

UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO
ESCOLA DE ENGENHARIA DE SÃO CARLOS
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA DE PRODUÇÃO
LABORATÓRIO DE OTIMIZAÇÃO DE PROCESSOS DE FABRICAÇÃO (OPF)

**PROCESSOS DE CONFORMAÇÃO DOS MATERIAIS -
INTRODUÇÃO AOS PROCESSOS DE CONFORMAÇÃO**

PARTE I

T. ALTAN, S.OH, H. GEGEL

Tradução e adaptação, Professor Titular Reginaldo Teixeira Coelho, PhD

JULHO - 2012

Sumário

| | |
|---|----|
| CAPÍTULO 1..... | 6 |
| OS PROCESSOS DE CONFORMAÇÃO NA FABRICAÇÃO..... | 6 |
| 1.1 Classificação dos processos de conformação..... | 6 |
| 1.2 Características dos processos de conformação..... | 6 |
| 1.2.1 Geometria..... | 6 |
| 1.2.2 Tolerâncias..... | 6 |
| 1.2.3 Razão de Produção..... | 7 |
| 1.2.4 Fatores Ambientais e Humanos..... | 7 |
| 1.3 Os processos de conformação de metais na fabricação..... | 7 |
| REFERÊNCIAS..... | 8 |
| CAPÍTULO 2..... | 9 |
| VARIÁVEIS, CLASSIFICAÇÃO E DESCRIÇÃO DOS PROCESSOS DE CONFORMAÇÃO DE METAIS*..... | 9 |
| 2.1 Conformação de metais como um sistema..... | 9 |
| 2.2 Caracterização do material..... | 10 |
| 2.3 Equipamento e ferramental..... | 12 |
| 2.4 Atrito e lubrificação na interface ferramenta/peça..... | 12 |
| 2.5 Região de deformação/mecânica de deformação..... | 12 |
| 2.6 Propriedades de geometria do produto..... | 12 |
| 2.7 Breve classificação e descrição dos principais processos de conformação..... | 12 |
| Redução na Posição 2..... | 25 |
| REFERÊNCIAS..... | 39 |
| CAPÍTULO 3..... | 41 |
| DEFORMAÇÃO PLÁSTICA: DEFORMAÇÃO E TAXA DE DEFORMAÇÃO..... | 41 |

| | |
|--|----|
| 3.1 Deformações locais e campo de velocidades | 41 |
| 3.2 Deformação | 42 |
| 3.3 Velocidades e taxa de deformação | 43 |
| 3.4 Deformação homogênea | 44 |
| 3.5 Deformação plástica (verdadeira) e deformação em engenharia | 45 |
| REFERÊNCIAS..... | 46 |
| CAPÍTULO 4..... | 47 |
| DEFORMAÇÃO PLÁSTICA: ESTADO SIMPLES DE TENSÃO | 47 |
| 4.1 Tensão de escoamento em Metais..... | 47 |
| 4.2 Teste de tração | 47 |
| 4.3 Teste de compressão | 49 |
| 4.4 Teste do anel | 55 |
| 4.5 Teste de torção | 56 |
| 4.6 – Representação dos dados de tensão de escoamento | 57 |
| REFERÊNCIAS..... | 75 |
| CAPÍTULO 5..... | 77 |
| DEFORMAÇÃO PLÁSTICA: ESTADO DE TENSÕES COMPLEXO E CRITÉRIOS DE ESCOAMENTO | 77 |
| 5.1 O critério de Tresca para escoamento | 77 |
| 5.2 O critério de Von Mises para o escoamento | 79 |
| 5.4 Comparação entre os critérios para escoamento de Tresca e de VonMises..... | 80 |
| 5.5 Potência e energia de deformação | 81 |
| 5.6 Valores efetivos de deformação e de taxa de deformação | 83 |
| REFERÊNCIAS..... | 84 |
| CAPÍTULO 6..... | 85 |
| ATRITO EM CONFORMAÇÃO DOS METAIS..... | 85 |

| | |
|---|-----|
| 6.1 Características dos lubrificantes em conformação dos metais | 85 |
| 6.2 Lubricidade e tensão de cisalhamento de atrito | 85 |
| 6.3 O teste de compressão do anel | 86 |
| REFERÊNCIAS..... | 88 |
| CAPÍTULO 7..... | 89 |
| TEMPERATURAS NA CONFORMAÇÃO DOS METAIS..... | 89 |
| 7.1 Geração e transferência de calor nos processos de conformação dos metais | 89 |
| 7.2 Temperaturas em operações de conformação quase contínuas..... | 91 |
| 7.3 Temperaturas nas operações empregadas em conformação de peças individuais | 94 |
| REFERÊNCIAS..... | 101 |
| CAPÍTULO 8..... | 102 |
| PRINCÍPIOS DAS MÁQUINAS DE CONFORMAÇÃO..... | 102 |
| 8.1 Interação entre as necessidades do processo e as máquinas de conformação..... | 102 |
| 8.2 Classificação e características das máquinas de conformação..... | 104 |
| 8.4 Características para carga e energia | 105 |
| 8.4.1 Energia disponível, E_M (em m.kg):..... | 105 |
| 8.4.2 Carga disponível, L_M (em Toneladas):..... | 105 |
| 8.4.3 Fator de eficiência η : | 105 |
| 8.5 Dados de características dependentes do tempo..... | 105 |
| 8.5.1 Número de golpes por minuto, n :..... | 105 |
| 8.5.2 Tempo de contato sob pressão, t_p :..... | 105 |
| 8.5.3 Velocidade sob pressão, V_p :..... | 106 |
| 8.6 Dados e características para a precisão | 106 |
| REFERÊNCIAS..... | 106 |
| CAPÍTULO 9..... | 107 |
| PRENSAS E MARTELOS PARA CONFORMAÇÃO A QUENTE E A FRIO DE PEÇAS..... | 107 |

| | |
|---|-----|
| 9.1 Prensas hidráulicas | 107 |
| 9.2 Sistemas de acionamento para prensas hidráulicas | 107 |
| 9.3 Prensa com sistema de acionamento direto..... | 107 |
| 9.4 Prensa com acumulador | 108 |
| 9.5 Características das prensas hidráulicas | 110 |
| 9.6 Prensas com sistema biela-manivela e excêntricas | 111 |
| 9.7 Carga e energia numa prensa mecânica..... | 116 |
| 9.8 Características de prensas mecânicas que dependem do tempo | 119 |
| 9.9 Precisão das prensas mecânicas | 120 |
| 9.10 Prensas biela-manivela com mecanismo de acionamento modificado | 121 |
| 9.11 Prensa de fuso ou de fricção | 123 |
| 9.12 Carga e energia em prensa de fricção | 125 |
| 9.13 Características dependentes do tempo de prensas de fricção..... | 126 |
| 9.14 Precisão nas operações com prensa de fricção..... | 127 |
| 9.15 Variações nos mecanismo de acionamento de prensas de fricção | 127 |
| 9.16 Martelo de forjamento (Martelo) | 128 |
| 9.17 Características importantes de um martelo de forjamento | 130 |
| REFERÊNCIAS..... | 131 |

CAPÍTULO 1

OS PROCESSOS DE CONFORMAÇÃO NA FABRICAÇÃO

Um dado material, normalmente sem forma ou de geometria simples, é transformado em um componente útil, através de um processo de fabricação. Este produto, na maioria das vezes, tem geometria complexa com forma, tamanho, precisão, tolerâncias aparência e propriedades bem definidas.

1.1 Classificação dos processos de conformação

A fabricação e montagem de componentes metálicos pode ser classificada, de maneira simplificada, em cinco áreas gerais:

- 1 - Processos para formas primárias em metais, tais como fundição, lingotamento, coquilhamento e metalurgia do pó. Em todos estes processo de fabricação o material inicialmente não tem forma definida mas a obtém através do processo.
- 2 - Processos de conformação dos metais, tais como laminação, extrusão, forjamento à frio e à quente, dobramento e repuxo, onde o metal é conformado através de deformação plástica.
- 3 - Processos de usinagem dos metais, tais como corte em serra, torneamento, fresamento e brochamento, onde uma nova forma é gerada através da remoção de material.
- 4 - Processos de tratamento dos metais, tais como tratamento térmico, anodização e endurecimento superficial, onde a forma do componente permanece essencialmente imutável mas sofre mudanças de aparência e propriedades.
- 5 - Processos de união, incluindo (a) união física, tais como aquelas por soldagem ou por difusão, e (b) união mecânica, tais como rebatamento, união eixo-cubo por contração e montagem mecânica.

1.2 Características dos processos de conformação

Existem quatro características principais em qualquer processo de fabricação, a saber geometria, tolerâncias, razão de produção e fatores ambientais e humanos.

1.2.1 Geometria.

Cada processo de manufatura é capaz de produzir uma família de geometrias. Dentro desta família há geometrias que podem ser produzidas somente com extraordinário custo e esforço. Por exemplo, o processo de forjamento permite a produção de componentes que podem ser facilmente extraídos de um estampo, isto é, estampo superior e inferior. Através do uso de projeto de estampo bipartido, é possível o forjamento com detalhes perpendiculares ao plano de partição e com formas mais complexas.

1.2.2 Tolerâncias

Nenhuma dimensão pode ser produzida exatamente como é especificada pelo projetista. Portanto, cada dimensão é associada com uma tolerância, assim como cada processo de fabricação permite a obtenção de certas tolerância dimensionais, de forma e acabamento superficial. A qualidade dessas dimensões, no entanto, pode ser melhorada pelo emprego de variantes mais sofisticadas deste processos e através de novos desenvolvimentos. Por exemplo, pelo uso do processo de fundição em cera perdida à vácuo é possível de se obter formas muito mais complexas com tolerâncias mais fechadas, do que usando os processo com moldes de areia. Tolerâncias dimensionais servem a um duplo propósito. Primeiro, elas permitem o funcionamento adequado dos componentes fabricados: por exemplo, um tambor de freio de automóvel deve ser circular, dentro de certos limites, para evitar vibrações e assegurar funcionamento correto dos freios. O segundo propósito das tolerâncias dimensionais é proporcionar intercambiabilidade. Sem intercambiabilidade - a capacidade de substituir um componente defeituoso (um rolamento, por exemplo) com um novo, de um produtor diferente - a moderna produção seriada seria inimaginável.

1.2.3 Razão de Produção.

A razão de produção que pode ser atingida através de um dado processo de fabricação é provavelmente o seu aspecto mais significativo, porque ela indica os aspectos econômicos e a produtividade que pode ser atingida. Nos países industrializados, as indústrias de produção representam cerca de 30 a 40% do produto interno bruto. Conseqüentemente, a produtividade destas indústrias, isto é, produção de componentes discretos, montagem e produtos por unidade de tempo, é o fator mais importante a influenciar o padrão de vida num país, assim como sua posição competitiva no mercado internacional de bens de produção.

A razão de produção ou produtividade pode ser aumentada através da melhoria dos processos de fabricação existentes ou pela introdução de novos processos e máquinas, todos requerendo novos investimentos. Contudo, o mais importante ingrediente para aumento de produtividade reside no ser humano e nos recursos gerenciais, porque boas decisões em investimentos (quando, quanto e em que) são tomadas por pessoas que são bem treinadas e motivadas. Como resultado, o presente e futuro da produtividade na fabricação dentro de uma fábrica, indústria ou nação depende não somente do nível de investimentos numa nova fábrica e equipamentos mas também do nível de treinamento e disposição dos engenheiros e especialistas em fabricação dentro destas entidades.

1.2.4 Fatores Ambientais e Humanos.

Todo processo de fabricação deve ser examinado visando (a) seus efeitos ambientais, isto é, em termos de poluição do ar, água e sonora, (b) sua interface com os recursos humanos, isto é, em termos de segurança humana, efeitos fisiológicos e psicológicos e (c) seu uso de energia e recursos materiais, particularmente em termos de escassez de energia e materiais. Conseqüentemente, a introdução e uso de um processo de fabricação deve antes ser considerados com vistas a estes fatores ambientais.

1.3 Os processos de conformação de metais na fabricação

Processos de conformação de metais incluem (a) processos de conformação maciça como o forjamento, extrusão, laminação e trefilação e (b) Processos de conformação de chapas como dobramento, repuxo e estiramento. Entre o grupo de processos de fabricação discutido anteriormente, conformação de metais representa um grupo altamente significativo de processos para produção industrial, componentes militares e bens de consumo.

Um meio comum de classificar os processos de conformação dos metais é considerá-los como conformação a frio (à temperatura ambiente) e a quente (à temperaturas acima da recristalização). Muitos materiais se comportam diferentemente em diferentes temperaturas. Normalmente, a tensão de escoamento de um metal aumenta com o aumento de deformação durante a conformação a frio e com o aumento da taxa de deformação durante a conformação a quente. Entretanto, os princípios gerais que governam a conformação dos metais a várias temperaturas são basicamente os mesmos; portanto classificação dos processos de conformação baseado na temperatura inicial do material não contribui significativamente para o entendimento e melhoria destes processos. De fato, o projeto das ferramentas, máquinas, automação, manuseio de componentes e conceitos de lubrificação podem ser melhor considerados através de classificação baseada não na temperatura mas sim na geometria específica de saída e entrada assim como nas condições do material e da razão de produção.

Geometrias complexas, em ambos processos de conformação maciço e de chapas, podem ser obtidos igualmente bem por conformação a frio ou a quente. Evidentemente, devido à menor resistência ao escoamento dos materiais deformados a elevadas temperaturas, as tensões nas ferramentas e as cargas nas máquinas são, relativamente, menores na conformação a quente comparadas àquelas na conformação a frio.

Conformação é especialmente atrativa em casos onde (a) a geometria do componentes é moderadamente complexa e o volume de produção é grande, de maneira que o custo do ferramental por unidade produzida possa ser mantido baixo - por exemplo em aplicações automobilísticas; e (b) as propriedades e integridade metalúrgica dos componentes são extremamente importantes, como é o caso de aeronaves de carga, motores a jato e componentes de turbinas.

O projeto, análise e otimização de processos de conformação requer (a) conhecimento analítico referente ao fluxo metálico, tensões e transferência de calor assim como (b) informações tecnológicas relacionadas com lubrificação, técnicas de aquecimento e resfriamento, manuseio de materiais, projeto e fabricação de estampas e equipamentos de conformação. Uma quantidade considerável de informações nos aspectos gerais de conformação está disponível na literatura. Alguns dos livros que abrangem este assunto são dados nas referências 1-4 e 1-13 no fim deste capítulo. Outros livros e artigos técnicos tratando de aspectos mais específicos destes assuntos são referenciados no fim de cada capítulo.

REFERÊNCIAS

- 1-1. Kienzle, O., "The Principles of Manufacturing Technology" (in German), *Werkstattstechnik und Maschinenbau*, Vol 46 (1956), No. 5, p 204.
- 1-2. Lange, K., "The Investigation of Metal Forming Processes as Part of a Technical System", Proc. 10th International Machine Tool Design and Research Conference, Pergamon Press, 1969, p 485.
- 1-3. Lahoti, G. D., and Altan, T., "Input/Output Relationships in Metal Forming", SME Paper EM75-375. Society of Manufacturing Engineers, Dearborn, MI, 1975.
- 1-4. Backofen, W. A., *Deformation Processing*, Addison-Wesley, 1972.
- 1-5. Johnson, W., and Mellor, P. B., *Engineering Plasticity*, Van Nostrand, 1978.
- 1-6. Slater, R. A. C., *Engineering Plasticity*, John Wiley, 1977.
- 1-7. Blazynski, T. Z., *Metal Forming - Tool Profiles and Flow*, John Wiley, 1976.
- 1-8. Prager, W., and Hodge, P. G., Jr., *Theory of Perfectly Plastic Solids*, Dover Publications, 1968.
- 1-9. Rowe, G. W., *Principles of Industrial Metalworking Processes*, Edward Arnold, 1977.
- 1-10. Thomsen, E. G., Yang, C. T., and Kobayashi, S., *Mechanics of Plastic Deformation in Metal Processing*, Macmillan Company, 1965.
- 1-11. Avitzur, B., *Metal Forming - Process and Analysis*, McGraw-Hill, 1968.
- 1-12. Dieter, G. E., Jr., *Mechanical Metallurgy*, McGraw-Hill, 1961.
- 1-13. Lange, K. (editor), *Study Book of Forming Technology* (in German), Vol I, II and III, Springer-Verlag, 1972.

CAPÍTULO 2

VARIÁVEIS, CLASSIFICAÇÃO E DESCRIÇÃO DOS PROCESSOS DE CONFORMAÇÃO DE METAIS*

Na conformação de metais, um componente inicialmente simples - um tarugo ou uma chapa metálica, por exemplo - é plasticamente deformada entre as ferramentas (ou estampo) para a obtenção a configuração final desejada. Portanto, um componente de geometria simples é transformado num outro complexo, onde as ferramentas guardam a geometria desejada e aplicam pressão no material deformando através da interface ferramenta/material. O processo de conformação de metais comumente produz pouca ou nenhuma sobra e produz a geometria final do componente num curto período de tempo, normalmente em um ou poucos golpes de uma prensa ou martelo. Como resultado final, conformação de metais apresenta um potencial para economia de energia e material - especialmente em médios e altos lotes, onde custo de feramental podem ser facilmente amortizados. Além disso, para um dado peso, componentes produzidos por conformação exibem melhores propriedades mecânicas, metalúrgicas e confiabilidade do que aquelas produzidas por fundição ou usinagem.

Conformação de metais é tecnologia de experiência orientada. Através dos anos, uma grande quantidade de conhecimento e experiência tem sido acumulada neste campo, na sua maioria pelo método da tentativa-e-erro. No entretanto, a indústria de conformação de metais tem sido capaz de fornecer sofisticados produtos fabricados dentro das mais rígidas normas, usando ligas recentemente desenvolvidas e difíceis de conformar.

Os fenômenos físicos que descrevem uma operação de conformação são de difícil expressão através de relações quantitativas. O fluxo de metais, o atrito na interface ferramenta/peça, a geração e transferência de calor durante o fluxo plástico do metal e o seu relacionamento com a microestrutura, as propriedades e as condições do processo são difíceis de prever e analisar. Frequentemente, quando se produzem componentes discretos, várias operações intermediárias de conformação (pré-conformação) são necessárias para transformar a geometria inicial simples em uma complexa, sem causar danos ao material ou prejudicar suas propriedades. Consequentemente, o principal objetivo de qualquer método de análise é auxiliar o engenheiro de conformação no projeto conformação e/ou da seqüência de pré-formas. Para uma dada operação de conformação (pré-conformação ou conformação final) o projeto essencialmente consiste de (a) estabelecer a relação cinemática (forma, velocidades, taxa de deformação, deformação) entre o componente deformado e indeformado, isto é, prever o fluxo de metal; (b) estabelecer o limite de conformabilidade, isto é, determinar se é ou não possível a conformação sem rupturas internas ou na superfície do metal e (c) prever as forças e tensões necessárias para efetuar a operação de conformação a fim de que o feramental e equipamento possam ser projetados ou selecionados.

Para o entendimento e o projeto, dimensionamento e otimização da operação de conformação é útil (a) considerar o processo de conformação de metais como um sistema e (b) classificá-lo de forma sistemática.

2.1 Conformação de metais como um sistema

Um sistema de conformação metálica consiste de todas as variáveis de entrada, tais como o tarugo ou “blank” (geometria e material), o feramental (geometria e material), as condições na interface ferramenta/componente, o mecanismo de deformação plástica, o equipamento usado, as características do produto final, e finalmente o ambiente da fábrica onde o processo está sendo conduzido⁽²⁻¹⁾.

A maneira de encarar o problema do ponto de vista do “sistema” na conformação de metais permite estudar da relação entrada/saída e os efeitos das variáveis do processo na qualidade do produto e no aspecto econômico do processo. A chave para o sucesso na operação de conformação, isto é, para se obter a forma e propriedades adequadas, é o entendimento e controle do fluxo metálico. A direção deste fluxo, sua magnitude de deformação e a distribuição de temperatura envolvida afetam significativamente as propriedades do componente conformado. O fluxo metálico determina ambas as propriedades relacionadas com a deformação local e a formação de defeitos, tais como trincas ou dobras na superfície ou abaixo dela. O fluxo metálico local é, por sua vez, influenciado pelas variáveis do processo, as quais estão resumidamente relacionadas na Tabela 2-1⁽²⁻¹⁾.

2.2 Caracterização do material

Para uma dada composição de material e uma história de deformação/tratamento térmico (microestrutura), a tensão de escoamento e a conformabilidade nas várias direções (anisotropia), são as mais importantes variáveis na análise de um processo de conformação de metais.

Para uma dada microestrutura, a tensão de escoamento, $\bar{\sigma}$, é escrito como função da deformação $\bar{\epsilon}$; da taxa de deformação $\dot{\bar{\epsilon}}$ e da temperatura θ :

$$\bar{\sigma} = F(\bar{\epsilon}, \dot{\bar{\epsilon}}, \theta) \quad (2.1)$$

Para formular a Equação Constitutiva, Equação (2.1), é necessário conduzir testes de torção, de deformação plana, de compressão e testes assimétricos de compressão. Durante qualquer destes testes, o trabalho plástico cria um certo aumento em temperatura, o qual deve ser considerado na estimativa e no uso dos resultados do teste.

Conformabilidade é a capacidade de o material ser deformado sem apresentar ruptura; isto depende de **(a)** as condições existentes durante o processo de deformação (tais como temperatura, taxa de deformação, a história anterior de tensão e deformação) e **(b)** variáveis do material (como a composição química, vazios internos, inclusões e microestrutura inicial). No processo de conformação à quente, gradientes de temperatura no material em deformação (por exemplo devido a resfriamentos locais) também influenciam o fluxo metálico e os fenômenos de ruptura.

Tabela 2-1 Variáveis mais significativas num processo de deformação

MATERIAL DO TARUGO

- Fluxo de tensões como função da deformação, taxa de deformação, temperatura e microestrutura (equações constitutivas)
- Conformabilidade como função da deformação, da taxa de deformação, temperatura e microestrutura (curvas limite de conformação)
- Condições superficiais
- Propriedades termo-físicas
- Condições iniciais (Composição química, temperatura, estados anteriores da microestrutura)
- Efeitos de mudanças em microestrutura e composição química na tensão de escoamento e conformabilidade

FERRAMENTAL

- Geometria das ferramentas
- Condições superficiais
- Material/Dureza/tratamento térmico
- Temperatura
- Rigidez e exatidão

CONDIÇÕES NA INTERFACE FERRAMENTA/PEÇA

- Tipo de lubrificante e temperatura de trabalho
- Isolação e características de resfriamento na camada de interface
- Lubrificação e tensão de cisalhamento ao atrito
- Características relacionadas com a aplicação e remoção do lubrificante

ZONA DEFORMAÇÃO

- Mecanismo de deformação, modelo usado para análise
- Fluxo de metal, velocidade, taxa de deformação, deformação (cinemática)
- Tensões (variação durante a deformação)
- Temperaturas (geração e transferência de calor)

EQUIPAMENTO USADO

- Velocidade/taxa de produção
- Força/Capacidade de conversão de energia
- Rigidez e exatidão

PRODUTO

- Geometria
- Exatidão dimensional/tolerâncias
- Acabamento superficial
- Microestrutura, propriedades mecânicas e metalúrgicas

AMBIENTE

- Capacidade da mão-de-obra disponível
 - Poluição do Ar, sonora e resíduos líquidos
 - Controle da produção e equipamentos disponíveis na fábrica
-
-

2.3 Equipamento e ferramental

A seleção de uma máquina para um dado processo é influenciada pelo tempo, exatidão e pelas características de carga/energia da mesma. A seleção do equipamento ótimo requer considerações do sistema completo de conformação, incluindo tamanho do lote, condições na fábrica, efeitos ambientais e necessidades de manutenção, assim como as necessidades de cada componente específico e do processo sob estudo.

As variáveis de ferramental incluem (a) projeto e geometria, (b) acabamento superficial, (c) rigidez e (d) propriedades mecânicas e térmicas sob as condições de utilização.

2.4 Atrito e lubrificação na interface ferramenta/peça

A mecânica de atrito na interface é muito complexa. Uma maneira de expressá-la quantitativamente é através do coeficiente de atrito, μ , ou do fator de atrito, m . Portanto, a tensão de cisalhamento ao atrito, τ , é

$$\tau = \sigma_n \mu \quad (2-2)$$

ou

$$\tau = m \bar{\sigma} / \sqrt{3} = f \bar{\sigma} \quad (2-3)$$

onde σ_n é a tensão normal na interface, $\bar{\sigma}$ é o fluxo de tensão do material deformando e f é fator de atrito ($= m/\sqrt{3}$). Há vários métodos para se estimar fricção, isto é, estimar o valor de μ ou m . Os testes mais comumente utilizados são os testes do anel e da espiga para conformação maciça e os testes de laminação com deformação plana e estiramento para conformação de chapas.

2.5 Região de deformação/mecânica de deformação

Em conformação o material é deformado plasticamente para a geração da forma do produto desejado. O fluxo de metal é principalmente influenciado por (a) geometria da ferramenta, (b) condições de atrito, (c) características do sobremetal e (d) condições térmicas existentes na região de deformação. Os detalhes do fluxo de metal influenciam a qualidade e as propriedades do produto conformado assim como a força e energia requerida pelo processo. A mecânica de deformação, isto é, o fluxo de metal, deformações, taxas de deformação e tensões podem ser investigados pelo uso de um dos métodos aproximados de análise (por exemplo elementos finitos, matrizes, diferenças finitas “billet” ou “upper bound”).

2.6 Propriedades de geometria do produto

A macro e microgeometria do produto, isto é, suas dimensões e acabamento superficial, são influenciados pelas variáveis do processo. As condições de processamento (temperatura, deformação e taxa de deformação) determinam as variações microestruturais que ocorrem durante a deformação e freqüentemente influenciam as propriedades do produto final. Conseqüentemente, um enfoque realista do sistema deve incluir considerações de (a) o relacionamento entre as propriedades e a microestrutura do material conformado e (b) a influência quantitativa das condições do processo e sequência de tratamento térmico nas variações microestruturais.

2.7 Breve classificação e descrição dos principais processos de conformação

Os processos de conformação podem ser classificados em duas grandes categorias:

1. Processos de conformação maciça (Tabela 2-2)
2. Processos de conformação de chapas (Tabela 2-3)

Tabela 2-2 - Classificação dos processos de conformação maciça

| Forjamento | Laminação | Extrusão | Trefilação |
|---|------------------------------------|--|--------------------------------|
| forjamento em estampo fechado sem rebarba | Laminação de chapas | Extrusão sem lubrificação | Trefilação |
| forjamento em estampo fechado com rebarba | Laminação de perfis | Extrusão a quente direta com lubrificação a quente | Trefilação com rolos |
| Cunhagem | Laminação de tubos | Extrusão hidrostática | Calibração de parede "Ironing" |
| Eletro-recalque | Laminação de anéis | | Trefilação de tubos |
| Forjamento por extrusão direta | Laminação rotativa por penetração | | |
| Forjamento por retro-extrusão | Laminação de engrenagens | | |
| Indentação | Laminação/forjamento | | |
| Forjamento isotérmico | Laminação progressiva de perfis | | |
| Forjamento de ogiva | Laminação superficial | | |
| Forjamento em estampo aberto (forjamento livre) | Laminação por torneamento (repuxo) | | |
| Forjamento orbital | Laminação progressiva de tubos | | |
| Forjamento de sinterizado | | | |
| Forjamento radial | | | |
| Recalque | | | |

Tabela 2-3 - Classificação dos processos de conformação para chapas

| | |
|--|---|
| Dobramento e flangeamento reto | Conformação de recessos rasos |
| Dobra simples | Embutimento |
| Calandragem | Conformação com martelo |
| Conformação de contornos lineares | Conformação eletromagnética |
| Conformação de nervuras linear | Conformação por explosão |
| Conformação por torneamento de perfis lineares | Conformação de degraus |
| Contorno de superfícies | Repuxo profundo e flangeamento |
| Laminação de perfis | Conformação por torneamento (repuxo em torno) |
| Nervuramento | Repuxo profundo |
| Conformação por envelhecimento | Conformação com punções flexíveis (borracha, diafragma, etc.) |
| Conformação por escoamento | Hydroconformação |
| Conformação e T6empera em matriz | |
| Conformação semi-hidrostática | |
| Conformação a vácuo | |

Nos dois casos, as superfícies do material deformado e das ferramentas estão em contato e o atrito entre elas tem grande influência no processo. No forjamento maciço o material inicial é um tarugo, barra ou vergalhão e um aumento considerável na taxa superfície-volume ocorre no componente conformado. Na conformação de chapas, um "blank" de chapa (platina) é plasticamente deformado numa matriz de forma tridimensional sem qualquer mudança significativa na espessura da chapa original ou nas características superficiais.

Processos que se enquadram na categoria de conformação maciça tem as seguintes formas distintas:

- O componente passa por uma grande deformação plástica, resultando numa apreciável mudança de forma e seção transversal.

- A porção do componente que sofre deformação plástica é, geralmente, muito maior do que aquela que sofre deformação elástica; portanto a recuperação elástica é insignificante.

Exemplos de processos de conformação maciça são extrusão, forjamento, laminação e trefilação.

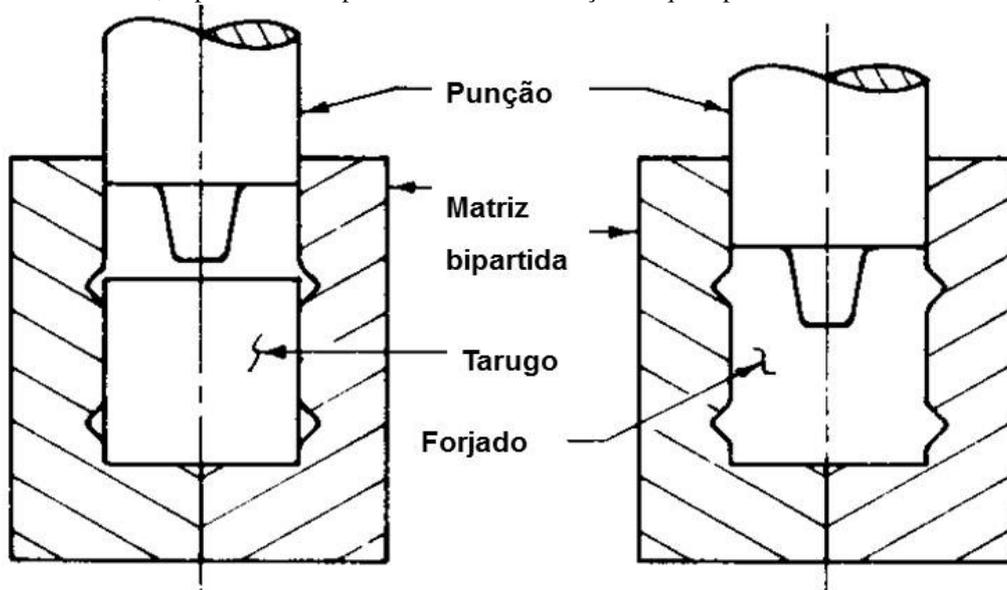
As características dos processos de conformação de chapas são:

- O componente é uma chapa ou é fabricado de uma chapa
- A deformação normalmente causa mudanças significativas na forma, mas não na seção transversal da chapa
- Em alguns casos, a magnitude da deformação plástica permanente é comparável à recuperação elástica; portanto, recuperação elástica ou efeito de mola pode ser significativo

Exemplos de processos que se enquadram nesta categoria são o dobramento convencional com dois apoios somente ou com estampas macho-fêmea, repuxo profundo, conformação por estiramento e com punção flexível.

Alguns processos podem ser enquadrados em ambas categorias (conformação maciça ou de chapas), dependendo da configuração do produto. Por exemplo, na redução da espessura da parede de um tubo. Partindo-se de um tubo de parede grossa o processo de trefilação poderia ser considerado como de conformação maciça. Por outro lado se o “blank” inicial fosse uma lata fabricada com chapa fina, a trefilação seria considerada como conformação de chapas.

Os mais importantes processos de conformação estão listados nas Tabelas 2-2 e 2-3. Os processos de conformação maciça da Tabela 2-2 estão descritos brevemente nas Figuras 2-1 até 2-32. Os processos de conformação de chapas da Tabela 2-3 estão brevemente descritos nas Figuras 2-33 até 2-50. A descrição fornecida em cada figura inclui equipamentos utilizados e aplicações dos mesmos*. Do ponto de vista da deformação dos metais, se algum processo ou variações deste são similares, eles são agrupados sob um título, especificado simplesmente como “variações daquele processo”.



Definição: Neste processo um tarugo com volume cuidadosamente controlado é deformado (à quente ou à frio) por um punção a fim de preencher a cavidade do estampo sem perda de material. O punção e o estampo podem ser compostos de uma ou várias partes.

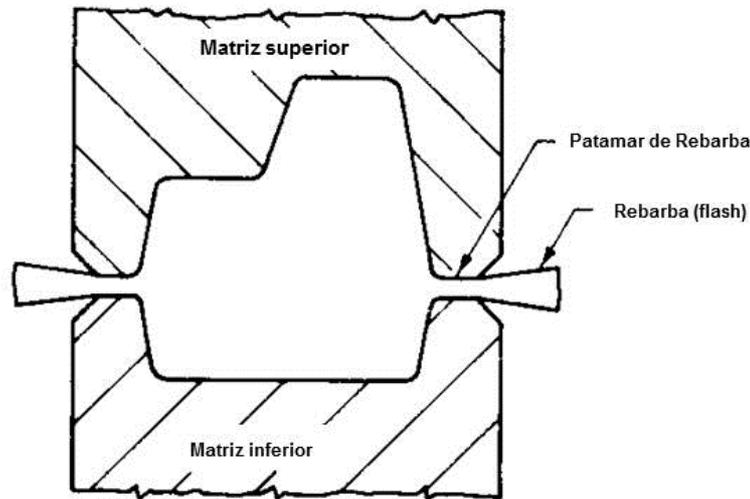
Equipamento: Prensa hidráulica, prensa mecânica com múltiplos golpes

Materiais: Aços carbono ligados, ligas de cobre e alumínio

Variações: Forjamento de núcleo, forjamento de precisão, forjamento frio e quente, Forjamento de sinterização

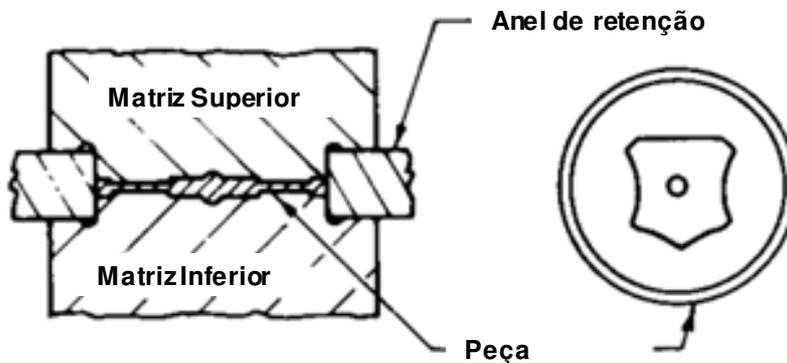
Aplicações: Forjamento de precisão, forjamento oco, ajustes, cotovelos, tês, etc.

Figura 2-1 - Conformação com estampo fechado sem rebarbas



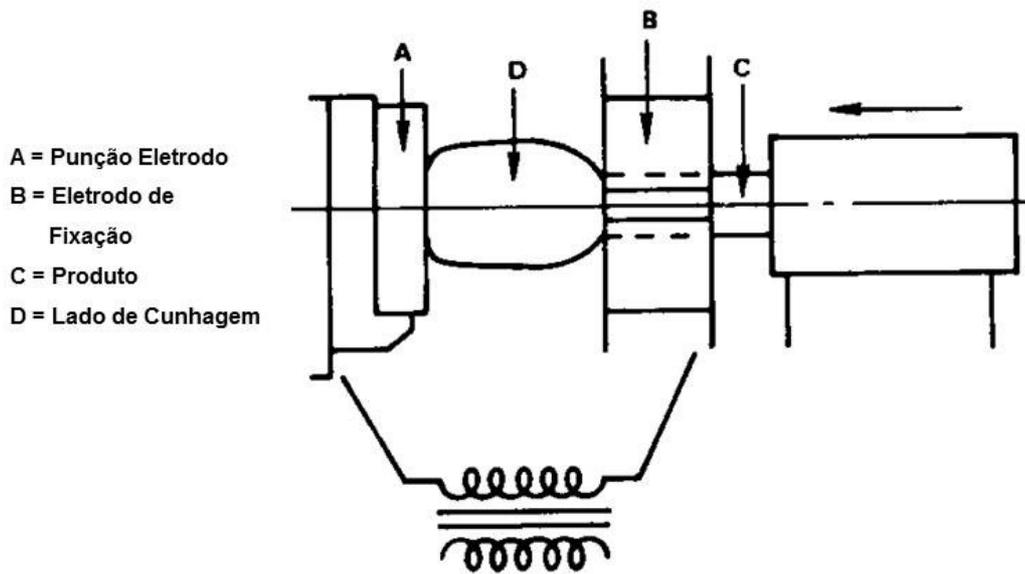
- Definição:** Neste processo um tarugo é conformado (à quente) em estampas (normalmente bipartidas) de modo que o fluxo de metal na cavidade do estampo é restrito. O excesso de material é extrudado através de uma folga estreita e aparece como um rebarba ao longo de todo o contorno do componente na divisão do estampo.
- Equipamento:** Prensas com simples e duplo estágio, prensas hidráulicas e mecânicas, e prensas de fricção.
- Materiais:** Ligas de alumínio, magnésio, berílio, cobre, aços carbono e ligados, aços inoxidáveis, ligas de níquel, de titânio, superligas baseadas em ferro, cobalto, níquel, ligas de nióbio, molibdênio, tântalo, tungstênio e demais materiais forjáveis.
- Variações:** Conformação com estampas fechadas com rebarba lateral, com rebarba longitudinal, sem rebarba
- Aplicações:** Componentes para automóveis, caminhões, tratores, veículos fora-de-estrada, aviões, transporte ferroviário, mineração, indústria mecânica em geral e produtos de engenharia relacionada com energia.

Figura 2-2 - Conformação com estampo fechado com rebarbas



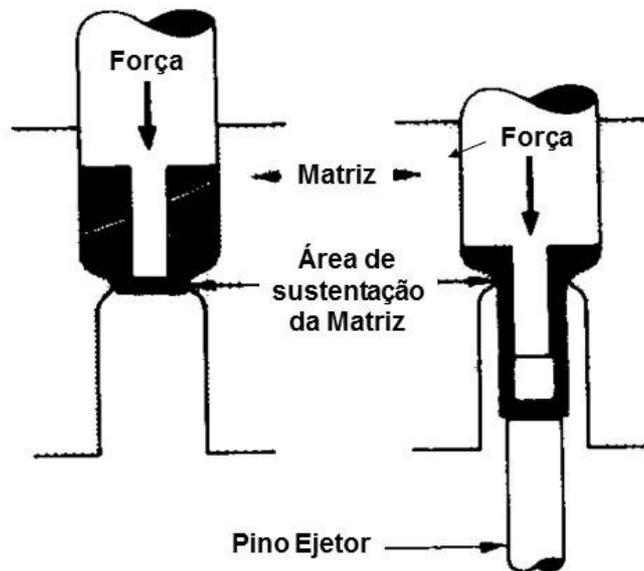
- Definição:** É uma operação de conformação em estampo fechado, normalmente executada à frio, na qual todas as superfícies de trabalho são confinadas ou restringidas, resultando numa impressão bem definida do estampo no componente. É também uma operação de repetidos golpes para afiar ou mudar um raio ou perfil existente.
- Equipamento:** prensa ou martelo
- Material:** Aços carbono ou ligados, aços inoxidáveis, ligas resistentes ao calor, ligas de alumínio, cobre, prata e ouro
- Variações:** cunhagem sem rebarbas, cunhagem com rebarbas, cunhagem em estampo fechado, conformação dimensional (calibragem).
- Aplicações:** Moedas metálicas, itens decorativos, tais como ornamentos usados sobre a mesa, medalhas e botões metálicos, conformação dimensional para componentes automobilísticos e componentes para aeronaves.

Figura 2-3 – Cunhagem



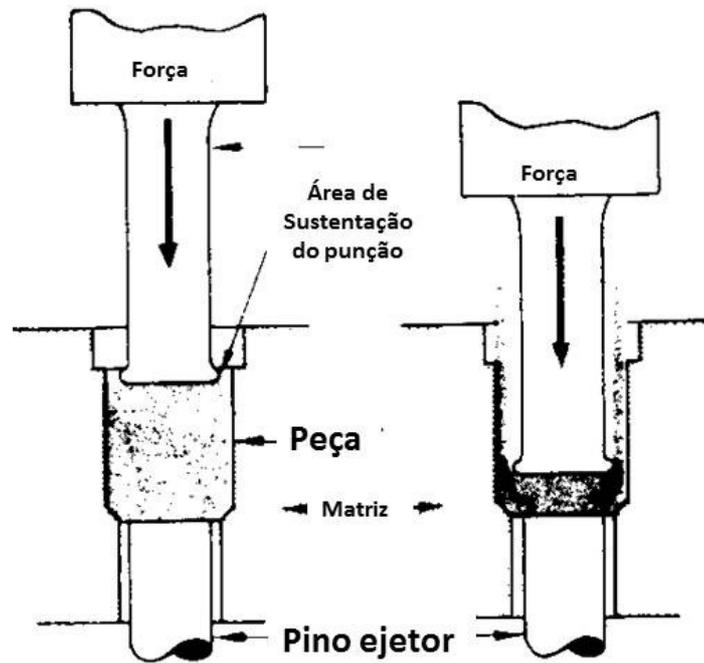
Definição: É o processo de conformação à quente no qual uma barra redonda é aquecida eletricamente e pressionada contra uma cavidade ou uma matriz plana.
 Equipamento: recaladoras elétricas
 Material: Aços carbono ou ligados, titânio
 Aplicações: em pré-conformações ou conformações finais

Figura 2-4 - Eletrorecalque



Definição: Neste processo o punção comprime um tarugo (quente ou frio) confinado numa cavidade com apenas uma passagem de modo que o material do tarugo flui através da passagem na mesma direção do movimento do punção.
 Equipamento: Prensa mecânica ou hidráulica
 Materiais: Aços carbono e ligados, ligas de alumínio, cobre, magnésio, e titânio
 Variações: Conformação com estampo fechado sem rebarbas, forjamento com sinterização
 Aplicações: Eixos sólidos com cones ou diferentes diâmetros, componentes tubulares com múltiplos diâmetros e furos cônicos ou não circulares.

Figura 2-5 - Forjamento por extrusão direta



Definição: Neste processo o tarugo (frio ou quente) é pressionado dentro de uma cavidade fechada por um punção de área menor que a cavidade, de modo que o material é forçado a escoar em volta do punção na direção oposta ao movimento do punção.

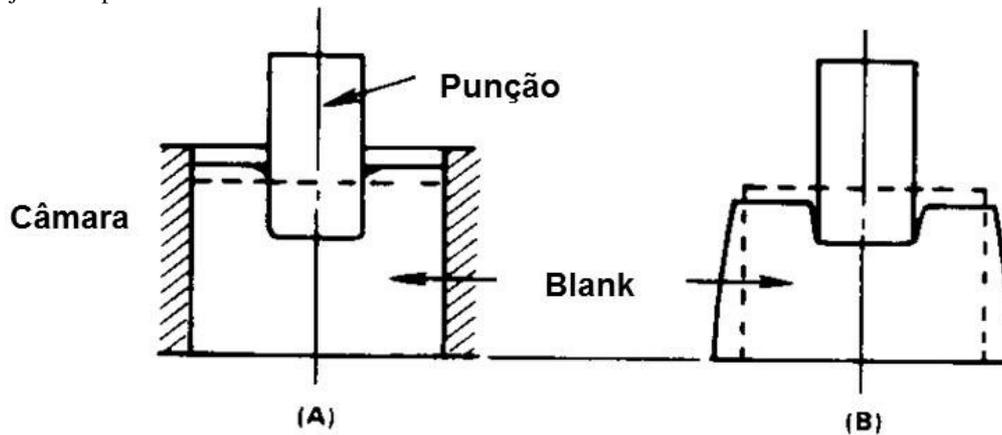
Equipamento: Prensas mecânicas ou hidráulicas

Materiais: Aços carbono ou ligados, ligas de alumínio, cobre, magnésio ou titânio

Variações: Conformação com estampo fechado sem rebarbas, forjamento com sinterização

Aplicações: Componentes contendo cavidades fechadas ou em formas de copos com furos cilíndricos, cônicos ou não circulares.

Figura 2-6 - Forjamento por retro-extrusão



Definição:   um processo no qual uma indenta o ou "gravamento"   realizada num bloco quente ou frio atrav s de um pun o de  rea menor do que o bloco.

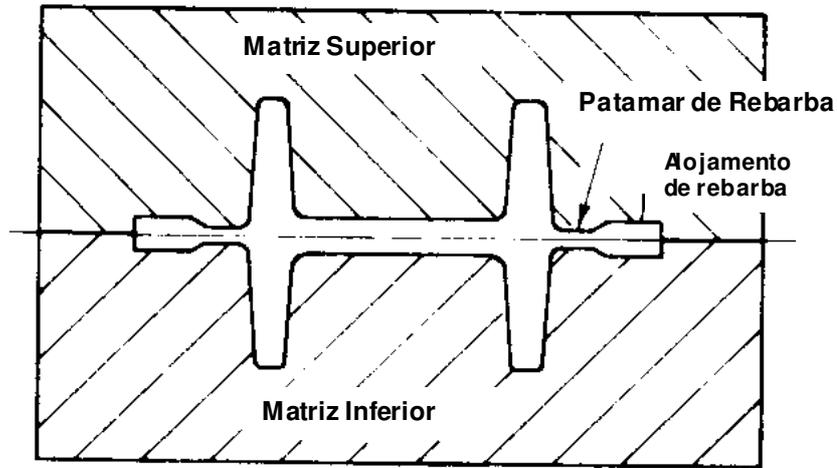
Equipamento: Prensas mec nicas ou hidr ulicas

Materiais: A os carbono ou ligados

Varia es: Indenta o ou impress o

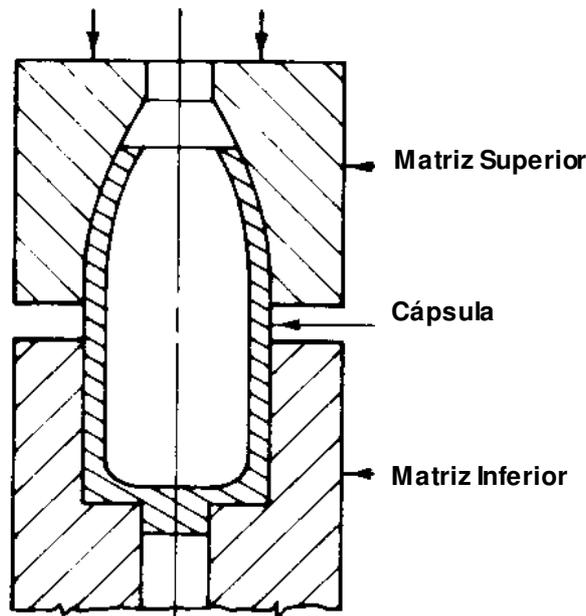
Aplica es: Fabrica o de estampos e moldes com impress es relativamente rasas.

