. 2017.

Quais são as forças envolvidas na trefilação, respectivamente, para trabalho (representado na figura pelo número 1) e deformação (representada na figura pelo número 2)?

- a) 1 - Compressão e 2 - Tração.
- b) 1 - Tração e 2 - Compressão.
- c) 1 - Tração e 2 - Cisalhamento.
- d) 1 - Compressão e 2 - Flexão.
- e) 1 - Torção e 2 - Tração.

2. Os principais produtos da trefilação são: arames, fios, tubos e barras. Os equipamentos são definidos de acordo com os produtos a serem fabricados. São conhecidos dois grupos básicos de equipamentos de trefilação: as trefiladoras de bancada e as trefiladoras de tambor.

Analisar as características apresentadas a seguir e indique se são características ligadas ao processo de trefilação, assinalando V para verdadeiro ou F para falso.

- () Obtenção de produtos de grande comprimento contínuo.
- () Produção de produtos com seções transversais médias e grandes.
- () O processo permite obtenção de boa qualidade de superfície.
- () É possível um excelente controle dimensional do produto obtido no processo.

() A matéria-prima utilizada para trefilar arames e fios são as barras de até meia polegada de diâmetro e seis metros de comprimento.

Assinale a alternativa que apresenta a sequência CORRETA para V (verdadeiro) ou F (falso).

- a) F – V – V – V – F.
- b) V – F – F – V – F.
- c) V – F – V – V – F.
- d) V – F – V – F – V.
- e) F – V – V – V – V.

3. No processo de trefilação em que são utilizadas as trefiladoras de tambor, as máquinas são tipicamente rotativas. Dependendo do seu grupo, elas podem operar de forma simples ou por meio de vários conjuntos de fieira e matriz, como é o caso da múltipla. Ainda sobre esse grupo de trefiladoras, existem máquinas de trefilar sem e com deslizamento.

Sobre a máquina com deslizamento, avalie as etapas que o fio-máquina percorre ao longo do processo, as quais estão descritas a seguir, e ordene-as de modo que o processo seja realizado adequadamente.

1	O fio-máquina é alinhado em uma roldana.
2	O fio-máquina recebe o tracionamento proveniente de um anel tirante.
3	O segundo anel trabalha para que o fio passe pela segunda fieira.
4	O fio-máquina passa pela desbobinadeira.
5	O fio-máquina dá algumas voltas em formato de hélice no anel tirante.
6	O fio-máquina passa pela primeira fieira.
7	O ciclo se repete para os demais conjuntos de matrizes e anel tirante.

Agora, assinale a alternativa que apresenta a ordem CORRETA das etapas que o fio-máquina percorre ao longo do processo quando é utilizada uma máquina com deslizamento.

- a) 4 – 1 – 6 – 3 – 2 – 7 – 5.
- b) 7 – 2 – 1 – 3 – 4 – 6 – 5.
- c) 6 – 2 – 5 – 4 – 1 – 3 – 7.
- d) 1 – 4 – 2 – 6 – 3 – 5 – 7.
- e) 4 – 1 – 6 – 2 – 5 – 3 – 7.

Referências

ARCELOR MITTAL. **Guia do aço**. 2013. Disponível em: <<http://brasil.arcelormittal.com.br/pdf/quem-somos/guia-aco.pdf>>. Acesso em: 7 maio 2017.

CALLISTER JR., William D. **Ciência e engenharia de materiais**: uma introdução. 7. ed. São Paulo: LTC, 2008.

CHIAVERINI, Vicente. **Tecnologia mecânica**: processos de fabricação e tratamento. Volume II. 2. ed. São Paulo: McGraw-Hill, 1986.

COLPAERT, Hubertus. **Metalografia dos produtos siderúrgicos comuns**. 4. ed. São Paulo: Blucher, 2008.

GERDAU AÇOS FINOS PIRATINI. Manual de aços. Disponível em: <http://www.feis.unesp.br/Home/departamentos/engenhariamecanica/maprotec/catalogo_acos_gerdau.pdf>. Acesso em: 3 jul. 2017.

HELMAN, Horacio; CETLIN, Paulo Roberto. **Fundamentos da conformação mecânica dos metais**. 2. ed. São Paulo: Artliber, 2005.

KIMINAMI, Claudio S; CASTRO, Walman B.; OLIVEIRA, Marcelo F. **Introdução aos processos de fabricação de produtos metálicos**. São Paulo: Blucher, 2013.

LAMINAÇÃO. Instituto Federal de Santa Catarina. Disponível em: <<http://joinville.ifsc.edu.br/~anael.krelling/Tecnologia%20em%20Mecatr%C3%B4nica/PFB64/3%20-%20Laminacao.pdf>>. Acesso em: 3 jul. 2017.

MARKETING Digital. **Máquina para fabricação de arames CA-60**. Disponível em: <<https://www.youtube.com/watch?v=49lv0kYm-cA>>. Acesso em: 9 abr. 2017.

POLY. **Trefila bifilar para fio de cobre**. Disponível em: <<https://www.youtube.com/watch?v=A7iJFf1Lmtg>>. Acesso em: 9 abr. 2017.

SCHAEFFER, Lirio. **Conformação mecânica**. São Paulo: Imprensa Livre, 1999.

SOUZA, Sérgio Augusto de. **Ensaaios mecânicos de materiais metálicos**: fundamentos teóricos e práticos. 5. ed. São Paulo: Blucher, 1982.

TORRES, Roberto. **Linha de trefilação multipasses para produção de arames de aços BTC, MTC e ATC**. Disponível em: <<https://www.youtube.com/watch?v=bXpmoWMN-ZQ>>. Acesso em: 9 abr. 2017.

Forjamento e processos correlatos

Convite ao estudo

Nesta segunda unidade de ensino, você conhecerá o processo de conformação plástica, conhecido como forjamento. Você estudará as principais características do forjamento, que é o processo de conformação de metais mais antigo que se conhece. Estudará também sobre a operação e os equipamentos necessários para executar o processo, assim como sobre as forças atuantes nesse processo de deformação. Outro ponto que você conhecerá e estudará são os tipos de processo de forjamento existentes e suas características, a saber: forjamento por prensagem, forjamento livre e forjamento em matriz. Outro ponto a ser estudado são as matrizes para forjamento e as principais características a serem consideradas em um projeto das matrizes. Serão abordados, também, a contração do metal, os canais de rebarbas e o material das matrizes. As principais características dos processos correlatos ao forjamento, como a recalagem, o forjamento rotativo e o forjamento em cilindros igualmente serão conhecidas e estudadas.

Você já conhece o desafio que terá nesta unidade em relação às situações-problema? Ainda não? Então, vamos conhecê-lo.

Bem, nesta unidade você trabalhará na indústria metalúrgica FORJAFORTE Ltda., que é uma indústria de pequeno porte do setor metal-mecânico e autopeças. Você é um engenheiro de processos júnior e atua rotineiramente em várias atividades da área de processos e produção. As tarefas que você deverá executar nessa indústria estão voltadas ao processo de forjamento e suas variações. A primeira tarefa será atuar na

produção por forjamento de um grande eixo que será utilizado para fabricar um rolo laminador. A segunda tarefa será executar o planejamento para produzir a peça castelo metálico, que é a parte sextavada em metal que compõe a vela de ignição, utilizando o processo de forjamento. E a terceira tarefa será definir uma folha de processo que registre adequadamente todo o processo de recalagem utilizado para produzir a peça chamada de corpo de uma pinça. Em todas essas atividades, será inclusa a análise de cálculos referente às matrizes de forjamento definidas ao processo.

Com certeza surgirão perguntas durante o transcorrer dos trabalhos, tais como: qual tipo de processo você utilizará para confecção de cada uma das peças estudadas durante a unidade? Você consegue definir a prensa a ser utilizada para prensagem de cada item analisado e que utilizará o processo de forjamento? É necessário algum tipo de cálculo para definição da prensa? A capacidade da prensa é um ponto importante a se definir? Como você planeja produzir cada uma das peças utilizando o processo de forja? Você consegue definir as principais características de ferramental, máquina e peça?

“A coisa mais indispensável a um homem é reconhecer o uso que deve fazer do seu próprio conhecimento”. Platão – Filósofo grego da antiguidade.

Bons estudos!

Seção 2.1

Forjamento – principais conceitos

Diálogo aberto

Os assuntos a serem estudados nesta seção são referentes aos conceitos e às características iniciais dos processos de forjamento. Os tipos de processos de forjamento e suas características, as forças atuantes na deformação, os tipos de produtos produzidos e os equipamentos utilizados também serão objetos de estudo. Assim, você vai conhecer e estudar sobre os processos de forjamento que são: prensagem, forjamento livre e forjamento em matriz.

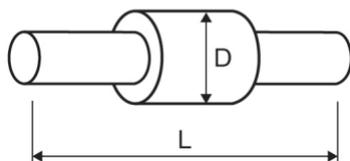
A indústria metalúrgica FORJAFORTE Ltda. é uma indústria de pequeno porte do setor metal-mecânico e autopeças e você faz parte da equipe atuando como engenheiro de processos júnior. A FORJAFORTE está trabalhando nas especificações de uma nova peça para um cliente do ramo metal-mecânico a ser produzida por meio do processo de forjamento. Trata-se de um grande eixo que será utilizado para fabricar um rolo laminador, como o apresentado na figura que segue.

Figura 2.1 | Rolo para laminação a frio



Fonte: <<https://goo.gl/3tDUXg>>. Acesso em: 12 fev. 2017.

Figura 2.2 | Material forjado para rolo laminador



Fonte: <<https://goo.gl/q8r3kn>>. Acesso em: 22 fev. 2017.

A peça será fornecida pré-acabada, e a operação será realizada pelo processo de prensagem e finalizada no próprio cliente. Sendo assim, o acabamento final e as estrias da ponta do eixo serão feitos por outros processos que não são estudados nesta disciplina e com os quais não devemos nos preocupar neste momento. Você, que está trabalhando na empresa há apenas três meses, foi incumbido de planejar tudo que for necessário para que a peça seja realizada com a qualidade e as especificações exigidas. O diâmetro a ser processado é o diâmetro maior do eixo cuja medida acabada é de 650 mm e o material: Liga 40Cr3MoV. Você consegue definir o equipamento a ser utilizado para prensagem do eixo e para o processo de forjamento? Você consegue definir qual a melhor sequência operacional para executar o forjamento. A capacidade da prensa é um ponto importante a se definir?

As perguntas apresentadas e outras tantas poderão ser respondidas com os estudos desta seção.

Assim, que tal irmos logo aos estudos?

Não pode faltar

O forjamento é um processo de conformação plástica que trabalha com esforço de compressão exercido sobre um material dúctil com a finalidade de lhe dar forma, o que pode acontecer através de uma ferramenta de trabalho com um perfil definido e o uso da prensagem, ou simplesmente por um martelo.

O forjamento é o processo de conformação plástica mais antigo que se tem conhecimento, iniciado com o trabalho dos ferreiros de forma braçal que utilizavam martelos e bigornas para produzir a deformação do metal, isso há séculos antes de Cristo,

conforme pode ser visto na Figura 2.3, que mostra um trabalhador em atividade nos anos de 1500 d. C. Depois, o processo foi mecanizado por meio do uso de máquinas - ferramentas - desde o início da Revolução Industrial.

Figura 2.3 | Forjador em atividade no período de 1500 d.C.



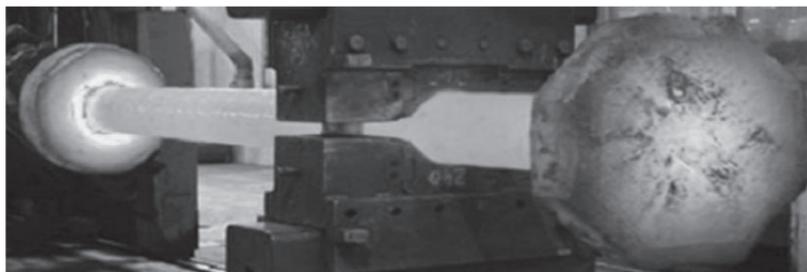
Fonte: <<https://goo.gl/ZhNb31>>. Acesso em: 7 jul. 2017.

Nos dias atuais, existem muitos tipos de máquinas para forjamento e que podem produzir peças com perfis e tamanhos diversos. Os processos mecânicos utilizados são executados pelo martelamento, com a utilização de martelos de forja ou martelos de queda, ou ainda pela prensagem, com a utilização de prensas. O martelo de forja ou o de queda trabalham com golpes sucessivos e rápidos sobre o material, deformando principalmente as camadas superficiais, sendo que a maior intensidade de pressão ocorre quando o martelo golpeia e toca o material em forjamento e vai reduzindo de intensidade a medida que ocorre a absorção da energia pela deformação do metal. As prensas trabalham com

a aplicação de compressão contínua e com baixa velocidade, deformando, assim, com mais intensidade as camadas internas e profundas do material, sendo que a máxima pressão obtida ocorre um pouco antes da retirada e alívio da pressão.

Uma operação de forjamento pode ser realizada a quente, como apresentado na Figura 2.4 para produção de grandes peças, como eixos de navios, turbinas, rotores de turbina, rolo laminador, asas de avião, virabrequins e anéis, ou a frio para produzir peças pequenas, como parafusos, pregos, alfinetes, engrenagens, porcas.

Figura 2.4 | Forja aberta a quente



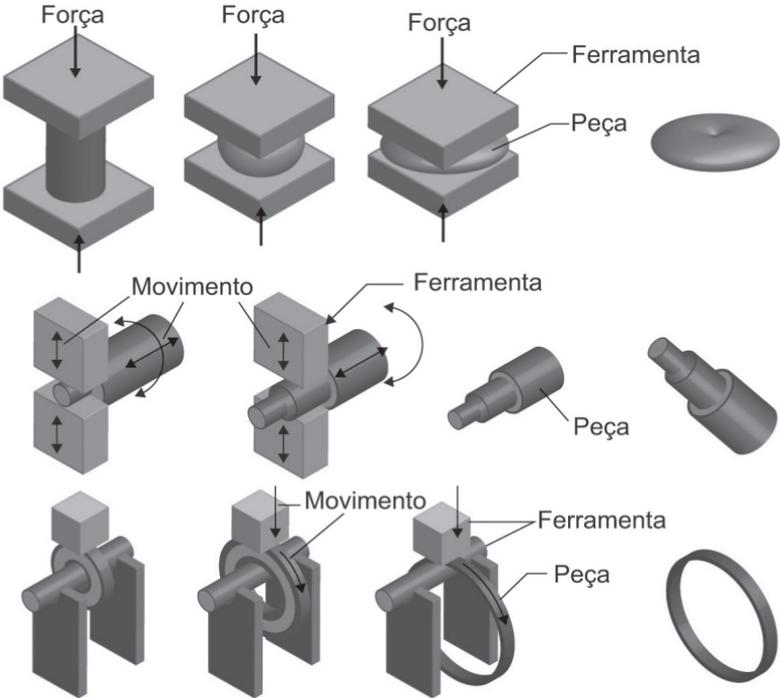
Fonte: <<https://goo.gl/tcbsDg>>. Acesso em: 7 jul. 2017.

O processo de conformação por forjamento apresenta algumas etapas que devem ser seguidas, iniciando com o corte do material, o aquecimento, uma pré-conformação utilizando normalmente o forjamento em matriz aberta ou livre, o forjamento em matriz fechada que pode ocorrer em várias etapas, a rebarbação e o acabamento.

O forjamento é classificado em algumas categorias. Vamos conhecê-las? No forjamento em matriz aberta ou livre, o esforço para deformação do metal se dá quando são aplicados golpes com o uso de matrizes abertas de maneira repetitiva. Algumas das características para esse tipo de processo estão nas matrizes que são simples, planas e não se tocam no final de curso, conforme pode ser observado na Figura 2.5, além do fato de o maquinário empregado descer por queda livre ou por acionamento de um sistema pneumático. Essa categoria de forjamento é utilizada para produzir os produtos de grande porte, podendo ser acabados ou não, e que possuam perfis simples, como os eixos de grande porte, já citados, serão utilizados em turbinas para navios ou como

rolos laminadores, ganchos, âncoras e ferramentas agrícolas, além de dar forma a peças que serão acabadas em outros processos de forjamento mais complexos, como em matrizes fechadas.

Figura 2.5 | Operações de forjamento em matriz aberta ou livre

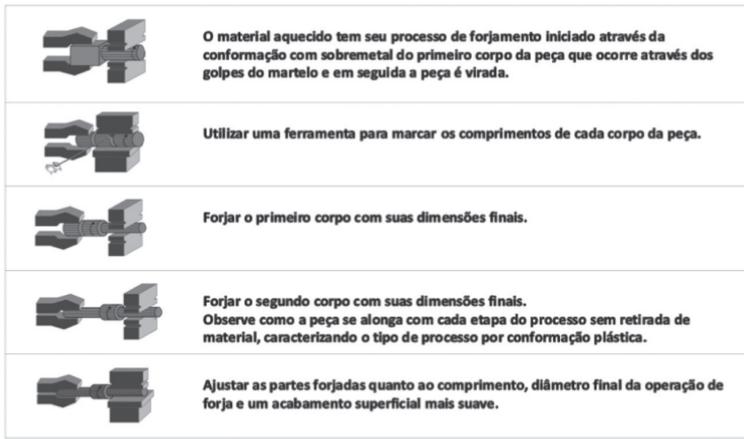


Fonte: Kiminami, Castro e Oliveira (2013, p. 81).



A Figura 2.6 a seguir apresenta um exemplo para uma sequência de operação de um processo de forjamento utilizando o tipo matriz aberta ou livre.

Figura 2.6 | Forjamento de um eixo em matriz aberta ou livre



Fonte: adaptada de: <<https://goo.gl/6SaZSp>>. Acesso em: 25 abr. 2017.

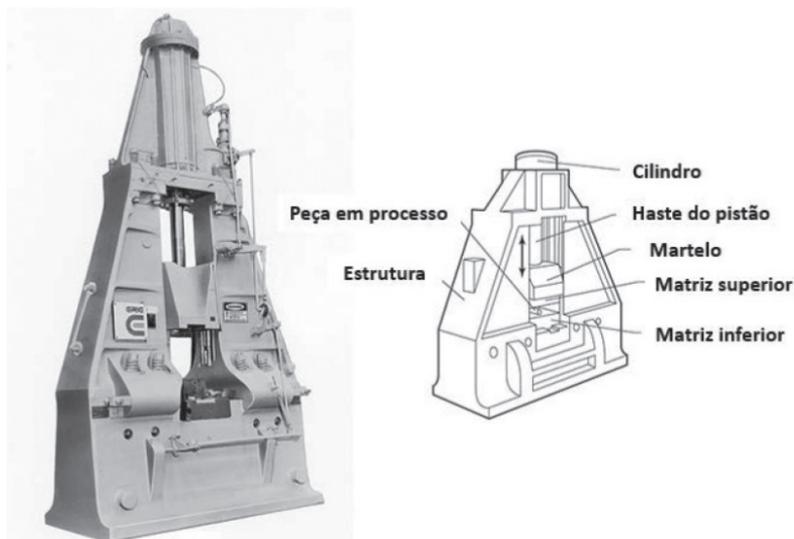
Na categoria de forjamento em matriz fechada, a conformação se dá pela prensagem do material em uma matriz que possui dois lados: o superior, que é fixo no martelo da prensa e desce quando a máquina é acionada; e o inferior, que fica fixo na mesa ou bigorna da máquina. A matriz deve ser construída de acordo com o perfil da peça que será produzida, devendo, assim, apresentar cavidades de acordo com o projeto da peça. A conformação total das peças ocorre com o fechamento ou semifechamento da matriz, momento em que se atingem as maiores pressões desse tipo de processo.

Mais detalhes sobre as matrizes de forjamento e seus projetos serão vistos mais adiante, na Seção 2.2.

Quanto aos equipamentos empregados, vamos conhecê-los? O martelo de forja, conforme apresentado na Figura 2.7, atua sobre a superfície do material através de golpes de alto impacto que são rapidamente repetidos, normalmente entre 60 a 150

golpes por minuto (gpm), por meio de um ciclo sobe-desce do conjunto martelo-matriz superior, e toda a deformação é produto da dissipação de energia cinética do martelo quando ele cai livremente. A massa do martelo pode variar de 200 a 3.500 kg, e a altura existente nos equipamentos pode variar de 1 m a 3,5 m.

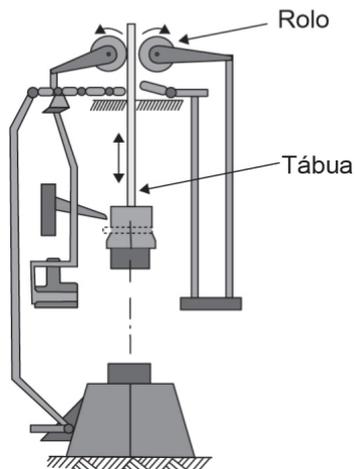
Figura 2.7 | Martelo de forja



Fonte: adaptada de: <<https://goo.gl/rCWzH1>>. Acesso em: 7 jul. 2017.

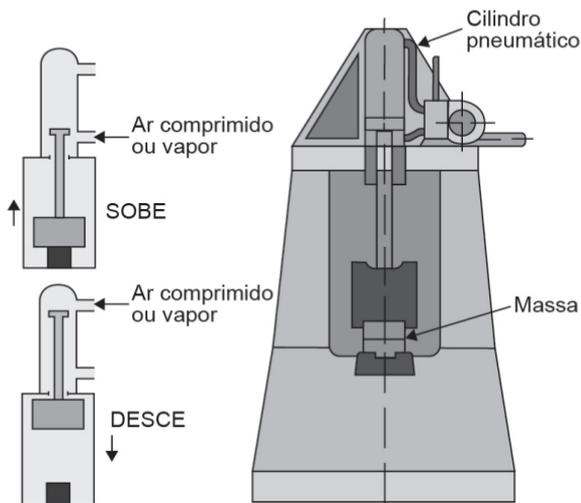
O movimento e acionamento do martelo se dá por fricção com uso de tábuas, conforme pode ser visto na Figura 2.8, ou por meio de sistema pneumático, de acordo com Figura 2.9. O equipamento por fricção tem uma capacidade de trabalho em relação ao peso de peças fabricadas de até no máximo 50 kg, enquanto que, para os acionados por ar comprimido, esses valores são superiores.

Figura 2.8 | Martelo com tábua



Fonte: <<https://goo.gl/d9Vz6o>>. Acesso em: 23 abr. 2017.

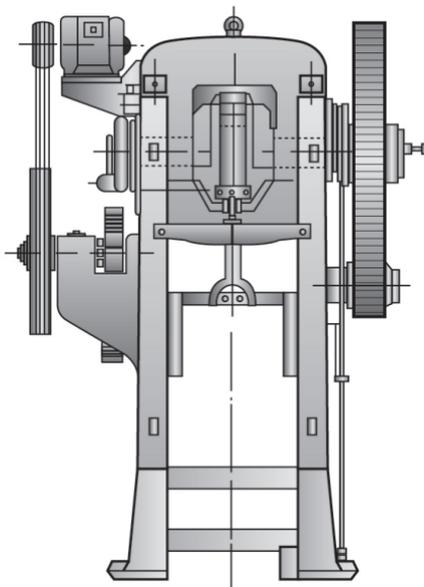
Figura 2.9 | Martelo pneumático



Fonte: <<https://goo.gl/d9Vz6o>>. Acesso em: 23 abr. 2017.

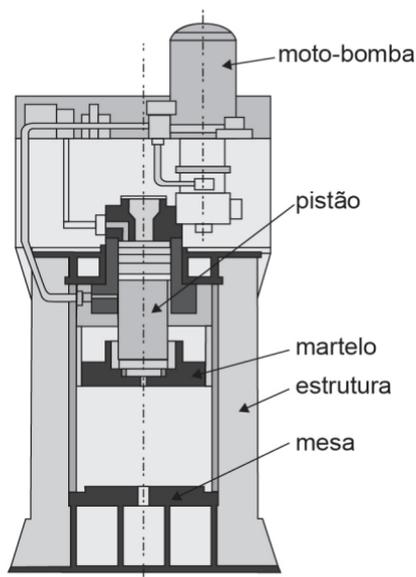
Já a prensa trabalha com deslocamento lento e contínuo, comprimindo o material com evolução de pressão durante a deformação, ou seja, com aumento gradual, o que gera uma deformação mais profunda das camadas de deformação. Essas prensas podem ter acionamento mecânico ou hidráulico, sendo que suas cargas admissíveis são de 100 a 8.000 t e 300 a 50.000 t respectivamente. Prensas mecânicas, como a apresentada na Figura 2.10 são acionadas por excêntricos, apresentando curso limitado ou ainda por fricção. Já as prensas hidráulicas, conforme a Figura 2.11, são acionadas por pistões hidráulicos e, normalmente, possuem grande curso. Assim, quando comparamos o curso entre esses dois modelos de prensa, verificamos que as prensas hidráulicas possuem cursos maiores em relação às prensas excêntricas.

Figura 2.10 | Prensa mecânica



Fonte: <<https://goo.gl/RCS0Bt>>. Acesso em: 7 jul. 2017.

Figura 2.11 | Prensa hidráulica



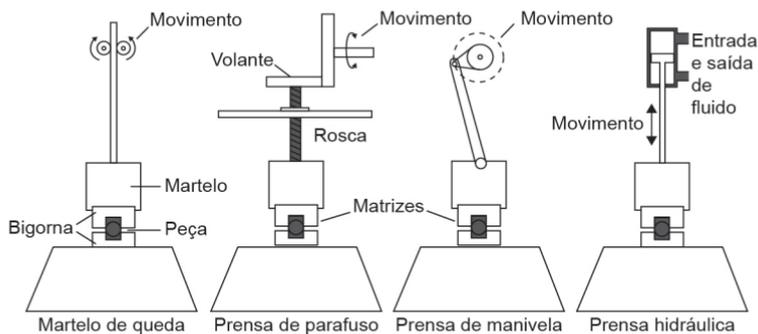
Fonte: <<https://goo.gl/VW7VoK>>. Acesso em: 23 abr. 2017.



Refleta

Veja, na Figura 2.12, algumas ilustrações esquemáticas dos equipamentos utilizados para o forjamento.

Figura 2.12 | Equipamentos de forjamento



Fonte: <<https://goo.gl/VW7VoK>>. Acesso em: 23 abr. 2017.

Pesquise um pouco sobre cada modelo de prensa apresentado e responda: qual dos modelos apresentados apresenta maior capacidade em relação à força de trabalho? Qual dos modelos deve ser utilizado quando se trabalha com matriz aberta? E para matriz fechada? Quais os tamanhos e pesos das peças que podem ser fabricados em cada modelo? Qual desses modelos de máquina é mais caro e necessita de mais investimento? Qual modelo pode apresentar os custos de manutenção mais altos?

O cálculo do esforço de forjamento, apresentado na Figura 2.13, é o P que é dado por:

$$P = P_m \times (a \times b)$$

$$P_m = \sigma_0 \times \left(1 + \frac{\mu b}{2h}\right)$$

Em que:

P é o esforço ou a pressão de forjamento necessário para deformar a peça.

P_m é a carga média agindo sobre a interface metal/matriz.

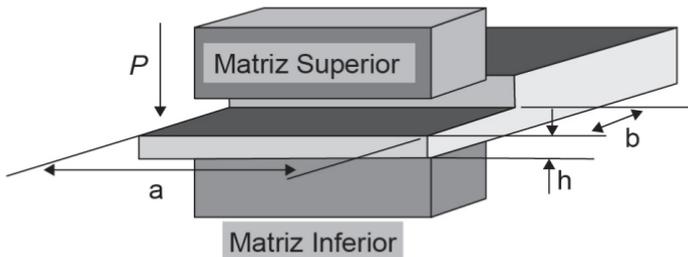
O produto $(a \times b)$ é a área afetada pela pressão P exercida pelas matrizes.

σ_0 é a tensão média de escoamento do material forjado.

μ é o coeficiente de atrito entre as interfaces de forjamento.

h é a espessura final da peça.

Figura 2.13 | Esquema representativo do esforço de forjamento



Quadro 2.1 | Trabalho máximo por tipo de martelo.

Quanto ao trabalho máximo (T)		
Martelos de queda livre	Martelos de dupla ação	Martelos de contragolpe
É transmitido pelo sistema cadente.	Se dá pela somatória da energia fornecida pelo peso da massa cadente e de uma força F gerada por intermédio de um acionamento pneumático ou hidráulico que aumenta a velocidade da massa. A força do cilindro pode ser até vinte vezes o peso da massa cadente.	Utiliza duas massas que trabalham com a mesma velocidade e se chocam no meio do percurso. Os acionamentos se dão da seguinte forma: a massa superior por meio de um sistema de pistão cilíndrico, e a massa inferior, que é menor que a superior em 5% do peso, é acionada através do movimento da massa superior através de cabos.
$T = Q \times H$	$T = (Q + F) \times H.$	$T = (F + Q_1 + Q_2) \times H.$
Em que: T = trabalho fornecido pelo sistema cadente em J. Q = peso do sistema cadente em N ou Kgf. H = altura máxima da queda em metros.	Em que: F = força de um cilindro com acionamento pneumático ou hidráulico.	Em que: Q1 = o peso da massa superior Q2 = o peso da massa inferior.

Fonte: adaptada de: Bresciani (1997, p. 79-80).



Assimile

Você sabe como chegamos à fórmula para o cálculo do trabalho fornecido pelo sistema cadente? Vamos entender? Veja como deduzir a fórmula utilizada para martelo de queda livre e o de dupla ação.

$$T = \frac{m \times (V)^2}{2} = \frac{(Q \times V)}{2g}$$

$$V = 2 \times g \times H$$

$$T = \frac{(Q \times 2 \times g \times H)}{2 \times g}$$

$$T = Q \times H$$

e

$$T = \frac{m \times V^2}{2} =$$

$$V = 2 \times (g + a) \times H$$

$$a = \frac{F}{m} \quad e \quad m = \frac{Q}{g}$$

$$V = 2 \times g \times H \times \left[1 + \frac{F}{Q} \right]$$

$$T = \frac{m}{2} \times 2 \times g \times H \times \left[1 + \frac{F}{Q} \right] = (Q + F) \times H.$$

Em que:

m = massa do sistema cadente (kg)

V = velocidade do instante do impacto (m/s)

g = aceleração da gravidade (m/s²)

F = força exercida pelo pistão à massa cadente para imprimir uma maior aceleração à massa (N)

a = aceleração provocada pela força F (m/s²)

Quanto às velocidades mais comuns em máquinas de forjamento, podemos utilizar as apresentadas na Quadro 2.2 disponível a seguir:

Quadro 2.2 | Faixa de velocidades para as máquinas de forjamento

Máquinas	Faixas de velocidades (m/s)
Martelo de queda livre	3,6 a 4,8
Martelo de dupla ação	3,0 a 9,0
Prensa excêntrica	0,06 a 1,5
Prensa hidráulica	0,06 a 0,3

Fonte: adaptada de: Altan (apud DIETER, 1981, p. 500).



Pesquise mais

Para entender como ocorre um forjamento na prática, assista aos vídeos propostos a seguir:

FERRAMENTAVITALÍCIA. Martelo pneumático para forjar peça quente. Disponível em: <<https://www.youtube.com/watch?v=FYqxSfqVezM>>. Acesso em: 30 abr. 2017.

DIGITALSPOT CHILE. Final forjados. Disponível em: <<https://www.youtube.com/watch?v=-LeG9TCJo8Y>>. Acesso em: 30 abr. 2017.

Sem medo de errar

Vamos relembrar e entender o que deve ser feito nesta situação-problema. A FORJAFORTE está trabalhando nas especificações de uma nova peça para um cliente do ramo metal-mecânico a ser produzida por meio do processo de forjamento. Trata-se de um grande eixo que será utilizado para fabricar um rolo laminador.

A peça será fornecida pré-acabada, e a operação será realizada pelo processo de prensagem e finalizada no próprio cliente. Assim, é necessário planejar tudo que for necessário para que a peça seja realizada com a qualidade e as especificações exigidas. O diâmetro a ser processado é o diâmetro maior do eixo cuja medida acabada é de 650 mm, e o material: Liga 40Cr3MoV. Você deve definir: o equipamento a ser utilizado para prensagem do eixo e para o processo de forjamento, a melhor sequência operacional para executar o forjamento, a capacidade da prensa.

Devemos, a princípio, observar as características e o tamanho da peça a processar. No caso, trata-se de uma peça muito grande com diâmetro de 650 mm, produzida em liga 40Cr3MoV e devendo ser observado que o diâmetro a ser forjado ficará com sobremetal para posterior acabamento, nos mostrando que a precisão requerida é baixa. Pelo tamanho e tipo de produto a ser produzido, vamos definir que o processo deverá ser realizado a quente, adotando temperatura de 850 a 1050 °C, valor definido para aço-liga com Cr-Mo, segundo Billigmann e Feldmann (1979, p. 77).

Os processos mecânicos utilizados para esse tipo de peça são o martelamento, com a utilização de martelos de forja ou martelos de queda que trabalham com golpes sucessivos e rápidos sobre o material, deformando principalmente as camadas superficiais, ou ainda a prensagem, com a utilização de prensas. Quanto ao tipo de matriz, devemos utilizar os forjamentos em matriz aberta ou livre, que são simples, planas e sem se encostarem no final do curso, em que o esforço para deformação do metal se dá quando são aplicados golpes com o uso de matrizes abertas de maneira repetitiva.

Conforme vimos na teoria, essa categoria de forjamento é utilizada para um produto de grande porte, podendo ser acabado ou não, e que possua perfil simples, como é o caso que estamos avaliando, ou seja, um eixo de grande porte.

O martelo de forja atua sobre a superfície do material através de golpes de alto impacto que são rapidamente repetidos, normalmente entre 60 a 150 golpes por minuto (gpm), por meio de um ciclo sobe-desce do conjunto martelo-matriz superior, e toda a deformação é produto da dissipação de energia cinética do martelo quando ele cai livremente. A massa do martelo pode variar de 200 a 3.500 kg, e a altura existente nos equipamentos pode variar de 1 m a 3,5 m.

Muitos fornecedores de equipamentos já apresentam a capacidade de suas máquinas nas especificações e nos catálogos. Prensas apropriadas para serem utilizadas nesse tipo de processo, similares à apresentada na Figura 2.14, podem ser verificadas nos sites indicados a seguir.

Figura 2.14 | Prensa para forjamento



Fonte: <<http://www.machining.top/images/banner2.jpg>>. Acesso em: 14 jul. 2017.

Industry Stock. Disponível em: <<http://www.industrystock.com.br/html/Prensas%20de%20forja%20a%20martelo%20mec%C3%A2nico/product-result-pt-55306-0.html>>. Acesso em: 30 abr. 2017.

Sack E Kiesselbach Maschinenfabrick GmbH. Disponível em: <<http://www.sack-kiesselbach.de/produkte/industriepressen/hydraulische-unterkolben-eisenkresse.html>>. Acesso em: 30 abr. 017.

Anyang forjar. Martelo Hidráulico para forjamento. Disponível em: <<https://portuguese.alibaba.com/product-detail/plc-fully-hydraulic-closed-die-forging-hammer-cnc-forging-hammer-11471173.html>>. Acesso em: 30 abr. 2017.

Quanto à sequência de processo, por trabalharmos apenas com forjamento livre, pode ser dada por: obtenção do material ou *blank*, aquecimento do material, forjamento intermediário, forjamento final, tratamento térmico para remover tensões, homogeneização da estrutura, melhoria da usinabilidade e as propriedades mecânicas.

Para auxiliar na escolha do processo e maquinário, assista, no vídeo a seguir, à produção de um grande eixo através do processo de forjamento.

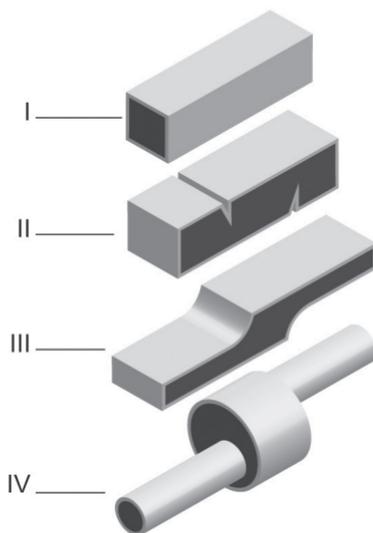
Corp. HAARP Technology. Forjando um grande eixo. 2015. Disponível em: <<https://www.youtube.com/watch?v=1nAsCOGQkHM>>. Acesso em: 30 abr. 2017.

Forja de um eixo excêntrico

Descrição da situação-problema

Imagine que você trabalha em uma indústria mecânica de usinagem e conformação plástica e que deve planejar a manufatura de uma peça cujo volume é de 500 peças/mês, conforme a Figura 2.15 a seguir, um eixo excêntrico. O gerente do departamento de engenharia e processos solicitou que você faça uma avaliação e defina se a produção dessa peça é mais viável utilizando o processo de forjamento ou através da usinagem. A empresa possui os dois tipos de equipamentos, não sendo esse aspecto um fator decisório. A escolha deve ser justificada. Após essa definição, ou seja, forjamento ou usinagem, você deve definir, dentro do processo, quais os tipos específicos de operação escolhida devem ser utilizados em cada uma das etapas indicadas na sequência de peças de I a IV.

Figura 2.15 | Eixo excêntrico forjado



Fonte: Ferreira (2006, p. 128).

Resolução da situação-problema

A primeira tarefa a ser realizada é a definição entre os processos de forjamento e usinagem. A melhor opção é o forjamento, pois se trata de um processo que: oferece uma precisão adequada para esse tipo de peça; não necessita de operadores especialistas; apresenta um tempo de operação apropriado para o volume de 500 peças/mês; pode ser trabalhado utilizando uma composição dos dois modelos de processo em matriz aberta ou livre e em matriz fechada; não gera desperdício de material; é apropriado para trabalhar com perfis simples, conforme as primeiras etapas, e perfis mais detalhados de acordo com o perfil final da peça. Já quanto à usinagem: há perda de material devido aos cavacos gerados; as ferramentas se desgastam com frequência devido ao esforço e formato do material de partida; existe a necessidade de operadores com muita prática e especialistas; o tempo de usinagem desse tipo de peça é extremamente alto; os tempos de preparação ou para fazer um programa caso a máquina seja um CNC são altos.

Assim, com a escolha do forjamento, é necessário planejar cada etapa e os seus detalhes. Então, vamos a eles.

O formato e os entalhes: além de sabermos que se tratam de um formato pré-acabado, apresentados na peça da sequência I, II e III, indicam-nos que o ideal é o forjamento livre. Assim, a partir da peça I, com formato quadrado em sua seção transversal, devemos forjar, por meio de martelamento, os entalhes do bloco II. Na sequência, utilizamos o bloco II com os entalhes acabados e o forjamos livremente até que o perfil e a configuração apresentados no bloco III sejam obtidos. Como última etapa, devemos forjar o perfil obtido no bloco III em uma matriz fechada, que pode ser realizada em apenas uma ou em mais etapas, se necessário, finalizando o processo por meio da obtenção da peça acabada com o perfil IV.

Faça valer a pena

1. O forjamento é o processo de conformação plástica mais antigo que se tem conhecimento, iniciado com o trabalho dos ferreiros de forma braçal com a utilização de martelos e bigornas, evoluindo ao longo dos anos e chegando à produção mecanizada com o uso de máquinas - ferramentas. Avalie as informações a seguir e indique se são V – Verdadeiras ou F – Falsas.

Sobre o forjamento, é correto dizer que:

() É um processo de conformação plástica que trabalha com esforço de tração.

() Utiliza o material frágil para que a deformação ocorra com maior facilidade e precisão.

() Tem a finalidade de dar forma a um metal, transformando-o em peças acabadas ou semiacabadas.

() Trabalha com a utilização de uma ferramenta de trabalho com um perfil definido.

() Utiliza a prensagem ou um martelo para produzir o esforço sobre o material e deformá-lo.

Assinale a alternativa que apresenta a sequência CORRETA para V – Verdadeiro ou F – Falso.

a) F – V – V – V – V.

b) F – F – V – V – V.

c) F – F – V – V – F.

d) V – V – F – V – V.

e) V – F – V – F – V.

