

Conformação Mecânica

Otávio Fernandes Lima da Rocha

Presidência da República Federativa do Brasil
Ministério da Educação
Secretaria de Educação Profissional e Tecnológica

© Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Pará
Este caderno foi elaborado em parceria entre o Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Pará/IFPA-Belém e a Universidade Federal de Santa Maria para o Sistema Escola Técnica Aberta do Brasil – Rede e-Tec Brasil.

Equipe de Elaboração – Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Pará/IFPA-Belém

Reitor

Edson Ary de O. Fontes/IFPA-Belém

Coordenador Institucional

Erick Alexandre de Oliveira Fontes/IFPA-Belém

Coordenador de Curso

Oscar Jesus Choque Fernandez/IFPA-Belém

Professor-autor

Otávio Fernandes Lima da Rocha/IFPA-Belém

Equipe Técnica

Carlos Lemos Barboza/IFPA-Belém

Fabiano Darlindo Veloso/IFPA-Belém

Gisely Regina Lima Rebelo/IFPA-Belém

Wyllen Soares Pinheiro/IFPA-Belém

**Comissão de Acompanhamento e Validação
Colégio Técnico Industrial de Santa Maria/CTISM**

Coordenador Institucional

Paulo Roberto Colusso/CTISM

Coordenação Técnica

Iza Neuza Teixeira Bohrer/CTISM

Coordenação de Design

Erika Goellner/CTISM

Revisão Pedagógica

Andressa Rosemárie de Menezes Costa/CTISM

Francine Netto Martins Tadielo/CTISM

Marcia Migliore Freo/CTISM

Revisão Textual

Lourdes Maria Grotto de Moura/CTISM

Vera da Silva Oliveira/CTISM

Revisão Técnica

Eduardo Lehnhart Vargas/CTISM

Moacir Eckhardt/CTISM

Ilustração

Gustavo Schwendler/CTISM

Marcel Santos Jacques/CTISM

Rafael Cavalli Viapiana/CTISM

Ricardo Antunes Machado/CTISM

Diagramação

Leandro Felipe Aguilar Freitas/CTISM

Setor de Processamento Técnico – Biblioteca IFPA – Campus Belém

V149 Rocha, Otávio Fernandes Lima da.
Conformação mecânica / Otávio Fernandes Lima da Rocha.
— Belém : IFPA ; Santa Maria : UFSM, 2012.
68p.

1. Conformação mecânica. I. Escola Técnica Aberta do Brasil.
II. Título.

CDD: 669

Apresentação e-Tec Brasil

Prezado estudante,

Bem-vindo ao e-Tec Brasil!

Você faz parte de uma rede nacional pública de ensino, a Escola Técnica Aberta do Brasil, instituída pelo Decreto nº 6.301, de 12 de dezembro de 2007, com o objetivo de democratizar o acesso ao ensino técnico público, na modalidade a distância. O programa é resultado de uma parceria do Ministério da Educação, por meio das Secretarias de Educação a Distância (SEED) e de Educação Profissional e Tecnológica (SETEC), as universidades e escolas técnicas estaduais e federais.

A educação a distância no nosso país, de dimensões continentais e grande diversidade regional e cultural, longe de distanciar, aproxima as pessoas ao garantir acesso à educação de qualidade e ao promover o fortalecimento da formação de jovens moradores de regiões distantes dos grandes centros geográfica e ou economicamente.

O e-Tec Brasil leva os cursos técnicos a locais distantes das instituições de ensino e para a periferia das grandes cidades, incentivando os jovens a concluir o ensino médio. Os cursos são ofertados pelas instituições públicas de ensino, e o atendimento ao estudante é realizado em escolas-polo integrantes das redes públicas municipais e estaduais.

O Ministério da Educação, as instituições públicas de ensino técnico, seus servidores técnicos e professores acreditam que uma educação profissional qualificada – integradora do ensino médio e da educação técnica, – é capaz de promover o cidadão com capacidades para produzir, mas também com autonomia diante das diferentes dimensões da realidade: cultural, social, familiar, esportiva, política e ética.

Nós acreditamos em você!

Desejamos sucesso na sua formação profissional!

Ministério da Educação
Janeiro de 2010

Nosso contato
etecbrasil@mec.gov.br



Indicação de ícones

Os ícones são elementos gráficos utilizados para ampliar as formas de linguagem e facilitar a organização e a leitura hipertextual.



Atenção: indica pontos de maior relevância no texto.



Saiba mais: oferece novas informações que enriquecem o assunto ou “curiosidades” e notícias recentes relacionadas ao tema estudado.



Glossário: indica a definição de um termo, palavra ou expressão utilizada no texto.



Mídias integradas: sempre que se desejar que os estudantes desenvolvam atividades empregando diferentes mídias: vídeos, filmes, jornais, ambiente AVEA e outras.



Atividades de aprendizagem: apresenta atividades em diferentes níveis de aprendizagem para que o estudante possa realizá-las e conferir o seu domínio do tema estudado.



Sumário

Palavra do professor-autor	9
Apresentação da disciplina	11
Projeto instrucional	13
Aula 1 – Introdução à conformação dos metais	15
1.1 Conceito	15
1.2 Classificação geral da conformação dos metais	16
Aula 2 – Fundamentos da conformação plástica dos metais	23
2.1 Diagrama tensão x deformação ($\sigma \times \epsilon$)	23
2.2 Parâmetros da mudança de forma	25
2.3 Resistência à mudança de forma ou resistência à conformação (k_f)	27
Aula 3 – Operações de conformação mecânica por deformação plástica	33
3.1 No processo de laminação	33
3.2 No processo de forjamento	40
3.3 No processo de trefilação	42
3.4 No processo de extrusão	46
3.5 No processo de estampagem ou conformação de chapas	50
Referências	67
Currículo do professor-autor	68



Palavra do professor-autor

Meus amigos sejam todos bem-vindos.

Esta apostila se destina aos alunos do Curso Técnico em Metalurgia. É focada nos fundamentos da conformação mecânica dos metais e de ligas metálicas. Como pré-requisito para o curso, são necessários conhecimentos de ciência dos materiais, da resistência e propriedades dos materiais e do tratamento térmico. Ao final do curso, o aluno deverá ser capaz de aplicar, em casos específicos, as teorias fundamentais dos principais processos de fabricação mecânica por deformação plástica em materiais metálicos.

Em metalurgia, com conhecimentos de Conformação Mecânica haverá condições de correlacionar o processamento do material com a estrutura e o desempenho do material nas principais aplicações dos processos de fabricação por deformação plástica.

Tipos de esforços atuantes nos processos de conformação mecânica, principais diferenças e aplicações, definição de trabalho a quente, morno e a frio, peças produzidas a frio e a quente, entendimento do fenômeno de encruamento no trabalho a frio, recuperação e recristalização dos metais trabalhados a frio e a quente, são conhecimentos que subsidiarão os profissionais em seu desempenho na indústria.

É de fundamental importância que os alunos do Curso Técnico em Metalurgia adquiram a competência de aplicar os princípios básicos do diagrama tensão *versus* deformação, consolidação dos conceitos sobre plasticidade, elasticidade, tenacidade e resiliência, cálculo dos parâmetros da mudança de forma dos metais, cálculo da resistência da mudança de forma e do trabalho na conformação por deformação plástica. Conceitos, fundamentos de aplicação, cálculos de esforços predominantes, dimensionamento da ferramenta e de peças fabricadas pelos supramencionados processos de conformação mecânica por deformação plástica serão igualmente importantes na consolidação do perfil do técnico em metalurgia.



Apresentação da disciplina

Prezados alunos.

A disciplina foi preparada para ser trabalhada em 3 aulas, as duas primeiras ministradas em 2 semanas e a terceira em 4 semanas, totalizando 6 semanas.

Estudar-se-ão os princípios da correlação do processamento do material com a estrutura, e a influência desses fenômenos no desempenho do material, considerados nas principais aplicações dos processos de fabricação por deformação plástica, além dos tipos de esforços atuantes nos processos de conformação mecânica por deformação plástica, bem como vantagens e desvantagens dos materiais processados a frio e a quente. Finalmente, serão repassadas habilidades e competências profissionais acerca das aplicações dos princípios básicos do Diagrama Tensão versus Deformação, principais fenômenos que ocorrem ao longo da deformação do material, com destaque às principais zonas de deformação que surgem nesse diagrama, cálculo da resistência à mudança de forma e do trabalho na conformação por deformação plástica. Cálculos de esforços predominantes, dimensionamento da ferramenta e de peças fabricadas pelos processos mencionados fazem parte do rol de conhecimentos que serão oferecidos no Curso Técnico em Metalurgia ofertado no Programa e-Tec Brasil pelo IFPA.



Projeto instrucional

Disciplina: Conformação Mecânica (carga horária: 40h).

Ementa: Introdução à conformação dos metais. Fundamentos da conformação plástica dos metais. Operações de conformação mecânica por deformação plástica.

AULA	OBJETIVOS DE APRENDIZAGEM	MATERIAIS	CARGA HORÁRIA (horas)
1. Introdução à conformação dos metais	Compreender conformação mecânica e metalúrgica dos metais, suas aplicações e classificação. Diferenciar trabalho mecânico a frio do a quente, suas vantagens e desvantagens.	Ambiente virtual: plataforma <i>moodle</i> . Apostila didática. Recursos de apoio: <i>links</i> , exercícios.	05
2. Fundamentos da conformação plástica dos metais	Compreender os fundamentos metalúrgicos da conformação plástica dos metais, que consolidam a identificação das principais zonas envolvidas no diagrama tensão-deformação. Calcular os principais parâmetros que influenciam na mudança de forma do metal e determinar a resistência à mudança de forma, a força e o trabalho na conformação.	Ambiente virtual: plataforma <i>moodle</i> . Apostila didática. Recursos de apoio: <i>links</i> , exercícios.	10
3. Operações de conformação mecânica por deformação plástica	Compreender os principais parâmetros operacionais considerados nos cálculos dos esforços de conformação mecânica por deformação plástica.	Ambiente virtual: plataforma <i>moodle</i> . Apostila didática. Recursos de apoio: <i>links</i> , exercícios.	25

Aula 1 – Introdução à conformação dos metais

Objetivos

Compreender conformação mecânica e metalúrgica dos metais, suas aplicações e classificação.

Diferenciar trabalho mecânico a frio do a quente, suas vantagens e desvantagens.

1.1 Conceito

Entende-se como conformação dos metais a modificação de um corpo metálico para outra forma definida.

Os processos de conformação podem ser divididos em dois grupos: processos mecânicos, nos quais as modificações de forma são provocadas pela aplicação de tensões externas, e processos metalúrgicos, nos quais as modificações de forma estão relacionadas com altas temperaturas.

Os processos mecânicos são constituídos pelos processos de conformação plástica, para os quais as tensões aplicadas são geralmente inferiores ao limite de resistência à tração (σ_U), e pelos processos de conformação por usinagem, para os quais as tensões aplicadas são sempre superiores ao limite mencionado. A forma final, portanto, é obtida por retirada de material. Esses processos são também denominados “Processos de Conformação Mecânica” pela sua natureza.

Os processos metalúrgicos subdividem-se em conformação por solidificação, para os quais a temperatura adotada é superior à temperatura de fusão (T_F) do metal, e a forma final é obtida pela transformação líquido-sólido, e conformação por sinterização, em que a temperatura de processamento é inferior ao ponto de fusão do metal (metalurgia do pó).

1.2 Classificação geral da conformação dos metais

A Figura 1.1 apresenta um quadro geral da classificação dos processos de conformação.

Nosso estudo será intensificado nos processos de conformação plástica porque mais de 80% de todos os produtos metálicos produzidos são submetidos, em um ou mais estágios, a tais processos. Os processos de conformação plástica dos metais permitem a obtenção de peças em estado sólido, com características controladas, através da aplicação de esforços mecânicos em corpos metálicos iniciais que mantêm o seu volume constante. De uma forma resumida, os objetivos desses processos são a obtenção de produtos finais com especificação de:



- a) Dimensão e forma.
- b) Propriedades mecânicas.
- c) Condições superficiais.

Os processos de conformação plástica podem ser classificados de acordo com vários critérios:



- a) Tipo de esforço predominante.
- b) Temperatura de trabalho.
- c) Forma do material trabalhado ou do produto final.
- d) Tamanho da região de deformação (localizada ou geral).
- e) Tipo de fluxo do material (estacionário ou intermitente).
- f) Tipo de produto obtido (semiacabado ou acabado).

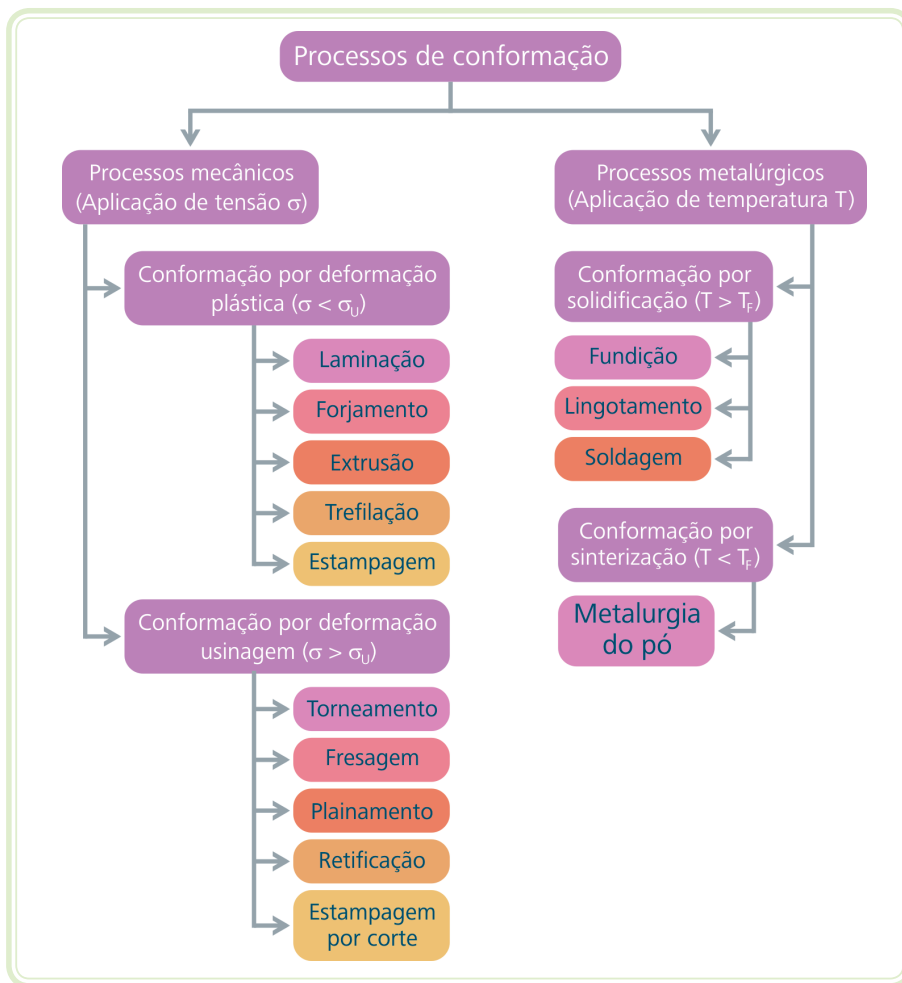


Figura 1.1: Quadro geral de classificação dos processos de conformação dos metais
 Fonte: Adaptado de Garcia, 2000

1.2.1 Classificação quanto ao tipo de esforço predominante

Os processos de conformação podem ser classificados de acordo com o tipo de esforço predominante em:

- a) Processo de conformação por compressão direta.
- b) Processo de conformação por compressão indireta.
- c) Processo de conformação por tração.
- d) Processo de conformação por cisalhamento.
- e) Processo de conformação por flexão.



Nos processos de conformação por compressão direta, predomina a solicitação externa por compressão sobre a peça de trabalho a exemplo do forjamento e da laminação.

Nos processos de conformação por compressão indireta, as forças externas aplicadas sobre a peça podem ser tanto de tração como de compressão, mas as que efetivamente provocam a conformação plástica do metal são as de compressão indireta desenvolvidas pela reação da matriz sobre a peça, a exemplo da trefilação, da extrusão e da estampagem profunda.

O principal exemplo de processo de conformação por tração é o estiramento de chapas em que a peça toma a forma da matriz pela aplicação de forças de tração em suas extremidades.

Os processos de conformação por cisalhamento envolvem forças cisalhantes suficientes para romper o metal no seu plano de cisalhamento. Os melhores exemplos desse tipo de processo são a torção de barras e o corte de chapas.

Nos processos de conformação por flexão, as modificações de forma são obtidas mediante a aplicação de um momento fletor a exemplo do dobramento de chapas e das tiras dobradas.