Figura 2-7 – Indenta o



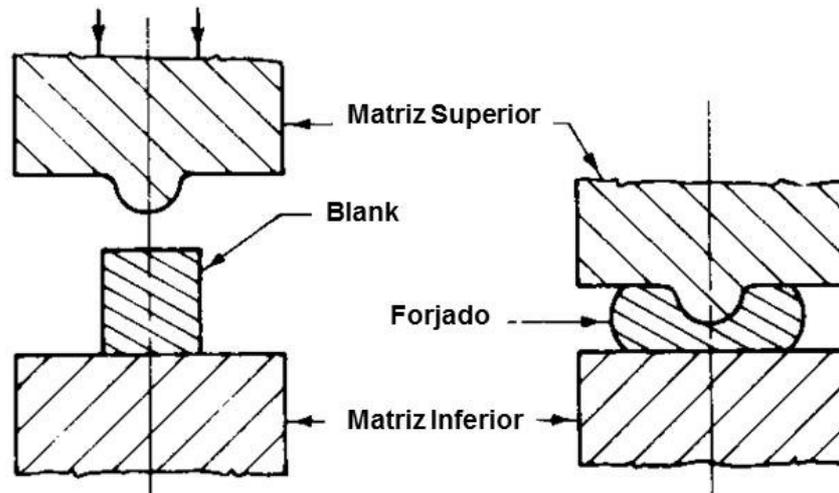
Definição: É um processo de forjamento onde o estampo e o material a ser forjado estão aproximadamente à mesma temperatura, em geral alta.
 Equipamento: Prensa hidráulica
 Materiais: Ligas de titânio ou de alumínio
 Variações: Conformação em estampo fechado com ou sem rebarba, conformação com sinterização
 Aplicações: Forjamento acabado ou quase acabado para indústria aeronáutica (net shape ou near-net-shape)

Figura 2-8 - Forjamento isotérmico



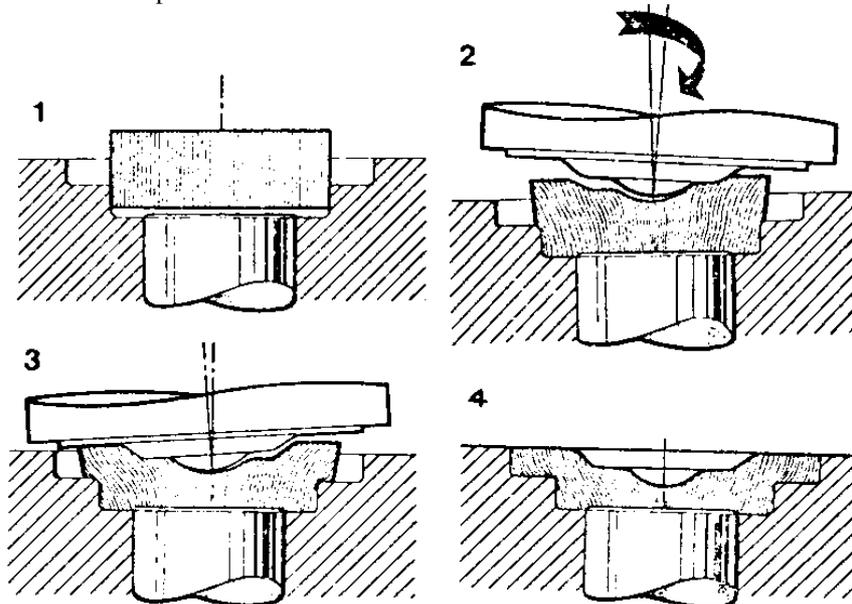
Definição: É um processo de forjamento à quente ou à frio no qual uma cápsula de munição ou um componente tubular tem sua boca fechada em ogiva pressionada axialmente por uma ferramenta de forma.
 Equipamentos: Pressas mecânicas, hidráulicas ou martelos.
 Materiais: Aços carbono ou ligados, ligas de alumínio e titânio
 Variações: Restrição e expansão de tubos
 Aplicações: Conformação do lado aberto de cartuchos de munição, conformação de reservatórios de gás

Figura 2-9 – Forjamento de ogivas



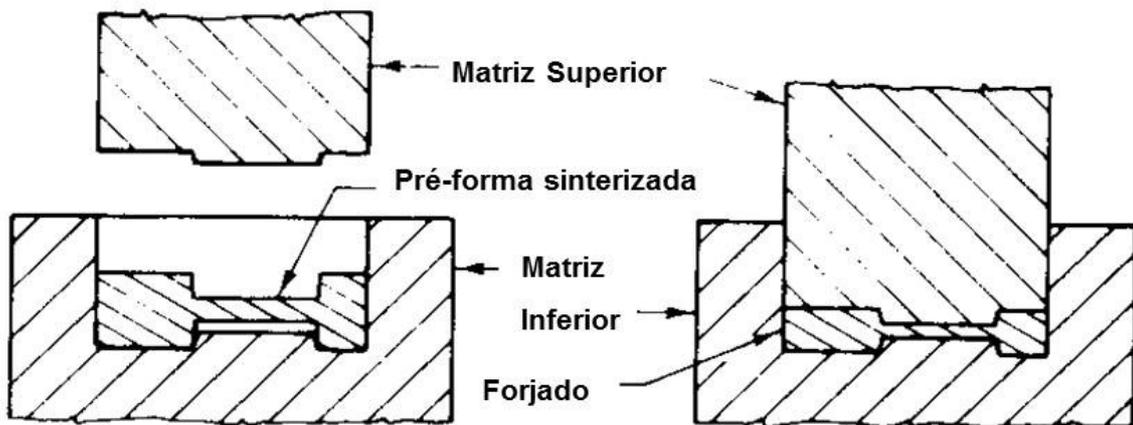
Definição: É um processo de forjamento a quente no qual o metal é conformado por golpes de martelo ou por pressão entre uma base plana e um punção de contorno simples.
 Materiais: Aços carbono e ligados, ligas de alumínio, titânio e todos os materiais forjáveis.
 Variações: Forjamento de vergalhões, eixos, mandris, anéis, recalçagem entre estampos planos ou curvos.
 Aplicações: Forjamento de lingotes, grandes forjamentos, pré-conformações

Figura 2-10 - Forjamento com estampo aberto



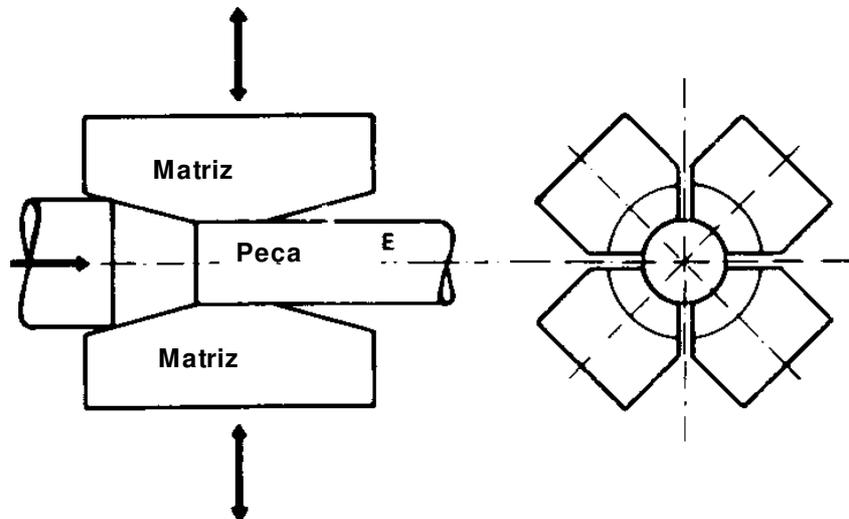
Definição: É um processo onde o material (quente ou frio) é forjado através de um punção superior com movimento orbital e uma matriz inferior não rotativa. A parte inferior do estampo sobe progressivamente de encontro à superior rotativa.
 Equipamento: Prensa orbital
 Materiais: Aços carbono e ligados, aços inoxidáveis, ligas de alumínio e latões e todos os materiais forjáveis
 Variações: É também chamado forjamento rotativo ou ainda oscilante. Em certos casos a parte inferior do estampo também tem movimento rotativo.
 Aplicações: Engrenagens cônicas, garras de embreagens, discos e cubos de rodas, anéis de rolamento, anéis de diversos contornos, vedações de rolamentos.

Figura 2-11 - Forjamento orbital



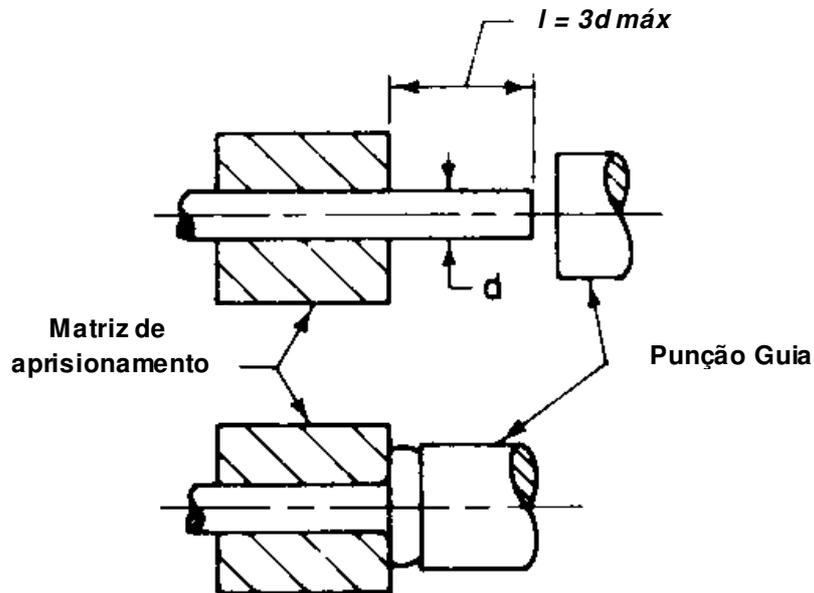
- Definição: É o processo de forjamento (à quente ou à frio) em matriz fechada no qual se usa pré-formas de pós metálicos sinterizados.
- Equipamentos: Prensas mecânicas ou hidráulicas
- Materiais: Aços carbono e ligados, aços inoxidáveis, ligas de cobalto, alumínio, titânio e níquel.
- Variações: conformação com estampo fechado com ou sem rebarba
- Aplicações: para forjamento de peças para automóveis, caminhões, e veículos fora-de-estrada.

Figura 2-12 - Forjamento de sinterizados



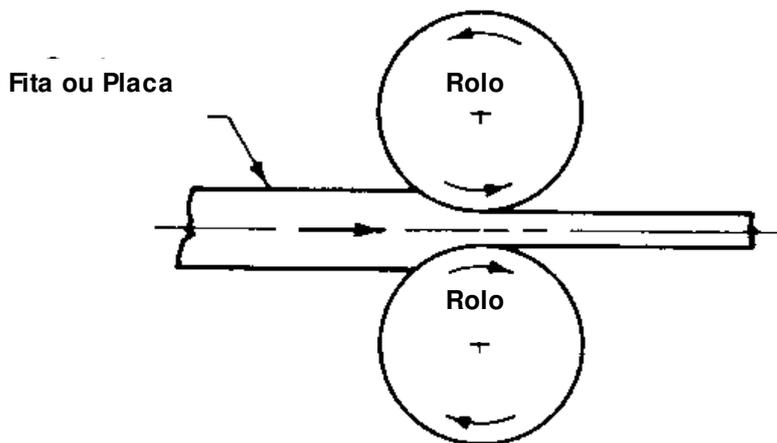
- Definição: Este processo de forjamento a quente ou a frio se utiliza de dois ou mais punções, ou matrizes, que se movem radialmente produzindo componentes sólidos ou tubulares com seções transversais constantes ou variáveis ao longo do comprimento.
- Equipamento: Máquina de forjamento radial
- Materiais: Aços carbono ou ligados, ligas de titânio berílio, tungstênio e superligas resistentes a altas temperaturas.
- Variações: Forjamento Rotativo
- Aplicações: Redução de diâmetros de lingotes e barras, forjamento de eixos e pontas-de-eixo com diversos diâmetros, forjamento de canos de armas, produção de componentes tubulares com e sem perfil interno.

Figura 2-13 - Forjamento radial



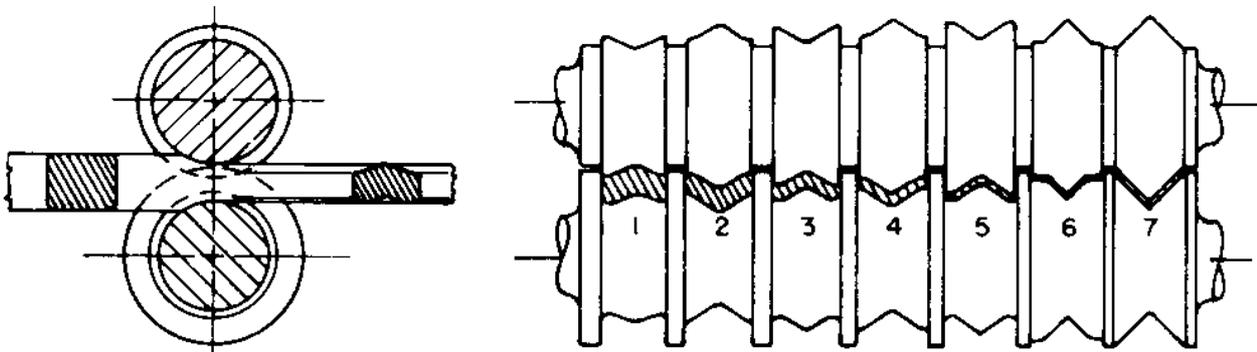
Definição: Este é o processo de forjamento, a quente ou a frio, no qual uma porção, ou todo o componente, tem sua seção transversal aumentada.
Equipamento: Martelos, máquinas recalcadoras, prensas hidráulicas, mecânicas ou de fricção
Materiais: Aços carbono ou ligados, aços inoxidáveis, todos os materiais forjáveis.
Variações: Eletrorecalque, forjamento por recalque, forjamento por estampo aberto.
Aplicações: Forjamentos finais, incluindo de porcas e parafusos, eixos flangeados e preparação para forjamentos finais.

Figura 2-14 - Recalque



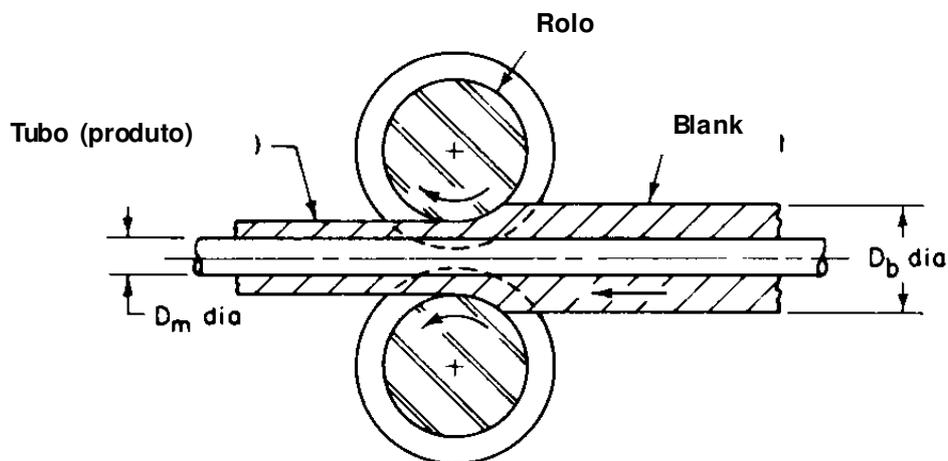
Definição: É um processo de conformação, a quente ou a frio, no qual a espessura da chapa é reduzida através do emprego de rolos rotativos. Em geral, o material laminado aumenta de comprimento e largura simultaneamente, enquanto a espessura é reduzida.
Equipamento: Dois ou quatro rolos laminadores, diversos rolos laminadores, rolos laminadores planetários.
Materiais: Aços carbono e ligados, Ligas de alumínio, cobre, titânio e níquel.
Variações: Laminação de tiras, laminação de placas, lingotes, laminação a quente.
Aplicações: Tiras, chapas e placas.

Figura 2-15 - Laminação de chapas



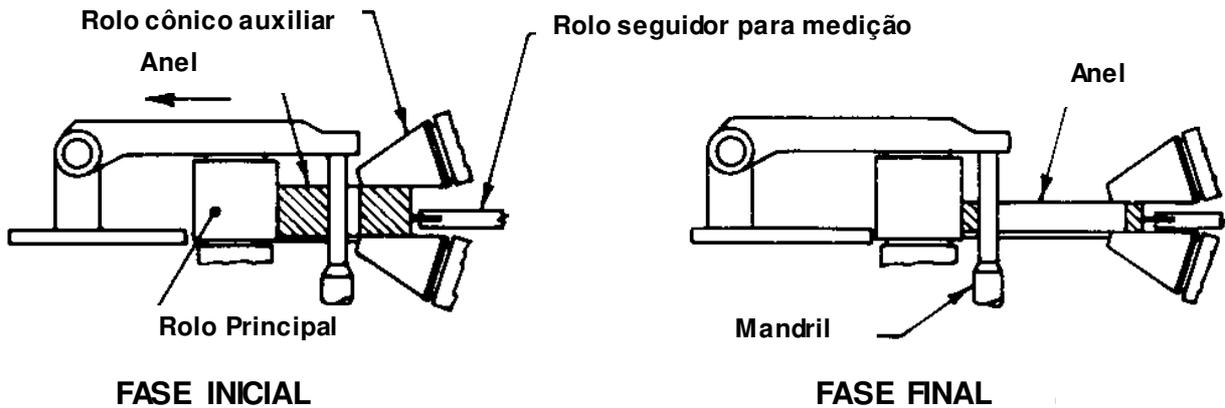
- Definição:** Neste processo de conformação a quente ou a frio, a seção transversal do material é reduzida e conformada simultaneamente através da passagem por uma série progressiva de rolos rotativos até a forma final desejada.
- Equipamento:** Dois rolos rotativos
- Materiais:** Aços carbono e ligados, aços ferramenta, aços inoxidáveis das séries 200 e 400, superligas, tais como inconel, Hastelloy-X, Waspaloy, e A-286, materiais não-ferrosos, tais como titânio, ligas de cobre.
- Variações:** Laminação de forma
- Aplicações:** Componentes estruturais, tais como seções T, U e L, seções para pás (de turbinas, hélices, etc.)

Figura 2-16 -Laminação de forma



- Definição:** É processo de conformação no qual a seção transversal e/ou diâmetro de tubos são reduzidos, através da passagem deste por rolos com acionamento próprio.
- Equipamento:** Dois rolos laminadores
- Materiais:** Aços carbono e ligados, ligas de cobre e alumínio
- Variações:** Laminação de tubos com ou sem mandril.
- Aplicações:** Tubos sem costura para diversas aplicações na indústria

Figura 2-17 - Laminação de tubos



Definição: É o processo de conformação (a quente ou a frio) onde um tarugo, inicialmente de forma circular, é transformado em um anel. Um rolo principal prensa o diâmetro externo do tarugo, o qual é suportado no diâmetro interno por um mandril. A forma da seção transversal é obtida pelo contorno apropriado do mandril e do rolo. A altura do anel é controlada pelos rolos auxiliares (Figura 2-18)

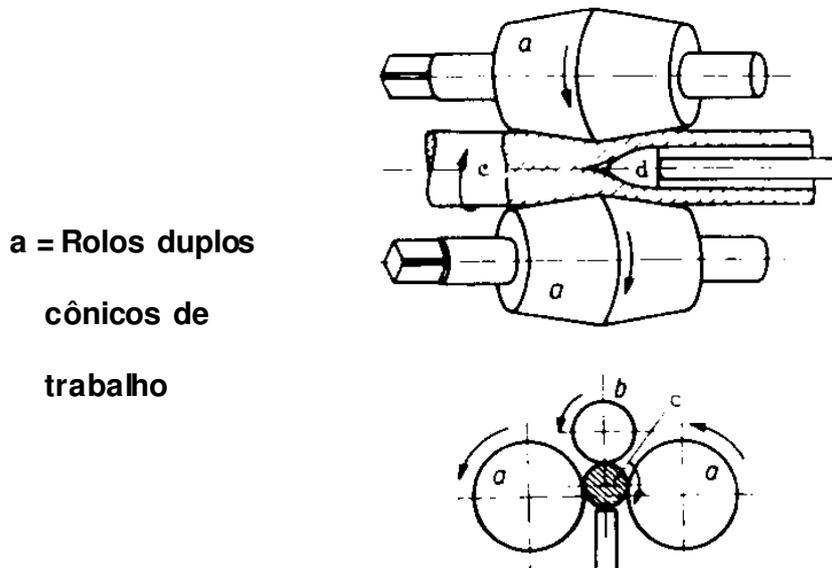
Equipamento: Máquinas de laminação de anéis ou rolos laminadores.

Materiais: Aços carbono e ligados, ligas de alumínio, níquel e titânio

Variações: Laminação de Tubos com mandril, Laminação de tubos sem mandril

Aplicações: Anéis de todos os tipos, flanges, pistas de rolamento, engrenagens, anéis de rolamento, anéis de comutador, anéis para motores à jato, componentes de reatores.

Figura 2-18 - Laminação de anéis



a = Rolos duplos cônicos de trabalho

Definição: Neste processo de conformação à quente, uma seção oca é formada através da rotação periférica de um tarugo contra um mandril componta. O tarugo é movido por um par de rolos cônicos montados como eixos longitudinais reversos. A força de atrito entre os rolos e o tarugo produz movimentos de rotação e avanço longitudinal sobre o tarugo.

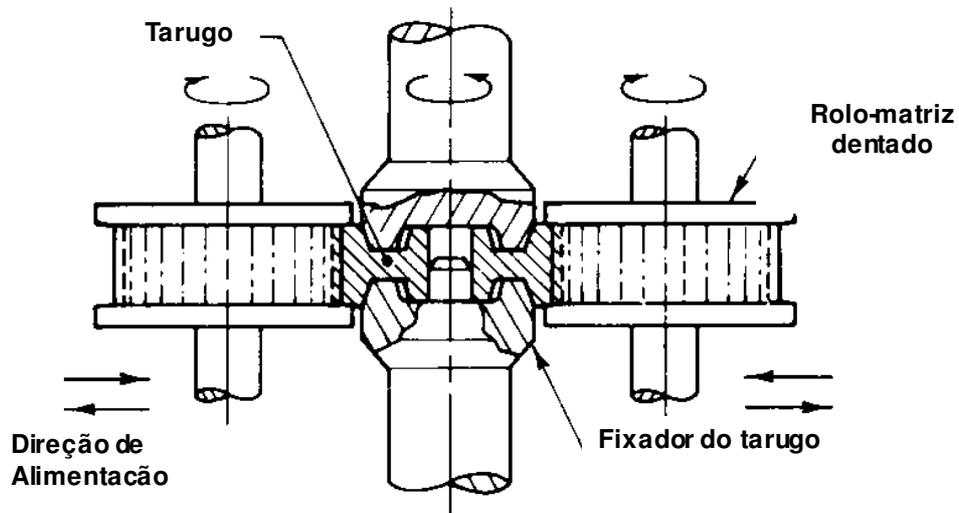
Equipamento: Rolos de laminação rotativa de tubos

Materiais: Aços carbono e ligados

Variações: Processo Mannesmann™ de laminação rotativa de tubos

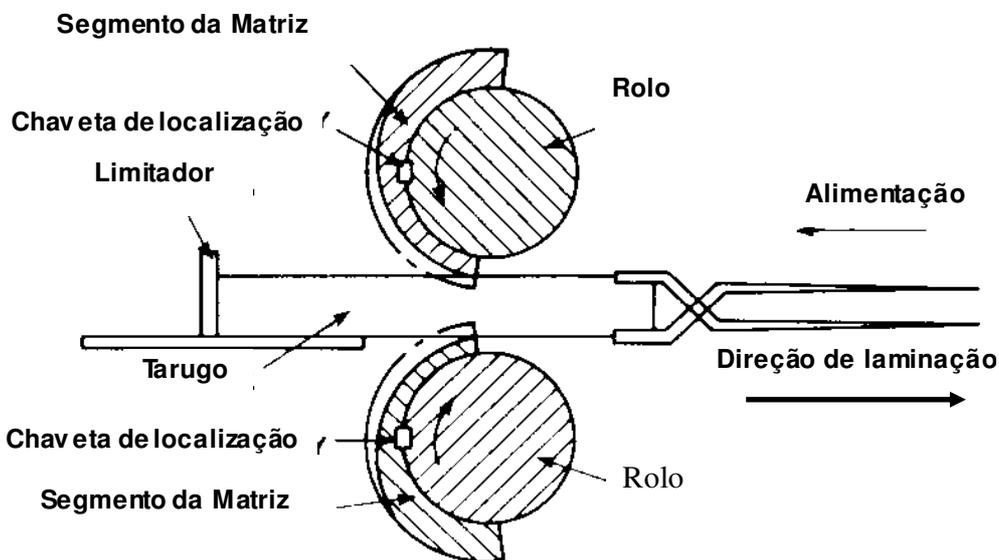
Aplicação: Fabricação de tubos sem costura

Figura 2-19 - Laminação rotativa por penetração



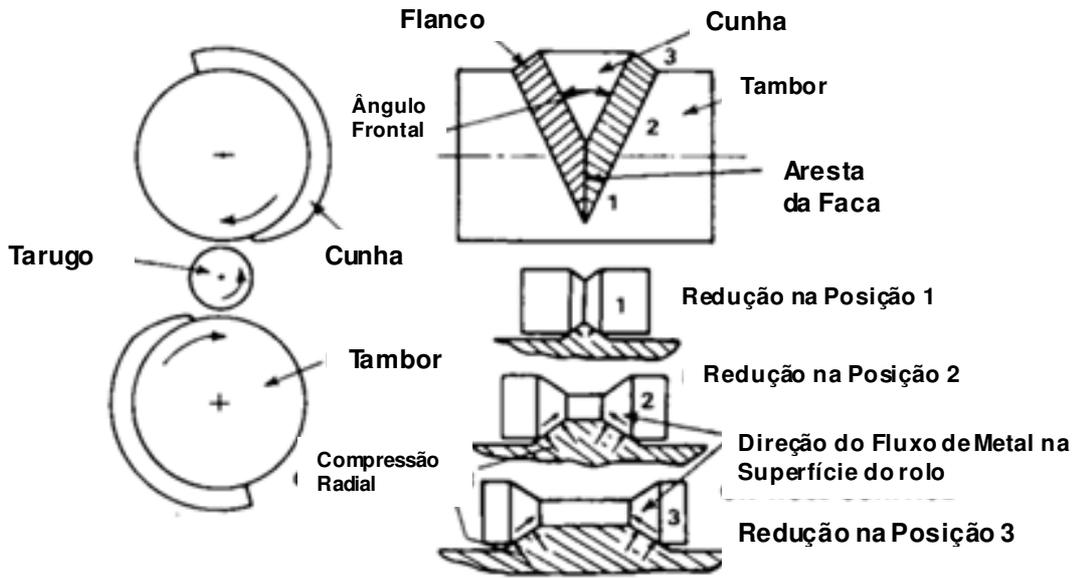
Definição: É o processo de conformação para dentes de engrenagens, num tarugo quente ou frio, através de laminação entre rolos laminadores com dentes de engrenagens.
 Equipamento: Máquina laminadora de engrenagens
 Materiais: Aços carbono e ligados
 Variações: Laminador de roscas, laminador de elos
 Aplicações: Engrenagens, elos de corrente

Figura 2-20 - Laminação de engrenagens



Definição: Neste processo a forma desejada é produzida através de laminação de um tarugo quente entre dois rolos contendo o perfil apropriado na forma de sulcos.
 Equipamento: Rolos laminadores redutores
 Materiais: Aços carbono e ligados, ligas de alumínio.
 Aplicações: Pré-formados para forjamento de componentes esbeltos

Figura 2-21 - Laminação/forjamento



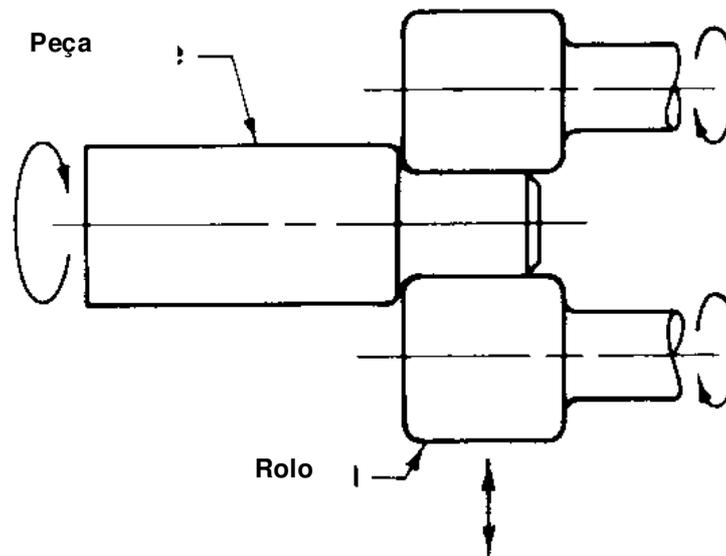
Definição: Neste processo de conformação um tarugo circular é inserido transversalmente entre dois rolos laminadores contendo cada um o perfil apropriado, ou seja, na forma de cunhas com altura progressiva. Durante este processo as ferramentas s movem em sentidos opostos girando o tarugo dando forma ao mesmo.

Equipamento: Máquina com dois outrês rolos laminadores, cruzados ou transversais

Variação: Rolos transversais

Aplicação: Pré-formados para forjados, componentes simétricos axialmente, tais como eixos com diversos dâmetros diferentes ou cones, árvores primárias e secundárias de câmbio.

Figura 2-22 - Laminação progressiva de perfis



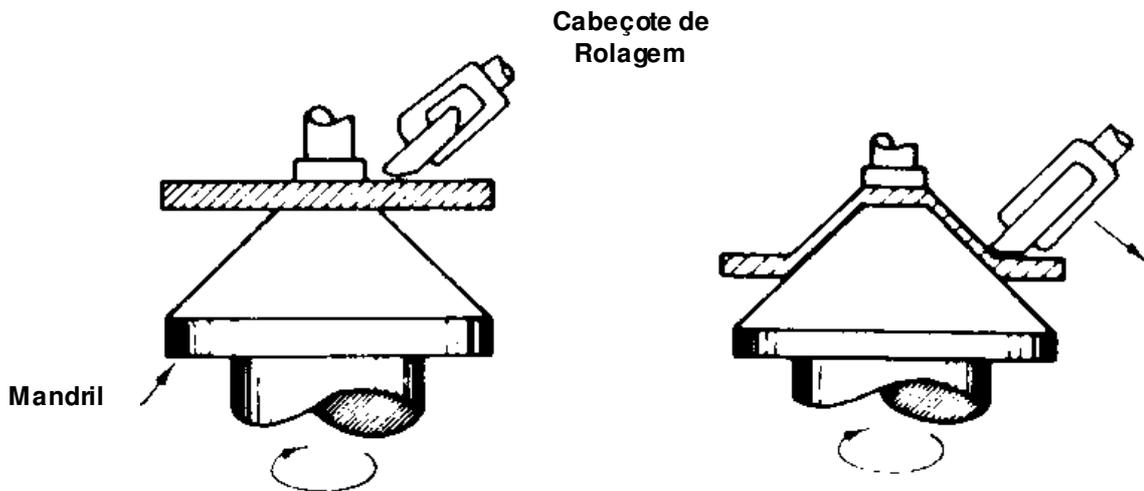
Definição: Neste processo a superfície do componente é alisada e polida através da laminação desta por dois rolos que são pressionados radialmente e movido axialmente. Desta forma obtém-se uma superfície com tensão superficial de compressão, melhorando sua resistência à fadiga.

Equipamento: Máquina de laminação superficial, tornos com dispositivos especiais

Materiais: Aços carbono e ligados, ligas de alumínio e latões

Aplicação: Polimentos superficiais em eixos e superfícies de rolamento

Figura 2.23 - Laminação superficial



Definição: É um processo de conformação, a quente ou a frio, no qual pode-se produzir componentes na forma de pratos, combinando-se rotação e pressão diferente da conformação por torneamento, principalmente porque reduz a espessura inicial do tarugo.

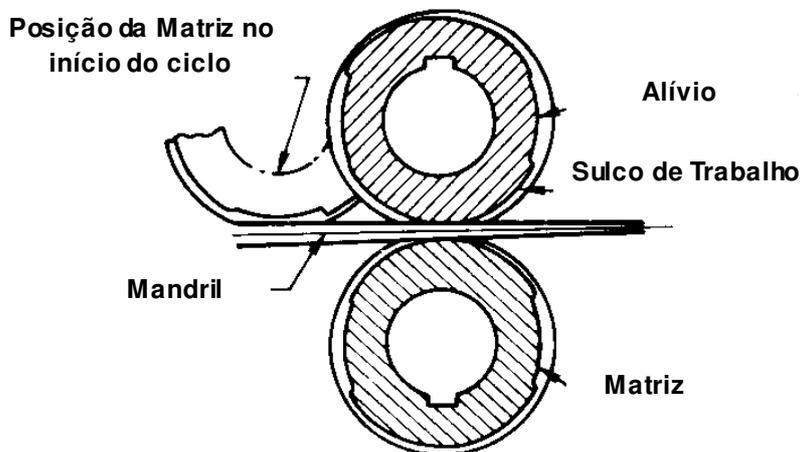
Equipamento: Máquinas de laminação por torneamento

Materiais: Aços carbono e ligados, ligas de alumínio, cobre, titânio

Variações: Conformação cônica, conformação de tubos, laminação/extrusão

Aplicação: Trambuladores, componentes empregados em indústria aeroespacial, tais como o nariz de mísseis e foguetes, componentes na forma de discos produzidos em moderadas quantidades.

Figura 2-24 - Repuxo por torneamento



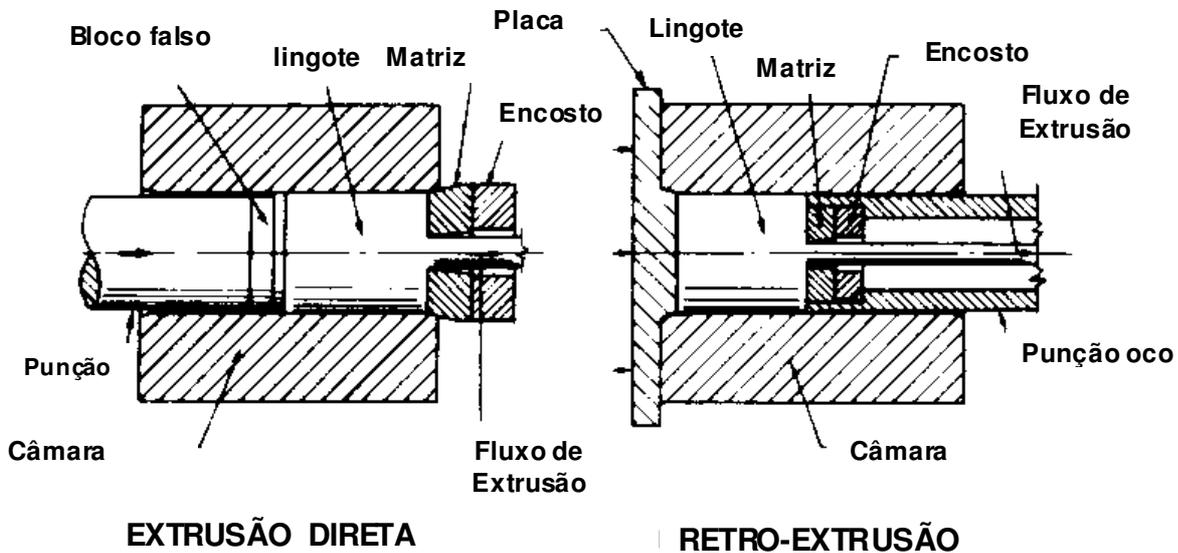
Definição: Neste processo a área da seção transversal de um tubo é reduzida através da laminação deste sobre uma mandril cônico e usando rolos semicirculares com sulcos também cônicos. Estes rolos não giram, mas oscilam e o mandril com o tubo é que rotaciona entre os movimentos de oscilação dos rolos laminadores, movendo-se à frente simultaneamente.

Equipamento: Rolos laminadores para laminação progressiva de tubos, redutor de tubos por laminação do tipo "HPTR™"

Materiais: Aços carbono e ligados, Ligas de titânio, tântalo, nióbio

Aplicações: Largamente empregado em processos intermediários entre a extrusão e a trefilação final, ou como operação final em tubos

Figura 2-25 - Laminação progressiva de tubos



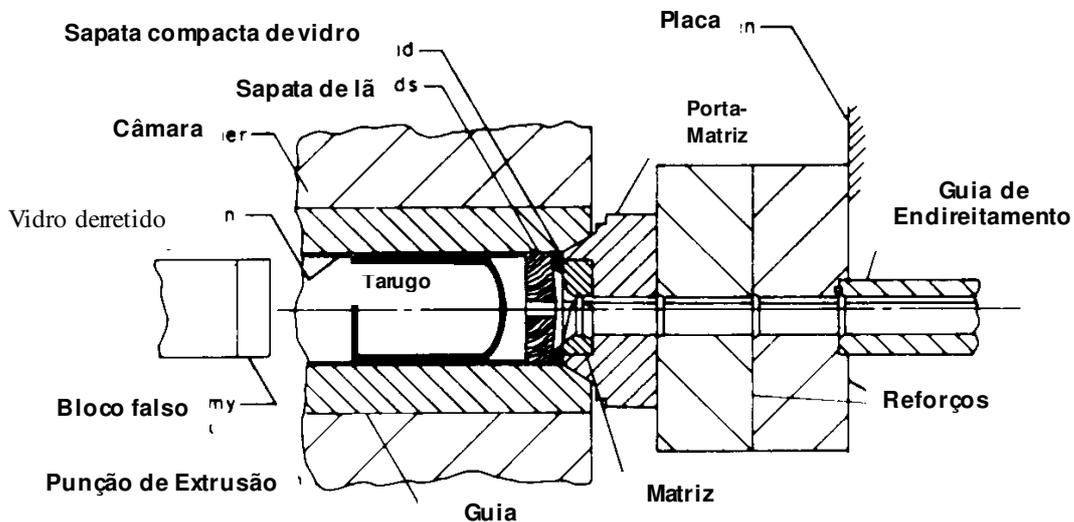
Definição: Neste processo o tarugo aquecido, de uma determinada secção transversal, é extrudado contra o orifício de uma matriz sem nenhuma lubrificação, quer seja no tarugo ou na matriz. A extrusão pode ser direta, quando acontece na direção de movimento do punção, ou indireta, quando a extrusão é em direção oposta.

Equipamento: Prensa hidráulica

Materiais: Ligas de cobre, chumbo, alumínio, magnésio, zinco.

Aplicação: Extrusão de barras, tubos e forma complexas

Figura 2-26 – Extrusão a quente sem lubrificação



Definição: O tarugo aquecido é prensado contra a matriz, usando uma forma qualquer de lubrificação, para obter o produto de determinada forma geométrica.

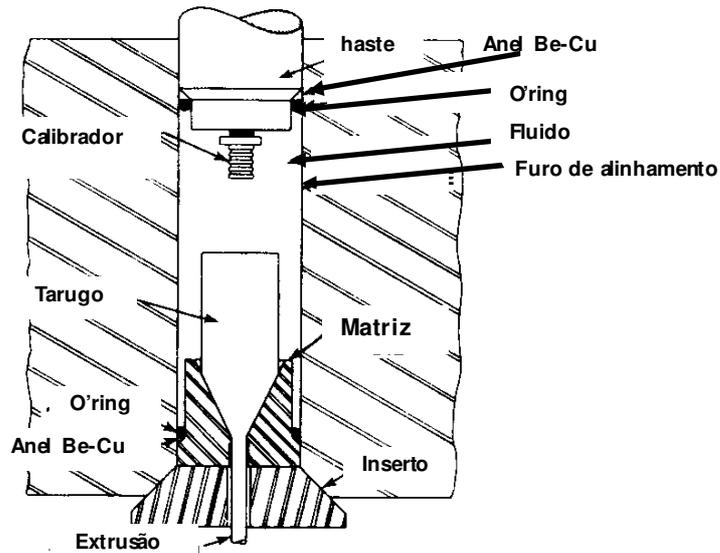
Equipamento: Pressas hidráulicas ou mecânicas

Materiais: Aços carbono ou ligados, Ligas de titânio, berílio, nióbio, tântalo, tungstênio, molibdênio, Superligas de níquel ou cobalto.

Variações: “Sejourmet Process”, Extrusão com graxas grafitadas

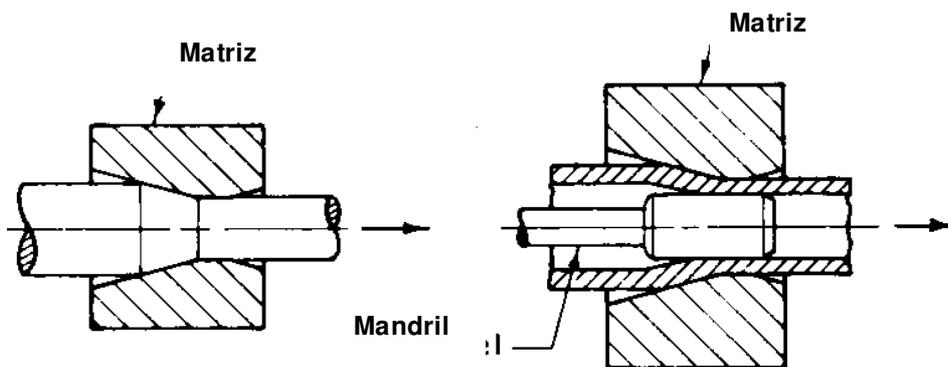
Aplicações: Extrusão de barras, tubos e outras seções transversais complexas.

Figura 2-27 - Extrusão direta a quente lubrificada



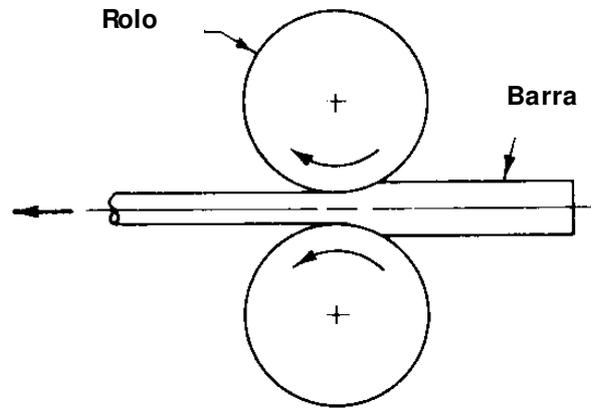
- Definição:** É um processo onde o tarugo, aquecido ou frio, é extrudado através de pressão exercida por fluido pressurizado, ao invés de um punção.
- Equipamento:** Prensa hidrostática de extrusão, Prensa hidráulica com ferramental especial.
- Materiais:** Aços carbono e ligados, Ligas de alumínio, magnésio, cobre, materiais revestidos, materiais refratários e resistentes a altas temperaturas, compostos
- Variações:** extrusão por Hydrafil™, extrusão hidrostática contínua.
- Aplicação:** Este processo está ainda em estágio de desenvolvimento. Tem especial potencial para aplicações em extrusão de tubos, arames, ligas de alumínio, materiais revestidos, tubos de aço, perfis complexos, engrenagens, tubos de cobre, extrusão de materiais frágeis.

Figura 2-28 - Extrusão hidrostática



- Definição:** É um processo empregado para redução de área, ou forma, de seção transversal de barras, tubos, arames, a quente ou a frio, puxando o tarugo através de um orifício.
- Equipamento:** Bancadas de trefilação, máquinas de trefilação e arames.
- Materiais:** Aços carbono e ligados, aços inoxidáveis, ligas de cobre, alumínio, titânio, nióbio, tungstênio, tântalo, cobalto, berílio, Zircaloy-2™, TD níquel™, cromo.
- Variações:** Trefilação de barras, trefilação de arames, trefilação de tubos commandril estacionário, ou commandril flutuante, trefilação de fomas.
- Aplicações:** Arames redondos ou com seções complexas, barras, tubos.

Figura 2-29 - Trefilação



Definição: Este processo consiste em reduzir a área da seção transversal de uma barra, fita tubo ou arame (à quente ou à frio) puxando a o tarugo por entre rolos sem movimento próprio.

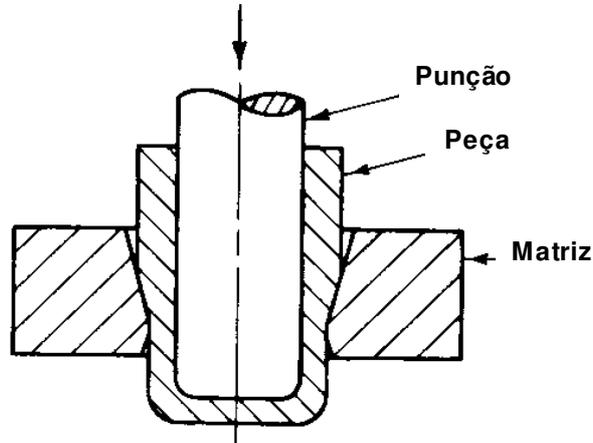
Equipamento: Bancada de laminação, rolos de laminação de arames

Materiais: Aços carbono ou ligados, ligas de cobre, ligas de alumínio.

Variações: “Steckel rolling”, Trefilação de tubos através de rolos com mandril flutuante, com mandril móvel ou sem mandril

Aplicações: Barras, fitas, tubos, e produtos com arames de várias formas.

Figura 2-30 - Laminação através de rolos.



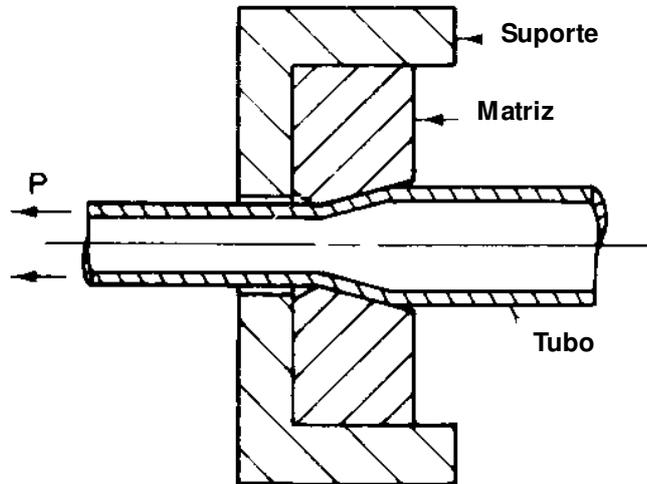
Definição: É um processo no qual a parede de um componente em forma de copo é calibrada ou afinada (a quente ou a frio) forçando-se este por um punção através de uma cavidade, ou matriz.