2. Nos dias atuais, existem muitos tipos de máquinas para forjamento que podem produzir peças com perfis e tamanhos diversos. Os processos mecânicos utilizados são executados pelo martelamento, com a utilização de martelos de forja ou martelos de queda, ou ainda pela prensagem com a utilização de prensas.

Referente ao martelo de forja, avalie as afirmações a seguir:

I. O martelo de forja trabalha com golpes sucessivos e rápidos sobre o material.

II. O martelo de forja deforma principalmente as camadas internas do material.

III. A maior intensidade de pressão quando se trabalha com martelo de forja ocorre durante o processo de pressão gradual que o martelo exerce sobre o material em forjamento.

IV. Em um processo de forjamento com o martelo de forja, a intensidade de pressão vai reduzindo à medida que ocorre a absorção da energia pela deformação do metal.

Assinale a alternativa que apresenta as afirmações CORRETAS.

- a) As afirmações I e II apenas.
- b) As afirmações III e IV apenas.
- c) As afirmações I e IV apenas.
- d) As afirmações I, II e IV apenas.
- e) As afirmações I, III e IV apenas.

3. Em um forjamento em matriz aberta, o esforço para deformação do metal se dá quando são aplicados golpes com o uso de matrizes abertas de maneira repetitiva. As matrizes utilizadas são simples, planas e não se tocam no final de curso, além do fato de o maquinário empregado descer por queda livre ou por acionamento de um sistema pneumático. Qual das alternativas a seguir apresenta o conjunto de produtos produzidos através de um forjamento em matriz aberta.

- a) Agulha – alfinete – prego – parafuso – porca.
- b) Âncora – gancho – arruela – pistão – corrente.
- c) Colher – garfo – concha – lança – maçaneta.
- d) Alicates – chave de fenda – alavanca – contato eletrônico em chapa – pá.
- e) Eixo de turbina – eixo para navio – rolo laminador – âncora – gancho.

Seção 2.2

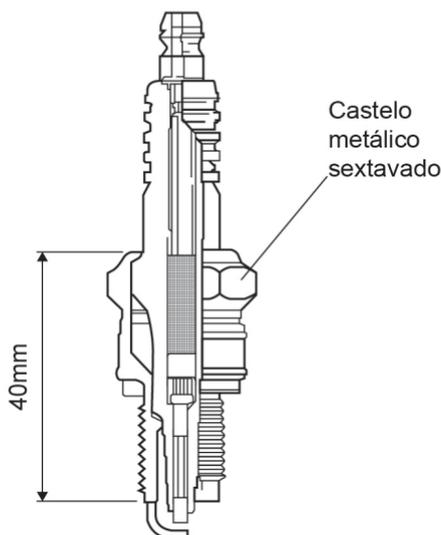
Matrizes de forjamento

Diálogo aberto

Nesta seção, você estudará sobre as matrizes para forjamento, as principais características para um projeto das matrizes, a contração do metal, os canais de rebarbas e o material das matrizes. Assim, com os conceitos e as características estudados e entendidos sobre a matriz de forjamento, você estará pronto para resolver a situação-problema. Então, vamos conhecê-la?

A FORJAFORTE Ltda. está em um momento de ascensão e conseguiu fechar mais um grande pedido, agora com uma empresa fabricante de velas de ignição. O pedido compreende a produção de um grande volume de uma peça com o nome de castelo metálico (ver Figura 2.16), que é a parte sextavada de metal que compõe a vela de ignição. Você deve atuar resolvendo e definindo algumas características do processo para que essa manufatura seja realizada com sucesso. Muitas perguntas surgirão, e você deverá definir e justificar cada questionamento. Qual tipo de processo você utilizará para a confecção dessa peça? Quais as principais características para um projeto de uma matriz que produzirá o castelo metálico? Quais as principais características a se definir em relação ao metal e às matrizes? Essa peça partirá de um *blank* redondo de Aço 1010, diâmetro 25 mm x 22 mm de comprimento, com rugosidade máxima recomendada $Ra = 3,2 \mu\text{m}$, até se tornar a peça acabada, podendo e devendo passar por mais de uma fase no processo. Como você planeja produzir essa peça utilizando o processo de forja? Em relação às melhores características para obtenção do sextavado, do diâmetro externo maior, do diâmetro externo menor e do diâmetro interno, como eles devem sair da forja: acabados ou com sobremetal?

Figura 2.16 | Vela de ignição: castelo metálico sextavado



Fonte: adaptada de: <<https://goo.gl/4Aym6D>>. Acesso em: 14 maio 2017

Não pode faltar

Na seção anterior, você conheceu e aprendeu sobre muitas características referentes ao processo de forjamento. Com relação à matriz utilizada no forjamento, você conheceu que existem dois modelos básicos de matriz, a aberta e a fechada, e que elas dão nome aos tipos de forjamentos, o forjamento em matriz aberto ou livre e o forjamento em matriz fechada.

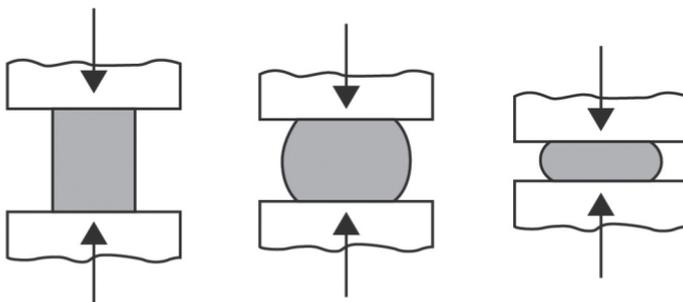


Assimile

Vamos relembrar esses dois tipos de forjamento?

No forjamento em matriz aberta ou livre, conforme pode ser observado na Figura 2.17, o esforço para deformação do metal se dá quando são aplicados golpes com o uso de matrizes abertas de maneira repetitiva. Algumas das características para esse tipo de processo é que as matrizes utilizadas são simples, planas e não se tocam no final de curso, além do fato de o maquinário empregado descer por queda livre ou por acionamento de um sistema pneumático.

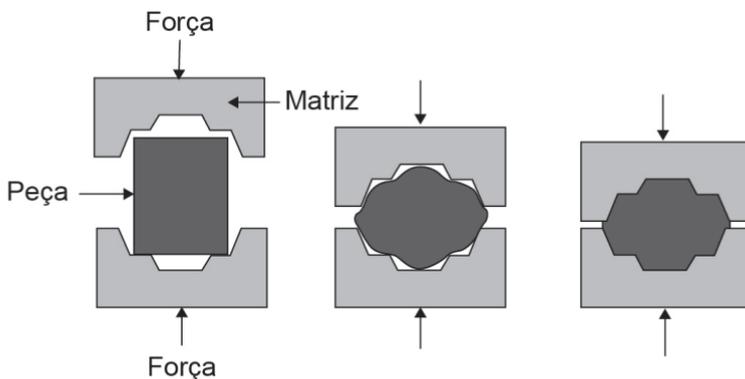
Figura 2.17 | Forjamento em matriz aberta



Fonte: <www.iem.unifei.edu.br/professores/edmilson/Aula6.ppt>. Acesso em: 8 maio 2017.

Na categoria de forjamento em matriz fechada, conforme apresentado na Figura 2.18, a conformação se dá pela prensagem do material em uma matriz que possui dois lados: o superior, que é fixo no martelo da prensa e desce quando a máquina é acionada, e o inferior, que fica fixo na mesa ou bigorna da máquina. A matriz deve ser construída de acordo com o perfil da peça que será produzida, devendo, assim, apresentar cavidades de acordo com o projeto da peça. A conformação total das peças ocorre com o fechamento ou semifechamento da matriz, momento em que se atingem as maiores pressões desse tipo de processo.

Figura 2.18 | Forjamento em matriz fechada

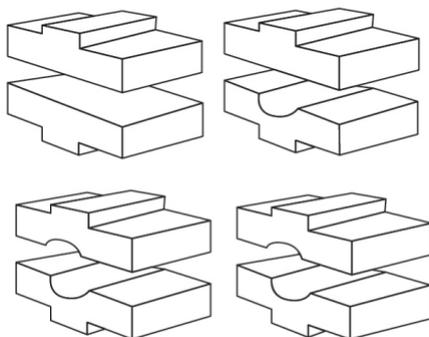


Fonte: adaptada de: Kiminami, Castro e Oliveira (2013, p. 81).

As matrizes são peças que normalmente são fabricadas em aço-ferramenta e que têm a função de entrar em contato direto com o metal para execução da conformação plástica do material.

Você conhece as principais características de um forjamento utilizando uma matriz aberta? Vamos conhecer algumas dessas características? Um forjamento em matriz aberta, como apresentado na Figura 2.19, pode produzir peças nos formatos e seções redondos, retangulares, quadrados, octogonais e hexagonais, que são forjados partindo-se de um tarugo ou bloco. A utilização de matriz aberta promove a deformação do metal entre as matrizes superior e inferior e, em geral, flui para os lados sobre a superfície da matriz. A matriz aberta é utilizada quando a peça a ser forjada é muito grande e, assim, torna-se inviável a utilização de uma matriz fechada. Os pesos das peças normalmente variam de 15 a 500 kg em aproximadamente 80% do que é produzido nesse tipo de matriz, limitado por fatores de capacidade dos equipamentos de aquecimento, forjamento e o manuseio das peças durante o forjamento ou ainda quando a quantidade de peças é muito pequena, não sendo viável financeiramente produzir e utilizar uma matriz fechada.

Figura 2.19 | Alguns tipos de matriz aberta



Fonte: Cetlin e Helman (2005, p. 153).

E como será o forjamento com matriz fechada? Em um forjamento em matriz fechada, o metal deve se alojar entre duas meias matrizes e preencher toda a cavidade, de acordo com o perfil das matrizes, havendo, assim, restrições quanto ao espalhamento do material, conforme é possível verificar na Figura

2.20. Esse tipo de forjamento se dá, na maioria das vezes, por meio de várias etapas, sendo necessárias, assim, várias matrizes com cavidades diferentes, que a cada etapa do forjamento promove uma alteração de forma, transformando o metal de partida, que é um tarugo, um bloco ou mesmo uma pré-forma adquirida em forjamento de matriz aberta, em formas prévias até gradualmente chegar à forma final da peça.

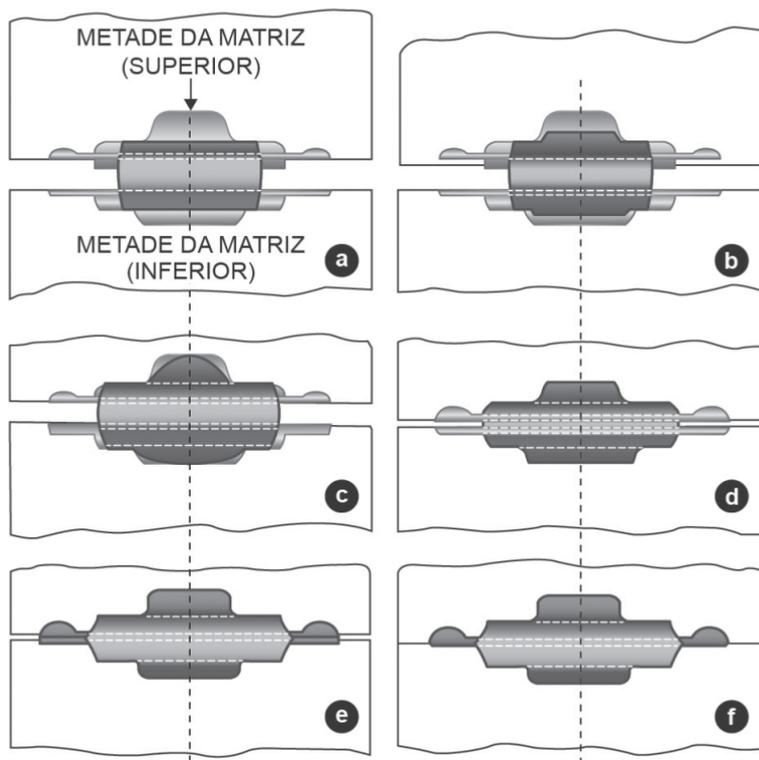
Figura 2.20 | Sequência de um forjamento em matriz fechada



Fonte: adaptada de: Cetlin e Helman (2013, p. 154).

Na Figura 2.21, você pode verificar a sequência do processo de forjamento em matriz fechada. No primeiro passo, que não é apresentado na figura, ocorre o esboçamento, em que o metal sofre sua primeira deformação visando à forma da peça, por meio de um forjamento livre. Em seguida, esse metal com a primeira pré-forma alimenta uma matriz fechada e, por meio de golpes sucessivos ou prensagem, o material que está aquecido flui e preenche, aos poucos e depois completamente, a cavidade das duas meias matrizes.

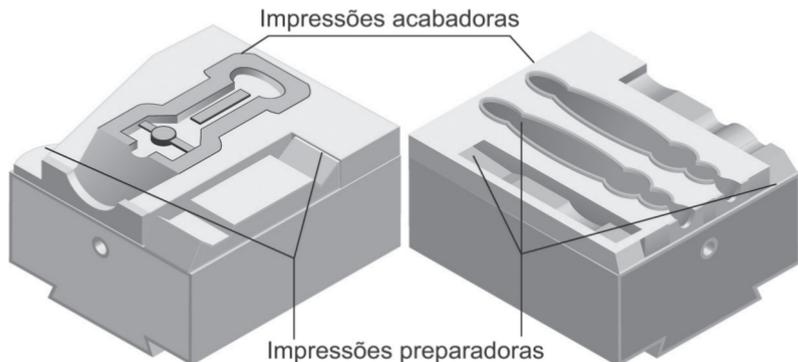
Figura 2.21 | Diferentes fases do forjamento em matriz fechada



Fonte: Chiaverini (1986, p. 87).

Com frequência, utiliza-se a prática de construir uma matriz com várias cavidades usinadas na mesma peça, as quais recebem o nome de impressões. É uma forma de otimizar o processo e reduzir os custos do material desse ferramental e da própria manufatura que, a cada golpe da máquina, consegue deformar as peças em suas várias etapas. As impressões recebem os nomes de impressões preparadoras, quando são utilizadas nas etapas iniciais do forjamento, ou impressões acabadoras, quando são as envolvidas na conformação final da peça. Veja esse conceito na Figura 2.22 a seguir.

Figura 2.22 | Diferentes fases do forjamento em matriz fechada



Fonte: adaptada de: Cetlin e Helman (2013, p. 156).

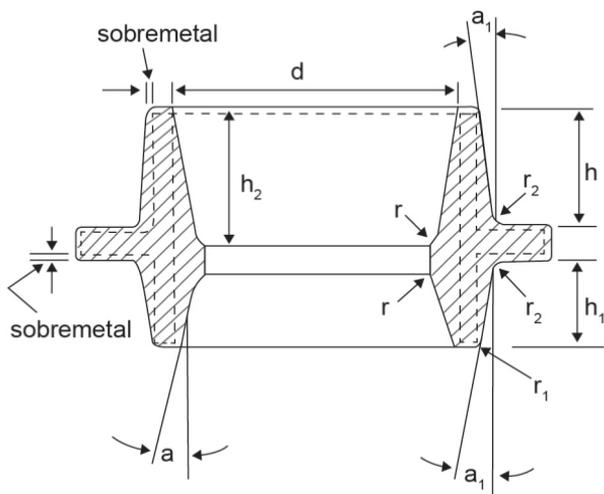
Os projetos de matriz devem considerar alguns pontos que são chaves para o sucesso do processo. Vamos conhecer essas características?

Em um projeto de matrizes para forjamento em matriz fechada, devemos considerar inicialmente a peça que será forjada, o que se projeta em relação à quantidade de peças e ao número de impressões em cada matriz, suas especificações e as dimensões existentes em seu desenho, a fim de selecionar os fatores e as características a serem considerados. Outro aspecto importante é a necessidade de verificar se a peça a ser fabricada por meio do forjamento passará por outras operações, como a usinagem e, em caso positivo, prever o sobremetal adequado.

Qual o sobremetal adequado? Vamos conhecer algumas médias mais utilizadas para sobremetal em manufatura por forjamento? Utiliza-se, para dimensões até 20 mm, um sobremetal de 0,5 a 1 mm; para dimensões na faixa de 20 a 80 mm, utiliza-se 1,0 a 1,5 mm; para dimensões de 80 a 150 mm, utiliza-se sobremetal de 1,5 a 2,0 mm; e para dimensões com variação entre 150 a 250 mm, o sobremetal deve estar entre 2,0 a 3,0 mm. Quanto aos ângulos de saída ou à conicidade, que servem para facilitar a extração da peça da matriz, é necessário utilizar ângulos com variação entre 5° a 7° para superfícies internas e 7° a 8° para superfícies externas, conforme pode ser visto na Figura 2.23. Nos projetos de matrizes, deve-se definir raios de curvatura, evitando, assim, cantos vivos

que geram tensões e, por consequência, fissuras de 2 a 5 mm de profundidade. A concordância dos cantos é essencial para prevenir falhas devido à contração do material, que ocorre durante as temperaturas de forjamento até a temperatura ambiente. Sobre as tolerâncias, o importante é estabelecer tolerâncias longitudinais para as dimensões das peças forjadas.

Figura 2.23 | Representação de sobremetal, raios de concordância e ângulos de saída



Fonte: Chiaverini (1986, p. 91).

Quadro 2.3 | Raios de concordância em peças para forjamento em matriz

RAIOS DE CONCORDÂNCIA EM PEÇAS PARA FORJAMENTO EM MATRIZ				
Medidas h, h_1, h_2 ou d em mm		Concordância, mm		
de	até	r	r_1	r_2
—	25	5	0,5	1
25	40	8	1	1,5
40	63	12	1,5	2
63	100	20	1,5	2,5
100	160	30	2	3
160	250	50	2,5	3,5

Fonte: adaptada de: Chiaverini (1986, p. 92).

As tolerâncias devem ser definidas nas matrizes de forjamento para prevenir a ocorrência de alguns possíveis problemas. O primeiro é o deslocamento de uma das partes da matriz em relação ao segundo lado, o qual, se ocorrer, resultará em uma peça defeituosa. Nesse caso, é necessário definir tolerâncias longitudinais. O desgaste das cavidades da matriz é outro problema que gera a necessidade do estabelecimento de tolerâncias. Veja na Quadro 2.4 algumas tolerâncias adotadas pelos fabricantes.

Quadro 2.4 | Tolerâncias dimensionais de peças forjamento em matriz

TOLERÂNCIAS DIMENSIONAIS DE PEÇAS FORJADAS EM MATRIZ				
Dimensões da peça mm	Forjamento normal.		Forjamento de precisão.	
	Limites máx e min.	Tolerância Total	Limites máx. e min.	Tolerância total.
Até 30.	±0,5	1	0,3 -0,2	0,5
De 30 a 50	±0,6	1,2	0,4 -0,3	0,7
De 50 a 80	0,9 -0,7	1,6	0,5 -0,4	0,9
De 80 a 125	1,2 -0,8	2	0,6 -0,5	1,1
De 125 a 200	1,5 -1	2,5	0,8 -0,6	1,4
De 200 a 250	1,8 -1,2	3	0,9 -0,7	1,6
De 250 a 315	2,2 -1,3	3,5	1 -0,8	1,8
De 315 a 400	2,6 -1,4	4		
De 400 a 500	3 -1,5	4,5		
De 500 a 600	3,4 -1,6	5		

Fonte: adaptada de: Chiaverini (1986, p. 93).



As simulações numéricas e a análise por elementos finitos são utilizadas em projetos de peças e matrizes para forjamento. Você sabe para que essa ferramenta é utilizada em forjamento? Quais as características da conformação plástica por forjamento podem ser estudadas através da utilização de simulações numéricas? Essa ferramenta pode ser utilizada para otimizar o processo? Pesquise sobre o assunto e reflita sobre as vantagens da simulação numérica. Veja alguns exemplos do uso dessas ferramentas em:

Revista Forge. **Análise das deformações e das tensões para o forjamento em matriz aberta do eixo vazado.** Disponível em: <<http://revistaforge.com.br/analise-das-deformacoes-e-das-tensoes-para-o-forjamento-em-matriz-aberta-de-eixo-vazado/>>. Acesso em: 27 maio 2017.

CONEM. **Desenvolvimento de simulação de processo de forjamento usando método de elementos finitos.** Disponível em: <<http://www.abcm.org.br/anais/conem/2002/trabalhos/tema15/CPB0944.PDF>>. Acesso em: 27 maio 2017.

Um fator de contração do metal deve ser considerado no projeto da matriz, já que, em um forjamento, o metal é aquecido a uma temperatura adequada ao trabalho, gerando dilatação que é revertido no resfriamento. Assim, a cavidade da matriz deve ser fabricada maior, de acordo com o tipo de material. Veja a Quadro 2.5, a seguir.

Quadro 2.5 | Valores de contração para materiais

Valores de contração considerando o tipo de material sob o ponto de vista prático.		
Material	Contração	Temperatura de trabalho x temperatura pós-resfriamento.
Aço	1,00%	(de 1020°C a 20°C).
Bronze	0,80%	(de 520°C a 20°C).
Latão	0,90%	(de 520°C a 20°C).
Cobre	0,80%	(de 520°C a 20°C).
Ligas leves	0,90%	(de 420°C a 20°C).

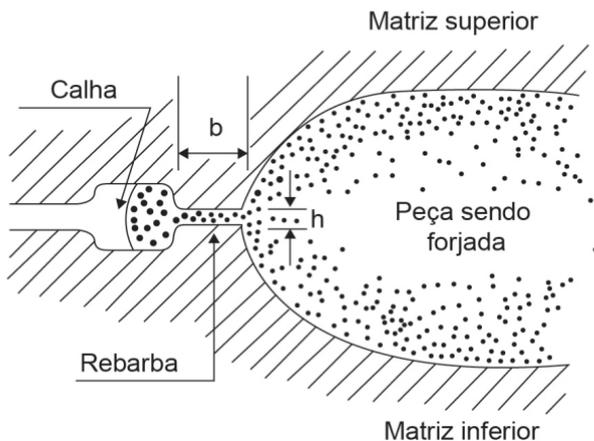
Fonte: adaptada de: Chiaverini (1986, p. 94).

Em um processo em matriz fechada, é de fundamental importância a precisão na quantidade de material utilizada, pois, se essa quantidade for insuficiente para o enchimento completo da cavidade da matriz, ocorrerá falha no volume de material para manufatura da peça e, conseqüentemente, ela apresentará problemas quanto à formação de seu perfil, provavelmente sendo descartada para o uso. Por outro lado, um excesso na quantidade de material ocasionará sobrecarga no ferramental, podendo gerar esforço maior que o previsto à máquina e à ferramenta, danificando-as.

Considerando o grau de dificuldade no dimensionamento exato da quantidade de material a ser utilizada para preencher a cavidade da matriz, concluiu-se, como medida mais apropriada, a utilização de um pequeno volume de material a mais que o volume calculado para formação da peça a ser manufaturada.

Como acomodar esse pequeno excesso de material sem prejudicar a ferramenta e o maquinário? Bem, a solução encontrada, considerando toda a importância dessa característica foi incluir, nos projetos de matrizes, uma cavidade periférica especial em formato de canal, também conhecida como "calha", conforme apresentado na Figura 2.24, que circunda a cavidade principal de trabalho com a finalidade de recolher o material em excesso assim que toda a cavidade principal é preenchida. Quando a peça é retirada da matriz, o material acomodado nessa cavidade é considerado uma rebarba que deve ser removida através de uma operação de corte que pode ocorrer através de uma matriz especial de corte, por quebra ou ainda por esmerilhamento.

Figura 2.24 | Calha para evitar a extensão exagerada da rebarba



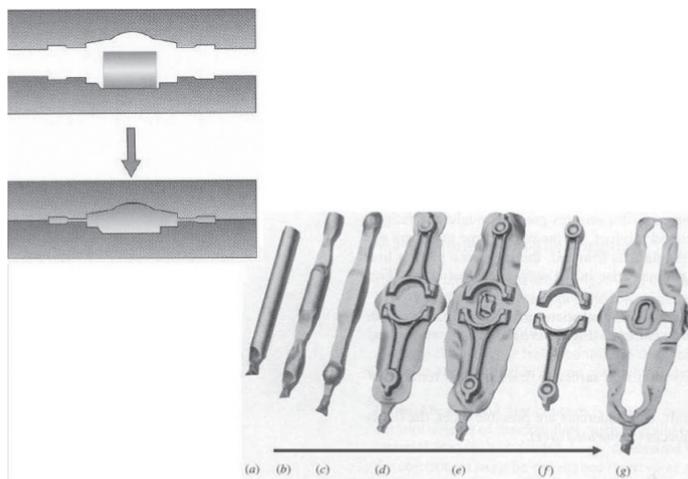
Fonte: adaptada de: Cetlin e Helman (2013, p. 157).



Exemplificando

Na Figura 2.25, você pode ver um exemplo das etapas para manufatura de uma biela através do forjamento em matriz fechada.

Figura 2.25 | Biela fabricada por matriz fechada



Fonte: <<https://goo.gl/UmW1ii>>. Acesos em: 14 jul. 2017.

Você sabe quais os materiais ideais para confecção das matrizes de forjamento? Os aços-liga especiais para ferramenta são os materiais comumente utilizados na confecção de matrizes de forjamento. Esse tipo de aço contém carbono de médio e alto teor e elementos de liga como o níquel, tungstênio, cromo, vanádio e molibdênio. A quais esforços as matrizes de forjamento estão sujeitas? Bem, as matrizes para forjamento estão expostas a grandes exigências mecânicas, podendo atingir tensões de até 200 kgf/mm², assim como os requisitos térmicos, já que o material forjado está sob temperaturas apreciáveis. Em função dessas solicitações, as matrizes precisam ser projetadas para serem construídas com materiais que tenham características como: elevada tenacidade, alto limite de escoamento, alta dureza, alta resistência mecânica a quente, resistência à fadiga e tolerância a oscilações térmicas.

Os aços cromo-níquel e cromo-níquel-molibdênio são utilizados para matrizes que trabalharão com alumínio e suas ligas devido à sua alta tenacidade.

Para forjar aço, deve-se utilizar também aço ligado ao tungstênio em função da sua elevada resistência ao calor. Esse tipo de aço permite tratamentos térmicos que geram aumento da dureza e resistência ao desgaste.

No forjamento a frio, são utilizados os aços conhecidos como indeformáveis, que têm pouca ou nenhuma alteração dimensional de forma e de deformação quando recebe o tratamento térmico. Na classificação da AISI (*American Iron and Steel Institute*) e da SAE (*Society of Automotive Engineers*), esses aços são indicados pelas letras O, quando forem de baixa liga e temperados a óleo, e D, quando forem de alta liga e temperados à óleo ou ar. Já no forjamento a quente, a classificação para o aço é H, que pode ser o cromo-molibdênio, cromo-tungstênio, tungstênio e molibdênio.

O metal duro também pode ser utilizado como material de matrizes. Esse material é utilizado em matrizes que necessitem de maior dureza e resistência à compressão.



Acesse o site indicado a seguir e entenda um pouco mais sobre os aços para forjamento, a aplicação do forjamento na atualidade, análise do comportamento das deformações e tensões do forjamento por meio da simulação numérica, simulação computacional de elementos finitos entre outros assuntos relacionados ao forjamento. Não deixe de ler também a coluna de pesquisa e desenvolvimento, que traz uma matéria muito interessante sobre a parceria de sucesso entre indústria e pesquisa.

FORGE. **Revista internacional de negócios e tecnologia no campo da forjaria**. n. 20, abr. 2017. Disponível em: <http://www.sunniva.com.br/arquivos/forge/2017.04_Forge.pdf>. Acesso em: 13 maio 2017.

Sem medo de errar

A FORJAFORTE Ltda. necessita produzir um grande volume da peça “castelo metálico”, que é a parte sextavada de metal que compõe a vela de ignição. Você deve atuar resolvendo e definindo algumas características do processo para que essa manufatura seja realizada com sucesso.

O processo de forjamento em matriz fechada a frio é o mais adequado para produção do castelo metálico em função do tamanho da peça e da quantidade do lote. Outra opção para produção dessa peça é a extrusão que estudaremos mais adiante. Assim, para essa produção da FORJAFORTE, utilizaremos o forjamento considerando as seguintes características: a peça que será forjada, o que se projeta em relação à quantidade de peças e ao número de impressões em cada matriz, as especificações, as dimensões existentes em seu desenho, a definição se a peça a ser fabricada por meio do forjamento passará por outras operações, como a usinagem e, em caso positivo, prever o sobremetal adequado.

O forjamento do castelo metálico deve ser realizado através dos seguintes processos: recozimento da matéria-prima, esboçamento, forjamento em matriz fechada considerando utilizar de três a cinco etapas, usinagem interna e externa, incluindo rosca

e soldagem da ponta do eletrodo lateral. Devemos nos concentrar aqui no processo de forjamento, similar ao apresentado na Figura 2.26, que mostra a sequência para as etapas de forjamento.

Figura 2.26 | Etapas de forjamento do castelo metálico



Fonte: <<https://goo.gl/tKH46f>>. Acesso em: 10 jul. 2017.

A principal característica a ser observada na peça e no projeto da matriz é o sobremetal para posterior usinagem, que deve estar entre 1,0 a 1,5 mm, conforme verificamos na teoria. Os ângulos de saída ou conicidade, que servem para facilitar a extração da peça da matriz, devem estar entre 5° e 7° para superfícies internas e 7° e 8° para superfícies externas. Os raios para concordância interna devem ter 5 mm, e os externos de 1 a 1,5 mm. As tolerâncias devem ser especificadas como $\pm 0,5$ mm para os diâmetros e $\pm 0,6$ mm para os comprimentos. Devemos nos lembrar de considerar um fator de contração do metal de 1% no projeto da matriz, já que, em um forjamento, o metal é aquecido a uma temperatura adequada ao trabalho, gerando dilatação que é revertido no resfriamento. Assim, a cavidade da matriz deve ser fabricada maior, de acordo com o tipo de material. Deve-se calcular a quantidade de material adequada para o metal de partida – *blank* – a fim de que as matrizes sejam preenchidas totalmente, além de considerar-se a rebarba e o preenchimento da calha. O material a ser considerado para confecção da matriz é um

aço ligado ao tungstênio, que permite tratamentos térmicos que geram aumento da dureza e resistência ao desgaste, considerando que o material a ser forjado é um aço 1010.

Avançando na prática

O forjamento de uma engrenagem

Descrição da situação-problema

Você trabalha em uma empresa metalúrgica que fabrica peças de todos os tamanhos utilizadas em transmissão mecânica. Acaba de chegar um pedido para fabricar engrenagens cujo diâmetro externo maior é de 100 mm (veja a Figura 2.27), e você deve definir os processos a serem utilizados para fabricar essa peça e indicar se, entre esses processos, é possível utilizar o forjamento como parte do processo de manufatura. Caso você opte em utilizar o processo de forjamento na manufatura dessa engrenagem, cite quais as vantagens influenciaram nessa decisão e podem ser destacadas em relação a outros processos. Qual a matéria-prima a ser utilizada no início do processo? Você consegue definir quais as etapas para processar a engrenagem?

Figura 2.27 | Engrenagem forjada



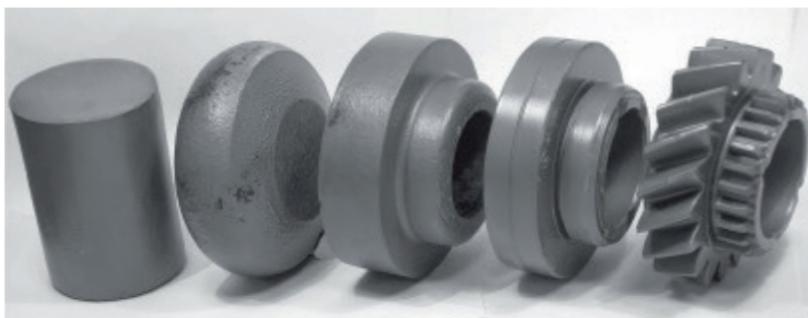
Fonte: adaptada de: Kiminami, Castro e Oliveira (2013, p. 131).

Resolução da situação-problema

O forjamento certamente fará parte da manufatura dessa peça, porém o acabamento e a finalização das dimensões devem ser realizados por meio da usinagem devido à necessidade de precisão

dimensional. O forjamento deve ser utilizado como processo inicial, pois, se fabricarmos a peça apenas por usinagem, uma grande quantidade de matéria-prima seria eliminada em forma de cavacos, provocando um grande desperdício, além de grande desgaste no ferramental, elevando o tempo e os custos em função dos itens anteriormente declarados. Assim, o processo a ser utilizado deve começar pelo forjamento a partir de um tarugo de metal obtido pelo corte de uma barra de aço. O tarugo deve ser aquecido até 1200 °C e forjado em pelo menos duas etapas, podendo ser a primeira em matriz aberta e a segunda em matriz fechada e puncionamento para obter o furo. Veja, na Figura 2.28, as peças obtidas em cada uma dessas etapas. Depois de forjar, é necessário usinar em pelo menos duas etapas, o torneamento dos diâmetros e o fresamento para confeccionar os dentes da engrenagem.

Figura 2.28 | Etapas do forjamento de uma engrenagem



Fonte: adaptada de: Kiminami, Castro e Oliveira (2013, p. 131).

Faça valer a pena

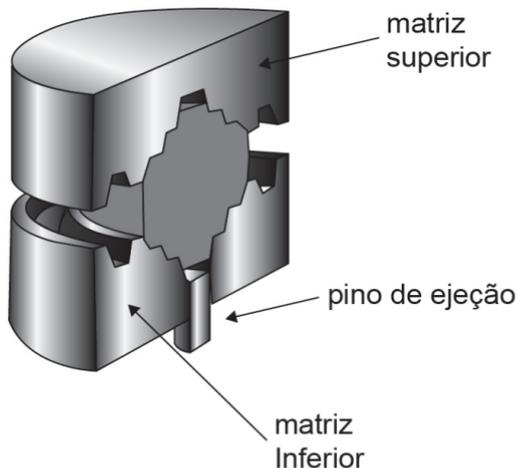
1. Em um processo em matriz fechada, é de fundamental importância a precisão na quantidade utilizada de material, pois uma quantidade insuficiente para o enchimento completo da cavidade da matriz ocasiona falha na formação e perfil da peça, e um excesso ocasiona sobrecarga no ferramental, podendo gerar esforço maior que o previsto à máquina e à ferramenta, danificando-as.

Avalie as asserções a seguir referente às soluções definidas para evitar o excesso ou a falta de material em uma matriz de forjamento fechada.

I. Em um projeto de matriz para forjamento, é prevista uma cavidade

periférica especial em formato de canal, também conhecida como "calha", conforme apresentado na figura a seguir, que circunda a cavidade principal de trabalho com a finalidade de recolher o material em excesso assim que toda a cavidade principal for preenchida.

Matriz fechada com cavidade



Fonte: <<https://goo.gl/tGZr5Y>>. Acesso em: 12 maio 2017.

PORQUE

A solução encontrada para evitar excesso ou falta de material na cavidade da matriz é incluir um pequeno volume de material a mais que o volume calculado para formação da peça a ser manufaturada e que é acomodado na calha usinada.

Assinale a alternativa que apresenta a avaliação CORRETA para as asserções apresentadas.

- a) As asserções I e II são verdadeiras, e a II é uma justificativa correta para a I.
- b) As asserções I e II são verdadeiras, porém a II não justifica a I.
- c) A asserção I é verdadeira, e a II é falsa.
- d) A asserção I é falsa, e a II é verdadeira.
- e) As duas asserções são falsas.

2. O forjamento em matrizes fechadas não é feito de uma só vez: usam-se diversas cavidades em matrizes, e a peça vai sendo sucessivamente forjada nessas cavidades, chegando gradualmente até sua forma final. Avalie as afirmações a seguir, referentes às características das cavidades das matrizes. (HELMAN, 2005)

- I. As cavidades usinadas nas matrizes são conhecidas como impressões.
 - II. As cavidades correspondentes às etapas iniciais do forjamento são as impressões preparadoras.
 - III. As cavidades correspondentes às etapas finais do processo de forjamento são as impressões polivalentes.
 - IV. A matriz para forjamento fechado com várias cavidades é justificada quando existe a necessidade de fabricar poucas peças.
- Assinale a alternativa que apresenta as afirmações CORRETAS.

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

3. Os projetos de matriz devem considerar alguns pontos que são chaves para o sucesso do processo. Em um projeto de matrizes para forjamento em matriz fechada, devemos considerar inicialmente a peça que será forjada, o que se projeta em relação à quantidade de peças e ao número de impressões em cada matriz, suas especificações e as dimensões existentes em seu desenho, a fim de selecionar os fatores e as características a serem considerados. Quanto à tolerância, é importante ressaltar que elas devem ser definidas nas matrizes de forjamento para prevenir a ocorrência de alguns possíveis problemas.

Quanto ao uso de tolerância em projeto de matriz de forjamento, é correto o que se afirma na alternativa:

- a) As tolerâncias são utilizadas quando existe a necessidade de recuperação de matrizes através de manutenção programada devido ao desgaste das cavidades.
- b) As tolerâncias referentes à superfície e ao perfil são as mais importantes a se considerar e devem ser definidas por meio da relação entre as várias superfícies que constituem a matriz e cujos centros situam-se sobre a superfície geométrica prática.
- c) As tolerâncias longitudinais são necessárias para prevenir o deslocamento de uma das partes da matriz em relação ao segundo lado, o que, se ocorrer, resultará em uma peça defeituosa.
- d) As tolerâncias de forma e posição devem ser indicadas para assegurar requisitos relacionados à reprodutibilidade das peças produzidas pela ferramenta.
- e) De modo geral, uma tolerância longitudinal se aplica na direção transversal à geometria da matriz.

Seção 2.3

Processos de forjamento: recalagem, forjamento rotativo e forjamento em cilindros

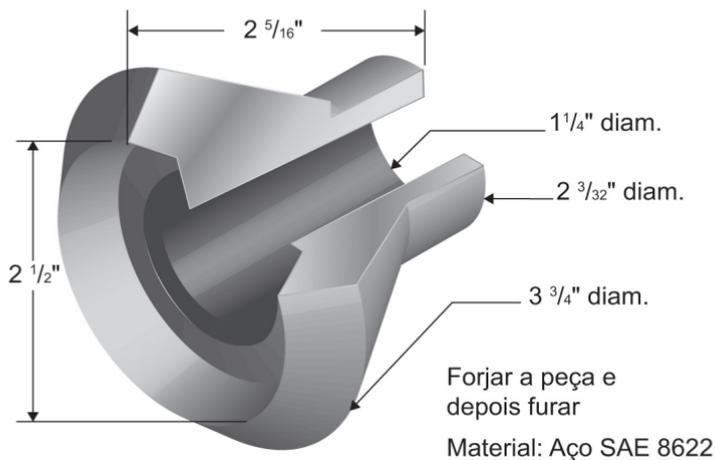
Diálogo aberto

Nesta última seção da segunda unidade de ensino, você estudará sobre alguns processos correlatos ao forjamento, que são a recalagem, o forjamento rotativo e o forjamento em cilindros. Conhecendo as definições, os conceitos e os detalhes desses processos, você estará apto a resolver a situação-problema. Vamos ver sobre o que trata essa tarefa?

Nesta terceira seção, você trabalhará em um item que já é produzido na FORJAFORTE há alguns anos. Esse item já é manufaturado por um dos tipos de forjamento em ritmo de produção, porém, por estar visando certificar-se em um sistema de qualidade, o supervisor do departamento de processos definiu que é preciso registrar e documentar todo o processo. O que você deve fazer nesta seção é definir uma folha de processo ou instrução para produzir a peça especificada.

Dessa forma, você deve observar a peça apresentada no desenho da Figura 2.29, que é o corpo da pinça, e definir alguns detalhes necessários para sua produção, os quais devem ser registrados na folha de instrução ou em uma descrição de processo. Imagine que nenhuma informação lhe foi passada sobre o processo e que você deve ir até a produção para identificar todas as características. Algumas perguntas surgirão e devem ser respondidas para descrever o processo corretamente na folha de instrução. Qual é o tipo de forjamento mais apropriado para manufaturar o corpo da pinça? Qual processo é utilizado atualmente na FORJAFORTE? Você consegue definir cada uma das etapas do processo utilizado pela FORJAFORTE para produzir a peça? Como deve ser um plano de processo para realizar a peça? Definir o passo a passo para realizar a peça é uma metodologia adequada e ajuda na prática? Você consegue definir as principais características de ferramental e máquina a serem consideradas?