1.2.2 Quanto à temperatura de trabalho

Em relação à temperatura de trabalho, os processos de conformação podem ser classificados em processos com trabalho mecânico a frio e com trabalho mecânico a quente. Quando a temperatura de trabalho é maior que a temperatura que provoca a recristalização do metal, o processo é denominado como trabalho a quente e, abaixo dessa temperatura, o trabalho é denominado como a frio.

No trabalho mecânico a frio, provoca-se o aparecimento no metal do chamado efeito de encruamento, ou seja, o aumento da resistência mecânica com a deformação plástica. O trabalho mecânico a frio permite aumentar a resistência mecânica de certos metais não-ferrosos que não são endurecíveis por tratamentos térmicos.

No trabalho mecânico a quente, a deformação plástica é realizada numa faixa de temperatura, e durante um determinado tempo em que o encruamento é eliminado pela recristalização do metal.

Um metal na sua condição encruada possui energia interna elevada em relação ao metal não deformado plasticamente. Aumentando-se a temperatura, há uma tendência de o metal retornar à condição mais estável de menor energia interna. O tratamento térmico para obter esse efeito é denominado recozimento e, além da recuperação da estrutura cristalina do metal, esse tratamento provoca a diminuição da resistência mecânica e a elevação da ductilidade.

Os esquemas representativos mostrados pela Figura 1.2 apresentam as modificações estruturais que ocorrem nos trabalhos mecânicos a frio e a quente. Verifica-se, portanto, no caso do trabalho a frio, no final do processo, a estrutura completamente deformada e alinhada na mesma direção da deformação. Situação contrária é observada para o trabalho a quente onde, durante o processo, ocorre a recrystalização da estrutura.

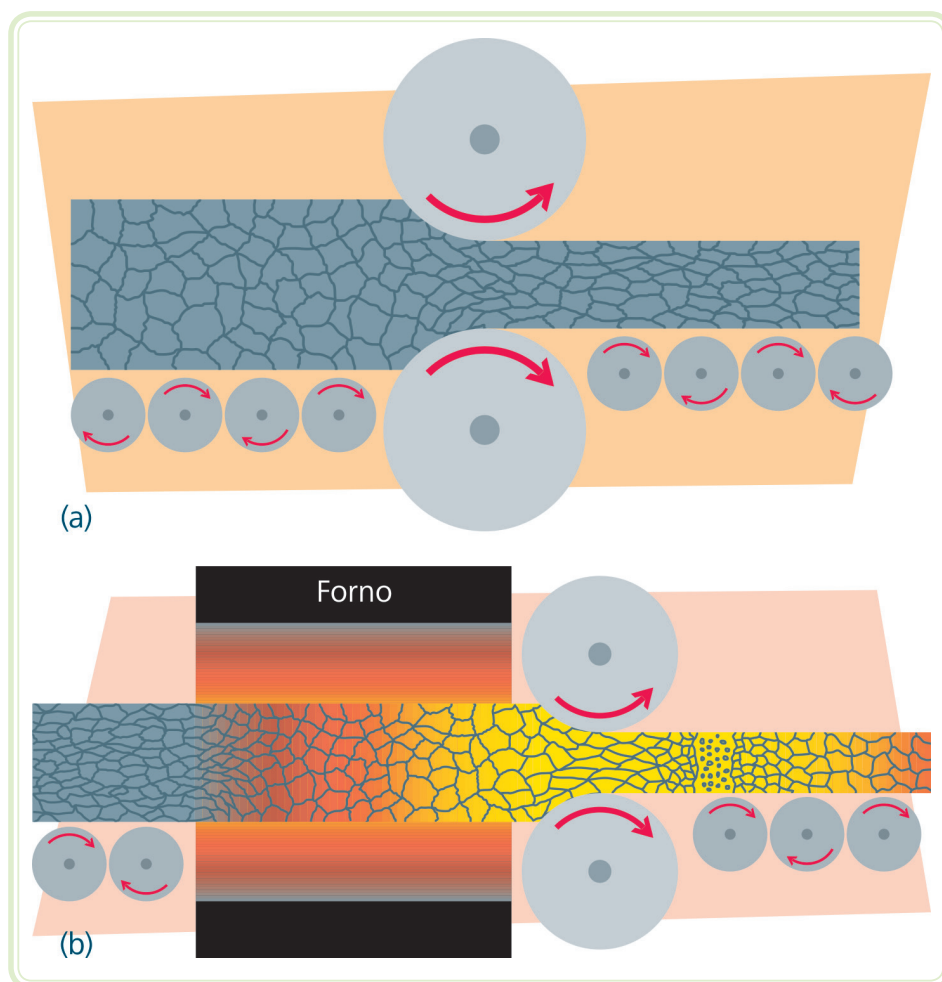


Figura 1.2: Ilustração dos processos mecânicos: (a) trabalho a frio, (b) aumento da temperatura de conformação acima da temperatura de recrystalização e trabalho a quente

Fonte: CTISM, adaptado de http://conformacaomecanica-unisc.blogspot.com/2007_03_01_archive.html

1.2.2.1 Vantagens e desvantagens do trabalho a quente



a) Vantagens

- Menor energia requerida para deformar o metal, já que a tensão de escoamento decresce com o aumento da temperatura.
- Aumento da capacidade do material para escoar sem se romper (ductilidade).
- Homogeneização química das estruturas brutas de fusão (ex.: eliminação de segregações) em virtude da rápida difusão atômica interna.
- Eliminação de bolhas e poros por caldeamento.
- Eliminação e refino da granulação grosseira e colunar do material fundido, proporcionando grãos menores, recristalizados e equiaxiais.
- Aumento da tenacidade e ductilidade do material trabalhado em relação ao material bruto de fusão.



b) Desvantagens

- Necessidade de equipamentos especiais (fornos, manipuladores, etc.) e gasto de energia para aquecimento das peças.
- Reações do metal com a atmosfera do forno, levando a perdas de material por oxidação e outros problemas relacionados. No caso dos aços, ocorre também decarbonetação superficial; metais reativos como o titânio ficam severamente fragilizados pelo oxigênio e têm de ser trabalhados em atmosfera inerte ou protegidos do ar por uma barreira adequada.
- Formação de óxidos, prejudiciais ao acabamento superficial.
- Desgaste das ferramentas é maior, e a lubrificação é difícil.
- Necessidade de grandes tolerâncias dimensionais por causa de expansão e contração térmicas.
- Estrutura e propriedades do produto resultam menos uniformes do que em caso de trabalho a frio seguido de recozimento, pois a deformação sempre maior nas camadas superficiais produz nelas uma granulação re-

cristalizada mais fina, enquanto as camadas centrais, menos deformadas e sujeitas a um resfriamento mais lento, apresentam crescimento de grãos.

No trabalho a morno ocorre uma recuperação parcial da ductilidade do material e a tensão de conformação situa-se numa faixa intermediária entre o trabalho a frio e a quente. Em termos de conformação mecânica, chama-se de:

- Trabalho a Quente (TQ) aquele que é executado em temperaturas acima de $0,5T_f$.
- Trabalho a Morno (TM), executado na faixa compreendida (grosseiramente) entre $0,3$ e $0,5 T_f$.
- Trabalho a Frio (TF) aquele que é executado entre 0 e $0,3 T_f$.

Resumo

Nesta aula vimos que a conformação pode ser entendida como a modificação de um corpo metálico para outra forma definida.

Apresentamos a divisão dos processos de conformação que podem ser divididos em dois grupos: processos mecânicos nos quais as modificações de forma são provocadas pela aplicação de tensões externas; processos metalúrgicos nos quais as modificações de forma estão relacionadas com altas temperaturas. Apresentaram-se os principais objetivos dos processos de conformação e sua classificação geral.

Atividades de aprendizagem

1. Diferencie os processos de conformação.
2. Quais os objetivos principais dos processos de conformação plástica dos metais?
3. Como podem ser classificados os processos de conformação plástica dos metais?
4. Quanto ao tipo de esforço predominante, o corte de chapas e a fabricação de tubos, barras e perfis se encaixam em que processos de conformação mecânica?



5. Quais as diferenças entre o trabalho mecânico a frio e o trabalho mecânico a quente?
6. Como se apresenta o produto conformado depois de trabalhado a frio e a quente?
7. Os trabalhos a frio ou a quente permitem que a peça sofra várias etapas de conformação plástica sem precisar de tratamentos térmicos intermediários. Critique esta afirmação.

Aula 2 – Fundamentos da conformação plástica dos metais

Objetivos

Compreender os fundamentos metalúrgicos da conformação plástica dos metais, que consolidam a identificação das principais zonas envolvidas no diagrama tensão-deformação.

Calcular os principais parâmetros que influenciam na mudança de forma do metal e determinar a resistência à mudança de forma, a força e o trabalho na conformação.

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

O estudo do diagrama tensão versus deformação é de elevada importância para se entender como um material diante de um estado de tensão se comporta durante a deformação.

Para se definir tensão e deformação convencionais, vamos considerar uma barra cilíndrica e uniforme que é submetida a uma carga de tração uniaxial crescente, semelhante ao procedimento aplicado para um ensaio de tração normalizado, conforme mostra a Figura 2.1.

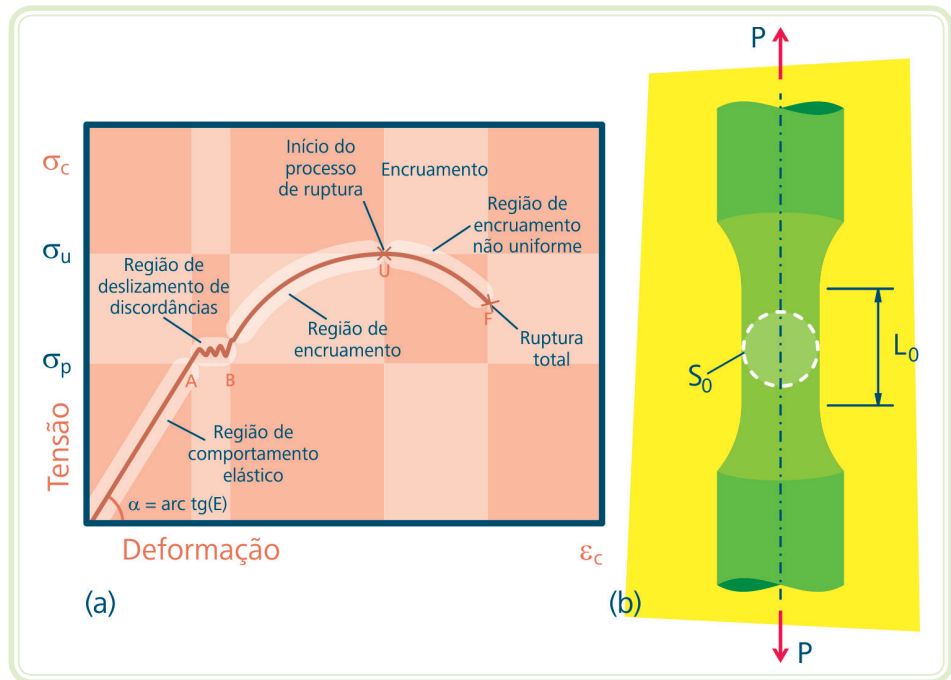


Figura 2.1: Esquema representativo do corpo de prova para ensaio de tração e do diagrama $\sigma \times \epsilon$ correspondente

Fonte: CTISM, adaptado de Garcia, 2000, p. 8

A tensão convencional, nominal ou de engenharia (σ_c), é dada por:

Equação 2.1

$$\sigma_c = \frac{P}{S_0}$$

Onde: σ_c (Pa) é a tensão

P (N) é a carga aplicada

S_0 (m²) é seção transversal original

A deformação convencional ou nominal (ϵ_c) é dada por:

Equação 2.2

$$\epsilon_c = \frac{L_1 - L_0}{L_0}$$

Onde: ϵ_c é a deformação

L_0 e L_1 são, respectivamente, os comprimentos inicial e final da peça metálica

Na curva da Figura 2.1, observam-se quatro regiões de comportamentos distintos: OA – região de comportamento elástico; AB – região de escoamento de discordância; BU – região de encruamento uniforme; UF – região

de encruamento não uniforme (o processo de ruptura tem início em U, e é concluído no ponto F).

Para um material de alta capacidade de deformação permanente, o diâmetro do corpo de prova começa a decrescer rapidamente ao se ultrapassar a carga máxima (ponto U). Assim, a carga necessária para continuar a deformação diminui até a ruptura do material.

Observa-se, na prática, uma grande variação nas características das curvas tensão-deformação para diferentes tipos de materiais. A Figura 2.2 mostra curvas tensão-deformação para algumas ligas metálicas comerciais.

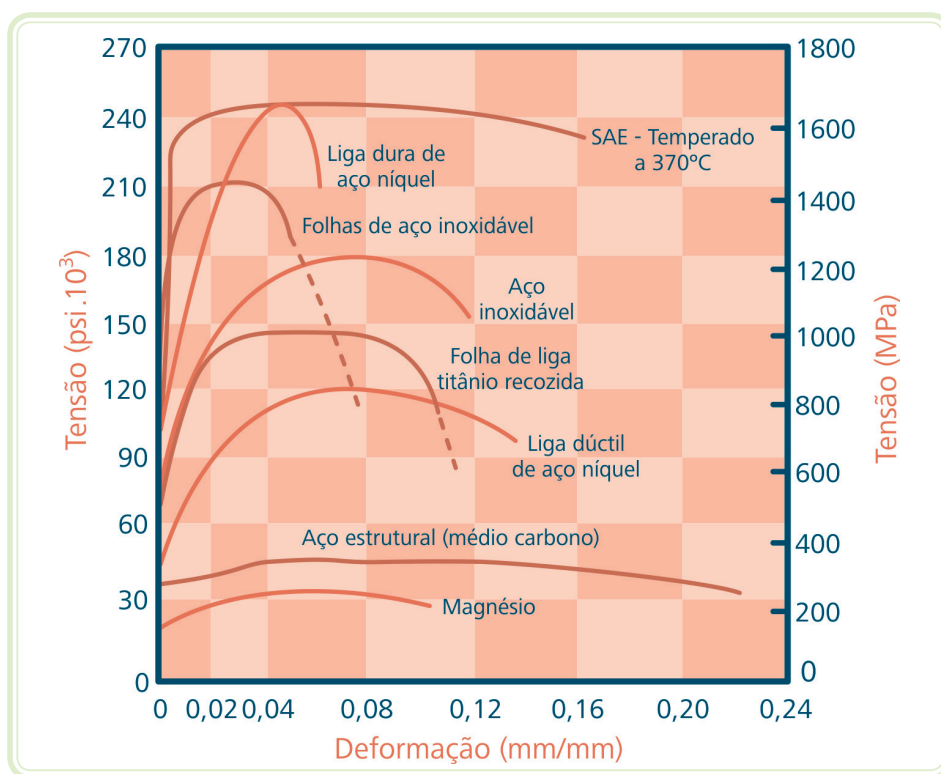


Figura 2.2: Relação do comportamento entre tensão-deformação para algumas ligas comerciais

Fonte: CTISM, adaptado de Garcia, 2000, p. 10

2.2 Parâmetros da mudança de forma

Quando na solicitação mecânica de um corpo metálico se atinge a tensão limite de escoamento (σ_p do diagrama apresentado na Figura 2.1), a peça metálica inicia um processo de deformação permanente ou deformação plástica. O principal mecanismo de deformação plástica é o de escorregamento de discordância, conforme mostra a Figura 2.3.

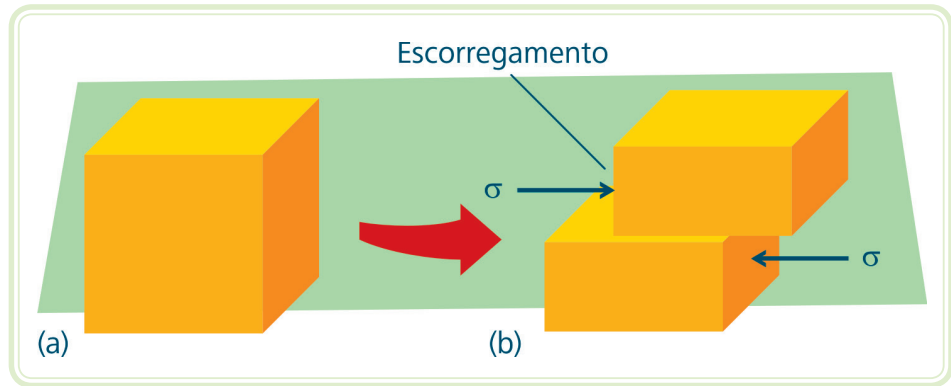


Figura 2.3: Mecanismo de deformação plástica por escorregamento

Fonte: CTISM, adaptado de Filho, 1991

Quando a conformação se propaga por escorregamento, nas diferentes direções, o volume do corpo conformado permanece constante. Na deformação de uma peça metálica, com forma de um paralelepípedo, por exemplo, de dimensões iniciais h_0 , L_0 e b_0 , para as dimensões finais h_1 , L_1 e b_1 , a mudança de forma é expressa pelas seguintes relações:

Equação 2.3

$$V_i = h_0 \times L_0 \times b_0$$

Equação 2.4

$$V_f = h_1 \times L_1 \times b_1$$

Onde: V_i e V_f são, respectivamente, os volumes inicial e final da peça metálica.