Equipamento: Prensa mecânica ou hidráulica

Materiais: Aços carbono ou ligados, ligas de alumínio, titânio.

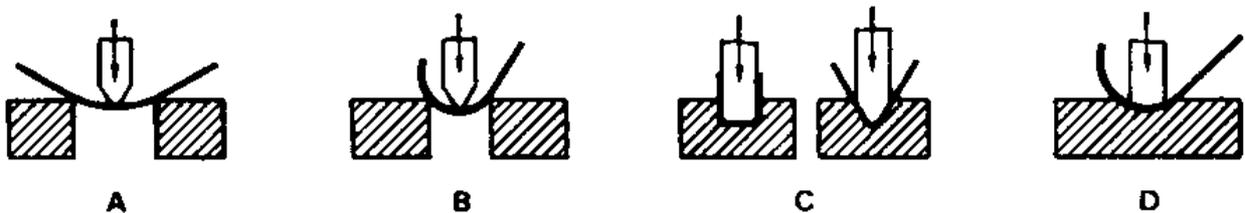
Aplicações: Peças em forma de copo, tampas para diversos usos.

Figura 2-31 - Calibração de parede (ou estampagem)



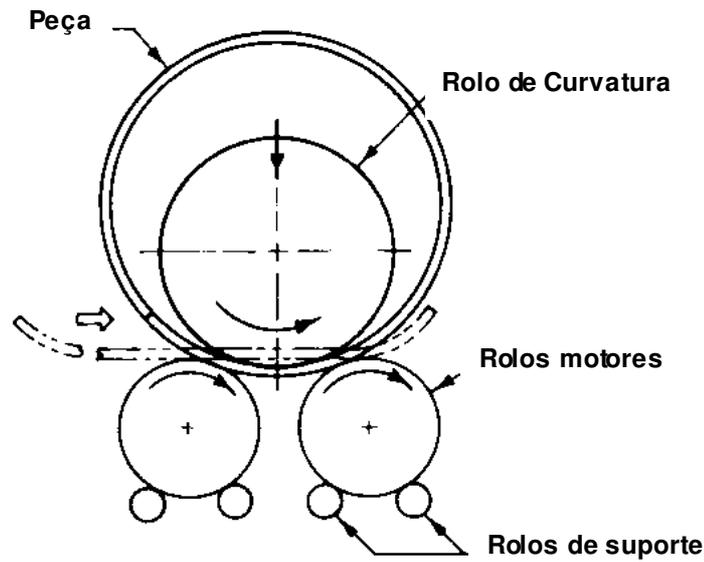
Definição: Neste processo o diâmetro externo de um tubo é trefilado (a quente ou a frio) sem nenhum mandril para suporte no diâmetro interno.
Equipamento: Bancadas de trefilação
Materiais: Aços carbono ou ligados, aços inoxidáveis, ligas de cobre.
Aplicações: Tubos.

Figura 2-32 - Trefilação de tubos



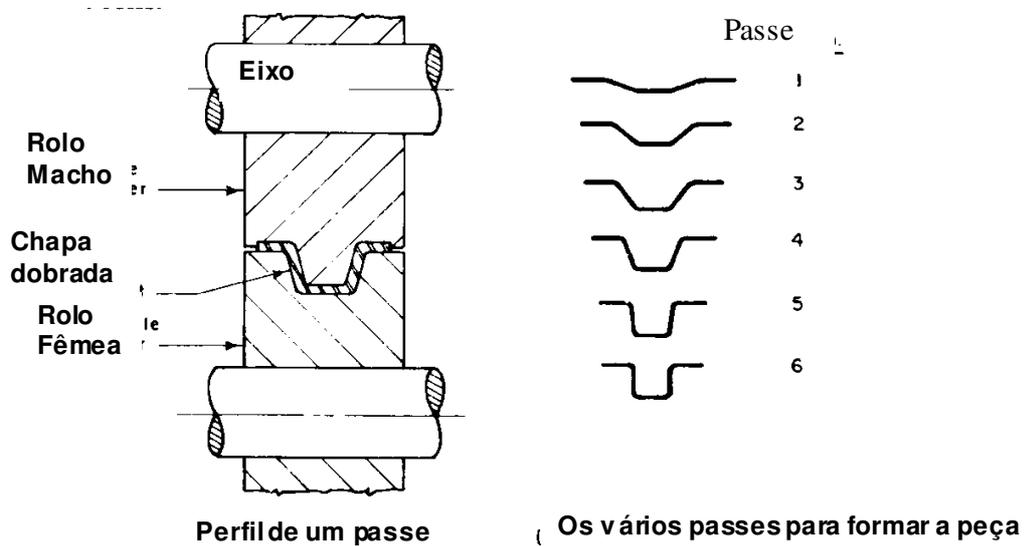
(A) Dobramento em vazio (B) Curvamento em vazio (C) Dobramento com matriz (D) Arredondamento com matriz
Definição: Dobramento é um processo de conformação largamente empregado em chapas com seções lineares, angulares, canais ou em forma de chapéus. Há duas formas típicas de dobramento: com ou sem matriz de forma. Na operação com matriz de forma o componente é suportado por uma cavidade (matriz) fêmea no ângulo desejado. Na segunda forma o ângulo final é dado pelo limite de movimento vertical do punção.
Equipamento: Dobreira mecânica ou hidráulica
Materiais: Aços carbono ou ligados, ligas de alumínio, titânio, superligas com ferro, níquel ou cobalto, ligas de molibdênio, berílio, ou tungstênio.
Variações: Dobramento com matriz elástica, dobramento de chapas com um lado preso
Aplicações: Produção de componentes com formas lineares de chapas ou placas

Figura 2-33 – Dobramento



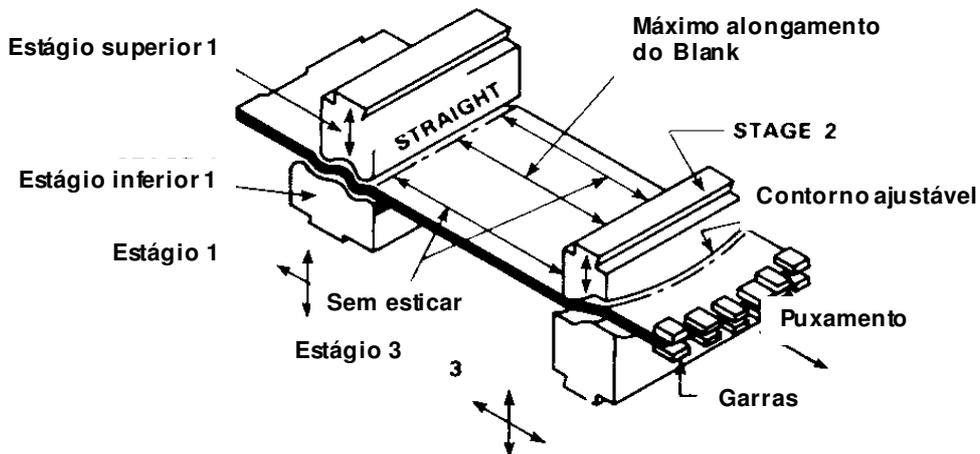
Definição: Este processo produz uma curvatura na chapa, barra ou outra seção usando três cilindros com distância ajustável.
 Equipamento: Máquinas de calandragem, máquinas de cilindrar, máquinas com rolos em pirâmide
 Materiais: Aços carbono e ligadas, ligas de alumínio e titânio
 Variações: Roletador de alavancas
 Aplicações: Cilindros para tanques de pressão, tanques de aquecedores, tubos nervurados, cones para bicas de alimentação e seções irregulares para estruturas de submarinos, aviões e reatores nucleares.

Figura 2-34 - Calandragem



Definição: É empregado para produzir componentes longos com seções transversais uniformes ao longo do comprimento. A seção é produzida passando-se a chapa através de roletes com perfis progressivos até a forma final.
 Equipamento: Máquinas de laminação de perfil
 Materiais: Aços carbono e ligadas, ligas de alumínio, titânio, superligas de ferro, níquel e cobalto, ligas de molibdênio, nióbio.
 Variações: Laminação por arestas
 Aplicações: Produção de grande quantidade de formas com perfil complexo a partir de chapas.

Figura 2-35 - Laminação de perfis



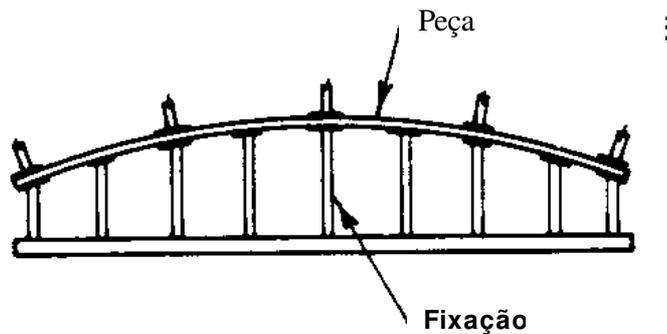
Definição: Trata-se um processo de conformação no qual os componentes contém curvaturas compostas. Os contornos são estabelecidos puxando-se a chapa através de mandíbulas, em três estágios. O primeiro estágio consiste de um par de matrizes de perfil reto. O segundo e terceiro estágios consistem de matrizes com contornos cujos movimentos podem ser controlados em diversas direções, por cames. A forma final da chapa é determinada pelo ajuste da posição relativa entre os três estágios.

Equipamento: Máquinas de Nervuramento ou androforming™

Materiais: Aços carbono e ligados, ligas de alumínio, titânio, superligas de ferro, níquel e cobalto, ligas de molibdênio e nióbio.

Aplicações: conformação de contornos duplos em painéis longos de chapa

Figura 2-36 - Nervuramento (androforming)



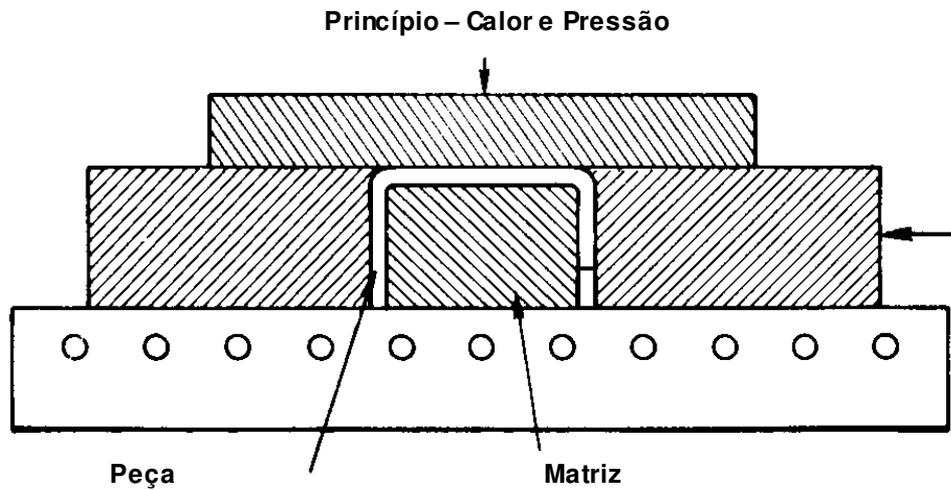
Definição: Neste processo os painéis a serem conformados são fixados nos contornos requeridos e submetidos ao tratamento térmico ou envelhecimento numa temperatura determinada por um período de tempo. Durante o envelhecimento o material escoa devido à tensão introduzida pela fixação e retém o contorno quando removido da fixação, após o tratamento térmico.

Equipamento: Fornos e fixação especiais para conformação por envelhecimento

Materiais: Ligas de alumínio e titânio

Aplicações: Contornos comuns para painéis em pequenas quantidades

Figura 2-37 - Conformação por envelhecimento



Definição: Pressão é aplicada sobre formas irregulares ou pré-conformadas, colocadas contra uma matriz aquecida. Quando em contato com a matriz quente, o componente assume a forma desejada devido à deformação por escoamento.

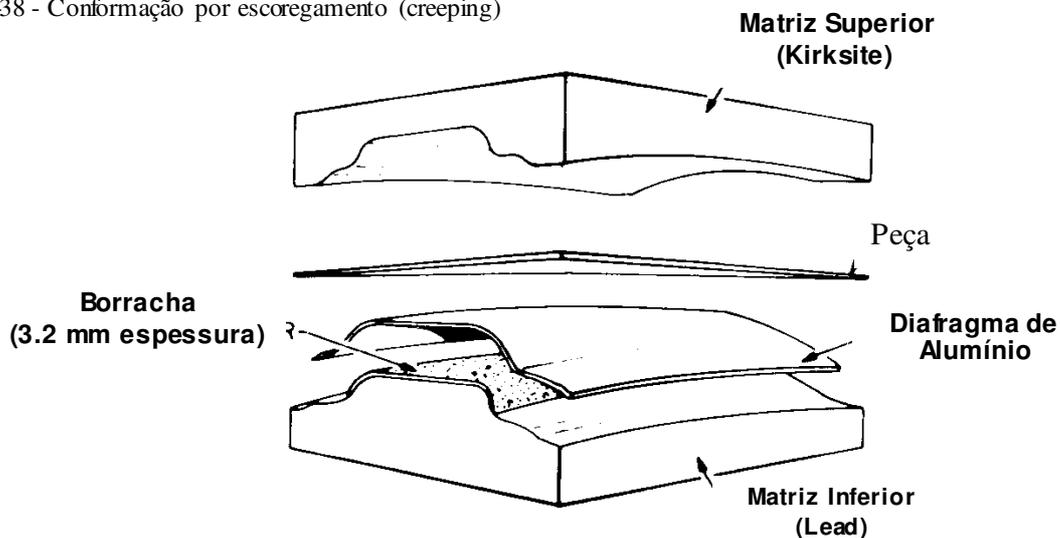
Equipamento: Prensas especiais para conformação por escoamento.

Materiais: Alumínio e titânio.

Variações: Conformação por envelhecimento, conformação com matriz aquecida

Aplicações: Conformação de componentes para indústria aeroespacial

Figura 2-38 - Conformação por escoamento (creeping)



Definição: Neste processo de conformação a chapa aquecida é conformada entre matrizes frias sob alta pressão sem que se permita a contração do componente, durante a conformação. A porcentagem de estiramento introduzida no metal é proporcional ao seu coeficiente de expansão térmica da liga na temperatura de processamento.

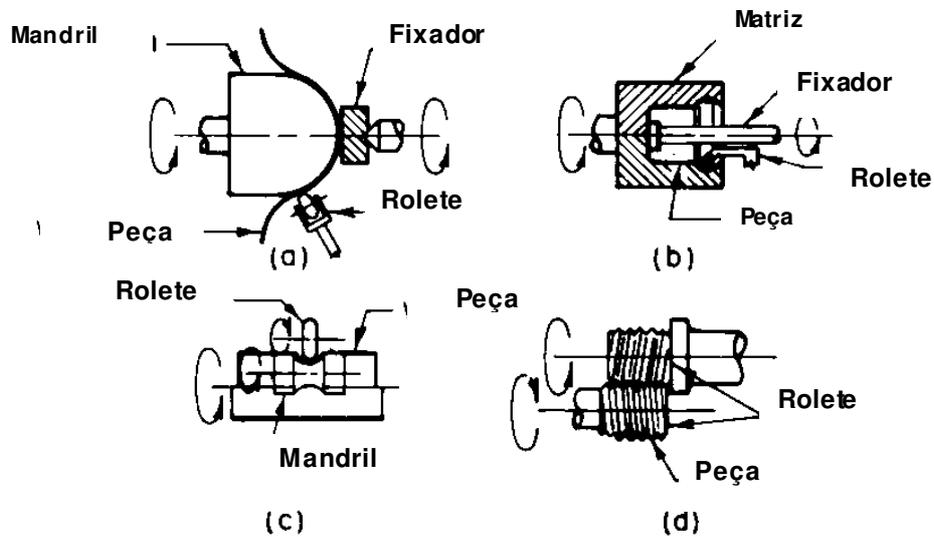
Equipamento: Prensa hidráulica

Materiais: Alumínio e ligas de titânio.

Variações: Conformação hidrodinâmica por resfriamento.

Aplicações: Componentes de formas complexas que devem ser conformados livres de dobras ou tensões residuais, conformação integral de carcaças rígidas.

Figura 2-39 - Conformação por têmpera em matriz



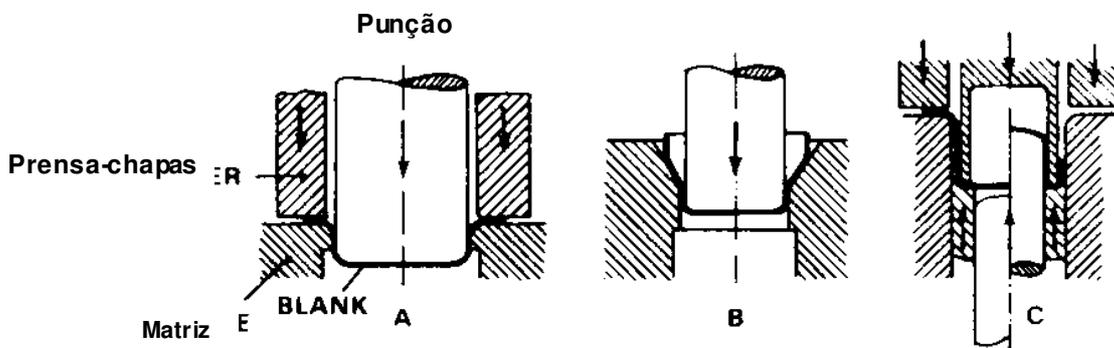
Definição: É o processo para conformação de componentes em forma de prato sem costura, através da combinação de forças de rotação e pressão. Neste caso o componente final mantém a espessura da chapa original.

Equipamento: Máquinas de conformação por torneamento, tornos modificados.

Materiais: Aços carbono e ligados, ligas de alumínio, titânio, superligas de ferro, níquel e cobalto, ligas de molibdênio, nióbio, berílio e tungstênio.

Aplicações: Conformação de flanges, abas conformadas, copos (canecas), superfícies de revolução, tais como cones e sinos.

Figuras 2-40 - Conformação por tomeamento.



(A) Primeiro repuxo (B) Segundo repuxo (C) Repuxo inverso

Definição: Neste processo de conformação a chapa (quente ou fria) normalmente prensada nas bordas por prensa-chapas, é forçada por um punção através de uma matriz para formar um recesso profundo contendo uma parede na mesma espessura que a chapa original. Este processo é empregado para produzir componentes de forma prismática ou cilíndrica com ou sem flange. Componentes em forma de copo ou tubo podem ser obtidos por sucessivas operações de repuxo, que pode também calibrar o diâmetro externo.

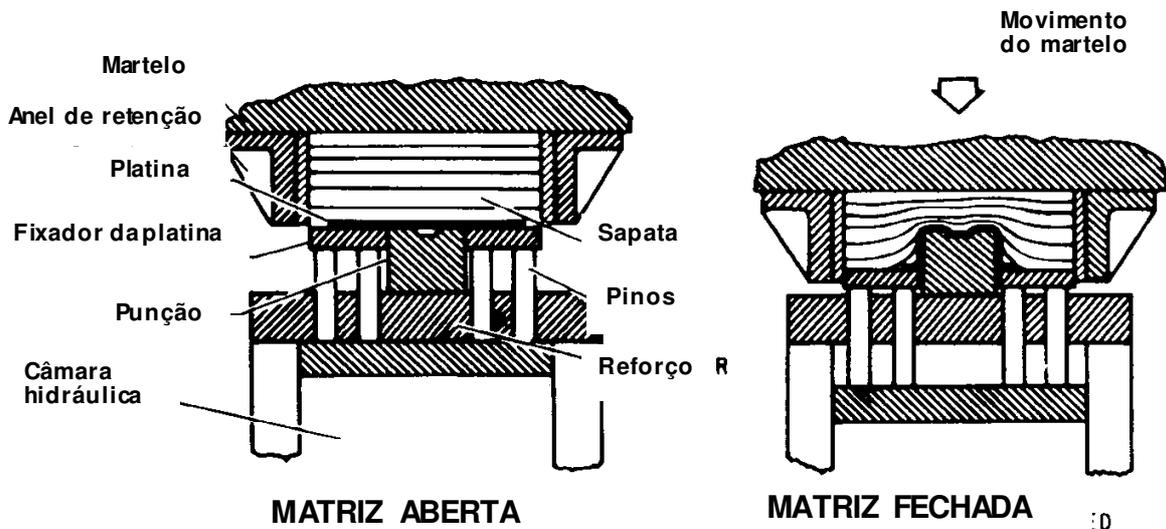
Equipamento: Prensa hidráulica ou mecânica, prensas transfer de duplo estágio

Materiais: Aços carbono e ligados, ligas de alumínio, titânio, superligas de ferro, níquel e cobalto, ligas de molibdênio, nióbio e tungstênio.

Variações: Repuxo profundo com múltiplos punções, repuxo com punção de contorno rígido, conformação de borracha com ou sem prensa-chapas (processo Marform™), conformação fluidica, conformação por explosivos, hidro-conformação.

Aplicações: Repuxo de copos fundos e rasos, carcaças, cápsulas de munição, latas

Figura 2-41 - Estampagem profunda



Definição: Neste processo a platina é presa nas bordas por um punção, composto de borracha, que desce se ajustando ao formato da matriz. Como a borracha exerce uma pressão quase hidrostática sobre a matriz, a chapa se conforma a esta.

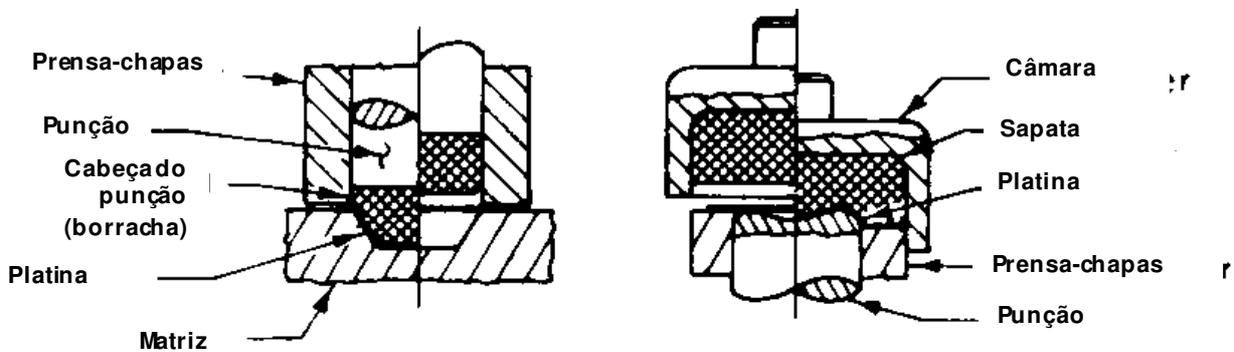
Equipamento: Prensa hidrostática ou prensas especiais.

Materiais: Aços carbono elíados, ligas de alumínio

Variações: hidro-conformação, conformação por diafragma de borracha, processo SAAB de conformação por diafragma

Aplicações: Componentes com recessos profundos, com ou sem flange

Figura 2-42 - Conformação com punção flexível



Definição: Esta é uma operação para a produção de componentes com recessos rasos. Uma sapata de borracha é fixada contra o punção de forma que quando pressionada contra a cavidade da matriz, ou grupo de cavidades, preenche-a totalmente. Como a chapa está entre a sapata e a cavidade da matriz, o componente se conforma com a cavidade.

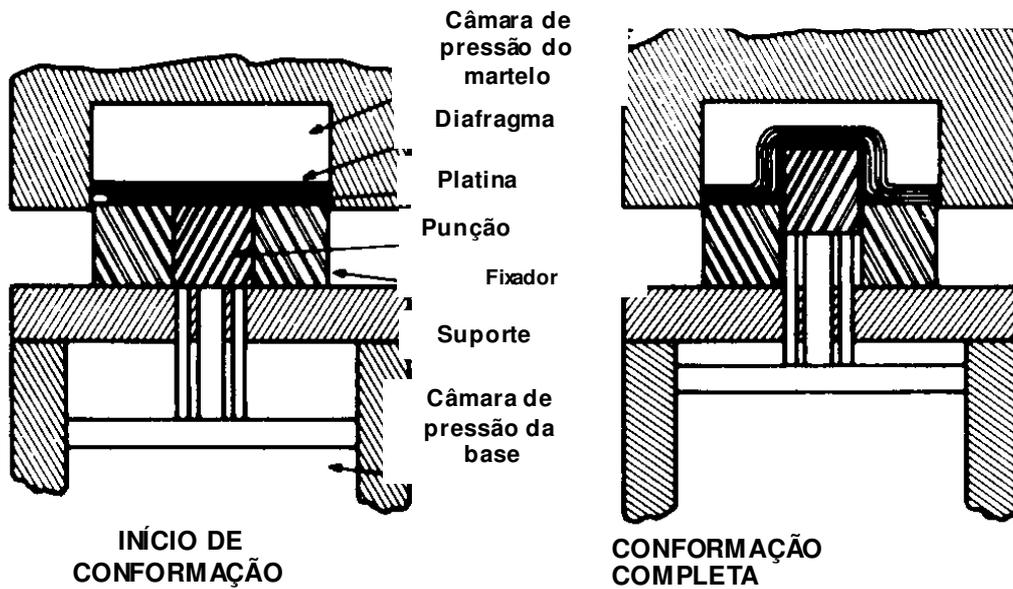
Equipamento: Prensa hidráulica, máquinas de conformação especiais ou martelos

Materiais: Aços carbono ou ligados, ligas de alumínio, titânio, superligas de ferro, níquel e cobalto, ligas de molibdênio e nióbio.

Variações: Processo Verson-Wheeler™ (conformação usando bolsa de borracha), conformação com martelo usando borracha presa, flangeamento com borracha, conformação por matriz de borracha.

Aplicações: componentes com recesso, tais como partes posteriores de refletores, capas de torradeiras, enrijecedores de fuselagem, partes com flanges externos e internos.

Figura 2-43 - Conformação com sapata de borracha



Definição: Neste processo a platina é presa entre um diafragma, o qual encerra uma câmara com fluido e um prensa-chapas. Um punção prensa a chapa contra a câmara fluidica conformando a chapa em torno do punção com pressão isostática.

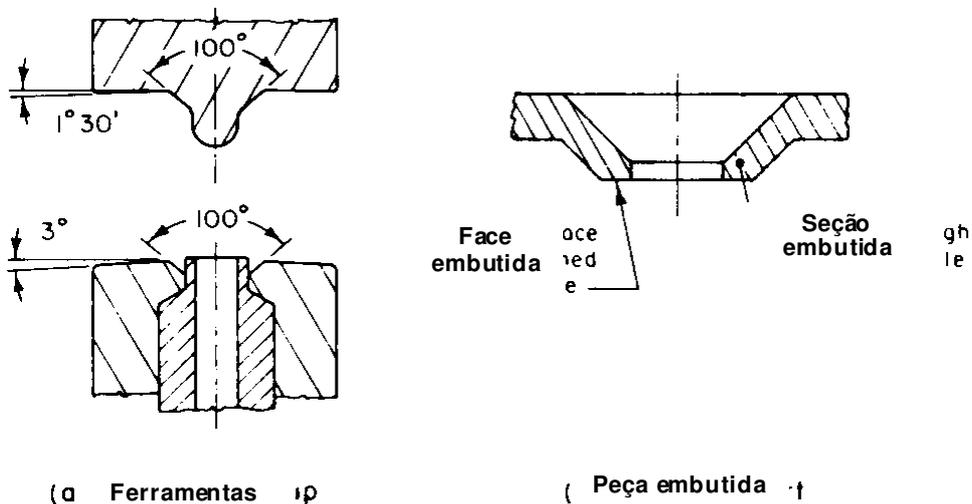
Equipamento: Prensa hidráulica de dupla ação, máquinas especiais.

Materiais: Aços carbono e ligados, ligas de alumínio

Variações: Técnica Hi-Draw™, processo Marform™.

Aplicações: Componentes com recesso profundos, com ou sem flanges.

Figura 2-44 - Hidroconformação com diafragma de borracha



Definição: Embutimento é o processo no qual se produz um recesso cônico em volta de um furo numa chapa para alojara a cabeça de um parafuso ou rebite. É muito comum em chapas muito finas para a produção de um furo escareado.

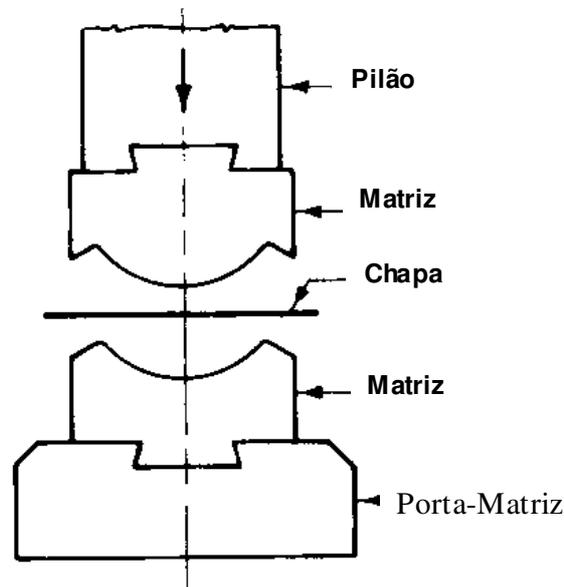
Equipamento: Máquinas especiais para embutimento.

Materiais: Aços carbono ou ligados, ligas de alumínio, titânio e, superligas de ferro, níquel e cobalto, Berílio e tungstênio.

Variações: Embutimento de raio, embutimento em forma de moeda, flangeamento.

Aplicações: Componentes de chapa fina que necessitam o embutimento de cabeças de parafusos ou rebites.

Figura 2-45 - Embutimento



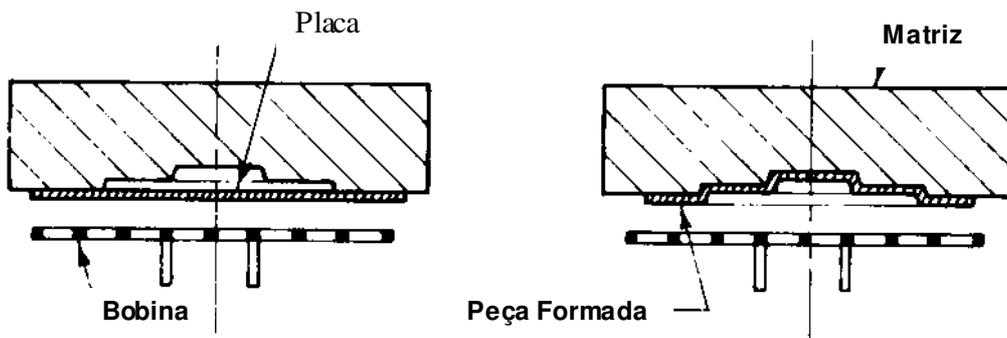
Definição: É o processo empregado para conformar componentes através de matrizes tipo macho-fêmea, usando sucessivos golpes de prensa tipo martelo de gravidade.

Equipamento: Martelos.

Variações: cunhagem, conformação para dimensão.

Aplicações: Componentes com dupla curvatura, contornos suaves e rasos, componentes irregulares e com recessos relativamente profundos.

Figura 2-46 - Conformação por martelo



Definição: O componente é conformado pela aplicação direta de um intenso campo magnético que força a chapa contra a cavidade de uma matriz. O campo magnético é conseguido pela passagem de corrente através de uma bobina.

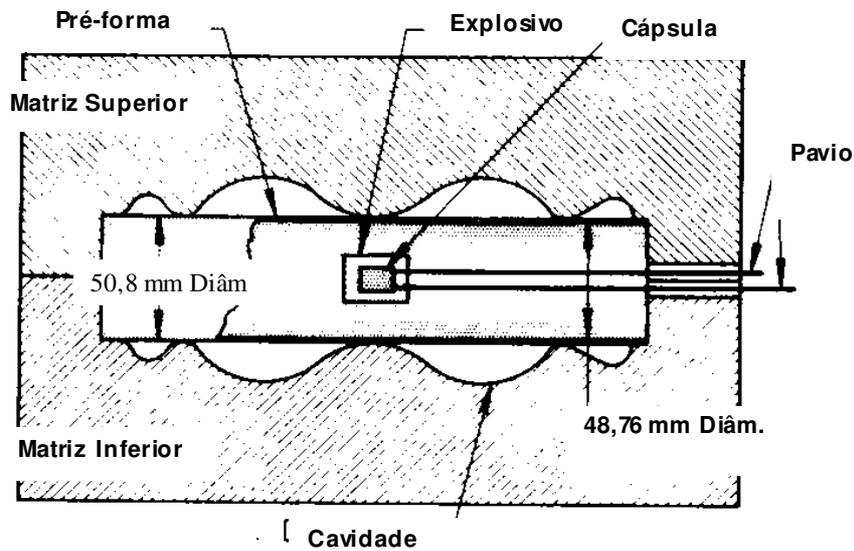
Equipamento: equipamento especial

Materiais: materiais magnéticos.

Variações: conformação por descarga elétrica

Aplicações: Em componentes com recessos rasos, partes tubulares

Figura 2-47 - Conformação eletromagnética



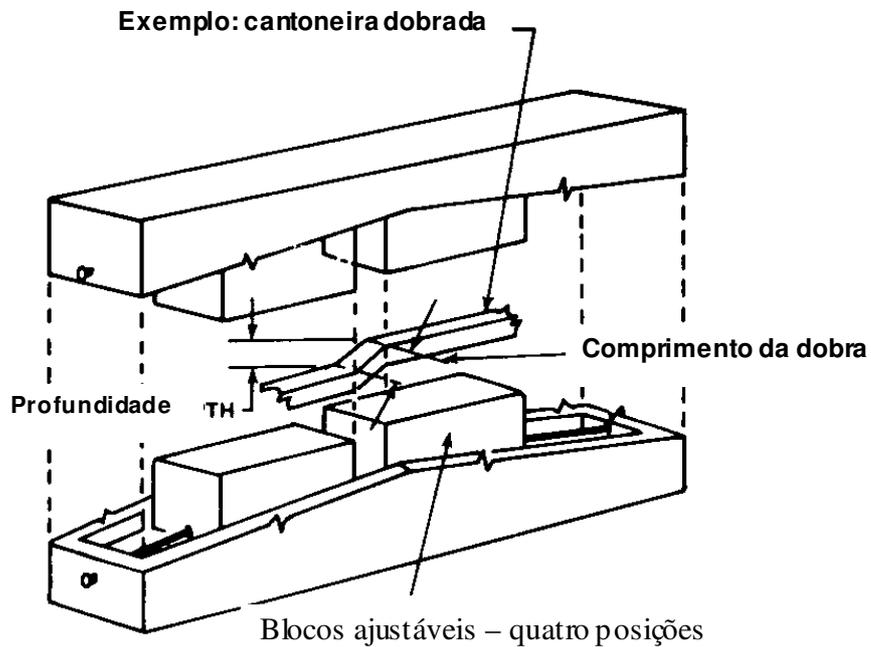
Definição: Neste processo o componente é conformado pela aplicação instantânea de alta pressão obtida pela detonação de uma carga explosiva.

Equipamento: Equipamento especial para conformação por explosão.

Materiais: Ligas de alumínio

Aplicações: Conformação de tubos com finíssima parede que requerem tolerância fechadas.

Figura 2-48 - Conformação por explosão



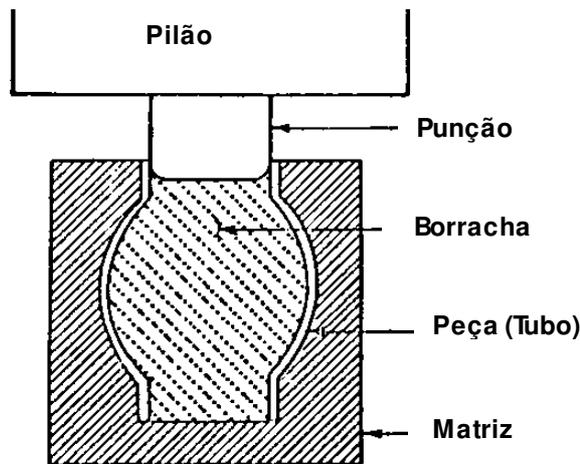
Definição: É o processo para produção de componentes com duas partes paralelas, porém com um degrau entre elas. Isto permite a produção de conexões perfeitas em chapas, placas e perfis estruturais.

Equipamento: prensas hidráulicas ou mecânicas

Materiais: Aços carbono ou ligados, ligas de titânio, superligas de ferro, níquel e cobalto, ligas de molibdênio, nióbio, berílio e tungstênio.

Aplicações: conformação de peças aeroespaciais

Figura 2-49 - Conformação de degraus



| | |
|--------------|--|
| Definição: | Neste processo uma pressão é aplicada no interior de um componente tubular para que este adquira uma forma particular. Esta pressão interna pode ser aplicada através da expansão de um punção fluido ou de borracha |
| Equipamento: | Prensa hidráulica ou mecânica |
| Materiais: | Aços carbono ou ligados, ligas de alumínio. |
| Variações: | conformação de matriz, conformação livre, expansão por abaulamento, expansão por expansão por esferas de aço, expansão por fluido, por explosão, por magneto. |
| Aplicação: | Contornos de tubos ou cápsulas |

Figura 2-50 - Abaulamento de tubos

REFERÊNCIAS

- 2-1. Altan, T., Lahoti, G. D., and Nagpal, V., "Systems Approach in Massive Forming and Application to Modeling of Forging Processes", J. Applied Metalworking, ASM, Vol 1, No. 1, p 29.
- 2-2. Metals Handbook, Eighth Edition, Vol 1 (Properties and Selection of Metals) and Vol 4 (Forming), American Society for Metals, Metals Park, OH.
- 2-3. "Metal-Forming Techniques", Technology Utilization Report, NASA SP-5017, National Aeronautics and Space Administration, Washington, DC, May 1965.
- 2-4. Dictionary of Production Engineering, Vol 1 (Forging and Drop Forging), Vol 3 (Sheet Metal Forming) and Vol 5 (Cold Extrusion and Upsetting), International Institution for Production Engineering, Verlag W. Girardet, Essen.
- 2-5. Henning, H. J., and Strohecker, D. E., "Shear Forming and Spinning of Metals", Battelle Memorial Institute, Columbus, OH, Final Technical Report on Survey of Current Knowledge of the Deformation Characteristics of Beryllium and Refractory Metals and Superalloys (Feb 10, 1966), Contract No. 65-02590 for the Bureau of Naval Weapons, Code RRMA-24 (RSIC 1782).
- 2-6. "Cold Roll Forming - Theory and Application", Bulletin 709/872, The Yoder Company, Cleveland, OH.
- 2-7. "Computations for Metalworking and Presses", E. W. Bliss Company, Press Div., Hastings, MI.
- 2-8. Deformation Processing of Stainless Steels", D. E. Strohecker *et al*, NASA Technical Memorandum NASA TMX-53569, Oct 1966.
- 2-9. "Ultrasonic Activation Aids Tube Production", Tooling and Production, Vol 32, No. 2, May 1966, p 96.
- 2-10. Altan, T., *et al*, Forging Equipment, Materials and Practices, MCIC-HB-03, Metals and Ceramics Information Center, Battelle Columbus Laboratories, Columbus, OH, 1973.
- 2-11. Lahoti, G. D., and Altan, T., "Design of Dies for Radial Forging of Rods and Tubes", Technical Paper MF76-390, Society of Manufacturing Engineers, Dearborn, MI.
- 2-12. Richardson, B. D., Fiorentino, R. J., and Sabroff, A. M., "Comparison of Hydrostatic and Conventional Methods of Extrusion and Drawing", Technical Paper MF68-217, American Society of Tool and Manufacturing Engineers, Dearborn, MI.
- 2-13. Aluminum, Vol 3 (Fabrication and Finishing), edited by K. R. Van Horn, American Society for Metals, Metals Park, OH, 1967, pp 81-112.

- 2-14. Byrer, T. G., Design Guide for Use of Structural Shapes in Aircraft Applications, Technical Report AFML-TR-73-211, Sept 1973.
- 2-15. Geleji, A., Forge Equipment Rolling Mills and Accessories, Akademiai Kiado, Budapest, 1967.
- 2-16. Egan, P. F., "Transverse Rolling Solves Many Problems", Metal Forming, April 1967, pp 99-107.
- 2-17. Beyon, R. E., Roll Design and Mill Layout, Association of Iron and Steel Engineers, Pittsburgh, 1956.
- 2-18. Sachs, G., Principles and Methods of Sheet-Metal Fabricating, Reinhold Publishing Corporation, New York.
- 2-19. Wood, W. W., *et al*, Theoretical Formability, Vol I and II, Vought Aeronautics - a division of Chance Vought Corporation, ASD TR 61-191, 1961.
- 2-20. Wood, W. W., Final Report on Sheet-Metal Forming Technology, Vol 1, Chance Vought Corporation, Dallas, Contract No. AF 33(657)-7314, ASD Project No. 7-871, 1963.
- 2-21. Hoischen, H., "Cold Hobbing of Impressions for Forging Dies" (in German), Industrie-Anzeiger, Vol 89, No. 56, July 14, 1967, p 1256.
- 2-22. Lange, K., Lehrbuch der Umformtechnik/Textbook of Forming Technology (in German), Springer-Verlag, Berlin, 1972.

CAPÍTULO 3

DEFORMAÇÃO PLÁSTICA: DEFORMAÇÃO E TAXA DE DEFORMAÇÃO

O objetivo de se aplicar a teoria da plasticidade em conformação dos metais é investigar os mecanismos de deformação plástica nos processos de conformação dos metais. Esta investigação permite a análise e previsão de *(a)* fluxo metálico (velocidade, deformação, taxa de deformação), *(b)* temperaturas e transferência de calor, *(c)* variações locais de resistência do material ou da tensão de escoamento e *(d)* tensões, carga de conformação, pressão e energia. Portanto, os mecanismos de deformação fornecem os meios para determinação de como o metal flui, como a geometria desejada pode ser obtida pela deformação plástica e quais são as propriedades mecânicas esperadas do componente produzido por conformação.

A fim de que se possa chegar à descrição matemática manuseável da deformação do metal, várias simplificações (razoáveis) são assumidas:

- Deformações elásticas são negligenciadas. No entanto, quando necessário, recuperação elástica (por exemplo no caso do efeito de mola em dobramento) e deflexão elástica do ferramental (no caso de conformação de precisão com tolerâncias apertadas) devem ser consideradas.
- O material em deformação é considerado contínuo (aspectos metalúrgicos como grãos, contornos de grão e dislocações não são considerados).
- Dados de testes de tração e compressão uniaxial são correlacionados com tensão de escoamento em condições de tensão multiaxial.
- Anisotropia e efeitos de “Bauschinger” são negligenciados.
- O volume permanece constante.
- O atrito é expresso através de expressões simplificadas tais como lei de Coulomb ou tensão de cisalhamento constante. Isto será discutido em maiores detalhes à frente.

3.1 Deformações locais e campo de velocidades

O deslocamento local de elementos de volume é descrito por um “campo de velocidades”, isto é, velocidades, taxa de deformação e deformação. Para simplificar a análise frequentemente assume-se que o campo de velocidades é independente das propriedades do material. Obviamente, isto não é correto. Se um grande gradiente de deformação ($\dot{\epsilon}$) ou temperatura (θ) estiver presente o material não fluirá exatamente da mesma forma que outro estritamente homogêneo fluiria. As porções mais moles - onde, por exemplo, a temperatura é maior do que em outras partes da zona de deformação - fluirão mais facilmente do que o restante do material na zona de deformação.

Num estado de fluxo estável (cinamaticamente), o campo de velocidades permanece imutável, como no caso do processo de extrusão (Figura 3-1(b)); num estado de fluxo não estável, o campo de velocidades muda continuamente com o tempo, como no caso de forjamento (Figura 3-1(a)).

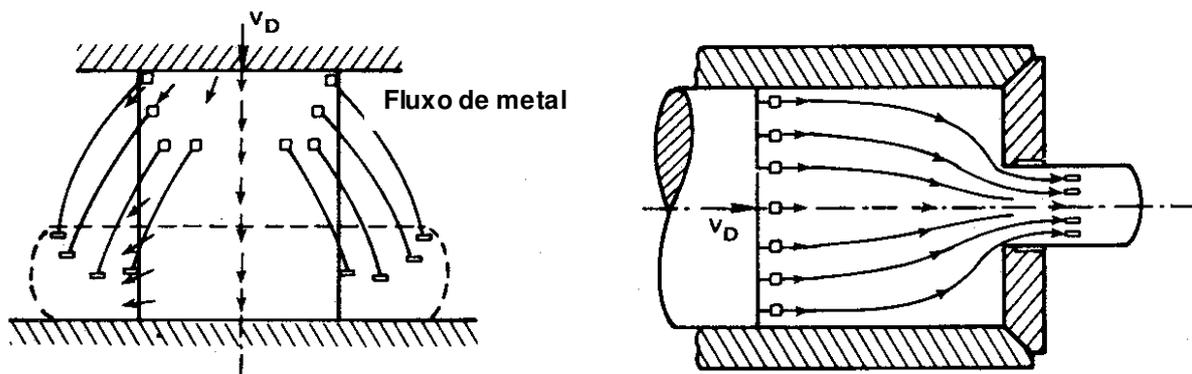


Figura 3.1 - Fluxo de metal em certos processos de conformação. (a) Recalque num estado não estável; (b) Extrusão num estado estável⁽³⁻¹⁾.

3.2 Deformação

A fim de que se possa investigar o fluxo de metal quantitativamente, é necessário definir a deformação, taxa de deformação e velocidades (ou deslocamento por unidade de tempo). A Figura 3.2 ilustra a deformação de um bloco retangular infinitesimal, *abcd*, em um paralelogramo, *a'b'c'd'*, após uma pequena quantidade de deformação plástica. Embora esta ilustração seja em duas dimensões, os mesmos princípios se aplicam a casos tridimensionais ^(3-1, 3-2). As coordenadas de um ponto são inicialmente *x* e *y* (e *z* em três dimensões). Após uma pequena deformação, o mesmo ponto adquire as coordenadas *x'* e *y'* (e *z'* em três dimensões).