Figura 2.29 | Desenho do corpo da pinça

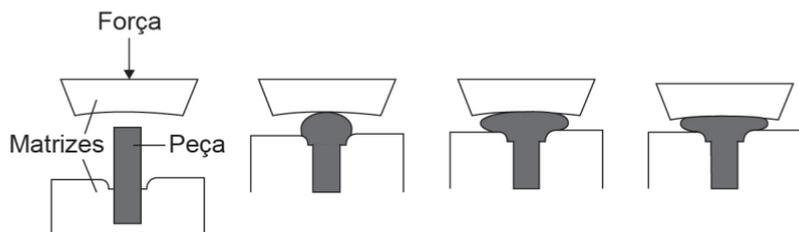


Fonte: <<http://slideplayer.com.br/slide/337206/>>. Acesso em: 12 fev. 2017.

Não pode faltar

A recalagem é um processo de conformação plástica realizado em uma máquina recalcadora que trabalha a frio, morno ou quente para alongar ou reconformar alguns materiais, como uma barra ou um tubo que apresentem seção transversal uniforme, sendo que, na maioria das vezes, o material trabalhado possui formato circular. O recalque é a versão mais simples que se conhece para a operação de forjamento livre, em que um tarugo cilíndrico é recalcado entre duas matrizes planas, porém uma operação de recalque também pode ser realizada em matriz fechada. Veja na Figura 2.30 que a ferramenta de recalque é uma matriz que apresenta duas partes, a primeira chamada de sujeitadora, que fixa e apoia o metal a ser recalcado, e a segunda que aplica a força necessária para produzir a deformação do metal. Na operação de recalque em matriz aberta, apresentada na Figura 2.30, está sendo conformada a cabeça de um prego.

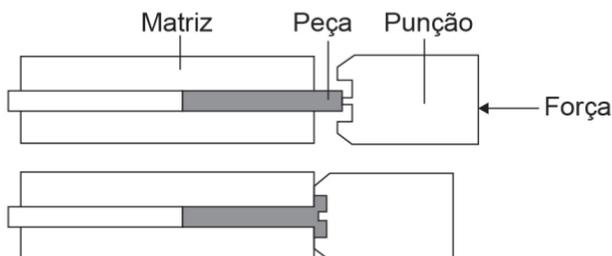
Figura 2.30 | Operação de recalque em matriz aberta: produção de cabeça de prego



Fonte: Kiminami, Castro e Oliveira (2013, p. 84).

A Figura 2.31 apresenta uma operação de recalque em matriz fechada em que uma cabeça de parafuso é conformada. O primeiro lado da matriz, a sujeitadora, fixa e apoia o material, e a segunda parte, aqui chamada de punção, é pressionada em direção à face do material, proporcionando a força necessária para a deformação e moldagem da peça.

Figura 2.31 | Operação de recalque em matriz fechada: produção de cabeça de parafuso



Fonte: Kiminami, Castro e Oliveira (2013, p. 84).



Assimile

O cálculo da pressão de recalagem pode ser realizado com a fórmula que segue e ser utilizado para definir a máquina de recalcar.

$$P = S \times R_d \times k$$

Em que: P = pressão máxima, em *kgf*, que ocorre na recalagem.

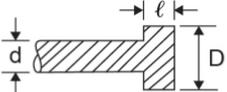
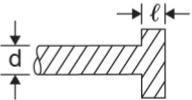
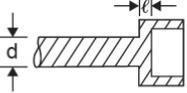
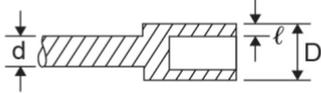
S = área em mm^2 , da seção transversal da peça.

R_d = resistência à deformação, em kgf/mm^2 , do material a recalcar, à temperatura de deformação.

k = coeficiente que varia de acordo com as várias dimensões da peça.

R_d – Resistência à deformação em kgf/mm^2.	
Aço	10 a 15.
Cobre	6
Ligas leves	0,4 a 0,5
Latão	4

Figura 2.32 | Formatos para valor de k

Tipo	Tipo	Tipo
	$l \geq d$	$k = 1,2.$
	$l \leq 0,8 \times d$	$k = 1,5 \text{ a } 2,7.$
	$l \leq 0,8 \times d$	$k = 4 \text{ a } 7.$
	$l \leq 0,4 \times d$	$k = 6 \text{ a } 9.$

Fonte das imagens: Chiaverini (1986, p. 100).

São previstos alguns passos para a realização de um processo de recalagem, iniciando-se a partir da fixação do metal de partida (*blank*), que é mantido a quente e entre matrizes e, em seguida, aplica-se pressão em uma de suas pontas, na direção da face do

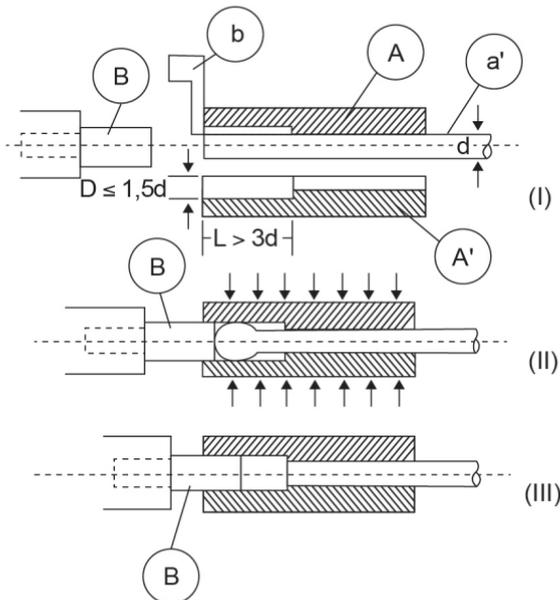
eixo com a utilização da ferramenta de recalcar que, aos poucos, vai modificando a seção da peça, alargando o diâmetro e reduzindo o comprimento da extremidade por meio de deslocamento do metal. Quer conhecer um pouco mais sobre as etapas do processo de recalagem? Veja que, na Figura 2.33, uma barra é submetida a um processo de recalagem por meio de três etapas, identificadas por (I), (II) e (III).

Na etapa (I), uma barra identificada por a' já aquecida alimenta a máquina recalçadora, posicionada nas duas meio-matrizes abertas A e A' . Em seguida, a alavanca b , que tem a função de um *stop*, define a posição correta para a face da barra paralela à face da matriz.

Na etapa (II), a recalçadora é ligada, e as duas meio-matrizes se fecham, fixando a barra, e a alavanca b retorna à sua posição de repouso. A punção identificada por B inicia seu avanço em direção à barra, iniciando assim a deformação.

Na etapa (III), a punção B completa o avanço, entrando totalmente na câmara, e o recalque da ponta da barra é finalizado. A matriz é aberta e a peça retirada.

Figura 2.33 | Recalçagem de uma barra



Fonte: adaptada de: Chiaverini (1986, p. 96).

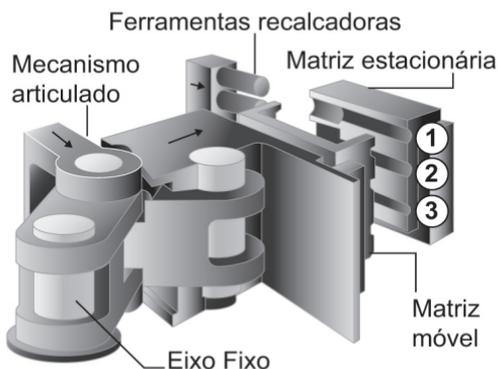
Uma máquina para recalque é denominada recalçadora ou ainda máquina de forjamento por compressão axial. Esse tipo de máquina tem posicionamento horizontal, conforme é possível verificar na Figura 2.34, e trabalha mecanicamente por meio de um eixo principal com transmissão excêntrica que impulsiona o cursor da ferramenta que, por sua vez, recalca o metal na horizontal. O cursor da matriz é propulsionado por cames e excêntricos que devem se movimentar na horizontal, formando um ângulo reto com o cursor da ferramenta de recalcar. As duas matrizes de aperto do metal são consideradas os componentes mecânicos essenciais na recalçagem. A Figura 2.35 apresenta uma recalçadora. Vamos entender seu funcionamento? A máquina é alimentada na posição 1 da matriz estacionária; na sequência, o mecanismo articulado é acionado, movimentando-se conforme a direção da seta, fechando a matriz móvel sobre a estacionária e fixando a barra em 1. Em seguida, as ferramentas recalçadoras se deslocam em direção à matriz e à face da barra, processando o recalque da cabeça da barra. As matrizes e as ferramentas retornam à sua posição inicial, permitindo que as barras sejam reposicionadas na matriz, passando da posição 1 para a 2 e da posição 2 para a 3. Assim que as cavidades da matriz são alimentadas, a máquina é ligada novamente, e o ciclo de recalçagem se repete. A cada reposicionamento, uma peça pronta deve ser retirada da posição 3.

Figura 2.34 | Máquina para recalçagem



Fonte: <<https://goo.gl/axfgNV>>. Acesso em: 2 jun. 2017.

Figura 2.35 | Esquema de funcionamento de uma recalçadora



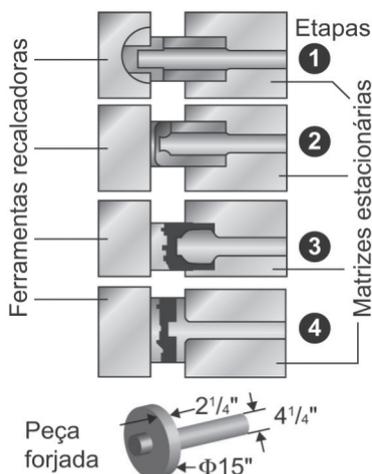
Fonte: Cetlin e Helman (2013, p. 161).



Exemplificando

Observe a Figura 2.36, que apresenta a manufatura de um pino por meio de um processo de recalque. Aqui você pode verificar a existência de quatro etapas, cujo processo de compressão está em andamento, e as ferramentas recalçadoras já estão no final de curso. Ao passar pelas quatro etapas, o pino estará produzido por completo.

Figura 2.36 | Etapas de fabricação de peça típica de uma recalçadora

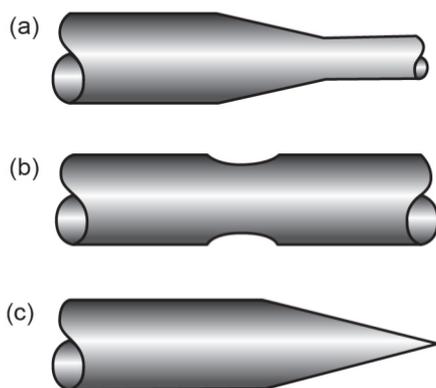


Fonte: Cetlin e Helman (2013, p. 162).

Outro tipo de forjamento é o rotativo. Você conhece esse processo? Vamos conhecer?

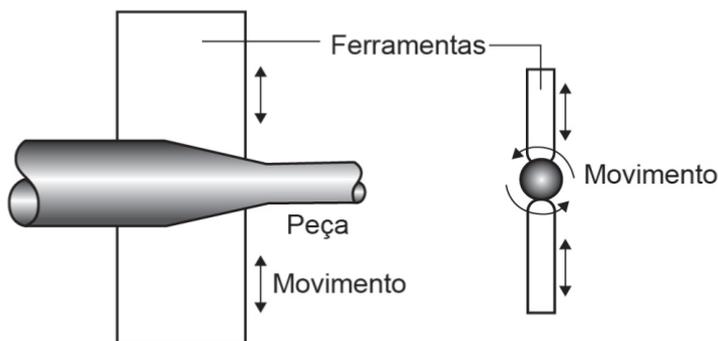
O forjamento rotativo é utilizado para fazer pontas com seção cônica ou afunilada em barras, tubos e arames que serão trabalhados posteriormente pela trefilação, como pode ser visto na Figura 2.37. Assim, sua aplicação é principalmente na redução da área da seção transversal desse tipo de metal de partida por meio de golpes radiais sequenciados, a quente, morno ou a frio, com a utilização de pares de matrizes, conforme apresentado na Figura 2.38.

Figura 2.37 | Formas e produtos manufacturados por forjamento rotativo



Fonte: Kiminami, Castro e Oliveira (2013, p. 84).

Figura 2.38 | Processo de forjamento rotativo



Fonte: Kiminami, Castro e Oliveira (2013, p. 84).

Os materiais ou peças que podem ser forjados pelo processo rotativo devem ter seção transversal simétrica na forma circular, quadrada ou até retangular.

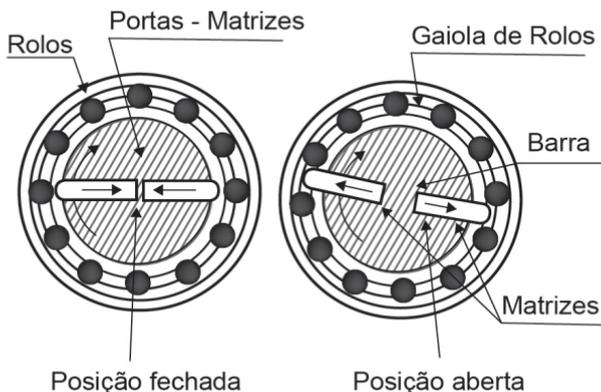
Quadro 2.6 | Condições para forjamento rotativo em função do material

Condições para forjamento rotativo em função do material		
Material	Temperatura de trabalho	Condição de aplicação
<i>Aço</i> $\Rightarrow C \leq 0,2 \%$.	Frio	Aplicado com eficiência naqueles que apresentam porcentagem de carbono menor ou igual a 0,2%.
<i>Aço</i> $\Rightarrow C > 0,2 \%$ + <i>aumento elementos de liga.</i>	Frio	Acima de 0,2% de carbono e com aumento de elementos de liga, a eficiência desse forjamento reduz.
Molibdênio, tungstênio ou aço-liga com dureza acima de 90 HB – <i>Rockwell B</i>	Quente	Utilizado quando vão ser trabalhados os metais e as ligas, que são pouco dúcteis.

Fonte: elaborada pelo autor.

Na Figura 2.39, é apresentado o princípio de funcionamento da máquina de forjamento rotativa. Ela é composta por uma gaiola de rolos fixos que armazena um porta-matriz que gira com alta velocidade. As matrizes, que podem ter um perfil cônico, são posicionadas e fixadas no porta-matriz e movem-se radialmente. Durante o giro, as matrizes são abertas e fechadas rapidamente em centenas de vezes por minuto. Esse ciclo compreende o fechamento das matrizes quando tocam os rolos e a abertura quando penetram entre dois rolos, formando, assim, um ciclo de golpes sobre o material. A peça que também está em giro obtém a redução da seção a partir de sua introdução no sentido longitudinal que direciona ao afunilamento do furo cônico das matrizes.

Figura 2.39 | Princípio de funcionamento de uma máquina de forjamento rotativa



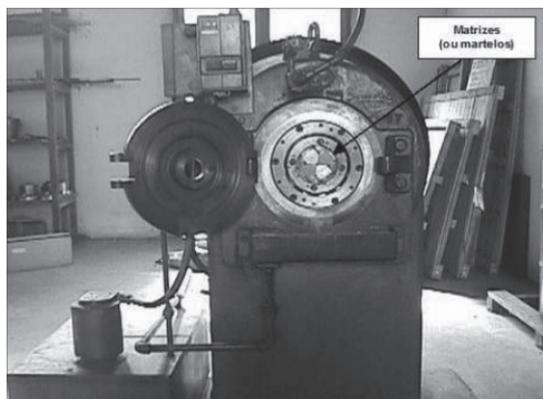
Fonte: Cetlin e Helman (2013, p. 162).



Refleta

Na Figura 2.40 a seguir, você tem uma máquina de forjamento rotativo. Pense e pesquise um pouco sobre ela. Que tipo de indústria deve investir nesse tipo de equipamento? O sistema porta-matrizes, matrizes e rolos é um sistema simples ou requer muita tecnologia aplicada e específica? Quais os conceitos empregados no mecanismo desse equipamento? Quais os principais fabricantes desse tipo de equipamento? São nacionais?

Figura 2.40 | Máquina de forjamento rotativo



Fonte: <<https://goo.gl/yKekik>>. Acesso em: 21 maio 2017.

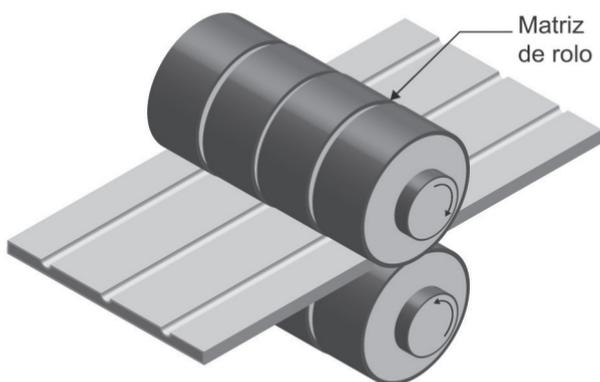
O forjamento em cilindros é mais um dos tipos de processo de conformação plástica por forjamento. Você conhece o forjamento em cilindros? Não? Então vamos ver alguns detalhes do processo.

Esse processo trabalha com dois cilindros que giram em direções opostas para reduzir a seção transversal de uma barra ou de um tarugo que passa entre eles. Os cilindros possuem um ou mais entalhes ou caneluras coincidentes em cada cilindro.

Para a realização do trabalho, a peça é passada em cada entalhe ou canelura dos cilindros. A sequência operacional consiste na compressão da peça em uma das caneluras assim que os cilindros giram. Ao ser trabalhado nessa primeira canelura, o movimento é interrompido, a peça é posicionada na próxima canelura, e a máquina acionada para que os cilindros voltem a girar. Esse processo é repetido para todas as posições de canelura dos cilindros até o final da manufatura da peça.

Esse processo é utilizado para aumentar o comprimento de barras, alterar e modificar uma determinada seção transversal de acordo com uma nova especificação ou reduzir um certo diâmetro. O forjamento em cilindros apresenta algumas vantagens pela sua simplicidade e rapidez, sendo bastante utilizado em pré-laminação de peças que serão posteriormente forjadas em matriz ou recalçadas. Também pode ser utilizado na manufatura de peças acabadas, em que o acabamento e a precisão não sejam requisitos principais.

Figura 2.41 | Representação de forjamento em cilindros



Fonte: Chiaverini (1986, p. 102).



Pesquisar além dos materiais fornecidos é essencial para seu aprimoramento e crescimento técnico. A seguir, são apresentados alguns sites com vídeos sobre o assunto. Assista e conheça como esses processos apresentados ocorrem na prática.

Portland Bolt. How a bolt is made - portland bolt & manufacturing (Como é fabricado um Grande Parafuso de Ancoragem – Inclui recalçagem). Disponível em: <https://www.youtube.com/watch?v=DAOg4_FwOCg>. Acesso em: 21 maio 2017.

Forjamento de tubos. Disponível em: <<https://www.youtube.com/watch?v=nFDA2U-Tqt0>>. Acesso em: 21 maio 2017.

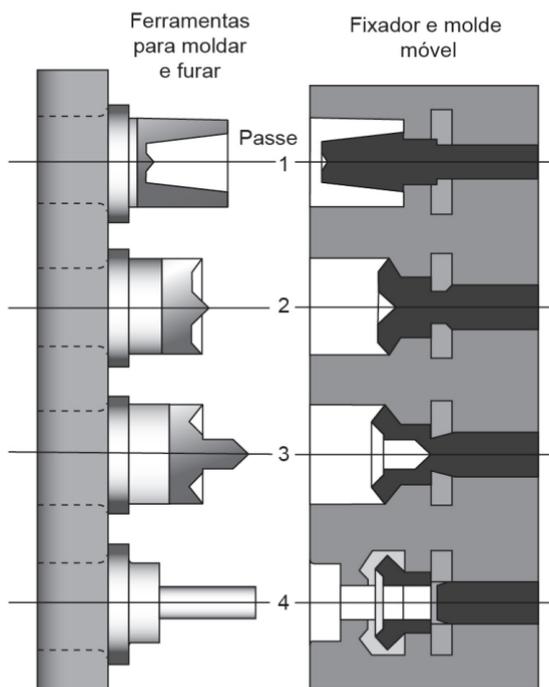
Betamacchine – máquina recalçadora horizontal. Disponível em: <http://www.betamaq.com.br/videos.php?height=350&width=420&view_video=52>. Acesso em: 21 maio 2017.

Sem medo de errar

Nesta nova situação-problema, você trabalhará em um item que já é produzido na FORJAFORTE por meio de um dos processos de forjamento estudado. A peça é o corpo da pinça, e é preciso registrar e documentar todo o processo de manufatura usando uma folha de processo ou folha de instrução que apresente as principais características do processo de produção.

As características da peça estão na Figura 2.42, e você deve observar a peça apresentada no desenho e definir alguns detalhes necessários para sua produção, registrando tudo na folha de instrução ou em uma descrição de processo.

Figura 2.42 | Etapas para recalque do corpo da pinça



Fonte: <<http://slideplayer.com.br/slide/337206/>>. Acesso em: 12 fev. 2017.

Por meio de algumas características observadas na peça, podemos perceber que a sua produção é realizada pela operação de forjamento conhecida como "recalcagem". As características observadas são: a peça parte de uma barra, possui seção transversal uniforme e circular e que necessita ser reconformada em perfil específico. O trabalho deve ser realizado a quente devido ao diâmetro de quase 100 mm e do material, um aço SAE 8622, que está no grupo de aços-níquel-cromo-molibdênio com baixos teores de Ni, Cr e Mo e cuja dureza é de aproximadamente 145 a 225 HB.

Definido o tipo de processo de forjamento, devemos definir as etapas do processo e fazer um croqui dessas etapas. As operações necessárias, que envolvem furação e conformação da cabeça do corpo da pinça, indicam-nos a necessidade de utilização de uma matriz fechada, pois envolve alteração de perfil e dimensões externas, internas, na face e um furo passante, sendo necessário controlar todas essas características. Vamos definir agora que

a peça será produzida através de quatro etapas apresentadas na Figura 2.42, assim, é necessário um conjunto de matrizes estacionárias com quatro cavidades e um conjunto de quatro ferramentas recaladoras ou punções.

A descrição do processo deve ser: o processo é constituído por um conjunto de matrizes estacionária e ferramentas de recalcar em um número de quatro passes. No primeiro passe, uma barra redonda já aquecida alimenta a máquina recaladora, sendo posicionada nas duas meio-matrizes abertas. O material é posicionado e ajustado longitudinalmente com o uso do *stop* que define a sua posição correta. A recaladora é ligada, e a matriz estacionária se fecha, fixando a barra, e o *stop* retorna à sua posição de repouso. A punção inicia seu avanço em direção à barra, começando assim, a deformação no passe número 1. A punção finaliza seu avanço, entrando totalmente na câmara, e o recalque da ponta da barra é finalizado no primeiro passe. A matriz é aberta, a peça é retirada e passada para o passe número 2. Toda a sequência se repete e, assim, a peça é conformada nos passes 2, 3 e 4, quando é finalizada por completo. A ferramenta a ser utilizada deve ter os perfis tanto no lado estacionário quanto na punção, conforme o desenho apresentado em que o perfil externo é trabalhado primeiro e, na sequência, o furo. Podemos calcular a pressão para recalcar. Para isso, vamos utilizar o maior diâmetro, e as faixa de resistência à deformação para aços e coeficiente de acordo com características da peça.

$$P = S \times R_{cl} \times k = \frac{\pi \times (95,25^2)}{4} \times 10 \times 6 = 7125,57 \times 10 \times 6 = 427.534,2 \text{kgf} = 428 \text{ton}.$$

Quanto às máquinas para forjar por recalque a quente, existem algumas opções no mercado. Veja a seguir uma opção de máquina que atende às necessidades de processos e do produto a ser manufaturado.

Máquina horizontal para forjar por recalque a quente, peças com diâmetro compreendido entre 25,4 e 5.038 mm, com força de prensagem compreendida entre 75 e 500 TE, capacidade entre 60 e 120 golpes por minuto, Mod. AFM-C1000, originária do Canadá, Marca IMPA

ou

Recalcadora HASENCLEVER HG 50/450 20110311 Wolf-Dieter Hasenclever- MACHINE À FER FORGÉ. Disponível em: <<http://www.doovi.com/video/upsetter-hasenclever/TqnMtvYU6M>>. Acesso em: 21 maio 2017.

Veja algumas fontes de pesquisa para máquinas de forja e recalque.

Revista Nei. Disponível em: <<http://www.nei.com.br/termo/produtos/prensas-de-forja?s=prensas%20de%20forja&page=1>>. Acesso em: 3 jun. 2017.

CIMM. Centro de Informação Metal Mecânico. Disponível em: <<http://www.cimm.com.br/portal/categorias/172-forja>>. Acesso em: 3 jun. 2017.

Avançando na prática

Forjamento de uma ponta de eixo para reboque

Descrição da situação-problema

Imagina que você recebeu um pedido para fabricar a peça apresentada na Figura 2.43, a seguir. Essa peça é uma ponta de eixo com cônico para reboque, cujas área e região do cone devem ser produzidas por meio do forjamento. O material é um aço SAE 1045 que sofrerá têmpera posterior.

Figura 2.43 | Ponta de eixo cônico para reboque



Fonte: <<https://goo.gl/o64nLn>>. Acesso em: 21 maio 2017.

Qual dos processos de forjamento você vai escolher e utilizar considerando a peça a ser forjada? Quais as principais características que devem ser observadas para definir o equipamento e as especificações do processo? Como a máquina de forjar escolhida funciona para manufaturar a peça?

Resolução da situação-problema

O forjamento rotativo a quente deve ser o escolhido. Ele pode ser utilizado para fazer pontas com seção cônica. O forjamento rotativo a quente é utilizado quando vão ser trabalhados os metais e as ligas, que são pouco dúcteis, por exemplo, o molibdênio, o tungstênio ou aço-liga com dureza acima de 90 HB – Rockwell B.

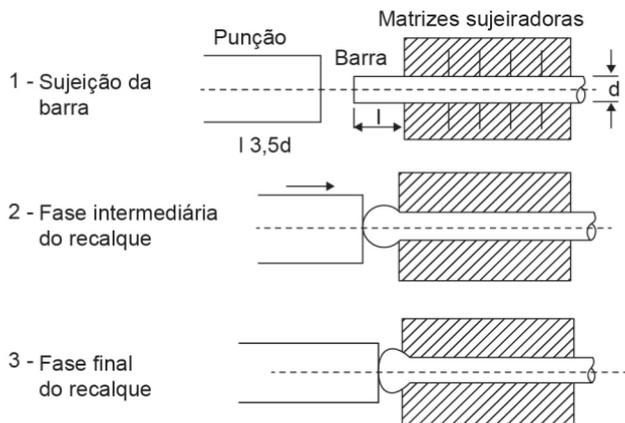
Os materiais ou peças que podem ser forjados pelo processo rotativo devem ter seção transversal simétrica na forma circular, quadrada ou até retangular.

As matrizes de forjamento rotativo devem ser preparadas especialmente de acordo com o perfil da peça a ser trabalhada. O equipamento a ser utilizado é composto por uma gaiola de rolos fixos que armazena um porta-matriz que gira com alta velocidade. As matrizes, que podem ter um perfil cônico, são posicionadas e fixadas no porta-matriz e movem-se radialmente. Durante o giro, as matrizes são abertas e fechadas rapidamente centenas de vezes por minuto. Esse ciclo compreende o fechamento das matrizes quando tocam os rolos e a abertura quando penetram entre dois rolos, formando, assim, um ciclo de golpes sobre o material. A peça que também está em giro obtém a redução da seção a partir de sua introdução no sentido longitudinal, que direciona ao afunilamento do furo cônico das matrizes.

Faça valer a pena

1. Observe a figura que segue, referente a um processo de recalque da cabeça de um pino.

Figura | Forjamento livre com operação de recalque realizado em prensa horizontal



Fonte: Bresciani et al. (2011, p. 82).

A seguir, são apresentadas as fases para recalcar a cabeça de um pino. Ordene a sequência correta para essa operação.

I	A recalçadora é ligada, e as duas meio-matrizes se fecham fixando a barra.
II	A punção inicia seu avanço em direção à barra, iniciando, assim, a deformação.
III	Uma barra já aquecida alimenta a máquina recalçadora, sendo posicionada entre as duas meio-matrizes abertas.
IV	A alavanca tipo <i>stop</i> retorna à sua posição de repouso.
V	Uma alavanca que tem a função de um <i>stop</i> define a posição correta para a face da barra.
VI	A punção completa o avanço entrando totalmente na câmara, e o recalque da ponta da barra é finalizado.
VII	A matriz é aberta, e a peça retirada.

Assinale a alternativa que apresenta a sequência CORRETA para fabricar a cabeça do pino através do processo de recalque.

- I – III – V – IV – II – VI – VII.
- III – VI – II – IV – I – V – VII.
- III – V – I – IV – II – VI – VII.
- III – I – V – II – IV – VII – VI.
- V – I – III – IV – VII – II – VI.

2. A recalragem é um processo de conformação plástica realizado em uma máquina recalçadora que trabalha a frio, morno ou quente para alongar ou reconformar alguns materiais, como uma barra ou um tubo.

A respeito do processo de recalragem, avalie as afirmações que seguem.

I. Na recalragem, um tarugo cilíndrico é trabalhado entre duas matrizes e pode ser realizado em matriz aberta ou fechada.

II. A recalragem é um processo de conformação plástica que trabalha em uma só etapa, na qual uma punção provoca a deformação por completo no material de acordo com o perfil definido.

III. Um processo de recalragem é aplicado para alongar ou reconformar alguns materiais, como uma barra ou um tubo que apresentem seção transversal uniforme, normalmente circular.

IV. Uma ferramenta de recalçar vai modificando a seção da peça aos poucos, reduzindo o diâmetro externo e a espessura da parede e aumentando o comprimento da extremidade.

Agora, assinale a alternativa que apresenta as afirmações CORRETAS.

- a) Apenas as afirmações I e II estão corretas.
- b) Apenas as afirmações I e III estão corretas.
- c) Apenas as afirmações II e IV estão corretas.
- d) Apenas as afirmações I, III e IV estão corretas.
- e) Todas as afirmações estão corretas.

3. Um forjamento em cilindros apresenta algumas vantagens pela sua simplicidade e rapidez, sendo bastante utilizado em pré-laminação de peças que serão posteriormente forjadas em matriz ou recalçadas. Também pode ser utilizado na manufatura de peças acabadas, em que acabamento e precisão não sejam requisitos principais.

Avalie as afirmações a seguir referentes ao processo de forjamento em cilindros e indique se são V – Verdadeiras ou F – Falsas.

() Esse processo trabalha com dois cilindros que giram em direções opostas para reduzir a seção transversal de uma barra ou de um tarugo que passam entre eles.

() Os cilindros utilizados em um processo de forjamento em cilindros possuem perfil liso.

() O primeiro passo da sequência operacional em um forjamento em cilindros consiste na compressão da peça em uma das caneluras do cilindro assim que os cilindros giram.

() Esse processo é utilizado para aumentar a largura de barras, alterar e modificar uma determinada seção longitudinal de acordo com uma nova especificação ou aumentar um certo diâmetro da cabeça de um pino ou parafuso por exemplo.

Agora, assinale a alternativa que apresenta a sequência CORRETA para V – Verdadeiro ou F – Falso.

a) V – V – V – F.

b) V – F – F – F.

c) V – F – V – V.

d) V – F – V – F.

e) F – F – V – V.

Referências

- BILLIGMANN, Josef; FELDMANN, Heinz.-D. **Estampado e prensado a máquina**. 7. ed. Reverté: Barcelona, 1979.
- BRESCIANI Filho, Ettore (coord.), et al. **Conformação Plástica dos Metais**. 5. ed. Campinas: Editora da Unicamp, 1997.
- CALLISTER JR., William D. **Ciência e engenharia de materiais: uma introdução**. 7. ed. São Paulo: LTC, 2008.
- CETLIN, Paulo Roberto; HELMAN, Horácio. **Fundamentos da conformação mecânica dos metais**. 2. ed. São Paulo: Artliber, 2005.
- CHIAVERINI, Vicente. **Tecnologia mecânica – processos de fabricação e tratamento**. Volume II. 2. ed. São Paulo: McGraw-Hill, 1986.
- DIETER, George E. **Metalurgia mecânica**. 2. ed. São Paulo: Guanabara Dois, 1981.
- FERREIRA Ricardo Artur Sanguinetti. **Conformação plástica – fundamentos metalúrgicos e mecânica**. Recife: Ed. Universitária da UFPE, 2006.
- FILHO, Ettore. Bresciani.; et al. **Conformação plástica dos metais**. 6. ed. São Paulo: editora Unicamp, 2011. Disponível em: <<http://www.fem.unicamp.br/~sergio1/CONFORMACAOPLASTICADOSMETAIS.pdf>>. Acesso em: 18 ago. 2017.
- HELMAN, Horacio; CETLIN, Paulo Roberto. **Fundamentos da conformação mecânica dos metais**. 2. ed. São Paulo: Artliber, 2005.
- KIMINAMI, Claudio Shyinti, CASTRO, Walman Benício de, OLIVEIRA, Marcelo Falcão. **Introdução aos processos de fabricação de produtos metálicos**. São Paulo: Blucher, 2013.

Estampagem

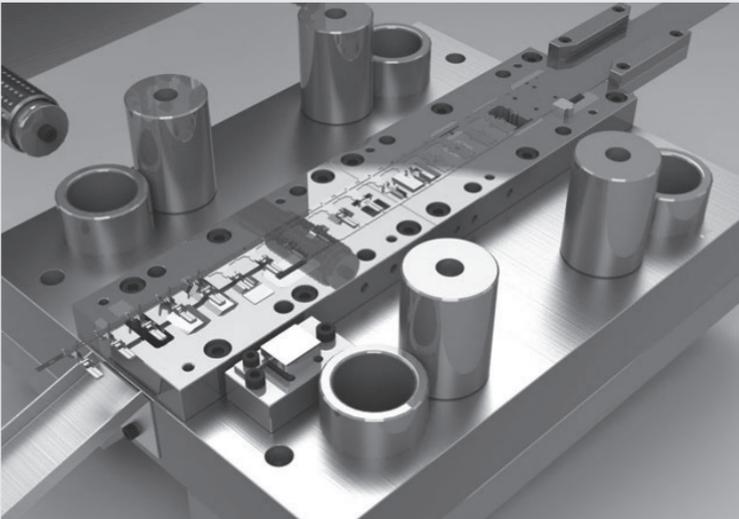
Convite ao estudo

Bem-vindo a mais esta etapa de estudo e aprendizado em que visamos conhecer o processo de estampagem, o qual é mais um dos tipos de manufatura mecânica por conformação de metais.

Na segunda unidade de ensino, você teve a oportunidade de aprender sobre um importante processo de conformação plástica de metais: o forjamento e suas variações.

Nesta unidade, você conhecerá a estampagem, incluindo as prensas e os equipamentos de estampagem (Figura 3.1), além dos três métodos inclusos nesse tipo de conformação: o corte, a dobra e a estampagem profunda de chapas.

Figura 3.1 | Estampo



Fonte: <<http://www.baldi.ind.br/>>. Acesso em: 30 maio 2017.

Você vai trabalhar com a indústria de ferramentaria e estamparia a *Stamped Part Ltda.*, uma empresa de origem inglesa que abriu uma filial no Brasil e que produz as ferramentas conhecidas como estampo de corte, dobra e repuxo e também executa produção de peças estampadas em larga escala para abastecer o mercado sul-americano. Você trabalha no departamento de processos e deverá estabelecer algumas características que serão solicitadas para produzir três novas peças: uma arruela, que deve ser produzida por meio do corte; um suporte, que utilizará o processo de dobra; e uma tampa, que deve ser produzida pela estampagem profunda; todas com a qualidade e as especificações definidas no projeto da peça.

É importante compreender, durante os estudos, que esses três processos de estampagem, o corte, a dobra e o repuxo, apresentam o mesmo princípio de funcionamento, porém têm funções diferentes e se completam para formar o processo de conformação plástica estampagem, podendo ser utilizados de forma individual ou em conjunto. Assim, durante os estudos, muitas perguntas surgirão e deverão ser compreendidas, analisadas e solucionadas, como: é necessário calcular as forças e demais características para a execução dos três tipos de estampagem por meio de fórmulas diferentes ou iguais? Quais as principais características do corte por estampagem que devem ser analisadas para que o processo obtenha sucesso e trabalhe com utilização racional do material? Em relação ao processo de dobra por estampagem, o que deve ser considerado como importante durante sua preparação e produção de peças? Para o processo de estampagem profunda, também conhecido como repuxo, quais os principais pontos a serem observados para que esse processo funcione com eficiência?

Bem, essas e muitas outras perguntas serão respondidas ao longo desta unidade, na qual a **Stamped Part Ltda.** será nosso objeto de estudo.

Seção 3.1

Estampagem – corte

Diálogo aberto

Nesta primeira seção da terceira unidade de ensino, você estudará e conhecerá as principais características da estampagem, conhecerá as prensas e equipamentos de estampagem, trabalhará com o processo de corte de chapas, aprenderá sobre as características de layout e sobre a matriz de corte e o esforço necessário para o corte.

Você trabalhará com a indústria de ferramentaria e estamparia, a *Stamped Part Ltda.*, uma empresa de origem inglesa que abriu uma filial no interior de São Paulo e que produz as ferramentas conhecidas como estampos de corte, dobra e estampagem profunda, e que também executa produção de peças estampadas em larga escala para abastecer o mercado sul-americano. Você trabalha no departamento de processos e deverá estabelecer algumas características que serão solicitadas para produzir uma nova peça: uma arruela, representada na Figura 3.2 a seguir, com a qualidade e especificações definidas no projeto da peça.

Figura 3.2 | Peça – Arruela



Fonte: <<https://goo.gl/9rW7fH>>. Acesso em: 30 maio 2017.

Nesta seção, você estudará sobre a operação de corte da estampagem e, assim, ao final da seção, poderá responder a alguns questionamentos: como definir o layout adequado para tira de chapa, observando o melhor aproveitamento da chapa? Você é capaz de definir as medidas para o layout da peça no material? Você consegue apresentar o aproveitamento da chapa em porcentagem (%)? É possível calcular a folga entre punção e matriz? É possível calcular e indicar as forças de corte necessárias? Quais as medidas ideais para o punção e a matriz?

Considere as seguintes informações e medidas para peça acabada: material = aço SAE 1020, recozido; espessura = 1,0 mm, diâmetro furo = 10 mm; diâmetro externo = 30 mm; tolerâncias para diâmetros interno e externo = $\pm 0,2$ mm; comprimento tira = 2.000 mm.

Não pode faltar

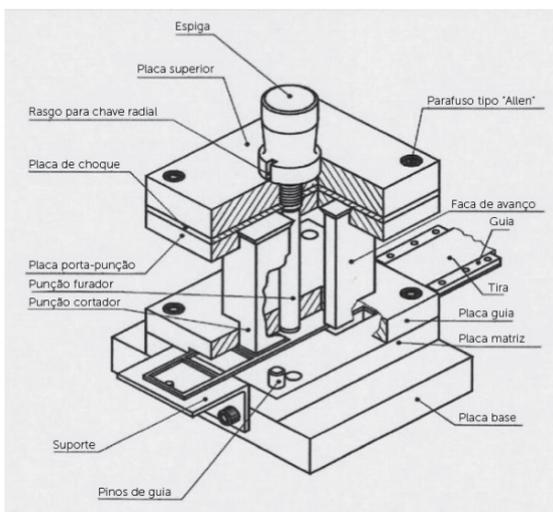
O processo de conformação plástica conhecido como estampagem é realizado a frio na maioria das vezes e é composto por um conjunto de operações que transforma uma chapa plana em uma nova peça com forma geométrica e perfil plano ou oco.

O processo para executar a deformação plástica utiliza prensas de estampagem e as ferramentas chamadas de *estampo* ou *matriz*.

Você já conhece o estampo? Vamos conhecer seus principais componentes?