Na conformação mecânica por deformação plástica $V_i = V_f$, logo:

Equação 2.5

$$\frac{h_0 \times L_0 \times b_0}{h_1 \times L_1 \times b_1} = 1$$

As deformações absoluta, relativa e logarítmica podem, respectivamente, ser escritas na seguinte forma:

Equação 2.6

$$\Delta h = h_1 - h_0 \quad \Delta L = L_1 - L_0 \quad \Delta b = b_1 - b_0$$

Equação 2.7

$$\Delta h(\%) = \frac{h_1 - h_0}{h_0} \times 100$$

$$\Delta L(\%) = \frac{L_1 - L_0}{L_0} \times 100$$

$$\Delta b(\%) = \frac{b_1 - b_0}{b_0} \times 100$$

Equação 2.8

$$\varphi_h = \ln \frac{h_1}{h_0} \quad \varphi_L = \ln \frac{L_1}{L_0} \quad \varphi_b = \ln \frac{b_1}{b_0}$$

A soma de todas as deformações logarítmicas é nula.

2.3 Resistência à mudança de forma ou resistência à conformação (kf)

Essa tensão é medida na região de deformação plástica, zona BU na curva da Figura 2.1, definida pela relação entre a força aplicada e a área da seção reduzida. Para manter a deformação permanente, ela deve ser sempre superada a cada instante para se conseguir uma deformação adicional.

A relação entre Kf e a deformação logarítmica permite obter a curva de encruamento do metal, conforme mostra a Figura 2.4.

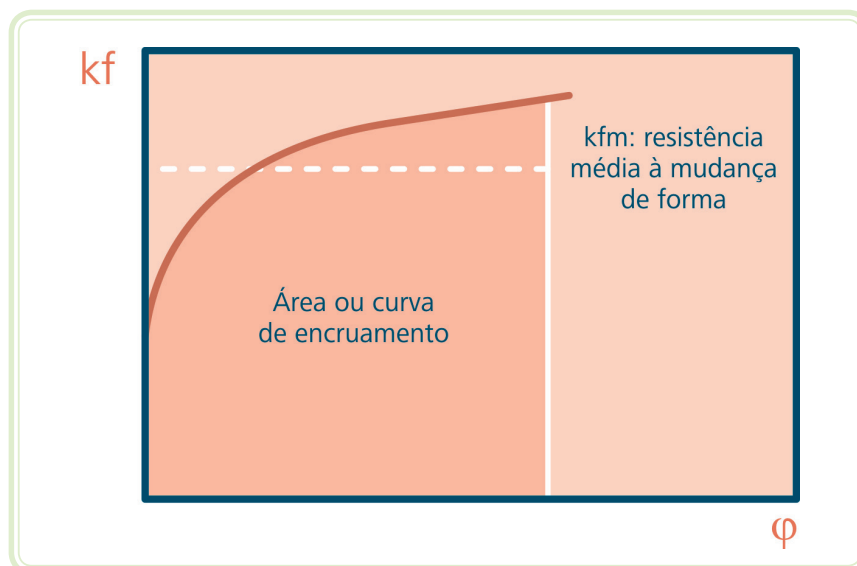


Figura 2.4: Curva de encruamento e resistência média à mudança de forma

Fonte: CTISM, adaptado de Gruning, 1973, p. 23

2.3.1 Força de conformação (F_C)

A força de conformação é dada por:

Equação 2.9

$$F_C = A_0 \times k_f \quad \text{em kg}$$

Onde: A_0 é área da seção inicial da peça (mm^2)

2.3.2 Trabalho na conformação (W)

Na deformação de um corpo cilíndrico, por exemplo, de altura h_0 até uma altura h_1 , é consumido um certo trabalho que pode ser determinado pela multiplicação do volume (V) do material deformado e da área varrida sob a curva de encruamento (a), ou seja:

Equação 2.10

$$W = V \times a \quad \text{em J}$$

Onde:

Equação 2.11

$$V = A_0 \times (h_1 - h_0) \quad \text{em mm}^3$$

A Figura 2.5 apresenta as curvas para determinação de " k_f " e " a ", em função da deformação logarítmica.

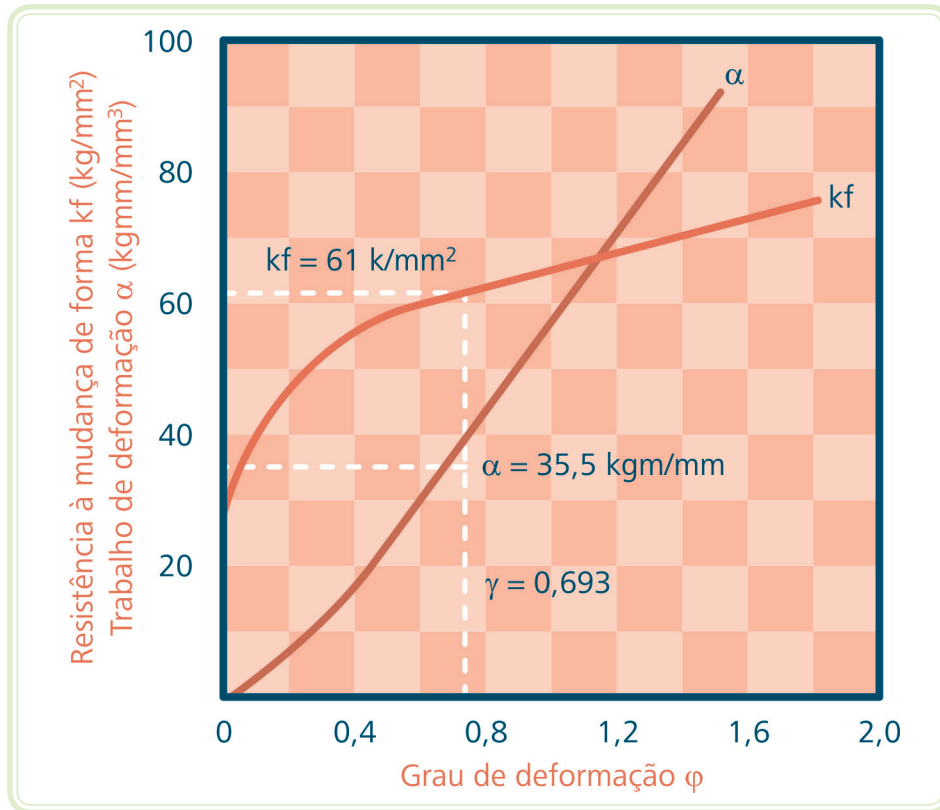


Figura 2.5: Curva de encruamento para o aço Ck 10

Fonte: CTISM, adaptado de Gruning, 1973, p. 21

Resumo

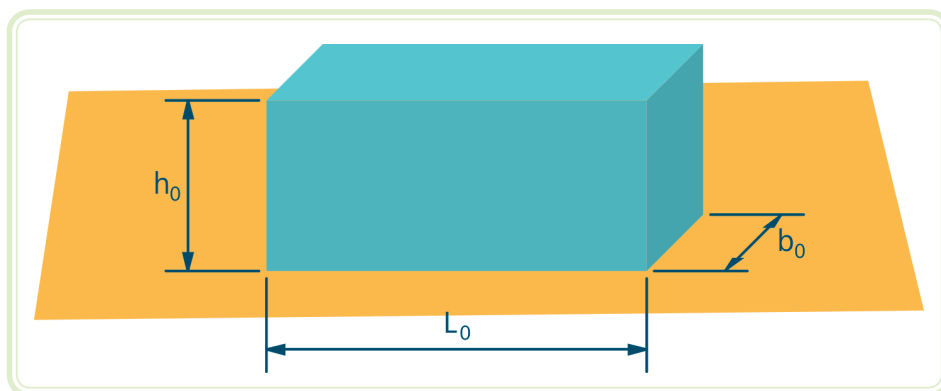
Nesta aula foi apresentado o diagrama tensão versus deformação. Por ele foi definida a tensão convencional nominal ou de engenharia como a relação entre a força aplicada sobre a seção transversal de um corpo de prova submetido a um ensaio de tração. Foram apresentadas as principais regiões do diagrama como as de comportamento elástico, escoamento de discordância, encruamento uniforme, e encruamento não-uniforme.

Foram estudados os principais parâmetros de mudança de forma como deformação absoluta, deformação relativa, e deformação logarítmica. Estudou-se também a resistência à mudança de forma (k_f) e como calculá-la. Essa tensão é medida na região de deformação plástica, definida pela relação entre a força aplicada e a área da seção reduzida, curva de encruamento.



Atividades de aprendizagem

1. De que forma a estrutura bruta de fusão influencia no desempenho de um material que será submetido a um ou mais processos de conformação plástica?
2. O que se entende por elasticidade e plasticidade dos metais? Na prática, quando se quer dar forma a um corpo metálico por aplicações de tensões externas, em que região de deformação no diagrama da Figura 2.1 você deve trabalhar? Justifique. E na construção civil? Que região do gráfico você deve empregar, considerando que nesse segmento o material mais empregado é o aço estrutural? Justifique.
3. Utilize os parâmetros de mudança de forma num paralelepípedo nas condições que seguem:



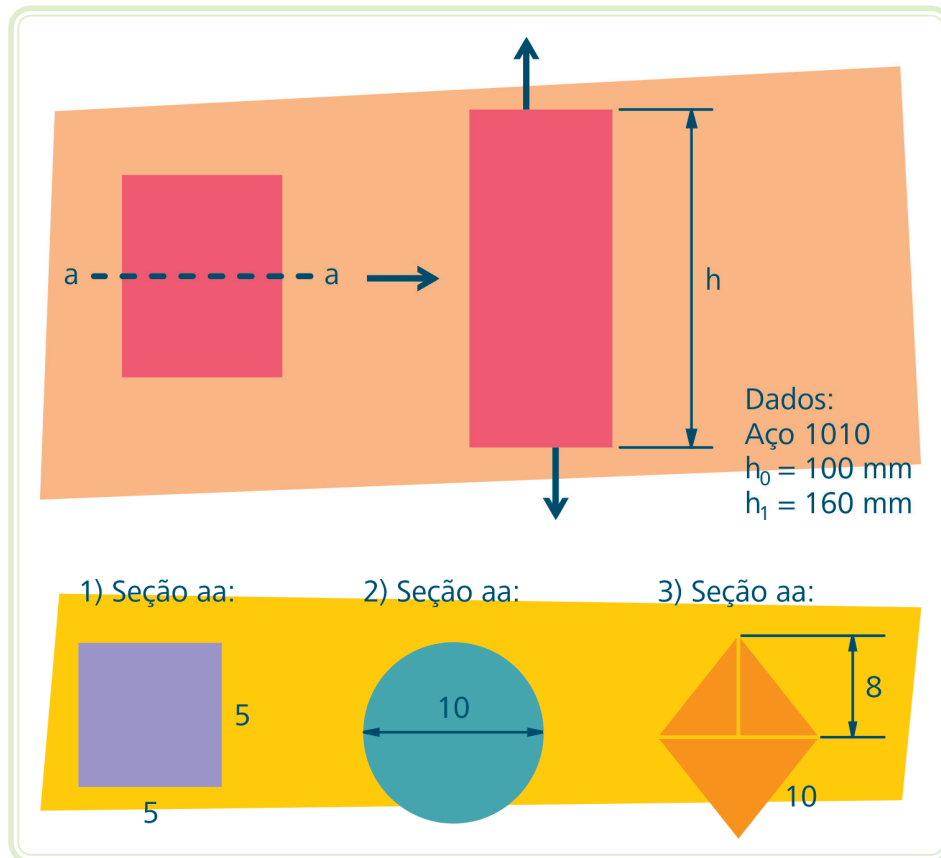
Exercício 3.1: Parâmetro de mudança de forma num paralelepípedo

Fonte: Autor

- a) Dimensões iniciais: $h_0 = 40 \text{ mm}$; $b_0 = 20 \text{ mm}$ e $L_0 = 100 \text{ mm}$
- b) Dimensões após deformação: $h_1 = 20 \text{ mm}$; $b_1 = 20 \text{ mm}$ e $L_1 = 120 \text{ mm}$

Analisando os planos de deformação do paralelepípedo, pelas suas dimensões finais, que tipos de esforço foram aplicados ao longo das dimensões L , h e b ?

4. Nas condições que seguem, calcule:



Exercício 4.1: Exemplos para cálculo

Fonte: Autor

- a) A resistência à mudança de forma (k_f).
- b) Força de deformação (F_c).
- c) Trabalho de deformação (W).

Aula 3 – Operações de conformação mecânica por deformação plástica

Objetivos

Compreender os principais parâmetros operacionais considerados nos cálculos dos esforços de conformação mecânica por deformação plástica.

3.1 No processo de laminação

A laminação é um processo de conformação que consiste na passagem de um corpo sólido (peça) entre dois cilindros (ferramentas) que giram à mesma velocidade periférica, mas em sentidos contrários, conforme mostra a Figura 3.1.

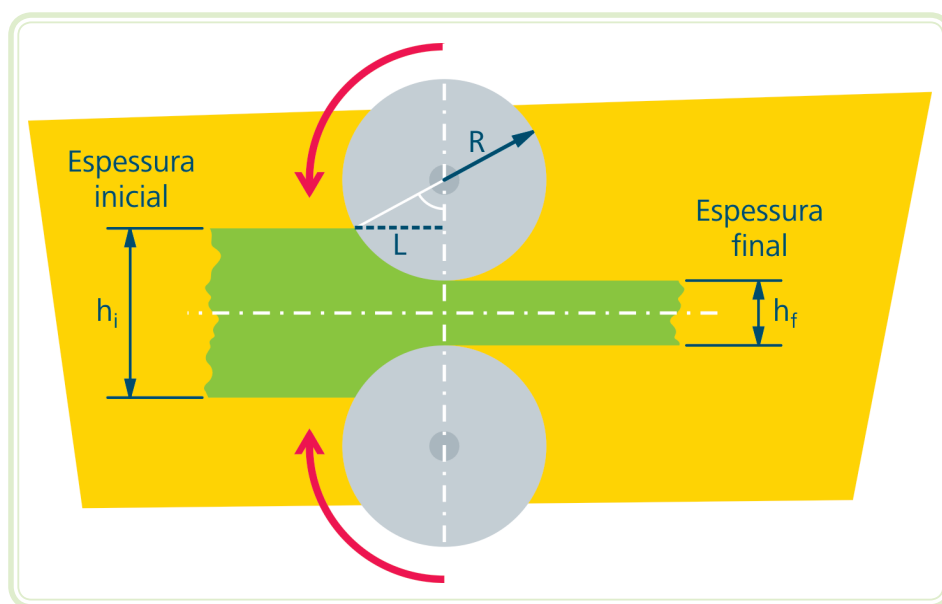


Figura 3.1: Ilustração do processo de laminação

Fonte: CTISM, adaptado de Filho, 1991

3.1.1 Condições de arraste da peça pelos cilindros

Equação 3.1

$$\mu \geq \operatorname{tg} \alpha$$

Onde: μ é o coeficiente de atrito entre o cilindro de laminação (Figura 3.1) e a peça

α é o ângulo de contato

Equação 3.2

$$\alpha = \sqrt{\frac{\Delta h}{R}}$$

A redução de laminação é definida como:

Equação 3.3

$$\Delta h = h_i - h_f$$

Onde: h_i e h_f são, respectivamente, as espessuras iniciais e finais do corpo
 R é o raio de curvatura do cilindro de laminação

3.1.2 Condição para redução máxima

Equação 3.4

$$\Delta h_{\max} = \mu^2 \times R$$

3.1.3 Comprimento do arco de contato (L)

Equação 3.5

$$L = \sqrt{R \times \Delta h}$$

3.1.4 Cálculo da carga na laminação (P)

3.1.4.1 Laminação de chapas a frio

Equação 3.6

$$P = \sigma_0 \times A$$

Onde: $A = L \times w$

A é a área de contato

L é o comprimento (arco de contato na direção de laminação)

w é a largura da chapa (direção do arco de contato na direção transversal)

σ_0 é a tensão média de escoamento do material laminado

A equação 3.6 não leva o efeito do atrito para o cálculo da carga de laminação. Orowan (apud HELMAN; CETLIN, 1983, p. 136) sugeriu uma expressão que contempla o efeito do atrito, aumentando a carga de laminação em 20%, conforme mostra a equação 3.7.