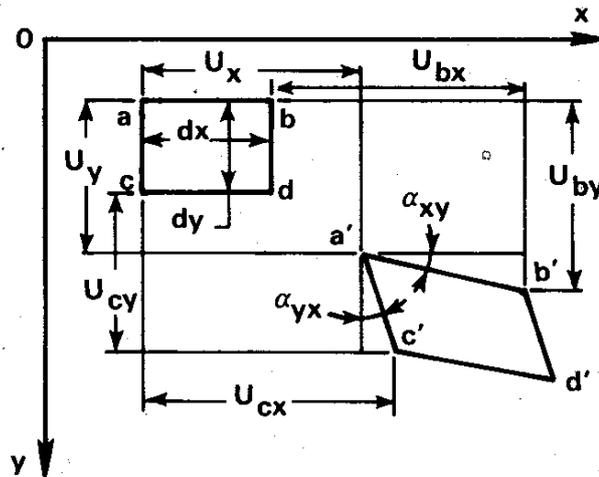


Figura 3.2 - Deslocamentos no plano x-y.

Desprezando-se os componentes de ordem superior pode-se determinar a magnitude do deslocamento do ponto *b*, *u_{bx}*, como função do deslocamento do ponto *a*, *u_x*, sobre a variação da função *u_x* sobre o comprimento *dx*, ou seja:

$$u_{bx} = u_x + \frac{\partial u_x}{\partial x} dx \tag{3.1}$$

Note que *u_x* depende também de *y* e *z*.

O alongamento relativo do comprimento *ab* (o qual é originalmente igual a *dx*), ou a deformação relativa na direção *x*, *ε_x*, torna-se:

$$\epsilon_x = (u_{bx} - u_x) / dx \text{ ou então} \tag{3.2a}$$

$$\epsilon_x = \left(u_x + \frac{\partial u_x}{\partial x} dx - u_x \right) / dx = \frac{\partial u_x}{\partial x}$$

similarmente, nas direções *y* e *z*:

$$\epsilon_y = \frac{\partial u_y}{\partial y}; \epsilon_z = \frac{\partial u_z}{\partial z} \tag{3.2b}$$

A variação angular devido à pequena deformação considerada na Figura 3.2 é infinitesimalmente pequena. Portanto, *tana_{xy}* = *α_{xy}* e *tana_{yx}* = *α_{yx}*. Desta forma tem-se:

$$\alpha_{xy} = (u_{by} - u_y) / (u_{bx} + dx - u_x) \tag{3.3}$$

A expressão para *u_{bx}* dada pela Equação (3.1), e aquela par *u_{by}* pode ser obtida similarmente, como:

$$u_{by} = u_y + \frac{\partial u_y}{\partial y} dy \tag{3.4}$$

Usando as Equações (3.1) e (3.4), e considerando-se que $\frac{\partial u_x}{\partial x} = \epsilon_x$ é consideravelmente menor que 1, a Equação (3.3) leva a:

$$\alpha_{xy} = \frac{\partial u_y}{\partial x} \tag{3.5a}$$

e similamente:

$$\alpha_{yx} = \frac{\partial u_x}{\partial y} \tag{3.5b}$$

Portanto, a deformação angular total no plano x-y, ou plano de cisalhamento γ_{xy} é:

$$\gamma_{xy} = \alpha_{xy} + \alpha_{yx} = \frac{\partial u_y}{\partial x} + \frac{\partial u_x}{\partial y} \tag{3.6a}$$

Similamente:

$$\gamma_{yz} = \frac{\partial u_y}{\partial z} + \frac{\partial u_z}{\partial y} \tag{3.6b}$$

e

$$\gamma_{zx} = \frac{\partial u_z}{\partial x} + \frac{\partial u_x}{\partial z} \tag{3.6c}$$

3.3 Velocidades e taxa de deformação

A distribuição das componentes de velocidade (v_x, v_y e v_z) dentro do material em deformação, descreve o fluxo de metal neste material. A velocidade é a variação o deslocamento no tempo, ou, nas direções x, y e z ^(3.2, 3.3):

$$v_x = \frac{\partial u_x}{\partial t}; v_y = \frac{\partial u_y}{\partial t}; v_z = \frac{\partial u_z}{\partial t} \tag{3.7}$$

A taxa de deformação relativa, isto é, a variação da deformação relativa com o tempo e:

$$\dot{\epsilon}_x = \frac{\partial \epsilon_x}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial t} \frac{\partial (u_x)}{\partial x} = \frac{\partial}{\partial x} \frac{\partial (u_x)}{\partial t} = \frac{\partial v_x}{\partial x}$$

Similamente:

$$\dot{\epsilon}_x = \frac{\partial v_x}{\partial x}; \dot{\epsilon}_y = \frac{\partial v_y}{\partial y}; \dot{\epsilon}_z = \frac{\partial v_z}{\partial z} \tag{3.8a}$$

$$\dot{\gamma}_{xy} = \frac{\partial v_x}{\partial y} + \frac{\partial v_y}{\partial x} \tag{3.8b}$$

$$\dot{\gamma}_{yz} = \frac{\partial v_y}{\partial z} + \frac{\partial v_z}{\partial y} \tag{3.8c}$$

$$\dot{\gamma}_{zx} = \frac{\partial v_x}{\partial z} + \frac{\partial v_z}{\partial x} \tag{3.8d}$$

O estado de deformação na deformação plástica de metais é completamente descrito pelos deslocamentos u , velocidades v , deformações ϵ e taxas de deformações $\dot{\epsilon}$ (num sistema de coordenadas x, y e z). É possível, no entanto, expressar os mesmos valores num outro sistema de coordenadas x', y', z' se o ângulo de rotação entre ambos for conhecido. Portanto, em cada pequeno elemento dentro de um corpo sendo deformado plasticamente, é possível orientar o sistema de coordenadas de modo que o elemento não esteja submetido a cisalhamento, mas somente à compressão ou cisalhamento. Neste caso, as deformações angulares $\gamma_{xy}, \gamma_{yz}, \gamma_{zx}$ serão todas iguais a zero e o elemento se deforma ao longo dos eixos principais de deformação.

Em testes de tração e compressão uniaxial (sem estrição ou flambagem), deformação é também nas direções principais.

A hipótese de volume constante, para facilitar a análise, negligencia a deformação relativa da fase elástica. Esta hipótese é razoável na maioria dos processos de conformação onde a quantidade de deformação plástica é muito maior do que a elástica. Esta hipótese pode ser expressa também para deformações ao longo dos eixos principais, como segue:

$$\epsilon_x + \epsilon_y + \epsilon_z = 0 \tag{3.9}$$

e

$$\dot{\epsilon}_x + \dot{\epsilon}_y + \dot{\epsilon}_z = 0 \tag{3.10}$$

3.4 Deformação homogênea

Considere o forjamento de recalque de um bloco em forma de paralelepípedo “sem atrito” com mostrado na Figura 3.3.

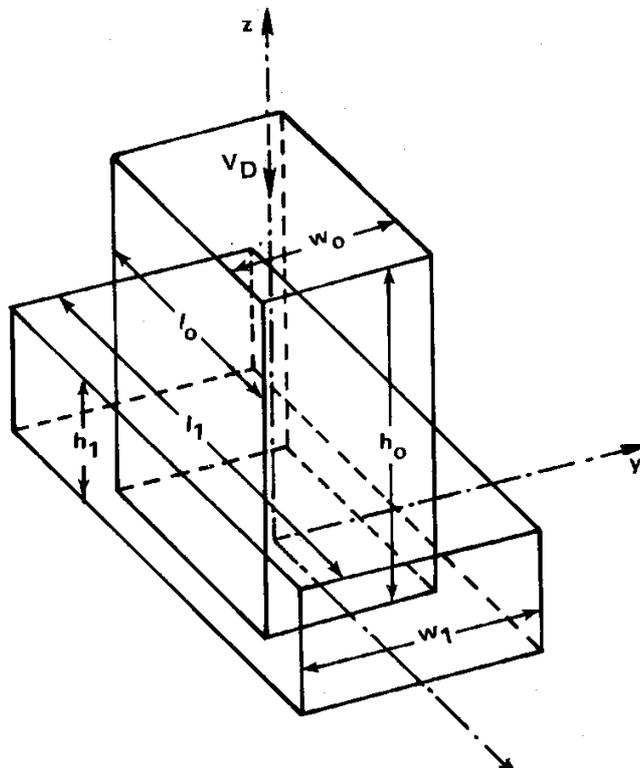


Figura 3.3 - Deformação homogênea no recalque de um bloco na forma de um paralelepípedo sem atrito.

A parte superior do estampo move-se para baixo à velocidade V_D . Os eixos de coordenadas x, y, z tem sua origem no centro da área retangular da parte inferior do bloco. As dimensões iniciais e finais do bloco são designadas por θ e I , respectivamente. A altura instantânea do bloco durante a deformação é h . As componentes de velocidade v_x, v_y, v_z , descrevem o movimento de cada partícula dentro do bloco em deformação, podem ser expressas como função linear das coordenadas x, y e z , como segue:

$$v_x = \frac{V_{Dx}}{2h}; v_y = \frac{V_{Dy}}{2h}; v_z = -\frac{V_{Dz}}{2h} \tag{3.11}$$

A fim de demonstrar que o campo de velocidades descrito pela Equação (3.11) é pelo menos “aceitável”, é necessário provar que estas velocidades satisfazem (a) a hipótese de volume constante e (b) as condições da fronteira ^(3, 4).

As condições de contorno podem ser verificadas considerando-se a forma inicial do bloco antes da deformação (Figura 3.3). Na origem das coordenadas, todas as velocidades devem ser iguais a zero. Esta condição é satisfeita porque na origem, para $x = y = z = 0$, tem-se, da Equação (3.11) $v_x = v_y = v_z = 0$. Na fronteira:

$$\text{Em } x = l_0/2; \text{ velocidade na direção } x: v_{x0} = V_D l_0 / 4h_0 \tag{3.12a}$$

Em $y = w_0/2$; velocidade na direção y : $v_{y0} = V_D w_0 / 4h_0$
 (3.12b)

Em $z = h_0$; velocidade na direção z : $v_{z0} = -V_D$ (3.12c)

Pode-se mostrar facilmente que a hipótese de volume constante é também satisfeita. No início da deformação, a taxa de volume ou o volume deslocado pelo movimento da parte superior do estampo, por unidade de tempo é:

Taxa de volume = $V_D w_0 h_0$ (3.13)

O volume movido para os lados do bloco, por unidade de tempo é:

$2v_{x0} h_0 w_0 + 2v_{y0} l_0 h_0$ (3.14)

Usando os valores de v_{x0} e v_{y0} dados pelas Equações (3.12a) e (3.12b), a Equação (3.14) fornece:

Taxa de volume = $2h_0(w_0 V_D l_0 + l_0 V_D w_0) / 4h_0$
 (3.15a)

ou

Taxa de volume = $V_D w_0 h_0$ (3.15b)

As quantidades dadas pelas Equações (3.13) e (3.15) são iguais, isto é, a hipótese de volume constante está satisfeita.

A taxa de deformação relativa pode, neste ponto, ser obtida das componentes de velocidade dadas pela Equação (3.11):

$\dot{\epsilon}_x = \frac{\partial v_x}{\partial x} = V_D / 2h$ (3.16a)

Similarmente:

$\dot{\epsilon}_y = V_D / 2h$; $\dot{\epsilon}_z = -V_D / h$ (3.16b)

Pode-se facilmente notar que:

$\dot{\gamma}_{xy} = \dot{\gamma}_{xz} = \dot{\gamma}_{yz} = 0$

Numa deformação homogênea, as taxas de deformação angulares serão iguais a zero. A deformação relativa pode ser obtida pela integração no tempo, t . Na direção da altura:

$\epsilon_z = \int_{t_0}^{t_1} \dot{\epsilon}_z dt = \int_{t_0}^{t_1} -\frac{V_D}{h} dt$ (3.17)

para pequenos deslocamentos, $dh = -V_D dt$. Desta forma, a Equação (3.17) leva a:

$\epsilon_h = \epsilon_z = \int_{h_0}^{h_1} -\frac{dh}{h} dt = \ln\left(\frac{h_1}{h_0}\right)$ (3.18a)

As outras deformações podem ser obtidas similarmente:

$\epsilon_l = \epsilon_x = \ln\left(\frac{l_1}{l_0}\right)$; $\epsilon_b = \epsilon_y = \ln\left(\frac{w_1}{w_0}\right)$ (3.18b)

A condição de volume constante, em termos de deformação, pode ser verificada de:

$V = h_0 w_0 l_0 = h_1 w_1 l_1 \rightarrow \frac{h_0 w_0 l_0}{h_1 w_1 l_1} = 1$

ou tomando os logaritmos naturais:

$\ln\left(\frac{h_0}{h_1}\right) + \ln\left(\frac{w_0}{w_1}\right) + \ln\left(\frac{l_0}{l_1}\right) = \epsilon_h + \epsilon_b + \epsilon_l = 0$ (3.19)

3.5 Deformação plástica (verdadeira) e deformação em engenharia

O resultado da Equação (3.18) pode ser obtido através de caminho diferente ^(3, 5). Na teoria da resistência dos materiais - durante um alongamento uniforme na tração, por exemplo - a deformação infinitesimal em engenharia, de , é considerada com relação ao comprimento inicial, l_0 , ou seja:

$$de = \frac{dl}{l_0} \rightarrow e = \int_{l_0}^{l_1} \frac{dl}{l_0} = \frac{l_1 - l_0}{l_0} \tag{3.20}$$

Na teoria da conformação plástica dos metais, a condição inicial não pode ser usada como uma referência; portanto, a mudança em comprimento deve ser relacionada com comprimento instantâneo, ou seja:

$$d\epsilon = \frac{dl}{l} \rightarrow \epsilon = \int_{l_0}^{l_1} \frac{dl}{l} = \ln\left(\frac{l_1}{l_0}\right) \tag{3.21}$$

As Equações (3.20) e (3.21) fornecem:

$$\epsilon = \ln\left(\frac{l_1}{l_0}\right) = \ln(e + 1) \tag{3.22}$$

A relação entre ϵ e e pode ser ilustrada considerando-se o seguinte exemplo de deformação uniforme, onde uma barra é uniformemente (ou homoganeamente) comprimida para metade de seu comprimento original ou alongada para duas vezes seu comprimento original:

| | Compressão para $l_1 = l_0/2$ | Tração para $l_1 = 2 l_0$ |
|--|----------------------------------|------------------------------|
| $\epsilon = \ln\left(\frac{l_1}{l_0}\right)$ | -0.693 | +0.693 |
| $e = \frac{l_1 - l_0}{l_0}$ | -0.5 | +1 |

REFERÊNCIAS

3-1. Lange, K. (editor), Study Book of Forming Technology (in German), Vol 1 (Fundamentals), Springer-Verlag, New York, 1972.

3-2. Backofen, W. A., "Deformation Processing", Addison-Wesley Publishing Company, 1972.

3-3. Rowe, G. W., "Principles of Industrial Metalworking Processes", Edward Arnold Publishers, London, 1977.

3-4. Johnson, W., and Mellor, P. B., "Engineering Plasticity", Van Nostrand Reinhold Co, London, 1975.

3-5. Thomsen, E. G., Yang, C. T., and Kobayashi, S., "Mechanics of Plastic Deformation in Metal Processing", The Macmillan Company, New York, 1965.

CAPÍTULO 4

DEFORMAÇÃO PLÁSTICA: ESTADO SIMPLES DE TENSÃO

Para entender as tensões e as forças envolvidas nos processos de conformação é útil (a) familiarizar-se com o conceito de tensão de fluência (ou de escoamento), (b) começar com o estudo de deformação plástica sob condições onde existe um estado de tensão simples.

4.1 Tensão de escoamento em Metais

Para estudar o comportamento de um metal em deformação plástica, é apropriado considerar condições de deformação uniforme ou homogênea. A tensão de fluência de um metal sob condições uniaxiais, como função da deformação média, $\bar{\epsilon}$, taxa de deformação média, $\dot{\bar{\epsilon}}$, e temperatura, pode ser considerada como o “tensão de escoamento”. O metal começa a “fluir” ou deformar-se plasticamente quando a tensão aplicada (em tração uniaxial sem estricção ou em compressão uniaxial sem flambar) atinge o valor da “tensão de escoamento” ou “tensão de fluência”.

A tensão de escoamento, $\bar{\sigma}$, é importante porque no processo de conformação dos metais as cargas e tensões de conformação dependem (a) da geometria do componente, (b) do atrito e (c) da tensão de escoamento do material sendo deformado. A tensão de escoamento de um metal é influenciada por:

- Fatores não relacionados com o processo de deformação, tais como, composição química, estrutura metalúrgica, fases, tamanho de grão, segregação e história anterior de tratamentos térmicos.
- Fatores explicitamente relacionados com ao processo de deformação, tais como temperatura de deformação, θ , grau de deformação ou deformação, $\bar{\epsilon}$, e taxa de deformação, $\dot{\bar{\epsilon}}$.

Portanto, a tensão de escoamento, $\bar{\sigma}$, pode ser expressa como função da temperatura, θ , deformação média, $\bar{\epsilon}$, e taxa de deformação, $\dot{\bar{\epsilon}}$ e microestrutura, S :

$$\bar{\sigma} = f(\theta, \bar{\epsilon}, \dot{\bar{\epsilon}}, S) \quad (4.1)$$

Na conformação a quente de metais em temperaturas acima da recristalização, a influência da deformação na tensão de escoamento é insignificante, e a influência da taxa de deformação se torna crescentemente importante. Ao contrário, na temperatura ambiente (isto é, conformação a frio), o efeito da taxa de deformação na tensão de escoamento é insignificante, e o efeito da deformação na tensão de escoamento (isto é, o encruamento) é o mais significativo. O grau de dependência da tensão de escoamento na temperatura varia consideravelmente entre diferentes materiais. Portanto, variações de temperatura na operação de forjamento podem ter significantes efeitos diferentes nas cargas requeridas e no fluxo do metal, para diferentes materiais. Por exemplo, uma queda de aproximadamente 55°C dentro da faixa de temperatura de conformação à quente (de 925°C para 870°C) resultaria em 41% de aumento na tensão de escoamento para a liga de titânio 8Al-1Mo-1V. O aumento na tensão de escoamento que resultaria da mesma queda de temperatura de 55°C dentro da faixa de conformação à quente (1205°C para 1150°C), seria de apenas 15% para o aço AISI 4340⁽⁴⁻¹⁾.

Para ser útil na análise de conformação, a tensão de escoamento de metais deve ser determinado experimentalmente para as condições de $\bar{\epsilon}$, e θ que existem nos processos de conformação. Os métodos mais comuns usados para se obter os dados de tensão de escoamento são os testes de tração, compressão uniforme e torção.

4.2 Teste de tração

O teste de tração é comumente empregado para a determinação de propriedades mecânicas dos metais. Contudo, as propriedades do material determinadas neste teste são basicamente úteis para o projeto de componentes e não para a produção de componentes por processo de conformação. A principal razão para isto é que dados de tração, isto é, dados de tensão de escoamento, obtidos no ensaio de tração, são válidos somente para uma relativamente estreita faixa de deformação plástica. Dados de tensão de escoamento, contudo, devem ser válidos para uma estreita faixa de deformação relativa, conforme as encontradas nos processos de conformação, de modo que estes dados possam ser úteis na análise de conformação dos metais.

Dois métodos de representação dos dados de tração são ilustrados na Figura 4.1^(4.2).

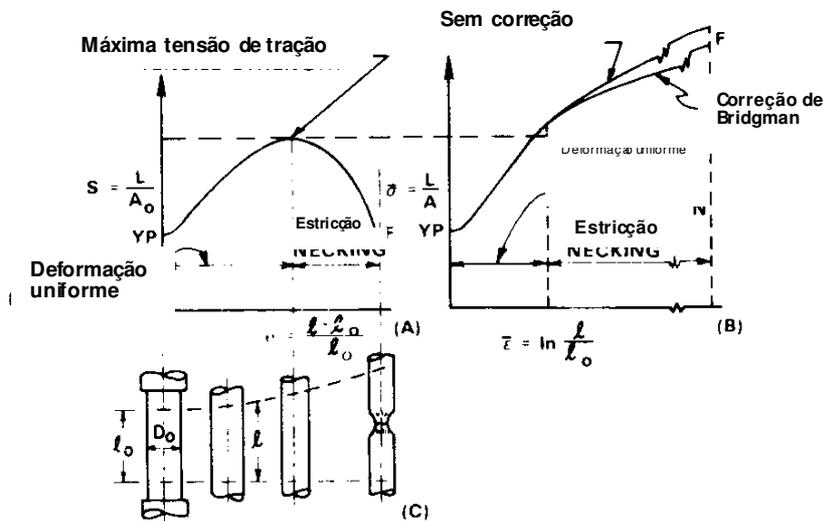


Figura 4.1 - Representação de dados num teste de tração: (A) curva de tensão-deformação de engenharia, (B) Curva tensão-deformação verdadeira e (C) Esquema de alteração dimensional no corpo de provas durante o teste⁽⁴⁻²⁾.

No diagrama clássico tensão-deformação de engenharia (Figura 4.1a) a tensão é obtida dividindo-se a carga instantânea, L , pela área da seção transversal inicial do corpo de prova, A_0 . Estatensão é então marcada no gráfico contra a deformação de engenharia, $\xi = (l - l_0)/l_0$. Durante a deformação o corpo de provas se alonga inicialmente de forma uniforme. Quando a carga atinge seu máximo valor, estrição começa a ocorrer (formação de pescoço) e a condição de tensão uniforme deixa de existir. A deformação é então concentrada somente na região do pescoço, enquanto o restante do corpo de provas permanece rígido. A Figura 4.1b ilustra a verdadeira representação do diagrama tensão-deformação verdadeira do mesmo conjunto de dados de tração. Neste caso, antes da redução de área, o seguinte relacionamento é válido:

$$\begin{aligned} \bar{\sigma} &= \text{Verdadeira tensão (ou Tensão de Escoamento)} \\ L/A &= \text{Carga instantânea/área instantânea} \\ \sigma &= L/A \end{aligned} \tag{4.2}$$

e

$$\bar{\epsilon} = \text{Deformação verdadeira} = \ln(l/l_0) = \ln(A_0/A) \tag{4.3}$$

A carga instantânea em termos de tensão é dada por $L = A\bar{\sigma}$. O critério para a estrição pode ser formulado como a condição em que L seja máximo ou seja⁽⁴⁻²⁾:

$$\frac{dL}{d\bar{\epsilon}} = 0 \tag{4.4}$$

Próximo, mas ligeiramente antes de atingir a carga máxima, a condição de deformação uniforme, isto é, Equações (4.2) e (4.3), são válidas⁽⁴⁻²⁾. Da Equação (4.3) tem-se:

$$\begin{aligned} A &= A_0 e^{-\bar{\epsilon}}, \text{ ou} \\ L &= A\bar{\sigma} = A_0\bar{\sigma} e^{-\bar{\epsilon}} \end{aligned} \tag{4.5}$$

Combinando-se as Equações (4.4) e (4.5) chega-se a:

$$\frac{dL}{d\bar{\epsilon}} = 0 = A_0 \left(\frac{d\bar{\sigma}}{d\bar{\epsilon}} e^{-\bar{\epsilon}} - \bar{\sigma} e^{-\bar{\epsilon}} \right) \tag{4.6}$$

ou ainda

$$\frac{d\bar{\sigma}}{d\bar{\epsilon}} = \bar{\sigma} \tag{4.7}$$

Como será discutido mais adiante no texto, a curva de tensão de escoamento, $\bar{\sigma} \times \bar{\epsilon}$, obtida à temperatura ambiente, pode ser expressa na forma de uma equação exponencial:

$$\bar{\sigma} = K \bar{\epsilon}^n \tag{4.8}$$

onde K e n são constantes.

Combinando-se as Equações (4.7) e (4.8) tem-se:

$$\frac{d\bar{\sigma}}{d\bar{\epsilon}} = K \bar{\epsilon}^{n-1} = \frac{\bar{\sigma}}{\bar{\epsilon}} = \frac{\bar{\sigma}}{1} \tag{4.9}$$

ou

$$\bar{\epsilon} = n \tag{4.10}$$

Esta condição é mostrada esquematicamente na Figura 4.2.

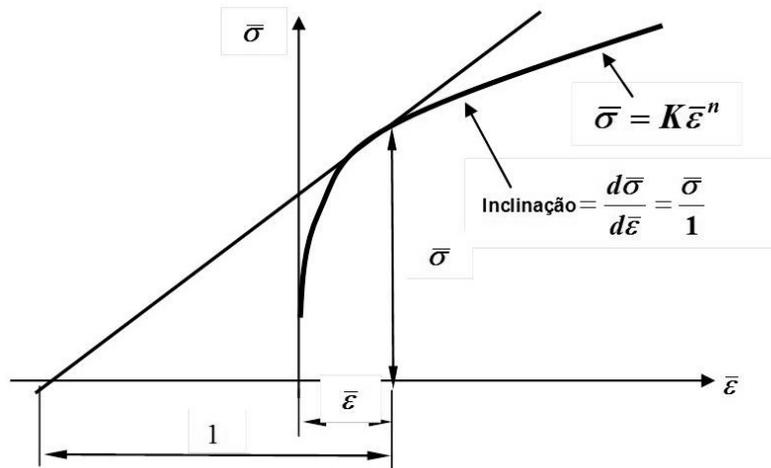


Figura 4.2 - Representação esquemática da condição de estrição em tensão simples.

Desta figura e da equação 4.10 é evidente em baixas temperaturas, onde a equação 4.8 é válida, um material com alto valor de n , ou coeficiente de encruamento, tem alto grau de conformabilidade, isto é, suporta uma maior quantidade de deformação uniforme em tração do que outro material com baixo n . Deve-se, no entanto, notar que esta conclusão não é correta para materiais e condições onde a tensão de escoamento não pode ser representado pela equação 4.8.

O cálculo da tensão verdadeira depois da estrição (Figura 4.1b) requer uma correção porque um estado tri-axial de tensões é induzido. Tal correção, obtida por Bridgeman, é dada pela equação:

$$\sigma_s = \bar{\sigma} = \frac{L}{\pi r^2} \left[\left(1 + \frac{2R}{r} \right) \ln \left(1 + \frac{r}{2R} \right) \right]^{-1} \tag{4.11}$$

Os valores de R e r estão definidos na Figura 4.3^(4.2). Pode-se ver claramente que, para estimativa da equação 4.11, os valores de r e R devem ser medidos continuamente durante o teste. Isto torna-se trabalhoso e propício a erros. Portanto, outros testes, os quais fornecem dados para condições de altas deformações mais elevadas nos testes de tração, são usados em conformação dos metais.

4.3 Teste de compressão

O teste de compressão é empregado para se determinar dados de tensão de escoamento (relação entre tensão verdadeira e deformação verdadeira) para metais em diversas temperaturas e taxas de deformação^(4.1). Neste teste as placas planas do estampo e a amostra cilíndrica são mantidos à mesma temperatura, de modo que o resfriamento imposto pelo estampo, e sua influência no fluxo do metal, é evitado.

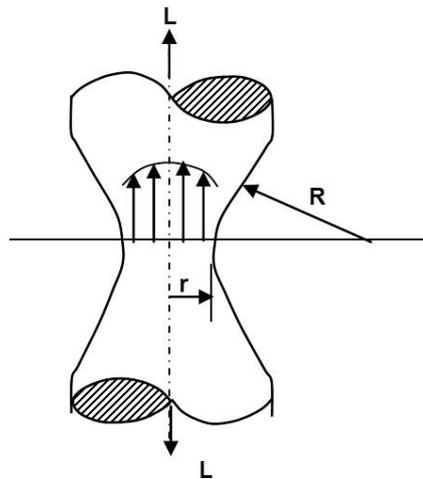


Figura 4.3 - Distribuição axial de tensão na porção que sofre estricção num corpo-de-provas tracionado

Para ser aplicado sem correções ou erros, as amostras cilíndricas devem ser recalçadas sem que sofram o abaulamento, isto é, o estado uniforme de tensões deve ser mantido, como mostrado na Figura 4.4. O abaulamento é evitado através do emprego de lubrificação adequada, isto é, Teflon ou óleo lubrificante à temperatura ambiente e, para altas temperaturas de trabalho, grafite dissolvida em óleo para ligas de alumínio e vidro moído para aços, titânio e aços resistentes a altas temperaturas ^(4.3). Partindo-se destes dados a tensão de escoamento é calculada a cada estágio de deformação, ou aumento de deformação.

Similarmente à porção de alongamento uniforme no teste de tração, o seguinte relacionamento é válido para o teste de compressão uniforme:

$$\bar{\epsilon} = \ln\left(\frac{h_0}{h}\right) = \ln\left(\frac{A}{A_0}\right) \tag{4.12}$$

$$\bar{\sigma} = \frac{L}{A} \tag{4.13}$$

$$A = A_0 e^{\bar{\epsilon}} \tag{4.14}$$

$$\dot{\bar{\epsilon}} = \frac{d\bar{\epsilon}}{dt} = \frac{dh}{h dt} = \frac{v}{h} \tag{4.15}$$

onde v é a velocidade instantânea de deformação; h_0 e h a altura inicial e instantânea respectivamente assim como A_0 e A são a área inicial e instantânea respectivamente.

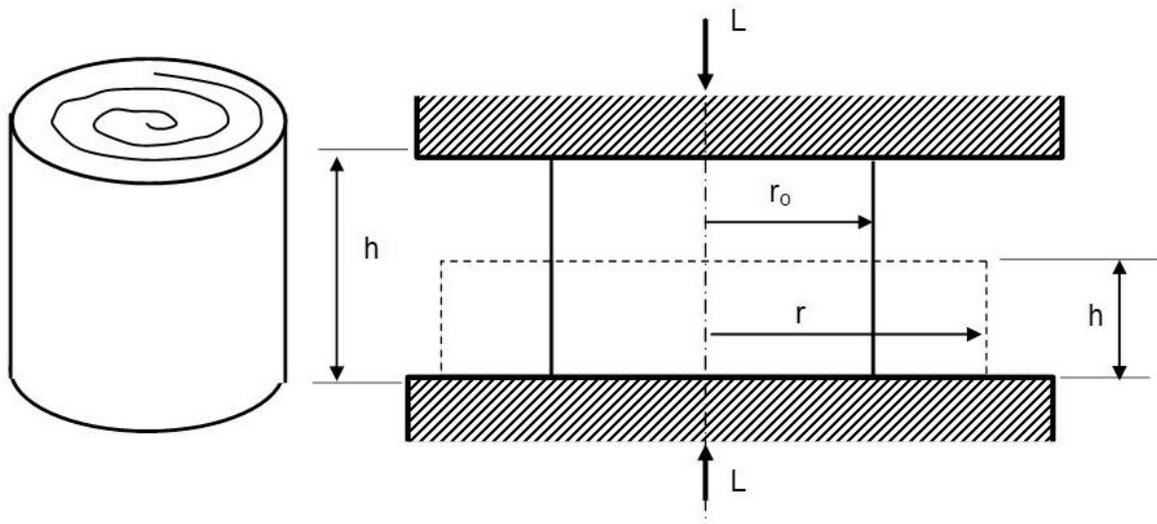


Figura 4.4 - Corpo de provas para teste de compressão. (a) Vista do corpo de provas mostrando os sulcos rasos para lubrificação (b) Forma do corpo de provas antes e depois do teste.

Como discutido anteriormente, os valores de tensão de escoamento determinados a altas deformações nos testes de tração requerem uma correção devido à estrição. Portanto, o teste de compressão os quais podem ser realizados sem o abaulamento, até aproximadamente 50% de redução em altura ($\bar{\epsilon} = 0.693$ ou mais), é largamente empregado para a obtenção dados de tensão de escoamento para aplicações em conformação de metais.

Na temperatura ambiente a tensão de escoamento da maioria dos metais (exceto aqueles contendo chumbo, por exemplo) são ligeiramente dependentes da taxa de deformação. Portanto, qualquer máquina de teste ou prensa pode ser empregada para o teste de compressão, independentemente da velocidade de aplicação da carga. A lubrificação adequada das faces da matriz de teste pode ser alcançada pelo uso de lubrificantes como Teflon, dissulfeto de molibdênio ou óleo de alta viscosidade e também pelos sulcos usinados em ambas as faces do corpo de provas, os quais servem para reter o lubrificante durante a deformação (Figura 4.4). Uma curva típica de carga-deslocamento obtida em teste de compressão uniforme de uma liga de alumínio (Al 1100, recozido) à temperatura ambiente em uma máquina de teste é mostrada na Figura 4.5. Os dados $\bar{\sigma} \times \bar{\epsilon}$ obtidos desta curva estão mostrados na Figura 4.6.

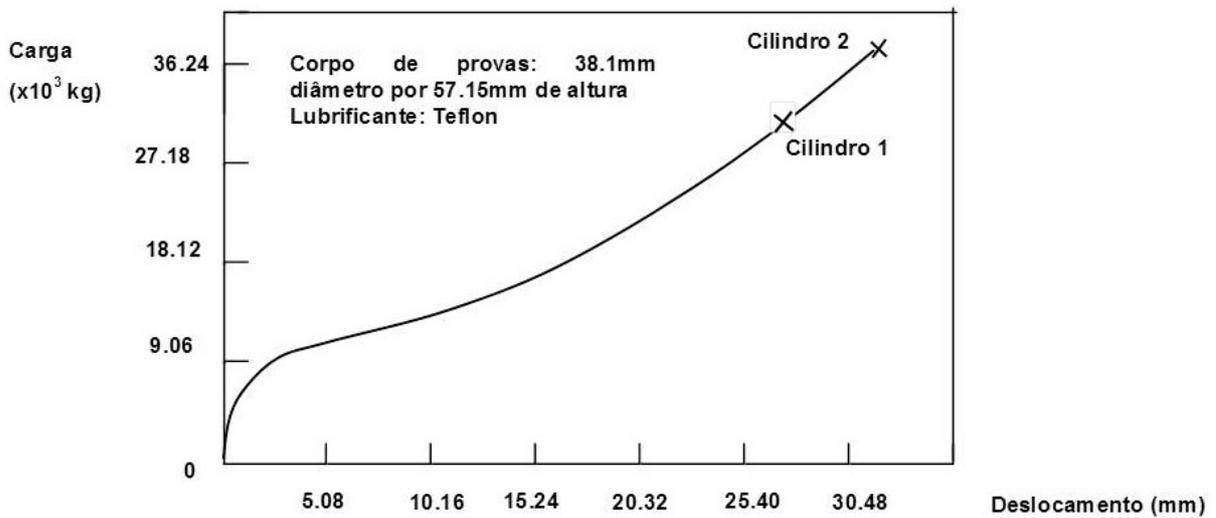
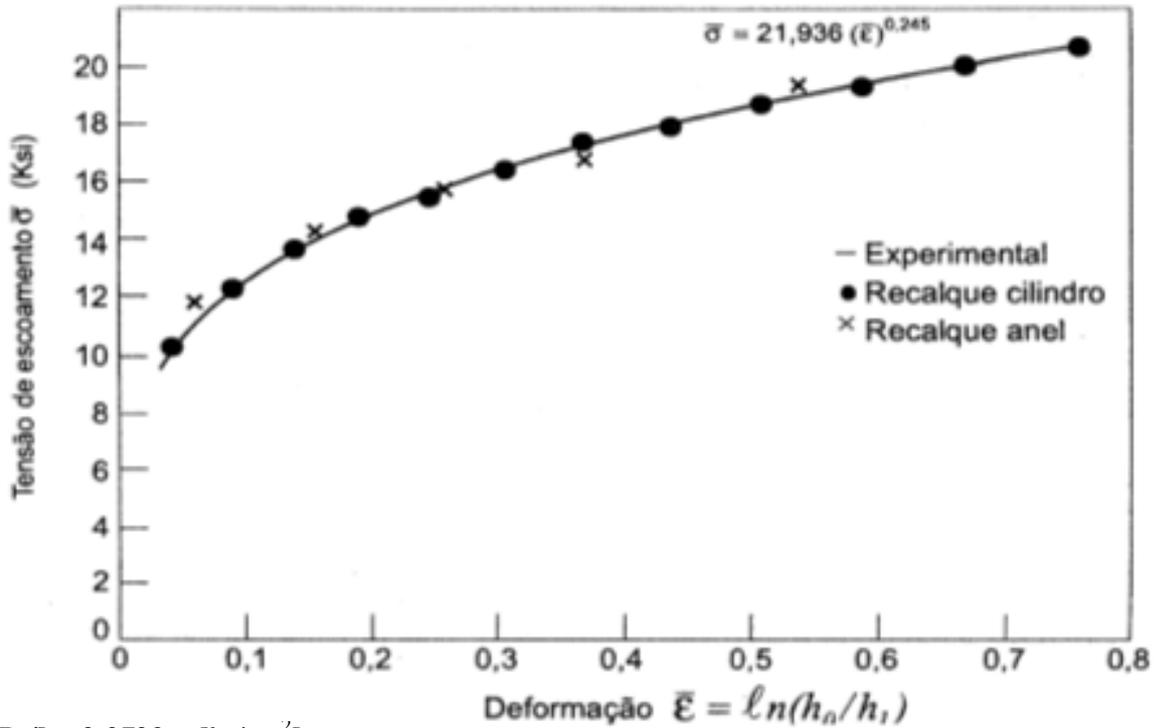


Figura 4.5 - Curva de carga-deslocamento obtida de um teste de recalque uniforme em um cilindro de alumínio Al 1100 recozido.



[Psi] x 0.0703 = [kg/cm²]

Figura 4.6 - Curva de tensão-deformação ($\bar{\sigma}$) para um cilindro de alumínio Al 1100 recozido, obtida do teste de recalque uniforme

Em altas temperaturas de trabalho, isto é, acima da temperatura de recristalização, a tensão de escoamento de quase todos os metais é muito mais dependente da taxa de deformação. Portanto, onde for possível, estes testes de compressão em altas temperaturas são realizados numa máquina que fornece um perfil velocidade-deslocamento de modo que a condição $\dot{\bar{\epsilon}} = \text{velocidade/altura}$ do corpo de provas possa ser mantida durante o teste. Para este propósito existem prensas mecânicas com pilões (cabecotes) ativos chamadas platômetros ou máquinas hidráulicas programáveis⁽⁴⁻⁵⁾. Para manter as condições relativamente isotérmicas e de compressão uniforme, o teste é realizado num forno ou sistema semelhante àquele mostrado na Figura 4.7.

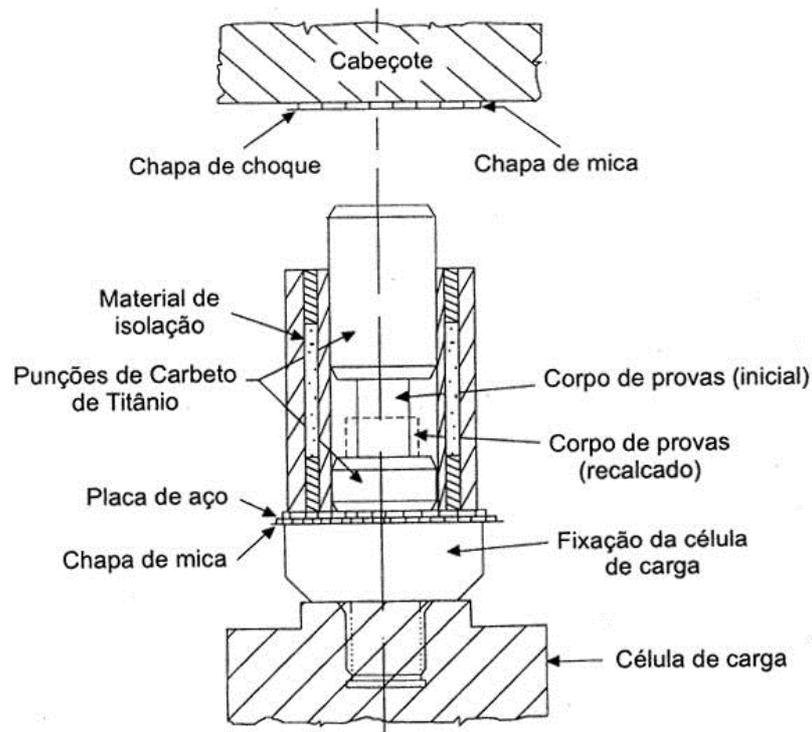


Figura 4.7 - Sistema de fixação empregado no aquecimento e compressão de cilindros e anéis.

O corpo de provas é untado com lubrificante apropriado, por exemplo, óleo grafitado para temperaturas de até 400 °C e vidro moído para temperaturas de até 1200°C. O sistema e o corpo de provas são aquecidos até a temperatura de teste e então este é iniciado. Exemplos de corpos de prova comprimidos à quente estão na Figura 4.8. Exemplos de curvas $\bar{\sigma} \times \bar{\epsilon}$ a altas temperaturas são dados nas Figuras 4.9 e 4.10.

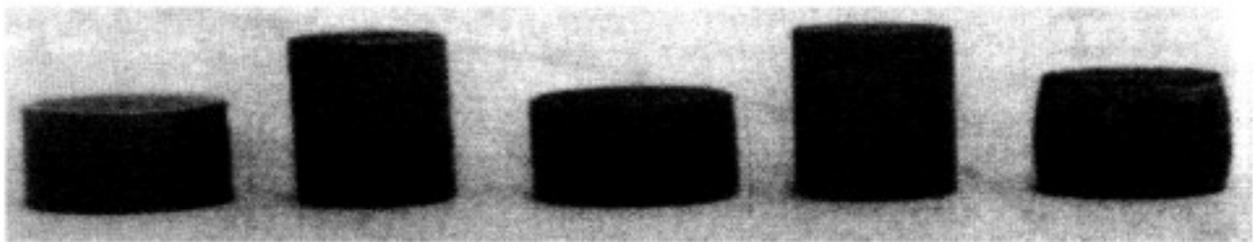


Figura 4.8 - Corpos de prova de compressão uniforme antes e depois da deformação (da esquerda para a direita: AISI 1018, INCO 718, Ti-6Al-4V).

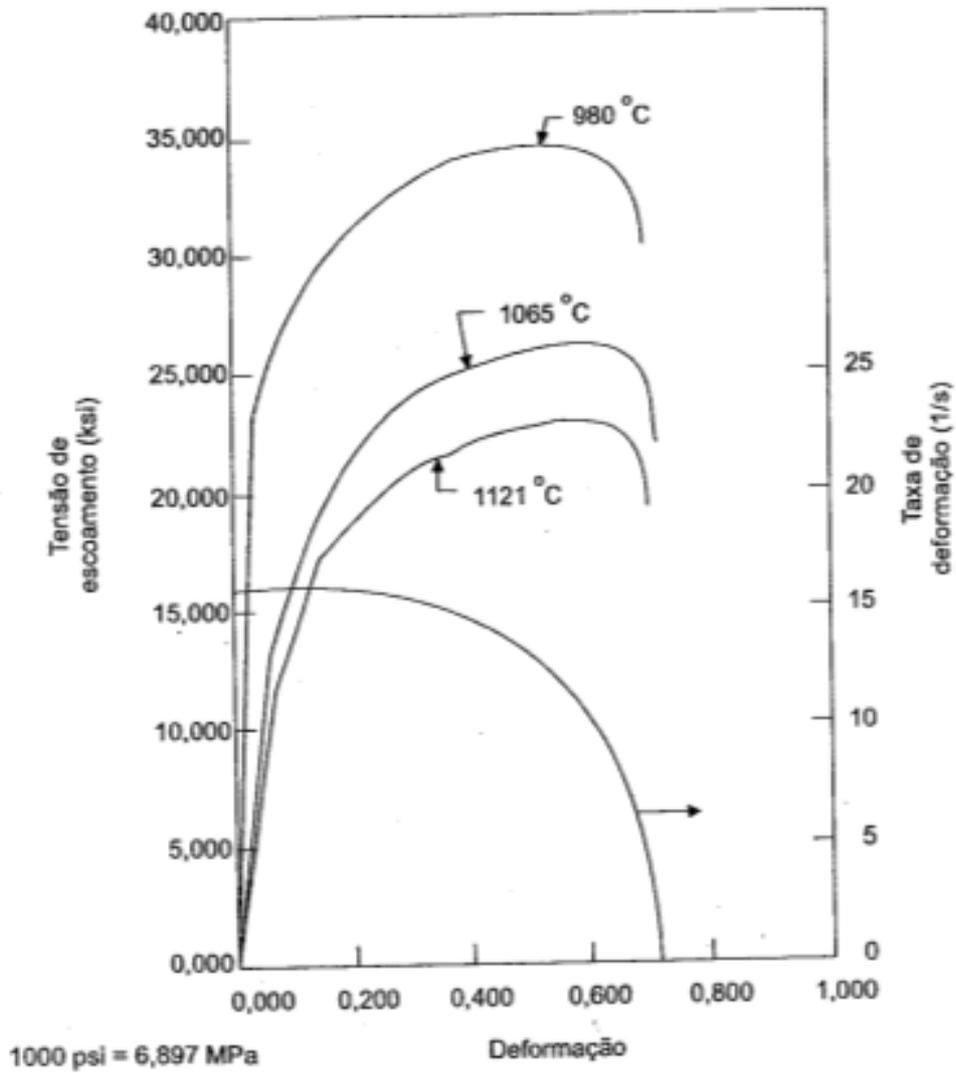


Figura 4.9 - Tensão de escoamento versus deformação e taxa de deformação versus deformação para aço inoxidável 403 a 982°C, 1066 °C e 1121°C (testes realizados numa prensa mecânica onde $\dot{\epsilon}$ não foi mantido constante).