A composição de um estampo que pode ser observada na Figura 3.3 e apresenta elementos que são comuns em qualquer tipo de ferramenta, como as várias placas, placa-base, espiga, placa de choque, parafusos e pinos para fixação e placa de guia, entre outros, e elementos que são específicos dessa ferramenta e responsáveis por dar forma ao produto final, que são a matriz e o punção.

Figura 3.3 | Estampo de corte e suas partes



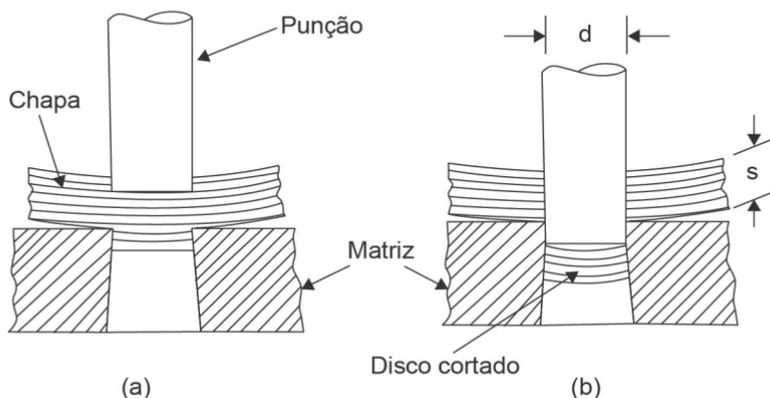
Fonte: <<https://goo.gl/QNA61W>>. Acesso em: 24 jun. 2017.

As operações básicas da estampagem são compostas por três tipos: o corte, o dobramento, que inclui o encurvamento, e a estampagem profunda, também conhecida como repuxo. Entre esses três tipos de estampagem, a profunda é a única que, em alguns casos, pode ser realizada a quente. Para proceder uma conformação plástica por meio da estampagem, pode ser necessária apenas uma deformação ou, dependendo da profundidade de deformação necessária, duas ou mais operações para deformação.

Um dos três tipos de operação que vamos estudar nesta unidade é o "corte", que corresponde à produção de peças com formas geométricas variadas com a utilização de chapas que são sujeitadas à atuação de uma ferramenta ou punção de corte, aplicados por uma prensa que efetua pressão na chapa que se encontra suportada por uma matriz. Ao ocorrer a penetração da punção na matriz, a força de compressão se transforma em força de cisalhamento, e uma parte da chapa é destacada de forma súbita.

Observe a Figura 3.4 a seguir, que apresenta uma operação de corte de chapa. Na Figura 3.4a, é possível verificar a punção em sua posição inicial e a matriz que apoia a chapa; e na Figura 3.4b, é possível verificar que a punção já desceu e efetuou o corte (ou cisalhamento) da chapa, e que o disco cortado se despreendeu da chapa.

Figura 3.4 | Operação de corte em chapa



Fonte: Chiaverini (1986, p. 105).

Ainda na Figura 3.4b, é possível verificar que a espessura da chapa é identificada por s , e o diâmetro da punção é identificado por d .

A relação entre a espessura e o diâmetro, ou seja, $\frac{s}{d}$, para chapas de aço apresenta um valor máximo de 1,2 que expressa, inicialmente, que a espessura da chapa a ser cortada deve ser igual ou menor que o diâmetro da punção.

A operação de corte de chapas pode ser realizada para muitas formas e geometrias diferentes.

A complexidade do perfil da peça a ser cortada determina se a peça vai ser realizada em uma etapa única ou em várias etapas até conferir o perfil final. Assim, temos vários tipos de corte que podem ser utilizados e que são: corte simples, entalhe, puncionamento, corte parcial e recorte. Veja, na Figura 3.5 a seguir, esses tipos de corte.

Figura 3.5 | Tipos de corte

Corte simples	Entalhe	Puncionamento	Corte parcial	Recorte
				
Para produzir uma peça de qualquer formato a partir de uma chapa.	Corte de um entalhe em qualquer região do contorno da peça.	Corte por impacto para obtenção de furos de pequenas e médias dimensões utilizando punção e matriz.	Corte incompleto realizado na peça, sendo que uma parte fica presa à chapa.	Corte de parte excedente de material de uma peça que já passou por conformação.

Fonte: adaptada de: <<https://goo.gl/PebFxA>>. Acesso em: 3 jun. 2017.



Exemplificando

Veja a seguir, na Figura 3.6, alguns exemplos de formas e geometrias possíveis de serem obtidas por meio da operação de corte que é realizada em uma estampagem.

Todas essas peças passaram por uma operação de corte em estampo, antes de passarem por outros tipos de estampagem.

Figura 3.6 | Operação de corte em chapa



Fonte: <<http://siderplast.com.br/Produtos/produtosDetalhes/5>>. Acesso em: 4 jun. 2017.

O produto de um primeiro corte de chapas pode ser utilizado em uma operação posterior de dobra ou estampagem profunda, além de poder ser o produto acabado e final.

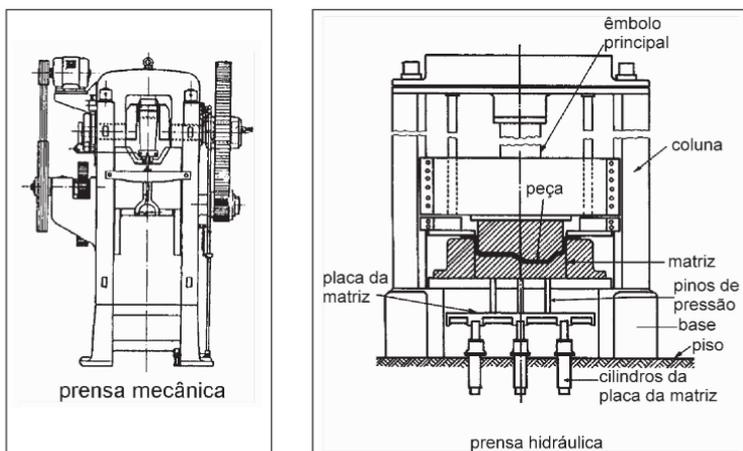


Refleta

As máquinas utilizadas na estampagem são as prensas mecânicas e hidráulicas (Figura 3.7).

Você já conheceu e estudou sobre essas máquinas durante os estudos de forjamento, mas será que são as mesmas máquinas? Os tipos, tamanhos e capacidades podem ser os mesmos? Pense e pesquise sobre esses aspectos.

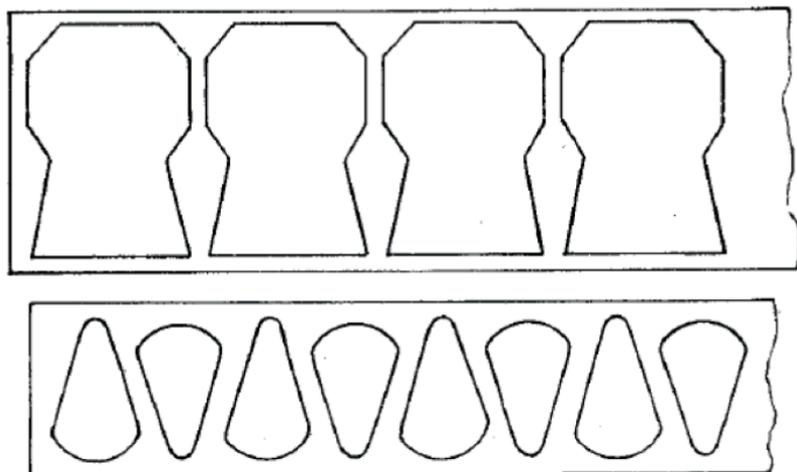
Figura 3.7 | Prensas utilizadas na estampagem



Fonte: <<https://goo.gl/A8m3H6>> (p. 111). Acesso em: 21 jun. 2017.

Você acha que o posicionamento das peças para o corte é um fator importante? Se sua resposta foi sim, você está certo. Um planejamento de corte é importante para definirmos o layout mais adequado considerando o melhor aproveitamento e o menor desperdício de material. O layout da tira, conforme é possível ver na Figura 3.8, prevê as possíveis disposições recomendadas de elementos que podem ser cortados de chapas, levando em conta: a economia do material, a forma e as dimensões do material que será utilizado e, principalmente, a geometria dos elementos que devem ser produzidos.

Figura 3.8 | Layout de tira com disposições recomendadas



Fonte: Chiaverini (1986, p. 105).

O layout de tira comumente é chamado de estudo econômico e é um estudo para obtenção do melhor e máximo aproveitamento da chapa. Para isso, o estudo econômico deve definir a quantidade de peças a estampar por meio da melhor distribuição e disposição das peças na chapa, sendo necessário, ainda, calcular as distâncias mais adequadas entre as várias peças. Vamos conhecer as fórmulas e os procedimentos para chegarmos a esses valores?

A utilização da chapa é dada em porcentagem por meio da seguinte fórmula.

$$\% \text{ Utilização} = \frac{A_p \times n}{A_c} \times 100$$

Em que :

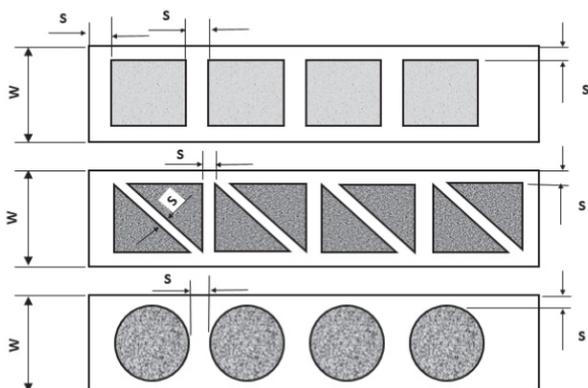
A_p = Superfície total da peça em mm^2 .

n = Número de peças por chapa.

A_c = Superfície total da chapa em mm^2 .

As distâncias entre duas peças e nos cantos da chapa variam de acordo com as dimensões da peça e da tira e da espessura do material a cortar. Existem algumas teorias diferentes sobre a determinação das distâncias. Vamos conhecer uma delas. Veja a seguir, na Figura 3.9 e no Quadro 3.1, como calcular os valores que podem ser adotados em função dessas características em situações de baixa produção.

Figura 3.9 | Layout com as distâncias entre peças e até as bordas



Fonte: elaborada pelo autor.

Quadro 3.1 | Fórmulas para determinar as distâncias entre peças e até as bordas da tira

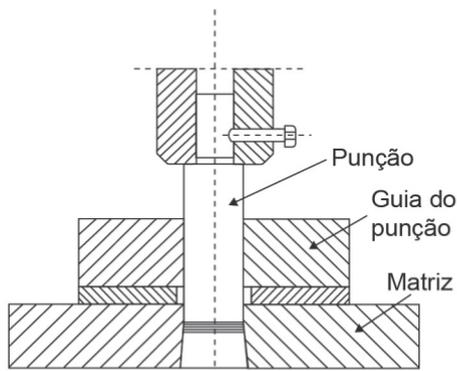
Largura da chapa x espessura (mm)	Medidas de espaçamento (mm)
$W \leq 70; e \geq 0,5$.	$S = 0,4.e + 0,8$.
$W \leq 70; e < 0,5$.	$S = 2 - 2.e$.
$W \geq 70; e \geq 0,5$.	$S = 1,5 \times (0,4.e + 0,8)$.
$W \geq 70; e < 0,5$.	$S = 1,5 \times (2 - 2.e)$.

Fonte: adaptado de: <<https://goo.gl/TbD6rc>> (p. 22). Acesso em: 10 jun. 2017.

Como deve ser uma matriz para corte?

Vamos conhecer como é composta uma matriz de corte em sua forma mais simples. O punção e a cavidade da matriz devem ser projetados e fabricados com uma seção que possua o contorno de acordo com a peça a ser manufaturada pelo corte.

Figura 3.10 | Matriz para corte de chapas



Fonte: Chiaverini (1986, p. 106).

Na Figura 3.10, é possível verificar os principais componentes de um conjunto punção-matriz de corte. O punção faz o movimento em direção à matriz e à chapa que ficam paradas. O guia do punção tem a função de guiar o punção e limitar a deflexão da chapa. Os pisadores ou prensa-chapas servem para fixar a chapa contra a matriz. O furo da matriz deve ser levemente cônico, conforme pode ser verificado na Figura 3.13, para que a peça cortada seja extraída sem correr riscos de obstruir o canal de saída da matriz devido a pequenas rebarbas.

A força de corte no puncionamento é dada pela fórmula que segue.

$$F_c = A_c \times \tau_{cis} \cdot (\text{kgf}).$$

Onde:

F_c = Força de corte.

τ_{cis} = Tensão de cisalhamento do material (Kgf / mm^2).

A_c = Área de corte (secção resistiva de corte) = $l \times e$.

l = perímetro ou comprimento de corte (mm).

e = Espessura de corte (mm).

Para um diâmetro "d", temos que:

$$A_c = \text{Área do perímetro de corte} = \pi \times d \times e$$

$$F_c = \pi \times d \times e \times \tau_{cis}.$$

Vamos nos aprofundar agora nos dois principais componentes do estampo de corte: o punção e a matriz, assim como na integração desses dois componentes. Os **tipos de punção** apresentados na Figura 3.11 são:

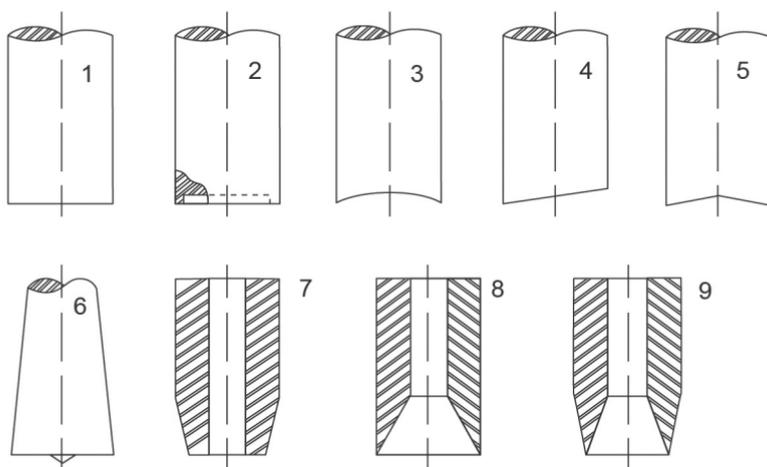
1 – Retificado em esquadro: é o tipo mais utilizado para corte de chapas de espessura ≤ 2 mm por ser o mais barato.

2 – 3 – 4 – 5 – Côncavos e com fio de corte inclinado: são os perfis utilizados quando os punções devem ter diâmetros relativamente grandes.

6 – Cônico externo: é utilizado em trabalhos muito grosseiros ou em forjaria para corte a quente.

7 – 8 – 9 – Faca: são punções utilizados para processar materiais não metálicos ou fracos. Trabalham sem matriz, utilizando como base uma placa de borracha ou madeira topo.

Figura 3.11 | Tipos de punção



Fonte: adaptada de <<https://goo.gl/bEF2ht>>. Acesso em: 10 jun. 2017.



Assimile

O valor para a folga entre punção e matriz é um fator importante para que não exista travamento entre as partes e para não criar rebarba em excesso nas peças.

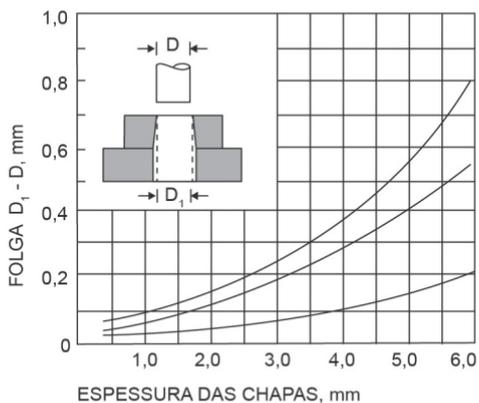
Uma folga em excesso provoca rebarbas na peça produzida, e uma folga pequena provoca desgaste rápido das arestas de corte da punção.

Essa folga depende:

- ✓ Da espessura da chapa a ser submetida ao corte.
- ✓ Do tipo de material, que pode ser duro ou mole.

O gráfico apresentado na Figura 3.12 permite a determinação dessa folga ideal.

Figura 3.12 | Gráfico para determinação da folga entre punção e matriz na operação de corte de chapas



Fonte: Chiaverini (1986, p. 107).

Quadro 3.2 | Curvas espessura x folga

Curva	Material
Curva superior.	Aço duro.
Curva média.	Aço doce e latão.
Curva inferior.	Alumínio e metais leves.

Fonte: adaptada de: Chiaverini (1986, p. 107).

Para determinar o valor da folga, siga os seguintes passos:

- 1 – Verifique a espessura da chapa a ser cortada.
- 2 – Identifique esse valor no eixo horizontal do gráfico.
- 3 – Suba uma reta perpendicular até a mesma cortar as três curvas.
- 4 – Identifique o material a ser cortado e qual das três curvas representa esse material.

5 – No ponto cruzado pela reta perpendicular, trace uma nova reta na horizontal em direção aos valores da folga.

6 – Identifique o valor da folga no eixo vertical.

Para determinar as medidas do punção e da matriz, devemos considerar a tolerância da peça a ser cortada. Assim, para um furo de uma peça que será cortada por punçionamento, a medida máxima passa a ser considerada também a medida do punção. Devemos então, verificar a tolerância máxima indicada para o furo ou a tolerância geral do desenho para definir a medida do punção.

Assim temos as fórmulas para furar:

Diâmetro do punção = Medida teórica nominal + tolerância máxima.

Diâmetro da Matriz = Medida do punção + folga.

Para tolerância maior que 0,5 mm, considera-se medida máxima permitida + 0,5 mm.

Para o recorte de medidas externas, por exemplo, a medida externa de uma arruela ou outra peça semelhante, a medida mínima deve ser considerada a medida da matriz. Assim, devemos utilizar a medida mínima das tolerâncias indicadas no desenho da peça.

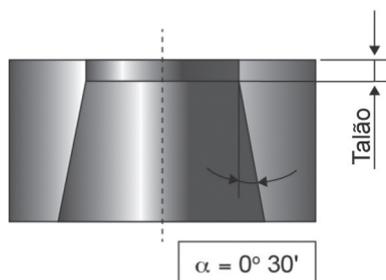
As fórmulas a seguir estabelecem as tolerâncias para recortar.

Diâmetro da matriz = Medida teórica nominal - tolerância mínima.

Diâmetro do punção = Diâmetro da matriz - folga.

A matriz deve apresentar uma parte cilíndrica e, na sequência, uma parte cônica. Essa parte cilíndrica deve ter uma altura mínima de 2,0 mm, conhecida como talão. Essa altura também pode ser definida como duas vezes a espessura da chapa e não deve ultrapassar 6 mm. O ângulo de saída (α) no furo da matriz pode ser visto na Figura 3.13.

Figura 3.13 | Ângulo de saída matriz



Fonte: <<https://goo.gl/Hb1UMD>> (p. 96). Acesso em: 11 jun. 2017.

Quadro 3.3 | Ângulo de saída da matriz em função da espessura da chapa

Espessura da chapa	Ângulo α
0,1 a 1,5	$0^\circ 30'$
1,75 a 2,5	$0^\circ 45'$
2,75 a 8,0	1°

Fonte: elaborado pelo autor.



Pesquise mais

Estude e entenda um pouco mais sobre a manufatura por meio do processo de estampagem. No artigo indicado a seguir, você poderá conhecer um pouco mais sobre a estampagem a quente e quando ela é ideal.

BUTTON, Sergio Tonini. Estampagem a quente de chapas metálicas: melhorias de desempenho e redução de custos na indústria automotiva. **Revista Manufatura em Foco**. 2015. Disponível em: <<http://www.manufaturaemfoco.com.br/estampagem-a-quente-de-chapas-metalicas-melhorias-de-desempenho-e-reducao-de-custos-na-industria-automotiva/>>. Acesso em: 4 jun. 2017.

Sem medo de errar

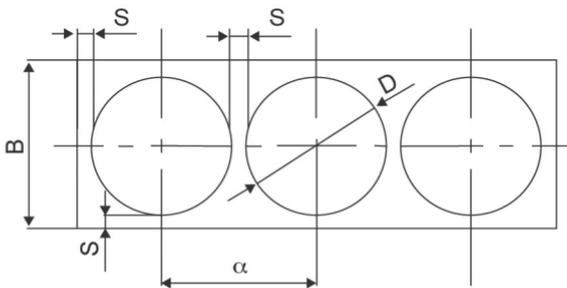
Vimos, no início da seção de ensino, que você é funcionário da indústria de ferramentaria e estamparia a *Stamped Part Ltda.* e

deverá estabelecer algumas características para produzir uma nova peça, uma arruela, com a qualidade e as especificações definidas no projeto da peça. Com os estudos referentes à operação de corte por estampagem, você certamente está apto a resolver e definir essas características. Vamos lembrar o que é necessário: como definir o layout adequado para tira de chapa, observando o melhor aproveitamento da chapa? Você é capaz de definir as medidas para o layout da peça no material? Você consegue apresentar o aproveitamento da chapa em porcentagem (%)? É possível calcular a folga entre punção e matriz? É possível calcular e indicar as forças de corte necessárias? Quais as medidas ideais para o punção e a matriz?

Considere as seguintes informações e medidas para peça acabada: material = aço SAE 1020, recozido; espessura = 1,0 mm, diâmetro furo = 10 mm; diâmetro externo = 30 mm; tolerâncias para diâmetros interno e externo = $\pm 0,2$ mm.

O layout deve ser definido por meio do estudo econômico em que podem ser analisados diversos layouts e pode ser calculado o seu aproveitamento. Aqui vamos fazer o estudo para duas situações. Layout para uma peça por golpe.

Figura 3.14 | Layout uma peça



Fonte: <<https://goo.gl/FDs3SS>> (p. 29). Acesso em: 11 jun. 2017.

Aqui temos uma chapa com largura menor que 70 mm e espessura da chapa maior que 0,5 mm. Assim, vamos utilizar a fórmula para cálculo de S.

$$S = 0,4e + 0,8 = 0,4 \times 1 + 0,8 = 1,2 \text{ mm.}$$

$$B = D + 2 \times S = 30 + 2 \times 1,2 = 32,4 \text{ mm.}$$

$$A_p = (\pi \times R^2) - (\pi \times r^2) =$$

$$(\pi \times 15^2) - (\pi \times 5^2) = 628,32 \text{ mm}^2.$$

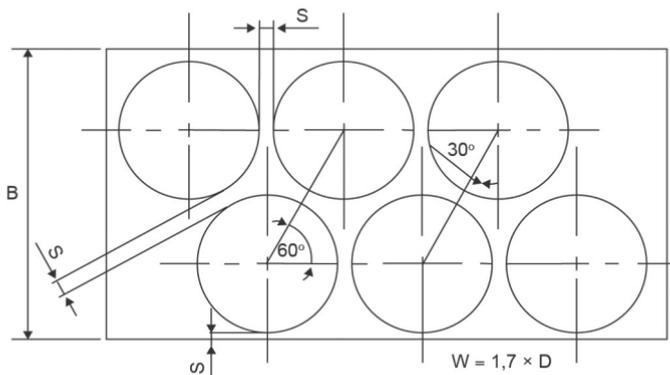
$$A_c = 2.000 \times 32,4 = 64800 \text{ mm}^2.$$

$$n = \frac{2000}{31,2} = 64 \text{ 10 peças/tira}$$

$$\% \text{ Utilização (1pé / golpe)} = \frac{A_p \times n}{A_c} \times 100 =$$

$$\frac{628,32 \times 64}{64800} \times 100 = 62,05 \%$$

Figura 3.15 | Layout duas peças



Fonte: <<https://goo.gl/fMdeFu>> (p. 29). Acesso em: 11 jun. 2017.

Aqui temos uma chapa com largura maior que 70 mm e espessura maior que 0,5 mm. Assim, vamos utilizar a fórmula para cálculo de S.

$$S = 0,4.e + 0,8 = 0,4 \times 1 + 0,8 = 1,2 \text{ mm}.$$

$$B = (D + S) \times \text{sen}60^\circ + D + 2 \times S$$

$$= (30 + 1,2) \times \text{sen}60^\circ + 30 + 2 \times 1,2 =$$

$$27,02 + 30 + 2,4 = 59,42 \text{ mm}.$$

$$A_c = 2000 \times 59,42 = 118840 \text{ mm}^2.$$

$$n = \left[\frac{(L - (D + S) \times \text{sen}30^\circ + D + 2 \times S)}{D + S} \right] \times 2 + 2$$

$$= \left[\frac{(2000 - (30 + 1,2) \times \text{sen}30^\circ + 30 + 2 \times 1,2)}{30 + 1,2} \right] \times 2 + 2$$

$$= \left[\frac{(2000 - 15,6 + 32,4)}{31,2} \right] \times 2 + 2$$

$$= 131,28 \text{ peças / tira}.$$

$$\% \text{ Utilização (2pés / golpe)} = \frac{A_p \times n}{A_c} \times 100$$

$$= \frac{628,32 \times 131}{118840} \times 100 = 69,26 \%$$

Assim, verificamos que trabalhar com duas peças/golpe apresenta uma pequena vantagem.

Calculando a força de corte para cortar duas peças por golpe, temos:

Vamos localizar a tensão de cisalhamento para um Aço 1020 recozido e que, de acordo com o Quadro 3.4 a seguir, é 30 kgf/mm².

Quadro 3.4 | Quadro para tensão de cisalhamento do material

Metal.	Ks (Kgf/mm2) recozido	Ks (Kgf/mm2) encruado
Aço, 0,1%C	24	32
Aço, 0,2%	30	40
Aço, 0,3%	36	48
Aço, 0,4%	45	56
Aço, 0,6%	55	72
Aço, 0,8%	70	90
Aço, inoxidável	50	56
Alumínio 99 e 99,5	7 a 9	13 a 16
Prata e Monel (liga de níquel)	28 a 36	45 a 56
Bronze	33 a 40	40 a 60
Cobre	18 a 22	25 a 30
Estanho	03	04
Zinco	12	20
Chumbo	02	03

Fonte: <<http://bmalbert.yolasite.com/resources/Estampagem.pdf>> (p. 55). Acesso em: 10 jun. 2017.

$$\begin{aligned}
 F_c &= [(\pi \times D \times e \times \tau_{cs}) + (\pi \times d \times e \times \tau_{cm})] \times 2 \\
 &= [(\pi \times 30 \times 1 \times 30) + (\pi \times 10 \times 1 \times 30)] \times 2 \\
 &= [2827,43 + 942,48] \times 2 = 7539,82 \text{ kgf}.
 \end{aligned}$$

De acordo com o gráfico para definição de folga, devemos utilizar a curva do meio para um aço doce e espessura 1 mm, e temos uma folga de 0,08 mm.

Para cálculo das medidas do punção e da matriz para o furo de 10 mm, vamos utilizar os critérios.

$$\text{Diâmetro do punção} = \text{Medida no minimal} + \text{tolerância máxima} = 10 + 0,2 = 10,2 \text{ mm.}$$

$$\text{Diâmetro da matriz} = \text{Diâmetro do punção} + \text{Folga} = 10,2 + 0,08 = 10,28 \text{ mm.}$$

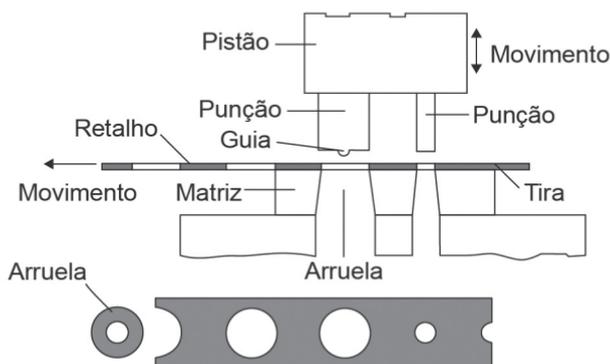
Para o cálculo para as medidas do punção e matriz para recortar o diâmetro externo de 30 mm da arruela, vamos utilizar os critérios:

$$\text{Diâmetro da matriz} = \text{Medida no minimal} - \text{tolerância mínima} = 30 - 0,2 = 29,8 \text{ mm.}$$

$$\text{Diâmetro do punção} = \text{Diâmetro da matriz} - \text{Folga} = 29,8 - 0,08 = 29,72 \text{ mm.}$$

O processo para cortar as arruelas pode ser realizado por meio da estampagem progressiva, conforme pode ser verificado na Figura 3.16 que segue.

Figura 3.16 | Exemplo de estampo progressivo para produzir arruelas



Fonte: Kiminami, Castro e Oliveira (2013, p. 95).

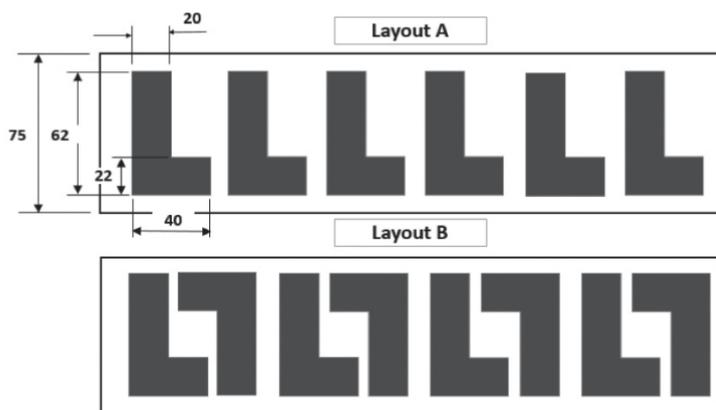
Avançando na prática

Definição de layout

Descrição da situação-problema

Imagine que você deve decidir apenas entre dois layouts apresentados para produzir uma peça com perfil em L por meio do processo de corte. O desenho da peça e dos possíveis layouts, A e B, são apresentados a seguir, na Figura 3.17. O comprimento total da tira a ser utilizada é de 2 metros, e a espessura da chapa é de 2 mm.

Figura 3.17 | Layout com as distâncias entre peças e até as bordas



Fonte: elaborada pelo autor.

Entre estes dois layouts, qual é o mais vantajoso para produzir a peça com perfil L apresentada? Como você pode tomar essa decisão?

Você acredita que existem outras opções de layout mais vantajosas que as apresentadas?

Resolução da situação-problema

Para tomar essa decisão, é necessário realizar os cálculos de aproveitamento da chapa em %. Então, vamos lá.

Para o layout A, vamos determinar o S, utilizando $W \geq 70; e \geq 0,5$, pois $e = 2$ mm.

$$S = 1,5 \times (0,4 \times e + 0,8) = 2,4.$$

$$\text{Passo} = 40 + 2,4 = 42,4.$$

$$n = \frac{2000}{42,4} = 47,2 = 47 \text{ peças / tira.}$$

$$\begin{aligned} \text{Vamos confirmar se o total de peças cabe no comprimento da tira} \\ = 47 \times 42,4 + (2 \times 2,4) = 1997,6 \text{ mm} \end{aligned}$$

$$A_p = (62 \times 20) + (22 \times 20) = 1680 \text{ mm}^2.$$

$$A_c = 2000 \times 75 = 150000 \text{ mm}^2.$$

$$\% \text{ Utilização A} = \frac{1680 \times 47}{150000} \times 100 = 52,64 \%$$

Vamos calcular os valores para produzir 2 peças/golpe.

$$\text{Passo} = 40 + 2,4 + 20 = 62,4 \text{ mm.}$$

$$n = \frac{2000}{62,4} = 32,05 \times 2 = 64,10 = 64 \text{ peças / tira.}$$

Vamos confirmar se essa quantidade de peças cabe no comprimento total da tira.

$$= 32 \times 62,4 + (2 \times 2,4) = 2001,6, \text{ isto mostra que não é possível fazer as 64 peças.}$$

Assim, vamos produzir apenas 62 peças.

$$\% \text{ Utilização B} = \frac{1680 \times 62}{150000} \times 100 = 69,44 \%$$

Dessa forma, podemos comprovar e decidir que o layout B é mais econômico, proporciona maior aproveitamento e produzirá mais peças por golpe e por tira, devendo ser o escolhido.

Quanto à segunda pergunta, a resposta é sim, podem existir outros layouts mais vantajosos. No caso dessa peça, um layout em que todas as peças sejam fabricadas em um mesmo sentido e com uma inclinação sobre o alinhamento da tira pode ser uma

boa solução. Para comprovar se a opção é melhor, é necessário repetir os cálculos apresentados para as opções A e B e fazer uma comparação de resultados.

Faça valer a pena

1. O processo de conformação plástica conhecido como estampagem é realizado a frio na maioria das vezes e é composto por um conjunto de operações que transforma uma chapa plana em uma nova peça com forma geométrica e perfil plano ou oco.

As operações básicas da estampagem são compostas por três tipos, que são:

- a) O corte, a torção e o repuxo.
- b) O corte, o dobramento e a estampagem profunda.
- c) A compressão, a tração e o cisalhamento.
- d) A estampagem rasa, a estampagem profunda e a estampagem intermediária.
- e) O cisalhamento, o encurvamento e o empuxo.

2. O layout de tira comumente é chamado de estudo econômico. Analise as informações apresentadas a seguir sobre o estudo econômico para definição do layout da tira.

I. O estudo econômico é um estudo para obtenção do melhor e máximo aproveitamento da chapa.

II. No estudo econômico, é possível definir a melhor distribuição e disposição das peças na tira.

III. Com o estudo econômico, obtém-se a maior quantidade de peças em uma mesma chapa.

IV. Nesse estudo, é necessário calcular a distância mais adequada entre a primeira e última peça da tira.

Agora, assinale a alternativa que apresenta as afirmações CORRETAS, apenas.

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

3. O valor para a folga entre punção e matriz é um fator importante para que não exista travamento entre as partes e para não criar rebarba em excesso nas peças.

Analise as afirmações que seguem e indique se são verdadeiras (V) ou falsas (F).

() Uma folga em excesso provoca rebarbas na peça produzida.

() Uma folga pequena provoca desgaste rápido das arestas de corte da punção.

() A folga existente depende da largura da chapa a ser submetida ao corte.

() A folga existente depende da ductilidade e tenacidade do material.

Assinale a alternativa que apresenta a sequência CORRETA para verdadeira (V) ou falsa (F).

a) V – V – V – V.

b) V – F – V – F.

c) F – V – F – V.

d) V – V – F – F.

e) F – F – V – V.

Seção 3.2

Estampagem – dobramento e encurvamento

Diálogo aberto

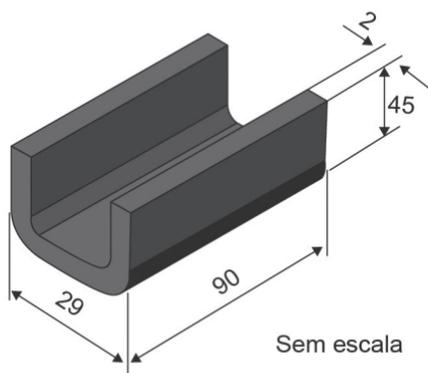
Nesta seção, você estudará sobre o processo de dobramento realizado pela estampagem. E os assuntos que serão estudados e trabalhados dentro desse tema são: o dobramento e encurvamento, a determinação da linha neutra, o esforço necessário para o dobramento, o processo de encurvamento.

Você está atuando na indústria de ferramentaria e estamparia Stamped Part Ltda., uma empresa de origem inglesa que abriu uma filial no Brasil e que produz as ferramentas conhecidas como estampo de corte, dobra e repuxo e também executa produção de peças estampadas em larga escala para abastecer o mercado sul-americano. Você trabalha no departamento de processos e deverá estabelecer algumas características que serão solicitadas para produzir uma nova peça: um suporte, representado na Figura 3.18 a seguir, com a qualidade e as especificações definidas no projeto da peça.

Nesta seção, você estudará sobre a operação de dobramento e encurvamento por estampagem e, a partir desses novos conhecimentos, poderá responder às perguntas que surgirão, como: com as informações fornecidas, é possível definir o melhor raio de dobramento? Você consegue definir a melhor forma para dobrar a peça suporte, por meio da estampagem, assim como a forma de penetração do punção mais adequada ao tipo de peça? Você é capaz de definir e calcular a medida da peça desenvolvida? É possível calcular a força de dobramento para dobrar o suporte?

Considere as seguintes informações e medidas para peça acabada: material = alumínio – liga ASTM 1200, $\sigma_t = 14,5 \text{ kgf/mm}^2$, espessura = 2,0 mm, comprimento total = 90 mm, largura externa = 29 mm, altura = 45 mm.

Figura 3.18 | Suporte em U para ligação de módulos eletrônicos



Fonte: adaptada de: <<http://www.easymec.net/Default.aspx?app=56>>. Acesso em: 19 jun. 2017.

Não pode faltar

O dobramento ocorre quando um material em formato de tira ou outro formato predeterminado é submetido a esforços de flexão e sofre uma deformação plástica. Essas forças ocorrem em duas direções opostas para promover a flexão e dão nova forma a uma superfície que inicialmente é plana, passando para duas superfícies concorrentes, com um ângulo e um raio de concordância na junção entre os novos lados. Em uma operação de dobramento ou encurvamento, procura-se não alterar a espessura ou qualquer outra dimensão do material. Os perfis mais comuns de se obter em uma operação de dobra são: "V", "U" e "L".

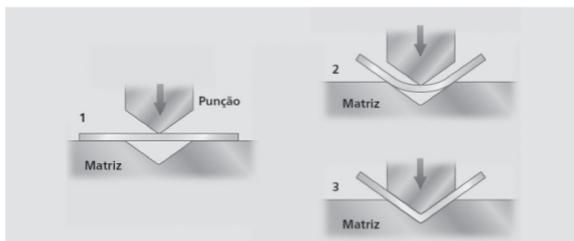


Assimile

Você conhece os métodos de dobramento? Existem três formas mais conhecidas e difundidas para ele. Vamos conhecer as formas de ação do punção sobre a chapa?

O primeiro tipo de dobramento é em "V", que é mais aplicado quando é necessário dobrar chapas com perfil largo. Veja na Figura 3.19.

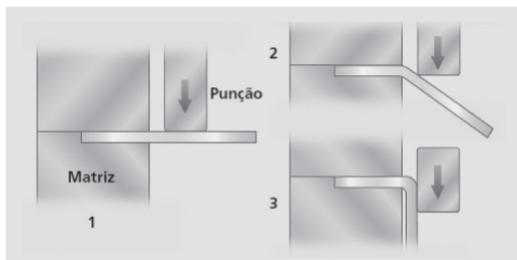
Figura 3.19 | Dobramento em "V"



Fonte: <<https://goo.gl/jVg4Sh>> (p. 114). Acesso em: 11 jun. 2017.

O segundo tipo de dobramento é em "L" ou "U", utilizado para dobrar pequenas peças e que utiliza na função do punção um braço de alavanca.

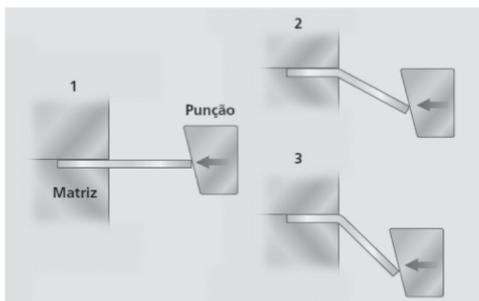
Figura 3.20 | Dobramento em "L"



Fonte: <<https://goo.gl/5rpDzD>> (p. 114). Acesso em: 11 jun. 2017.

O terceiro tipo de dobramento é o de ação frontal, que é utilizado na maioria das vezes para fazer dobras curvas ou fechadas.

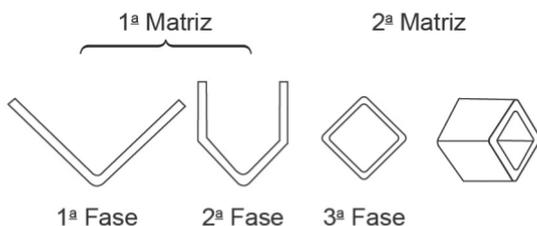
Figura 3.21 | Dobramento em "L"



Fonte: <<https://goo.gl/NmfFrJ>> (p. 115). Acesso em: 11 jun. 2017.