Equação 3.7

$$P = 1,2 \times \sigma_0 \times A$$

A equação 3.7 pode ser escrita da seguinte forma:

Equação 3.8

$$\frac{P}{w} = 1,2 \times \sigma_0 \times \sqrt{R \times \Delta h}$$

Onde: P/w é a carga por unidade de largura

Uma expressão para a carga de laminação de elevada precisão foi desenvolvida em 1927 por Ekelund (apud HELMAN; CETLIN, 1983, p. 136; FILHO et al, 1991, p. 30), a qual leva em consideração o raio do cilindro deformado R' proveniente das deformações elásticas que ocorrem no cilindro de laminação. Para maiores detalhes, consultar o autor referido.

3.1.4.2 Laminação de chapas a quente

a) Equação de Sims (HELMAN; CETLIN, 1983, p. 157)

Equação 3.9

$$\frac{P}{w} = \sigma_0 \times \sqrt{R \times \Delta h} \times Q_s$$

Onde: Q_s pode ser obtido através dos valores descritos no gráfico apresentado pela Figura 3.2. No gráfico em questão, o valor de “e” especificado nos eixos das abscissas se refere à deformação convencional na laminação (ϵ_c), dada pela seguinte expressão:

Equação 3.10

$$e = \frac{h_i - h_f}{h_i}$$

b) Equação de Ekelund (HELMAN; CETLIN, 1983, p. 157)

Equação 3.11

$$\frac{P}{w} = \sigma_0 \times \sqrt{R \times \Delta h} \times Q_e$$

Onde:

Equação 3.12

$$Q_e = 1 + \frac{1,6 \mu L - 1,2 \Delta h}{h_i + h_f}$$

Onde: o coeficiente de atrito μ varia de acordo com a temperatura de laminação, conforme a Equação 3.13

L é o comprimento do arco de contato definido pela Equação 3.5

Equação 3.13

$$\mu = 0,8 (1,05 - 0,0005 T)$$

Onde: T é a temperatura de laminação em °C

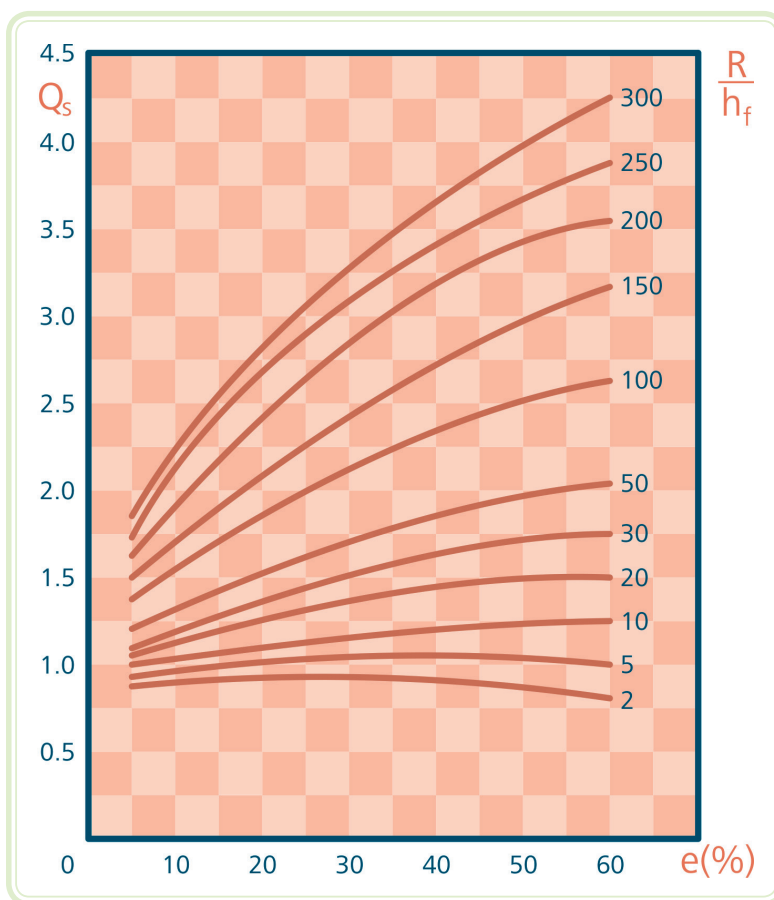


Figura 3.2: Ábaco para cálculo de Q_s

Fonte: CTISM, adaptado de Helman; Cetlin, 1983, p. 158

c) Equação de Orian-Pascoe (HELMAN; CETLIN, 1983, p. 158)

Equação 3.14

$$\frac{P}{W} = \sigma_0 \times \sqrt{R \times \Delta h} \times Q_p$$

Onde:

Equação 3.15

$$Q_p = \frac{1}{4} \left[n + \sqrt{\frac{R}{h_f} \left(\frac{\Delta h}{h_f} \right)} \right]$$

3.1.5 Cálculo do torque na laminação (M)

Equação 3.16

$$M = 2P (\lambda L)$$

Onde: λ é um fator que leva em consideração o efeito da deformação elástica do cilindro de laminação, apresentando os seguintes valores: 0,5 e 0,45 para laminação a quente e a frio, respectivamente

3.1.6 Cálculo da potência na laminação (N)

A potência consumida por cada cilindro, girando a “n” revoluções por minutos, é dada por:



Equação 3.17

$$N = 2\pi nM$$

Onde: M é medido em kg.m
n é medido em rpm

Para obter N em CV, a Equação 3.17 se transforma em:

Equação 3.18

$$N = \frac{2\pi nM}{60 \times 75}$$

A potência total necessária pelos cilindros é obtida multiplicando a Equação 3.18 por 2 (dois).

3.1.7 Especificação do cilindro de laminação

Os cilindros com superfícies cilíndricas (geratriz reta), Figura 3.1, são utilizados para laminação de placas e chapas. Por outro lado, os cilindros que apresentam ranhuras ou passagens (aberturas formadas na superfície), destinam-se à laminação de perfis e barras, conforme mostra a Figura 3.3.

A literatura propõe as seguintes recomendações para um projeto eficiente de um cilindro de laminação:



- a) Quanto menor for o número de passes, menor será o custo de fabricação do cilindro.
- b) Temperatura de trabalho maior permite uma maior intensidade de redução com menor desgaste dos cilindros.
- c) Um diâmetro maior dos cilindros permite maior intensidade de redução sem fratura de cilindro e maior facilidade de entrada da peça com uma área de contato maior. Exige, contudo, maior potência motora, provoca maior espalhamento e reduz a deformação na direção da laminação.

Os cilindros de laminação de blocos e placas têm como principal requisito a resistência mecânica, pois são submetidos na laminação de grandes massas com elevadas reduções, a pressões elevadas e choques intensos que se associam à solicitação térmica transmitida à superfície. Essa solicitação térmica pode provocar a formação de fissuras superficiais que têm a possibilidade de se expandirem com os choques mecânicos e provocarem a fratura dos cilindros. Para essas solicitações, os cilindros são comumente constituídos de aço-liga (por exemplo: 0,85% C, 1% Mn, 1% Cr, 0,25% Mo) e fabricados por fundição, com tratamentos térmicos posteriores de recozimento, têmpera e revenido.

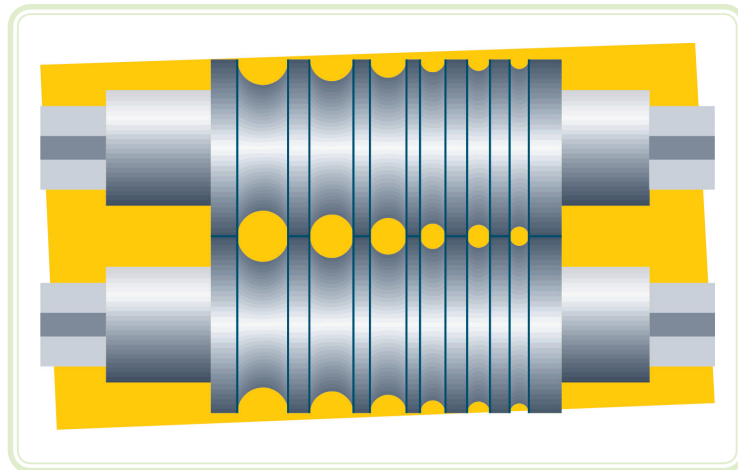


Figura 3.3: Arranjo duo de cilindros com passagens para a laminação a quente de barras

Fonte: CTISM, adaptado de Cetlin; Helman, 1983

3.1.8 Classificação dos produtos laminados

A classificação dos produtos laminados é realizada considerando suas formas e dimensões, de acordo com normas técnicas tradicionalmente estabelecidas. Essas normas apresentam diferenças nas indicações entre si e quando se trata de produtos siderúrgicos ou de produtos de metais não ferrosos. O Quadro 3.1 indica o sistema de definição para os laminados de aço.

Quadro 3.1: Definições de produtos siderúrgicos laminados (ABNT TB-52/68)

Produto semiacabado	Produto que, para a utilização final, necessita de acabamento (por exemplo, placa, tarugo, etc.)
Produto acabado	Produto que pode ser empregado na forma em que se encontra.
Produto plano	Produto obtido com cilindros de geratriz aproximadamente reta.
Bloco	Produto semiacabado da seção transversal $> 15.600 \text{ mm}^2$, de relação largura/espessura ≤ 2 e com arestas arredondadas.
Placa	Produto semiacabado e com espessura $> 40 \text{ mm}$, relação largura/espessura > 2 e com arestas arredondadas.
Platina	Produto semiacabado $\geq 150 \text{ mm}$ e espessura ≥ 6 e $\leq 40 \text{ mm}$.
Tarugo	Produto semiacabado da seção transversal $\leq 15.600 \text{ mm}^2$, de espessura mínima $= 40 \text{ mm}$, relação largura/espessura ≤ 2 , e com arestas arredondadas; outra denominação possível é palanquilha.
Barra	Produto acabado de seção transversal constante e com forma geométrica simples (barra quadrada, retangular, oval, sextavada, etc.).
Vergalhão	Barra redonda laminada a quente com amplas tolerâncias dimensionais ou de superfície (uso comum em concreto armado).
Perfil	Produto acabado da seção transversal com forma geométrica simples ou composta de formas geométricas simples.
Perfil leve	Perfil com dimensões nominais $< 80 \text{ mm}$.
Perfil médio	Perfil com dimensões nominais $> 80 \text{ mm}$ e $< 200 \text{ mm}$.
Perfil pesado	Perfil com dimensões nominais $> 200 \text{ mm}$.
Trilho	Perfil de seção transversal especial destinado a formar a pista de rolamento dos veículos do tipo ferroviário.
Tubo	Produto oco de seção constante e parede uniforme, geralmente retilíneo e de seção circular.
Viga metálica	Perfil de seção transversal na forma de H, I, U, etc.
Fio máquina	Produto intermediário de seção circular utilizado para a fabricação de arames, fios, rebites, etc., e geralmente fornecidos em rolos.
Chapa	Produto plano de espessura $\geq 0,3 \text{ mm}$ e largura $\geq 300 \text{ mm}$.
Tira	Produto plano de espessura $\geq 0,30 \text{ mm}$ e $\leq 5,00 \text{ mm}$, e largura $< 300 \text{ mm}$.
Chapa grossa	Chapa com espessura $> 5,00 \text{ mm}$ e largura $\geq 300 \text{ mm}$.
Chapa fina	Chapa com espessura $\geq 0,30 \text{ mm}$ e $\leq 6,00 \text{ mm}$, e largura $\geq 300 \text{ mm}$.
Folha	Produto plano com espessura $< 0,30 \text{ mm}$ e com qualquer largura.
Fita	Produto plano de largura $\leq 300 \text{ mm}$ e fornecida em bobina.

Fonte: Adaptado de Filho, 1991

Os produtos laminados podem ser inicialmente classificados em produtos semiacabados e acabados. Os produtos semiacabados são os blocos, as placas e os tarugos (ou palanquilhas). Os produtos acabados, por sua vez, se subdividem em dois grupos: os não planos e os planos.

3.2 No processo de forjamento

Forjamento é o processo de conformação através do qual se obtém a forma desejada da peça por martelamento ou aplicação gradativa de pressão. Esse processo normalmente é efetuado a quente, embora certos metais possam ser forjados a frio. Neste item, tratar-se-á do forjamento convencional, ou seja, o processo conduzido a quente.

O processo de forjamento subdivide-se em duas categorias: forjamento livre, ou em matriz aberta e forjamento em matriz fechada, conhecido apenas como forjamento em matriz. A Figura 3.4 apresenta de forma esquemática as duas categorias de forjamento em questão.

No forjamento em matrizes fechadas, o metal deve adotar a forma esculpida previamente nas duas matrizes, havendo fortes restrições ao livre espalhamento do material. O forjamento em matriz aberta é usado normalmente quando o número de peças a produzir é relativamente pequeno, e o tamanho delas é grande (eixos de turbina e de navios, grandes virabrequins e anéis, etc.).

Existem duas classes principais de equipamentos de forjamento: os martelos e as prensas. Os martelos provocam deformação do metal por impacto e as prensas submetem o metal a uma força de compressão em baixa velocidade.

3.2.1 Classificação dos produtos forjados

A classificação desses produtos pode se dar considerando o processo a que foram submetidos e da qualidade particularmente dimensional do produto acabado. Assim, podem ser: forjados em matriz aberta e forjados em matriz fechada, forjados em martelos, forjados em máquinas forjadas, forjados a quente ou a frio e forjados em diferentes níveis de precisão dimensional, de acordo com normas de convenções internacionais.

3.2.2 Propriedades de produtos forjados

As propriedades mecânicas dos produtos forjados são limitadas à temperatura de trabalho, isto é, entre os forjados a frio e a quente. Sabe-se que o trabalho a frio proporciona ao produto conformado limites de resistência maiores e ductilidade menor. Os forjados a frio se apresentam com índice de rugosidade bem menor.

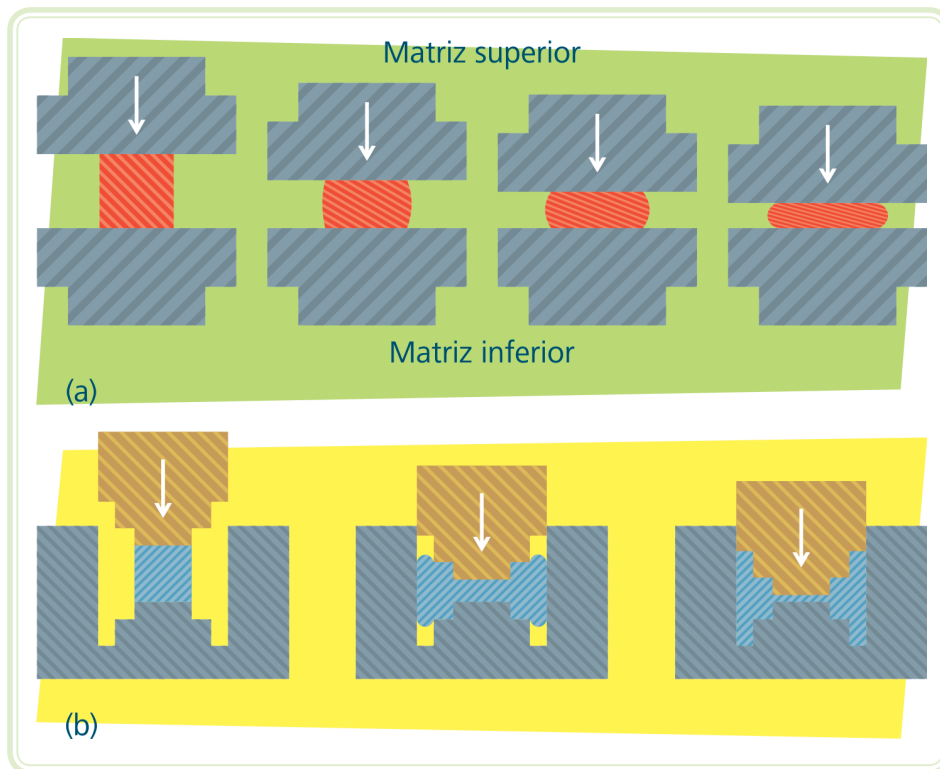


Figura 3.4: (a) Forjamento em matriz aberta e (b) forjamento em matriz fechada

Fonte: CTISM, adaptado de www.cimm.com.br

3.2.3 Cálculo do esforço no forjamento (P)

3.2.3.1 Estado plano de deformação

As equações 3.19 e 3.20 representam o cálculo do esforço no processo de forjamento.