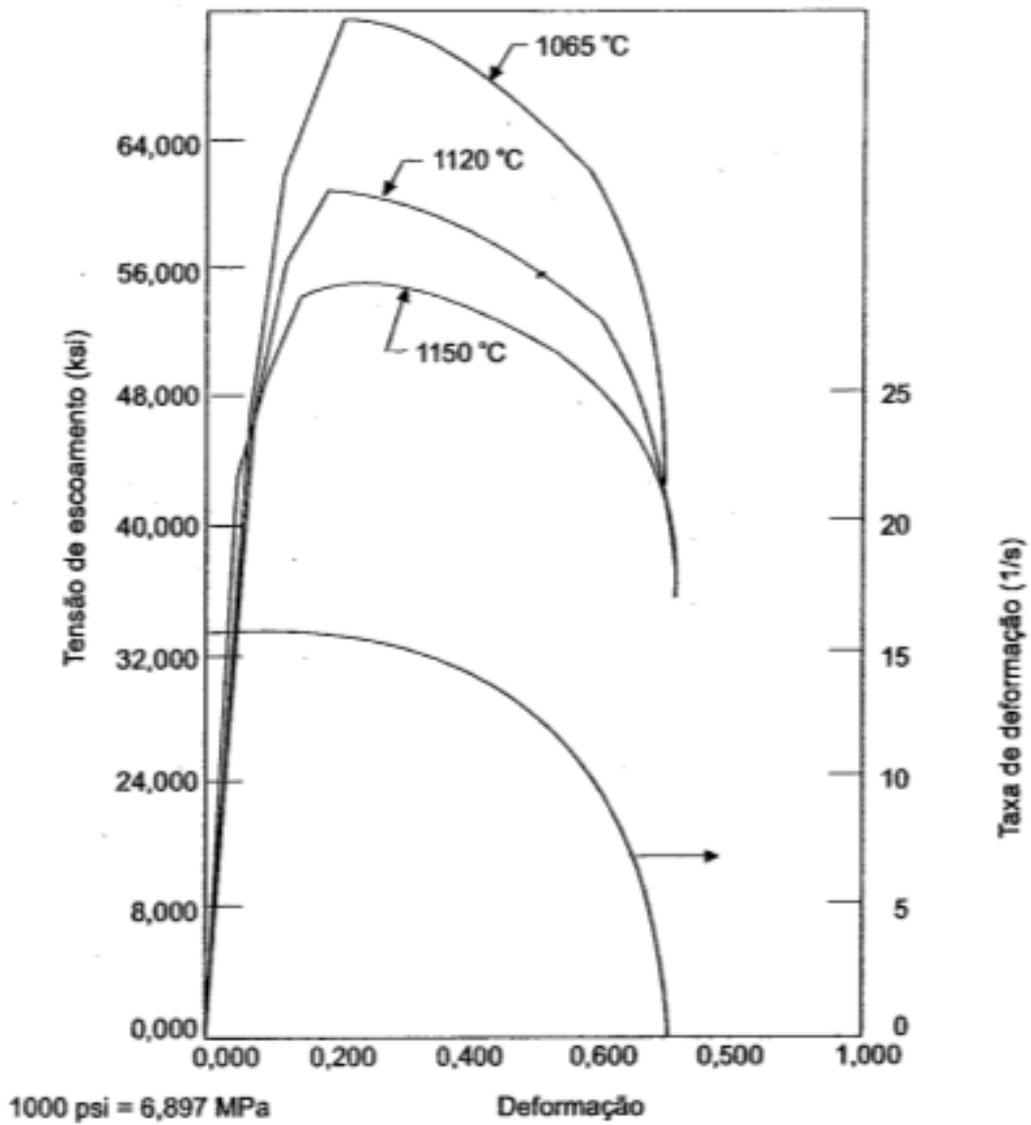


Figura 4.10 - Fluxo de escoamento versus deformação e taxa de deformação versus deformação para “Waspaloy” 403 a 1066°C, 1121 °C e 1149°C (testes realizados numa prensa mecânica onde não foi mantido constante).

4.4 Teste do anel

O teste do anel consiste em comprimir um corpo de provas na forma de anel com faces planas para uma redução conhecida (Figura 4.11).

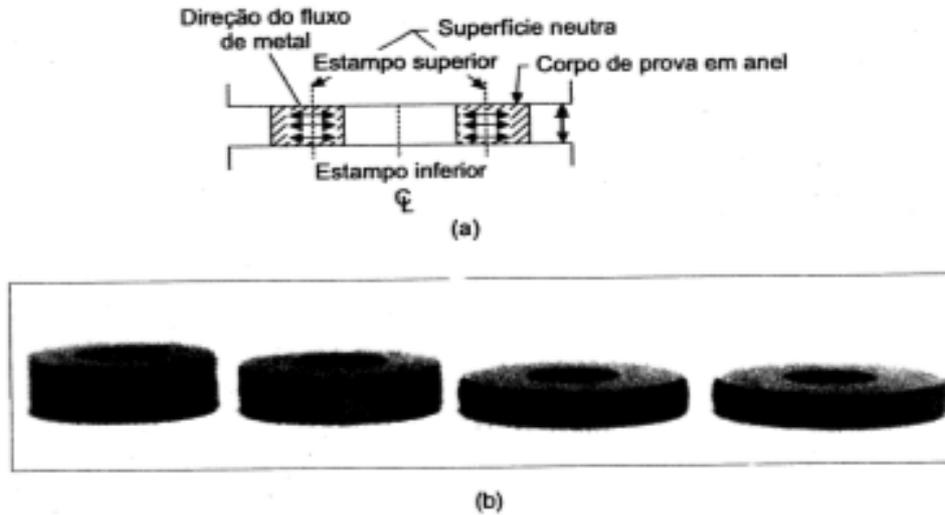


Figura 4.11 - Teste do anel. (a) esquema do fluxo de metal; (b) exemplos de anéis recalçados com várias reduções de altura.

A mudança nos diâmetros interno e externo do anel forjado é extremamente dependente da atrito na interface ferramenta/corpo de provas⁽⁴⁻⁴⁾. Se o atrito fosse igual a zero o anel se deformaria da mesma forma que uma disco sólido, com os elementos fluindo radialmente para fora numa taxa proporcional à sua distância do centro. Com o aumento da deformação, o diâmetro interno do anel é reduzido se o atrito é grande, e aumenta se o atrito é baixo. Portanto, a mudança no diâmetro interno representa um método simples para estimar o atrito na interface. Isto será discutido com maiores detalhes no Capítulo 6.

O teste do anel pode também ser empregado para a determinação dos dados $\bar{\sigma} \times \bar{\epsilon}$ para aplicações práticas⁽⁴⁻³⁾. Para este propósito é necessário realizar uma análise ou uma simulação matemática do teste do anel. Esta simulação permite a previsão do diagrama carga-deslocamento, se $\bar{\sigma} \times \bar{\epsilon}$ e o atrito são conhecidos. Inversamente, usando-se este modelo matemático do teste do anel, é possível calcular a curva $\bar{\sigma} \times \bar{\epsilon}$ se o diagrama carga-deslocamento e o atrito são conhecidos.

4.5 Teste de torção

O teste de torção pode ser empregado para obter-se dados sobre $\bar{\sigma}$ em altos valores de deformação relativa, da ordem de $\bar{\epsilon} = 2 a 4$. Portanto, este teste é usado para quando $\bar{\sigma}$ deve ser conhecido, nas operações tais como extusão, forjamento radial ou “laminação passo peregrino” (processo de fabricação de tubos sem costura), onde altos valores de deformação relativa estão presentes. No teste de torção um tubo com um entalhe (raio interno = r , espessura de parede no fundo do entalhe = t , e comprimento = l) é torcido numa velocidade conhecida; o torque T e o ângulo de rotação Ψ (em radianos) são medidos⁽⁴⁻⁶⁾. A tensão de cisalhamento, τ , na seção de espessura t , é dada por:

$$\tau = \frac{T}{2\pi r^2 t} \tag{4.16}$$

A deformação angular relativa, γ , é:

$$\gamma = \frac{r\Psi}{l} \tag{4.17}$$

Os resultados do teste de torção podem ser relacionados com tração ou compressão uniforme como segue:

$$\tau = \frac{\bar{\sigma}}{\sqrt{3}} \tag{4.18}$$

e

$$\gamma = \int d\gamma = \sqrt{3} \int d\bar{\epsilon} = \sqrt{3}\bar{\epsilon}$$

As equações 4.18 e 4.19 foram obtidas do critério de escoamento de “von Mises”, a qual será discutida em maiores detalhes à frente.

4.6 – Representação dos dados de tensão de escoamento

Uma típica curva $\bar{\sigma} \times \bar{\epsilon}$, obtida em temperaturas abaixo da de recristalização, isto é, na região de conformação à frio, é similar àquela mostrada na Figura 4.6. Neste caso o encruamento é marcante e $\bar{\sigma}$ não é significativamente afetado por $\dot{\bar{\epsilon}}$, para a maioria dos materiais. Em altas temperaturas de trabalho, muitas curvas $\bar{\sigma} \times \bar{\epsilon}$ são similares àquelas apresentadas nas Figuras 4.9 e 4.10. Obviamente, os valores de $\bar{\sigma}$ são maiores para materiais mais resistentes. Em temperaturas de conformação à frio, $\bar{\sigma}$ aumenta com o aumento de $\bar{\epsilon}$ e atinge um valor de “tensão de saturação” para valores de $\bar{\epsilon}$ maiores do que 0.8 ou 1.0. Em altas temperaturas de conformação, $\bar{\sigma}$ aumenta com o aumento de $\dot{\bar{\epsilon}}$ e com a diminuição da temperatura, θ . Para $\dot{\bar{\epsilon}}$ constante, $\bar{\sigma} \times \bar{\epsilon}$ primeiro aumenta, depois diminui por causa de geração interna de calor e do amolecimento causado pelo aumento de temperatura. Em todos os testes, a temperatura não é estritamente constante. Devido à deformação plástica, um aumento de temperatura $\Delta \theta$ tem lugar. Este pode ser estimado por:

$$\Delta \theta = \frac{E \bar{\epsilon} \bar{\sigma}}{c \rho} \tag{4.20}$$

onde E é o fator de conversão, c a capacidade térmica e ρ a densidade.

Muitos materiais, quando testados à temperatura ambiente na faixa sujeita a encruamento, não são afetados por moderadas taxas de deformação; portanto a velocidade de aplicação da carga não necessita ser controlada precisamente. Um relacionamento aproximado tensão-deformação para uma limitada região de deformação relativa pode, freqüentemente, ser dado por uma equação exponencial da forma:

$$\bar{\sigma} = K \bar{\epsilon}^n \tag{4.21}$$

onde K e n são constantes.

A equação (4.21) é ilustrada graficamente na Figura 4.12⁽⁴⁻²⁾. A inclinação da curva num gráfico log-log é n e $K = \bar{\sigma}$ onde $\bar{\epsilon} = 1$.

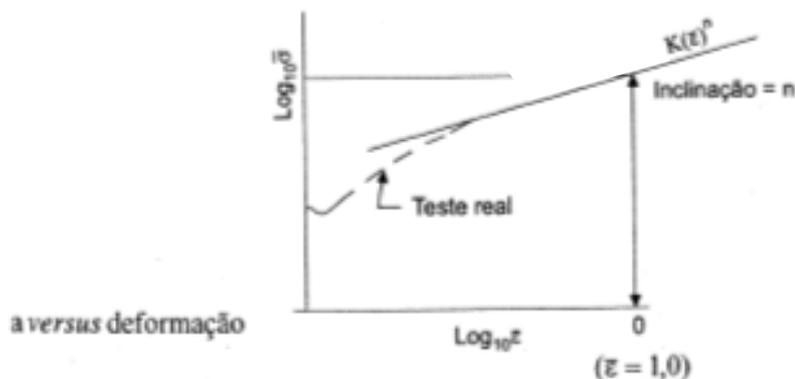


Figura 4.12 - Curva de tensão efetiva versus deformação num gráfico log-log

| | | | | | | | | | | | | |
|------------------------|-------|------|-------|-------|------|------|------|---------|-----|----------|-------|-------|
| 5115 | 0.14 | 0.53 | 0.028 | 0.027 | 0.37 | 0.71 | A | 68 20 | (c) | 0.1-0.7 | 115.2 | 0.18 |
| | | | | | | | A | 68 20 | 1.6 | | 123.7 | 0.09 |
| | | | | | | | A | 572 300 | 1.6 | | 102.4 | 0.15 |
| 5120(e)..... | 0.18 | 1.13 | 0.019 | 0.023 | 0.27 | 0.86 | A | 68 20 | (c) | 0.1-0.7 | 126.6 | 0.18 |
| | | | | | | | A | 68 20 | 1.6 | | 116.6 | 0.09 |
| | | | | | | | A | 572 300 | 1.6 | | 98.1 | 0.16 |
| 5140 | 0.41 | 0.67 | 0.04 | 0.019 | 0.35 | 1.07 | A | 68 20 | (c) | 0.1-0.7 | 125.1 | 0.15 |
| | | | | | | | A | 68 20 | 1.6 | | 133.7 | 0.09 |
| | | | | | | | A | 572 300 | 1.6 | | 112.3 | 0.12 |
| D2 tool steel(e) | 1.60 | 0.45 | | | 0.24 | | A | 68 20 | (c) | 0.2-1.0 | 191.0 | 0.157 |
| L6 tool steel | 0.56 | | | | | 0.46 | | | | | | |
| W1-1.0C especial | 1.05 | 0.21 | | | 0.16 | | A | 68 20 | (c) | 0.2-1.0 | 170.2 | 0.128 |
| 302 SS | 0.08 | 1.06 | 0.037 | 0.005 | 0.49 | 0.14 | A | 68 20 | (c) | 0.2-1.0 | 170.2 | 0.128 |
| 302 SS | 0.053 | 1.08 | 0.027 | 0.015 | 0.27 | | A | 68 20 | (c) | 0.2-1.0 | 135.6 | 0.179 |
| 304 SS(e) | 0.030 | 1.05 | 0.023 | 0.014 | 0.47 | 9.16 | HR,A | 32 0 | 10 | 0.25-0.7 | 185.7 | 0.295 |
| 316 SS | 0.055 | 0.92 | 0.030 | 0.008 | 0.49 | | HR,A | 390 200 | 30 | 0.25-0.7 | 120.8 | 0.278 |
| 410 SS | 0.093 | 0.31 | 0.026 | 0.012 | 0.33 | | HR,A | 750 400 | 30 | 0.25-0.7 | 92.7 | 0.279 |
| | | | | | | 10.2 | A | 68 20 | (c) | 0.1-0.7 | 210.5 | 0.6 |
| | | | | | | 10.6 | A | 68 20 | (c) | 0.1-0.7 | 210.5 | 0.6 |
| | | | | | | 12.9 | A | 68 20 | (c) | 0.1-0.7 | 182.0 | 0.59 |
| | | | | | | 13.8 | A | 68 20 | (c) | 0.1-0.7 | 119.4 | 0.2 |
| 431 SS | 0.23 | 0.38 | 0.020 | 0.006 | 0.42 | 1.72 | A | 68 20 | 1.6 | 0.1-0.7 | 137.9 | 0.09 |
| | | | | | | | A | 68 20 | (c) | 0.1-0.7 | 189.1 | 0.11 |

(a) Tr = traços; (b) A = recozido, F = forjado, HR = laminado a quente; (c) máquina de teste de baixa velocidade, sem especificação de velocidade de teste; (d) composição dada é normal (referência não específica análise); (e) composição aproximada.

Tabela 4.2 - Resumo dos valores de K e n descrevendo a relação tensão de escoamento-deformação, $\bar{\sigma} = K\bar{\epsilon}^n$, para várias ligas de alumínio.

| Liga | Composição % | | | | | | | | | | Pb | Cr | Ti | Zn | Mg | Mn | Fe | Si | Cu | Al | História de material (a) | Temperatura | | Taxa de deformação 1/s | Variação da deformação | k | n |
|------------|--------------|-------|-------|------|-------|-------|-------|-------|------|--|----|----|----|----|----|----|----|----|----|------|--------------------------|-------------|-----|------------------------|------------------------|-------|---|
| | Mg | Mn | Fe | Si | Cu | Al | F | C | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 1100 | 99.0 | 0.10 | 0.15 | 0.50 | 0.01 | 0.01 | 0.01 | | | | | | | | | | | | | CD,A | 32 | 0 | 10 | 0.25-0.7 | 25.2 | 0.804 | |
| 1100 | Rem | 0.01 | 0.10 | 0.16 | 0.01 | 0.01 | 0.01 | 0.03 | | | | | | | | | | | | A | 68 | 20 | (b) | 0.2-1.0 | 17.3 | 0.297 | |
| EC | 99.5 | 0.01 | 0.092 | 0.23 | 0.026 | 0.033 | 0.01 | | | | | | | | | | | | | A(c) | 68 | 20 | 4 | 0.2-0.8 | 22.4 | 0.204 | |
| 2017 | Rem | 4.04 | 0.70 | 0.45 | 0.55 | 0.76 | 0.22 | | | | | | | | | | | | | A | 68 | 20 | (b) | 0.2-1.0 | 45.2 | 0.180 | |
| 2024(d) .. | Rem | 4.48 | 0.60 | 0.46 | 0.87 | 1.12 | 0.20 | | | | | | | | | | | | | A | 68 | 20 | (b) | 0.2-1.0 | 56.1 | 0.154 | |
| 5052 | Rem | 0.068 | 0.10 | 0.19 | 0.04 | 2.74 | 0.01 | 0.003 | | | | | | | | | | | | A(e) | 68 | 20 | 4 | 0.2-0.8 | 29.4 | 0.134 | |
| 5052(d) .. | Rem | 0.09 | 0.13 | 0.16 | 0.23 | 2.50 | 0.05 | | | | | | | | | | | | | A | 68 | 20 | (b) | 0.2-1.0 | 55.6 | 0.189 | |
| 5056 | Rem | 0.036 | 0.15 | 0.22 | 0.04 | 4.83 | 0.01 | | | | | | | | | | | | | A(e) | 68 | 20 | 4 | 0.2-0.7 | 57.0 | 0.130 | |
| 5083 | Rem | 0.01 | 0.10 | 0.16 | 0.77 | 4.41 | 0.01 | 0.002 | 0.13 | | | | | | | | | | | A | 68 | 20 | 4 | 0.2-0.8 | 65.2 | 0.131 | |
| 5454 | Rem | 0.065 | 0.12 | 0.18 | 0.81 | 2.45 | <0.01 | 0.002 | | | | | | | | | | | | A(e) | 68 | 20 | 4 | 0.2-0.8 | 49.9 | 0.137 | |
| 6062 | Rem | 0.03 | 0.63 | 0.20 | 0.63 | 0.68 | 0.065 | 0.08 | | | | | | | | | | | | | 68 | 20 | (b) | 0.2-1.0 | 29.7 | 0.122 | |

(a) CD = trefilado a frio, A = recozido; (b) máquina de teste de baixa velocidade, sem especificação de velocidade; (c) recozido por 4 horas a 400 °C; (d) composição aproximada; (e) recozido por 4 horas a 420 °C.

1 ksi = 10³ psi = 6,897 MPa

Tabela 4.3 - Resumo dos valores de K e n descrevendo a relação de tensão de escoamento-deformação, $\bar{\sigma} = K\bar{\epsilon}^n$, para várias ligas de cobre

| Liga (a) | Composição (b), % | | | | | | | | | | Ni | Temperatura °F °C | História do material (c) | Taxa de deformação, Variação da l/s deformaçoão | k | n |
|--------------|-------------------|-----|--------|--------|------|--------|--------|--------|-------|-----|-----|----------------------|--------------------------|--|-------|-------|
| | Cu | Si | Fe | Sb | Sn | Zn | S | Pb | | | | | | | | |
| CDA110 | 99.94 | | 0.0025 | 0.0003 | | 0.0012 | 0.0012 | 0.0012 | 0.001 | 64 | 18 | HR,A | 2.5 | 0.25-0.7 | 65.5 | 0.328 |
| CDA110 | | | | | | | | | | 68 | 20 | F | (d) | 0.2-1.0 | 54.0 | 0.275 |
| CDA230 | 84.3 | | | | 15.7 | | | | | 68 | 20 | A | (d) | 0.2-1.0 | 76.7 | 0.373 |
| CDA260 | 70.8 | | | | 29.2 | | | | | 68 | 20 | A | (d) | 0.2-1.0 | 98.1 | 0.412 |
| CDA260 | 70.05 | | Tr | | Rem | | | | | 390 | 200 | HR,A | | 0.25-0.7 | 71.7 | 0.414 |
| CDA272 | 63.3 | | | | 36.7 | | | | | 68 | 20 | A | (d) | 0.2-1.0 | 103.9 | 0.394 |
| CDA377 | 58.6 | | Tr | | 39.6 | | 1.7 | | | 68 | 20 | A | (d) | 0.2-1.0 | 115.3 | 0.334 |
| CDA521(e) .. | 91.0 | | | | | | | | | 68 | 20 | F | (d) | 0.2-1.0 | 130.8 | 0.486 |
| CDA647 | 97.0 | 0.5 | | | | | | | 2.0 | 68 | 20 | F | (d) | 0.2-1.0 | 67.2 | 0.282 |
| CDA757 | 65.1 | | | | 22.4 | | <0.05 | | 12.4 | 68 | 20 | A | (d) | 0.2-1.0 | 101.6 | 0.401 |
| CDA794 | 61.7 | | Tr | | 20.6 | | Tr | | 17.5 | 68 | 20 | A | (d) | 0.2-1.0 | 107.0 | 0.336 |

(a) CDA = Copper Development Association; (b) Tr = traços; (c) HR = laminado a quente, A = recozido, F = forjado; (d) máquina de teste de baixa velocidade, sem especificação de velocidade; (e) composição aproximada.

| | Temperatura de teste, °F (°C): | | | | | |
|---|--|--|--|--|--|--|
| | 1650 (900) | 1830 (1000) | 2010 (1100) | 2190 (1200) | 2075 (1135) | 2190 (1200) |
| 1060(a) Laminado a quente, 1.5-100 rescozido 0.56 C, 0.26 Si, 0.28 Mn, 0.014 S, 0.013 P, 0.12 Cr, 0.09 Ni | 18.5 23.3 23.3 21.3 | 13.3 16.9 16.4 14.9 | 10.1 12.6 12.0 10.4 | 7.4 8.9 8.6 7.8 | 10.1 12.6 12.0 10.4 | 7.4 8.9 8.6 7.8 |
| 1060(a) 0.56 C, 0.26 Si, 0.28 Mn, 0.014 S, 0.013 P, 0.12 Cr, 0.09 Ni | 16.2 18.3 21.8 23.3 23.7 23.6 | 10.8 13.2 16.1 17.1 16.8 16.6 | 8.7 10.1 12.1 12.8 12.5 12.7 | 6.5 7.5 8.5 8.8 8.8 8.7 | 8.7 10.1 12.1 12.8 12.5 12.7 | 6.5 7.5 8.5 8.8 8.8 8.7 |
| 1095(a) Laminado a quente, 1.5-100 rescozido 1.00 C, 0.19 Si, 0.17 Mn, 0.027 S, 0.023 P, 0.10 Cr, 0.09 Ni | 22.8 21.3 18.3 21.9 21.8 21.0 | 17.1 16.2 13.9 16.6 15.7 13.6 | 11.7 10.7 9.8 11.7 10.6 9.7 | 8.4 7.8 7.1 8.0 7.3 6.5 | 11.7 10.7 9.8 11.7 10.6 9.7 | 8.4 7.8 7.1 8.0 7.3 6.5 |
| 1115 Laminado a quente, 4.4-23.1 como recebido 0.17 C, 0.153 Si, 0.62 Mn, 0.054 S, 0.032 P | 16.3 19.4 20.4 20.9 20.9 | 13.0 15.6 17.3 18.0 16.9 | 10.9 12.9 14.0 14.4 13.6 | 9.1 10.5 11.2 11.0 9.9 | 10.9 12.9 14.0 14.4 13.6 | 9.1 10.5 11.2 11.0 9.9 |
| Alloy steel 0.35 C, 0.27 Si, 1.49 Mn, 0.041 S, 0.037 P, 0.03 Cr, 0.11 Ni, 0.28 Mo | 16.6 19.9 23.0 24.9 26.0 25.9 25.9 25.5 22.1 | 12.2 14.8 17.6 19.1 19.6 19.5 19.2 16.6 15.0 | 9.4 11.5 13.5 14.4 14.5 14.2 13.9 10.9 10.1 | 7.4 8.1 9.4 10.2 10.4 9.7 9.2 8.2 10.7 | 9.4 11.5 13.5 14.4 14.5 14.2 13.9 10.9 10.1 | 7.4 8.1 9.4 10.2 10.4 9.7 9.2 8.2 10.7 |
| 4337(a) Laminado a quente, 1.5-100 rescozido 0.35 C, 0.27 Si, 0.66 Mn, 0.023 S, 0.029 P, 0.59 Cr, 2.45 Ni, 0.59 Mo | 28.1 29.2 28.1 22.9 28.2 27.8 25.8 16.1 18.6 20.9 21.8 | 20.8 21.8 21.3 17.1 20.4 20.0 18.2 12.4 14.1 15.9 13.5 | 15.0 15.7 15.5 11.8 14.3 13.6 11.8 8.2 9.5 11.4 11.7 | 8.2 11.3 11.3 8.6 10.1 9.1 7.5 6.3 6.8 8.1 8.0 | 15.0 15.7 15.5 11.8 14.3 13.6 11.8 8.2 9.5 11.4 11.7 | 8.2 11.3 11.3 8.6 10.1 9.1 7.5 6.3 6.8 8.1 8.0 |
| 926(a) Laminado a quente, 1.5-100 rescozido 0.61 C, 1.56 Si, 0.94 Mn, 0.038 S, 0.035 P, 0.12 Cr, 0.27 Ni, 0.06 Mo | 28.2 27.8 25.8 16.1 18.6 20.9 21.8 | 20.4 20.0 18.2 12.4 14.1 15.9 13.5 | 14.3 13.6 11.8 8.2 9.5 11.4 11.7 | 10.1 9.1 7.5 6.3 6.8 8.1 8.0 | 14.3 13.6 11.8 8.2 9.5 11.4 11.7 | 10.1 9.1 7.5 6.3 6.8 8.1 8.0 |
| 50100(a) 1.00 C, 0.19 Si, 0.17 Mn, 0.027 S, 0.023 P, 0.10 Cr, 0.09 Ni | 16.1 18.6 20.9 21.8 | 12.4 14.1 15.9 13.5 | 8.2 9.5 11.4 11.7 | 6.3 6.8 8.1 8.0 | 8.2 9.5 11.4 11.7 | 6.3 6.8 8.1 8.0 |

Tabela 4.4 - Resumo dos valores de C (Ksi) e m descrevendo a relação tensão de escoamento-deformação, $\bar{\sigma} = C\dot{\epsilon}^m$, para vários aços em diversas temperaturas

| Aço | História do material | Variação da taxa de deformação | Deformação | | 1650 (3000) | | 1850 (3300) | | 2010 (3600) | | 2150 (3850) | | |
|---------------------|---|-------------------------------------|------------|-------|-------------|-------|-------------|-------|-------------|-------|-------------|---|--|
| | | | C | m | C | m | C | m | C | m | C | m | |
| 50100(a), continúed | 1.00 C, 0.19 Si, 0.17 Mn, 0.027 S, 0.023 P, 0.10 Cr, 0.09 Ni | Laminado a quente, 1.5-100 recozido | 0.40 | 0.134 | 16.8 | 0.134 | 11.2 | 0.155 | 8.4 | 0.154 | | | |
| | | | 0.50 | 21.5 | 0.131 | 15.6 | 0.150 | 11.1 | 0.158 | 7.4 | 0.199 | | |
| | | | 0.60 | 21.8 | 0.132 | 14.6 | 0.163 | 10.0 | 0.184 | 7.0 | 0.212 | | |
| | | | 0.70 | 20.9 | 0.131 | 13.5 | 0.176 | 9.7 | 0.183 | 6.7 | 0.220 | | |
| | | | 0.80 | 20.9 | 0.133 | 14.3 | 0.146 | 9.5 | 0.169 | 6.7 | 0.203 | | |
| Mn-Si steel | 0.61 C, 1.58 Si, 0.94 Mn, 0.038 S, 0.035 P, 0.12 Cr, 0.27 Ni, 0.06 Mo | Laminado a quente, 1.5-100 recozido | 0.30 | 25.5 | 0.107 | 17.7 | 0.127 | 12.0 | 0.143 | 8.3 | 0.171 | | |
| | | | 0.50 | 25.9 | 0.107 | 17.7 | 0.129 | 12.3 | 0.143 | 8.3 | 0.173 | | |
| | | | 0.70 | 23.3 | 0.131 | 16.6 | 0.134 | 12.0 | 0.148 | 7.7 | 0.192 | | |
| | | | 0.80 | 23.3 | 0.131 | 16.6 | 0.134 | 12.0 | 0.148 | 7.7 | 0.192 | | |
| Cr-Si steel | 0.47 C, 3.74 Si, 0.58 Mn, 8.20 Cr, 20 Ni | Laminado a quente, 1.5-100 recozido | 0.05 | 19.2 | 0.117 | 14.8 | 0.119 | 9.7 | 0.172 | 7.5 | 0.181 | | |
| | | | 0.10 | 22.6 | 0.112 | 17.1 | 0.108 | 11.5 | 0.151 | 8.7 | 0.166 | | |
| | | | 0.20 | 25.7 | 0.106 | 19.5 | 0.101 | 13.5 | 0.139 | 9.7 | 0.160 | | |
| | | | 0.30 | 27.6 | 0.106 | 20.5 | 0.109 | 14.8 | 0.126 | 10.0 | 0.161 | | |
| | | | 0.40 | 27.6 | 0.114 | 20.2 | 0.114 | 14.4 | 0.141 | 9.5 | 0.179 | | |
| | | | 0.50 | 27.2 | 0.113 | 19.8 | 0.125 | 14.1 | 0.144 | 9.1 | 0.188 | | |
| | | | 0.60 | 26.0 | 0.121 | 18.8 | 0.137 | 12.8 | 0.162 | 8.2 | 0.209 | | |
| | | | 0.70 | 24.7 | 0.130 | 17.8 | 0.152 | 11.9 | 0.178 | 7.5 | 0.226 | | |
| | | | 0.80 | 19.9 | 0.118 | 23.9 | 0.104 | 15.1 | 0.167 | 10.0 | 0.206 | | |
| | | | 0.90 | 19.9 | 0.136 | 25.6 | 0.120 | 16.8 | 0.162 | 11.1 | 0.189 | | |
| DS(a) | 2.22 C, 0.43 Si, 0.37 Mn, 13.10 Cr, 0.33 Ni | Laminado a quente, 1.5-100 recozido | 0.20 | 19.9 | 0.142 | 27.6 | 0.121 | 13.5 | 0.159 | 11.9 | 0.184 | | |
| | | | 0.30 | 19.9 | 0.144 | 28.4 | 0.119 | 19.1 | 0.148 | 12.1 | 0.192 | | |
| | | | 0.40 | 19.3 | 0.150 | 28.2 | 0.126 | 13.9 | 0.150 | 12.1 | 0.178 | | |
| | | | 0.50 | 18.5 | 0.155 | 26.6 | 0.132 | 13.5 | 0.155 | 11.8 | 0.182 | | |
| | | | 0.60 | 17.5 | 0.160 | 25.2 | 0.142 | 17.5 | 0.160 | 11.5 | 0.182 | | |
| | | | 0.70 | 16.1 | 0.163 | 23.3 | 0.158 | 16.1 | 0.162 | 10.7 | 0.199 | | |
| | | | 0.80 | 39.2 | 0.087 | 29.0 | 0.108 | 21.0 | 0.123 | 14.6 | 0.121 | | |
| | | | 0.90 | 43.7 | 0.087 | 30.4 | 0.114 | 21.0 | 0.139 | 13.9 | 0.130 | | |
| | | | 1.00 | 39.7 | 0.101 | 27.1 | 0.125 | 18.4 | 0.155 | 12.2 | 0.124 | | |
| | | | 1.10 | 33.3 | 0.131 | 22.5 | 0.145 | 15.3 | 0.163 | 10.7 | 0.108 | | |

| Material | Temperatura de teste, °F (°C): | Temperatura de teste, °F (°C): | | | | |
|---|--------------------------------|--------------------------------|---------------|---------------|---------------|--------------|
| | | 1290 (700) | 1510 (820) | 1650 (900) | 1830 (1000) | 2190 (1200) |
| H-13 0.39 C, 1.02 Si, 0.60 Mn, 0.016 P, 0.020 S, 5.29 Cr, 0.04 Ni, 1.35 Mo, 0.027 N, 0.83 V | 290-906 | 19.1 0.1 | 10.2 0.305 | 6.0 0.373 | 4.8 0.374 | 4.8 0.374 |
| H-26(a) 0.80 C, 0.28 Si, 0.32 Mn, 4.30 Cr, 0.18 Ni, 0.55 Mo, 18.40 W, 1.54 V | Laminado a quente, recozido | 1650 (900) | 1830 (1000) | 2010 (1100) | 2190 (1200) | |
| | | 46.7 0.10 | 37.4 0.072 | 26.2 0.106 | 18.7 0.125 | |
| | | 49.6 0.30 | 38.1 0.087 | 26.0 0.121 | 18.3 0.140 | |
| | | 44.6 0.50 | 33.7 0.102 | 23.6 0.131 | 16.2 0.151 | |
| | | 39.1 0.70 | 27.9 0.124 | 20.1 0.149 | 13.8 0.162 | |
| 301 SS(a) 0.08 C, 0.93 Si, 1.10 Mn, 0.009 P, 0.014 S, 16.99 Cr, 6.96 Ni, 0.31 Mo, 0.93 Al, 0.02 N, 0.063 Se | Laminado a quente, recozido | 1110 (600) | 1470 (800) | 1830 (1000) | 2190 (1200) | |
| | | 26.5 0.25 | 40.5 0.051 | 16.3 0.117 | 7.6 0.161 | |
| | | 31.3 0.40 | 39.3 0.062 | 17.8 0.108 | 7.6 0.177 | |
| | | 17.5 0.60 | 37.8 0.069 | 17.4 0.102 | 6.6 0.192 | |
| 302 SS 0.07 C, 0.71 Si, 1.07 Mn, 0.03 P, 0.005 S, 18.34 Cr, 9.56 Ni | Laminado a quente, recozido | 310-460 | | | | |
| | | 26.5 0.25 | 25.1 0.129 | 11.0 0.206 | 4.6 0.281 | |
| | | 31.3 0.40 | 30.0 0.121 | 13.5 0.188 | 4.7 0.284 | |
| | | 17.5 0.60 | 45.4 0.063 | 16.8 0.161 | 4.1 0.310 | |
| 302 SS 0.08 C, 0.49 Si, 1.06 Mn, 0.037 P, 0.005 S, 18.37 Cr, 9.16 Ni | Laminado a quente, recozido | 0.2-30 | | | | |
| | | 52.2 0.25 | 36.6 0.042 | 23.1 0.040 | 12.8 0.082 | |
| | | 58.9 0.40 | 40.4 0.032 | 24.7 0.050 | 13.6 0.083 | |
| | | 63.2 0.60 | 41.9 0.030 | 24.9 0.053 | 13.5 0.091 | |
| | | 64.0 0.70 | 42.0 0.031 | 24.7 0.052 | 13.4 0.096 | |
| 302 SS 0.07 C, 0.43 Si, 0.48 Mn, 18.60 Cr, 7.70 Ni | Laminado a quente, recozido | 1650 (900) | 1830 (1000) | 2010 (1100) | 2190 (1200) | |
| | | 24.6 0.05 | 16.8 0.079 | 13.7 0.093 | 9.7 0.139 | |
| | | 28.4 0.10 | 21.2 0.068 | 15.6 0.091 | 11.1 0.127 | |
| | | 33.6 0.20 | 25.2 0.067 | 18.1 0.089 | 12.5 0.120 | |
| | | 35.3 0.30 | 26.3 0.074 | 19.5 0.089 | 13.5 0.115 | |
| | | 35.6 0.40 | 26.9 0.084 | 19.9 0.094 | 14.2 0.110 | |
| | | 35.6 0.50 | 27.0 0.093 | 19.6 0.096 | 14.2 0.115 | |
| | | 34.1 0.60 | 26.4 0.092 | 19.3 0.102 | 13.8 0.118 | |
| | | 33.6 0.70 | 25.7 0.102 | 18.9 0.108 | 13.9 0.120 | |

| Aço | História do material | Variação da taxa de deformação, 1/s Deformação | | | | | | | | | | | | |
|---|----------------------|--|------------|------------|-------------|-------------|------------|-------------|-------------|-------------|------------|-------|-------|-------|
| | | C | m | C | m | C | m | C | m | C | m | | | |
| 309 SS | Trefilado, recozido | Temperatura de teste, °F (°C): 200-525 | 0.25 | 0.40 | 0.60 | 1110 (600) | 1470 (800) | 1930 (1000) | 2180 (1200) | 2180 (1200) | 1850 (800) | 0.184 | 0.178 | 0.155 |
| 0.13 C, 0.42 Si, 1.30 Mn, 0.023 P, 0.008 S, 22.30 Cr, 12.99 Ni | | | | | | | | | | | | | | |
| 310 SS | Trefilado, recozido | Temperatura de teste, °F (°C): 310-460 | 0.25 | 0.40 | 0.60 | 50.8 | 0.080 | 32.3 | 0.127 | 27.5 | 0.101 | 12.0 | 0.154 | |
| 0.12 C, 1.26 Si, 1.56 Mn, 0.01 P, 0.009 S, 25.49 Cr, 21.25 Ni | | | | | | | | | | | | | | |
| 316 SS | Trefilado, recozido | Temperatura de teste, °F (°C): 310-460 | 0.25 | 0.40 | 0.60 | 13.5 | 0.263 | 22.2 | 0.149 | 6.4 | 0.317 | 8.0 | 0.204 | |
| 0.06 C, 0.52 Si, 1.40 Mn, 0.035 P, 0.005 S, 17.25 Cr, 12.23 Ni, 2.17 Mo | | | | | | | | | | | | | | |
| 403 SS | Trefilado, recozido | Temperatura de teste, °F (°C): 0.8-100 | 0.25 | 0.50 | 0.70 | 26.3 | 0.079 | 15.4 | 0.125 | 7.3 | 0.157 | | | |
| 0.16 C, 0.37 Si, 0.44 Mn, 0.024 P, 0.007 S, 12.62 Cr | | | | | | | | | | | | | | |
| SS | Trefilado, recozido | Temperatura de teste, °F (°C): 0.8-100 | 0.25 | 0.50 | 0.70 | 24.6 | 0.090 | 15.3 | 0.158 | 7.5 | 0.155 | | | |
| 0.12 C, 0.12 Si, 0.29 Mn, 0.014 P, 0.016 S, 12.11 Cr, 0.50 Ni, 0.45 Mo | | | | | | | | | | | | | | |
| SS | Trefilado, recozido | Temperatura de teste, °F (°C): 3.5-80 | 0.25 | 0.50 | 0.70 | 26.3 | 0.076 | 16.0 | 0.142 | 7.8 | 0.152 | | | |
| 0.08 C, 0.45 Si, 0.43 Mn, 0.031 P, 0.005 S, 17.38 Cr, 0.31 Ni | | | | | | | | | | | | | | |
| Maraging 300 | | Temperatura de teste, °F (°C): 1600 (870) | 1700 (925) | 1800 (980) | 2000 (1095) | 2100 (1150) | | | | | | | | |
| Maraging 300 | | Temperatura de teste, °F (°C): 43.4 | 0.077 | 35.4 | 0.095 | 30.6 | 0.113 | 21.5 | 0.145 | 16.0 | 0.165 | | | |
| | | Temperatura de teste, °F (°C): 2200 (1205) | 12.8 | 0.165 | | | | | | | | | | |

(a) Composição aproximada

Tabela 4.5 - Resumo dos valores de C (Ksi) e m descrevendo a relação tensão de escoamento-deformação, $\bar{\sigma} = C\bar{\epsilon}^m$, para várias ligas de alumínio em diversas temperaturas

| Liga | História do material | Varição da taxa de deformação | Temperatura de teste, °F (°C) | Deformação | C | m | C | m | C | m | C | m | C | m |
|---|--|-------------------------------|-------------------------------|------------|------|--------|------|-------|-----|-------|-----|-------|-----|-------|
| Super-pure 99.99 Al, 0.0017 Cu, 0.0026 Si, 0.0033 Fe, 0.006 Mn | Laminado a frio, recozido 1/2 h a 1140°F | 0.4-311 | 390 (200) | 0.288 | 5.7 | 0.150 | 4.8 | 0.130 | 2.8 | 0.140 | 1.8 | 0.155 | 0.6 | 0.200 |
| | | | | 2.38 | 8.7 | 0.050 | 4.3 | 0.095 | 2.8 | 0.125 | 1.6 | 0.175 | 0.5 | 0.215 |
| 5C 0.01 Cu, 0.026 Mn, 0.083 Mg, 0.022 Si, 0.23 Fe, 0.01 Zn, 99.5 Al | Recozido 3h a 750°F | 0.25-63 | 465 (240) | 3.75 | 10.9 | 0.066 | 5.9 | 0.141 | 3.4 | 0.158 | 3.4 | 0.158 | 3.4 | 0.158 |
| | | | | 0.40 | 12.3 | 0.069 | 8.3 | 0.146 | 3.8 | 0.169 | 3.2 | 0.173 | 3.2 | 0.173 |
| | | | | 0.60 | 13.1 | 0.067 | 8.4 | 0.147 | 3.2 | 0.173 | 3.2 | 0.173 | 3.2 | 0.173 |
| 1100 99.0 Al (mín), 0.10 Cu, 0.15 Si, 0.50 Fe, 0.01 Mn, 0.01 Mg | Laminado a frio, recozido | 0.25-40 | 360 (200) | 0.25 | 9.9 | 0.056 | 4.2 | 0.115 | 2.1 | 0.211 | 2.1 | 0.211 | 2.1 | 0.211 |
| | | | | 0.50 | 11.5 | 0.071 | 4.4 | 0.132 | 2.1 | 0.227 | 2.1 | 0.227 | 2.1 | 0.227 |
| | | | | 0.70 | 12.2 | 0.075 | 4.5 | 0.141 | 2.1 | 0.234 | 2.1 | 0.234 | 2.1 | 0.234 |
| 1100a) 0.10 Cu, 0.20 Si, 0.02 Mn, 0.46 Fe, 0.01 Zn, Rem Al | Extrudido, recozido 1h a 750°F | 4-40 | 300 (150) | 0.105 | 11.4 | 0.022 | 9.1 | 0.026 | 6.3 | 0.055 | 3.9 | 0.100 | 2.2 | 0.150 |
| | | | | 0.223 | 13.5 | 0.022 | 10.5 | 0.031 | 6.9 | 0.061 | 4.3 | 0.096 | 2.4 | 0.130 |
| | | | | 0.338 | 15.9 | 0.021 | 11.4 | 0.035 | 7.2 | 0.073 | 4.5 | 0.100 | 2.5 | 0.141 |
| 2017 94.95 Al, 3.50 Cu, 0.10 Si, 0.50 Fe, 0.50 Mn, 0.45 Mg | Laminado a frio, recozido | 0.2-30 | 390 (200) | 0.512 | 16.1 | 0.024 | 11.9 | 0.041 | 7.3 | 0.084 | 4.4 | 0.116 | 2.4 | 0.166 |
| | | | | 0.695 | 17.0 | 0.028 | 12.3 | 0.041 | 7.4 | 0.088 | 4.8 | 0.130 | 2.4 | 0.166 |
| | | | | 0.950 | 17.0 | 0.028 | 12.3 | 0.041 | 7.4 | 0.088 | 4.8 | 0.130 | 2.4 | 0.166 |
| 2017(a) 0.89 Mg, 4.17 Cu, 0.61 Si, 0.41 Fe, 0.30 Mn, 0.052 Zn, 0.01 Pb, 99.9 Al | Solubilizado 1h a 940°F temperado em água, recozido 4h a 750°F | 0.4-311 | 570 (300) | 0.250 | 34.5 | 0.014 | 14.8 | 0.113 | 5.8 | 0.126 | 5.8 | 0.126 | 5.8 | 0.126 |
| | | | | 0.500 | 32.2 | -0.026 | 13.2 | 0.121 | 5.2 | 0.121 | 5.2 | 0.121 | 5.2 | 0.121 |
| | | | | 0.700 | 28.5 | -0.036 | 12.5 | 0.126 | 5.1 | 0.119 | 5.1 | 0.119 | 5.1 | 0.119 |
| 2017 0.89 Mg, 4.17 Cu, 0.61 Si, 0.41 Fe, 0.30 Mn, 0.052 Zn, 0.01 Pb, 99.9 Al | Solubilizado 1h a 940°F temperado em água, recozido 4h a 750°F | 0.4-311 | 570 (300) | 0.135 | 10.9 | 0.095 | 9.1 | 0.100 | 7.5 | 0.110 | 6.2 | 0.145 | 5.1 | 0.155 |
| | | | | 2.660 | 10.0 | 0.100 | 9.2 | 0.100 | 7.7 | 0.090 | 5.8 | 0.090 | 4.6 | 0.165 |
| | | | | 0.680 | 10.0 | 0.100 | 9.2 | 0.100 | 7.7 | 0.090 | 5.8 | 0.090 | 4.6 | 0.165 |

Tabela 4.5 - Resumo dos valores de C (ksi) e m descrevendo a relação tensão de escoamento-deformação, $\bar{\sigma} = C\bar{\epsilon}^m$, para várias ligas de alumínio em diversas temperaturas.

| Liga | História do material | Variação da taxa de deformação | Deformação C | | 645 (360) | | 625 (480) | |
|--|---|--------------------------------|--------------|------|-----------|------|-----------|------|
| | | | m | C | m | C | m | C |
| Temperatura de teste, °F (°C): 465 (240) | | | | | | | | |
| 0.25-63 | | | | | | | | |
| 5052 | Recozido 3 h a 790 °F | | 0.20 | 14.3 | 0.038 | 8.9 | 0.067 | 5.6 |
| | 0.068 Cu, 0.04 Mn, 2.74 Mg, 0.10 Si, 0.19 Fe, 0.01 Zn, 0.003 Ti, Rem Al | | 0.40 | 15.9 | 0.035 | 9.3 | 0.071 | 5.3 |
| | | | 0.60 | 16.8 | 0.035 | 9.0 | 0.068 | 5.1 |
| | | | 0.80 | 17.5 | 0.038 | 9.4 | 0.068 | 5.6 |
| 5056 | Recozido 3 h a 790 °F | | 0.20 | 42.6 | -0.032 | 20.9 | 0.138 | 11.7 |
| | 0.036 Cu, 0.04 Mn, 4.83 Mg, 0.15 Si, 0.22 Fe, 0.01 Zn, 0.14 Cr, Rem Al | | 0.40 | 44.0 | -0.032 | 20.8 | 0.138 | 10.5 |
| | | | 0.60 | 44.9 | -0.031 | 19.9 | 0.143 | 10.3 |
| | | | 0.70 | 45.6 | -0.034 | 20.3 | 0.144 | 10.3 |
| 5083 | Recozido 3 h a 790 °F | | 0.20 | 43.6 | -0.006 | 20.5 | 0.095 | 9.3 |
| | 0.01 Cu, 0.77 Mn, 4.41 Mg, 0.10 Si, 0.16 Fe, 0.01 Zn, 0.13 Cr, 0.002 Ti, Rem Al | | 0.40 | 43.6 | -0.001 | 19.7 | 0.108 | 8.3 |
| | | | 0.60 | 41.9 | 0.003 | 18.8 | 0.111 | 8.5 |
| | | | 0.80 | 40.2 | 0.002 | 19.1 | 0.105 | 9.7 |
| 5454 | Recozido 3 h a 790 °F | | 0.20 | 33.6 | -0.005 | 16.8 | 0.093 | 10.9 |
| | 0.065 Cu, 0.81 Mn, 2.45 Mg, 0.12 Si, 0.18 Fe, <0.01 Zn, 0.002 Ti, Rem Al | | 0.40 | 36.0 | -0.009 | 16.3 | 0.104 | 10.7 |
| | | | 0.60 | 36.9 | -0.009 | 16.0 | 0.102 | 10.0 |
| | | | 0.80 | 37.0 | -0.009 | 16.2 | 0.097 | 10.2 |
| Temperatura de teste, °F (°C): 750 (400) | | | | | | | | |
| 0.4-311 | | | | | | | | |
| 7075(a) | Solubilizado por 1 h a 870 F, resfriado em água, envelhecido a 235 F por 16 h | | 0.115 | 10.0 | 0.090 | 6.0 | 0.135 | 3.9 |
| | 89.6 Al, 1.31 Cu, 2.21 Mg, 0.21 Si, 0.30 Fe, 0.34 Mn, 5.75 Zn, 0.01 Pb | | 2.66 | 9.7 | 0.115 | 6.2 | 0.120 | 4.8 |
| | | | | | | | | 2.9 |
| | | | | | | | | 2.7 |
| Temperatura de teste, °F (°C): 930 (500) | | | | | | | | |
| 1020 (550) | | | | | | | | |
| | | | | | | | | 2.9 |
| | | | | | | | | 2.7 |

(a) Composição aproximada.