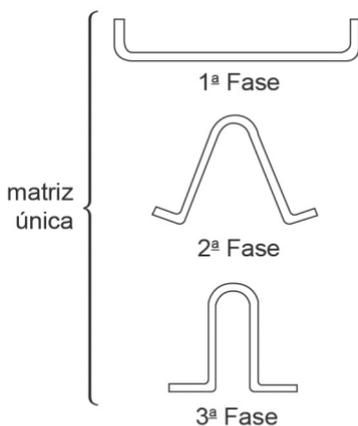
Na Figura 3.22 e 3.23, você pode ver como ocorre uma operação de dobramento por meio de várias fases.

Figura 3.22 | Fases de operação de um dobramento simples com duas matrizes



Fonte: Chiaverini (1986, p. 108).

Figura 3.23 | Fases de operação de um dobramento simples com matriz única



Fonte: Chiaverini (1986, p. 108).

Para o processo de dobramento, são importantes alguns fatores, como raio de curvatura e a elasticidade do material. O raio mínimo de curvatura é definido de acordo com o tipo de material e dado normalmente em múltiplos de espessura da chapa. Observe que cantos vivos não devem ser utilizados e que o uso dos raios em função da espessura é necessário para evitar aparecimento de trincas externas, sendo considerado, assim, um limite de conformação que varia largamente para vários metais. Vamos ver no Quadro 3.5:

Quadro 3.5 | Tamanho do raio de curvatura para dobra

Tipo de material	Tamanho do raio
Material mole/doce	1 a 2 vezes a espessura da chapa
Material duro	3 a 4 vezes a espessura da chapa

Fonte: elaborado pelo autor.

Vamos lembrar que um aço é uma liga metálica composta, em sua essência, por ferro e carbono, e que apresenta percentagens de carbono que variam entre 0,008 e 2,11%. O material é considerado duro quando o teor de carbono supera 0,3%. O aço é considerado mole quando é usado para composição de ligas metálicas. Outros materiais metálicos como alumínio, latão, entre outros, e suas ligas são considerados moles.

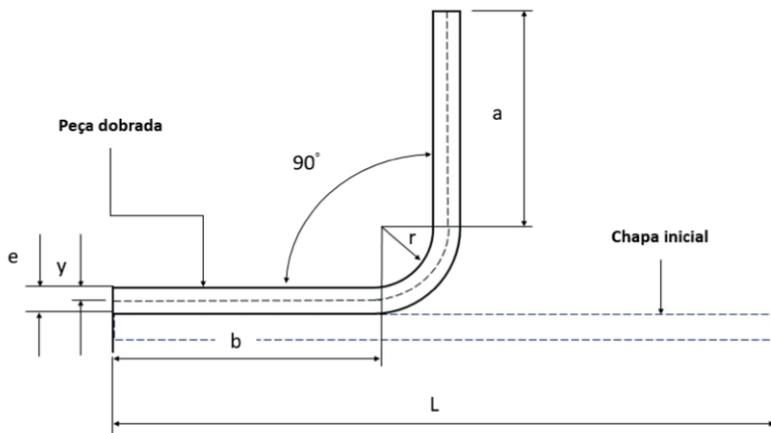
Quanto à elasticidade do metal em uma operação de dobramento, que funciona como o efeito mola, ela é necessária para que as dimensões exatas da peça em processo de dobra sejam obtidas.

A característica de elasticidade dos metais leva um material submetido à dobra a apresentar um retorno à sua forma original quando está processando um material duro. Para esses casos, é necessário tomar uma ação sobre o projeto e a confecção da matriz deixando os ângulos de dobramento mais acentuados, assim como utilizar várias fases para manufaturar a peça, com a utilização de uma ou mais matrizes.

Sempre que uma peça dobrada for produzida de acordo com um certo perfil, é imprescindível determinar o desenvolvimento linear ou as medidas exatas da chapa que será utilizada para produzir a peça dobrada. Esse desenvolvimento linear é obtido por meio da determinação da linha neutra. A linha neutra do elemento dobrado é a linha da seção transversal cuja fibra não sofre nenhum esforço de tração ou compressão e, dessa forma, não sofreu deformação alguma.

Para determinar a linha neutra, é necessário calcular conforme demonstrado a seguir. Vamos entender.

Figura 3.24 | Características para determinação da linha neutra em um dobramento



Fonte: elaborada pelo autor.

Na Figura 3.24, é possível verificar a chapa inicial que deve ser utilizada para fabricar a peça dobrada. Qual será o seu comprimento exato "L" para que a peça dobrada mantenha suas dimensões especificadas no projeto da peça? Devemos calcular esse comprimento "L" na altura da linha neutra, que é a linha da seção transversal que não sofre deformação alguma.

As distâncias "a" e "b" correspondem à distância da face da peça até a concordância do raio "r". Além dessas dimensões, é possível verificarmos, na figura, a espessura dada por "e" e a distância da linha neutra até a superfície da chapa dada por "y". As dimensões que compõem o comprimento total da peça dobrada devem ser dadas na linha neutra, assim, devemos considerar os dois comprimentos lineares "a" e "b", e o comprimento na região do raio, a ser dado pela medida do raio "r" somado com a medida "y", que é a distância do plano interno da chapa a linha neutra. Dessa forma, podemos dizer que:

$$L = a + b + \frac{\pi}{2} (r + y)$$

$$y = 2 \times \left(\frac{L - a - b}{\pi} \right) - r$$

Resultados práticos indicam valores padronizados para o posicionamento da linha neutra. Veja no Quadro 3.6, a seguir.

Quadro 3.6 | Valores de distância padronizadas para linha neutra

Espessura da chapa "e" (mm)	Distância "y" em relação ao lado interno da dobra
Até 2mm.	$\frac{1}{2} \times e$
Acima de 2 à 4 mm.	$\frac{3}{7} \times e$
Acima de 4 mm.	$\frac{1}{3} \times e$

Fonte: adaptado de: <<https://goo.gl/atqeyh>>. Acesso em: 11 jun. 2017.

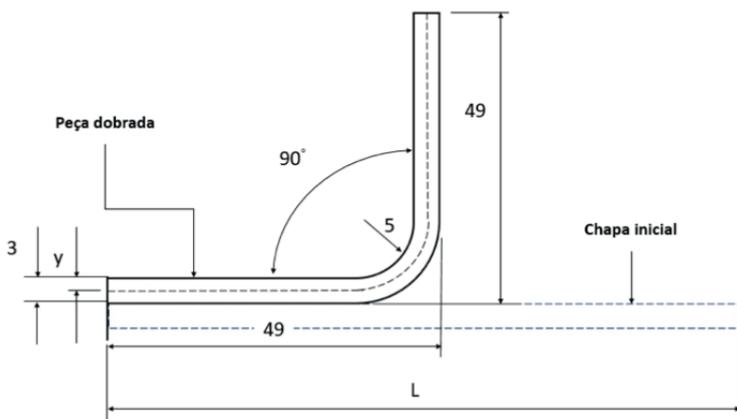


Exemplificando

É necessário determinar o comprimento "L" de uma chapa a ser dobrada, cuja espessura é de 3 mm, a largura é 22 mm, e o raio interno de dobramento tem 5 mm.

Os demais dados são apresentados na Figura 3.25, a seguir.

Figura 3.25 | Perfil da peça dobrada



Fonte: elaborada pelo autor.

Sabemos que:

$$L = a + b + \frac{\pi}{2} \times (r + y)$$

Vamos calcular os valores de a e b :

$$a = b = 49 - 3 - 5 = 41$$

Agora, vamos calcular a distância da linha neutra y

$$y = \frac{3}{7} \times e = \frac{3}{7} \times 3 = 1,3 \text{ mm}$$

Assim, o valor de L será:

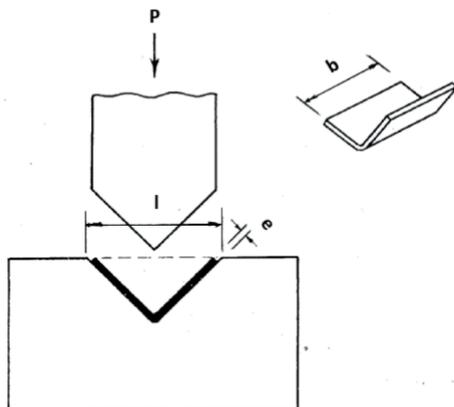
$$L = 41 + 41 + \frac{\pi}{2} \times (5 + 1,3)$$

$$L = 91,9 \text{ mm}$$

Como podemos calcular a força para o dobramento de uma peça?

O esforço necessário para realizar uma dobra pode ser calculado considerando-se algumas teorias sobre as fórmulas de resistência dos materiais para flexão de uma barra. Vamos conhecer? Vamos observar uma chapa posicionada e apoiada sobre uma matriz de dobramento e sujeita a um esforço para dobrar; podemos analogamente comparar com uma situação em que um corpo sólido é apoiado por meio de suas extremidades e sofre um carregamento em seu centro por meio da aplicação de uma força de flexão, gerando condições para determinarmos o esforço de dobramento. Veja nas Figuras 3.26 e 3.27, em que é apresentada essa situação.

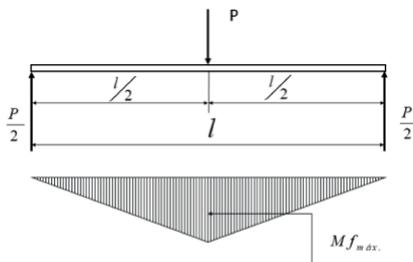
Figura 3.26 | Representação esquemática do método para determinação do esforço necessário para o dobramento



Fonte: Chiaverini (1986, p. 112).

Assim, para essa situação, em que temos um dobramento em "V", podemos representar as forças de flexão e o carregamento da chapa da seguinte forma (Figura 3.27).

Figura 3.27 | Força de flexão e sua reação para o dobramento



Fonte: elaborada pelo autor.

Inicialmente vamos entender como calcular o momento fletor das forças externas.

$$M_{f_{ext}} = \frac{P \times \frac{l}{2} \times \frac{l}{2}}{l} = \frac{P \times l^2}{4 \times l} = \frac{P \times l}{4}$$

Onde:

$M_{f_{ext}}$ = momento fletor em $\text{kgf} \times \text{mm}$.

P = Força necessária para realizar o dobramento em kgf .

l = distância entre os apoios em mm .

Do outro lado temos o momento das reações internas do material que se contrapõe ao M_f

$$\sigma_f \times \frac{I}{z}$$

Em que:

σ_f = tensão de flexão necessária para obter a deformação permanente em kgf/mm^2 .

I = momento de inércia da seção em relação ao eixo neutro em mm^4 .

Quando igualamos as duas fórmulas, temos:

$$\frac{P \times l}{4} = \sigma_f \times \frac{I}{z}$$

Para seções retangulares temos que:

$$\frac{I}{z} = \frac{b \times e^3}{6} \Rightarrow \frac{P \times l}{4} = \frac{\sigma_f \times b \times e^3}{6} \Rightarrow$$

$$\frac{P \times l}{2} = \frac{\sigma_f \times b \times e^3}{3} \Rightarrow$$

$$P = \frac{2 \times \sigma_f \times b \times e^3}{3 \times l}$$

Em que:

e = espessura da chapa em mm .

b = largura da chapa em mm .

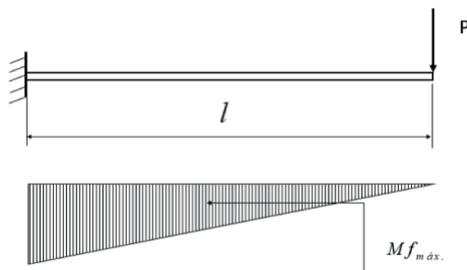
Considere que $\sigma_f = 2 \times \sigma_t$.

Em que:

σ_t = limite de resistência à tração em kgf/mm^2 .

Para uma situação em que temos um dobramento em "L", é necessário representar as forças de flexão e o carregamento da chapa como uma viga engastada. Vamos ver essa situação na Figura 3.28:

Figura 3.28 | Força de flexão para um dobramento em "L"



Fonte: elaborada pelo autor.

Vamos ver como calcular a força necessária para o dobramento em "L".

Para a dobra em "L", o cálculo do momento fletor será:

$$Mf_{máx} = P \times l$$

O momento fletor de reação interna do material é:

$$Mf_{máx} = \sigma_f \times \frac{I}{z}$$

$$\frac{I}{z} = \frac{b \times e^2}{6}$$

Igualando as duas fórmulas, chegamos à fórmula para calcular a força de dobramento:

$$P \times l = \frac{\sigma_f \times b \times e^2}{6}$$

$$P = \frac{\sigma_f \times b \times e^2}{6 \times l}$$



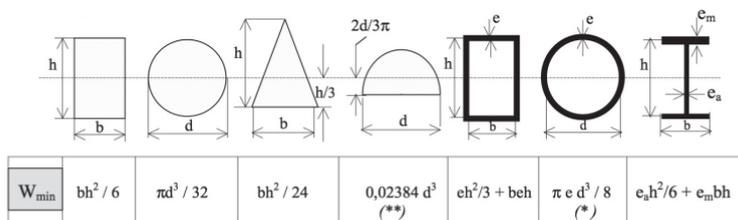
Refleta

Um dobramento ocorre, na maioria das vezes, em uma chapa com formato retangular. Podemos trabalhar com outros formatos de material em uma operação de dobramento ou encurvamento?

A seguir, na Figura 3.29, são apresentados alguns valores de módulo de resistência $W = \frac{I}{z}$ para algumas formas de seção, em que $e \ll b \sim h \sim d$.

Caso seja possível trabalhar com dobramentos e encurvamentos com os formatos diversos apresentados, como você utilizaria esses valores?

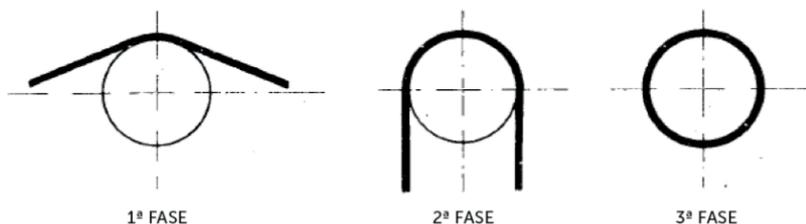
Figura 3.29 | Valores de módulo de resistência para formas diversas



Fonte: <<https://goo.gl/mN5rvq>> (p. 4). Acesso em: 18 jun. 2017.

Para as operações de encurvamento, são utilizados, da mesma forma, os princípios e conceitos aplicados no dobramento. Em uma operação de encurvamento total, normalmente é utilizada mais de uma etapa, conforme pode ser verificado na Figura 3.30.

Figura 3.30 | Representação das fases de encurvamento total de uma chapa com a utilização de uma matriz única



Fonte: Chiaverini (1986, p. 113).



Pesquise mais

Existem alguns processos pouco explorados e utilizados nas indústrias. O processo Guerin de estampagem é um deles, o qual não é evidenciado ou destacado em comparação aos tradicionais.

Conheça e estude um pouco mais sobre esses processos no site indicado a seguir:

- BRITES, Fabiano da Silva et al. **Comparação do acabamento superficial e do nível de deformação entre um processo convencional de estampagem e o processo Guerin**. ABCM – Associação Brasileira de Engenharia e Ciências Mecânicas. Penedo, Itatiaia – RJ, 2013. Disponível em: <<http://abcm.org.br/anais/cobef/2013/PDFS/COBEF2013-0391.PDF>>. Acesso em: 17 jun. 2017.

Sem medo de errar

A *Stamped Part Ltda.* é uma empresa que produz estampo de corte, dobra e repuxo e também executa produção de peças estampadas em larga escala. Você trabalha no departamento de processos dessa empresa e deverá estabelecer algumas características para produzir a peça suporte. Com as informações obtidas, você deve resolver algumas questões. Vamos a elas: é possível definir o melhor raio de dobramento? Você consegue definir a melhor forma para dobrar a peça suporte por meio da estampagem, assim como a forma de penetração do punção mais adequada ao tipo de peça? Você é capaz de definir e calcular a medida da peça desenvolvida? É possível calcular a força de dobramento para dobrar o suporte?

Considere as seguintes informações e medidas para peça acabada: material = alumínio – liga ASTM 1200, $\sigma_t = 14,5 \text{ kgf/mm}^2$, espessura = 2,0 mm, largura total = 90 mm, medida externa = 29 mm, altura = 45 mm. Nesta seção, vamos trabalhar apenas com a dobra, assim, os furos apresentados na figura devem ser desprezados nesse momento.

Primeiramente, vamos definir o raio de dobramento.

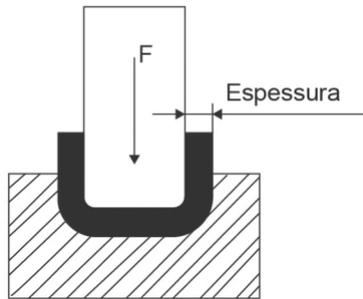
Para o alumínio, o raio de dobramento deve ser de 1 a 2 vezes a espessura da chapa.

$$r = 2 \times 2 = 4 \text{ mm.}$$

A forma correta para realizar o dobramento em "U" é a mesma utilizada para a dobra em "V", que é mais aplicada quando é

necessário dobrar chapas com perfil largo. Para esse tipo de dobramento, os apoios são laterais, e a força aplicada na vertical e na região central, assim o punção penetra na vertical e pressiona a região que forma a face interna do U. Veja a Figura 3.31 a seguir, que apresenta esse tipo de processo de dobramento.

Figura 3.31 | Processo de estampagem: dobra em "U"



Fonte: <<http://www.easymec.net/Default.aspx?app=56>>. Acesso em: 19 jun. 2017.

Vamos calcular agora o comprimento desenvolvido para a peça.

O cálculo do comprimento linear das duas laterais é dado por:

$$a = 45 - 2 - 4 = 39 \text{ mm.}$$

O cálculo da medida linear do fundo é:

$$b = 29 - 4 - 4 - 2 - 2 = 17 \text{ mm.}$$

O cálculo da distância da linha neutra é:

$$y = \frac{1}{2} \times e = \frac{1}{2} \times 2 = 1 \text{ mm.}$$

O cálculo do comprimento desenvolvido da peça será:

$$L = a + a + b + 2 \times \left[\frac{\pi}{2} \times (r + y) \right] =$$

$$L = 39 + 39 + 17 + 2 \times \left[\frac{\pi}{2} \times (4 + 1) \right] =$$

$$L = 110.71 \text{ mm.}$$

Vamos aplicar a fórmula para o cálculo da força de dobramento.

A distância entre os apoios deve ser definida entre 15 a 20.e. Vamos adotar 20.e.

Sabemos que, para calcular a força de dobramento de um perfil "U", devemos multiplicar a fórmula utilizada para um perfil "L" por

dois. Assim temos:

$$P = 2 \times \left(\frac{2 \times \sigma_f \times b \times e^2}{3 \times l} \right) =$$

$$P = 2 \times \left(\frac{2 \times 14,5 \times 90 \times 2^2}{3 \times 20 \times 2} \right) = 2 \times \left(\frac{10440}{120} \right) =$$

$$P = 174 \text{ kgf}$$

Avançando na prática

Cálculos para uma dobra em "L"

Descrição da situação-problema

Você trabalha em uma empresa que projeta estampo para todo tipo de serviços de estampagem.

Um novo cliente apresenta uma peça de SAE 1040, a ser dobrada por estampagem em "V", com as seguintes dimensões: espessura da chapa = $1,5 \text{ mm}$, comprimento total de cada aba dobrada = 50 mm , ângulo de dobra = 90° , largura da peça = 55 mm , raio interno de dobra = 8 mm , $\sigma_f = 50 \text{ kgf/mm}^2$, distância entre apoios = $20 \times e$.

O cliente, a princípio, deseja saber qual o comprimento da chapa para definir quanto vai gastar em R\$ por peça, sabendo que, para cada 100 mm de comprimento (equivalente a $0,06 \text{ kg}$), o custo é de $\text{R\$ } 25,00$, e a força necessária para manufaturar cada peça para verificar se poderá utilizar as máquinas que já possui. Você pode passar esses valores ao cliente?

Resolução da situação-problema

A princípio, é necessário calcular o valor da peça desenvolvida para saber as dimensões da chapa a ser utilizada. Assim, vamos calcular.

$$L = a + b + \frac{\pi}{2} \times (r + y)$$

$$a = b = 50 - 8 - 1,5 = 40,5 \text{ mm.}$$

$$y = \frac{1}{2} \times e = \frac{1}{2} \times 1,5 = 0,75 \text{ mm.}$$

$$L = 40,5 + 40,5 + \frac{\pi}{2} \times (8 + 0,75)$$

$$L = 94,75 \text{ mm.}$$

Assim, o custo do material por peça será:

$$100 \text{ mm}(0,06\text{kg}) \rightarrow \text{R\$ } 25,00$$

$$94,75 \text{ mm} \rightarrow X$$

$$X = \text{R\$ } 23,69 \text{ por / peça.}$$

Agora, vamos calcular a força para dobrar cada peça.

$$P = \frac{2 \times \sigma_f \times b \times e^2}{3 \times l}$$
$$P = \frac{2 \times 50 \times 55 \times 1,5^2}{3 \times 20 \times 1,5} =$$
$$P = \frac{12375}{90} = 137,5 \text{ kgf.}$$
$$P = 137,5 \text{ kgf.}$$

Faça valer a pena

1. O dobramento é um dos três tipos de conformação plástica obtidos pela operação de estampagem. Na categoria estampagem, o dobramento pode definir as dimensões finais de uma peça ou ainda, em conjunto com os outros tipos de estampagem, o corte e a estampagem profunda podem produzir peças mais complexas. Assim, apesar de ser um processo relativamente simples, torna-se bastante importante no grupo de processos de conformação plástica de metais.

Sobre o dobramento, analise as afirmações a seguir e indique se são verdadeiras (V) ou falsas (F).

() O dobramento ocorre quando um metal com forma inicial de tira ou outro formato de *blank* é submetido a esforços de compressão e sofre uma deformação plástica.

() Durante a operação de dobramento, o material fica submetido às forças de tração que ocorrem em duas direções opostas para promover a deformação e que darão uma nova forma a uma superfície que inicialmente é plana, passando para duas superfícies inclinadas.

() Na dobra de um metal, é considerado como um ângulo ideal aquele que fique a noventa graus, definindo, assim, um canto vivo na junção entre os novos lados.

() Em uma operação de dobramento ou encurvamento, ocorre uma mudança dimensional da peça, que pode ocorrer em sua largura, seu comprimento ou na espessura do material.

Agora, assinale a alternativa que apresenta a sequência CORRETA para verdadeiro (V) ou falso (F).

- a) V - V - F - F.
- b) F - V - V - V.
- c) F - F - V - V.
- d) F - F - V - F.
- e) F - F - F - F.

2. Sobre a elasticidade do metal em uma operação de dobramento, podemos dizer que essa característica funciona como o efeito mola e que é necessária para que as dimensões exatas da peça em processo de dobra sejam obtidas.

Sobre o efeito da característica de elasticidade dos metais em uma operação de dobra, analise as asserções a seguir e a relação entre elas.

I. No projeto e na confecção de uma matriz de dobra, é necessário que sejam definidos os ângulos de dobramento mais acentuados.

PORQUE

II. A característica de elasticidade dos metais pode levar um material submetido a dobra a apresentar um retorno à sua forma original quando está sendo produzido com a utilização de um material duro.

Agora, assinale a alternativa que apresenta a análise CORRETA em relação as asserções.

- a) As duas asserções são verdadeiras, porém a II não é uma justificativa correta para a I.
- b) As duas asserções são verdadeiras, e a II justifica corretamente a I.
- c) A asserção I é verdadeira, e a II é falsa.
- d) A asserção I é falsa, e a II é verdadeira.
- e) As duas asserções são falsas.

3. Existem três formas mais conhecidas e difundidas para o dobramento por estampagem.

Observe o quadro a seguir: na primeira coluna são apresentados os tipos de dobramentos com suas punções e as formas de ação do punção sobre a chapa; e na segunda coluna, mostra-se quando é aplicado cada um desses conceitos de dobra.

Tipo de dobramento e punção	Aplicação
A. Dobramento de ação frontal com punção frontal e ângulo.	I. Para dobrar pequenas peças
B. Dobramento e punção em "V".	II. Para fazer dobras curvas ou fechadas.
C. Dobramento em "L" ou "U", com um braço de alavanca na função de punção.	III. Para dobrar chapas com perfil largo.

Assinale a alternativa que apresenta a associação CORRETA.

- a) A – II; B – III; C – I.
- b) A – I; B – III; C – II.
- c) A – III; B – II; C – I.
- d) A – I; B – II; C – III.
- e) A – II; B – I; C – III.

Seção 3.3

Estampagem profunda

Diálogo aberto

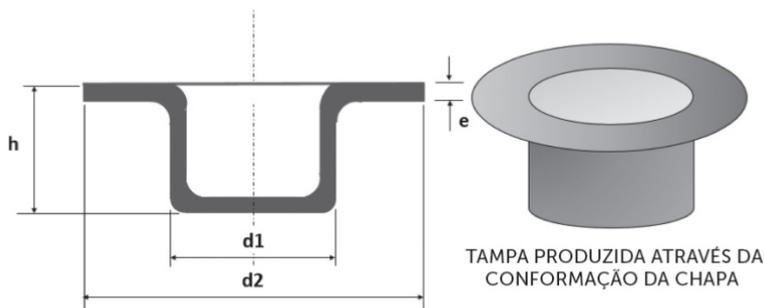
Esta última etapa referente aos estudos de estampagem está reservada para você conhecer e aprender sobre a estampagem profunda e algumas de suas principais características, como a matriz para estampagem profunda, as operações de reestampagem e os defeitos provenientes de estampagem. Você aplicará e exercitará alguns dos cálculos aplicados no processo e projeto de matrizes para estampagem profunda.

Você trabalha na indústria *Stamped Part Ltda.*, que atua na área de ferramentaria e estampagem. Essa é uma empresa de origem inglesa, que abriu uma filial no Brasil e produz as ferramentas conhecidas como estampo de corte, dobra e repuxo e também executa produção de peças estampadas em larga escala para abastecer o mercado sul-americano. Você trabalha no departamento de processos e deverá estabelecer algumas características para produzir uma tampa a partir de um *blank* de chapa.

Com os novos conhecimentos adquiridos nesta etapa de aprendizagem, você estará preparado para definir alguns parâmetros necessários para o ferramental e a fabricação da peça a ser fabricada pela estamperia *Stamped Part Ltda.* por meio da estampagem profunda, que conseguiu efetivar um grande pedido da peça tampa, conforme a Figura 3.32, junto a um de seus clientes.

Observe a peça da Figura 3.32 e, após a aprendizagem, reveja todos os conceitos referentes à estampagem profunda, pois é com esse processo que a peça deverá ser produzida.

Figura 3.32 | Tampa



Fonte: elaborada pelo autor.

O material utilizado é o aço SAE 1045, com $\sigma_t = 56 \frac{\text{kgf}}{\text{mm}^2}$ e as medidas da peça são: $d_1=30 \text{ mm}$; $d_2 = 50 \text{ mm}$; $h = 35 \text{ mm}$; espessura = 1mm.

Você tem condições de realizar alguns dos cálculos e definir algumas especificações para produzir a peça em questão? Quais cálculos você considera importantes para definir a ferramenta e o processo? É possível definir um lubrificante adequado ao processo? Você é capaz de fazer um croqui ou desenho com a ideia de uma ferramenta de estampagem para produção da peça apresentada? Bem, agora é com você. Utilize todos os conhecimentos adquiridos nesta seção de aprendizagem para solucionar o problema apresentado.

Bons estudos!

Não pode faltar

A estampagem profunda ou repuxo é um processo de conformação plástica no qual, a partir de chapas metálicas e planas, são produzidos peças e objetos com perfis variados e ocos. As deformações são realizadas em uma ou mais operações. As chapas utilizadas não apresentam variação em sua espessura quando estampadas.

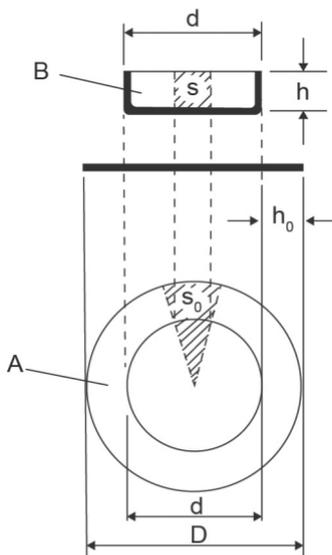
Observe, na Figura 3.33, que a partir de um disco metálico "A" com espessura definida e diâmetro "D", obtém-se uma peça oca com formato de um pequeno cilindro "B" que apresenta um novo

diâmetro "d" e altura "h". Note que a espessura do material, em geral, não é alterada.

Nessa mesma figura, é apresentado o comportamento das fibras do material ao ser deformado pela estampagem profunda, em que a área S_0 dobra-se a 90° e transforma-se na região δ após a estampagem. Percebe-se que a região retangular que constitui a parede cilíndrica δ na conformação ficou deformada, já que, antes do processo, essa região apresentava um perfil trapezoidal com dimensões e área diferentes da região cilíndrica, delimitada pelos diâmetros "D" e "d" que constituíam a curva circular h_0 . Quanto às alturas, também houve alteração depois de a região S_0 dobrar-se a 90° , pois a altura "h" é maior que a altura inicial " h_0 ". Observando a peça já estampada "B", podemos constatar que o disco que forma o fundo do cilindro não sofreu qualquer alteração de forma em relação ao disco metálico inicial "A".

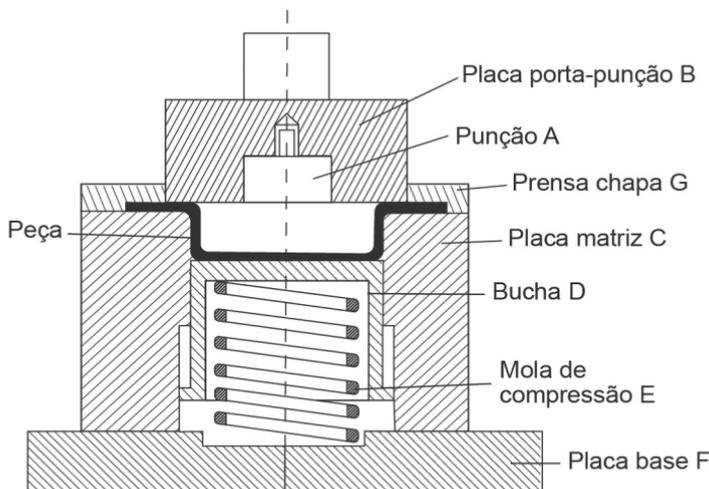
Assim, podemos concluir que, durante o processo de estampagem profunda, cada pequena região de deformação estará sujeita às forças radiais de tração e forças tangenciais de compressão.

Figura 3.33 | Deformação devido à estampagem profunda



Observe a Figura 3.34, que traz o desenho esquemático de uma matriz básica utilizada na estampagem profunda. Nesta figura, é possível ver o punção A, que é fixado no porta-punção B. Esse conjunto é fixado no cabeçote superior da prensa e vai descer para executar o repuxo quando solicitado. O material na forma de disco que será embutido deve alimentar a ferramenta posicionada sobre o disco de retenção G. Esse disco de retenção G é necessário para garantir que não ocorra rugosidade na peça durante o embutimento. Na parte inferior, fica posicionada a matriz C, que apresenta a cavidade para assentamento do material durante o repuxo. Para a conformação da peça, é necessário que o punção A desça, penetre na matriz C até que a peça seja moldada entre o perfil da cavidade e do punção. Ainda sobre a matriz C, é fixada em uma base F, que é fixada na mesa da prensa.

Figura 3.34 | Matriz simples para estampagem profunda



Fonte: Chiaverini (1986, p. 115).

A bucha ou o mancal D será comprimido pela força do punção em conjunto com a mola E e a peça que está sendo produzida. A função da bucha D é evitar que ocorra deformação irregular da chapa. Ao final do curso e finalização da operação, o punção A retorna, e a peça é extraída através da ação do mancal D e da mola E.

Para realizar uma estampagem profunda ou o repuxo, é necessário seguir algumas etapas para planejar e projetar o

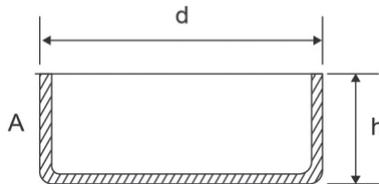
processo. Essas etapas são: análise do produto (raios, tolerâncias, geometria), desenvolvimento do *blank*, definição do número de estágios necessários, cálculo de força de repuxo, sujeitadores, extratores, definição de punções e matrizes e sua folga, projeto dos componentes do primeiro repuxo e dos componentes dos demais repuxos, localizadores e guias flutuantes.

Vamos conhecer mais a fundo algumas dessas etapas.

Para realizar uma estampagem profunda, é necessário definir as dimensões do material a ser utilizado por meio dos cálculos de desenvolvimento de uma peça a ser manufaturada. O uso racional do material também deve ser observado na estampagem profunda e, para isso, o cálculo de desenvolvimento será importante, a fim de estabelecer a menor quantidade possível de material.

Vamos conhecer um método para realizar o cálculo de desenvolvimento que é aplicado para peças ocas e que possuam geometria regular ou com seção circular.

Figura 3.35 | Peça cilíndrica conformada por estampagem profunda



Fonte: Chiaverini (1986, p. 116).

Para o caso de uma peça cilíndrica e oca, com o formato de um copo, conforme a Figura 3.35, os cálculos devem ser realizados da seguinte maneira:

Para calcular a área do disco desenvolvido S , temos:

$$S = \frac{\pi \times D^2}{4}, \text{ onde:}$$

S = área do disco desenvolvido em mm^2 .

D = diâmetro do disco desenvolvido em mm .

Para calcular a área externa do cilindro S' , que compreende a área do fundo mais a área da lateral, temos:

$$S' = \left(\frac{\pi \times d^2}{4} \right) + (\pi \times d \times h).$$

Em que:

S' = área externa do cilindro em mm^2 .

d = diâmetro do fundo do cilindro em mm .

h = altura do cilindro em mm .

Podemos igualar as duas fórmulas, já que as áreas S e S' deverão representar a mesma peça.

$$S = S'$$

$$\frac{\pi \times D^2}{4} = \left(\frac{\pi \times d^2}{4} \right) + (\pi \times d \times h)$$

Simplificando, temos:

$$\pi \times D^2 = (\pi \times d^2) + (4 \times \pi \times d \times h) \Rightarrow$$

$$\Rightarrow D^2 = d^2 + (4 \times d \times h).$$

$$\Rightarrow D = \sqrt{d^2 + (4 \times d \times h)}.$$

Vamos admitir que $h = 2 \times d$, assim:

$$D = d + h = 3 \times d.$$

Esse cálculo pode também ser realizado por meio do volume, substituindo o uso da área.

Para cilindros que tenham as arestas da base arredondadas com a utilização de raio, o cálculo deve levar em consideração esse aspecto. Veja a seguir:

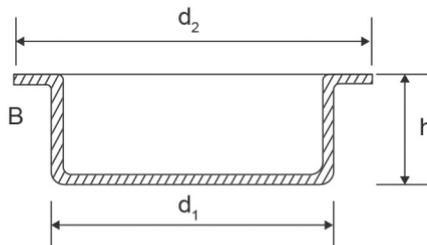
$$D = \sqrt{d^2 + (4 \times d \times h)} - r.$$

Em que:

r = raio de concordância em mm , quando for menor ou igual a $\frac{1}{4}$ da altura h .

Vamos conhecer como deve ser o cálculo de desenvolvimento quando a aplicação é para peças ocas e que possuam geometria regular ou com seção circular com o diferencial de possuir um flange ou aba.

Figura 3.36 | Peça cilíndrica com flange ou aba



Fonte: Chiaverini (1986, p. 118).

Para estampagem profunda em que a peça é um cilindro com flange ou aba, conforme a Figura 3.36, temos:

Para calcular a área da coroa superior (na aba), temos:

$$S_2 = \frac{\pi \times d_2^2}{4}, \text{ em que:}$$

S_2 = área da coroa superior em mm^2 .

d_2 = diâmetro externo da aba ou flange em mm.

Para calcular a área da superfície lateral do cilindro, temos:

$$S_1 = \pi \times d_1 \times h, \text{ em que:}$$

S_1 = área da superfície lateral do cilindro em mm^2 .

d_1 = diâmetro do fundo em mm.

Nesse caso, igualando as fórmulas e simplificando, temos:

$$S = S_1 + S_2.$$

$$\frac{\pi \times D^2}{4} = \frac{\pi \times d_2^2}{4} + \pi \times d_1 \times h$$

Assim, temos que:

$$\pi \times D^2 = \pi \times d_2^2 + (4 \times \pi \times d_1 \times h)$$

e a fórmula final fica:

$$D = \sqrt{d_2^2 + (4 \times d_1 \times h)}$$

Quando a peça apresenta formas irregulares, o desenvolvimento é realizado normalmente por meio de procedimento prático, no qual a placa é cortada e procede-se a estampagem. Em seguida, é necessário inspecionar a peça conformada em suas medidas e contorno e verificar se há material em excesso ou em falta. Constatado que o *blank* ainda não é o ideal para a peça, deve-se recortar outro com as devidas correções em função das falhas percebidas e estampar novamente. Esse procedimento é realizado quantas vezes forem necessárias, devido às diferenças e aos desvios encontrados, até a obtenção das peças dentro das especificações de desenho e projeto.

E a força necessária para o repuxo, você sabe como calcular?

Bem, a força necessária para o repuxo é dada por:

$$Fr = K \times \pi \times d \times e \times \sigma t \times 1,25.$$

Em que:

Fr = força de repuxo.

d = diâmetro do punção.

e = espessura do material.

σt = tensão de tração para repuxo

1,25 = fator de correção.

K = coeficiente que deve ser definido em função da relação entre d e D , sendo D o diâmetro do disco do *blank*.

Quando o cálculo se referir a uma peça não cilíndrica, é necessário substituir o $\pi \times d$ pelo cálculo do perímetro referente à geometria da peça.

Quadro 3.7 | Valores de K em função da relação entre d e D

d / D	0,55	0,575	0,6	0,625	0,65	0,675	0,7	0,725	0,75	0,775	0,8
K	1,0	0,93	0,86	0,79	0,72	0,66	0,6	0,55	0,5	0,45	0,4

Fonte: adaptado de <<https://goo.gl/vb6VTT>>. Acesso em: 13 jun. 2017.



Exemplificando

Como calcular a força necessária para o repuxo de uma peça cujo material é uma chapa de aço SAE 1020, laminado a quente, com tensão de tração igual a 21,4 kgf/mm² e tem espessura de 3,0 mm? O diâmetro do punção é de 25 mm, e o blank em forma de disco tem diâmetro de 41,5 mm.

Vamos resolver a equação da força de repuxo:

$$Fr = k \times \pi \times d \times e \times \sigma t \times 1,25$$

Inicialmente, é necessário definir o valor de k. Assim:

$$\frac{d}{D} = \frac{25}{41,5} = 0,6024$$

Pelo quadro de valores de k em função da relação entre d e D, definimos que o valor de k é 0,86.

Assim:

$$Fr = 0,86 \times \pi \times 25 \times 3 \times 21,4 \times 1,25 \left(\text{mm} \times \text{mm} \times \frac{\text{kgf}}{\text{mm}^2} \right)$$

$$Fr = 5420,43 \text{ kgf}$$

A folga entre punção e matriz para um repuxo é em função da espessura da chapa que será repuxada.

$F_{pm} = e$, para chapas finas até 1,5 mm.

$F_{pm} = e + t + 20\% \text{ tol.máx}$, para chapas grossas, acima de 1,5 mm.

Em que:

e = Espessura da chapa a ser repuxada.

t = Tolerância da espessura da chapa.

20% tol. máx. = 20% da tolerância máxima da chapa.



Existem outras forças importantes de serem calculadas e que compõem o cálculo total que determina a força da prensa necessária. Vamos conhecê-las.

O sujeitador serve para manter a pressão específica sobre o *blank*, evitando o enrugamento da chapa que está em repuxo.