Equação 3.19

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

Equação 3.20

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

Onde: P é o esforço ou a pressão de forjamento para deformar a peça
 P_m é a carga média agindo sobre a interface metal/matriz
 O produto $a \times b$ é 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

A Figura 3.5 mostra de forma esquemática a ação da pressão P .

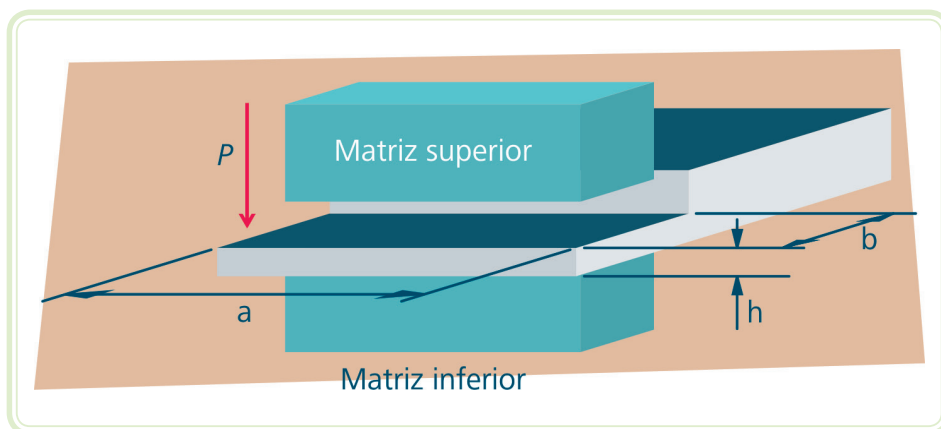


Figura 3.5: Esquema representativo do esforço de forjamento

Fonte: CTISM, adaptado de www.cimm.com.br

3.3 No processo de trefilação

A trefilação é um processo de conformação plástica que se realiza pela operação de conduzir um fio (uma barra ou tubo) através de uma ferramenta denominada fieira, de formato externo cilíndrico e que contém um furo no centro por onde passa o fio. Esse furo, com diâmetro decrescente, apresenta um perfil na forma de funil curvo ou cônico.

A passagem do fio pela fieira provoca a redução de sua seção e, como a operação é comumente realizada a frio, ocorre o encruamento com alteração das propriedades mecânicas do material do fio. Essa alteração se dá no sentido da redução da ductilidade e do aumento da resistência mecânica. Portanto, entre as diversas etapas da trefilação, pode ocorrer a necessidade de se realizarem tratamentos térmicos de recozimento, para diminuir o efeito do encruamento e para fornecer à peça ductilidade suficiente para a continuidade do processo.

A matéria-prima para o processo de trefilação é um produto na forma de arame (barra ou tubo) obtido pelo processo de extrusão (para metais não ferrosos) ou pelo processo de laminação (para metais ferrosos e não ferrosos). Os esforços preponderantes na deformação são esforços de compressão exercidos pelas paredes do furo da ferramenta sobre o fio no momento de sua passagem, por efeito de um esforço de tração de origem externa aplicado na direção axial do fio. Como o esforço externo é de tração, e o esforço que provoca a deformação é de compressão, o processo de trefilação, conforme a aula 1, é classificado como de compressão indireta, como mostra o esquema apresentado pela Figura 3.6.

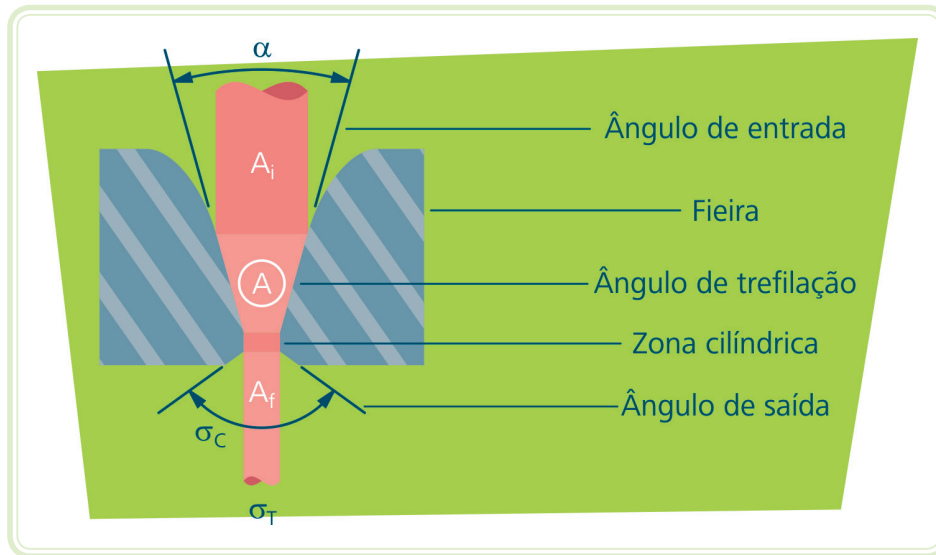


Figura 3.6: Esquema representativo do processo de trefilação

Fonte: CTISM, adaptado de www.cimm.com.br

Como se observa na Figura 3.6, σ_c e σ_T são, respectivamente, as tensões de compressão e tração, A representa as áreas da barra trefilada (A_f) e a trefilar (A_i).

3.3.1 Tensão aplicada na trefilação (σ_T)

3.3.1.1 Deformação homogênea

Equação 3.21

$$\sigma_T = \sigma_0 \ln \frac{A_i}{A_f}$$

Onde: σ_0 é a tensão média de escoamento

A_i e A_f são, respectivamente, as áreas da barra a trefilar e trefilada

3.3.1.2 Método dos blocos

Equação 3.22

$$\sigma_T = \sigma_0 \frac{1+B}{B} \left[1 - (1-R)^B \right]$$

Onde:

Equação 3.23

$$B = \mu \cotg \alpha$$

Equação 3.24

$$R = 1 - \frac{A_f}{A_i}$$

Onde: α é o semiângulo da fieira
 μ é o coeficiente de atrito na interface barra-fieira
 R é a relação de trefilação
 B é o fator que considera o efeito de atrito

O ângulo ótimo para a fieira é dado pela seguinte expressão:

Equação 3.25

$$\alpha_{\text{ótimo}} = \sqrt{\frac{2}{3} \mu \ln \frac{R_i}{R_f}}$$

Onde: R_i e R_f são os raios iniciais e finais da barra, antes e depois da trefilação, respectivamente

3.3.2 Condição de redução máxima

- Sem atrito:

Equação 3.26

$$\sigma_T = \sigma_0 \ln \frac{A_i}{A_f} = \sigma_0 \ln \frac{1}{1-R}$$

- Tensão máxima admissível: $\sigma_T = \sigma_0$

Logo: $R = 63\%$, que é a redução máxima na trefilação, sem o atrito, que é obtida quando se igual $\sigma_T = \sigma_0$.

O denominado ângulo ou semiângulo da fieira se refere ao ângulo do cone de trabalho, conforme o esquema mostrado na Figura 3.6.

3.3.3 Especificação da ferramenta de trabalho

No projeto da ferramenta de trefilação, os materiais da fieira devem:



- Permitir a trefilação de grande quantidade de fios, sem que ocorra um desgaste acentuado da fieira.
- Permitir a trefilação a altas velocidades para produzir elevadas quantidades por unidade de tempo.
- Permitir a adoção de elevadas reduções de secção.

- d) Conferir calibração constante do diâmetro do fio.
- e) Conferir longa vida à ferramenta, sem necessidade de paradas da máquina de trefilar para controle de dimensões e para substituição da ferramenta.
- f) Permitir a obtenção de superfície lisa e brilhante no fio durante longo período de uso.

Os materiais comumente usados para a fieira são:

- Diamante, para fios de diâmetro até ou menor que 2 mm.
- Metal duro, para fios com diâmetro maior que 2 mm.



Os diamantes industriais, provenientes de pedras trabalhadas ou de lascas de pedras, são usados para fieiras após o estudo da orientação cristalográfica que permita a melhor furação para determinado diâmetro. Não devem ter defeitos. Precisam possuir suficientes dureza e resistência mecânica em todas as direções de trabalho.

As fieiras fabricadas com metal duro são obtidas por sinterização seguindo as seguintes etapas de fabricação: mistura dos pós metálicos, compressão dos pós em matriz com forma próxima à final, correção da forma por raspagem, sinterização a uma temperatura elevada, em atmosfera controlada e polimento final.

3.3.4 Classificação dos produtos trefilados

A classificação dos produtos trefilados é realizada inicialmente considerando o tipo de produto: barra, tubo, arame ou fio.

As barras mais finas, em geral com diâmetro menor do que 5 mm, passam a se denominar arames ou fios. Usualmente, denomina-se o produto como arame quando o seu uso é para fins de construção mecânica e como fio, quando seu uso é para fins elétricos (condutor elétrico).

Os fios podem, por sua vez, ser classificados considerando seu diâmetro e o tipo de metal que o constitui. No caso dos fios de cobre, é comum a classificação em fios grossos (5 a 2 mm), fios médios (2 a 0,5 mm), fios finos (0,5 a 0,15 mm) e fios capilares (menor do que 0,15 mm). Além disso, os fios podem ser ainda classificados pelo seu emprego e pelos tipos de eventuais revestimentos plásticos ou metálicos aplicados.

3.3.5 Propriedades dos produtos trefilados

As propriedades mecânicas e metalúrgicas e as características dimensionais dos produtos trefilados dependem das características da matéria-prima e dos diversos fatores no processo de trefilação (tensão, temperatura de trabalho, lubrificação, deformação, velocidade de deformação, entre outros).

Diversas normas técnicas, nacionais e internacionais, estabelecem as especificações dos diversos produtos trefilados, tanto em ferrosos quanto em não ferrosos. Como exemplo, pode-se citar, resumidamente, a especificação de fios de cobre (fios de cobre Nu de secção circular para fins elétricos, EB-11, ABNT, RJ, 1978). Essa norma se aplica a fios para enrolamentos em geral, para telecomunicações e para projetos de condutores especiais.

3.3.6 Propriedades mecânicas

Especificação de fios de cobre Nu de secção circular para fins elétricos. (extraído da Norma EB-11, ABNT, RJ, 1978).

Tabela 3.1: Propriedades mecânicas

Têmpera	Alongamento da ruptura mínimo (%)	Limite de resistência à tração (MPa)
Mole	25 (em 250 mm)	----
Mole-duro	0,88 (em 1500 mm)	373-422
Duro	0,85 (em 1500 mm)	471

Fonte: Adaptado de Filho, 1991, p. 117

Tabela 3.2: Propriedades elétricas

Têmpera	Resistividade a 20°C (ohm.mm ² /m)	Condutividade a 20°C (%IACS)
Mole	0,017241	100
Mole-duro	0,017837	96,66
Duro	0,017930	96,16

Fonte: Adaptado de Filho, 1991, p. 117

3.3.7 Condições superficiais

As superfícies dos fios acabados devem estar isentas de fissuras, asperezas, escamas, estrias, rebarbas, inclusões, resíduos de óxidos ou de outros materiais estranhos.

3.4 No processo de extrusão

A extrusão é um processo de conformação plástica que consiste em fazer passar um tarugo ou lingote de seção circular colocado dentro de um recipiente, pela abertura existente no meio de uma ferramenta colocada na

extremidade do recipiente, por meio da ação de compressão de um pistão acionado pneumática ou hidráulicamente. Os produtos da extrusão são perfis e tubos e, particularmente, barras de seção circular.

Normalmente o processo de extrusão é realizado a quente, diminuindo, portanto, os efeitos do encruamento.

O lingote inicial é assim denominado por ser proveniente de um processo de fundição. Contudo, se a peça inicial, matéria-prima para a extrusão, for obtida do processo de laminação de barras de grande seção, é melhor ser designada como barra inicial ou tarugo.

A extrusão é classificada como processo de compressão indireta, pois são as paredes internas da ferramenta que provocam, por causa da reação à pressão do pistão, a ação de compressão sobre o tarugo.

A Figura 3.7 apresenta o esquema do processo em questão.

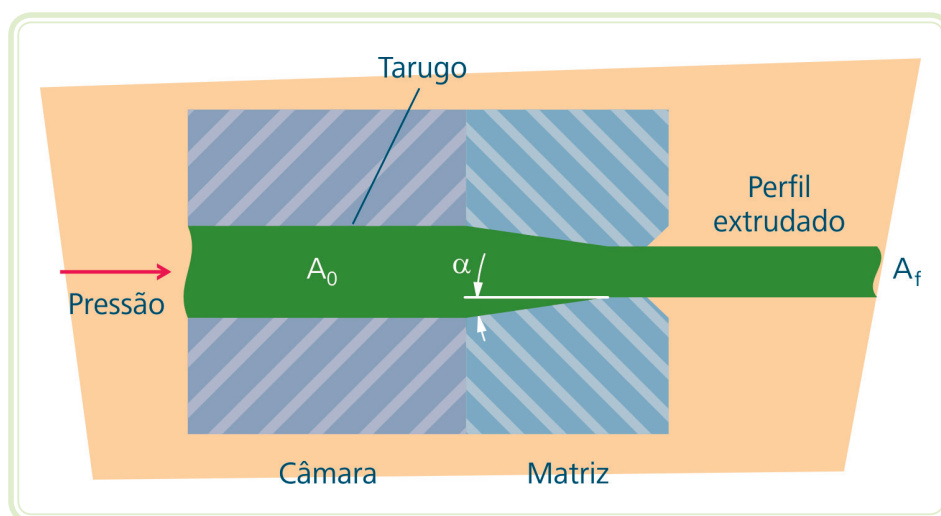


Figura 3.7: Esquema representativo do processo de extrusão direta

Fonte: CTISM, adaptado de www.cimm.com.br

O processo de extrusão, quanto ao movimento do material, pode ser classificado em dois tipos: direto e inverso, conforme mostram as Figuras 3.7 e 3.8, respectivamente. Na extrusão direta, o pistão age sobre o tarugo, forçando sua passagem pela ferramenta, colocada no lado oposto do recipiente e provocando uma intensa ação de atrito entre o tarugo e o recipiente de extrusão. Na extrusão inversa, o pistão se mantém fixo, com a ferramenta colocada na sua extremidade, e o recipiente com o tarugo avança em sua direção, tornando inexistente o atrito entre o tarugo e o recipiente.

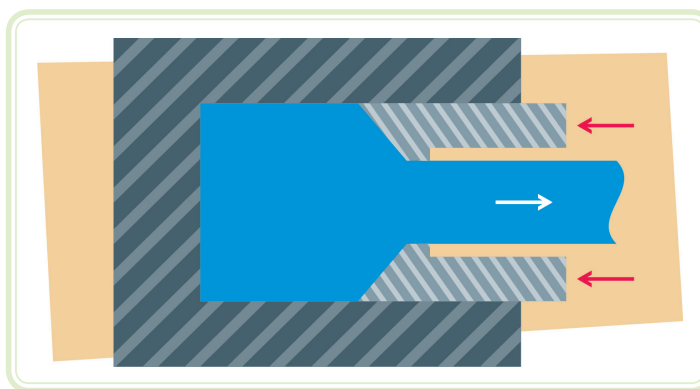


Figura 3.8: Esquema representativo do processo de extrusão inversa

Fonte: CTISM, adaptado de www.cimm.com.br

3.4.1 Pressão de extrusão

3.4.1.1 Deformação homogênea

Equação 3.27

$$\sigma_E = \sigma_0 \ln Re$$

Onde: Re é a relação de extrusão definida com A_f/A_r

3.4.1.2 Método dos blocos

Equação 3.28

$$\sigma_E = \sigma_0 \frac{1+B}{B} \left[Re^B - 1 \right]$$

3.4.2 Especificação da ferramenta de trabalho

As ferramentas para extrudar, ou fieiras, podem apresentar diversos tipos de perfis, sendo que a escolha deles depende do tipo de metal a ser trabalhado e da experiência acumulada em cada condição de trabalho. Condições a serem observadas no estabelecimento dos perfis:



- a) Propriedades do metal a ser extrudado.
- b) Tolerância de distorção no extrudado.
- c) Níveis das tensões aplicadas.
- d) Contração térmica no extrudado.
- e) Escoamento uniforme e equilibrado do metal pela matriz.

A Figura 3.9 apresenta de forma esquemática os perfis das fieiras conforme as condições citadas.