Tabela 4.6 - Resumo dos valores de C (ksi) e m descrevendo a relação tensão de escoamento-deformação, $\bar{\sigma} = C\dot{\epsilon}^m$, para várias ligas de cobre em diversas temperaturas.

| Liga | História do material | Variação da taxa de deformação, 1/s Deformação C | | C | | m | | | | | | | |
|------------|--|--|-----------|-----------|------------|------------|------------|------|-------|------|-------|-----|-------|
| | | Temperatura de teste, °F (°C): | 570 (300) | 640 (450) | 1110 (600) | 1380 (750) | 1650 (900) | | | | | | |
| Copper | Laminado a frio, recozido 2 h a 1110°F | 4-40 | 0.105 | 17.0 | 0.010 | 12.7 | 0.050 | 7.5 | 0.096 | 4.7 | 0.134 | | |
| | | | 0.223 | 22.5 | 0.004 | 16.8 | 0.043 | 9.7 | 0.097 | 6.3 | 0.110 | | |
| | | | 0.338 | 30.2 | 0.017 | 25.1 | 0.008 | 18.9 | 0.041 | 10.0 | 0.128 | 6.1 | 0.154 |
| | | | 0.512 | 32.2 | 0.025 | 26.6 | 0.014 | 19.4 | 0.056 | 8.5 | 0.186 | 5.5 | 0.195 |
| | | | 0.695 | 34.4 | 0.024 | 26.8 | 0.031 | 19.0 | 0.078 | 8.2 | 0.182 | 5.2 | 0.190 |
| | | Temperatura de teste, °F (°C): | 800 (427) | | | | | | | | | | |
| | | | 26.7 | 0.0413 | | | | | | | | | |
| OFHC Cobre | | | | | | | | | | | | | |
| CDA 110 | Laminado a quente, recozido | 0.25-40 | 0.25 | 23.0 | 0.046 | 12.9 | 0.136 | 6.6 | 0.160 | | | | |
| | | | 0.50 | 27.4 | 0.049 | 13.7 | 0.150 | 6.9 | 0.168 | | | | |
| | | | 0.70 | 28.8 | 0.057 | 13.3 | 0.155 | 6.8 | 0.176 | | | | |
| | | Temperatura de teste, °F (°C): | 750 (400) | | | | | | | | | | |
| | | | 26.7 | 0.0413 | | | | | | | | | |
| CDA 220 | Extrudado, laminado a frio 30%, recozido 650 C 90 min. | 0.1-10 | 0.25 | 41.0 | 0.017 | 34.1 | 0.018 | 22.6 | 0.061 | 11.2 | 0.134 | | |
| | | | 0.50 | 46.7 | 0.029 | 39.9 | 0.032 | 24.4 | 0.084 | 11.0 | 0.156 | | |
| | | | 0.70 | 48.1 | 0.034 | 40.7 | 0.024 | 24.5 | 0.086 | 11.4 | 0.140 | | |
| | | Temperatura de teste, °F (°C): | 390 (200) | | | | | | | | | | |
| | | | 26.7 | 0.0413 | | | | | | | | | |
| CDA 260 | Laminado a quente, recozido | 3.5-30 | 0.25 | 34.9 | 0.036 | 16.0 | 0.194 | 7.1 | 0.144 | | | | |
| | | | 0.50 | 42.3 | 0.031 | 14.8 | 0.237 | 7.0 | 0.148 | | | | |
| | | | 0.70 | 42.4 | 0.045 | 14.3 | 0.228 | 6.3 | 0.151 | | | | |
| CDA 260 | Laminado a quente, recozido | 3.5-30 | 0.25 | 49.0 | 0.028 | 26.9 | 0.083 | 7.6 | 0.189 | 3.1 | 0.228 | | |
| | | | 0.50 | 58.6 | 0.027 | 28.6 | 0.075 | 5.4 | 0.281 | 2.8 | 0.239 | | |
| | | | 0.70 | 60.3 | 0.027 | 26.7 | 0.061 | 4.7 | 0.291 | 2.7 | 0.220 | | |
| CDA 365 | Laminado a quente, recozido | 3.5-30 | 0.25 | 45.8 | 0.038 | 28.6 | 0.065 | 9.8 | 0.106 | 2.4 | 0.166 | | |
| | | | 0.50 | 57.2 | 0.032 | 28.9 | 0.085 | 8.5 | 0.137 | 2.1 | 0.197 | | |
| | | | 0.70 | 59.1 | 0.035 | 26.6 | 0.078 | 8.4 | 0.113 | 1.8 | 0.222 | | |

Tabela 4.7 - Resumo dos valores de C (ksi) e m descrevendo a relação tensão de escoamento-deformação, $\bar{\sigma} = C\dot{\epsilon}^m$, para várias ligas de titânio em diversas temperaturas.

| Liga | História do material | | Variação da taxa de deformação, $\dot{\epsilon}$ | | Temperatura de teste, T (°C) | | C | | m | | C | | m | | |
|---|---|------------|--|-----------|--------------------------------|------------|------------|-------------|------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| | Descrição | Temp. (°C) | C | m | C | m | C | m | C | m | C | m | C | m | |
| Type 1 0.04 Fe, 0.02 C, 0.005 H ₂ , 0.01 N ₂ , 0.04 O ₂ , Rem Ti | Recozido 15 min. a 1200°F em alto vácuo | 68 (20) | 392 (200) | 752 (400) | 1112 (600) | 1472 (800) | 1652 (900) | 1832 (1000) | 0.2 | 52.8 | 0.029 | 60.9 | 0.046 | 39.8 | 0.074 |
| | | 0.25-16.0 | 60.9 | 0.046 | 39.8 | 0.074 | 25.3 | 0.097 | 12.6 | 0.167 | 5.4 | 0.230 | 3.0 | 0.387 | |
| | | 0.4 | 113.7 | 0.029 | 73.3 | 0.056 | 48.8 | 0.061 | 29.6 | 0.115 | 14.6 | 0.181 | 5.5 | 0.348 | |
| | Recozido 15 min. a 1200°F em alto vácuo | 68 (20) | 392 (200) | 752 (400) | 1112 (600) | 1472 (800) | 1652 (900) | 1832 (1000) | 0.5 | 129.6 | 0.028 | 82.2 | 0.056 | 53.9 | 0.049 |
| | | 0.25-16.0 | 82.2 | 0.056 | 53.9 | 0.049 | 32.1 | 0.105 | 14.9 | 0.195 | 5.5 | 0.348 | 3.5 | 0.289 | |
| | | 0.8 | 142.5 | 0.027 | 87.7 | 0.058 | 56.3 | 0.042 | 32.7 | 0.099 | 15.4 | 0.180 | 5.9 | 0.186 | |
| Type 2 0.15 Fe, 0.02 C, 0.005 H ₂ , 0.02 N ₂ , 0.12 O ₂ , Rem Ti | Recozido 15 min. a 1200°F em alto vácuo | 68 (20) | 392 (200) | 752 (400) | 1112 (600) | 1472 (800) | 1652 (900) | 1832 (1000) | 1.0 | 150.6 | 0.027 | 90.7 | 0.054 | 56.6 | 0.044 |
| | | 0.25-16.0 | 90.7 | 0.054 | 56.6 | 0.044 | 33.5 | 0.099 | 15.9 | 0.173 | 5.9 | 0.167 | 3.0 | 0.264 | |
| | | 0.4 | 143.3 | 0.021 | 92.7 | 0.043 | 54.5 | 0.051 | 33.6 | 0.092 | 17.5 | 0.167 | 6.9 | 0.135 | |
| | Recozido 15 min. a 1200°F em alto vácuo | 68 (20) | 392 (200) | 752 (400) | 1112 (600) | 1472 (800) | 1652 (900) | 1832 (1000) | 0.4 | 173.2 | 0.021 | 112.1 | 0.042 | 63.1 | 0.047 |
| | | 0.25-16.0 | 112.1 | 0.042 | 63.1 | 0.047 | 36.3 | 0.101 | 18.4 | 0.190 | 7.2 | 0.151 | 4.9 | 0.167 | |
| | | 0.8 | 193.8 | 0.024 | 125.3 | 0.045 | 65.6 | 0.047 | 36.9 | 0.104 | 18.4 | 0.190 | 7.8 | 0.138 | |
| Sem liga 0.03 Fe, 0.0084 N, 0.0025 H, Rem Ti | Laminado a quente, recuzido 800°C, 90 min | 68 (20) | 392 (200) | 752 (400) | 1112 (600) | 1472 (800) | 1652 (900) | 1832 (1000) | 1.0 | 216.8 | 0.023 | 134.8 | 0.058 | 65.3 | 0.045 |
| | | 0.25-16.0 | 134.8 | 0.058 | 65.3 | 0.045 | 37.0 | 0.089 | 18.4 | 0.190 | 7.6 | 0.106 | 3.9 | 0.195 | |
| | | 0.50 | 27.9 | 0.066 | 17.8 | 0.111 | 10.0 | 0.242 | 2.1 | 0.266 | 0.8 | 0.097 | 3.7 | 0.167 | |
| | Recozido 15 min. a 1200°F em alto vácuo | 68 (20) | 392 (200) | 752 (400) | 1112 (600) | 1472 (800) | 1652 (900) | 1832 (1000) | 0.70 | 30.1 | 0.065 | 20.0 | 0.098 | 12.2 | 0.185 |
| | | 0.25-16.0 | 20.0 | 0.098 | 12.2 | 0.185 | 2.5 | 0.316 | 0.5 | 11.0 | 0.060 | 12.90 | 0.060 | 14.70 | 0.060 |
| | | 0.25 | 23.4 | 0.062 | 14.3 | 0.115 | 8.2 | 0.236 | 1.8 | 0.324 | 0.50 | 27.9 | 0.066 | 17.8 | 0.111 |
| Ti-5Al-2.5 Sn 5.1 Al, 2.5 Sn, 0.06 Fe, 0.03 C, 0.01 H ₂ , 0.03 N ₂ , 0.1 O ₂ , Rem Ti | Recozido 15 min. a 1200°F em alto vácuo | 68 (20) | 392 (200) | 752 (400) | 1112 (600) | 1472 (800) | 1652 (900) | 1832 (1000) | 0.1 | 173.6 | 0.046 | 125.6 | 0.028 | 97.6 | 0.028 |
| | | 0.25-16.0 | 125.6 | 0.028 | 97.6 | 0.028 | 66.1 | 0.025 | 58.5 | 0.034 | 44.2 | 0.069 | 5.4 | 0.308 | |
| | | 0.2 | 197.9 | 0.046 | 138.8 | 0.022 | 107.4 | 0.026 | 92.8 | 0.020 | 92.8 | 0.020 | 92.8 | 0.020 | |
| | Recozido 15 min. a 1200°F em alto vácuo | 68 (20) | 392 (200) | 752 (400) | 1112 (600) | 1472 (800) | 1652 (900) | 1832 (1000) | 0.3 | 215.6 | 0.046 | 147.4 | 0.021 | 112.5 | 0.027 |
| | | 0.25-16.0 | 147.4 | 0.021 | 112.5 | 0.027 | 95.6 | 0.019 | 58.7 | 0.040 | 44.6 | 0.082 | 5.1 | 0.294 | |
| | | 0.4 | 230.6 | 0.039 | 151.4 | 0.022 | 116.0 | 0.022 | 96.7 | 0.021 | 96.7 | 0.021 | 96.7 | 0.021 | |

Tabela 4.8 - Resumo dos valores de C (ksi) e m descrevendo a relação tensão de escoamento-deformação, $\bar{\sigma} = C\bar{\epsilon}^m$, para vários materiais.

| Material | História do material | Variação da taxa de deformação, 1/s | Strain | | C | | m | | C | | m | | C | | m | | | |
|---|---|--|---------------|---------------|--------------|--------------|--------------|--------------|-------------|---|---|---|---|---|---|---|--|--|
| | | | °F (°C) | F (C) | C | m | C | m | C | m | C | m | C | m | C | m | | |
| Chumbo 99.98 Pb, 0.003 Cu, 0.003 Fe, 0.002 Zn, 0.002 Ag | Temperatura de teste | 0.115 2.68 | 72 (22) | 230 (110) | 235 (176) | 415 (215) | 500 (260) | 570 (303) | | | | | | | | | | |
| | | | 2.0 (0.040) | 1.56 (0.065) | 1.21 (0.085) | 0.79 (0.130) | 0.47 (0.160) | 0.40 (0.180) | | | | | | | | | | |
| Magnésio 9.010 Al, 0.003 Zn, 0.008 Mn, 0.004 Si, 0.002 Cu, 0.0008 Ni, Rem. Mg | Temperatura de teste, Extrudado, laminado a frio 15% recuzido 550 °C, 90 min. | 0.25 0.50 0.70 | 390 (200) | 570 (300) | 750 (405) | 930 (400) | | | | | | | | | | | | |
| | | | 18.1 (0.063) | 9.8 (0.215) | 4.1 (0.263) | 1.7 (0.337) | | | | | | | | | | | | |
| | | | 17.2 (0.093) | 5.4 (0.211) | 4.0 (0.234) | 1.7 (0.302) | | | | | | | | | | | | |
| | | | 15.5 (0.094) | 3.3 (0.152) | 4.3 (0.215) | 2.1 (0.210) | | | | | | | | | | | | |
| U-700 | Temperatura de teste | 0.7 | 1975 (1080) | 3030 (1166) | | | | | | | | | | | | | | |
| | | | 26.6 (0.21) | 22.1 (0.21) | | | | | | | | | | | | | | |
| Zircônio 99.8 Zr, 0.009 Hf, 0.006 Al, 0.038 Fe, 0.0006 H ₂ , 0.0025 N ₂ , 0.0035 O ₂ , 0.0 Ni | Temperatura de teste, Recuzido, 15 min a 1380 °F em alto vácuo | 0.2 0.3 0.4 0.5 0.6 | 66 (20) | 392 (200) | 752 (400) | 1112 (600) | 1472 (800) | 1852 (900) | 1932 (1000) | | | | | | | | | |
| | | | 117.4 (0.031) | 74.0 (0.052) | 40.2 (0.090) | 23.5 (0.069) | 16.8 (0.069) | 5.6 (0.227) | 4.6 (0.301) | | | | | | | | | |
| | | | 143.7 (0.022) | 52.2 (0.058) | | | | | | | | | | | | | | |
| | | | 159.5 (0.017) | 105.1 (0.046) | 54.4 (0.095) | 29.4 (0.09) | 18.2 (0.116) | 7.1 (0.252) | 4.0 (0.357) | | | | | | | | | |
| | | | 169.3 (0.017) | 112.8 (0.041) | 58.2 (0.083) | | | | | | | | | | | | | |
| Zircaloy 2 98.35 Zr, 0.015 Hf, 1.4 Zn, 0.01 Al, 0.06 Fe, 0.045 Ni, 0.0055 H ₂ , 0.0023 N ₂ , 0.0755 O ₂ | Temperatura de teste, Recuzido, 15 min a 1380 °F em alto vácuo | 0.1 0.2 0.3 0.4 0.5 0.6 0.8 1.0 | 98.8 (0.031) | 65.9 (0.046) | 58.3 (0.065) | 30.4 (0.049) | 15.6 (0.147) | 7.5 (0.325) | 3.9 (0.362) | | | | | | | | | |
| | | | 136.9 (0.025) | 105.8 (0.035) | 67.9 (0.058) | | | | | | | | | | | | | |
| | | | 178.5 (0.034) | 131.4 (0.035) | 73.5 (0.056) | 37.5 (0.053) | 18.7 (0.172) | 7.8 (0.342) | 4.0 (0.367) | | | | | | | | | |
| | | | 202.7 (0.027) | 145.4 (0.036) | 77.3 (0.057) | | | | | | | | | | | | | |
| | | | | 154.2 (0.034) | 79.9 (0.053) | 35.2 (0.059) | 18.6 (0.178) | 7.2 (0.387) | 4.0 (0.367) | | | | | | | | | |
| Gráfico 99.9 U, 0.0012 Mn, 0.002 Ni, 0.00074 Cu, 0.00072 Cr, 0.0001 Co, 0.0047 H ₂ , 0.0041 N ₂ , 0.1760 O ₂ (livre de cádmio e boro) | Temperatura de teste, Recuzido 2 hr a 1110 °F em alto vácuo | 0.2 0.4 0.6 0.8 | 68 (20) | 212 (100) | 392 (200) | 572 (300) | 922 (500) | 1292 (600) | 1652 (900) | | | | | | | | | |
| | | | 151.0 (0.043) | 113.0 (0.042) | 77.4 (0.034) | 45.9 (0.044) | 31.9 (0.051) | 16.0 (0.061) | 4.5 (0.069) | | | | | | | | | |
| | | | 173.9 (0.033) | 132.7 (0.049) | 91.0 (0.031) | 53.3 (0.047) | 33.1 (0.059) | 16.1 (0.069) | 4.5 (0.069) | | | | | | | | | |
| | | | 184.9 (0.023) | 143.1 (0.047) | 98.1 (0.032) | 56.0 (0.056) | 33.4 (0.054) | 16.1 (0.069) | 4.5 (0.069) | | | | | | | | | |
| | 189.8 (0.016) | 149.5 (0.048) | 102.0 (0.036) | 58.3 (0.057) | 33.3 (0.049) | 16.2 (0.097) | 4.5 (0.069) | | | | | | | | | | | |
| | | 1.0 | | | 59.0 (0.056) | 32.5 (0.055) | 16.4 (0.097) | 4.5 (0.069) | | | | | | | | | | |

Pode-se notar do diagrama esquemático da Figura 4.12 que, para baixos valores de deformação, uma curva determinada experimentalmente pode se distanciar da curva dada pela Equação 4.14. Neste caso outros valores de n e K podem ser especificados para diferentes faixas de deformação relativa efetiva. Valores típicos de n e K são dados nas Tabelas 4.1 até 4.3 para vários metais⁽⁴⁻¹⁾. Deve-se notar que outras formas de curvas tensão-deformação para conformação à temperatura ambiente, isto é, conformação a frio, tem sido sugeridas. Algumas delas são:

$$\text{Ludwik} \quad \bar{\sigma} = a + b(\bar{\epsilon})^c \tag{4.22}$$

onde a , b e c são constantes arbitrárias. Esta é a forma aproximada de curva tensão-deformação para materiais em estado recozido, mas tende a subestimar a tensão onde a deformação é baixa (<0.2) e superestimá-la para altos valores de deformação relativa. Para materiais fortemente pré-tensionados, $c \approx 1$.

$$\text{Voce} \quad \bar{\sigma} = a + (b - a)(1 - e^{-c\bar{\epsilon}}) \tag{4.23}$$

Esta relação dá um bom ajuste, porém não é muito adequada para análise devido à sua forma complexa.

$$\text{Swift} \quad \bar{\sigma} = c(a + \bar{\epsilon})^n \tag{4.24}$$

Esta relação mais realista do que a Equação (4.21). Contudo, sua manipulação algébrica se mostra difícil. Para materiais muito sensíveis à taxa de deformação relativa, a expressão mais comumente empregada é:

$$\bar{\sigma} = C(\dot{\bar{\epsilon}})^m \tag{4.25}$$

Os coeficientes C e m desta curva seriam obtidos para várias temperaturas e deformações relativas, de modo que C e m teriam diferentes valores para uma dada temperatura, para diversos valores de deformação relativa. Como exemplo, valores de C e m são dados para diversos materiais nas Tabelas 4.4 até 4.8⁽⁴⁻¹⁾. Para a previsão das forças e tensões nas operações práticas de conformação, frequentemente é suficiente especificar um valor médio ou máximo para $\bar{\sigma}$ o qual é empregado nas equações para estimar o máximo valor da carga de conformação. Em tais casos práticos, o uso de um valor constante médio para $\bar{\sigma}$ pode ser justificado. Se os valores de $\bar{\epsilon}$ e $\dot{\bar{\epsilon}}$ não são conhecidos exatamente, então o valor de C na equação 4.25 pode ser empregado como uma aproximação para $\bar{\sigma}$. Tais valores para trabalho à quente são fornecidos nas Tabelas 4.9 e 4.10⁽⁴⁻³⁾. Os dados relacionados na Tabela 4.9 foram obtidos num teste de compressão isotérmico. Os dados da Tabela 4.10, por outro lado, em um teste não isotérmico, em um teste de anel. Nestes testes as dimensões do anel também são importantes, porque a temperatura média do anel varia durante o teste e é influenciada pela transferência de calor e a espessura do anel. Tabela 4.9 Valores médios de tensão de escoamento determinados em teste de compressão uniforme que podem ser empregados na previsão prática de cargas

| Material | Tensão de escoamento ksi | Temperatura P | Varição de deformação (ln) ho/ho | Varição da taxa de deformação, 1/s |
|----------------------|--------------------------|---------------|----------------------------------|------------------------------------|
| 403 stain-less steel | 33,0 | 1800 | 0,3-0,7 | 10,0-14,0 |
| | 25,0 | 1950 | 0,3-0,7 | 10,0-14,0 |
| | 21,0 | 2050 | 0,2-0,7 | 10,0-14,0 |
| Waspoy | 62,0 | 1950 | 0,2-0,4 | 13,0-15,0 |
| | 56,0 | 1950 | 0,4-0,6 | 10,0-13,0 |
| | 52,0 | 2050 | 0,1-0,3 | 12,0-15,0 |
| | 48,0 | 2050 | 0,3-0,6 | 10,0-13,0 |
| | 46,0 | 2100 | 0,1-0,3 | 13,0-15,0 |
| Ti-6Al-2Sn-4Zr-2Mo | 42,0 | 2100 | 0,3-0,6 | 10,0-13,0 |
| | 56,0 | 1600 | 0,1-0,4 | |
| | 52,0 | 1600 | 0,4-0,6 | 13,0-15,0 |
| | 52,0 | 1675 | 0,1-0,4 | 10,0-13,0 |
| | 46,0 | 1675 | 0,4-0,6 | 13,0-15,0 |
| Inconel 718 | 38,0 | 1750 | 0,1-0,4 | 10,0-13,0 |
| | 34,0 | 1750 | 0,4-0,6 | 10,0-13,0 |
| | 54,0 | 2080 | 0,1-0,4 | 13,0-15,0 |
| | 48,0 | 2080 | 0,4-0,6 | 10,0-13,0 |
| | 46,0 | 2100 | 0,1-0,4 | 13,0-15,0 |
| Ti-8Mo-8V-2Fe-3Al | 40,0 | 2100 | 0,4-0,6 | 10,0-13,0 |
| | 40,0 | 1650 | 0,1-0,6 | 10,0-15,0 |
| | 28,0 | 1850 | 0,1-0,6 | 10,0-15,0 |
| AISI 4340 | 24,0 | 2000 | 0,1-0,6 | 10,0-15,0 |
| | 25,0 | 1900 | 0,2-0,7 | 10,0-14,0 |
| | 21,0 | 2000 | 0,3-0,8 | 12,0-17,0 |

1 ksi = 6,897 MPa

Os dados relacionados na Tabela 4.9 foram obtidos num teste de compressão isotérmico. Os dados da Tabela 4.10, por outro lado, em um teste não isotérmico, em um teste de anel. Nestes testes as dimensões do anel também são importantes, porque a temperatura média do anel varia durante o teste e é influenciada pela transferência de calor e a espessura do anel.

Tabela 4.10 Valores médios de tensão de escoamento obtidos a partir do teste de compressão em anel, sugeridos para uso prático.

| Material | Tensão de escoamento (ksi) | Temperatura, F | Varição de deformação, 1/s | Fator de cisalhamento, m | Tempo de contato | Dimensão do anel (b) |
|---------------|----------------------------|----------------|----------------------------|--------------------------|------------------|----------------------|
| 6061 Al | 9 | 800 | 18-22 | 0.4 | 0.038 | A |
| | 9 | 800 | 15-17 | 0.31 | 0.047 | B |
| | 7 | 800 | 10-13 | 0.53 | 0.079 | C |
| Ti-7Al-4Mo | 48 | 1750 | 13 | 0.42 | 0.033 | D |
| | 30 | 1750 | 18-23 | 0.42 | 0.044 | E |
| | 30 | 1750 | 15-18 | 0.7 | 0.056 | F |
| 403 SS | 37 | 1800 | 25-28 | 0.23 | 0.029 | D |
| | 33 | 1800 | 25-27 | 0.24 | 0.037 | E |
| | 33 | 1800 | 16-18 | 0.34 | 0.047 | F |
| 403 SS | 32 | 1950 | 20 | 0.28 | 0.06 | F |
| | 28 | 1950 | 16 | 0.29 | 0.07 | F |
| | 25 | 2050 | 20 | 0.35 | 0.06 | F |
| | 19 | 2050 | 16 | 0.43 | 0.07 | F |
| Waspaloy | 55 | 2100 | 20 | 0.18 | 0.06 | F |
| | 50 | 2100 | 13-16 | 0.21-0.24 | 0.07-0.09 | F |
| 17-7PH SS | 34 | 1950 | 13-20 | 0.22-0.28 | 0.06-0.09 | F |
| | 22 | 2100 | 16-20 | 0.35 | 0.06-0.07 | F |
| | 18 | 2100 | 13 | 0.31 | 0.09 | F |
| Ti-6Al-4V | 43 | 1700 | 20 | 0.30 | 0.06 | F |
| | 35 | 1700 | 13-16 | 0.29-0.34 | 0.07-0.09 | F |
| | 27 | 1750 | 16-20 | 0.32-0.46 | 0.06-0.07 | F |
| | 20 | 1750 | 13 | 0.38 | 0.09 | F |
| Inconel 718 | 65 | 2000 | 16-20 | 0.17-0.18 | 0.06-0.07 | F |
| | 58 | 2000 | 13 | 0.18 | 0.09 | F |
| | 50 | 2100 | 20 | 0.33 | 0.06 | F |
| | 48 | 2100 | 13-16 | 0.29-0.30 | 0.07-0.09 | F |
| Ti-8Al-1Mo-1V | 50 | 1750 | 13-16 | 0.22-0.26 | 0.07-0.09 | F |
| | 47 | 1750 | 20 | 0.27 | 0.06 | F |
| | 40 | 1800 | 13-16 | 0.27-0.32 | 0.07-0.09 | F |
| | 27 | 1800 | 20 | 0.27 | 0.06 | F |
| 7075 Al | 19 | 700 | 13-20 | 0.36-0.42 | 0.06-0.09 | G |
| | 16 | 800 | 13-20 | 0.31-0.49 | 0.06-0.09 | G |
| Udimet | 65 | 2050 | 14-17 | 0.4 | (c) | F |

(a) At 10 to 30% reduction. (b) Dimensions, OD:ID:thickness, in inches: A = 6:3:0.5, B = 6:3:1.0, C = 6:3:2.0, D = 3:1.5:0.25, E = 3:1.5:0.5, F = 3:1.5:1.0, G = 5:3:1. (c) Not measured.

10³psi = 1ksi = 6,897 MPa

REFERÊNCIAS

4-1. Altan, T., and Boulger, F. W., "Flow Stress of Metals and Its Application in Metal Forming Analyses", Trans. ASME, J. Engr. Ind. Nov 1973, p 1009.
 4-2. Thomsen, E. G., Yang, C. T., and Kobayashi, S., "Mechanics of Plastic Deformation in Metal Processing", The Macmillan Company, New York, 1965.

- 4-3. Douglas, J. R., and Altan, T., "Flow Stress Determination for Metals at Forging Rates and Temperatures", Trans. ASME, J. Engr. Ind. Feb 1975, p 66.
- 4-4. Lee, C. H., and Altan, T., "Influence of Flow Stress and Friction Upon Metal Flow in Upset Forging of Rings and Cylinders", Trans. ASME, J. Engr. Ind., Aug 1972, p 775.
- 4-5. Altan, T., Semiatin, S. L., and Lahoti, G. D., "Determination of Flow Stress Data for Practical Metal Forming Analysis", Annals of CIRP, Vol 30, No. 1, 1981, p 129.
- 4-6. Lahoti, G. D., and Altan, T., "Prediction of Temperature Distributions in Axisymmetric Compression and Torsion", J. Engr. Materials Technology, April 1975, p 113.

CAPÍTULO 5

DEFORMAÇÃO PLÁSTICA: ESTADO DE TENSÕES COMPLEXO E CRITÉRIOS DE ESCOAMENTO

Numa tração ou compressão homogênea simples (uniaxial), o metal flui (escoa) plasticamente quando a tensão, σ , atinge o valor da tensão de escoamento, $\bar{\sigma}$, ou quando o critério de escoamento em deformação uniaxial é:

$$|\sigma| = \frac{L}{A} = \bar{\sigma} \quad (5.1)$$

onde L e A são respectivamente a força e área

Num estado multiaxial de tensões, a deformação plástica (escoamento) depende de uma combinação de todas as tensões^(5-1, 5-2). Existem duas “hipóteses” ou critérios principais para deformação plástica:

1. **Tresca** ou critério da tensão de cisalhamento para o escoamento ou para deformação plástica;
2. **von Mises** ou critério da energia de distorção para o escoamento ou para deformação plástica

5.1 O critério de Tresca para escoamento

O critério de Tresca para escoamento diz que a fluência do material começa quando a máxima tensão de cisalhamento, τ_{\max} , atinge um certo valor crítico, k , ou quando $|\tau_{\max}| = k$, onde k é a tensão de escoamento para o cisalhamento, a qual é característica de um dado material e sua microestrutura, dependendo da taxa de deformação de cisalhamento, deformação e temperatura de deformação. Assim como no caso de deformações, tensões também têm eixos principais, como ilustrado, através do círculo de Mohr, na Figura 5.1.

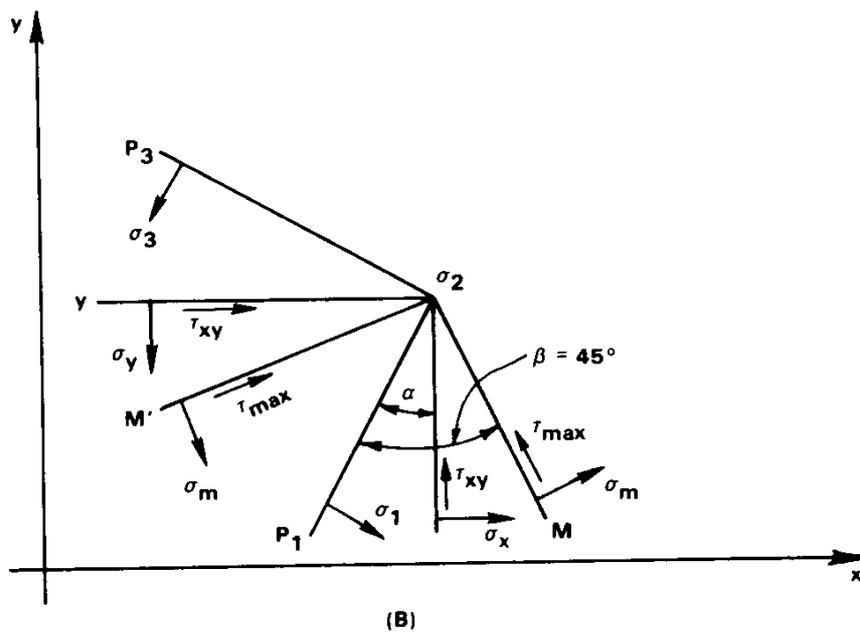
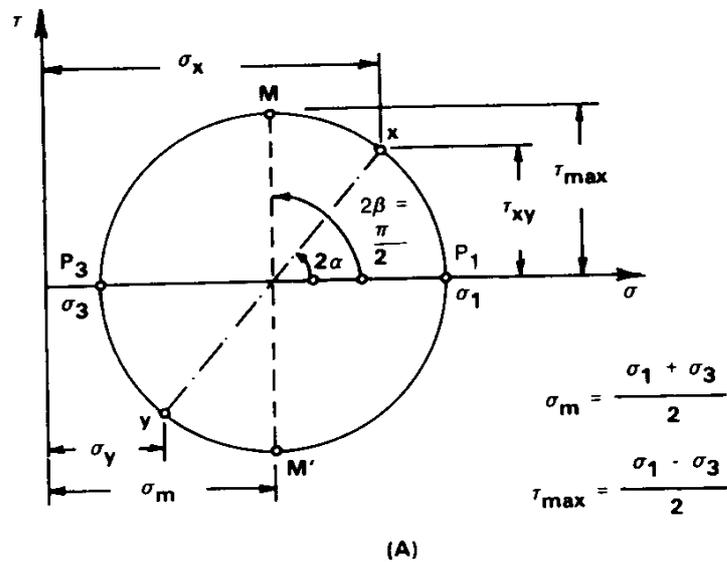


Figura 5.1 Representação do estado de tensões através do Círculo de Mohr

O círculo de Mohr representa as tensões num plano cujos eixos de coordenadas são escolhidos como sendo a tensão de cisalhamento, τ , (ordenadas) e a tensão normal, σ , (abscissa). No plano físico x - y as tensões “principais” são perpendiculares entre si, e na direção das tensões principais a tensão de cisalhamento é zero, como pode ser visto pela Figura 5.1(b). Na representação pelo círculo de Mohr, isto é, no plano τ - σ , a máxima tensão principal σ_1 e a mínima tensão principal σ_3 definem o tamanho do círculo de Mohr (Figura 5.1a). Os sub-índices 1 e 3 são arbitrários e indicam apenas que $\sigma_3 \leq \sigma_2 \leq \sigma_1$.

Como pode ser visto na Figura 5.1, o maior valor da tensão de cisalhamento, $\tau_{m\acute{a}x}$, agindo no plano τ - σ , é dado pelo raio do círculo de Mohr⁽⁵⁻³⁾. Portanto:

$$\tau_{max} = (\sigma_1 - \sigma_3)/2 \tag{5.2}$$

O estado de tensões, que causa deformação plástica, está ilustrado pelo círculo de Mohr de raio k .

Para o estado uniaxial do teste de tração (sem estricção e $\sigma_2 = \sigma_3 = 0$), deformação plástica começa quando (Figura 5.2):

$$\sigma_1 = \frac{F}{A} = \bar{\sigma} = 2k \quad \text{ou} \quad k = \frac{\bar{\sigma}}{2} \tag{5.3}$$

onde F é a força de tração e A é área da seção transversal instantânea do corpo de provas.

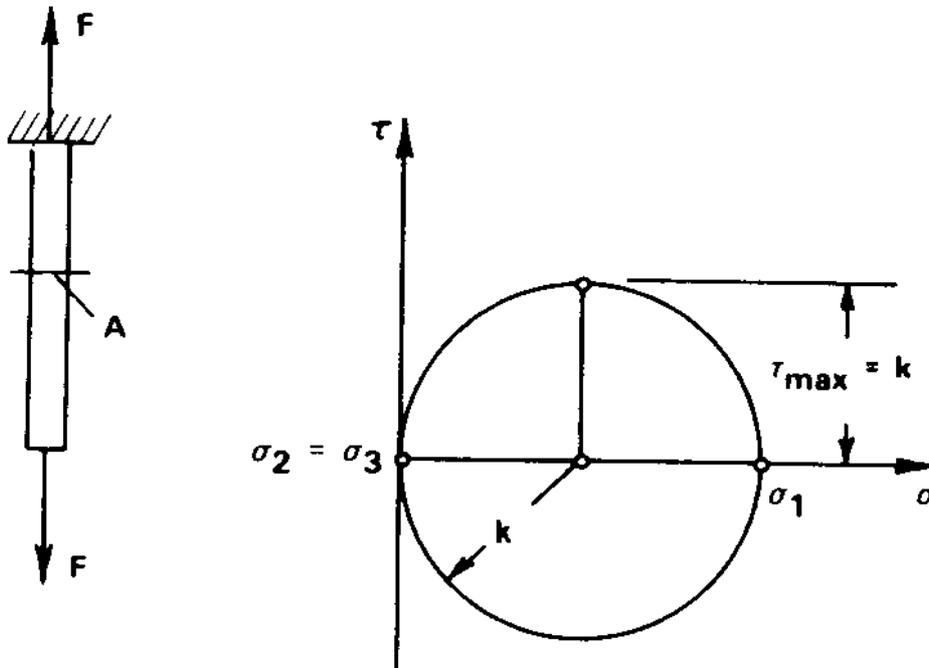


Figura 5.2 - Círculo de Mohr para tensões uniaxiais ^(5.2).

Portanto, o critério de escoamento de Tresca pode ser expresso como:

$$\sigma_1 - \sigma_3 = \bar{\sigma} \tag{5.4}$$

A Equação (5.4) mostra que, de acordo com o critério de escoamento de Tresca, a deformação plástica começa se a diferença entre o máximo (σ_1) e mínimo (σ_3) valor das tensões principais for igual a $\bar{\sigma}$. A Figura 5.1 mostra que a posição do círculo, isto é, a tensão hidrostática, não é importante para a deformação plástica. A tensão principal média é

$$\sigma_m = (\sigma_1 + \sigma_2 + \sigma_3)/3 \tag{5.5}$$

e a pressão hidrostática é:

$$p = -\sigma_m \tag{5.6}$$

5.2 O critério de Von Mises para o escoamento

O critério de von Mises para escoamento considera todas as tensões agindo no corpo em deformação e pode ser expresso como segue. O início da fluência (escoamento) deve depender de uma combinação de tensão normal e de cisalhamento, o qual não muda seu valor quando transformado de uma sistema de coordenadas para outro ^(5.2, 5-4). Em termos de tensões principais o critério de Von Mises é:

$$\left\{ \frac{1}{2} \left[(\sigma_1 - \sigma_2)^2 + (\sigma_2 - \sigma_3)^2 + (\sigma_1 - \sigma_3)^2 \right] \right\}^{1/2} = \bar{\sigma} \tag{5.7a}$$

Em termos gerais:

$$\left\{ \frac{1}{2} \left[(\sigma_x - \sigma_y)^2 + (\sigma_y - \sigma_z)^2 + (\sigma_z - \sigma_x)^2 \right] + 3(\tau_{xy}^2 + \tau_{yz}^2 + \tau_{zx}^2) \right\}^{1/2} = \bar{\sigma} \quad (5.7b)$$

ou quando combinado com a Equação (5.5), a Equação (5.7)a resulta em:

$$\left\{ \frac{3}{2} \left[(\sigma_1 - \sigma_m)^2 + (\sigma_2 - \sigma_m)^2 + (\sigma_3 - \sigma_m)^2 \right] \right\}^{1/2} = \bar{\sigma} \quad (5.7c)$$

Uma interpretação física do critério de von Mises mostra que o lado esquerdo da Equação (5.7c) é proporcional à energia de distorção armazenada pelo material antes do escoamento. A energia de distorção elástica resulta da diferença entre a energia total de deformação elástica menos a energia necessária para alteração elástica de volume. O critério de escoamento diz então que a deformação plástica se inicia quando a energia de distorção elástica atinge um valor crítico. Esta é a razão pela qual este critério é também chamado “Critério da Energia de Distorção”.

5.4 Comparação entre os critérios para escoamento de Tresca e de VonMises

Em tração ou compressão uniaxial, isto é, para $\sigma_1 = F/A$ e $\sigma_2 = \sigma_3 = 0$, a Equação (5.7a) fornece:

$$\sqrt{\frac{1}{2} 2\sigma_1^2} = \bar{\sigma}, \quad \text{ou} \quad \sigma_1 = \bar{\sigma} \quad (5.8)$$

Comparação entre as Equações 5.8 e 5.4 indica que ambos critérios de escoamento, Tresca e von Mises, dão o mesmo resultado sob condições uniaxial de escoamento, ou da Equação (5.3):

$$\sigma_{max} = \frac{1}{2} \sigma_1 = \frac{1}{2} \bar{\sigma} \quad (5.9)$$

Para cisalhamento puro, a situação é diferente. Como pode ser visto na Figura 5.3, cisalhamento puro pode existir quando $\sigma_3 = -\sigma_1$, $\sigma_2 = 0$. O critério de Tresca resulta, usando a Equação (5.4): $\tau_{max} = \sigma_1 = \bar{\sigma}/2$. O critério de von Mises resulta em, da Equação (5.7a):

$$\bar{\sigma} = \sqrt{\frac{1}{2} (\sigma_1^2 + \sigma_1^2 + 4\sigma_1^2)} = \sqrt{3} \sigma_1 \quad (5.10)$$

Além disso, pode-se ver pela Figura 5.3:

$$\tau_{max} = \sigma_1 = \frac{\bar{\sigma}}{\sqrt{3}} = 0.577 \bar{\sigma} \quad (5.11)$$

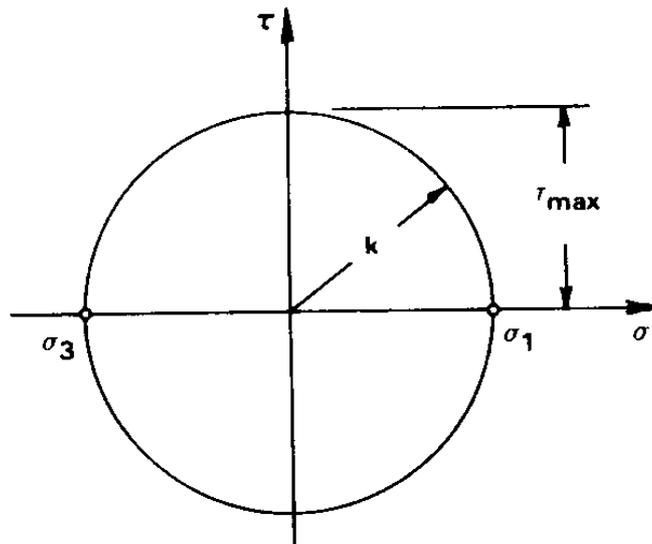


Figura 5.3 - Círculo de Mohr para cisalhamento puro ⁽⁵⁻²⁾

Portanto, no caso de cisalhamento puro existe uma diferença de 15% entre os valores obtidos para τ_{max} em ambos os critérios. Experimentos (com cisalhamento e tração combinados) indicam que o critério de von Mises é melhor (mais próximo da realidade) do que o de Tresca.