O cálculo da força de sujeição é dado por:

$$F_{sj} = P \times A$$

Onde: F_{sj} = força de sujeição

A = área de contato entre sujeitador e *blank*

P = pressão específica = 0,1 a 0,2 kgf / mm²

Para ferramentas em que a aplicação não requer precisão apertadas, utilizar:

$$F_{sj} = 0,3 \times Fr$$

Os extratores são utilizados para retirar a peça de dentro das matrizes e/ou dos punções. Ela é calculada por:

$$F_{ext} = 0,1 \times F$$

Em que:

F = Força da operação (corte, repuxo e outros)

O cálculo da força total de operação, que é utilizado para definir a máquina necessária, será dado por:

$$F_t = (Fr + F_{sj} + F_{ext}) \times 1,2$$

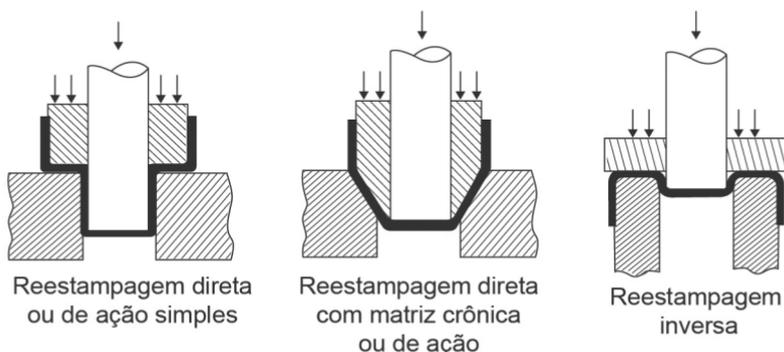
Onde:

1,2 = fator de segurança recomendado.

F_t = Força total da operação ou do estágio.

Como é executado o repuxo das peças com grande profundidade? Bem, sempre que a profundidade a ser executada em um repuxo for grande, é necessário executar várias operações que chamamos de reestampagem, que podem ser realizadas por vários tipos, conforme apresentado na Figura 3.37.

Figura 3.37 | Operações de estampagem



Fonte: Chiaverini (1986, p. 118).

Esse número de operações de reestampagem depende da profundidade de repuxo e de algumas características de conformabilidade referentes ao material da chapa. Teoricamente, a redução máxima obtida em uma única operação de estampagem é em média 50% ou 60% para condições muito boas e favoráveis. Dessa forma, dificilmente uma operação de estampagem profunda será realizada em uma única operação.

É necessário conhecermos o coeficiente de repuxo, que fornece a menor relação entre o diâmetro do punção e diâmetro do *blank* em função do material a ser utilizado na chapa.

Assim, vamos ver como chegar a esses valores.

$$m \leq \frac{d_1}{D}, \text{ em que: } m = \text{coeficiente para a primeira operação.}$$

$$m_1 \leq \frac{d_n}{d_n - 1}, \text{ em que: } m_1 = \text{coeficiente para demais operações.}$$

Quadro 3.8 | Valores de coeficiente de repuxo

Material	m	m_1
Aço para repuxo	0,6 - 0,65.	0,8.
Aço para repuxo profundo	0,55 - 0,6.	0,75 - 0,8.
Aço para carroceria	0,52 - 0,58.	0,75 - 0,8.
Aço inoxidável	0,50 - 0,55.	0,8 - 0,85.
Cobre	0,55 - 0,6.	0,85.
Latão	0,5 - 0,55.	0,75 - 0,8.
Alumínio mole	0,53 - 0,6.	0,8.
Duralumínio	0,55 - 0,6.	0,9.

Fonte: adaptado de <<https://goo.gl/W6ZjRp>>. Acesso em: 13 jun. 2017.



Pesquise mais

É importante que você conheça fisicamente o que é e como funciona um processo de estampagem, a ferramenta, a máquina utilizada. Acesse os vídeos indicados a seguir e veja o funcionamento desses equipamentos. O processo de aprendizagem ficará mais fácil vendo como a estampagem ocorre.

LUIZ Campos. **Simulação de prensa e ferramenta**. 2014. Disponível em: <<https://www.youtube.com/watch?v=W0DsRP6qU8k>>. Acesso em: 2 jul. 2017.

KF Estamparia. **Processo e planejamento de estampagem**. 2009. Disponível em: <<https://www.youtube.com/watch?v=hSu-9jNr3CM>>. Acesso em: 2 jul. 2017.

A lubrificação é importante para melhorar o rendimento do processo de estampagem profunda. Os esforços utilizados no processo são reduzidos, assim como o desgaste das ferramentas. Os tipos de óleos utilizados são aqueles para pressão extrema que mantêm a chapa protegida contra corrosão e são produzidos com material de fácil remoção e desengraxe. Os tipos de óleos mais

utilizados são os minerais com uma série de aditivos, como o Pb, P, Cl e gorduras orgânicas.

As máquinas utilizadas para estampagem profunda continuam sendo já estudadas mecânica e hidráulica.



Refleta

Os projetos de estampo estão cada vez mais complexos e com uma necessidade de eficiência produtiva maior. Softwares para agilizar o processo e reduzir os custos de projeto são cada vez mais utilizados.

Refleta qual a importância e o volume de aplicação de um software CAD/CAE na atividade de projetar e conceber as ferramentas de estampagem.

Você pode ler um pouco sobre esse tema no artigo indicado a seguir para auxiliá-lo nessa reflexão.

SARAFANA, Nuno M. R. de S. **Aplicação de software CAD/CAE na concepção de ferramentas de estampagem** – um estudo de caso. Universidade Nova de Lisboa. Faculdade de Ciência e Tecnologia. Departamento de Engenharia Mecânica e Industrial. Lisboa. 2010. Disponível em: <https://run.unl.pt/bitstream/10362/4838/1/Sarafana_2010.pdf>. Acesso em: 2 jul. 2017.

Sem medo de errar

Você vai definir alguns parâmetros necessários para o ferramental e a fabricação da peça “tampa”, a ser fabricada pela estamparia *Stamped Part Ltda.* por meio da estampagem profunda. Você deverá responder a algumas perguntas, como: é necessário fazer alguns dos cálculos e definir algumas especificações para produzir a peça em questão? Quais cálculos você considera importante para definir a ferramenta e o processo? É possível definir um lubrificante adequado ao processo? Você é capaz de fazer um croqui ou um desenho com a ideia de uma ferramenta de estampagem para produção da peça apresentada? Bem, agora é com você. Utilize todos os conhecimentos adquiridos nesta seção de aprendizagem para solucionar o problema apresentado.

O material utilizado é o aço SAE 1045, com $\sigma_t = 56 \frac{\text{kgf}}{\text{mm}^2}$ e

as medidas da peça são: $d_1=30$ mm; $d_2 = 50$ mm; $h = 35$ mm; espessura = 1mm.

Sim, para definir a ferramenta e alguns parâmetros do processo, é necessário realizar alguns cálculos, como: desenvolvimento do *blank*, definição do número de estágios necessários, cálculo de força de repuxo, sujeitadores, extratores, folga.

Vamos calcular esses parâmetros.

Com o cálculo do desenvolvimento, temos o diâmetro do *blank*.

$$D = \sqrt{d_2^2 + (4 \times d_1 \times h)}$$
$$D = \sqrt{50^2 + (4 \times 28 \times 35)}$$
$$D = 80,12 \text{ mm.}$$

Vamos verificar qual é a redução em %.

$$\text{Redução em \%} = \frac{100 \times (80,12 - 28)}{80,12}$$

$$\text{Redução em \%} = 65,05 \%$$

O valor calculado está acima do permitido, que é de 50 a 60%. Assim, confirmamos a necessidade de utilizar mais de uma etapa para essa estampagem.

Portanto, vamos calcular todas as reduções para reestampagem.

Considerando que a primeira redução será de 45%, definido a partir do Quadro 3.8, para aço para repuxo profundo, temos 0,55.

$$m \leq \frac{d_1}{D} \Rightarrow d_1 = m \times D$$

$$d_1 = 0,55 \times 80,12 = 44,06 \text{ mm}$$

Para as demais reduções, vamos utilizar reduções de 25%, conforme Quadro 3.8 para aço repuxo profundo, cujo valor é 0,75.

$$d_2 = 0,75 \times 44,06 = 33,045 \text{ mm}$$

$$d_3 = 0,75 \times 33,045 = 24,78 \text{ mm}$$

Como o diâmetro desejado é 28 mm, nesse último estiramento, utilizamos a medida de 28 mm para a última etapa.

Ficou definido que serão utilizadas três etapas.

Para calcular a força, devemos definir os K.

Conforme Quadro 3.7, devemos utilizar $K_1 = 1$, $K_2 = 0,5$ e $K_3 = 0,4$.

Para o cálculo da força necessária para o repuxo, temos:

$$Fr = k \times \pi \times d \times e \times \sigma t \times 1,25$$

$$Fr_1 = 1 \times \pi \times 44,06 \times 1 \times 56 \times 1,25 = 9689,30 \text{ kgf}$$

$$Fr_2 = 0,5 \times \pi \times 33,045 \times 1 \times 56 \times 1,25 = 3633,49 \text{ kgf}$$

$$Fr_3 = 0,4 \times \pi \times 28 \times 1 \times 56 \times 1,25 = 2463,00 \text{ kgf}$$

Vamos calcular as demais forças:

Força de extração:

$$F_{ext} = 0,1 \times Fr$$

$$F_{ext_1} = 0,1 \times 9689,30 = 968,93 \text{ kgf}$$

$$F_{ext_2} = 0,1 \times 3633,49 = 363,35 \text{ kgf}$$

$$F_{ext_3} = 0,1 \times 2463,00 = 246,3 \text{ kgf}$$

Força do sujeitador:

$$F_{sj} = P \times A = 0,2 \times \frac{\pi \times 80,12^2}{4} = 1008,33 \text{ kgf}$$

$$F_{total} = (Fr + F_{ext} + F_{sj}) \times 1,2$$

$$F_{total} = (\sum Fr + \sum F_{ext} + \sum F_{sj}) \times 1,2$$

$$F_{total} = (15785,8 + 1578,6 + 1008,4) \times 1,2$$

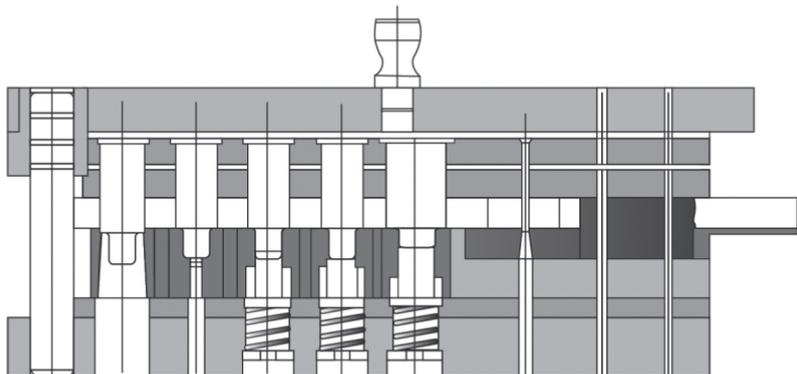
$$F_{total} = 20847,36 \text{ kgf}$$

A folga entre punção e matriz é em função da espessura da chapa. Para chapa de 1 mm, temos que a folga será também igual a 1 mm.

Os tipos de óleos mais utilizados são os minerais, com uma série de aditivos, como o Pb, P, Cl e gorduras orgânicas.

Veja um desenho com a ideia de uma ferramenta de estampagem para produzir a peça, sem considerar o número de etapas.

Figura 3.38 | Estampo progressivo



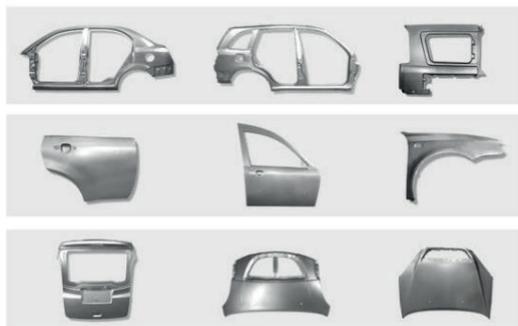
Fonte: Provenza (1991, p. 343).

Estampagem com corte, dobra e repuxo

Descrição da situação-problema

Imagine que seu chefe solicitou que você avaliasse e determinasse a melhor forma para manufaturar todas as peças de uma lataria de automóvel, apresentadas na Figura 3.39. Qual processo e quais tipos você indicaria? Por que esse processo indicado é o mais apropriado? Quais as vantagens de se utilizar esse processo? Quais as etapas para realizar esse processo? Quais as principais ferramentas utilizadas?

Figura 3.39 | Capô: peças estampadas



Fonte: <<https://goo.gl/3PuYTM>>. Acesso em: 2 jul. 2017.

Resolução da situação-problema

O processo mais apropriado para fabricar esses tipos de peça é a estampagem, por meio de suas três modalidades: o corte, a dobra e o repuxo. Esse é um processo de mudança de forma por deformação plástica e é um dos únicos aplicados em chapas, para obter-se peças não planificáveis, ou seja, peças que devem ser obtidas por meio de uma só conformação e jamais em sucessivas dobras ou repuxos. A estampagem fabrica muitas peças e componentes, principalmente para a indústria automotiva, de eletrodomésticos e alimentar. Peças para automóveis, como portas, capô, painéis e outras, além de latas de bebida, laterais de geladeira e fogão e mesa superior de fogão são alguns exemplos dos produtos manufaturados pela estampagem.

Esse processo é apropriado para fabricar peças a partir de vários tipos de material, como o aço de baixo carbono, o aço inoxidável,

o cobre, o alumínio e diferentes ligas não ferrosas. O processo de estampagem também é apropriado para fabricar grandes volumes ou séries de peças, apresentando muitas vantagens com o seu uso, como: custo por peça reduzido; alta produção; retira a peça finalizada do processo com bom acabamento superficial; exige pouco custo aplicado ao controle de qualidade, pois mantém uma uniformidade na produção do produto e a detecção de desvios é rápida; obtém uma maior resistência das peças em função da conformação, o que gera o encruamento no material; tem ótima precisão dimensional. Como desvantagem, o alto custo do ferramental deve ser registrado.

Para realizar uma estampagem profunda ou o repuxo, é necessário seguir algumas etapas para planejar e projetar o processo. Essas etapas são: análise do produto (raios, tolerâncias, geometria), desenvolvimento do *blank*, definição do número de estágios necessários, cálculo de força de repuxo, sujeitadores, extratores, definição de punções e matrizes e sua folga, projeto dos componentes do primeiro repuxo e dos componentes dos demais repuxos, localizadores e guias flutuantes.

As duas ferramentas principais da estampagem são o punção e a matriz, que trabalham sobre uma prensa mecânica ou hidráulica para obtenção da conformação de peças metálicas.

O punção é a parte da ferramenta móvel, convexa e que deve se acoplar à matriz, que é côncava.

Faça valer a pena

1. A estampagem profunda ou repuxo é um processo de conformação plástica, no qual, a partir de chapas metálicas e planas, são produzidas peças e objetos com perfis variados e ocós.

Sobre a estampagem profunda, é correto dizer que:

- I. As deformações são realizadas em uma ou mais operações.
- II. As chapas utilizadas não apresentam variação em sua espessura quando estampadas.
- III. O comportamento das fibras do material ao ser deformado pela estampagem profunda transforma uma área quadrada contida na coroa do *blank* em uma área trapezoidal.
- IV. Em um primeiro embutimento, a altura final da peça pós-repuxo é menor que a altura inicial.

Assinale a alternativa que apresenta as afirmações CORRETAS, apenas.

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

2. Calcule a quantidade de reestampagens para uma chapa circular (blank) com diâmetro de 100 mm, cujo primeiro copo embutido gerou o diâmetro de 58 mm. O diâmetro final desejado para a peça é de 32 mm, com uma redução média de 20%.

Assinale a alternativa que apresenta a quantidade de reestampagens necessária e o valor calculado do último diâmetro próximo do diâmetro final desejado.

- a) Três reestampagens; 29,7 mm.
- b) Duas reestampagens; 31,5 mm.
- c) Três reestampagens; 31,9 mm.
- d) Quatro reestampagens; 29,2 mm.
- e) Duas reestampagens; 30,0 mm.

3. O repuxo deve ser calculado com uma força adequada para que as características e a qualidade do produto estampado saiam conforme as especificações. Calcule a força necessária para o repuxo de uma pequena peça com formato de copo cujo material é uma chapa de aço SAE 1040 – laminado a frio, com tensão de tração igual a 60,16 kgf/mm² e espessura de 1,6 mm. O diâmetro do punção é de 40 mm, e o *blank* em forma de disco tem diâmetro de 69,3 mm.

Utilize o quadro a seguir para definir o valor do coeficiente k.

Quadro 3.9 | Valores de K em função da relação entre d e D

d / D	0,55	0,575	0,6	0,625	0,65	0,675	0,7	0,725	0,75	0,775	0,8
K	1,0	0,93	0,86	0,79	0,72	0,66	0,6	0,55	0,5	0,45	0,4

Fonte: adaptado de <<https://goo.gl/r7sb6J>>. Acesso em: 13 jun. 2017.

Assinale a alternativa que apresenta o valor correto para a força de repuxo (em kgf) a ser utilizada para estampar a peça com as características apresentadas.

- a) 5307,5.
- b) 9366,1.
- c) 11011,6.
- d) 14061,5.
- e) 19063,5.

Referências

BALDI Ferramentaria. Disponível em: <<http://www.baldi.ind.br/>>. Acesso em: 30 maio 2017.

BARRIOS, Daniel Benítez et al. **Mecânica** – métodos e processos industriais. Centro Paula Souza. Fundação Padre Anchieta. São Paulo, 2011. Disponível em: <<https://mecanicaetecbatatais.files.wordpress.com/2013/07/mecc3a2nica-vol-5-mc3a9todos-e-processos-industriais.pdf>>. Acesso em: 11 jun. 2017.

BENAZZI JUNIOR, Ivar. CAVERSAN, Elpidio G. **Tecnologia de estampagem 2: dobra e repuxo**. (Apostila.) FATEC – José Crespo Gonzales. Centro Paula Souza. Sorocaba, 2012. Disponível: <http://www.eterfs.com.br/material/mecanica/APOSTILA_DE_ESTAMPO_FATEC-220813-3.pdf>. Acesso em: 11 jun. 2017.

BRITES, Fabiano da Silva et al. Comparação do acabamento superficial e do nível de deformação entre um processo convencional de estampagem e o processo Guerin. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE ENGENHARIA DE FABRICAÇÃO, 7., Itatiaia, 2013. **Anais da Associação Brasileira de Engenharia e Ciências Mecânicas**. Itatiaia, 2013. Disponível em: <<http://abcm.org.br/anais/cobef/2013/PDFS/COBEF2013-0391.PDF>>. Acesso em: 17 jun. 2017.

BUTTON, Sergio Tonini. Estampagem a quente de chapas metálicas: melhorias de desempenho e redução de custos na indústria automotiva. **Revista Manufatura em Foco**. 2015. Disponível em: <<http://www.manufaturaemfoco.com.br/estampagem-a-quente-de-chapas-metalicas-melhorias-de-desempenho-e-reducao-de-custos-na-industria-automotiva/>>. Acesso em: 4 jun. 2017.

CHIAVERINI, Vicente. **Tecnologia mecânica: processos de fabricação e tratamento**. v. 2, 2. ed. São Paulo: McGraw-Hill, 1986.

EASYMec.Net. Disponível em: <<http://www.easymec.net/Default.aspx?app=56>>. Acesso em: 19 jun. 2017.

IDMaterial. Endüstriyel tasarımcı gözüyle malzeme ve malzeme bilimi (Designer industrial em com o olho do material e a ciência dos materiais). Turquia, 2017. Disponível em: <<http://idmaterial.com/2016/02/26/metaller-5/>>. Acesso em: 2 jul. 2017.

KF Estamparia. **Processo e planejamento de estampagem**. 2009. Disponível em: <<https://www.youtube.com/watch?v=hSu-9jNr3CM>>. Acesso em: 2 jul. 2017.

KIMINAMI, Claudio Shyint; CASTRO, Walman Benício de.; OLIVEIRA, Marcelo Falcão. **Introdução aos processos de fabricação de produtos metálicos**. São Paulo: Blucher, 2013.

LUIZ Campos. **Simulação de prensa e ferramenta**. 2014. Disponível em: <<https://www.youtube.com/watch?v=W0DsRP6qU8k>>. Acesso em: 2 jul. 2017.

PAMPLONA, Carlos Fernando M. **Apostila resistência dos materiais** – teoria e exercícios. UFF – Universidade Federal Fluminense. Rio de Janeiro. 2006. Disponível em: <<http://www.uff.br/petmec/downloads/resmat/E%20-%20Flexao%20Pura.pdf>>. Acesso em 18 jun. 2017.

PROCESSOS de fabricação – estampagem. **Telecurso profissionalizante 2000**. Fundação Roberto Marinho. FIESP. 1995. Disponível em: <<https://docs.google.com/viewer?a=v&pid=sites&srcid=ZGVmYXVsdGRvbWFpbnxweTVhYWwyfGd4OjM4MjFhNzE2MDU4N2NiOGM>>. Acesso em: 10 jun. 2017.

PROVENZA, Francesco. **Desenhista de máquinas**. 46. ed. São Paulo: F. Provenza. 1991.

SARAFANA, Nuno Miguel Ribeiro de Sousa. **Aplicação de software CAD/CAE na concepção de ferramentas de estampagem**: um estudo de caso. Universidade Nova de Lisboa. Faculdade de Ciência e Tecnologia. Departamento de Engenharia Mecânica e Industrial. Lisboa, 2010. Disponível em: <https://run.unl.pt/bitstream/10362/4838/1/Sarafana_2010.pdf>. Acesso em: 2 jul. 2017.

Extrusão e outros processos de conformação

Convite ao estudo

Caro estudante, bem-vindo a esta última unidade de ensino, na qual vamos concluir os estudos referentes à manufatura mecânica – conformação plástica de metais.

Na terceira unidade de ensino, você estudou e aprendeu sobre o processo de estampagem e as subdivisões desse processo, constituídas pelo corte, dobra e estampagem profunda.

Para esta quarta unidade, nosso objetivo é que você conheça e aprenda sobre a extrusão e outros processos de conformação de metais que completam o grupo de processos de conformação plástica de metais, a saber: cunhagem, que é o processo utilizado na fabricação de moedas, como as exemplificadas na Figura 4.1, e outros produtos; o repuxamento; a conformação com três cilindros; a fabricação de tubos; a conformação por explosão; o estiramento; a mandrilagem; e a calandragem.

Figura 4.1 | Moeda israelita – cunhagem



Fonte: <<https://pixabay.com/pt/shekel-novo-shekel-moeda-israel-1490026/>>. Acesso em: 12 jul. 2017.

A CONFORMATUDO Ltda. é uma empresa que trabalha com conformação plástica de metal e tem, em sua fábrica, uma variedade ampla desse tipo de processo. Nesta unidade de ensino, você passará por algumas etapas diferentes nesta empresa. Primeiro você estará concorrendo a uma vaga para trabalhar no departamento de processos e terá que demonstrar conhecimentos sobre uma série de características de um processo de extrusão existente na fábrica. Em um segundo momento, você já estará contratado e trabalhando na empresa e será o responsável por colocar um novo processo de cunhagem de uma medalha em operação, cuidando de todos os preparativos para executar a cunhagem da medalha. Como terceira atividade, você deverá fazer um estudo para entender as diferenças entre uma calandragem de chapas grossas e calandragem de chapas finas. Esse estudo será necessário, pois a CONFORMATUDO recebeu uma consulta para trabalhar com calandragem de chapas grossas e tem algumas dúvidas sobre as condições técnicas para executar o trabalho já que tem experiência apenas em calandragem de chapas finas.

Surgirão muitas perguntas sobre as atividades e processos estudados. Cálculos são necessários? Quais equipamentos e máquinas são necessários? Quais as principais características e especificações das ferramentas envolvidas? Bem, essas são algumas das perguntas que, com certeza, deverão ser respondidas durante essa etapa de estudo, e seu aprendizado sobre todos os temas abordados será nosso maior objetivo.

Tenha uma ótima unidade de estudos e aproveite bem!

“Para ganhar conhecimento, adicione coisas todos os dias. Para ganhar sabedoria, elimine coisas todos os dias.” Lao-Tsé
– Filósofo e escritor da Antiga China.

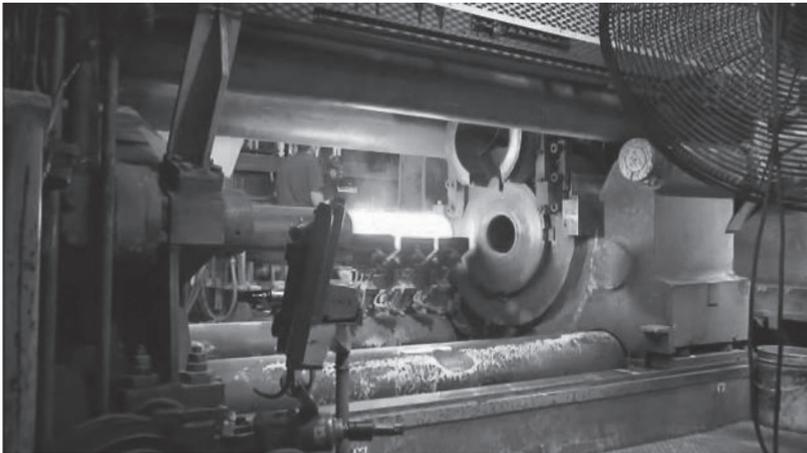
Seção 4.1

Extrusão

Diálogo aberto

A partir de agora, você vai estudar e aprender sobre a extrusão, que é mais um típico e importante processo de conformação plástica de metais. Nesses estudos referentes à extrusão, você vai estudar sobre seus fundamentos, conhecer o que é uma extrusão a quente (conforme apresentado na Figura 4.2) e a frio e quais são as forças aplicadas no processo. Conhecerá também os defeitos que podem ocorrer no processo de extrusão.

Figura 4.2 | Extrusão a quente



Fonte: <<https://i.ytimg.com/vi/P0vE1oJNAjM/sddefault.jpg>>. Acesso em: 11 jul. 2017.

A CONFORMATUDO Ltda. é uma empresa que trabalha com conformação plástica de metal e tem, em sua fábrica, uma variedade ampla desse tipo de processo. Você candidatou-se e está concorrendo a uma vaga para trabalhar no departamento de processos e, em um dos testes práticos ao qual você é submetido, o gerente da área solicitou que descreva como é realizado um processo de extrusão de uma barra redonda de 20 mm de diâmetro x 6 m de comprimento e material SAE 1010. Ele solicita que você apresente

um plano de produção para essa peça. Assim, você deverá saber: quais são as principais características desse processo de extrusão e que são importantes para compor esse plano de produção da peça? Você que já aprendeu, nesta disciplina muito sobre o conteúdo de extrusão, então consegue indicar o tipo de máquina adequado? E as características da matriz de extrusão? Existe necessidade de alguns cálculos? Se sim, quais são os principais cálculos a executar? Quais os cuidados a serem tomados devido a possíveis falhas na peça?

E então, quer a vaga? Pesquise sobre os tipos de extrusão e os equipamentos utilizados para cada aplicação, estude sobre as matrizes e suas características importantes, por exemplo, ângulo de ataque. Verifique os principais cálculos possíveis de serem realizados, como a força de extrusão aplicada, explique o funcionamento do equipamento, faça um croqui da matriz.

Tenha atenção, força, concentração e demonstre conhecimento para buscar esta vaga.

"O homem realmente culto não se envergonha de fazer perguntas também aos menos instruídos". Lao-Tsé – Filósofo e pensador chinês.

Não pode faltar

A extrusão é um processo de conformação plástica em que é utilizada uma força de compressão para empurrar o material com elevada pressão através de uma matriz que apresenta um orifício de acordo com o perfil da peça que se deseja produzir. Nessa passagem do metal pela matriz, ocorre uma redução na seção transversal de forma constante já que as medidas e a geometria da matriz são únicas e não se alteram.

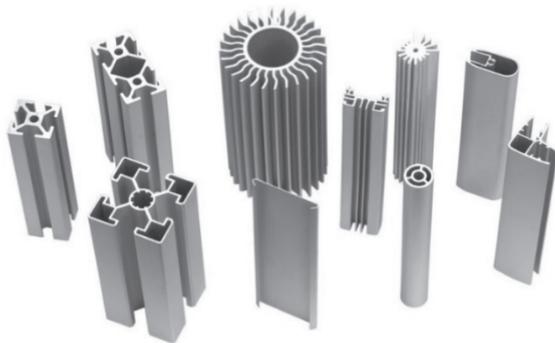
A matéria-prima da extrusão é o tarugo, que é um bloco de metal perfilado e produzido por meio do processo de laminação de um lingote.

Uma das características da extrusão é ser semicontínuo em que cada tarugo de metal se transforma em uma peça e é manufaturado individualmente. Os produtos produzidos por meio da extrusão são principalmente semiacabados e podem ter uma gama muito grande de formas de seção transversal vazada ou cheia, conforme

apresentado na Figura 4.3. Entre os produtos regulares na extrusão, estão os tubos com as mais variadas seções transversais, trilhos para portas deslizantes, quadros de portas e janelas. Outros produtos, com perfis mais complexos, como engrenagens, maçanetas e trancas, podem ser produzidos e cortados de acordo com os tamanhos e especificações das peças. Uma outra maneira de utilização da extrusão para produzir peças e componentes para bicicletas, motocicletas, automóveis, ferramentas, equipamentos de transporte, equipamentos agrícolas e maquinários pesados é por meio de sua combinação com o processo de forjamento.

Em relação aos materiais mais utilizados na extrusão, temos o aço de baixo carbono, o alumínio, o chumbo, o cobre e o magnésio. Todos esses materiais devem apresentar propriedades mecânicas adequadas para suportar o esforço do processo e facilitar o trabalho por extrusão, como ductilidade, fluência, resistência a ação dos esforços impostos pelo processo, resistência a alta temperatura imposta pelo processo ou pela existência de atrito.

Figura 4.3 | Peças extrudadas

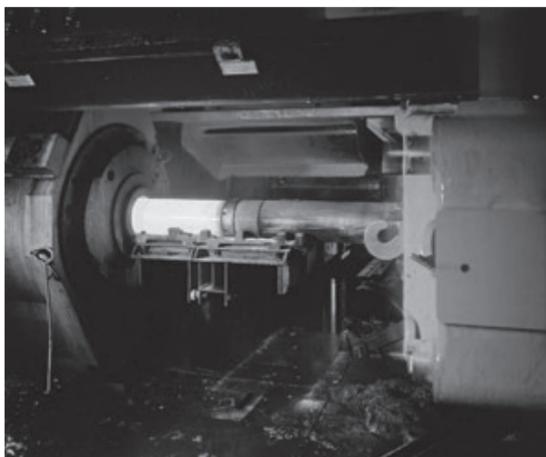


Fonte: <<http://www.allproducts.com/trades/metalwares/product01.html>>. Acesso em: 11 jul. 2017.

O processo de extrusão pode ser realizado a quente, morno ou frio. Devido aos grandes esforços empregados no processo, na maioria das vezes, a extrusão ocorre a quente, conforme pode ser verificado na Figura 4.4. A ductilidade do material a extrudar é um fator preponderante para decidir sobre a forma de executar a manufatura de cada produto. Quanto mais dúcteis, significa que

possuem maior capacidade de deformação, e a extrusão pode ser realizada a frio. Para materiais e ligas com menor ductilidade à temperatura ambiente, a deformação é realizada a quente para que sejam reduzidas as forças necessárias. O processo a frio está sendo ampliado a cada dia com o desenvolvimento de novas técnicas de extrusão a frio.

Figura 4.4 | Extrusão a quente



Fonte: <http://tkmnasteelprofiles.com/manufacturing_processes.html>. Acesso em: 12 jul. 2017.

A extrusão a quente oferece alguns problemas relacionados à matriz e ao material. Vamos entender um pouco melhor esses problemas. Com relação à matriz, é observado que, devido à alta temperatura, existe um desgaste muito grande da matriz de extrusão que eleva o custo da operação e gera uma constante preocupação com a qualidade do produto. Quanto ao material, é muito frequente que o tarugo, quando aquecido, crie uma cobertura de óxido que interfere no fluxo do material, podendo gerar um acabamento muito ruim do produto extrudado. Outro problema relacionado ao material é o esfriamento do tarugo, que pode ocorrer na câmara da máquina e, se isso ocorrer, o processo pode sofrer deformações desuniformes, já que, nesse caso, o material pode apresentar variação quanto ao seu ponto de recristalização em sua seção transversal e ao longo de seu comprimento. Uma ação preventiva bastante utilizada na prática é o pré-aquecimento da matriz de extrusão, que auxilia na manutenção da temperatura

do tarugo e prolonga a vida da matriz, que passa a não sofrer frequentes choques térmicos. No Quadro 4.1 que segue, podem ser verificadas as faixas de temperaturas para alguns dos metais mais utilizados na extrusão.

Quadro 4.1 | Temperaturas de extrusão

Temperatura de extrusão - por tipo de metal	
METAL	TEMPERATURA °C
Chumbo	200 - 250
Alumínio e suas ligas	375 - 475
Cobre e suas ligas	650 - 950
Aços	875 - 1300
Ligas refratárias	975 - 2200

Fonte: adaptado de <<https://goo.gl/xGUus2>>. Acesso em: 12 jul. 2017.

As matrizes utilizadas na extrusão a quente são fabricadas de aço, ferramenta para trabalho a quente e podem ser, ainda, revestidos com zircônia, o que ajuda a aumentar a vida dessas ferramentas. Nas matrizes para manufaturar barras e tubos, esse artifício de revestimento é bastante efetivo e utilizado.

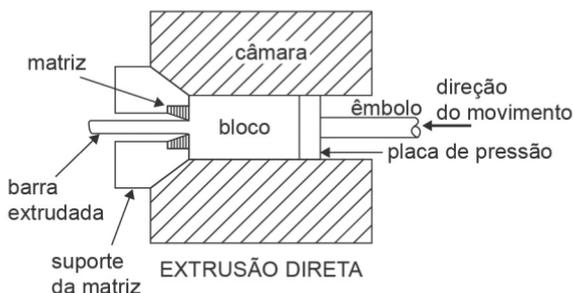
Na extrusão a quente, uma lubrificação adequada é vital para o sucesso da operação. Para extrusão de aço, aço inox, metais e ligas para altas temperaturas, o lubrificante mais utilizado é o vidro, e o processo é chamado de *Séjournet*. Quando a extrusão é realizada em metais que apresentem tendência de aderir à parede da matriz, a lubrificação ocorre por meio de um revestimento fino de metal macio e que tenha baixa resistência, como o aço doce ou cobre e, nesse caso, o procedimento é chamado de enlatamento ou jaquetamento.

A extrusão a frio é utilizada para produzir peças de aço, aço inoxidável, ligas de alumínio, chumbo, magnésio e cobre. Esse processo combina alguns tipos de operação, como a extrusão direta, a indireta e o forjamento. As peças e os componentes fabricados por extrusão a frio podem apresentar um peso de até 45 kg e comprimento de até 2 m, e a proporção que a porcentagem de carbono do material cresce, a dificuldade no processo de extrusão também aumenta. Vamos conhecer alguns produtos que podem ser produzidos pela extrusão a frio?

Algumas peças extrudadas a partir de aço com até 0,20% de carbono e que são facilmente extrudadas são: capas de mancal, pinos de pistões, porcas de rodas, invólucro de velas de ignição, capas de juntas esféricas. Já quando se utiliza aço com porcentagem de carbono acima de 0,2%, o processo de extrusão se torna mais difícil, e é necessário tratar a matéria-prima pela esferoidização para alterar sua estrutura, de forma que fique apto a passar pela extrusão. A esferoidização é um tipo de tratamento térmico para o aço, com alto teor de carbono e que tem o objetivo de dar forma esférica a um dos tipos de grãos que formam o aço, a cementita e, assim, reduzir sua dureza e torná-lo apto ao processo de conformação plástica. Alguns exemplos de peças produzidas com esses materiais são: porcas, forquilhas de junta universal, eixos de motores e geradores e apoio de suspensão dianteiro. Para aços-liga, aplicados a peças que receberão algum tipo de tratamento térmico, como têmpera ou cementação, a esferoidização é mandatória antes de executar a extrusão que fica ainda mais difícil. Algumas peças trabalhadas nesse caso são: parafusos, pinos, eixos, invólucros de esferas, buchas e pistões.

Vamos conhecer agora os tipos de extrusão? A extrusão é dividida em dois tipos: a **direta** e a indireta. Uma extrusão direta, conforme apresentado na Figura 4.5, é a forma mais tradicional desse processo, em que a câmara da extrusora é abastecida com um tarugo de metal (bloco) que é pressionado contra a matriz por um êmbolo ou atuador hidráulico que compõe a máquina para passar pelo seu orifício e tomar a forma dele. Assim, na extrusão direta, o tarugo se movimenta em direção à matriz. Nesse tipo de extrusão, o êmbolo fica sujeito à abrasão e alta temperatura e, para sua proteção, é utilizado um bloco de aço conhecido como falso pistão, posicionado entre o êmbolo e o tarugo. Como garantia de que todo o metal ultrapasse a matriz, também é utilizada uma peça de grafite entre o falso pistão e o tarugo.

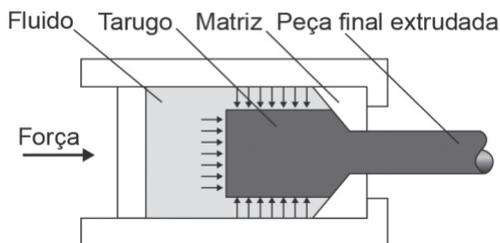
Figura 4.5 | Extrusão direta



Fonte: Chiaverini (1986, p. 125).

Um outro método de extrusão direta é a **hidrostática** (veja a Figura 4.6). Nesse tipo de extrusão, a câmara possui um fluido hidráulico, normalmente um óleo vegetal, que forma um filme entre sua parede e o tarugo, eliminando a ocorrência de fricção nas paredes durante o movimento do pistão e do material. A pressão aplicada na extrusão hidrostática é em torno de 1.400 Mpa, e o trabalho é realizado a frio. Além do baixo atrito, as altas relações de extrusão e os ângulos pequenos de matriz são as vantagens acreditadas ao método. É possível utilizar esse processo a quente, porém, nesse caso, deve-se substituir o fluido para vidros, ceras ou polímeros, que, além de lubrificar e facilitar o deslocamento do material, serve para manter o isolamento térmico do tarugo.

Figura 4.6 | Extrusão hidrostática

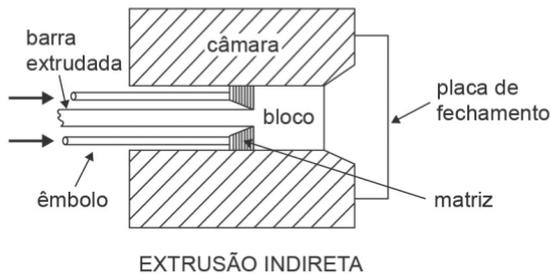


Fonte: Kiminami, Castro e Oliveira (2013, p. 86).

A extrusão **indireta**, de acordo com a Figura 4.7, é a matriz que se desloca em direção ao tarugo (bloco) e, devido a isso, é também chamada de reversa ou invertida. Nesse caso, as pressões e força de atrito são reduzidas quando comparadas com o tipo direto,

devido ao tarugo permanecer estático e não haver movimento relativo entre ele e as paredes da câmara. Como pontos negativos da extrusão indireta estão a restrição na produção de formas e perfis complexos e a limitação de força proporcionada em função de o êmbolo apresentar um furo. Na montagem do conjunto, o êmbolo que é oco é fixado na matriz para realizar o deslocamento, e a porta de entrada da câmara deve ser fechada com uma placa.

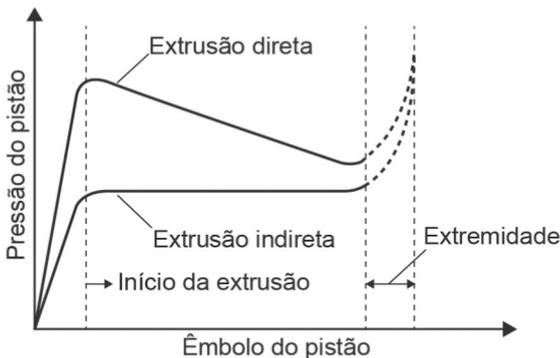
Figura 4.7 | Extrusão indireta



Fonte: Chiaverini (1986, p. 125).