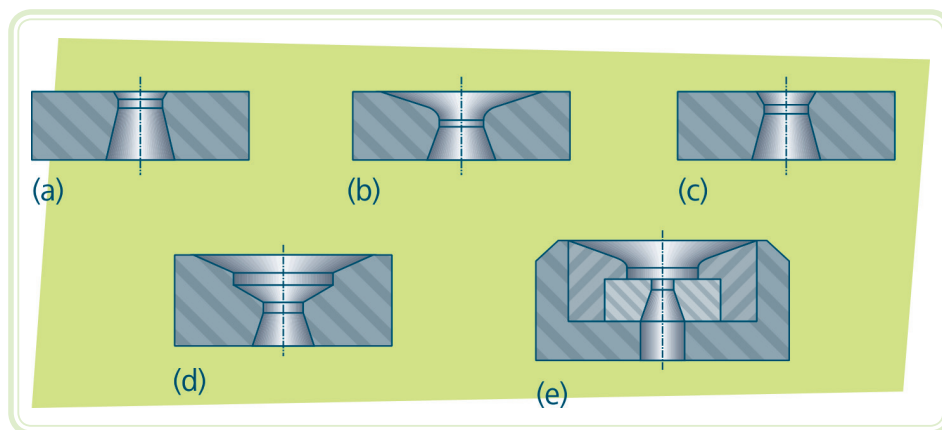


Figura 3.9: Tipos de ferramentas de extrusão

Fonte: Filho, 1981, p. 71

Os tipos de ferramentas com ângulos de entrada mais acentuados (Figura 3.9b e Figura 3.9c) e com ângulos de 120° a 160° são usados comumente para extrusão de tubos. Os formatos mais complexos são usados para metais duros (Figura 3.9d) e para reduzir os esforços na matriz recomenda-se o formato mostrado pela Figura 3.9e.

3.4.3 Classificação dos produtos extrudados

A classificação dos produtos extrudados é realizada de acordo com a forma de seção transversal. Os produtos são barras (redondas, quadradas, hexagonais, etc.), arames, tubos e perfis (ocos ou maciços) de formas diversas.

Os materiais metálicos comumente extrudados são o alumínio, o cobre e suas ligas. Outros não ferrosos, de aplicação mais restrita, podem ser também extrudados. Tubos e barras de aço podem ser produzidos a partir do processo em questão, mas isso ocorre de forma limitada pelas dificuldades operacionais. Esses materiais (aços-carbonos, aços inoxidáveis e alguns aços-liga) exigem elevadas temperaturas e pressões de trabalho que criam dificuldades de lubrificação e, em consequência, impõem baixas velocidades de trabalho e pequenas reduções.

3.4.4 Propriedades dos produtos extrudados

A redução de área é um fator determinante da microestrutura do extrudado. Partindo-se de um lingote e, adotando-se uma redução de 4 a 10 para 1, obtém-se uma estrutura orientada, mas sem que a estrutura bruta de fusão anterior possa ser eliminada. Na prática, são comuns relações de redução de 10 a 60 para 1.

A microestrutura da seção transversal pode se apresentar de maneira não uniforme quanto à forma e ao tamanho dos grãos, e essa variação de microestrutura pode ser diferente ao longo do comprimento do extrudado. A não uniformidade é decorrente das condições em que ocorre o fluxo de metal que, por sua vez, é dependente do tipo de processo (extrusão direta, com ou sem lubrificação, ou extrusão inversa). Logo, as propriedades mecânicas ficam dependentes do tamanho e forma dos grãos, da natureza do metal ou da liga metálica e de tratamentos térmicos posteriores, conforme mostra a Tabela 3.3.

Tabela 3.3: Propriedades da liga de Al-Mg-Si extrudado

Têmpera	Limite de resistência (MPa)	Limite de escoamento (MPa)	Alongamento (%)
0	90	48	----
T ₁	152	90	20
T ₄	172	90	22

Fonte: Filho, 1991, p. 88

Onde: 0, T₁ e T₄ são, respectivamente: (a) recozido; (b) resfriado da temperatura de trabalho e com envelhecimento natural até uma condição estável e (c) tratado termicamente por solubilização (520°C) com envelhecimento natural até uma condição estável.

Outras propriedades como elevada resistência à corrosão e elevada soldabilidade são exigidas de produtos extrudados.

3.5 No processo de estampagem ou conformação de chapas

Os processos de conformação de chapas podem ser classificados em dois grandes grupos: estampagem profunda ou embutimento e conformação geral, apresentados de forma esquemática nas Figuras 3.10 e 3.11.

Na técnica de fabricação de peças por conformação plástica a partir de chapas, o processo de corte da chapa sempre está presente. As operações de conformação plástica da peça são feitas de um pedaço de chapa cortada que se pode denominar disco ou esboço (a segunda denominação se refere a uma forma qualquer).

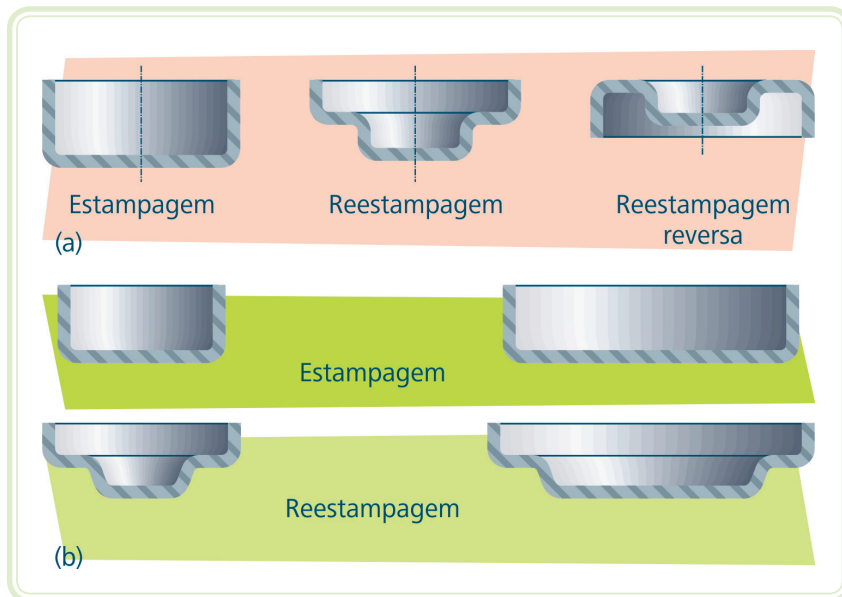


Figura 3.10: Processos de estampagem profunda (a) conformação de copos e (b) conformação de caixas

Fonte: CTISM, adaptado de Filho, 1991, p. 121

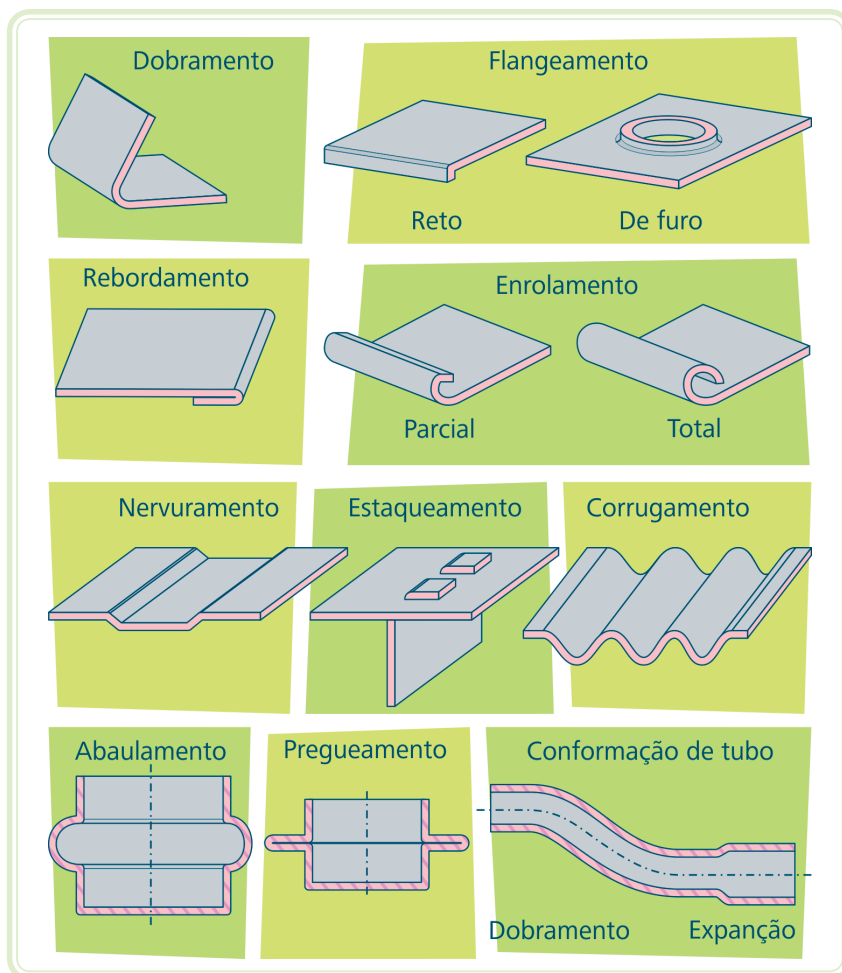


Figura 3.11: Processos de conformação geral

Fonte: CTISM, adaptado de Filho, 1991, p. 123

3.5.1 Ferramentas de estampagem

As ferramentas de corte por estampagem, comumente denominadas “estampas de corte”, são constituídas basicamente de uma matriz e de um punção, conforme mostra a Figura 3.12. A máquina de conformação mais usada é uma prensa excêntrica.

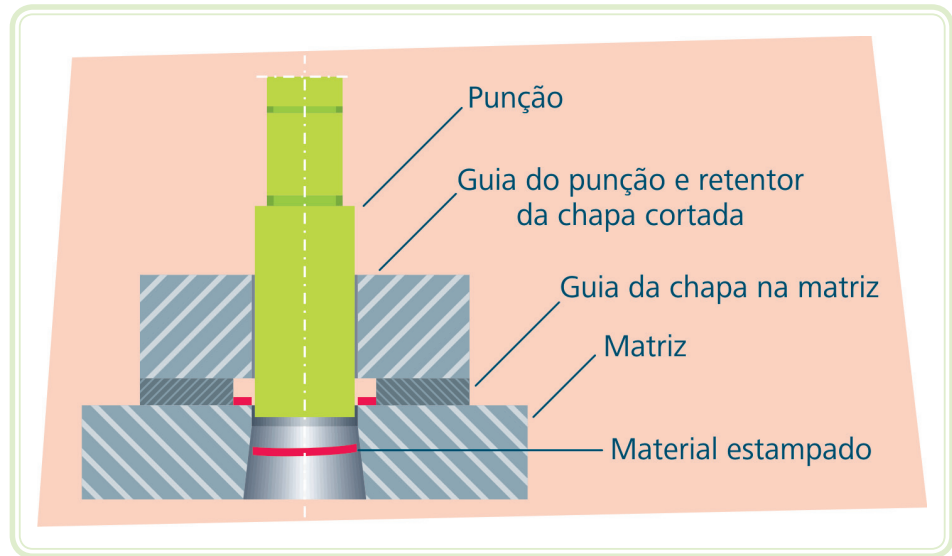


Figura 3.12: Ferramenta de corte

Fonte: CTISM, adaptado de Filho, 1991, p. 135

Um parâmetro importante de projeto de ferramenta é a folga entre punção e matriz determinada pela espessura e pelo material da chapa. As matrizes determinam as dimensões das peças e os punções determinam as dimensões dos furos. A folga entre punções e matrizes no processo de corte pode ser obtida de acordo com o processo mostrado na Figura 3.13.

As matrizes de corte terão as dimensões correspondentes ao limite inferior da tolerância das peças. Por outro lado, os punções de furação terão as dimensões correspondentes ao limite superior da tolerância das peças.

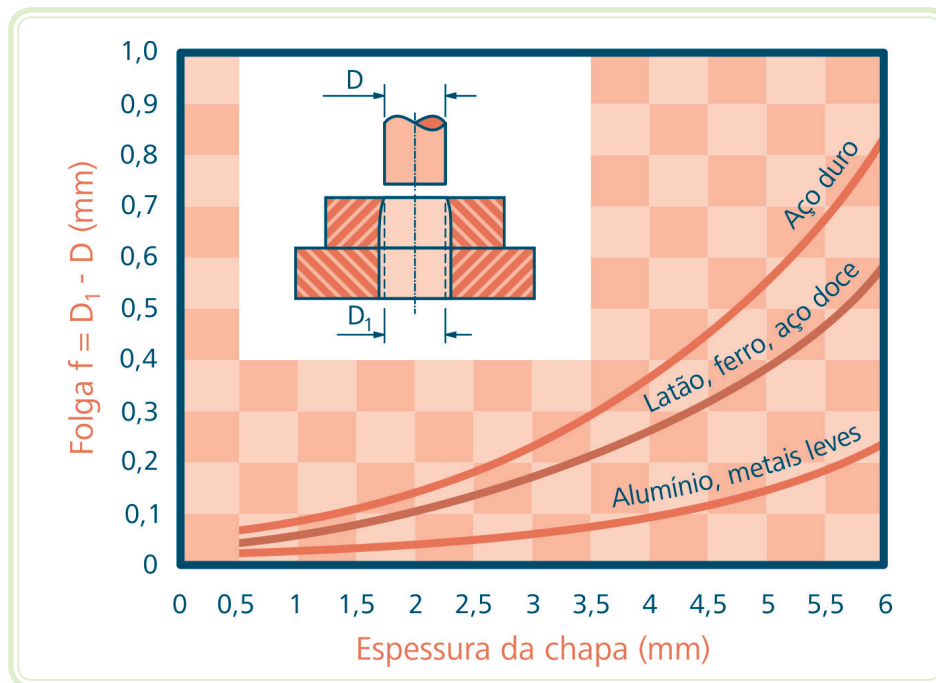


Figura 3.13: Folga entre punção e matriz

Fonte: CTISM, adaptado de Provenza, 1985, p. 9.09

3.5.2 Ferramentas de dobramento

O dobramento é realizado em ferramentas denominadas estampos de dobramento. A Figura 3.14 apresenta um desses estampos que se compõe de uma parte superior (macho) e uma inferior (fêmea). As máquinas de conformação podem, nesse caso, ser prensas excêntricas ou prensas viradeiras.

Para o dobramento deve-se levar em consideração o raio de curvatura utilizado para a peça e a elasticidade do material. Deve-se, ainda, evitar os cantos vivos, sendo, portanto, necessário fixar os raios externos de curvatura durante o dobramento. O raio de curvatura deve ser entre uma e duas vezes a espessura da chapa para materiais moles, e entre três e quatro vezes para materiais duros.



Figura 3.14: Ferramenta de dobramento adaptada à (a) prensa excêntrica ou à (b) prensa viradeira

Fonte: CTISM, adaptado de Filho, 1991, p. 137

Após a deformação que provoca o dobramento, a peça tende a voltar a sua forma primitiva, em proporção tanto maior quanto mais duro for o material da chapa, devido à recuperação elástica intrínseca no material. Portanto, ao se construir os estampos de dobramento deve-se fixar um ângulo de dobramento mais acentuado, de modo que, uma vez cessada a pressão de conformação, possa se obter uma peça com ângulo desejado. A Figura 3.15 esquematiza o efeito da recuperação elástica.

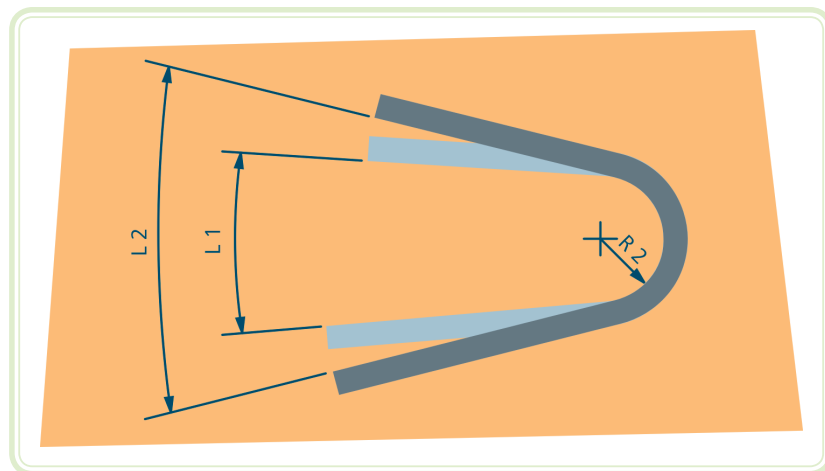


Figura 3.15: Esquema representativo da recuperação elástica em peças dobradas

Fonte: CTISM, adaptado de Umaras, 1979, p. 24

A Tabela 3.4 está baseada em literatura alemã sobre o tema em questão. (UMARAS, 1979). Serve como ponto de referência à execução de futuros ensaios práticos. A razão $R2/e$ na referida tabela é a relação entre o raio interno da dobra e a espessura da chapa.