Quando as tensões num dado ponto de um metal atingem certo nível de tensão, como especificado pelos critérios de escoamento (Tresca ou von Mises), então a fluência, isto é, a deformação plástica se inicia. A análise de deformação plástica requer uma certa relação entre a tensão aplicada e o campo de velocidades (cinemático como descrito pelos campos de velocidade, $\mathbf{\epsilon}$ e $\dot{\mathbf{\epsilon}}$). Tais relacionamentos existem entre as tensões (nos eixos principais) e as taxas de deformações relativas, como segue:

$$\dot{\epsilon}_1 = \lambda(\sigma_1 - \sigma_m) \tag{5.12a}$$

$$\dot{\epsilon}_2 = \lambda(\sigma_2 - \sigma_m) \tag{5.12b}$$

$$\dot{\epsilon}_3 = \lambda(\sigma_3 - \sigma_m) \tag{5.12c}$$

As equações 5.12a, 5.12b e 5.12c são chamadas “flow rules” ou regras de escoamento ^(5-1, 5-2, 5-4). A variável λ depende da direção do fluxo plástico, da temperatura, do material, da deformação e da taxa de deformação. As regras de escoamento, por exemplo Equações (5.12), podem se expressar na forma:

$$d\epsilon_I = \frac{3}{2} \frac{d\bar{\epsilon}}{\bar{\sigma}} (\sigma_I - \sigma_m) \tag{5.13}$$

onde $\bar{\epsilon}$ e $\bar{\sigma}$ significam a tensão e a deformação relativa efetivas. A Equação (5.13) pode também ser expressa como:

$$\dot{\epsilon}_I = \frac{3}{2} \frac{\dot{\bar{\epsilon}}}{\bar{\sigma}} (\sigma_I - \sigma_m) \tag{5.14}$$

5.5 Potência e energia de deformação

O processo de deformação plástica é irreversível. A energia mecânica, consumida durante a deformação, é transformada principalmente em calor. Neste ponto é interessante considerar a deformação homogênea de um bloco (Figura 5.4). As seguintes relações, mostradas no Capítulo 3, são aqui descritas:

$$\epsilon_h = \epsilon_I = \ln\left(\frac{h}{h_0}\right); \quad \dot{\epsilon}_I = \frac{v \dot{h}}{h}$$

$$\epsilon_2 = \ln\left(\frac{w}{w_0}\right); \quad \dot{\epsilon}_2 = \frac{v_w}{w}$$

$$\epsilon_3 = \ln\left(\frac{l}{l_0}\right); \quad \dot{\epsilon}_3 = \frac{v_l}{l}$$

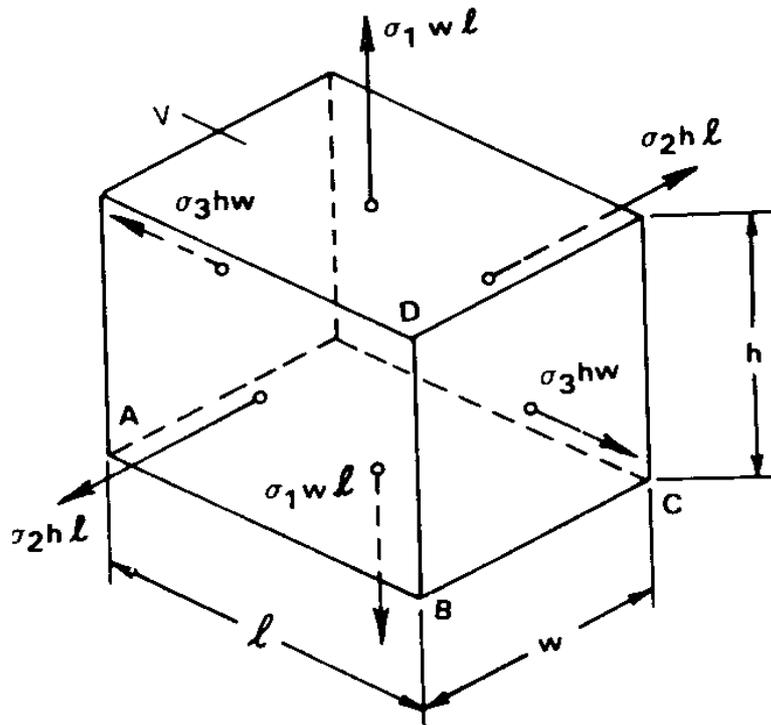


Figura 5.4 - Deformação homogênea de um bloco

De acordo com a Figura 5.4 a potência instantânea de deformação (força vezes velocidade) é dada por:

$$P = \sigma_1 w l v_h + \sigma_2 h l v_w + \sigma_3 w h v_l$$

$$= \sigma_1 w l h \dot{\epsilon}_1 + \sigma_2 w l h \dot{\epsilon}_2 + \sigma_3 w l h \dot{\epsilon}_3$$

$$= (\sigma_1 \dot{\epsilon}_1 + \sigma_2 \dot{\epsilon}_2 + \sigma_3 \dot{\epsilon}_3) V \tag{5.15}$$

onde V é o volume do bloco sendo deformado. A energia de deformação, W, é então:

$$W = V \int_{t_0}^{t_1} (\sigma_1 \dot{\epsilon}_1 + \sigma_2 \dot{\epsilon}_2 + \sigma_3 \dot{\epsilon}_3) dt \tag{5.16}$$

Como $\dot{\epsilon} dt = d\epsilon$, a Equação 5.16 pode também ser escrita como:

$$W = V \left(\int_0^{\epsilon_1} \sigma_1 d\epsilon_1 + \int_0^{\epsilon_2} \sigma_2 d\epsilon_2 + \int_0^{\epsilon_3} \sigma_3 d\epsilon_3 \right) \tag{5.17}$$

5.6 Valores efetivos de deformação e de taxa de deformação

A tensão de escoamento, $\bar{\sigma}$, é determinada por um teste uniaxial (de tração ou compressão homogênea). Sob uma condição de deformação multiaxial, é necessário relacionar o comportamento do material em condições uniaxiais com as condições multiaxiais. Considerando-se um elemento e as direções principais, a energia de deformação, dW , consumida durante o tempo elementar Δt , será:

$$dW = (\sigma_1 d\epsilon_1 + \sigma_2 d\epsilon_2 + \sigma_3 d\epsilon_3) V \tag{5.18}$$

ou dividindo por dt a potência de deformação, P , será:

$$P = \frac{dW}{dt} = (\sigma_1 \dot{\epsilon}_1 + \sigma_2 \dot{\epsilon}_2 + \sigma_3 \dot{\epsilon}_3) V \tag{5.19}$$

A deformação efetiva, $\bar{\epsilon}$, a taxa de deformação efetiva, $\dot{\bar{\epsilon}}$, (ambas indicadas pela barra), são definidas como:

$$dW = \bar{\sigma} d\bar{\epsilon} V \tag{5.20}$$

ou

$$P = \bar{\sigma} \dot{\bar{\epsilon}} V \tag{5.21}$$

As equações 5.19 e 5.21 fornecem:

$$\bar{\sigma} \dot{\bar{\epsilon}} = \sigma_1 \dot{\epsilon}_1 + \sigma_2 \dot{\epsilon}_2 + \sigma_3 \dot{\epsilon}_3 \tag{5.22}$$

Da hipótese de volume constante, no Capítulo 3, mostrou-se que:

$$\dot{\epsilon}_1 + \dot{\epsilon}_2 + \dot{\epsilon}_3 = 0 \tag{5.23}$$

ou

$$\sigma_m (\dot{\epsilon}_1 + \dot{\epsilon}_2 + \dot{\epsilon}_3) = 0 \tag{5.23b}$$

As Equações 5.23 e 5.24 fornecem:

$$\bar{\sigma} \dot{\bar{\epsilon}} = \dot{\epsilon}_1 (\sigma_1 - \sigma_m) + \dot{\epsilon}_2 (\sigma_2 - \sigma_m) + \dot{\epsilon}_3 (\sigma_3 - \sigma_m) \tag{5.24}$$

Usando uma forma do critério de von Mises, a Equação (5.7c), a Equação (5.24) se transforma em:

$$\dot{\bar{\epsilon}} = \frac{\dot{\epsilon}_1 (\sigma_1 - \sigma_m) + \dot{\epsilon}_2 (\sigma_2 - \sigma_m) + \dot{\epsilon}_3 (\sigma_3 - \sigma_m)}{\left\{ \frac{3}{2} \left[(\sigma_1 - \sigma_m)^2 + (\sigma_2 - \sigma_m)^2 + (\sigma_3 - \sigma_m)^2 \right] \right\}^{1/2}} \tag{5.25}$$

Usando ainda as Equações da Plasticidade (5.12a), (5.12b) e (5.12c), as quais fornecem $\sigma_1 - \sigma_m = \dot{\epsilon}_1 / \lambda$, etc., a Equação (5.25) pode ser simplificada na forma:

$$\dot{\bar{\epsilon}} = \sqrt{\frac{2}{3} (\dot{\epsilon}_1^2 + \dot{\epsilon}_2^2 + \dot{\epsilon}_3^2)} \tag{5.26}$$

ou por integração reduz-se a:

$$\bar{\epsilon} = \int_{t_0}^{t_1} \dot{\epsilon} dt \quad (5.27)$$

As Equações (5.20) e (5.27) mostram como calcular a deformação relativa efetiva e taxa de deformação relativa efetiva nas direções principais.

REFERÊNCIAS

- 5-1. Thomsen, E. G., Yang, C. T., and Kobayashi, S., "Mechanics of Plastic Deformation in Metal Processing", The Macmillan Company, New York, 1965.
- 5-2. Lange, K. (editor), "Study Book of Forming Technology" (in German), Vol 1 (Fundamentals), Springer-Verlag, New York, 1972.
- 5-3. Backofen, W. A., "Deformation Processing", Addison-Wesley Publishing Co., 1972.
- 5-4. Johnson, W., and Mellor, P. B., "Engineering Plasticity", Van Nostrand Reinhold Co., London, 1975.

CAPÍTULO 6

ATRITO EM CONFORMAÇÃO DOS METAIS

Na conformação dos metais o fluxo de metal é causado pela pressão transmitida do estampo para o metal sendo deformado. Portanto, as condições de atrito na interface material-estampo influenciam de maneira marcante o fluxo de metal, a formação de defeitos internos e superficiais, as tensões agindo no estampo e a carga e energia requeridas. Existem basicamente três tipos de lubrificação que governam as condições de atrito em conformação dos metais^(6-1, 6-2).

Condições “a seco”, nas quais não existe lubrificação na interface e somente estão presentes camadas de oxidação no estampo ou no componente, agindo como uma camada de separação. Neste caso o atrito é alto e tal situação só é desejada em poucas situações particulares, por exemplo, em laminação a quente de chapas e lingotes e extrusão sem lubrificação de alumínio.

Condições “hidrodinâmicas”, que existem quando uma espessa camada de lubrificante está presente entre o estampo e o componente. Neste caso, as condições de atrito são governadas pela viscosidade do lubrificante e pela velocidade relativa entre estampo e componente. A viscosidade da maioria dos lubrificantes diminui rapidamente com o aumento da temperatura. Conseqüentemente, na maioria dos casos práticos de operações de conformação de alta velocidade, tais como, laminação de fitas e arames, as condições hidrodinâmicas existem somente em determinados regimes de velocidade, onde a temperatura na interface é relativamente baixa⁽⁶⁻²⁾.

Lubrificação “de contorno” é a situação mais amplamente encontrada em conformação dos metais. Aumentos de temperatura na interface e as pressões relativamente altas, normalmente não permitem a presença de lubrificação em regime hidrodinâmico. Lubrificação de contorno, por outro lado, não permite uma análise confiável. Conseqüentemente, a maioria do conhecimento de lubrificação em conformação de metais é empírica, com muito pouca informação baseada em análises.

6.1 Características dos lubrificantes em conformação dos metais

O atrito em conformação dos metais é controlada pelo emprego de lubrificantes apropriados para cada aplicação. Espera-se que o lubrificante tenha certas características e desempenhe algumas, senão todas, as seguintes funções⁽⁶⁻¹⁾:

- Reduzir o atrito de deslizamento entre o estampo e a peça. Isto é alcançado pelo uso de um lubrificante de alta “lubricidade”.
- Agir como uma agente na prevenção da aderência e soldagem da peça no estampo
- Possuir boas propriedades de isolamento, especialmente em forjamento a quente, a fim de reduzir perda de calor da peça para o estampo.
- Ser inerte para prevenir ou minimizar reações entre o estampo e a peça nas temperaturas de forjamento empregadas.
- Não ser abrasivo para reduzir a erosão na superfície do estampo evitando excessivo desgaste.
- Ser livre de componentes poluidores ou venenosos não produzindo gases perigosos ou de odor desagradável.
- Ser facilmente aplicável e removível da peça e do estampo.
- Ser comercialmente disponível a um custo razoável.

Nenhum lubrificante pode preencher todas estas exigências acima e nenhum método sozinho pode avaliá-las todas simultaneamente. Portanto, vários métodos de teste existem para avaliar uma ou mais características de um lubrificante.

6.2 Lubricidade e tensão de cisalhamento de atrito

Na maioria das aplicações em conformação, a lubricidade de um lubrificante é o fator isolado mais significativo, uma vez que ele determina diretamente o atrito na interface, o que por sua vez influencia as tensões, a carga e a energia de forjamento. A fim de se avaliar o desempenho de vários lubrificantes e para poder-se prever as pressões de conformação, é necessário expressar o atrito na interface quantitativamente, em termos de um fator ou coeficiente⁽⁶⁻³⁾. A tensão de cisalhamento de atrito, τ , é normalmente expressa como:

$$\tau = \sigma_n \mu \quad (6.1)$$

ou

$$\tau = f\sigma_n = \frac{m}{\sqrt{3}}\bar{\sigma} \quad (6.2)$$

onde $0 \leq m \leq 1$.

A Equação (6.1) indica que a tensão de atrito de cisalhamento τ é proporcional à tensão normal σ_n na interface estampo/material e μ é o coeficiente de atrito. A Equação (6.2) expressa que τ é dependente da tensão de escoamento do material a ser deformado, $\bar{\sigma}$, e do fator de atrito f ou do fator de cisalhamento m^* . Recentes estudos em mecânica de conformação indicam que a Equação (6.2) representa adequadamente a tensão de cisalhamento de atrito em conformação de metais e oferece vantagens na estimativa do atrito e no desenvolvimento de cálculos de tensão e carga de conformação. Para várias condições de conformação, os valores de m variam como segue:

- $m = 0.05$ a 0.15 para forjamento à frio de aços, ligas de alumínio e cobre usando lubrificantes comuns de sabão fosfatado ou óleo.
- $m = 0.2$ a 0.4 para forjamento à quente de aços, ligas de cobre e alumínio usando lubrificantes a base de grafite (água-grafite ou óleo-grafite)
- $m = 0.1$ a 0.3 para forjamento à quente de ligas de titânio e ligas de alta resistência à alta temperatura usando lubrificantes à base de vidro.
- $m = 0.7$ a 1.0 quando não se emprega lubrificantes, isto é, em laminação à quente de placas ou lingotes e extrusão não lubrificada de ligas de alumínio.

Na determinação do fator de atrito, f , ou do fator de cisalhamento, m , para conformação a quente, além dos efeitos do lubrificantes, os efeitos do resfriamento do estampo ou da transferência de calor da peça aquecida para o estampo frio deve ser considerado. Portanto, os testes de lubrificação usados para determinação dos fatores de atrito devem incluir ambos efeitos de lubrificação e de resfriamento do estampo. Conseqüentemente, em conformação a quente um bom teste deve satisfazer tanto quanto possível os seguintes requisitos:

- O corpo de prova e o estampo devem estar aproximadamente à mesma temperatura encontrada na operação real de conformação
- O tempo de contato entre o corpo de provas e as ferramentas sob pressão deve ser aproximadamente o mesmo que na operação real de interesse.
- A razão entre a área da superfície do componente deformado e aquela da superfície original antes da deformação deve ser a mesma que a da operação em estudo.
- A velocidade relativa entre o material sendo deformado e o estampo deve ter aproximadamente a mesma magnitude e direção que a operação de interesse.

6.3 O teste de compressão do anel

Lubrificação, como definido pelo fator de atrito, f , ou o fator de cisalhamento, m , é mais comumente medido pelo teste do anel⁽⁶⁻⁵⁾. No teste do anel, um corpo de provas em forma de anel com faces planas é comprimido para uma redução conhecida (Figura 6.1).

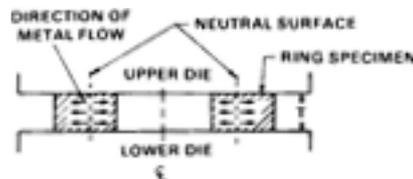


Figura 6.1 - Escoamento do metal no teste de compressão do anel

A mudança no diâmetro interno e externo do anel forjado é bastante dependente do atrito na interface ferramenta/corpo de provas. Se o atrito fosse igual a zero, o anel se deformaria da mesma forma que um disco sólido, com cada elemento fluindo radialmente para fora numa taxa proporcional à sua distância do centro. Com o aumento da deformação, o diâmetro interno do anel diminui se o atrito for alto e aumenta se o atrito for baixo. Portanto, a mudança no diâmetro interno representa um método simples de se estimar o atrito na interface.

O teste do anel tem uma vantagem quando aplicado no estudo do atrito. A fim de se medir o atrito com este teste, a força necessária para deformar o anel e a tensão de escoamento do material do corpo de provas não precisam ser conhecidos.

Desta forma, a interpretação dos resultados do teste é enormemente simplificada. Para obter a magnitude do fator de atrito, o diâmetro interno do anel comprimido deve ser comparado com os valores pré-determinados usando vários valores para o fator de atrito, f , ou fator de cisalhamento, m . Diversas análises teóricas estão disponíveis para este propósito ^(6-3, 6-6, 6-7). Numa destas análises um programa de computador foi desenvolvido para matematicamente simular o fluxo de metal na compressão do anel com abaulamento ou embarilhamento ⁽⁶⁻³⁾. Portanto, as dimensões do anel para várias reduções em altura e diversos valores do fator de cisalhamento, m , podem ser determinados. Os resultados são marcados em um gráfico na forma de “curvas teóricas de calibração”, como as que estão mostradas na Figura 6.2, para anéis tendo razões diâmetro externo(DE):diâmetro interno (DI):Espessura igual a 6:3:2, 6:3:1 e 6:3:0.5.

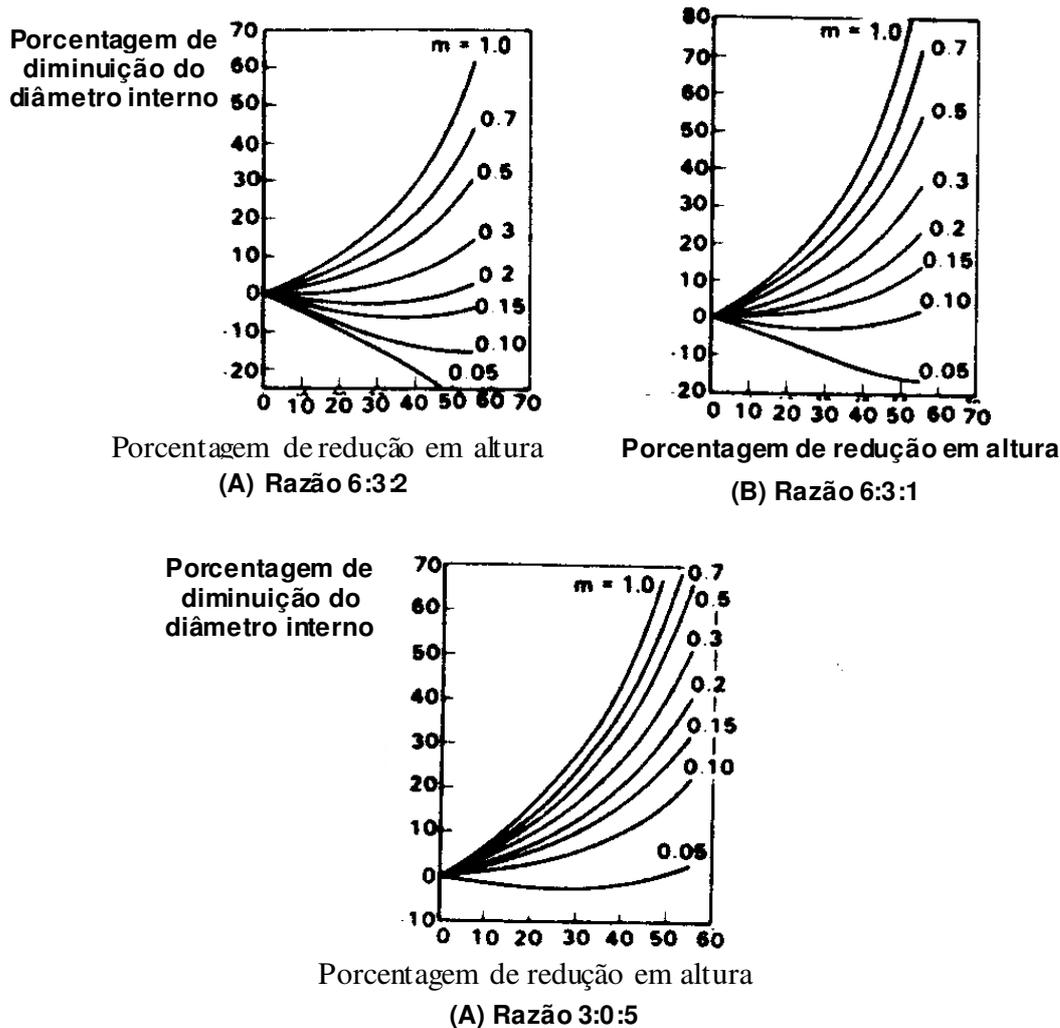


Figura 6.2 - Curvas de calibração teóricas para recalque de anel de acordo com as razões entre DE:DI:espessura.

Os valores de diâmetro interno usados na figura são os valores no ponto de máxima dilatação. Na determinação do valor do fator de cisalhamento m , para uma dada condição experimental, as dimensões medidas (redução de altura e variação no diâmetro interno) são colocadas na figura de calibração apropriada. Desta posição do ponto, em relação às curvas teóricas para vários valores de m , o valor do fator de cisalhamento m , que atuou durante o teste, é obtido.

Em recentes estudos, o teste de compressão do anel foi realizado para diversos materiais em uma prensa mecânica de 500 toneladas com uma velocidade nominal de 90 golpes por minuto e curso total de 254 mm ⁽⁶⁻⁵⁾. Os resultados destes testes estão mostrados na Tabela 6.1. Estes dados não representam os valores ótimos de fator de atrito m , mas ilustra a ordem de grandeza de m encontrado em operações práticas em prensas mecânicas. Dados similares para vários lubrificantes e para forjamento em diferentes máquinas estão disponíveis na literatura ^(6-1, 6-5).

Tabela 6.1 - Valores de fator de cisalhamento, m , obtidos de ensaios com anéis realizados numa prensa mecânica (temperatura da matriz ~ 145 °C com acabamento superficial $Ra \sim 2.45 \mu m$)

| Material | Temperatura do corpo de provas, °C | Fator de cisalhamento (m) | Tempo de contato | Relações do anel (a) | Sistema de lubrificação |
|---------------|------------------------------------|-------------------------------|------------------|----------------------|-------------------------|
| 6061 Al | 426 | 0,4 | 0,038 | 6:3:0,5 | (b) |
| | 426 | 0,31 | 0,047 | 6:3:1 | (b) |
| | 426 | 0,53 | 0,079 | 6:3:2 | (b) |
| Ti-7Al-4-Mo | 955 | 0,42 | 0,033 | 3:1,5:0,25 | (c) |
| | 955 | 0,42 | 0,044 | 3:1,5:1 | (c) |
| | 1750 | 0,7 | 0,056 | 3:1,5:0,25 | (c) |
| 403 SS | 982 | 0,23 | 0,029 | 3:1,5:1 | (c) |
| | 982 | 0,24 | 0,039 | 3:1,5:1 | (c) |
| | 982 | 0,34 | 0,047 | 3:1,5:1 | (c) |
| | 1065 | 0,28 | 0,06 | 3:1,5:1 | (c) |
| | 1120 | 0,35 | 0,06 | 3:1,5:1 | (c) |
| Waspaloy | 1150 | 0,18 | 0,06 | 3:1,5:1 | (c) |
| 17-7PH SS | 1065 | 0,28 | 0,06 | 3:1,5:1 | (c) |
| | 1150 | 0,35 | 0,06 | 3:1,5:1 | (c) |
| Ti-6Al-4V | 927 | 0,3 | 0,06 | 3:1,5:1 | (c) |
| | 955 | 0,46 | 0,06 | 3:1,5:1 | (c) |
| Inconel 718 | 1093 | 0,18 | 0,06 | 3:1,5:1 | (c) |
| | 1150 | 0,33 | 0,06 | 3:1,5:1 | (c) |
| Ti-8Al-1Mo-1V | 955 | 0,27 | 0,06 | 3:1,5:1 | (c) |
| | 982 | 0,27 | 0,06 | 3:1,5:1 | (c) |
| Udimet | 1120 | 0,4 | 0,06 | 3:1,5:1 | (c) |
| 7075 Al | 370 | 0,37 | 0,06 | 5:3:1 | (b) |
| | 426 | 0,31 | 0,06 | 5:3:1 | (b) |

(a) Dimensões dos anéis em polegadas, DE: DI: E; (b) pré-cobertura "Caustic" + cobertura de grafite "Dag 137" (Acheson) sobre o corpo de provas e spray de grafite Deltaforge 43 (Acheson) na matriz; (c) cobertura à base de vidro moído Deltaforge 347 (Acheson) nos corpos de prova e grafite Deltaforge 43 (Acheson) na matriz.

REFERÊNCIAS

- 6-1. Schey, J. A. (editor), "Metal Deformation Processes: Friction and Lubrication", Marcel Dekker, New York, 1970; superseded by Schey, J. A., "Tribology in Metalworking: Lubrication, Friction and Wear", American Society for Metals, Metals Park, OH, 1983.
- 6-2. Altan, T., "Heat Generation and Temperatures in Wire and Rod Drawing", Wire Journal, March 1970, p 54.
- 6-3. Lee, C. H., and Altan, T., "Influence of Flow Stress and Friction Upon Metal Flow in Upset Forging of Rings and Cylinders", Trans. ASME, J. Engr. Industry, Vol 94, No. 3, Aug 1972, p 775.
- 6-4. Male, A. T., and DePierre, V., "The Validity of Mathematical Solutions for Determining Friction from the Ring Compression Test", Trans. ASME, J. Lubrication Technology, Vol 92, 1970, p 389.
- 6-5. Douglas, J. R., and Altan, T., "Flow Stress Determination for Metals at Forging Rates and Temperatures", Trans. ASME, J. Engr. Industry, Feb 1975, p 66.
- 6-6. Avitzur, B., "Metalforming Processes and Analyses", McGraw-Hill, New York, 1968.
- 6-7. Hawkyard, J. B., and Johnson, W., "An Analysis of the Changes in Geometry of a Short Hollow Cylinder During Axial Compression", Int. J. Mech. Sci., 1967, Vol 9, p 163.

CAPÍTULO 7

TEMPERATURAS NA CONFORMAÇÃO DOS METAIS

Nos processo de conformação, ambas deformação plástica e atrito contribuem para a geração de calor. Aproximadamente 90-95% da energia mecânica envolvida no processo é transformada em calor ^(7.1). Em algumas operações de conformação contínua, tais com extrusão e trefilação, efetuadas em altas velocidades, a temperatura aumenta cerca de centenas de graus ^(7.2). Uma parte do calor gerado permanece no material deformado, outra flui para a ferramenta, enquanto uma terceira parte flui para a parte indeformada do componente. As temperaturas desenvolvidas no processo influenciam as condições de lubrificação, a vida das ferramentas e as propriedades do produto final, e, mais significativamente, determina a máxima velocidade de deformação, a qual pode ser usada para produzir bons componentes sem danificar excessivamente as ferramentas. Portanto, a geração de temperatura durante a deformação plástica influencia de maneira significativa a produtividade dos processos de conformação dos metais.

7.1 Geração e transferência de calor nos processos de conformação dos metais

Em conformação dos metais a magnitude e distribuição da temperatura depende principalmente de:

- Da temperatura inicial do materiais e do ferramental
- Da geração de calor devido a deformação plástica e ao atrito na interface estampo/material
- Da transferência de calor entre o material em deformação e o estampo e entre o material e o ambiente (ar ou refrigerante).

Em processos, tais como forjamento e extrusão, onde uma grande quantidade de refrigerante não está presente, a perda de calor para o ambiente, através da radiação e condução, pode ser negligenciada. Portanto, a temperatura média instantânea no metal sendo deformado, θ_A , pode ser estimada por:

$$\theta_A = \theta_S + \theta_D + \theta_F - \theta_T \tag{7.1}$$

onde θ_S é a temperatura inicial do material, θ_D é o aumento de temperatura devido à deformação plástica, θ_F é o aumento de temperatura devido à atrito na interface e θ_T é a queda de temperatura devido à transferência de calor para o estampo.

O aumento de temperatura devido a deformação plástica, θ_D , num intervalo de tempo Δt é dado por:

$$\theta_D = \frac{A \bar{\sigma} \dot{\epsilon} \Delta t}{c \rho} \beta = \frac{\bar{\sigma} \Delta \bar{\epsilon}}{J c \rho} \beta \tag{7.2}$$

onde $\bar{\sigma}$ é a tensão de escoamento do material sendo deformado, $\dot{\epsilon}$ é a taxa de deformação relativa efetiva, $\Delta \bar{\epsilon}$ é a deformação relativa efetiva produzida durante o intervalo de tempo Δt , A é a constante de Joule de equivalência mecânica do calor, c é o calor específico do material sendo deformado, ρ é a densidade do material sendo deformado e β é a fração da energia de deformação transformada em calor ($0 \leq \beta \leq 1$); usualmente, $\beta = 0.95$.

O aumento da temperatura devido à atrito, θ_F , é dado por:

$$\theta_F = \frac{A f \bar{\sigma} v F \Delta t}{c \rho V_a} \tag{7.3}$$

onde, além dos símbolos já descritos, f é o fator de atrito na interface material/estampo, tal que a tensão de cisalhamento à atrito $\tau = f \bar{\sigma}$, v é a velocidade na interface material/estampo, F é a área na interface material/estampo, V_a é o volume sujeito ao aumento de temperatura.

Nas operações de conformação há um gradiente de temperaturas no material e no estampo. As temperaturas são normalmente altas na interface, onde o atrito gera calor, e decrescem para o interior do material e do estampo, como mostrado na Figura 7.1. Em muitas aplicações e para propósitos práticos é suficiente estimar-se a temperatura média no material sendo deformado, negligenciando os gradientes. Neste casos, o material sendo deformado pode ser considerado como sendo fino como uma chapa, com uma temperatura média uniforme, a qual é resfriada entre dois estampos. Em quase todos os processos de conformação o estampo é mais fino do que o material sendo deformado. Desta forma, o balanço de calor dá:

$$-c\rho V_a d\theta = \alpha F (\theta - \theta_I) dt \tag{7.4}$$

onde c é a capacidade térmica (material), ρ é a densidade do material, V_a o volume médio em consideração, θ a temperatura média instantânea do material, α é o coeficiente de transferência de calor entre o material e o estampo, θ_I é a temperatura da superfície de contato do estampo com o material e t é o tempo de resfriamento.

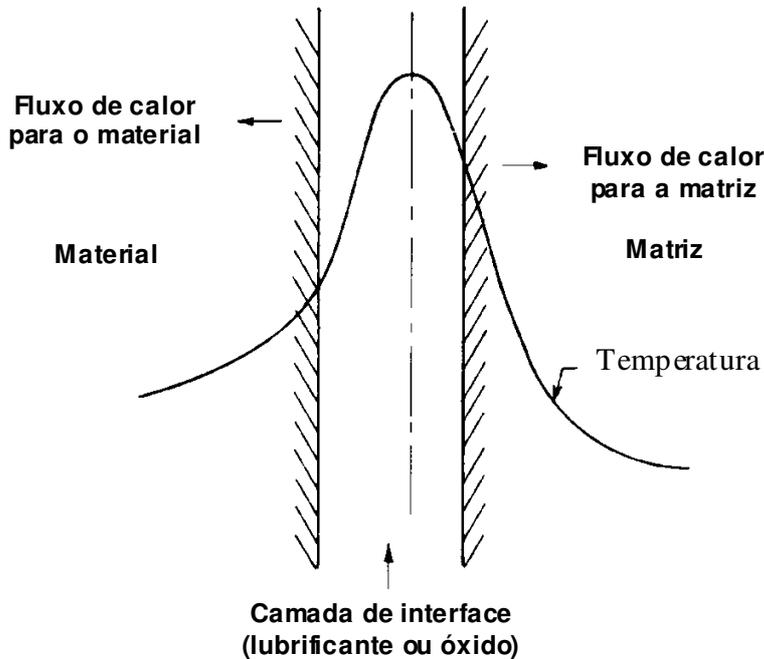


Figura 7.1 - Esquema ilustrando a temperatura na interface material/estampo

A integração da Equação (7.4) fornece:

$$\theta = \theta_I + (\theta_0 - \theta_I) \exp\left(\frac{-\alpha t}{c\rho h}\right) \tag{7.5}$$

onde h é a espessura do material entre os estampos, θ_0 é a temperatura inicial do material.

A Equação (7.5) descreve a variação da temperatura média do material, θ , durante o resfriamento, a qual é assumido como uma placa fina resfriada entre duas superfícies. Esta Equação não inclui qualquer aumento em temperatura devido à deformação e atrito que ocorre durante a conformação. A temperatura média final será:

$$\theta_a = \theta_D + \theta + \theta_F \tag{7.6}$$

onde θ_D , θ e θ_F estão definidos pelas Equações (7.2), (7.5) e (7.3) respectivamente.

Aumentos de temperaturas em operações de conformação para produção de peças individuais como forjamento em matrizes, recalques e repuxos, são bastante diferentes dos aumentos de temperaturas encontrados em deformações quase-contínuas como em trefilação, laminação e extrusão. Em operações como forjamento à frio, o fluxo de metal é cinematicamente em estado não uniforme. A deformação acontece num período de tempo relativamente curto, isto é, de alguns milisegundos até umas poucas frações de segundo. O material em deformação entra em contato com a ferramenta por um curto espaço de tempo. Após a conformação a peça é removida do estampo e este pode se resfriar por um período de tempo relativamente longo, até que um novo tarugo seja novamente carregado.

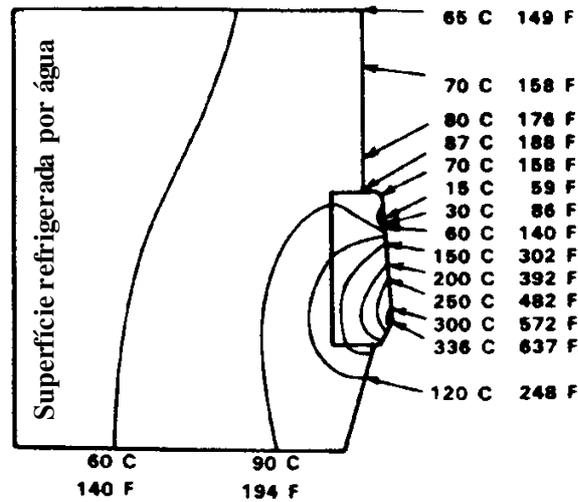


Figura 7.2 - Distribuição de temperatura numa matriz com inserto de carbeto na trefilação de arame e médio carbono de $d_o = 2.921$ mm para $d_f = 2,550$ mm a 426 mm/min ⁽⁷⁻⁴⁾

Em operações contínuas, tais como, trefilação de arames, o fluxo de metal é praticamente uniforme. O material sendo deformado está continuamente em contato com o estampo e há um aumento cumulativo de temperatura neste. Este aumento em temperatura influencia significativamente a vida do estampo, a taxa de produção e a qualidade do material trefilado.

7.2 Temperaturas em operações de conformação quase contínuas

Um bom exemplo de operação de conformação quase-contínua é a trefilação de arames. A Figura 7.2 mostra a distribuição de temperaturas num estampo de trefilação de carbeto para arames, obtida numa operação de trefilação de arame de aço numa velocidade de 426 m/min ⁽⁷⁻⁴⁾. A magnitude e distribuição destas temperaturas dependem do material sendo trefilado, da velocidade e do tipo de refrigerante empregado.

É possível estimar-se as temperaturas que ocorrem na trefilação e em outras operações de conformação através do uso de técnicas numéricas em computadores. Por exemplo, na trefilação usando um estampo simples, o calor é gerado pela deformação e pelo atrito.

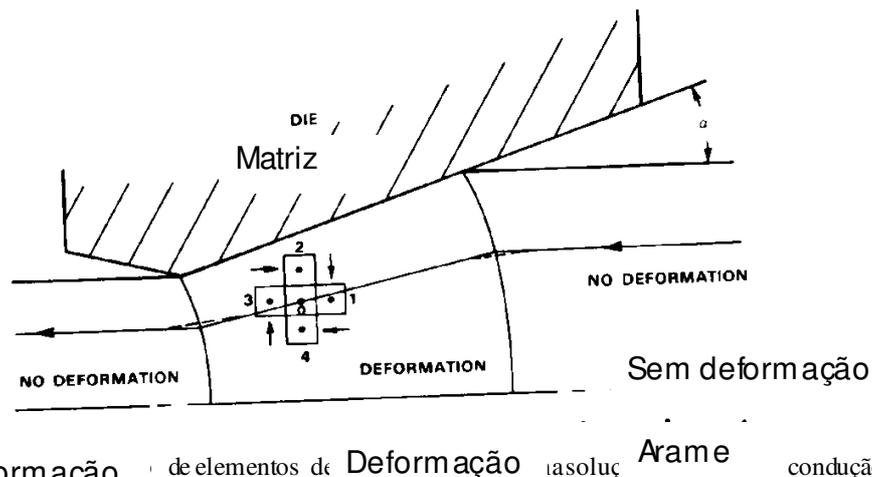


Figura 7.3 - F Sem deformação de elementos de Deformação asoluç Arame condução de calor.

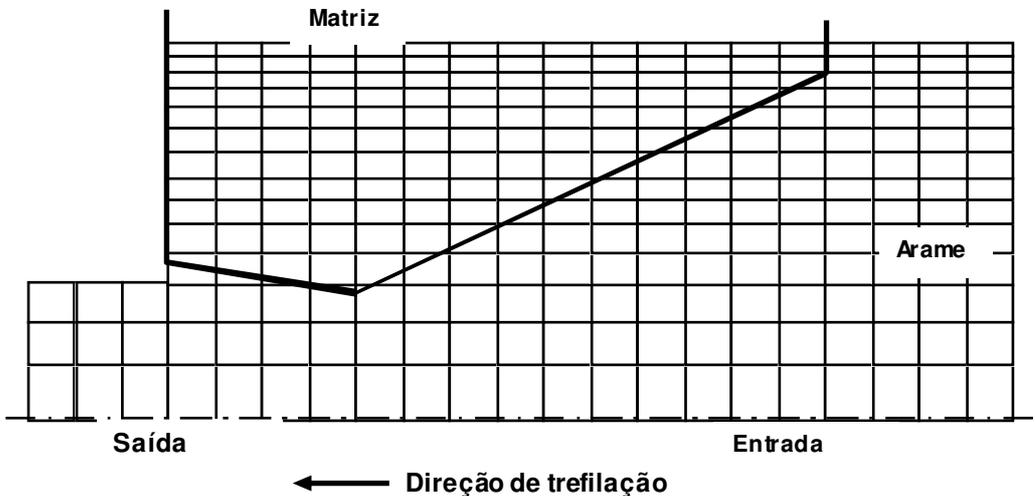


Figura 7.4 - Ilustração do sistema de grade usado para cálculo numérico da temperatura em trefilação.

Parte do calor gerado permanece no material sendo trefilado e parte é transmitida para a matriz e para outras partes do sistema. Portanto, o problema envolve a determinação simultânea do calor gerado, transportado pelo material trefilado e transmitido por condução. O método numérico usado para resolver este problema aproxima a geração de calor e a condução simultânea em dois passos consecutivos durante incrementos iguais de tempo, Δt . A repetição destes dois passos fornece a distribuição de temperatura como função do tempo. Este método proporciona ambos, estado permanente e não-permanente de temperaturas, porque o processo de trefilação é essencialmente simulado numericamente através dos cálculos para elementos de tempo consecutivos Δt , usando um computador ^(7-5, 7-6).

O fluxo de metal na trefilação e a transferência de calor entre um elemento de volume e suas imediações estão ilustrados na Figura 7.3, onde um elemento de volume se move seguindo uma linha de fluxo ⁽⁷⁻⁷⁾. Deformação acontece sob o estampo na zona definida pelas bordas de duas entradas e saídas na zona de deformação plástica. Para um elemento de volume o aumento de temperatura devido à deformação num intervalo de tempo Δt é dado pela Equação (7.2). O aumento de temperatura devido ao atrito é dado pela Equação (7.3).

Durante o intervalo de tempo Δt , transferência de calor por condução acontece entre o elemento de volume "0" (Figura 7.3) e elemento de volume adjacente "1" "2", "3" e "4". A mudança de temperatura no elemento de volume "0" depois da condução durante o intervalo de tempo Δt é calculado através da solução das equações de diferenças para a condução. Para derivar as equações de diferenças para a condução e calcular as mudanças de temperatura local, o material sendo trefilado e o estampo são divididos num sistema de grade (Figura 7.4). O aumento de temperatura e o calor transferido são calculados para cada ponto.

Exemplos de distribuição de temperaturas, calculados para trefilação de arames estão mostrados nas Figuras (7.5) e (7.6) ⁽⁷⁻⁷⁾.

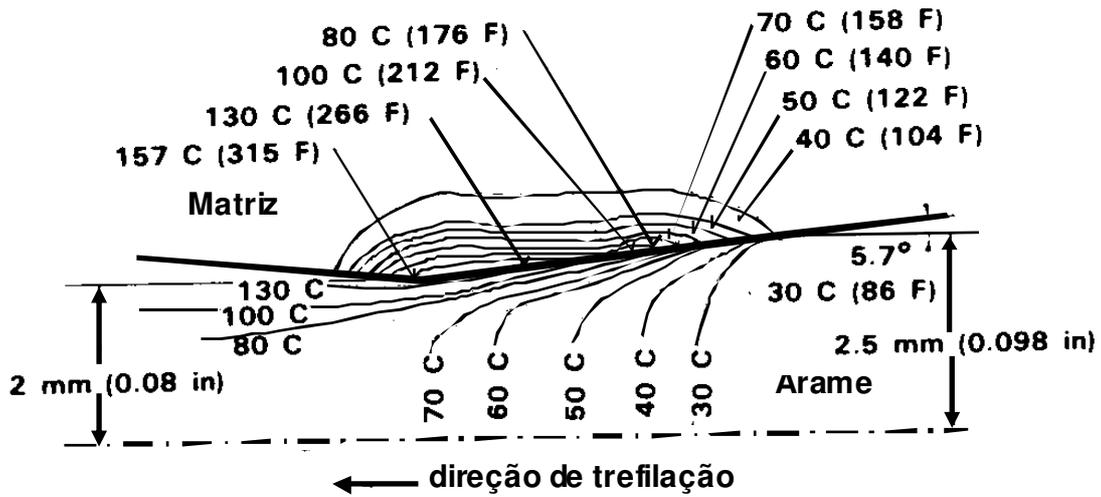


Figura 7.5 - Temperaturas na trefilação de arame de aço de $d_0 = 5.0$ mm para $d_1 = 4.0$ mm à uma velocidade de 60 m/min numa matriz de aço

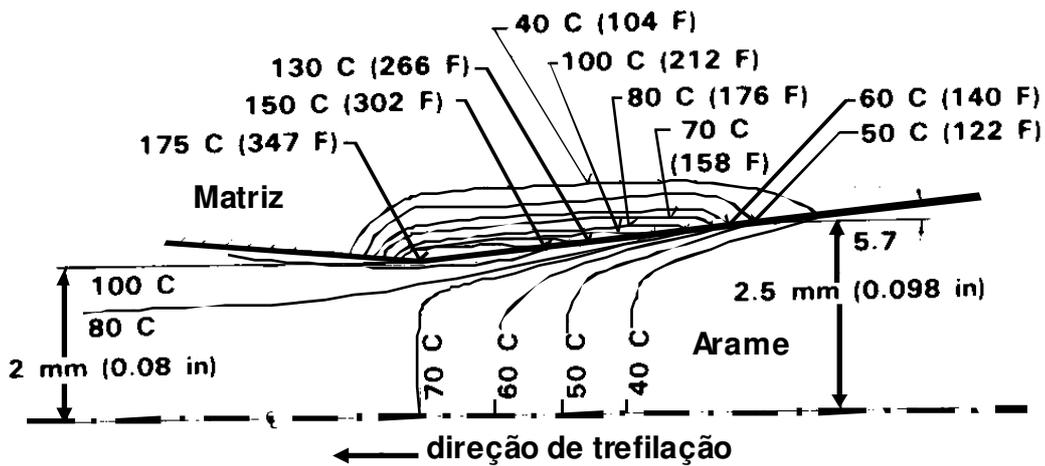


Figura 7.6 - Temperaturas na trefilação de arame de aço de $d_0 = 5.0$ mm para $d_1 = 4.0$ mm à uma velocidade de 120 m/min numa matriz de aço

Nestes dois exemplos, a única variável do processo que muda é a velocidade de trefilação. Pode-se notar que, conforme o esperado, a temperatura da matriz aumenta com o aumento da velocidade de trefilação. Cálculos similares são também efetuados para outros processo contínuos. A Figura 7.7 ilustra as variações do campo de temperaturas na extrusão à quente de uma liga de alumínio em vários estágios do deslocamento do punção, usando uma velocidade constante ⁽⁷⁻⁶⁾.

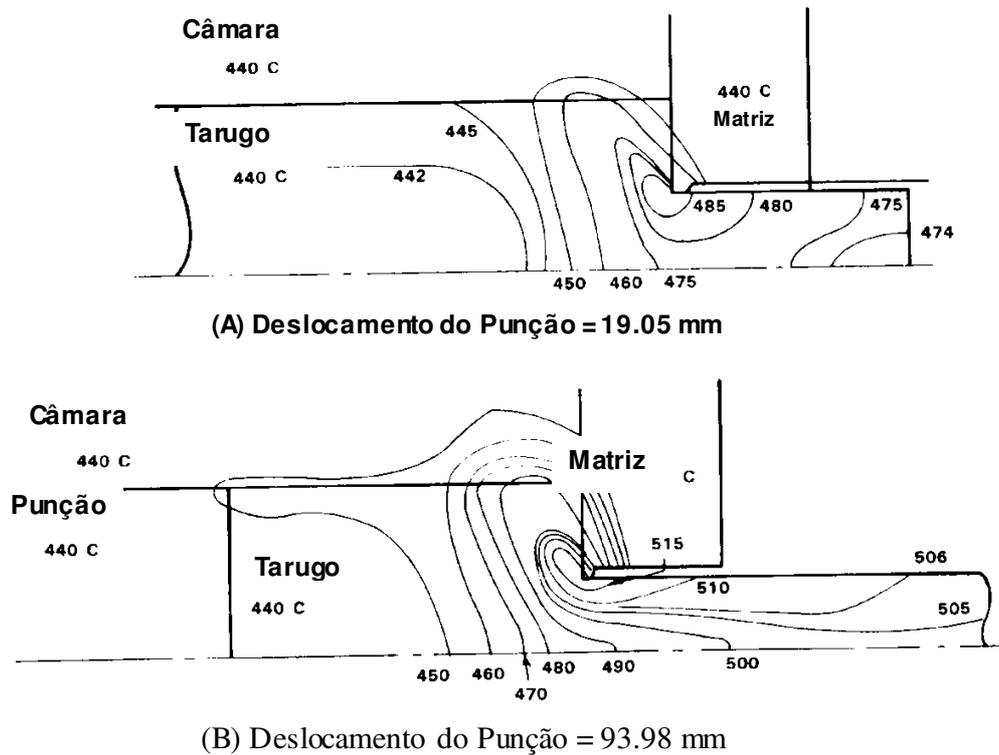


Figura 7.7 - Distribuição de temperaturas na extrusão de uma barra de liga de alumínio 5052 através de uma matriz plana (redução de 5:1, velocidade do punção de 1.88 m/min, diâmetro do tarugo de $\phi = 71$ mm; comprimento 142 mm; temperatura inicial da ferramenta e do tarugo 440°C) ⁽⁷⁻⁶⁾.

7.3 Temperaturas nas operações empregadas em conformação de peças individuais

Nas operações de conformação usadas para produzir peças individuais, o fluxo de metal se encontra num estado não permanente. Contato entre o metal sendo deformado e as partes do estampo é intermitente. A extensão do tempo de contato e a natureza da transferência de calor na interface material/estampo influencia a temperatura de maneira muito significativa. Um exemplo simples de uma operação envolvendo estado não permanente de fluxo de metal é o recalque à frio de um cilindro. Neste processo, da mesma maneira que na trefilação de arame (como discutido anteriormente), um sistema de grade é estabelecido para o cálculo das temperaturas (Figura 7.8). Para vários pontos, indicados na Figura 7.8, as temperaturas foram calculadas para o recalque de um cilindro de aço inicialmente à temperatura ambiente ⁽⁷⁻⁸⁾. Os resultados calculados para os pontos da grade $P_{1,2}$, $P_{1,5}$ e $P_{1,8}$ na Figura 7.8 são comparados com dados experimentais na Figura 7.9.