Na Figura 4.8, a seguir, você pode observar as curvas típicas de pressão de extrusão contra o percurso do êmbolo para a extrusão direta e indireta.

Figura 4.8 | Curvas comparativas esforço por tipo extrusão



Fonte: Kiminami, Castro e Oliveira (2013, p. 87).



Observe os vários métodos de extrusão nas figuras a seguir. Você consegue definir para que tipo de peça cada um destes tipos é utilizado? E quais são as principais características de cada um destes métodos? Reflita e pesquise mais, se achar necessário.

Figura 4.9 | Extrusão para trás matriz aberta

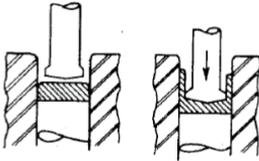


Figura 4.10 | Extrusão para trás matriz fechada

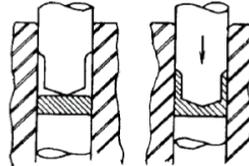


Figura 4.11 | Extrusão para frente matriz aberta

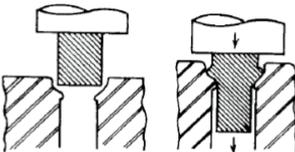


Figura 4.12 | Extrusão para frente matriz fechada

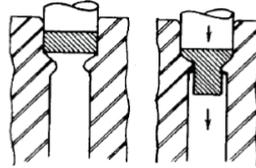


Figura 4.13 | Extrusão para frente tipo "Hooker"

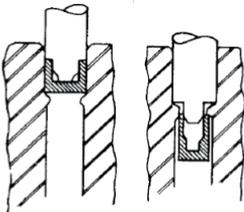
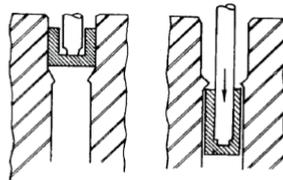


Figura 4.14 | Extrusão - Ironing



Fonte: Chiaverini (1986, p. 127).

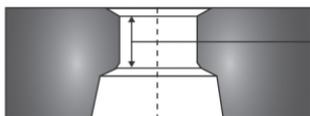
Durante a extrusão, é necessário fazer um acompanhamento do fluxo de metal, pois ele pode determinar a qualidade ou a existência de defeitos no produto final. Em uma extrusão, os grãos do material normalmente se alongam e formam uma estrutura com disposição primaz. As propriedades mecânicas do produto final também são frutos do fluxo do metal no processo.



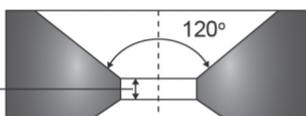
As matrizes para extrusão devem ser cuidadosamente projetadas, pois o fluxo do metal durante a operação dependerá de algumas características, como isenção de cantos vivos, simetria da seção transversal, isenção de mudanças bruscas nas dimensões dentro da seção transversal. Veja a seguir, na Figura 4.15, as configurações típicas de matrizes de extrusão.

Figura 4.15 | Configurações típicas de matrizes

a) Materiais Ferrosos



b) Materiais não-Ferrosos

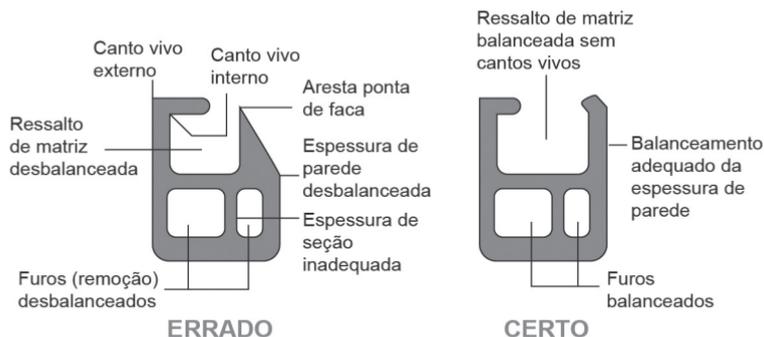


Zona Cilíndrica

Fonte: <<https://goo.gl/xGwxXs>>. Acesso em: 13 jul. 2017.

Na Figura 4.16, você pode observar algumas características ideais para um bom projeto de matriz de extrusão e o que é considerado errado e não deve ser praticado.

Figura 4.16 | Características a observar em um projeto de matriz de extrusão



Fonte: <http://www.cimm.com.br/portal/material_didatico/6506-extrusao-a-quente#.WWldvOmQzIU>. Acesso em: 13 jul. 2017.

Você conhece os parâmetros utilizados na extrusão e como defini-los? Não? Vamos conhecer, então?

Na extrusão existem os parâmetros geométricos e os físicos. Os parâmetros geométricos são: o ângulo da matriz α , a relação de extrusão e o fator de forma.

A relação de extrusão é dada por:

$$\text{Relação de extrusão} = \frac{A_0}{A_f}$$

Em que: A_0 = Área da seção transversal do tarugo (bloco).

A_f = Área do produto extrudado.

O fator de forma é dado por:

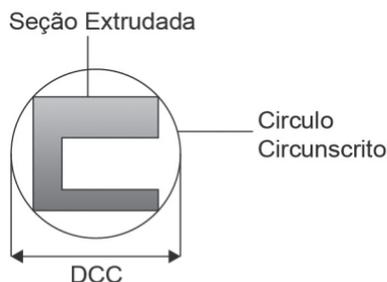
$$\text{Fator de forma} = \frac{P_{\text{extrudado}}}{A_f}$$

Em que:

$P_{\text{extrudado}}$ = perímetro da seção do produto extrudado.

O valor de forma define o grau de dificuldade da operação. Quanto maior o valor, mais complexa é a extrusão. Já o DCC (diâmetro do círculo circunscrito), vide Figura 4.17, representa o diâmetro do menor círculo em que é possível se inscreve a seção transversal do produto extrudado.

Figura 4.17 | Diâmetro do círculo circunscrito



Fonte: <<http://www.cimm.com.br/portal/materiaLdidatico/6504-parametros-da-extrusao#.WWkBlOmQzIU>>. Acesso em: 13 jul. 2017.

Os parâmetros físicos são: a força de extrusão, a velocidade de deslocamento do pistão, o tipo de lubrificante e a temperatura do tarugo.

A força de extrusão é calculada de acordo com:

$$F_{extrusão} = A_0 \times k \times \ln \left(\frac{A_0}{A_f} \right)$$

Em que:

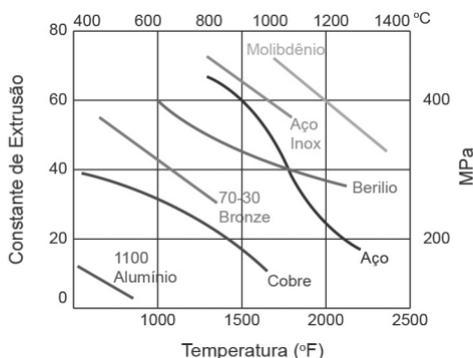
k = constante de extrusão.

\ln = valor dado por variáveis (velocidade etc.).

Assim, conclui-se que a força de extrusão depende de algumas características, como a relação de extrusão, a resistência do material, a fricção na câmara e na matriz, a velocidade de extrusão e a temperatura.

O valor da constante de extrusão k deve ser obtido por meio do gráfico apresentado na Figura 4.18 e é dado em função do material e da temperatura.

Figura 4.18 | Constante de extrusão para metais em várias temperaturas



Fonte: <http://www.cimm.com.br/portal/material_didatico/6504-parametros-da-extrusao#.WWkBlOmQzIU>. Acesso em: 13 jul. 2017.



Exemplificando

É necessário produzir uma peça com diâmetro final de 45 mm através de um tarugo cujo diâmetro tem 100 mm. O material a extrudar é um bronze 70-30, e a temperatura de processo é 1.000 °C. Calcule a força de extrusão em kgf.

Inicialmente, por meio do gráfico "Constante de extrusão para metais em várias temperaturas", determina-se o valor de k . Assim: k é 43 $\frac{\text{kgf}}{\text{mm}^2}$.

$$F_{extrusão} = A_0 \times k \times \ln\left(\frac{A_0}{A_f}\right)$$

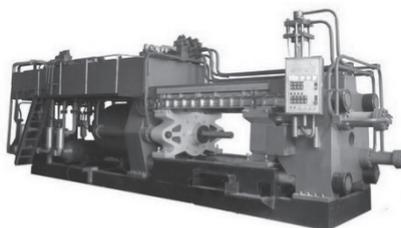
$$F_{extrusão} = \left(\frac{\pi \times 100^2}{4}\right) \times 43 \times \ln\left(\frac{\pi \times 100^2}{\pi \times 45^2}\right)$$

$$F_{extrusão} = 539345,97 \text{ kgf}$$

A velocidade de extrusão se dá em função do material e de outras variáveis do processo e se limita a 0,5 m/s na maioria dos equipamentos.

O equipamento para extrusão, que pode ser visto na Figura 4.19, é a prensa hidráulica que apresenta algumas vantagens para realizar o trabalho, como o controle de velocidade e curso, além da força exercida, que pode ser mantida constante durante todo o curso, o que permite produzir peças longas com alta taxa de produção. Esse equipamento também é conhecido como extrusora e, para peças mais longas (acima de 2 m) ou maiores (acima de 45 kg), principalmente, operam na horizontal. Outros tipos de prensa, como a vertical mecânica ou excêntrica, são utilizados para extrusão a frio, por impacto, e operam na produção seriada de peças e componentes pequenos. Uma prensa hidráulica também pode ser utilizada na vertical para extrusão a frio de peças pequenas, tendo uma vantagem quanto à sua ocupação na fábrica, que é bem menor que uma máquina na horizontal. Para peças e componentes que necessitem de redução progressiva, são utilizadas as prensas especiais dotadas de múltiplos estágios.

Figura 4.19 | Máquina prensa horizontal de extrusão



Fonte: <<http://www.nevilles.co.uk/aluminium/extrusions/>>. Acesso em: 11 jul. 2017.



Existem algumas técnicas para acompanhar e analisar o fluxo do metal, as características obtidas e a qualidade ou não do produto obtido. A seguir, é apresentado um site de vídeo que vai lhe oferecer boas informações acerca do processo de extrusão e do fluxo de metal. Pesquise mais, conheça o processo na prática e aproveite bem as informações.

ILSCO Extrusions Inc. Processo de extrusão alumínio. 2015. Disponível em: <<https://www.youtube.com/watch?v=P8BWQB4Vhk>>. Acesso em: 15 jul. 2017.

O produto obtido pelo processo de extrusão pode apresentar falhas e defeitos? Sim, como em todos os processos, defeitos podem ocorrer e, assim, o processo, o material e o produto devem ser controlados e acompanhados. Os defeitos na extrusão são muitos e afetam o produto final em sua qualidade e resistência. Um desses defeitos é a trinca superficial que ocorre devido a desvios no processo com temperatura ou velocidade altas demais. Trata-se de um defeito intergranular e, para corrigi-lo, é necessário ajustar a temperatura do tarugo e a velocidade do processo. Outras falhas são as linhas internas de óxido no interior do produto devido ao centro do tarugo movimentar-se de forma mais rápida que as partes externas e à formação de cavidade no centro da superfície do material que está em contato com o êmbolo que ocorre pelo mesmo motivo.

Sem medo de errar

Você, como um colaborador na empresa CONFORMATUDO Ltda. deve apresentar um plano de produção para uma barra extrudada de acordo com as especificações indicadas. Assim, é necessário descrever como é realizado um processo de extrusão de uma barra redonda de 20 mm de diâmetro x 6 m de comprimento e material SAE 1010. Portanto, você deverá saber e apresentar: quais são as principais características do processo de extrusão e que são importantes para compor esse plano de produção da peça? Indicar o tipo de máquina adequado e as principais características

da matriz de extrusão. Existe necessidade de alguns cálculos? Se sim, quais são os principais cálculos a executar? Quais os cuidados a serem tomados devido a possíveis falhas na peça?

Vamos às resoluções.

O comprimento da barra que é de 6 m nos indica que a conformação deve ser realizada a quente, pois a frio, o limite máximo de comprimento indicado é de 2 m. A temperatura de extrusão a ser utilizada deve variar entre 875 e 1.300 °C para aço. Como se trata de um aço SAE-1010 de baixo carbono, pode-se utilizar a menor temperatura dessa faixa e não é necessário um pré-tratamento.

Para definir as medidas iniciais do tarugo, pode-se estabelecer qual o comprimento que se deseja trabalhar, por exemplo, e calcular o diâmetro inicial através de uma igualdade de volume.

Vamos estabelecer que um bom comprimento a se trabalhar é 300 mm. Assim:

$$\begin{aligned}\pi \times r_1^2 \times l_1 &= \pi \times r_2^2 \times l_2 \\ \pi \times 10^2 \times 6000 &= \pi \times r_2^2 \times 300 \\ \sqrt{\frac{1844955,6}{942,5}} &= r_2 \\ r_2 &= 44,72 \text{ mm} \\ \Delta_{\text{Tarugo}} &= 89,44 \text{ mm}\end{aligned}$$

A extrusão desse tipo de material (barra longa) pode ser realizada pelo modo tradicional de extrusão, ou seja, extrusão direta. Pré-aqueça a matriz para evitar choque térmico e desgastes e quebras prematuras. A matriz deve ser confeccionada em aço ferramenta para trabalho a quente e pode ser, ainda, revestida com zircônia, o que ajuda a aumentar a vida dessa ferramenta.

A lubrificação é necessária nesse tipo de extrusão, e para extrusão de aço, aço inox, metais e ligas para altas temperaturas (considerar aqui acima de 1.000 °C), o lubrificante mais utilizado é o vidro na forma de microesferas, e o processo é chamado de Séjournet. O tarugo previamente aquecido é mergulhado em um tanque com microesferas de vidro que aderem à sua superfície. Durante a extrusão, essas microesferas deslizam entre o tarugo e a câmara, reduzindo o atrito. Caso a opção de extrusão seja com temperaturas menores que 1.000 °C, deve-se utilizar grafita ou bentonita (mistura de argilas de grãos muito finos), por exemplo.

Como definimos no início que o processo vai trabalhar com a temperatura menor, ou seja, 875 °C, então, nosso lubrificante é a última opção, grafite ou bentonita.

Vamos calcular a relação de extrusão:

$$\text{Relação de extrusão} = \frac{A_0}{A_f} = \frac{\pi \times 89,44^2}{\frac{\pi \times 20^2}{4}} =$$

$$\text{Relação de extrusão} = 20$$

Agora, vamos calcular a força para extrusão:

$$F_{\text{extrusão}} = A_0 \times k \times \ln\left(\frac{A_0}{A_f}\right)$$

Constante de extrusão k , a partir do gráfico da figura 4.18.

$$k = 62 \frac{\text{kgf}}{\text{mm}^2}$$

$$F_{\text{extrusão}} = \left(\frac{\pi \times 89,44^2}{4}\right) \times 62 \times \ln(20)$$

$$F_{\text{extrusão}} = 1166939 \text{ kgf}$$

A máquina a ser escolhida deve ser uma prensa horizontal, devido ao comprimento da barra a extrudar e que possua força superior à força calculada, preferencialmente 25% a mais no mínimo.

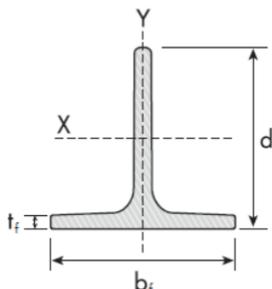
Avançando na prática

Produção por extrusão – perfil T

Descrição da situação-problema

Você trabalha em uma indústria que produz perfis extrudados, e acaba de chegar uma ordem de serviço para produzir a peça perfil T, conforme a Figura 4.20, cujas medidas são $d = b_f = 25,4$ mm, $t_f = 3,18$ mm (bitola 1" x 1/8"). Uma premissa na produção dessa indústria é racionalizar material e tempo de execução; assim, você precisará calcular o menor consumo de matéria-prima para produção. A área da seção transversal, de acordo com o catálogo do fornecedor, é de 1,54 cm². Para produzir a peça utilizando o material extremamente necessário e adequado ao perfil, você deve calcular o DCC que representa o menor diâmetro do material e, assim, tornar o processo economicamente viável. Apresente também o formato da matriz e, por meio de um croqui, o posicionamento dela na extrusora.

Figura 4.20 | Perfil T



Fonte: <<https://www.gerdau.com/br/pt/productservices/products/Document%20Gallery/barras-e-perfis-lamina-perfil-t.pdf>>. Acesso em: 15 jul. 2017.

Resolução da situação-problema

Vamos transformar o valor da área para unidade adequada aos cálculos.

$$1,54 \text{ cm}^2 = 154 \text{ mm}^2$$

Como o perfil T apresenta os dois lados iguais, podemos calcular o DCC utilizando a fórmula equivalente utilizada para um triângulo equilátero. Assim, temos:

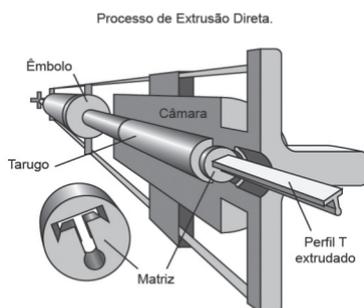
$$R = 0,577 \times b_f = 0,577 \times 25,4$$

$$R = 14,6558 \text{ mm}$$

$$D = 2 \times 14,6558 = 29,32 \text{ mm}$$

O croqui do formato da matriz e de sua posição na prensa horizontal (extrusora) pode ser visto na Figura 4.21, em corte para melhor visualização.

Figura 4.21 | Processo de produção de um perfil T por extrusão



Fonte: adaptada de: <<http://www.nevilles.co.uk/aluminium/extrusions/>>. Acesso em: 11 jul. 2017.

Faça valer a pena

1. O processo de extrusão pode ser realizado a quente, morno ou frio, porém, devido aos grandes esforços empregados no processo, na maioria das vezes, a extrusão ocorre a quente. Realizar a extrusão a frio apresenta algumas vantagens e algumas desvantagens em relação ao processo a quente.

Sobre as vantagens em realizar a extrusão a frio, é correto afirmar que:

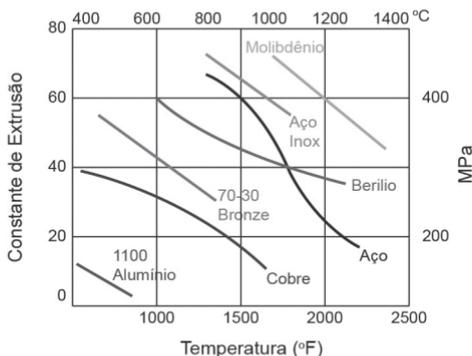
- I. As tensões produzidas no ferramental são relativamente baixas, tornando operacionalmente ideal para qualquer tipo de material.
- II. As medidas e tolerâncias obtidas pelo processo de extrusão a frio apresentam repetibilidade alta, não necessitando de muitos controles e operações posteriores de acabamento.
- III. Não há necessidade de pré-aquecimento do tarugo.
- IV. As taxas de produção e os custos proporcionados são bastante competitivos em relação a outros métodos de fabricação.

Agora, assinale a alternativa que apresenta as afirmações CORRETAS, apenas.

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

2. Calcule a força de extrusão em kgf, necessária para extrudar um tarugo de aço à temperatura de 1.200 °C. O tarugo tem 150 mm de diâmetro, e a peça acabada deve ficar com 60 mm de diâmetro.

Figura | Constante de extrusão para metais em várias temperaturas



Fonte: <<https://goo.gl/rXFv4Q>>. Acesso em: 13 jul. 2017.

Assinale a alternativa que apresenta o valor correto da força de extrusão em kgf.

- a) 701015 .
- b) 713004 .
- c) 761033 .
- d) 789343 .
- e) 797062 .

3. As matrizes para extrusão devem ser cuidadosamente projetadas, pois o fluxo do metal durante a operação dependerá de algumas características específicas dessa ferramenta.

Já o fluxo de metal é que define as propriedades mecânicas, assim como a qualidade do produto final. Pode-se comparar o fluxo do metal com o escoamento de um fluido em um canal.

São características importantes a se considerar em um projeto de matriz para extrusão:

- a) Assimetria da seção transversal, ferramenta bipartida, cantos arredondados.
- b) Isenção de cantos vivos, simetria da seção transversal, isenção de mudanças bruscas nas dimensões dentro da seção transversal.
- c) Cantos vivos, seção transversal contínua, seção transversal sem nervuras.
- d) Revestimento da região de contato, ângulo agudo, berço de entrada do material.
- e) Faces levemente inclinadas, dimensão formadora de medida com ângulo para saída das peças, arestas arredondadas.

Seção 4.2

Outros processos de conformação de metais – cunhagem e repuxamento, conformação com três cilindros, fabricação de tubos

Diálogo aberto

Neste estudo, você vai conhecer e aprender sobre outros quatro processos de conformação de metais, que são, especificamente, a cunhagem, o repuxamento, a conformação com três cilindros e a fabricação de tubos.

Para aplicar os conhecimentos adquiridos ao longo do estudo, você vai dar continuidade às atividades preparadas e realizadas na CONFORMATUDO Ltda., uma empresa que trabalha com conformação plástica de metal e tem, em sua fábrica, uma variedade ampla desse tipo de processo. Você vai dar prosseguimento às diferentes etapas e atividades que devem ocorrer nessa empresa agora que já está contratado e trabalhando nela e será o responsável por colocar um novo processo de cunhagem de uma medalha em operação, cuidando de todos os preparativos para executar a cunhagem da medalha.

Figura 4.22 | Medalhas militares de guerra



Fonte: <<https://pixabay.com/pt/medalhas-medalhas-de-guerra-guerra-1493863/>>. Acesso em: 17 jul. 2017.

Assim, imagine que você foi muito bem nos testes realizados e foi contratado pela CONFORMATUDO. Entrando na fábrica que está operando a todo vapor, em sua primeira semana de trabalho, você se deparou com um processo com o qual ficou impressionado, a cunhagem, e logo tratou de conhecê-lo melhor. Você descobriu, por meio de conversas com os colegas de trabalho mais experientes e a partir de sua própria observação, que se trata de uma operação de modelação em que um material relativamente macio é submetido a pressões extremamente elevadas em uma matriz fechada. Descobriu também que esse processo é utilizado para a produção de moedas, medalhas, talheres e objetos semelhantes e, ainda, que a cunhagem pode ser considerada como uma espécie de forjamento a frio em matriz fechada. Seu novo chefe viu sua empolgação e, por ter um trabalho a realizar nesse processo de cunhagem, logo o escalou. Trata-se da cunhagem de uma medalha, em cobre macio, com diâmetro de 70 mm, cujo *blank* já é fornecido na espessura conforme especificação de projeto. Sendo você o responsável designado para pôr o processo em operação, quais preparativos descreveria para executar a cunhagem da medalha? Você consegue definir como deve ser preparada a matriz de cunhagem? De que forma funciona a prensa de cunhagem? Você é capaz de descrever quais as principais características para executar o trabalho com alto padrão de qualidade? Pesquise e encontre informações a respeito para chegar a todas essas respostas. Durante a seção de aprendizagem, serão fornecidas informações importantes sobre o assunto que o ajudarão a responder e definir todos os preparativos necessários.

Então, mãos à obra e bons estudos.

Não pode faltar

A cunhagem é um processo de conformação plástica que normalmente é realizado a frio, por meio de prensagem do metal em matriz fechada, moldando, de uma só vez, o perfil e a impressão definidos para a peça. Assim, é reproduzido o desenho da matriz em uma ou ambas as faces ou em uma das superfícies da peça. Os produtos manufaturados por meio da cunhagem vão de moedas e medalhas de todos os tamanhos, objetos de decoração e de uso cotidiano, como talheres, até peças para indústrias automobilísticas, em que a precisão dimensional é imprescindível.

Quanto aos materiais que podem ser submetidos à cunhagem, podemos citar a família dos aço-carbono e aço-liga com no máximo 0,3% de carbono, aço inoxidável, ouro e suas ligas, prata, bronze e cobre.

As ferramentas para cunhagem, conforme pode ser verificado na Figura 4.23, devem ser confeccionadas em aço rápido que apresente boa resistência ao desgaste adesivo e abrasivo, boa resistência à compressão e alta tenacidade, pois estarão sujeitas a falhas durante seu uso e operação, como quebra, desgaste abrasivo e adesivo e deformação plástica.

Figura 4.23 | Matriz de cunhagem



Fonte: <<http://www.szslswl.net/Newsinfo.aspx?id=1190>>. Acesso em: 17 jul. 2017.

Existem dois tipos de cunhagem, a simples e a maciça. Na cunhagem simples, após a conformação, não existe qualquer alteração na espessura do metal ao longo de toda a superfície; e na maciça, a espessura do metal sofre alteração.

O cálculo da máxima força para conformação por cunhagem é dado por:

$$F_{\text{cunhagem}} = k_{cf} \times A_p$$

Em que :

F_{cunhagem} = força requerida para cunhagem em kgf

k_{cf} = resistência oposta pelo material ao fim da conformação em kgf / mm²

A_p = Área da superfície cunhada em mm²

Os valores de k_{cf} são dados pela pelo Quadro 4.2, apresentado a seguir em função do material e do tipo de cunhagem.

Quadro 4.2 | Valores de k_{cf}

Material	Cunhagem simples em kg/mm ²	Cunhagem maciça em kg/mm ²
Alumínio 99 %	5 a 8	8 a 12
Ligas de alumínio	Até 15	Até 35
Latão 63	20 a 30	150 a 180
Cobre macio	20 a 30	80 a 100
Cobre duro	30 a 50	100 a 150
Níquel puro	30 a 50	160 a 180
Prata alemã	30 a 40	180 a 220
Aço Ust 12-13	30 a 40	120 a 150
Aço inoxidável 18-8	60 a 80	250 a 320
Prata		150 a 180
Ouro		120 a 150

Fonte: adaptado de <<https://www.ppgem.eng.ufmg.br/defesas/682M.PDF>>. Acesso em: 22 jul. 2017.

A cunhagem é obtida por meio de três etapas, basicamente: a pré-conformação dada por extrusão ou forjamento, a cunhagem propriamente dita e a rebarbagem. Nos aços-carbono ou aços-liga, a cunhagem torna-se cada vez mais difícil quando a porcentagem de carbono ou de elementos de liga é aumentada, já que essas alterações modificam as propriedades mecânicas do material.

A operação de cunhagem deve ser precedida por uma operação de extrusão ou forjamento, em que o material é preparado na forma de *blank*, com as medidas necessárias para a futura peça. A cunhagem tem a capacidade apenas de redistribuir o metal conforme impressão e perfil especificados, não sendo, assim, apropriada para grandes deslocamentos de material.

O processo de conformação plástica conhecido como cunhagem é realizado utilizando-se o *blank* previamente preparado que alimenta uma matriz bipartida, fixada em uma prensa ou martelo de forja, e por meio do efeito de compressão provocado pela junção das duas partes da matriz que leva o metal

a se deformar, ultrapassando o limite de escoamento. O padrão de aumento da carga acima do limite de escoamento na compressão gira em torno de 3 a 5 vezes para se obter a deformação necessária.

O processo pode produzir algumas rebarbas, que devem ser eliminadas por corte após a cunhagem da peça em matriz.

Exemplificando

Na Figura 4.24, você pode ver as matrizes originais feitas à mão e usadas para produzir as grandes Medalhas de Paz Indiana Jefferson que foram entregues a Meriwether Lewis e William Clark por sua expedição em 1804 do rio Mississippi para o Oceano Pacífico. Essas matrizes estão protegidas no cofre Min't por mais de 200 anos.

Figura 4.24 | Matrizes para confeccionar medalhas por cunhagem



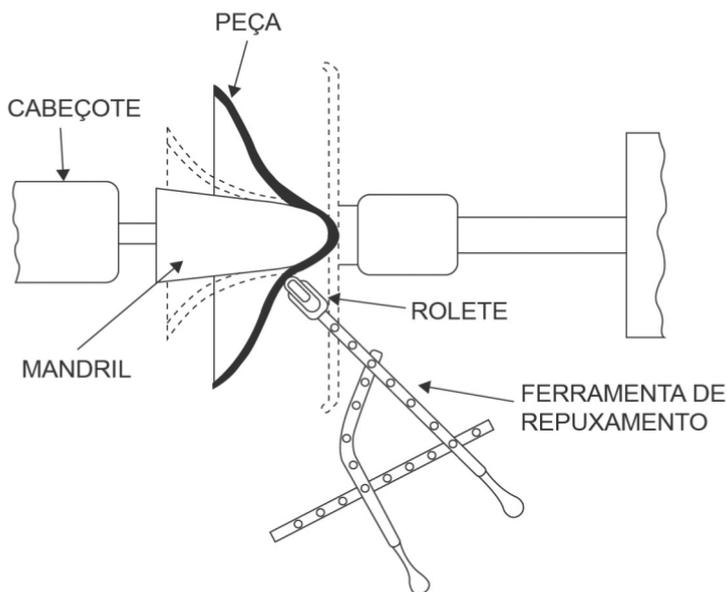
Fonte: <<https://www.ppgem.eng.ufmg.br/defesas/682M.PDF>> . Acesso em: 22 jul. 2017.

Um segundo processo que estudaremos é o repuxamento. Trata-se de um processo de conformação plástica que trabalha com esforço mecânico e rotação ao mesmo tempo, ou seja, de forma combinada, utilizando chapas como metal de partida. Esse processo é utilizado para produzir produtos com formas circulares, como semiesferas, cones e cilindros sem costura. Esses produtos podem ser flanges, copos, cones, abas e sinos, um produto que apresenta superfície de dupla curva de revolução.

O repuxamento pode ser realizado em todos os materiais que aceitam conformação a frio. O processo de repuxamento é realizado

em um torno e por meio de algumas etapas. Vamos conhecê-las. O material, uma placa circular, é apoiado e fixado no cabeçote da máquina, e uma ferramenta que possui um rolete em sua ponta é impulsionada em direção à placa, forçando esse material contra um mandril que apresenta o formato da peça a ser produzida até que a forma a se produzir seja finalizada. Esse mesmo procedimento pode ser realizado sem o mandril, caso a peça tenha um perfil mais simples e o operador habilidade apurada para tal.

Figura 4.25 | Ferramental para repuxamento



Fonte: adaptada de Chiaverini (1986, p. 122).

O repuxamento pode ser realizado também de forma mecanizada, por meio de máquinas e equipamentos específicos, como um torno CNC, projetados e preparados para essa atividade. Por meio desses processos mecanizados, é possível executar a conformação de muitas peças, objetos como lustres, baldes de gelo, componentes, com tamanhos grandes, médios e pequenos para empresas de petróleo, alimentícia, beneficiamento, elétricas, aeroespacial entre muitas outras.

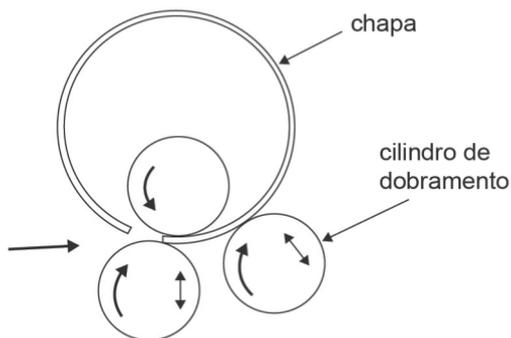


As máquinas especiais, tipo CNC, para repuxamento estão atuando na fabricação de muitas peças, componentes e objetos. Veja a seguir, por meio do link disponibilizado, o funcionamento de uma dessas máquinas, um torno de repuxo automático que está produzindo um balde de gelo, e assimile como é executado esse tipo de conformação.

- Torno de Repuxo Automático. Repuxando balde para gelo. BRM Máquinas Especiais. 2014. Disponível em: <<http://viiyoutube.com/video/RmmmmELRjHA/torno%20de%20repuxo%20autom%C3%A1tico>>. Acesso em: 22 jul. 2017.

Um terceiro processo a ser estudado nesta seção é a conformação com três cilindros, veja a Figura 4.26, em que uma barra, chapa, viga, tubo ou ainda outros perfis de material alimentam um dispositivo com três cilindros dispostos em formação de um triângulo. Ao passar pelos cilindros, o material é conformado. Os dois cilindros frontais têm a função de tracionar o metal e encaminhá-lo ao terceiro cilindro, que promove o dobramento ou encurvamento, conforme especificação. Essa operação é realizada a frio na maioria das vezes e é utilizada para processar aços-carbono com baixo carbono, até 0,3 %, podendo também ser aplicada a aços-liga com baixo teor dos elementos de liga.

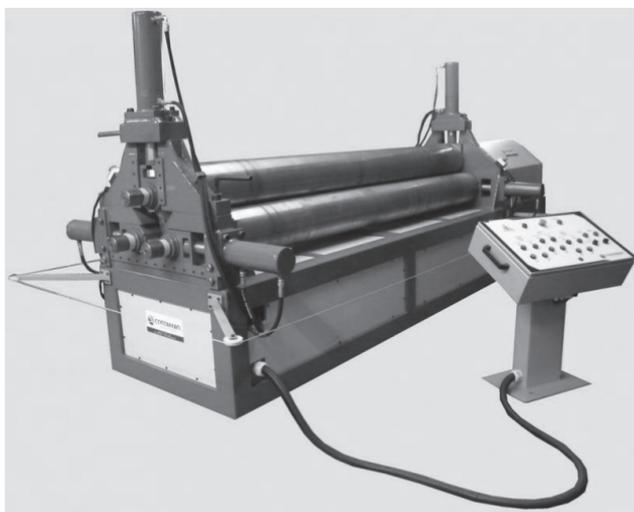
Figura 4.26 | Processo de conformação com três cilindros



Fonte: Chiaverini (1986, p. 123).

O equipamento utilizado na conformação com três cilindros é a calandra, conforme apresentado na Figura 4.27, e, devido a isso, o processo também é conhecido como calandragem, e as peças produzidas são chamadas de virolas. A calandra é composta pelos rolos ou cilindros, que possuem movimento giratório e cuja pressão que executam é regulável. A montagem é feita sobre uma estrutura metálica que pode ter diversas configurações de acordo com o fabricante da máquina. Os rolos que pressionam e curvam o material funcionam por meio de jogos de engrenagens, o que permite definir e aplicar uma velocidade a esses rolos. A distância entre os rolos pode ser ajustada de acordo com o material e a especificação do produto a ser trabalhado. O equipamento pode funcionar de forma manual ou motorizada.

Figura 4.27 | Calandra para chapas e tubos eletro-hidráulica



Fonte: <<http://www.costamaq.com.br/site/produtos/calandras/cteh-16-calandra-para-chapas-e-tubos-eleto-hidraulica>>. Acesso em: 24 jul. 2017.

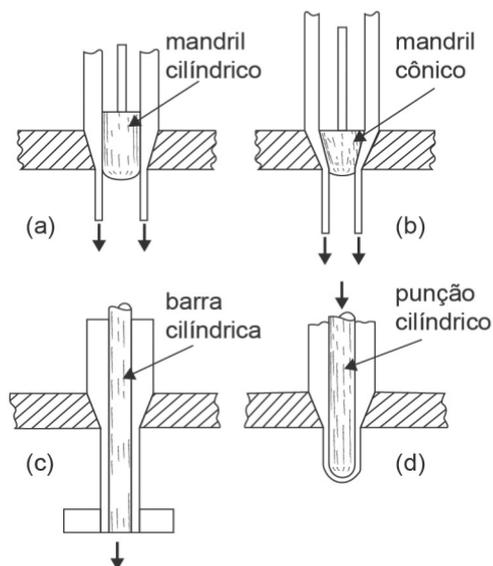


Existem máquinas de dobramento ou encurvamento que trabalham com estiramento ao mesmo tempo? Assista ao vídeo proposto no site a seguir, reflita e descubra mais sobre esses equipamentos.

Disponível em: <<http://www.directindustry.com/pt/prod/winton-machine-company/product-30011-1131637.html>>. Acesso em: 24 jul. 2017.

Nosso quarto processo a ser conhecido é o estiramento de tubos que, igualmente aos demais processos aqui apresentados, é realizado a frio e com a utilização de um mandril que funciona como uma ferramenta e é inserido no tubo para obtenção da conformação. O estiramento a frio é um processo de conformação que faz parte do processo de fabricação de tubos e é realizado após processos primários de manufatura de tubos, como a extrusão ou o mandrilamento a quente, a fim de conseguir tolerâncias dimensionais mais apertadas, acabamento superficial de melhor qualidade, redução de paredes, obtenção de formatos irregulares e propriedades mecânicas melhores em função da ocorrência de encruamento, isso tudo em relação aos processos primários anteriores.

Figura 4.28 | Processos de estiramento de tubos



Fonte: Chiaverini (1986, p. 134).

Na Figura 4.28 são apresentados os tipos de estiramento de tubos, sendo: (a) mandril cilíndrico estacionário; (b) mandril cônico estacionário; (c) barra em movimento; (d) punção empurrado.



Pesquise mais

Conheça, por meio do vídeo indicado a seguir, como são fabricadas as moedas por meio das várias etapas de produção.

Vídeo: Economicotv. Como se faz a cunhagem de uma moeda. Lisboa. 2013. Disponível em: <<https://www.youtube.com/watch?v=LGIWPX-dwjQ>>. Acesso em: 21 jul. 2017.

Sem medo de errar

Na CONFORMATUDO Ltda., agora já contratado pela empresa, você deve atuar nas suas atividades e será o responsável por colocar um novo processo de cunhagem de uma medalha em operação, cuidando de todos os preparativos para executar a cunhagem da medalha.

Sendo você o responsável designado para pôr o processo em operação, quais preparativos descreveria para executar a cunhagem da medalha? Você consegue definir como deve ser preparada a matriz de cunhagem? De que forma funciona a prensa de cunhagem? Você é capaz de descrever quais as principais características para executar o trabalho com alto padrão de qualidade?

Bem, a primeira providência a realizar é desenvolver e confeccionar a matriz de acordo com o desenho da medalha a ser manufaturada. Hoje em dia, são utilizados modernos sistemas informatizados para gerar o projeto artístico e a produção de matrizes. Esses sistemas trabalham sob regime de fluxo contínuo, com muita automatização e, assim, interconectam em um só ambiente os setores de projeto artístico e a montagem digital, que, ao seu final, gera as matrizes utilizadas para manufatura dos produtos metalúrgicos e gráficos. Esse tipo de sistema é importante principalmente para garantir o sigilo e a segurança da informação e do projeto. A confecção das matrizes de cunhagem é realizada por meio de usinagem em CNCs ou a laser, utilizando o projeto gráfico.



Pesquise mais

Esse sistema é muito utilizado pela casa da moeda do Brasil e pode ser visto com mais detalhes em:

Catálogo comercial – Casa da Moeda do Brasil. Disponível em: <<http://www.casadoeda.gov.br/arquivos/pcmb/negocios/produtos-e-servicos/catalogo-comercial/catalogo-portugues.pdf>>. Acesso em: 21 jul. 2017).

A cunhagem deverá ser realizada em três etapas: forjamento do *blank* (que estamos considerando que já chegará pronto neste estudo), a cunhagem propriamente dita e a rebarbagem.

Assim, devemos verificar o que é necessário para realizar a operação de cunhagem. Devemos calcular a força para executar a operação de conformação e escolher a máquina adequada. Dessa forma, temos que:

A força de cunhagem pode ser calculada a partir da fórmula:

$$F_{\text{cunhagem}} = k_{cf} \times A_p$$

k_{cf} É retirado do Quadro 4.2, considerando o material cobre macio e a cunhagem simples já que a espessura do material já é fornecida na medida.

Assim $k_{cf} = 20 \text{ a } 30 \text{ kg/mm}^2$

$$F_{\text{cunhagem}} = 30 \times \frac{\pi \times 70^2}{4}$$

$$F_{\text{cunhagem}} = 115453,53 \text{ kgf}$$

Para definição da máquina, o arredondamento deve ser considerado para maior.