Tabela 3.4: Tabela orientativa para determinar o retorno elástico ($L1/L2$)		
$R2/e$	Aço SAE 1010	Aço SAE 1020
1	0,99	0,99
1,6	0,99	0,99
2,5	0,985	0,98
4	0,98	0,975
6,3	0,975	0,97
10	0,97	0,96
16	0,96	0,93
25	0,94	0,90
40	0,92	0,86
63	0,87	0,79
100	0,83	0,88
$R2/e$	Alumínio	Aço inoxidável
1	0,94	0,92
1,2	0,94	0,92
1,6	0,94	0,91
1,8	0,93	0,90
2	0,93	0,89
2,5	0,93	0,86
3	0,92	0,87
4	0,91	0,85
5	0,90	0,83
8	0,86	0,79
10	0,81	0,75

Fonte: Adaptado de Umaras, 1979, p. 25

3.5.3 Ferramentas de estampagem profunda

A Figura 3.16 apresenta uma ferramenta de embutimento de um copo. O disco ou esboço que se deseja embutir é colocado sob o sujeitador (ou prensa-chapas) o qual prende a chapa pela parte externa. O punção está fixado ao porta-punção, e o conjunto é fixado à parte móvel da prensa. A matriz é fixada na base que, por sua vez, é fixada na mesa da prensa. A máquina de conformação é uma prensa excêntrica para peças pouco profundas ou uma prensa hidráulica para embutimento profundo.

A fabricação de uma peça pode exigir diversas etapas de embutimento, o que torna necessária a utilização de uma série de ferramentas com diâmetros da matriz e do punção decrescentes. O número de etapas depende do material da chapa (normalmente no estado recozido) e das relações entre o disco inicial e os diâmetros das peças estampadas.

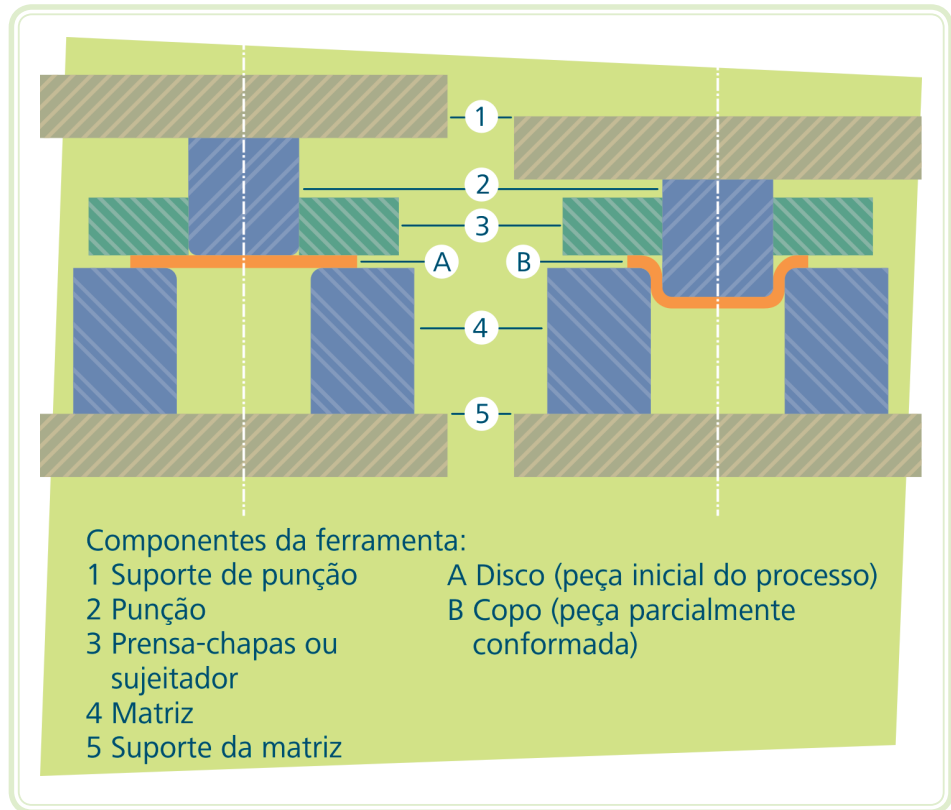


Figura 3.16: Ferramenta de estampagem profunda de um copo

Fonte: CTISM, adaptado de Filho, 1991, p. 138

3.5.4 Materiais para ferramentas de estampagem

Os materiais para ferramentas de estampagem são selecionados considerando os seguintes fatores: tamanho e tipo de ferramenta (corte, dobramento, embutimento), temperatura de trabalho (na estampagem geralmente o processo é realizado a frio) e natureza do material da peça.

Os materiais de uso mais comum para o conjunto punção-matriz são aços-ligas da categoria aços para ferramentas. Para os demais componentes estruturais são normalmente utilizados aços de baixo e médio carbono e para os elementos mais solicitados (molas, pinos, etc.) aços-ligas de uso comum na construção mecânica. Para elevar a resistência do desgaste, par-

tualmente das ferramentas de corte, empregam-se alguns tipos de metal duro (carbeto de tungstênio aglomerado com cobalto).

3.5.5 Produtos estampados

A classificação é simples e se baseia na forma da peça e, conseqüentemente, no tipo do processo de conformação aplicado.

Os materiais metálicos de uso mais comum nas chapas são os aços de baixo carbono que, para as operações de estampagem profunda, devem possuir características de elevada conformabilidade. O latão 70-30 (liga de cobre com 30% de zinco) é o material que apresenta um dos maiores índices de estampabilidade, sendo por isso empregado em peças cujos requisitos justifiquem a seleção de um material de custo elevado. O cobre, alumínio, zinco e outros metais não ferrosos, e suas ligas (na forma de chapas, tiras e folhas) podem ser também submetidos com facilidade, dependendo do tipo de liga, ao processo de estampagem profunda e à conformação por estampagem geral.

3.5.6 Força de corte (Q)

A força de corte é o produto resultante da tensão de cisalhamento (σ_c) com a área de corte A_c , conforme mostra a Equação 3.29.

Equação 3.29

$$Q = \sigma_c \times A_c$$

Onde: A_c é definida como a área de corte a qual é igual ao perímetro (p) de corte multiplicado pela espessura da chapa

A Figura 3.17 apresenta um exemplo para o cálculo da força de corte. Logo:

Equação 3.30

$$A_c = p \times t$$

A tensão de cisalhamento σ_c (kg/mm^2) é uma propriedade mecânica que depende do material.

Para levar em conta o efeito do atrito, sugere-se aumentar o valor de Q de 10% a 20%.

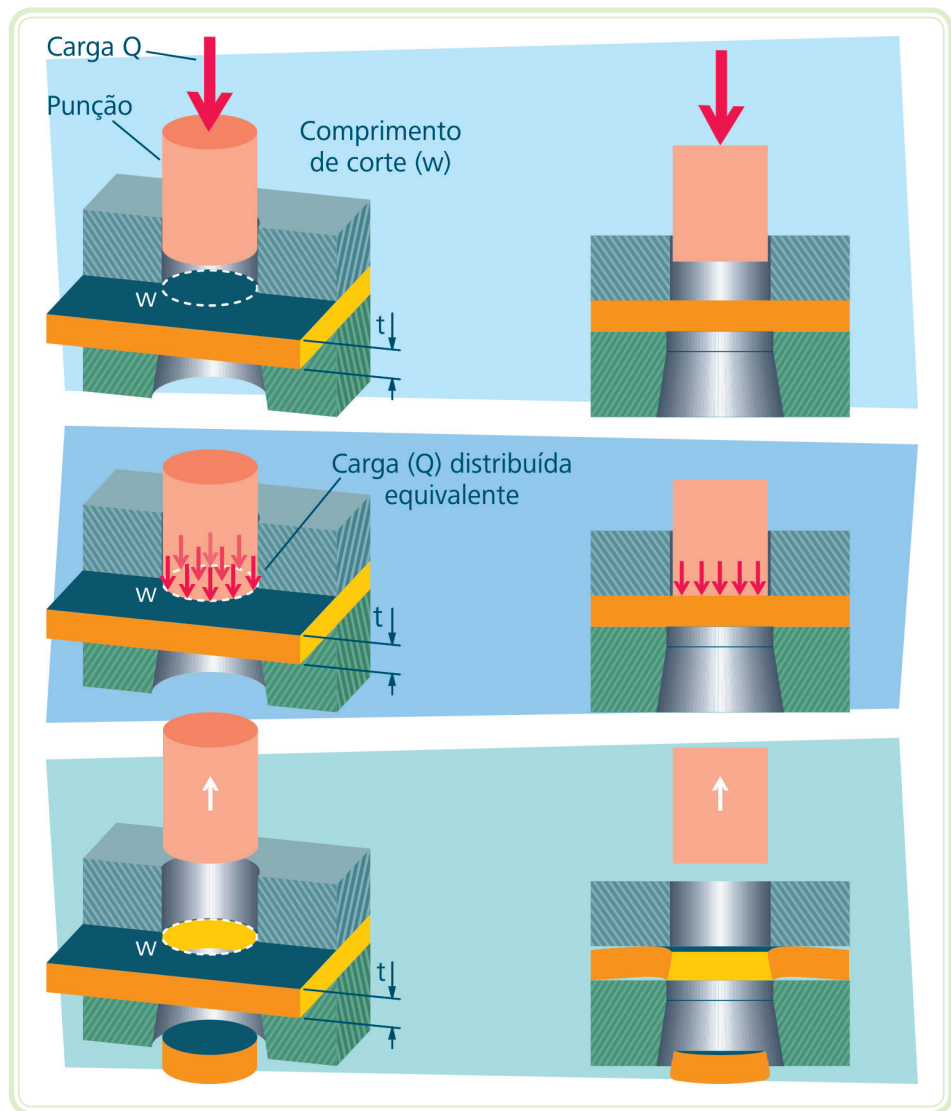


Figura 3.17: Exemplo ilustrativo de uma peça em processo de corte

Fonte: CTISM, adaptado de www.cimm.com.br

Dependendo do tipo de corte, são definidos diversos grupos de operações da prensa, conforme a listagem a seguir:



- A operação de corte é usada para preparar o material para posterior estampagem (*blank*). A parte desejada é cortada (removida) da chapa original.
- A fabricação de furos em prensa (*piercing* ou *punching*) caracteriza uma operação de corte em que o metal removido é descartado; a fabricação de entalhes (*notching*) nas bordas de uma chapa pode ser feita em prensa através do puncionamento dessas regiões.

- O corte por guilhotina é uma operação que não retira material da chapa metálica.
- A rebarbação (*trimming*) é uma operação que consiste em aparar o material em excesso (rebarbas) da borda de uma peça conformada. A remoção de rebarbas de forjamento em matriz fechada é uma operação desse tipo.
- Existe um processo relativamente recente de corte fino de “*blanks*” (*fine blanking*) que se caracteriza pelo emprego de folgas muito pequenas (0,0002 pol) com prensas e jogo de matrizes muito rígidos (para evitar dobramento da chapa). Com esse equipamento é possível produzir “*blanks*” com superfícies de corte quase isentas de defeitos. As peças produzidas podem ser empregadas como engrenagens, cames, sem que seja necessária a usinagem das bordas cortadas.

3.5.7 Determinação da linha neutra em peças dobradas

Para obter uma chapa dobrada segundo um determinado perfil, é necessário cortá-la no tamanho certo. Para isso é necessário conhecer as dimensões da peça desenvolvida. Na conformação da dobra, todas as fibras do material padecem solicitações de compressão ou tração, sofrendo conseqüentemente alongamento ou encurtamento.

As únicas fibras que permanecem inalteradas são as que estão localizadas no plano neutro ou, tratando-se de elementos lineares, na linha neutra. As fibras ali localizadas não sofrem deformações, portanto o desenvolvimento dessa linha nos fornecerá o comprimento exato da chapa ou da tira a ser cortada. A Figura 3.18 apresenta de forma esquemática a posição da linha neutra em uma peça dobrada.

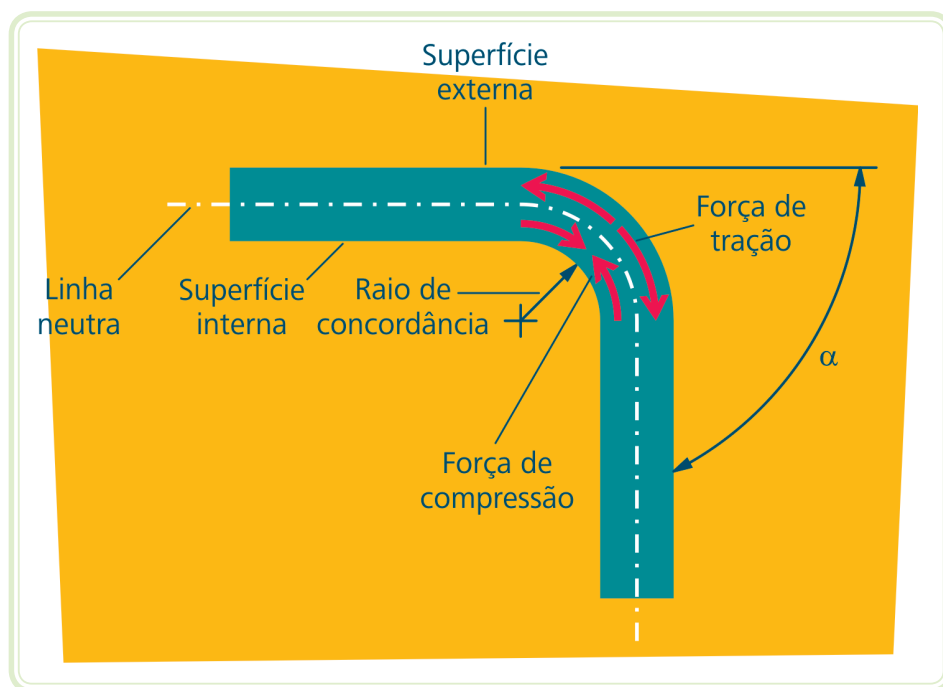


Figura 3.18: Representação esquemática da posição da linha neutra

Fonte: CTISM, adaptado de www.cimm.com.br

A linha neutra não se encontra sempre na metade da espessura da chapa. Através de ensaios práticos chegou-se à conclusão de que: (UMARAS, 1979).



- A linha neutra será na metade da espessura da chapa quando esta for até 1 mm.
- Para espessura acima de 1 mm, a linha neutra será 1/3 da espessura.

3.5.8 Cálculo de desenvolvimento de peças dobradas

Analiticamente uma peça dobrada pode ser desenvolvida facilmente através do seguinte processo:



- Determinar a linha neutra x , somar com o raio e calcular o seu desenvolvimento.
- Determinar todas as partes retas da peça.
- Determinar as partes curvas.
- Somar as partes retas e curvas.

A Figura 3.19, apresenta uma peça dobrada com as dimensões correspondentes para o cálculo do comprimento desenvolvido.