Assim:

$$F_{\text{cunhagem}} = 115453,6 \text{ kgf}$$

Para executar o processo de cunhagem propriamente dito, a frio, podemos utilizar prensa hidráulica ou mecânica. Uma boa opção é uma prensa hidráulica PS4 1050-C, que possui faixa de atuação de 2.000 kN (em torno de 204.000 kgf) a 10.000 kN (em torno de 1 ton.) de força, além de uma força de avanço de 10.500 kN e retorno de 550 kN, atua com velocidades em curso de aproximação de 130 mm/s, de prensagem de 4 mm/s e de retorno de 100 mm/s e pode trabalhar com metais ferrosos e não ferrosos, em peças com as mais variadas formas e perfis.



Pesquise mais

No site indicado a seguir, você pode pesquisar e conhecer prensas apropriadas para cunhagem.

Direct Industry. Disponível em: <<http://www.directindustry.com/pt/prod/schuler-mueller-weingarten/product-13229-1093261.html>>.

Acesso em: 21 jul. 2017.

A última operação será a rebarbação e o acabamento das peças por meio de corte de rebarbas e polimento das peças.

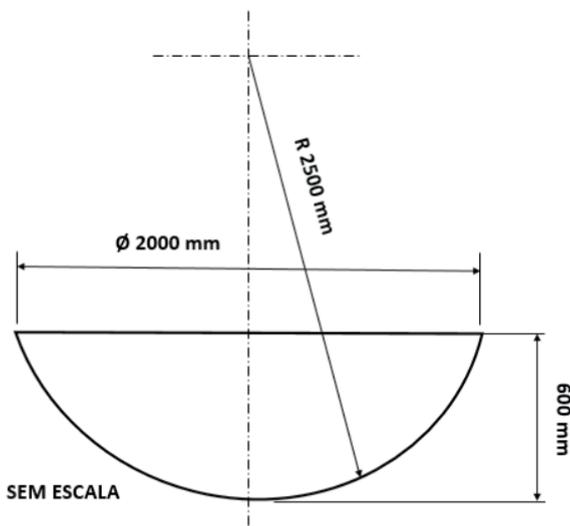
Fabricação de fundo do tanque

Descrição da situação-problema

Uma empresa de caldeiraria está produzindo um tanque de aço de médio porte que será utilizado em uma indústria de produção e armazenamento de petróleo e seus derivados. Você é o engenheiro responsável e deve definir a melhor e mais prática maneira de produzir cada parte desse tanque.

No momento, você precisa informar ao pessoal de produção como deve ser produzido o fundo do tanque que será fabricado de chapa de aço inox, com 6 mm de espessura e que, de acordo com as especificações, tem o formato de uma calota côncava com raio centralizado e distante a 2.500 mm da superfície da chapa. O diâmetro do *blank* é de 2.000 mm, e a altura da calota é de 600 mm, conforme desenho sem escala (Figura 4.29) apresentado a seguir. Faça também uma simulação do processo por meio de croquis ou desenhos, demonstrando como ocorre o processo definido.

Figura 4.29 | Fundo do tanque



Fonte: elaborada pelo autor.

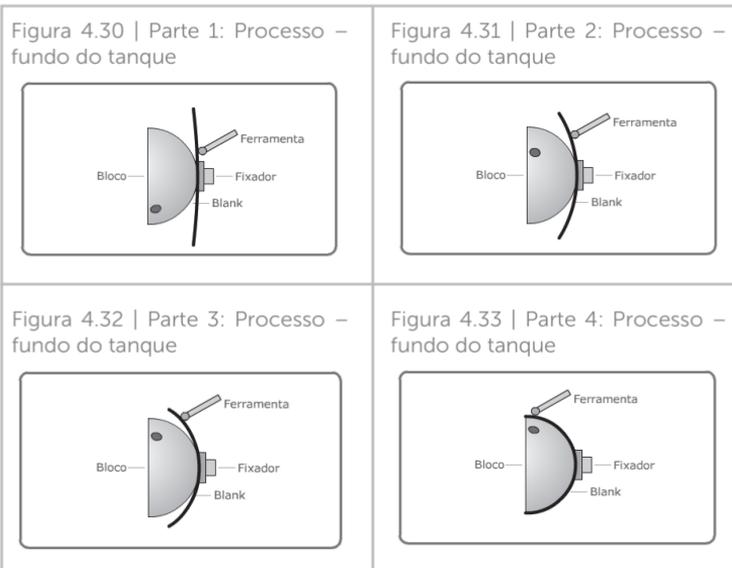
Resolução da situação-problema

Vamos manufacturar o fundo do tanque em aço inox por meio do processo de conformação plástica chamado de repuxamento. Nessa produção, é necessário utilizar um *blank* redondo, previamente preparado na forma de chapa com a especificação do produto, ou seja, 6 mm.

Comprimento ou diâmetro do *blank* igual a:

$$D = \sqrt{d^2 + (4 \times h^2)}$$
$$D = \sqrt{2000^2 + 4 \times 600^2}$$
$$D = 2332,4 \text{ mm}$$

Esse *blank* é fixado no cabeçote fixador da máquina e contra um mandril (bloco) que também servirá para modelar a peça. O bloco de modelagem em conjunto com o *blank* gira assim que a máquina é acionada. O *blank* inicia sua conformação e, progressivamente, vai tomando o formato final do bloco modelador por meio do deslocamento de uma ferramenta manual ou por meio de roletes, conforme apresentamos nas Figuras 4.30 a 4.33 a seguir.



Fonte: adaptada de <http://www.cimm.com.br/portal/material_didatico/6482-metodos-de-conformacao-maquinas-e-ferramentas#.WXP33-mQzIU>. Acesso em: 22 jul. 2017.

Faça valer a pena

1. A cunhagem é um processo de fabricação amplamente utilizado na manufatura de produtos como moedas e medalhas de todos os tamanhos, objetos de decoração e de uso cotidiano, como talheres, até peças para indústrias automobilísticas, em que a precisão dimensional é imprescindível.

Sobre a cunhagem, avalie as afirmações que seguem:

I. A cunhagem é um processo de usinagem que normalmente é realizado a frio.

II. A cunhagem ocorre quando um metal é prensado em uma matriz fechada.

III. Na cunhagem, o perfil e a impressão definidos para peça são moldados por meio de uma sequência de prensagem que pode chegar a dezenas de vezes.

IV. Na cunhagem, é reproduzido o desenho da matriz em uma ou ambas as faces ou ainda em uma das superfícies da peça.

Assinale a alternativa que apresenta as afirmações CORRETAS apenas.

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

2. Uma moeda com diâmetro de 27 mm e espessura de 1,5 mm deve ser cunhada.

O material a ser utilizado é o aço inoxidável 18.8, e a cunhagem será do tipo maciça com resistência oposta pelo material ao fim da conformação, apresentando um valor de 320 kg/mm^2 .

Calcule a força para cunhagem dessa moeda.

Assinale a alternativa que apresenta o valor da força de cunhagem em *kgf*.

- a) 112.985,7.
- b) 156.027,8.
- c) 183.217,7.
- d) 225.977,6.
- e) 263.867,3.

3. O repuxamento é um processo de conformação plástica que trabalha com esforço mecânico e rotação ao mesmo tempo, ou seja, de forma combinada, utilizando chapas como metal de partida.

Avalie as afirmações a seguir, referentes ao repuxamento, e indique se são verdadeiras (V) ou falsas (F).

() O processo de repuxamento é utilizado para produzir produtos com formas circulares, como semiesferas, cones e cilindros sem costura.

() São produtos fabricados pelo repuxamento eixos, roscas, pistões, buchas, porcas, parafusos e cones.

() O repuxamento pode ser realizado em todos os materiais que aceitam conformação a quente.

() O repuxamento pode ser realizado de forma manual em um torno mecânico ou mecanizada, utilizando um torno CNC, por exemplo.

Agora, assinale a alternativa que apresenta a sequência CORRETA para verdadeiro (V) ou falso (F).

a) V – V – F – V.

b) F – F – V – V.

c) V – F – F – V.

d) V – V – V – F.

e) F – V – F – V.

Seção 4.3

Outros processos de conformação de metais – conformação por explosão, estiramento, mandrilagem, calandragem

Diálogo aberto

Nesta fase de aprendizagem, você vai conhecer e aprender sobre mais alguns processos de conformação de metais, que são: a conformação por explosão, o estiramento, a mandrilagem e a calandragem. Na Figura 4.34, você pode ver um exemplo de peça fabricada pela conformação por explosão. Essa é uma parte da fuselagem de um Airbus, fabricado pelo método de estamparia por explosão.

Para aplicar os conhecimentos adquiridos ao longo do estudo, você vai continuar trabalhando na CONFORMATUDO Ltda., que é uma empresa que trabalha com conformação plástica de metal e tem, em sua fábrica, uma variedade ampla desse tipo de processo.

Você dará andamento às várias atividades existentes na indústria CONFORMATUDO Ltda. e será o responsável por fazer um estudo sobre um novo processo de fabricação para manufaturar um bocal exaustor de um ônibus espacial, cujas necessidades de produção são bem diferentes das conhecidas pela companhia com o requisito de o tipo e o padrão de material, além da qualidade, serem especiais.

Figura 4.34 | Parte da fuselagem de um Airbus fabricada pelo método de estamparia por explosão



Fonte: <<https://goo.gl/8DaqA3>>. Acesso em: 5 ago. 2017.

Na CONFORMATUDO Ltda., já existem vários processos de fabricação de chapas finas, como o estiramento e a estampagem profunda, porém, a empresa recebeu uma consulta para trabalhar com conformação de chapas grossas e um produto, um bocal exaustor de um ônibus espacial, que, devido ao seu uso, não pode ter o mínimo de defeito. A gerência de processos foi consultada pelo departamento de vendas sobre a possibilidade de confirmar esse trabalho que renderia uma boa renda para a empresa, porém ficou com muitas dúvidas sobre as condições técnicas para executar o trabalho. Assim, foi solicitado um estudo para entender as necessidades para conformar as chapas grossas e produzir esse bocal exaustor de um ônibus espacial. Você está na equipe que deve fazer esse estudo. Assim: qual o melhor processo para manufaturar essa peça? Quais as principais características que levam esse processo a ser o mais adequado? Os equipamentos necessários para esse processo já existem na empresa ou são diferenciados e devem ser providenciados?

Bons estudos!

Não pode faltar

A **conformação por explosão** é realizada a partir do uso de uma pressão elevada que ocorre instantaneamente oriunda da detonação de um explosivo. A matéria-prima utilizada para produção de uma peça ou componente nesse processo é uma placa ou chapa em formato de disco metálico (*blank* redondo). Esse processo é utilizado para produzir cilindros com diâmetro de até 2,5 metros, assim como peças com dimensões de médio porte e com perfis complexos. É utilizado com frequência na indústria aeroespacial para produzir peças de grande porte. Esse é um processo emergente, assim, existe capacidade e perspectiva de ser bastante desenvolvido e explorado por diversos tipos de empresas.

Na Figura 4.35, você pode conhecer os três métodos de conformação com explosivos que são: a conformação livre, a conformação cilíndrica e a conformação com matriz.

Figura 4.35 | Representação de três métodos de conformação por explosão



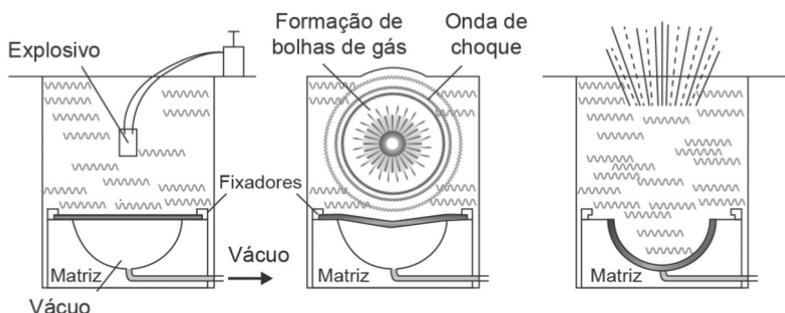
Fonte: adaptada de Kiminami, Castro e Oliveira (2013, p. 98).

Uma das características marcantes da conformação por explosão é que nela é envolvida grande quantidade de energia aplicada em um espaço de tempo muito curto e, por isso, está classificada como um processo de conformação que apresenta taxas altas de deformação.

Nesse processo, veja a Figura 4.36, uma placa ou chapa é fixada e selada sobre a matriz de conformação, criando um vácuo na cavidade entre matéria-prima e ferramenta. O conjunto composto por placa e matriz é alojado e mergulhado em um tanque que

contém um fluido que normalmente é água. Uma cápsula com carga explosiva é disposta a uma certa distância, conhecida como “distância recuada”, para gerar a energia de conformação. Ao ocorrer a detonação, a energia provocada por uma onda de choque é transmitida pela água e gera uma rápida conformação do metal sobre a matriz.

Figura 4.36 | Processo de conformação por explosão com matriz



Fonte: adaptada de Kiminami, Castro e Oliveira (2013, p. 98).

Algumas características e orientações devem ser observadas em um processo de conformação por explosão. Primeiro, é necessário que a detonação de carga explosiva ocorra com esse explosivo imerso na água e posicionado na maior profundidade praticável. Outra característica a seguir é utilizar os explosivos de alta potência, que apresentam uma detonação com velocidades que variam de 1.800 a 8.500 m/s e geram pressões de ordem de $2,8 \times 10^5 \text{ kgf/cm}^2$.



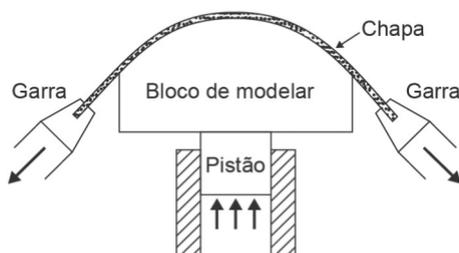
Refleta

Você acha que a tecnologia da conformação por explosão pode substituir a estampagem de chapas? Quais as diferenças entre essas tecnologias? Elas podem ser utilizadas em conjunto? Reflita e estude mais um pouco sobre esse assunto. Segue um site com um artigo que pode dar início à sua reflexão.

Inovação tecnológica. Cabine de avião é fabricada com tecnologia a explosão. 2011. Disponível em: <<https://goo.gl/tCu5vr>>. Acesso em: 1 ago. 2017.

Um segundo processo que será apresentado e estudado nesta seção de aprendizagem é o estiramento (veja a Figura 4.37), cujo processo de conformação plástica ocorre com a atuação de força de tração aplicada sobre uma chapa posicionada sobre uma ferramenta ou bloco modelo, com o intuito de esticá-lo. O estiramento é derivado do processo de desempenho por tração de chapas finas laminadas. É importante observar que, nesse processo, o efeito mola é quase totalmente eliminado, já que o gradiente de tensões existente é bastante uniforme. Porém, por predominar tensões trativas no processo e peças, deve-se utilizar material muito dúctil para obter deformações de grandes proporções.

Figura 4.37 | Operação de estiramento por tração



Fonte: Dieter (1981, p. 583).

O estiramento é utilizado em larga escala na indústria aeronáutica na produção de peças e componentes com grandes raios de curvatura ou mesmo com dupla curvatura.

O equipamento utilizado em uma conformação plástica por estiramento é composto por um pistão hidráulico, um bloco de modelar e duas garras. O pistão hidráulico, na maioria dos equipamentos, trabalha na posição vertical e tem a função de movimentar o bloco de modelar, e as duas garras são utilizadas para fixar as extremidades da chapa, que é tracionada ao ser empurrada pelo bloco de modelar. As garras utilizadas podem ser fixas ou móveis. As garras móveis propiciam que a força de tração fique em linha com as bordas da chapa. As garras fixas devem ter um raio grande para prevenir que ocorra ruptura da chapa nas garras. Um primeiro esforço de tração mais suave é utilizado sobre o *blank* de chapa metálica para acomodá-lo no perfil do bloco de

modelar. Em seguida, as garras são acionadas, e a carga de força de tração de estiramento é aumentada, deformando o material até deixá-lo de acordo com a especificação definida.

Não podemos deixar de lembrar que o estiramento está presente também como uma etapa de um processo de estampagem de chapas finas, como quando um copo de fundo hemisférico é conformado, o material é estirado sobre a face do punção.



Assimile

Podemos estabelecer o limite de conformação no estiramento por meio da ocorrência da estrição. A estrição é a diminuição das dimensões da seção transversal, ocasionada pelas cargas de tração do processo. No estiramento, deve-se prevenir a estrição localizada, que é aquela conhecida por **empescoamento**.

Em operações de estiramento, é normal existirem gradientes de deformação. A área que tem a maior deformação se transforma na parte mais encruada, e a deformação é transferida para o elemento de volume próximo.

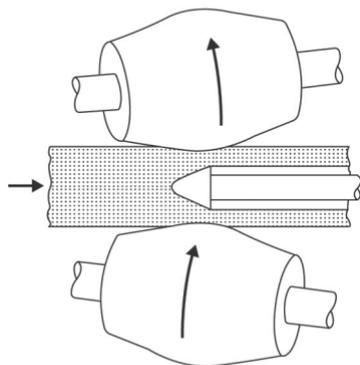
Sendo o coeficiente de encruamento considerado grande, existirá uma redistribuição das deformações por toda a extensão longitudinal da peça e, assim, é possível resistir a mais deformações antes que possa se iniciar a estrição localizada.

Agora vamos estudar e aprender sobre a **mandrilagem**. Os tubos são classificados em dois tipos básicos: sem costura e com costura. Tubos *sem costura* são *manufaturados* por meio de processos de extrusão ou mandrilagem (processo *Mannesmann*) e acabados por meio do estiramento de tubos a frio já estudado. Os tubos com costuras são manufaturados com a utilização de tiras de chapa, que são conformadas de acordo com o perfil e especificação definidos e depois são soldadas na junta.

A produção de tubos sem costura na forma bruta é realizada pelo laminador *Mannesmann*, conforme apresentado na Figura 4.38, para aço e cobre e se dá a partir do uso de tarugos. No processo *Mannesman*, um tarugo aquecido é posicionado entre dois cilindros de um laminador oblíquo, montados com inclinação

entre si, tomando como referência o plano horizontal. Essa montagem dos rolos e seu movimento de rotação, que ocorre no mesmo sentido, desenvolvem um empuxo radial e uma rotação do tarugo, que é movimentado para frente em direção a um mandril que tem a função de conformar o diâmetro interno do tubo. A mandrilagem é a operação de conformação a quente com maior grau de severidade aplicada aos metais e, no Brasil, é possível a manufatura de tubos com diâmetros máximos de até 14 polegadas (355,6 mm).

Figura 4.38 | Laminador Mannesmann



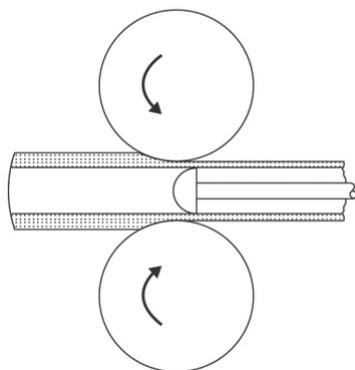
Fonte: adaptada de Dieter (1981, p. 559).

Quando ocorre a deformação de um sólido, é importante observar que isso envolve variação de volume e da sua forma. A deformação volumétrica ou dilatação cúbica é a variação em volume por unidade de volume. No processo *Mannesmann*, o arco de contato com o tarugo é pequeno, gerando uma deformação volumétrica alta e, em função disso, desenvolvem-se tensões de tração na direção axial ao eixo do tarugo. Esse fato favorece a abertura do centro do tarugo, que é formado à medida que o material escoar em torno do mandril e, assim, produz a cavidade do tubo.

Por meio do processo *Mannesmann*, não é possível manufaturar tubos com redução de parede e alongação necessárias para serem considerados tubos acabados pela transformação a quente. Para isso, são utilizados outros tipos de laminador-mandrilador que podem gerar o acabamento e alongação suficientes para tubos acabados.

Alguns desses processos de mandrilar são: rolo laminador-mandrilador, conforme a Figura 4.39, que são aqueles em que ocorre a passagem do tubo por um longo mandril contendo uma bucha.

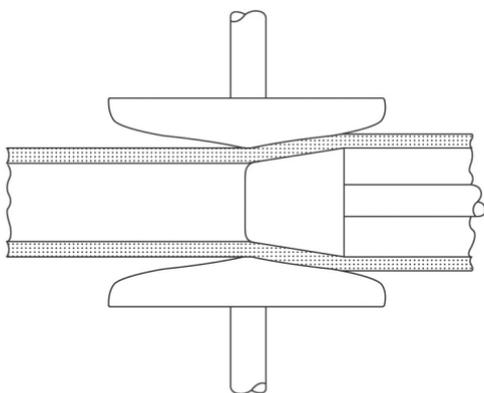
Figura 4.39 | Rolo laminador-mandrilador



Fonte: adaptada de Dieter (1981, p. 559).

Laminador *Three-roll piercing*, apresentado na Figura 4.40, é aquele que utiliza três rolos de laminação que manufacturam tubos mais concêntricos e conseguem superfícies externas e internas mais lisas do que o processo *Mannesmann*.

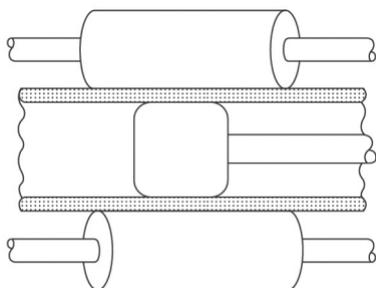
Figura 4.40 | Laminador *Three-roll piercing*



Fonte: adaptada de Dieter (1981, p. 559).

Retificadora-polidora, conforme a Figura 4.41, dá polimento nas superfícies externas e internas dos tubos fabricados, e pode reduzir ou eliminar pequenas excentricidades. É utilizada no final do processo de manufatura de tubos por ser um processo acabador.

Figura 4.41 | Retificadora polidora

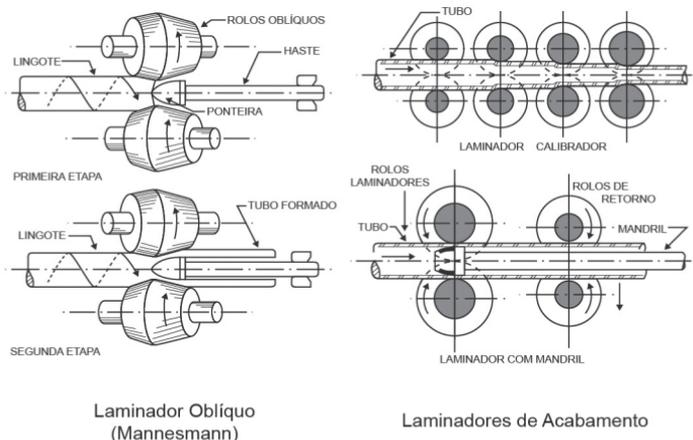


Fonte: adaptada de Dieter (1981, p. 559).

Exemplificando

Veja, na Figura 4.42, o processo de fabricação de um tubo sem costura por meio do laminador oblíquo ou processo Mannesmann e por meio de laminadores de acabamento.

Figura 4.42 | Retificadora polidora



Fonte: <<https://goo.gl/Sy5mE2>>. Acesso em: 4 ago. 2017.

O quarto processo aqui apresentado é a **calandragem**, que já estudamos anteriormente. Vamos relembrar seu conceito.

A calandragem ou conformação com três cilindros é o processo de conformação plástica em que uma barra, chapa, viga, tubo ou, ainda, outros perfis de material alimentam um dispositivo com três cilindros dispostos em formação de um triângulo. Ao passar pelos cilindros, o material é conformado. Os dois cilindros frontais têm a função de tracionar o metal e encaminhá-lo ao terceiro cilindro, que promove o dobramento ou encurvamento conforme a especificação. O equipamento utilizado na conformação com três cilindros é a calandra e, devido a isso, o processo também é conhecido como calandragem, e as peças produzidas são chamadas de virolas.



Pesquise mais

Tubos de aço sem costura são fabricados por diversas empresas em todo o mundo. Os processos utilizados também se repetem e são tecnologias discriminadas. Pesquise mais sobre os tipos de produção de tubos de aço, aço inox, níquel e bronze. A seguir, é dado um exemplo de material que pode ser consultado para aprender mais sobre esse rico processo.

Assista ao vídeo indicado a seguir, em que é apresentado um dos muitos fabricantes de tubos inoxidáveis. O fabricante apresentado no vídeo é um dos principais fabricantes mundiais de tubos e tubos de liga de aço inoxidável e níquel sem costura.

Tubos inoxidáveis. Salzgitter Mannesmann – Tubos de caldeira. 2011.

Disponível em: <<https://www.youtube.com/watch?v=MfMXwhs0gTk>>.

Acesso em: 3 ago. 2017.

Sem medo de errar

Sua nova atividade na CONFORMATUDO Ltda. é fazer um estudo sobre um novo processo de fabricação para manufaturar um bocal exaustor de um ônibus espacial. Assim, você deve entender as necessidades para conformar as chapas grossas e produzir um

bocal exaustor de um ônibus espacial. Algumas perguntas devem ser respondidas: qual o melhor processo para manufaturar essa peça? Quais as principais características que levam esse processo a ser o mais adequado? Os equipamentos necessários para esse processo já existem na empresa ou são diferenciados e devem ser providenciados? Essas e outras perguntas devem ser respondidas para ser apresentado ao departamento de vendas que, em caso positivo, ou seja, se for interessante e possível a fabricação pela CONFORMATUDO, confirmará o atendimento ao pedido e à manufatura das peças junto ao cliente.

Primeiramente, vamos entender, no Quadro 4.3, as diferenças dimensionais em relação a especificações das chapas finas e grossas, e quais as diferenças em trabalhar com esse tipo de material.

Quadro 4.3 | Diferenças entre chapas finas e grossas

Chapas Finas	Chapas Grossas
São chapas laminadas a frio ou a quente	
Espessura padrão fornecida pelas siderúrgicas, variando de 0,3 a 5,0 mm.	Espessuras fornecidas, variando de 4,75 a 150 mm
Chapas finas a frio: comprimentos-padrão de 2.000 mm, 2.500 mm e 3.000 mm/ ou bobinas.	Comprimentos-padrão de 6.000 e 12.000 mm.
Larguras padrão: de 1.000 mm, 1.100 mm, 1.200 mm e 1.500 mm.	Larguras-padrão de 1.000 a 3.800 mm.
As chapas finas a quente: comprimentos padrão de 2.000 mm, 3.000 mm e 6.000 mm	
Larguras padrão de 1.000 mm, 1.100 mm, 1.200mm, 1.500 mm e 1.800 mm.	
As dimensões preferenciais fornecidas pelas siderúrgicas são: largura de 1.200 mm e comprimento de 3.000 mm.	

Fonte: adaptado de <<https://goo.gl/7LLVct>>. Acesso em: 5 ago. 2017.

As chapas de aço são utilizadas em máquinas de grande e pequeno porte, construções e muitas outras peças e componentes, na fabricação de tubos de aço com os mais variados diâmetros, vigas e outros materiais designados à indústria ferroviária de aço, de móveis e objetos variados em indústrias em geral dos mais diversos campos. As chapas mais grossas são bastante utilizadas

na produção de equipamentos da indústria de base e estruturas de aço em geral.

Para a utilização dessas chapas, é necessário que elas passem por muitos processos de fabricação que vão moldar e tornar o material adequado às diferentes aplicações. As chapas finas podem ser trabalhadas por meio de processos como estampagem, conformação com três cilindros, estiramento, entre outros; e as chapas grossas, por meio de calandragem, conformação por explosão entre outros.

Para manufaturar um bocal exaustor de um ônibus espacial as técnicas utilizadas tradicionalmente para fabricação não são adequadas e suficientes. Sabe-se que, nesse tipo de peça, os materiais não podem apresentar qualquer mínimo defeito, pois ficam expostos a altíssimas velocidades.

Quando comparamos a qualidade de peças produzidas por meio do processo de conformação por explosão com os processos de estamparia e peças prensadas, verificamos que a qualidade das peças produzidas pela explosão é muito superior, tornando essa técnica adequada para produção do bocal exaustor de um ônibus espacial e muitas outras aplicações em que a isenção de micros defeitos é essencial. Outra característica que torna o processo adequado é que ele é aderente a geometrias extremamente complexas, e as propriedades mecânicas dos produtos produzidos ficam excelentes. Isso ocorre, pois uma curva de escoamento de um determinado metal varia com a velocidade de deformação e, na conformação por explosão, as altas taxas de deformação elevam a curva de "tensão de escoamento" pelo "grau de deformação" para cima, o que leva a peça acabada a apresentar uma resistência mecânica muito maior do que o material de partida e do que é possível se conseguir em processos considerados convencionais, como é o caso da estampagem, por exemplo.

Na fabricação de peças de aviões Airbus, esse processo também é utilizado, pois pode conformar chapas com até seis centímetros de espessura e gera maior confiabilidade em relação a riscos de fadiga ou fratura na estrutura das peças.

A técnica utilizada, que apresenta altas taxas de deformação, é bastante específica, e empresas, como é o caso da CONFORMATUDO, que se interessam em utilizá-la, devem adquirir o equipamento necessário para o trabalho.

Nesse processo, uma placa ou chapa é fixada e selada sobre a matriz de conformação, criando um vácuo na cavidade entre matéria-prima e ferramenta. O conjunto composto por placa e matriz é alojado e mergulhado em um tanque que contém um fluido que normalmente é água. Uma cápsula com carga explosiva é disposta a uma certa distância, conhecida como “distância recuada”, para gerar a energia de conformação. Ao ocorrer a detonação, a energia provocada por uma onda de choque é transmitida pela água e gera uma rápida conformação do metal sobre a matriz. A onda de choque provoca uma aderência muito forte entre chapa e matriz, copiando fielmente até os menores detalhes.

Avançando na prática

Produção de tubo sem costura

Descrição da situação-problema

Você trabalha como engenheiro de processos em uma indústria de manufatura de tubos de aço acabados, a SÓTUBOS Ltda. Chegou a seu departamento uma ordem para produzir um novo tubo de aço-liga, com diâmetro de 350 mm, sem costura e cujo acabamento solicita um grau de rugosidade fino, com valor de $R_a = 1,6 \mu\text{m}$. Este produto deve ser manufaturado através dos processos já existentes na empresa, pois o prazo de entrega não permite novos desenvolvimentos de processo. É necessário definir como produzir este produto, considerando que os processos existentes nesta empresa são: mandrilagem especificamente laminação *Mannesmann*, extrusão, solda e estiramento de tubos. Defina qual ou quais processos utilizar e justifique a resposta.

Resolução da situação-problema

A produção do tubo de aço-liga, com diâmetro 350 mm, sem costura e cujo acabamento é $R_a = 1,6 \mu\text{m}$, e considerando os processos existentes, deve ser feita por meio de uma união de dois processos, que são: **mandrilagem (laminação *Mannesmann*) e o estiramento de tubos.**

Vamos justificar.

A produção de tubos sem costura na forma bruta é realizada

pelo laminador *Mannesmann* para aço e cobre e se dá a partir do uso de tarugos.

Os tubos sem costura podem ser manufaturados por três tipos de processos industriais: a laminação (para tubos de grandes diâmetros na faixa de 80 a 650 mm), extrusão (para tubos com pequenos diâmetros) e o processo de fundição. Existem alguns processos para manufaturar tubos por laminação, porém, o mais importante é o processo *Mannesmann* que está disponível na empresa citada, a SÓTUBOS Ltda. Assim, o processo *Mannesmann* é o primeiro escolhido.

O processo *Mannesmann* forma o tubo a partir de uma barra circular maciça com o material definido para o produto, em nosso caso, aço-liga, que é empurrada por dois cilindros oblíquos que o rotacionam e transladam contra um mandril fixo. É obtido, assim, um tubo bruto, sem costura, que deverá ser conformado para acabamento por meio de outro processo, também existente na SÓTUBOS Ltda.: o estiramento de tubos, que é realizado a frio e com a utilização de um mandril que funciona como uma ferramenta e é inserido no tubo para obtenção da conformação. O estiramento a frio é um processo de conformação que faz parte do processo de fabricação de tubos e é realizado após processos primários de manufatura de tubos, como a extrusão ou o mandrilamento a quente, a fim de conseguir tolerâncias dimensionais mais apertadas, acabamento superficial de melhor qualidade, redução de paredes, obtenção de formatos irregulares e propriedades mecânicas melhores em função da ocorrência de encruamento, isto tudo em relação aos processos primários anteriores.

Faça valer a pena

1. Um processo de conformação por explosão apresenta muitas características, sendo algumas delas bastante específicas desse processo. Uma das características marcantes da conformação por explosão é que nela é envolvida grande quantidade de energia aplicada em um espaço de tempo muito curto e, por isso, está classificada como um processo de conformação que apresenta taxas altas de deformação.

Avalie se as características apresentadas a seguir são típicas de um processo de conformação por explosão.

- I. Força de impacto.
- II. Distribuição da aplicação da força.

III. Altíssimas forças inerciais.

IV. Velocidades de conformação baixas.

V. Alterações no comportamento plástico do material.

Agora assinale a alternativa CORRETA que apresenta apenas as características típicas de um processo de conformação por explosão.

a) I e III.

b) II e IV.

c) I, II, III e V.

d) II, III, IV e V.

e) I, III, IV e V.

2. O estiramento é um processo de conformação plástica que ocorre com a atuação de força de tração aplicada sobre uma chapa posicionada sobre uma ferramenta ou bloco-modelo com o intuito de esticá-lo. O estiramento é derivado do processo de desempenho por tração de chapas finas laminadas. É importante observar que, nesse processo, o efeito mola é quase totalmente eliminado, já que o gradiente de tensões existente é bastante uniforme.

Avalie as asserções que seguem e a relação entre elas.

I. Em um processo de estiramento, deve-se utilizar material muito dúctil para obter deformações de grandes proporções.

PORQUE

II. Nesse processo de estiramento e na estrutura das peças em produção são predominantes as tensões fletivas.

Assinale a alternativa que apresenta a avaliação CORRETA para as asserções apresentadas.

a) As asserções I e II são verdadeiras, porém a II não justifica a I.

b) As asserções I e II são verdadeiras, e a II justifica corretamente a I.

c) A asserção I é verdadeira, e a II é falsa.

d) A asserção I é falsa, e a II é verdadeira.

e) As asserções I e II são falsas.

3. Os tubos são classificados em dois tipos básicos: sem costura e com costura. Tubos sem costura são manufaturados por meio de processos de extrusão ou mandrilagem (processo *Mannesmann*) e acabados por meio do estiramento de tubos a frio. Os tubos com costuras são manufaturados com a utilização de tiras de chapa, que são conformadas de acordo com o perfil e especificação definidos e, depois, são soldadas na junta.

Com relação à produção de tubos sem costura na forma bruta, é correto afirmar que:

- a) É realizada por meio do laminador *Three-roll piercing* para aço inoxidável e bronze e se dá com o uso de barras curtas.
- b) É realizada por um rolo laminador-mandrilador para alumínio e aço e se dá a partir de blocos.
- c) É realizada por meio da retificadora-polidora em aço e latão a partir do uso de tubos pré-fabricados.
- d) É realizada pelo laminador *Mannesmann* para aço e cobre e se dá a partir do uso de tarugos.
- e) É realizada por uma extrusora direta para aço e suas ligas e se dá a partir de bloco ou tarugo metálico.

Referências

ALLPRODUCTS.COM. **Aluminum extrusion parts**. Taiwan, 2017. Disponível em: <<http://www.allproducts.com/trades/metalwares/product01.html>>. Acesso em: 11 jul. 2017.

BORGES. Marcos. **Processos produtivos em engenharia de produção – conformação. Extrusão**. 2017. Disponível em: <http://mmborges.com/processos/Conformacao/cont_html/extrusao.htm>. Acesso em: 12 jul. 2017.

CALEIRO, João Pedro. **Veja como é fabricado uma moeda no Brasil. Exame**. 2013. Disponível em: <<http://exame.abril.com.br/economia/veja-como-e-fabricada-uma-moeda-no-brasil/>>. Acesso em: 21 jul. 2017.

CASA DA MOEDA DO BRASIL. **Catálogo comercial**. Disponível em: <<http://www.casadaoeda.gov.br/arquivos/pcmb/negocios/produtos-e-servicos/catalogo-comercial/catalogo-portugues.pdf>>. Acesso em: 21 jul. 2017.

SETLIN, Paulo Roberto; HELMAN, Horácio. **Fundamentos da conformação mecânica dos metais**. 2. ed. São Paulo: Artliber, 2005.

CIMM – Centro de Informação Metal Mecânica. **Máquinas e ferramentas**. 2017. Disponível em: <http://www.cimm.com.br/portal/material_didatico/6482-metodos-de-conformacao-maquinas-e-ferramentas#.WXP33-mQzIU>. Acesso em: 22 jul. 2017.

_____. **Parâmetros da extrusão**. 2017. Disponível em: <http://www.cimm.com.br/portal/material_didatico/6504-parametros-da-extrusao#.WWkBlOmQzIU>. Acesso em: 13 jul. 2017.

_____. **Estiramento**. 2017. Disponível em: <http://www.cimm.com.br/portal/material_didatico/6485-estiramento#.WYT76emQzIV>. Acesso em: 4 ago. 2017.

CIMM – Centro de Informação Metal Mecânica. **Extrusão a quente**. 2017. Disponível em: <http://www.cimm.com.br/portal/material_didatico/6506-extrusao-a-quente#.WWldvOmQzIU>. Acesso em: 13 jul. 2017.

CHIAVERINI, Vicente. **Tecnologia mecânica – processos de fabricação e tratamento**. 2. ed. São Paulo: McGraw-Hill, 1986. 2 v.

DIETER George E. **Metalurgia mecânica**. 2. ed. São Paulo: Guanabara Dois, 1981.

ECONOMICES. **As etapas de fabricação de uma moeda**. 2013. Disponível em: <<https://diarideeeconomices.wordpress.com/2013/09/20/185/>>. Acesso em: 21 jul. 2017.

ECONOMICOTV. **"Como se faz" a cunhagem de uma moeda**. Lisboa. 2013. Disponível em: <<https://www.youtube.com/watch?v=LGIWpx-dwjQ>>. Acesso em: 21 jul. 2017.

INOVAÇÃO TECNOLÓGICA. **Cabine de avião e fabricada com tecnologia a explosão**. 2011. Disponível em: <<http://www.inovacaotecnologica.com.br/noticias/noticia.php?artigo=cabine-aviao-estamparia-explosao#.WYXgeOmQzIU>>. Acesso em: 5 ago. 2017.

KAY, Rhonda. Photo Walkthrough of U.S. Mint at Philadelphia. **CoinNews.net** – CoinNews. Numismatic Articles & Collector Price Tools. 2013. Disponível em: <<http://www.coinnews.net/2013/10/07/photo-walkthrough-of-u-s-mint-at-philadelphia/>>. Acesso em: 21 jul. 2017.

KIMINAMI, Claudio S; CASTRO, Walman B.; OLIVEIRA, Marcelo F. **Introdução aos processos de fabricação de produtos metálicos**. São Paulo: Blucher, 2013.

NEVILLE. **Precision Engineering Ltd. Aluminium extrusion**. 2017. Disponível em: <<http://www.nevilles.co.uk/aluminium/extrusions/>>. Acesso em: 11 jul. 2017.

PERFIL T Gerdau. 2017. Disponível em: <<https://www.gerdau.com/br/pt/productsservices/products/Document%20Gallery/barras-e-perfis-lamina-perfil-t.pdf>>. Acesso em: 15 jul. 2017.

PORTAL METÁLICA – Construção Civil. **Tubos industriais**. Disponível em: <<http://www.metalica.com.br/tubos-industriais>>. Acesso em: 4 ago. 2017.

_____. **Tubulação industrial**. Disponível em: <<http://www.metalica.com.br/tubulacao-industrial>>. Acesso em: 6 ago. 2017.

SILVA, Gilmar Cordeiro da. **Substituição das etapas de usinagem pela conformação mecânica na fabricação de contatos para soldagem por resistência**. 2003. 108 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Metalúrgica e de Minas) – Universidade Federal de Minas Gerais. Belo Horizonte. 2003. Disponível em: <<https://www.ppgem.eng.ufmg.br/defesas/682M.PDF>>. Acesso em: 22 jul.2017.

TYSENKRUPP. **Hot extruding** – extruded steel shapes – steel extrusions. 2017. Disponível em: <http://tkmnasteelprofiles.com/manufacturing_processes.html>. Acesso em: 12 jul. 2017.

ISBN 978-85-522-0190-8



9 788552 201908 >