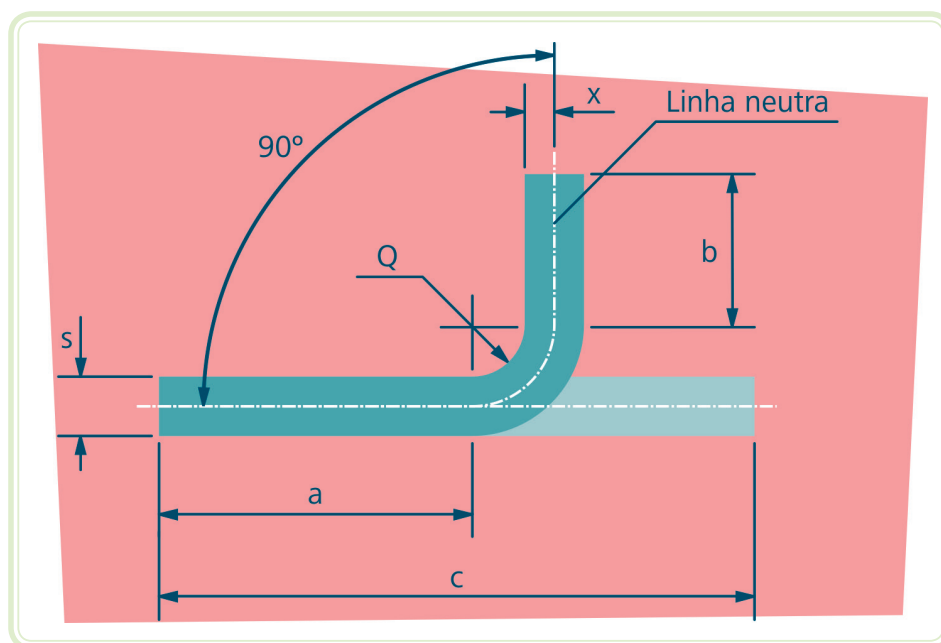


Figura 3.19: Representação esquemática do desenvolvimento de peças dobradas

Fonte: CTISM, adaptado de Provenza, 1985, p. 9.09

O comprimento do raio R é calculado pela seguinte fórmula:

Equação 3.31

$$D = \frac{2\pi Rx}{360^\circ} (180^\circ - \alpha)$$

Onde: α é o ângulo que se encontra representado pela Figura 3.19

Rx é o raio da curvatura na linha neutra, ou seja $Rx = R + x$

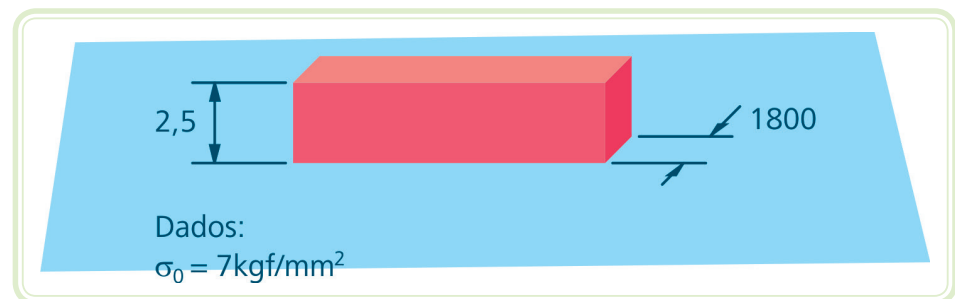
Resumo

Nesta aula foram apresentadas as operações dos principais processos de conformação por deformação plástica: laminação, forjamento, trefilação, extrusão e estampagem. Vale destacar que o único processo estudado nesta aula que não se enquadra como processo de conformação por deformação plástica é a estampagem por corte.



Atividades de aprendizagem

1. Calcular o comprimento do arco de contato e o ângulo de contato quando se laminam chapas de espessura inicial $h_i = 5$ mm, com passes de 12%, 15%, 45% e 50% (deformações logarítmicas), com rolos de diâmetros $D = 300$ mm.
2. Calcular as reduções máximas que podem ser realizadas em uma chapa de espessura inicial $h_i = 10$ mm, nos laminados do exercício 1, com rolos de diferentes estados superficiais, que produzem coeficientes de atrito 0,2, 0,1 e 0,05.
3. Qual é a carga máxima aproximada para reduzir o tarugo de alumínio a 2 mm de espessura, em um passe, em um laminador com rolos de 350 mm de diâmetro?



Exercício 3.1: Tarugo de alumínio

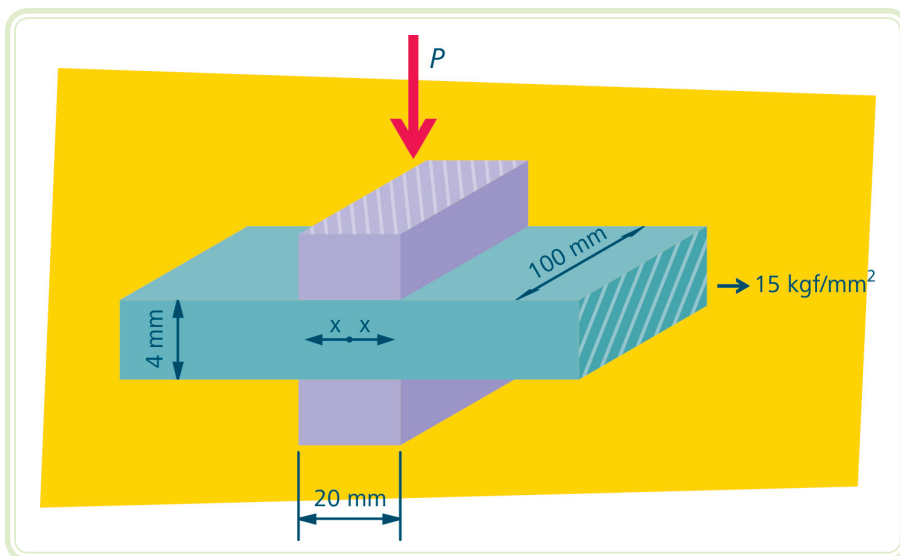
Fonte: CTISM, adaptado de Helman; Cetlin, 1983, p. 166

4. Se, no exercício anterior, a redução Δh passasse para 0,75 mm, qual seria a influência sobre a carga nos rolos?

Dados: $\alpha_0 = 7 \text{ kgf/mm}^2$

5. Em um processo de laminação a quente, calcular a carga e a potência necessária para deformar uma placa de alumínio de 150x100 mm até 125x100 mm com rolos de diâmetro 500 mm e uma velocidade angular de 6 rad/s. Considere a tensão média de escoamento 7 kgf/mm² e despreze a deformação lateral. Utilize as equações de Ekelund (com $\mu = 0,4$).
6. Como se apresentam as propriedades mecânicas de um produto forjado a frio e a quente?
7. Em que condições devemos aplicar o forjamento em matrizes fechadas?

8. Executa-se a operação que segue, no estado plano de deformação. O material é elasticamente rígido e não encruável. $\alpha_0 = 20 \text{ kgf/mm}^2$. Calcular a pressão de forjamento. Comparar essa pressão com aquela determinada pela teoria do limite superior.



Exercício 8.1: Operação de deformação

Fonte: CTISM, adaptado de Helman; Cetlin, 1991, p. 118

9. Como é constituída a matéria-prima para o processo de trefilação?
10. Por que a trefilação é denominada de processo de compressão indireta?
11. Provar que em condições de redução máxima na trefilação $A_i/A_f = e$, onde "e" é a base do logaritmo neperiano.
12. Quanto ao modo de aplicação, qual a diferença entre arame e fio de trefilação?
13. Uma barra de alumínio com 0,64 cm de diâmetro é trefilada até um arame com 0,57 cm de diâmetro. O semiângulo vale $10^\circ 06'$. Calcular a tensão de trefilação para os seguintes casos:
- $\bar{\sigma}_0 = 30,2 \times 10^2 \text{ kgf/cm}^2$; $\mu = 0$; deformação homogênea.
 - $\bar{\sigma}_0 = 30,2 \times 10^2 (\epsilon)^{0,246} \text{ kgf/cm}^2$; $\mu = 0$; deformação homogênea.
 - $\bar{\sigma}_0 = 30,2 \times 10^2 \text{ kgf/cm}^2$; $\mu = 0,4$; método do bloco.

14. Quanto à origem de fabricação, quando a matéria-prima para extrusão é denominada: (a) lingote e (b) tarugo?

15. Qual a diferença da extrusão direta para a inversa?

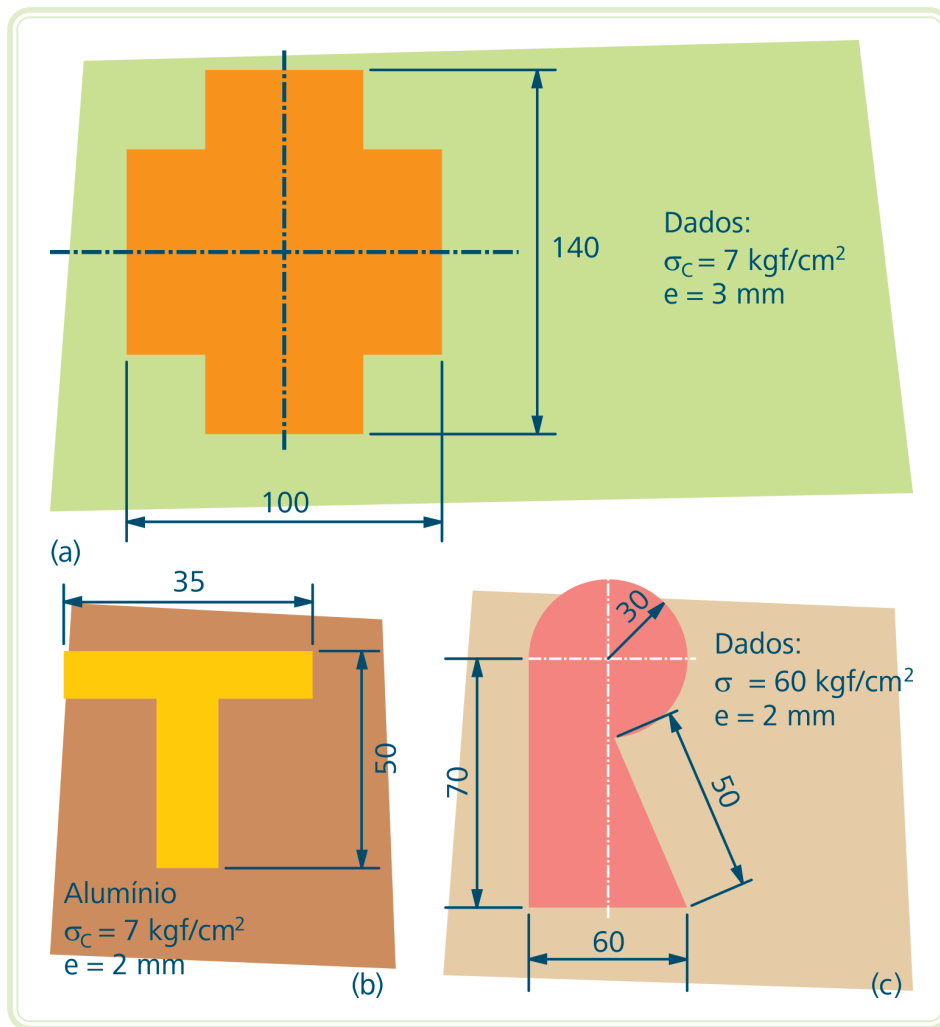
16. Calcular a pressão de extrusão média necessária para extrudar uma barra de alumínio com 10,9 cm de diâmetro para 3,8 cm. Considerar o $\mu = 0,15$ e o ângulo da matriz 45° . Utilizar os métodos de deformação homogênea e bloco.

Dado: $\bar{\sigma}_0 = 2,81 \text{ kgf/cm}^2$

17. Determinar as dimensões do punção e da matriz para cortar uma peça em chapa de alumínio duro.

Dados: $e = 2\text{mm}$ e $D = 50^{+0,000}_{-0,160} \text{ mm}$

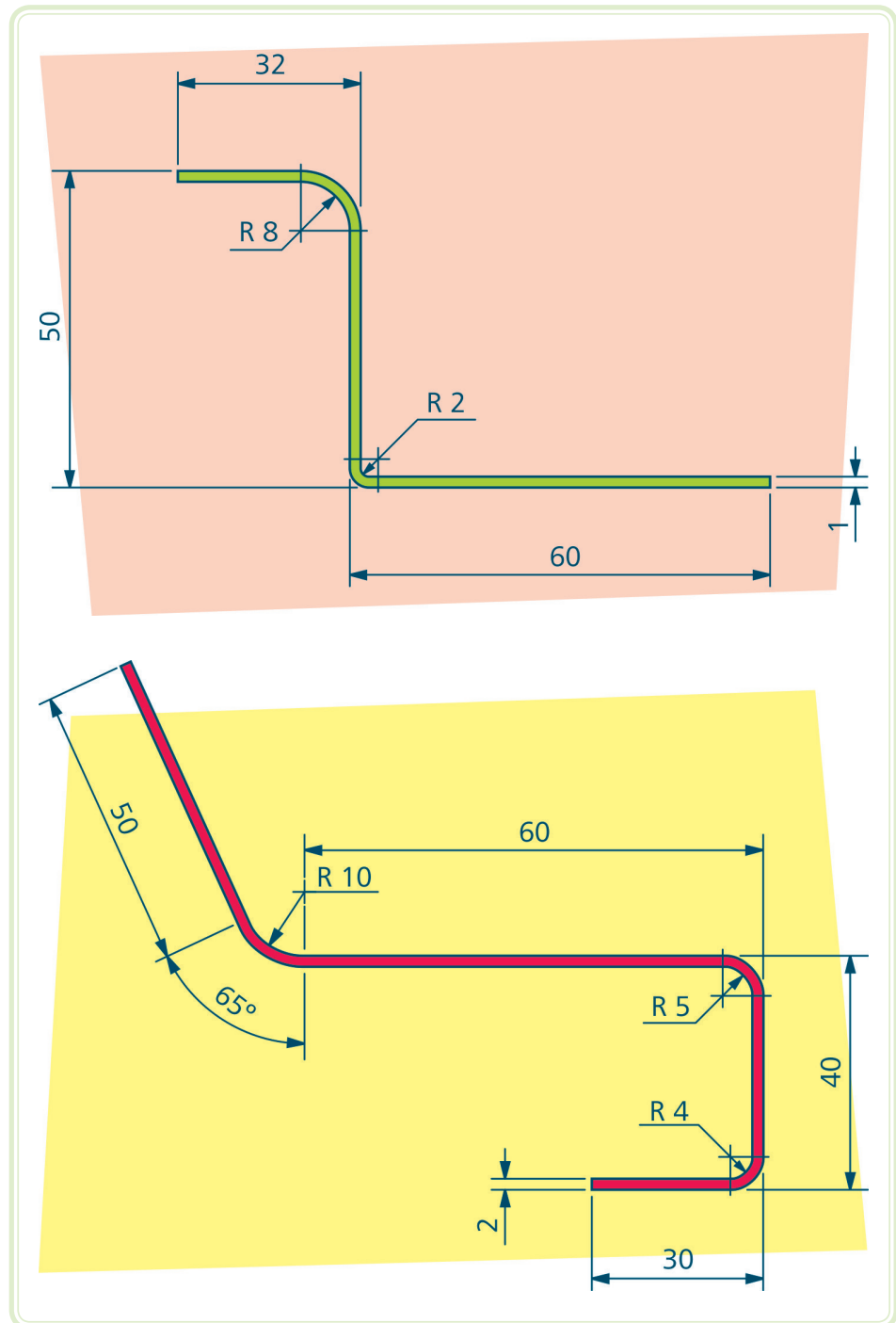
18. Determinar a força de cisalhamento para obter uma peça de acordo com as condições:



Exercício 18.1: Exemplo de peça

Fonte: CTISM, adaptado de Provenza, 1985, p. 4 e 12

19. Determinar o comprimento da chapa para se obter produtos dobrados de acordo com os formatos abaixo:



Exercício 19.1: Produto dobrado

Fonte: CTISM, adaptado de Umara, 1979, p. 4 e 5

Referências

BUTTON, S. T. **Apostila de conformação plástica dos metais**. Campinas: Editora da Unicamp, 2000.

CHIAVERINI, V. **Tecnologia mecânica**. v. I. 2. ed. São Paulo: Mc Graw-Hill, 1986.

DIETER, G. E. **Metalurgia mecânica**. Parte IV. Rio de Janeiro: Guanabara Dois, 1981.

FILHO, E. B.; ZAVAGLIA, C. A. C.; BUTTON, S. T.; GOMES E.; NERY, F. A. C. **Conformação plástica dos metais**. Campinas-SP: Editora da Unicamp, 1991.

GARCIA, A., SPIM, J. A.; SANTOS, C. A. **Ensaaios de materiais**. Rio de Janeiro: Editora Livros Técnicos e Científicos S. A., 2000.

GRUNING, K. **Técnicas de conformação, polígono da técnica mecânica**. São Paulo: Editora Polígono, 1973.

HELMAN, H.; CETLIN, P. R. **Fundamentos da conformação mecânica dos metais**. Rio de Janeiro: Guanabara Dois, 1983.

PROVENZA, F. **Estampos**. v. II. São Paulo: Pro-Tec, 1985.

UMURAS, J. **Tecnologia de estampagem**. v. II. 1. ed. Santo André: Editora Técnica Piping Ltda, 1979.

Currículo do professor-autor



Otávio Fernandes Lima da Rocha, possui graduação em Engenharia Mecânica pela Universidade Federal do Pará (1988), mestrado em Engenharia Mecânica pela Universidade Federal do Pará (1998) e doutorado em Engenharia Mecânica pela Universidade Estadual de Campinas (2003). Atualmente é Professor D5-II do Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Pará, pertencente à carreira do Ensino Básico, Técnico e Tecnológico, com atuação na educação presencial e a distância. Possui experiência na área de Engenharia de Materiais e Metalúrgica, com ênfase em estudos de pesquisas na área de solidificação, onde desenvolve trabalhos que analisam o processamento, estrutura, propriedades e desempenho de produtos fundidos, com destaque à correlação entre os parâmetros térmicos e estruturais e as influências nas suas propriedades. Na indústria, possui vasta experiência profissional onde desenvolveu funções técnicas de Engenheiro de Produto e de Engenheiro de Processos Medicinais.