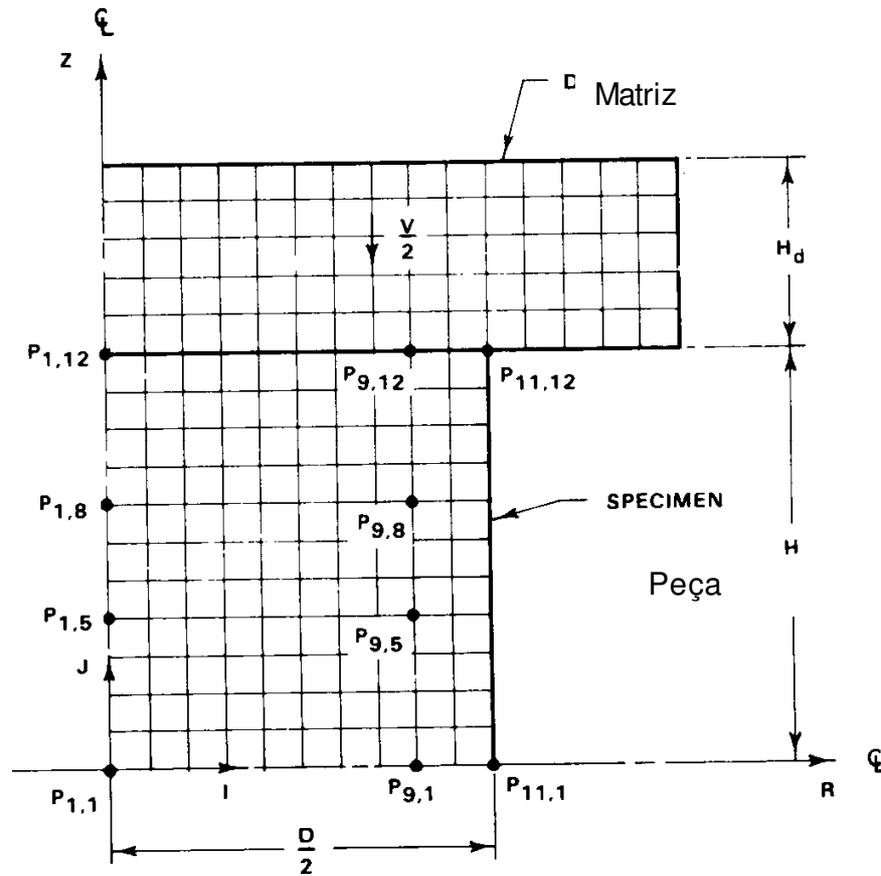


Figura 7.8 - Sistema de grade usado para calcular campos de velocidade e de temperaturas na compressão de um cilindro (7-8)

Como esperado, as temperaturas aumentam com o aumento da deformação. Nas operações de conformação à quente, o tempo de contato sob pressão entre o material deformando e o estampo é o fator mais significativo influenciando as condições de temperatura. Isto é ilustrado na Figura 7.10, onde as curvas de carga-deslocamento são dadas para forjamento de um componente de aço usando diferentes tipos de equipamento de forjamento (7-9). Estas curvas ilustram que, devido à taxa de deformação relativa e efeitos de temperatura, para o mesmo processo de forjamento, diferentes cargas de forjamento e quantidades de energia são requeridos para diferentes máquinas. Para martelos, a carga de forjamento é inicialmente alta devido aos efeitos da deformação relativa, mas a máxima carga é mais baixa do que para outras prensas hidráulicas ou de fricção. A razão para isto, é que numa prensa, a rebarba extrudada se resfria rapidamente, enquanto no martelo a temperatura da rebarba permanece aproximadamente a mesma do tanque inicial.

Desta forma, na conformação a quente, não é somente o material e a forma do componente que determinam o comportamento do fluxo de material e a carga e energia necessárias para a operação, mas também o tipo de equipamento empregado (taxa de deformação e os efeitos de resfriamento do estampo). Escamas na superfície e trincas ou desenvolvimento de pele dupla no material conformado, freqüentemente podem ser explicados pela excessiva taxa de resfriamento das camadas superficiais próximas da interface material/estampo, no componente conformado.

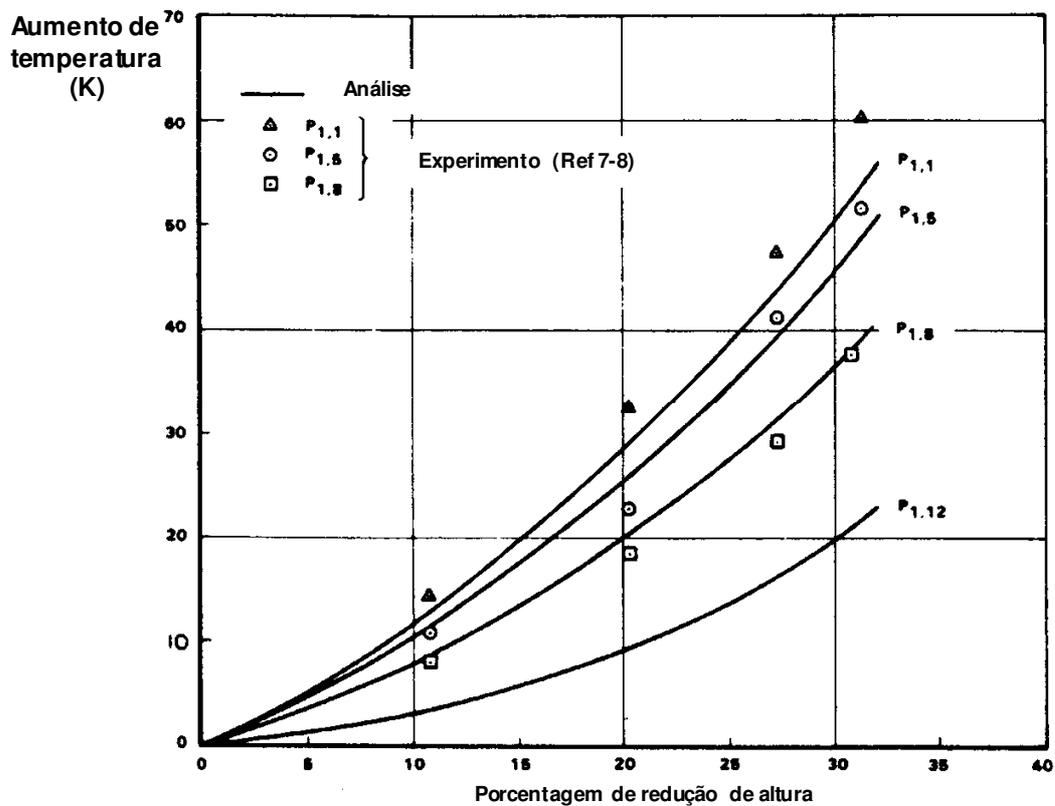


Figura 7.9 - Comparação entre os dados de temperatura prevista na compressão assimétrica com dados experimentais (com referência à Figura 7.8 para localização dos pontos P_{ij} na grade). Material aço AISI 1015, dimensões 20 mm de diâmetro por 30 mm de comprimento na temperatura inicial de 20°C⁽⁷⁻⁸⁾.

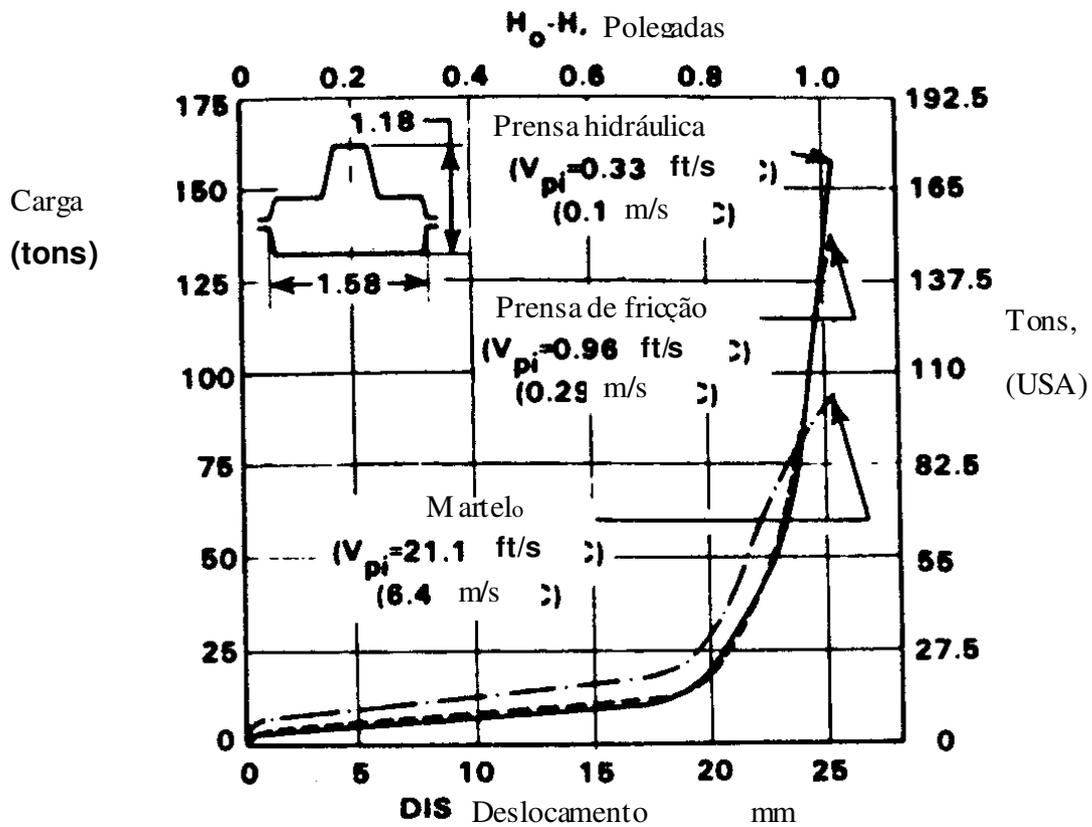


Figura 7.10 - Curvas de carga vs. deslocamento obtidas em forjamento de estampo fechado de um componente assimétrico de aço a 1042 °C em três máquinas diferentes com diferentes velocidades iniciais, V_{pi} ⁽⁷⁻⁹⁾.

Freqüentemente é desejável medir-se a temperatura na interface material/estampo em operações de conformação à quente. Um termopar para medir esta temperatura de interface deve exibir uma resposta muito rápida (uns poucos milisegundos), exatidão, mínima interferência com o fluxo de calor e a habilidade de sustentar altos valores de tensão normal e de cisalhamento, sob altas temperaturas. Tais termopares estão disponíveis e foram usados para medição de temperaturas no forjamento de aços⁽⁷⁻¹⁰⁾. Os resultados estão na Figura 7.11.

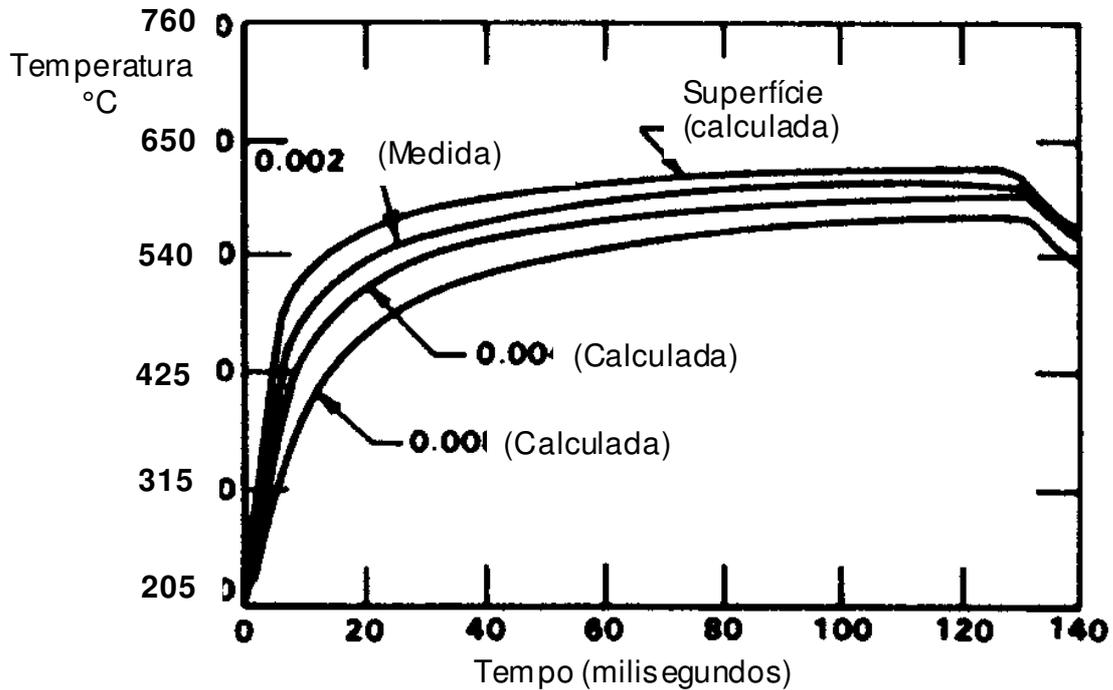


Figura 7.11 - Temperaturas na superfície e em várias profundidades num estampo empregado para forjar aço AISI 1040 sem lubrificante (corpos de prova com 28.5 mm de altura, redução de 75% na altura, temperatura do corpo de provas 1121 °C, temperatura do estampo 220°C) ⁽⁷⁻¹⁰⁾.

Estes resultados indicam claramente que o gradiente de temperatura é muito alto nas imediações da interface material/estampo.

Em outro estudo, termopares de resposta rápida foram fixados na parte inferior plana de um estampo para recalque, mostrado na Figura 7.12. As saídas dos termopares foram registradas por um traçador gráfico com raio de luz assim como a carga para recalcar o corpo de provas e o movimento do cabeçote da prensa como determinado pelo transdutor com potenciômetro de deslocamento ⁽⁷⁻³⁾.

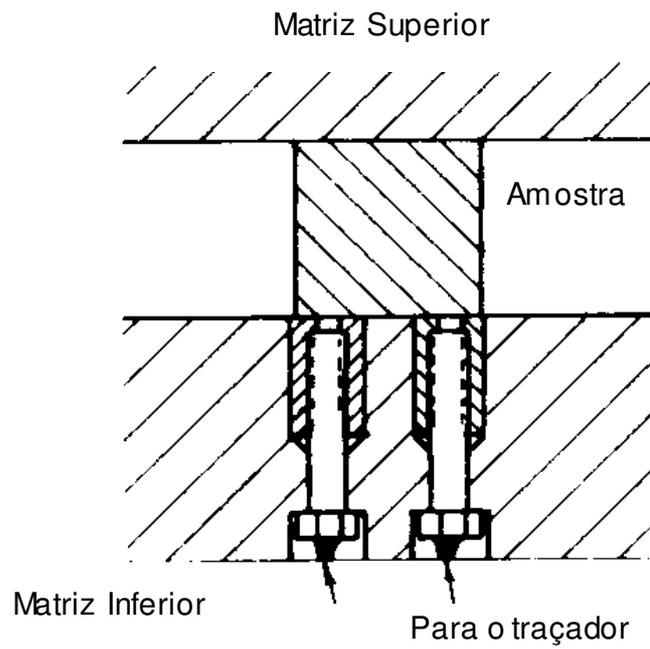


Figura 7.12 - Esquema da seção transversal de um set up para forjamento de recalque mostrando a localização dos tempopares de resposta rápida na parte inferior do estampo ⁽⁷⁻¹¹⁾.

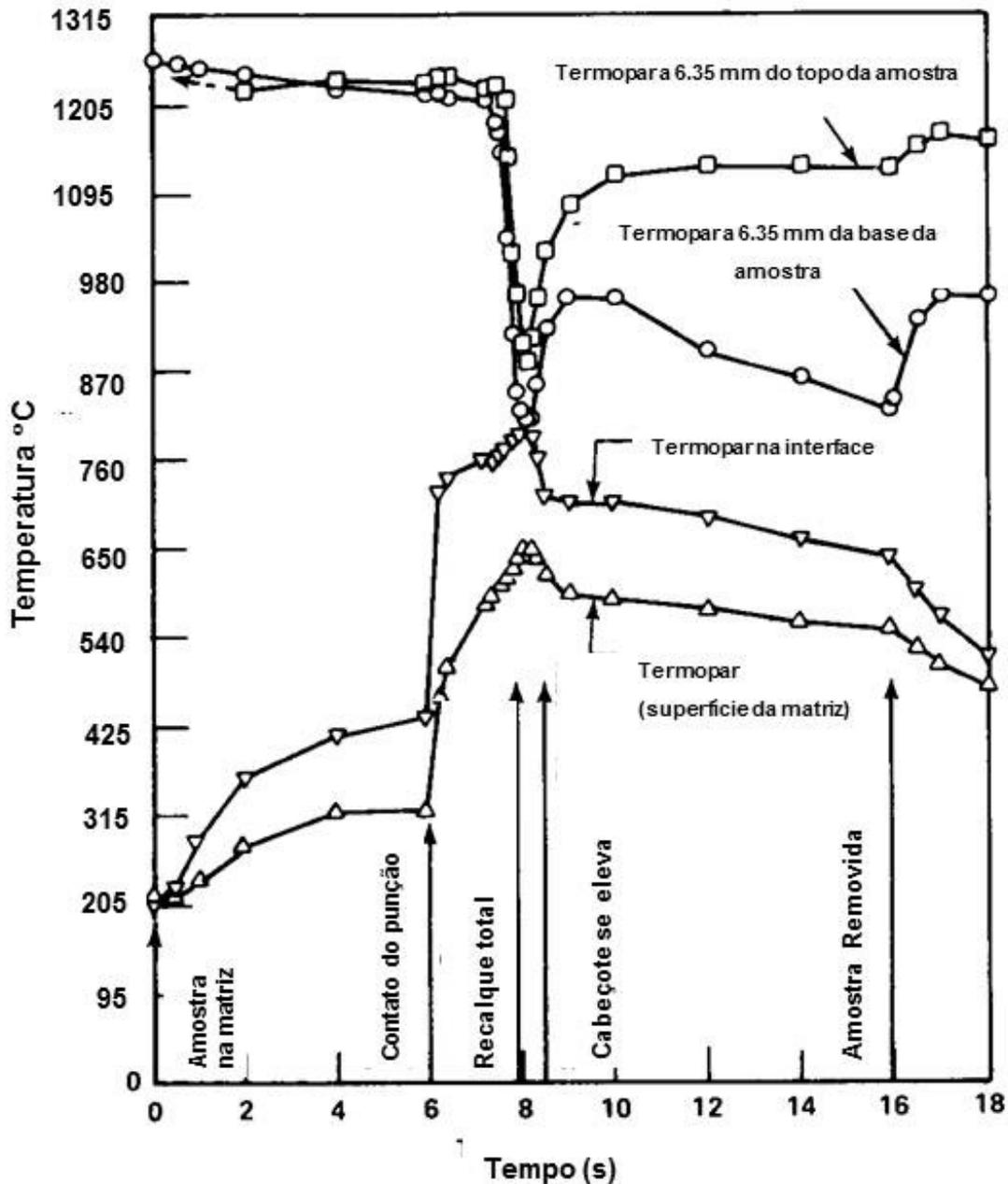


Figura 7.13 Variações de temperatura em diversas localizações no forjamento de AISI 1020 (76.2 mm de diâmetro por 76.2 mm de comprimento) para 25.4 mm de altura a 1230 °C entre estampas a 204 °C

A Figura 7.13 mostra as curvas temperatura-tempo para quatro termopares - dois no estampo e dois na peça forjada de aço AISI 1020 a 1230°C. Estes dados mostram que o termopar na interface (ou isolado) mede a temperatura da superfície da peça, somente sob pressão. Evidentemente, uma alta pressão de contato é necessária para assegurar um bom contato entre a superfície da peça e a junção do termopar. Depois que a carga tenha sido removida, o termopar da superfície indica o decaimento da temperatura enquanto o termopar colocado na peça em forjamento registra um aumento em temperatura na parte inferior do forjado. É interessante que a taxa de queda da temperatura, como indicado pelo termopar na interface, diminui significativamente uma vez que o cabeçote da prensa e conseqüentemente a pressão são removidos. Como pode ser esperado, a taxa de queda da temperatura aumenta ainda mais depois que o forjado é removido do estampo.

O resultado mostrado na Figura 7.13 indica que, durante o forjamento de aço a 1230°C com o estampo inicialmente a 204°C, a temperatura da superfície do estampo pode atingir aproximadamente 650°C numa fração de segundo, enquanto a

temperatura da peça na interface cai para cerca de 790°C. Estes dados concordam com as medidas mostradas na Figura 7.11. Medidas similares realizadas durante o forjamento de liga de alumínio 6061 mostrou essencialmente a mesma tendência de variação de temperatura com o tempo. Com o material a 430°C e o estampo a 204°C, a temperatura da interface atinge 370°C. Estes dados demonstram quão rapidamente a temperatura muda em forjamento à quente especialmente sob pressão de contato.

REFERÊNCIAS

- 7-1. Faren, W. S., and Taylor, G. I., "The Heat Developed During Plastic Extrusion of Metals", Proc. Royal Society, Series A, Vol 107, 1925, pp 422-451.
- 7-2. Lahoti, G. D., and Altan, T., "Prediction of Metal Flow and Temperatures in Axisymmetric Deformation Process", in "Advances in Deformation Processing", by J. J. Burke and V. Weiss (editors), Plenum Publishing Corp., 1978.
- 7-3. Altan, T., and Gerds, A. F., "Temperature Effects in Closed-Die Forging", ASM Technical Report No. C70-30.1, Oct 1970.
- 7-4. Ranger, A. E., "An Electrical Analogue for Estimating Die Temperature During Wire Drawing", J. Iron and Steel Inst., Vol 185, 1957, pp 383-388.
- 7-5. Altan, T., and Kobayashi, S., "A Numerical Method for Estimating Temperature Distributions in Extrusion Through Conical Dies", Trans. ASME, J. Engr. Industry, Vol 90, No. 1, 1968, pp 107-118.
- 7-6. Altan, T., Lee, C. H., and Akgerman, N., "Approximate Calculation of Velocity and Temperature Distributions in Axisymmetric Extrusion and Drawing", in Proc. First North American Metalworking Research Conference, McMaster University, Hamilton, Ontario, Canada 1973, pp 107-127.
- 7-7. Altan, T., "Heat Generation and Temperatures in Wire and Rod Drawing", Wire Journal, March 1970, p 54.
- 7-8. Lahoti, G. D., and Altan, T., "Prediction of Temperature Distributions in Axisymmetric Compression and Torsion". ASME, J. Engr. Materials and Technology, Vol 97, 1975, pp 113-120.
- 7-9. Altan, T., *et al*, "Forging Equipment, Materials and Practices", MCIC Handbook HB-03, Battelle, Columbus, OH, 1973.
- 7-10. Vigor, C. W., and Hornaday, J. W., "A Thermocouple for Measurement of Temperature Transients in Forging Dies", in "Temperature. Its Measurement and Control", Vol 3, Part 2, Reinhold, New York, 1961, p 625.

CAPÍTULO 8

PRINCÍPIOS DAS MÁQUINAS DE CONFORMAÇÃO

De maneira prática, cada processo de conformação está associado a pelo menos uma máquina de conformação (ou equipamento, como também pode ser chamado). A introdução de um novo processo de conformação invariavelmente depende do custo efetivo e da taxa de produção da máquina associada com este novo processo. Portanto, a capacidade desta nova máquina associada com este novo processo é de primordial importância. O engenheiro (industrial, mecânico ou metalúrgico) de conformação deve também ter conhecimento específico de máquinas de conformação para que possa:

- Usar o maquinário existente com maior eficiência
- Definir com exatidão a capacidade existente na fábrica
- Comunicar-se melhor com os fabricantes de máquinas quando modificações forem necessárias
- Se necessário, desenvolver intemamente novos processos e máquinas não existente no mercado.

8.1 Interação entre as necessidades do processo e as máquinas de conformação

O comportamento e as características da máquina de conformação influenciam:

- A tensão de escoamento e a capacidade que o material tem de ser trabalhado
- As temperaturas no material e no estampo, especialmente em processos à quente.
- As necessidades de carga e energia para uma dada geometria de produto e material
- As tolerâncias do componente forjado
- A taxa de produção ou produtividade

A interação entre as principais variáveis da máquina e do processo está ilustrada na Figura 8.1 para processos de conformação realizados em prensas. Como pode ser visto na Figura 8.1 a tensão de escoamento, $\bar{\sigma}$, as condições de atrito na interface e a geometria do forjado (dimensão e forma) determinam (a) a carga, L_p , para cada posição durante o golpe e (b) a energia, E_p , requerida pelo processo de conformação. A tensão de escoamento, $\bar{\sigma}$, aumenta com o aumento da taxa de deformação, $\dot{\epsilon}$, e com o decaimento da temperatura, θ . A magnitude destas variáveis depende do material a ser conformado. As condições de atrito se deterioram com o desgaste do estampo.

Como indicado pelas linhas conectadas ao bloco da temperatura, para uma dada temperatura inicial do tarugo, a variação de temperatura no componente é largamente influenciada por (a) a área da superfície de contato entre o estampo e o material, (b) a espessura e volume do componente, (c) a temperatura do estampo, (d) a quantidade de calor gerado pela deformação e pelo atrito e (e) o tempo de contato sob pressão.

A velocidade de deslizamento sob pressão, V_p , determina principalmente o tempo de contato sob pressão, t_p , e a taxa de deformação relativa, $\dot{\epsilon}$. O número de golpes por minuto em vazio (sem carga), n_0 , a energia da máquina, E_M , e a energia de deformação, E_p , requerida pelo processo influencia a velocidade de deslizamento sob carga, V_p , e o número de golpes sob carga, n_p ; n_p determina o máximo número de componentes produzidos por minuto (isto é, a taxa de produção), desde que a máquina possa ser carregada e descarregada na mesma velocidade).

O relacionamento ilustrado na Figura 8.1 se aplica diretamente a conformação a quente de peças individuais em prensas hidráulicas, mecânicas e prensas de parafuso ou de fricção, o que será discutido à frente.

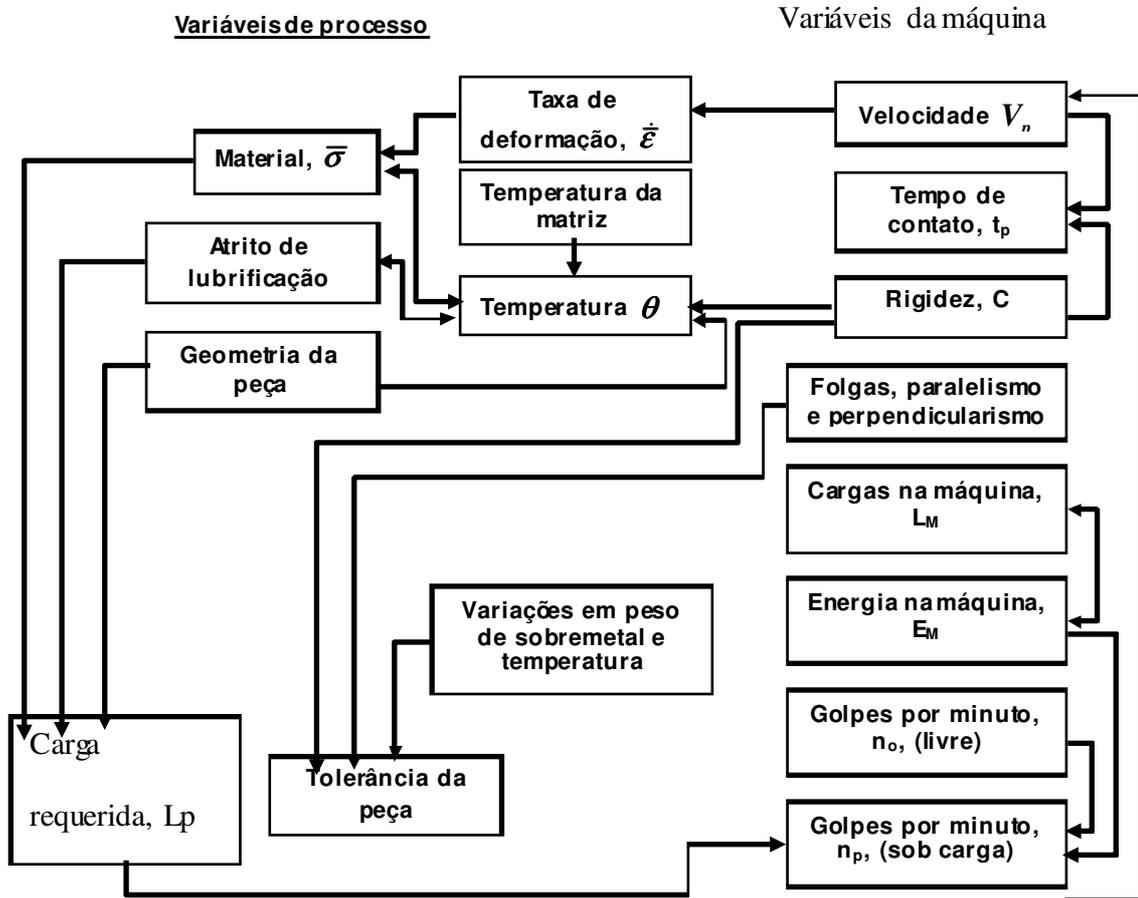


Figura 8.1 - Relacionamento entre variáveis de processo e de máquina no processo de conformação à quente em prensas

Contudo, em princípio, muito deste relacionamento se aplica em outros processo de conformação à quente, tais como extrusão e laminação à quente.

Para um dado material, uma operação específica (tal como forjamento em estampo fechado com rebarba, extrusão direta ou indireta, recalque, dobramento, etc.) requer uma certa variação da carga de conformação sobre o deslocamento de deslizamento (ou golpe). Este fato está ilustrado qualitativamente na Figura 8.2, a qual mostra a curvas carga-deslocamento características de várias operações de conformação. Para uma dada geometria de componente, a carga absoluta variará com a tensão de escoamento do material assim como com as condições de atrito. Na operação de conformação o equipamento deve suprir a máxima carga assim como energia requerida pelo processo.

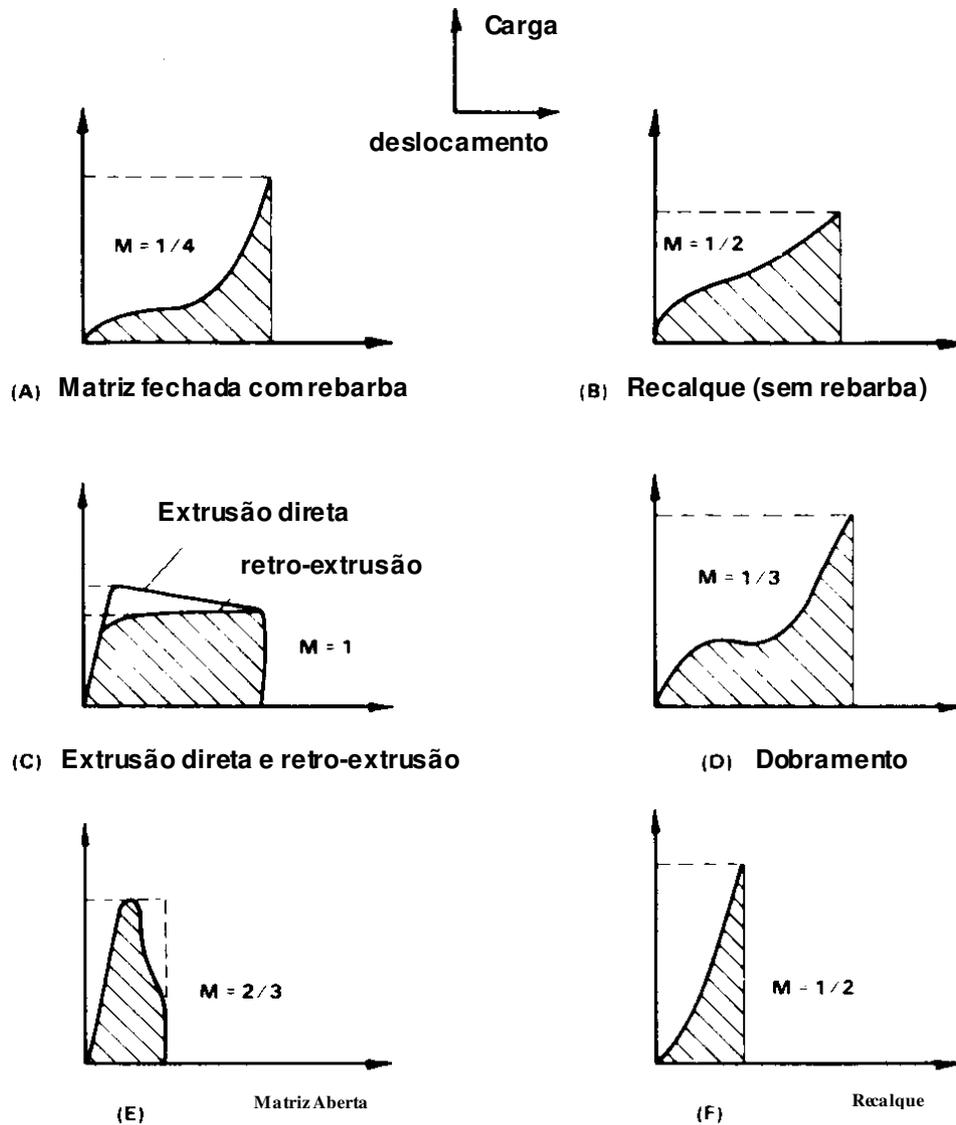


Figura 8.2 - Curvas de carga-deslocamento para várias operações de conformação (energia = carga x deslocamento x M , onde M é um fator característico da operação de conformação) ⁽⁸⁻¹⁾.

8.2 Classificação e características das máquinas de conformação

Os vários processo de conformação discutidos no Capítulo 2, estão associados com um grande número de máquinas de conformação. Estas incluem:

- Rolos de laminação para placas, fitas e formas.
- Máquinas para laminação de perfil partindo de fitas.
- Máquinas para laminação de anéis.
- Laminadores de rosca e máquinas para laminação de superfícies.
- Laminação magnética e por explosão
- Bancadas de trefilação para tubos e barras, arames e barras
- Máquinas para operações de prensagem, isto é, piensas

Entre aquelas listadas acima máquinas de prensagem são as mais largamente empregadas para uma grande variedade de processos. Estas máquinas podem ser classificadas em três tipos:

- Máquinas com carga restrita (prensas hidráulicas)
- Máquinas com golpe restrito (prensas de joelho e excêntricas)
- Máquinas de energia restrita (martelo e prensas de parafusos ou prensas de fricção)

As características significantes de cada uma destas máquinas compreende todos os dados de projeto e desempenho, os quais pertencem ao uso econômico destas máquinas ⁽⁸⁻¹⁾. Estas características incluem:

- Características para carga e energia.
- Características relacionadas com o tempo.
- Características de exatidão.

8.4 Características para carga e energia

8.4.1 Energia disponível, E_M (em m.kg):

É a energia fornecida pela máquina para realizar a deformação durante todo o golpe. A energia disponível, E_M não inclui a energia necessária para vencer o atrito nos mancais e guias, E_f , nem a energia perdida por causa da deformação elástica da estrutura e sistema de acionamento, E_d .

8.4.2 Carga disponível, L_M (em Toneladas):

É a carga disponível no cabeçote para realizar a deformação. Esta carga pode essencialmente ser constante como numa prensa hidráulica, mas pode variar com a posição da guia em relação ao máximo ponto inferior (PMI) como em prensas mecânicas.

8.4.3 Fator de eficiência η :

É determinado dividindo-se a energia disponível para deformação, E_M , pela energia total, E_T , fornecida pela máquina, isto é, $\eta = E_M/E_T$. A energia total, E_T , também inclui (a) as perdas no motor elétrico, E_e , (b) as perdas por atrito nas guias e no sistema de transmissão, E_f e (c) perdas devido à deformação elástica da estrutura da máquina, E_d .

As duas condições seguintes devem ser satisfeitas para completar a operação de conformação: primeiro é que a qualquer tempo durante a operação de conformação,

$$L_M \geq L_P \quad (8.1)$$

onde L_M é a carga disponível na máquina e L_P é a carga requerida pelo processo. A segunda condição é que para um golpe:

$$E_M \geq E_P \quad (8.2)$$

onde E_M é a energia disponível na máquina, E_P é a energia requerida pelo processo.

Se a condição expressada pela inequação (8.1) acima não for satisfeita para uma prensa hidráulica, esta irá travar sem atingir a deformação exigida. Numa prensa mecânica a embreagem irá deslizar e o cabeçote irá travar antes de descer ao ponto morto inferior (PMI). Se a condição expressa pela inequação (8.2) não for satisfeita, o volante irá se desacelerar para velocidades inaceitáveis numa prensa mecânica ou o componente não se formará completamente num único golpe numa prensa de fricção ou num martelo.

8.5 Dados de características dependentes do tempo

8.5.1 Número de golpes por minuto, n :

É a característica mais importante de qualquer máquina, porque ela determina a taxa de produção.

8.5.2 Tempo de contato sob pressão, t_p :

É o tempo durante o qual o componente permanece no estampo sob carga de deformação. Este valor é especialmente importante no fojamento a quente. A transferência de calor entre o componente conformado mais quente e o estampo mais

frio, é mais significativo sob pressão. Estudos extensivos realizados com temperatura em estampos e componentes claramente mostra que o coeficiente de transferência de calor é muito maior sob a pressão de forjamento do que em condições de contato livre. Com o aumento do tempo de contato sob pressão, o desgaste do estampo aumenta. Além disso, o resfriamento do material sendo forjado aumenta a carga de conformação necessária.

8.5.3 Velocidade sob pressão, V_p :

É a velocidade de deslizamento sob carga. Esta é uma variável importante porque ela determina (a) o tempo de contato sob pressão e (b) a taxa de deformação. A taxa de deformação influencia a tensão de escoamento do material sendo conformado e conseqüentemente afeta a carga e a energia requerida no forjamento à quente.

8.6 Dados e características para a precisão

Sob condições em vazio, as superfícies estacionárias e suas posições relativas são estabelecidas por (a) folgas nas guias, (b) paralelismo entre as mesas inferior e superior, (c) planicidade das mesas superior e inferior, (d) perpendicularismo entre o movimento de descida e a mesa inferior e (e) concentricidade das fixações da ferramenta. As características da máquina influenciam as tolerâncias dos componentes conformados. Por exemplo, na retro-extrusão um pequeno desvio de paralelismo das mesas, ou um ligeiro desvio de perpendicularismo entre o movimento e a mesa inferior, resultaria em tensões excessivas de flexão no punção e uma não uniformidade nas dimensões do produto.

Sob condições de carregamento, um desvio no movimento vertical do cabeçote (em relação à vertical, em máquinas com guias verticais, por exemplo) e a deflexão estrutural do cabeçote, particularmente em cargas fora-de-centro, possivelmente resulta em excessivo desgaste nas guias, desvios na espessura das peças conformadas e excessivo desgaste das ferramentas. Para reduzir-se os problemas de carregamento fora-de-centro e de inclinação no movimento vertical do cabeçote, o centro de carga da peça, isto é, o ponto onde está o vetor resultante total da carga de conformação, deveria ser colocado sob o centro de carga da máquina.

Em prensas (hidráulica, mecânica ou de fricção), onde a estrutura e o mecanismo de acionamento estão sujeitos à carga, a rigidez, C , da prensa é uma característica bastante significativa. A rigidez é o quociente entre a carga, L_M , e a deflexão elástica total, d , entre as mesas inferior e superior da prensa., isto é:

$$C = L_M/d \quad (8.3)$$

Em prensas mecânicas, a deflexão elástica total, d , inclui a deflexão da estrutura da prensa (~25 a 35% do total) e a deflexão do mecanismo de acionamento (~65 a 75% do total). A principal influência da rigidez, C , no processo de conformação pode ser resumida como segue:

- Sob condições idênticas de carga de conformação, L_M , a energia de deflexão, E_d , isto é, a energia elástica armazenada na prensa durante o crescimento da carga, é menor para uma prensa mais rígida (maior C). A energia de deflexão é dada por:

$$E_d = dL_M/2 = L_M^2/2C \quad (8.4)$$

- Quanto maior a rigidez, menor a deflexão da prensa. Conseqüentemente, a variação na espessura devido às mudanças no volume ou na temperatura do tauco são também menores numa prensa mais rígida.
- A rigidez influencia a curva de velocidade-tempo sob carga. Uma vez que uma máquina menos rígida gasta mais tempo para exercer e remover a pressão, o tempo de contato sob pressão, t_p , é maior. Este fato contribui para a redução do tempo de vida da ferramenta de conformação à quente.

A rigidez da prensa é aumentada através do uso de componentes maiores no projeto. Portanto, maior rigidez em prensas está diretamente relacionada com aumento de custos e não deve ser especificado a menos que possa ser justificado pelos ganhos em tolerância dos componentes ou em vida de ferramenta.

REFERÊNCIAS

- 8-1. Altan, T., *et al.*, "Forging Equipment, Materials and Practices", Metals and Ceramics Information Center, HB03, 1973.
- 8-2. Kienzle, O., "Characteristics of Data in Machine Tools for Closed-Die Forging" (in German), Werkstattstechnik, Vol 55, 1965, p 509.
- 8-3. Kienzle, O., "The Characteristic Data on Presses and Hammers" (in German), Werkstattstechnik and Maschinenbau, Vol 43, 1953, p 1.

CAPÍTULO 9

PRENSAS E MARTELOS PARA CONFORMAÇÃO A QUENTE E A FRIO DE PEÇAS

Preensas e martelos são largamente empregados em conformação a quente e a frio de peças individuais. O entendimento dos fundamentos operacionais destas máquinas básicas é bastante útil na seleção e otimização do uso de todos os tipos de equipamentos e máquinas de conformação de metais.

Existem basicamente três tipos de prensas: Hidráulica, mecânica e de fuso ou fricção. Estas máquinas são usadas para forjamento à quente e à frio, extrusão à frio, conformação de chapas e cunhagem. Martelos são de uso mais limitado e são empregados mais para forjamento a quente, cunhagem, e algumas operações de conformação de chapas⁽⁹⁻¹⁾.

9.1 Prensas hidráulicas

A operação de prensas hidráulicas é relativamente simples e é baseada no movimento de um pistão hidráulico guiado por um cilindro^(9-2 a 9-4). Prensas hidráulicas são essencialmente máquinas de carga restrita, isto é, sua capacidade para realizar uma operação de conformação é limitada principalmente pela máxima carga disponível. Os seguintes aspectos importantes são oferecidos pelas prensas hidráulicas:

- Nas prensa hidráulicas de acionamento direto, a máxima carga está disponível em qualquer ponto durante o golpe do martelo. Nas prensas de acionamento cumulativo, a carga disponível diminui ligeiramente dependendo do curso do martelo e das características de carga-deslocamento do processo de conformação.
- Uma vez que a carga máxima está disponível durante o curso total, uma relativamente alta quantidade de energia está disponível para deformação. Este é o motivo principal pelo qual prensas hidráulicas servem de maneira ideal para operações do tipo extrusão que requerem uma quase constante carga durante todo o percurso.
- Dentro da capacidade de uma prensa hidráulica, a máxima carga pode ser limitada para proteger as ferramentas. Não é possível exceder uma determinada carga fixada, devido à uma válvula de retorno limitando a carga disponível para o cilindro.
- Dentro dos limites da máquina, a velocidade de deslocamento do cabeçote pode ser variada continuamente durante o curso total. Controle adequado da velocidade com relação à pressão de conformação e à temperatura. Este aspecto de controle pode oferecer uma considerável vantagem na otimização dos processos de conformação.

9.2 Sistemas de acionamento para prensas hidráulicas

As características operacionais de uma prensa hidráulica são essencialmente determinadas pelo tipo e projeto de seu sistema de acionamento hidráulico. Como mostrado na Figura 9.1, dois tipos de sistema de acionamento hidráulico dão diferentes características de tempo-deslocamento^(9-5, 9-6):

9.3 Prensa com sistema de acionamento direto

Usualmente emprega óleo hidráulico como meio de trabalho. Para projetos mais antigos de prensas hidráulicas, no início do curso descendente o cabeçote superior cai sob influência da gravidade e o óleo é drenado de um reservatório para o cilindro superior através de sucção. Quando o estampo superior toca a peça, a válvula entre o cilindro e o reservatório é fechada e a bomba começa a aumentar a pressão no cilindro superior. Este modo de operação resulta em relativamente longos tempos de contato entre o estampo e o material sendo conformado. Como ilustrado na Figura 9.1b, durante o curso descendente nas

pressas mais modernas de acionamento direto uma pressão residual é mantida nos cilindros de retorno ou na linha de retorno através da válvula de alívio de pressão. Portanto, o estampo superior é forçado para baixo contra uma pressão e o tempo de contato sem pressão, inerente na queda livre, é eliminado. Quando o golpe da prensa é completado, isto é, quando o martelo atinge uma posição pre-determinada, ou quando a pressão atinge um certo valor, a pressão do óleo no cilindro do cabeçote é aliviada e desviada para levanta-lo.

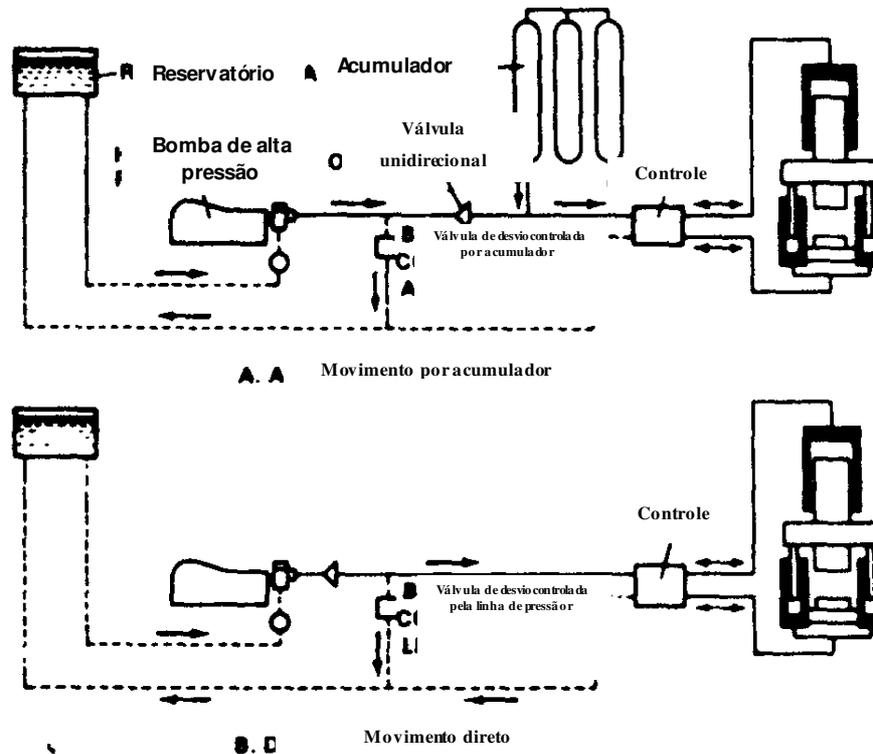


Figura 9.1 - Ilustração do esquema de acionamento de prensas hidráulicas (9-1).

9.4 Prensa com acumulador

Normalmente empregam emulsão de óleo-água como meio de trabalho e usam nitrogênio, vapor d'água, ou acumuladores carregados de ar comprimido para manter o meio sob pressão. A seqüência de operações é essencialmente similar àquela descrita para prensas de acionamento direto exceto que a pressão sobe por meio de uma emulsão de óleo-água nos acumuladores. Conseqüentemente, a taxa de penetração, isto é, a velocidade do martelo sob carga, não é diretamente dependente das características da bomba e pode variar dependendo da pressão no acumulador, da compressibilidade do meio de pressão e da resistência da material a ser deformado. No final do curso de deformação, à medida que a deformação prossegue, o meio de pressão se expande, a força demandada para deformar o material aumenta, a velocidade de penetração e a carga disponível no cabeçote diminuem.

Em ambos acionamentos, direto ou por acumulador, à medida que a pressão cresce e o meio de pressão é comprimido, ocorre uma certa diminuição na taxa de penetração. Esta diminuição é mais acentuada nas prensas de acionamento direto por óleo, principalmente porque o óleo é mais compressível do que a emulsão de água.

A aproximação e velocidade inicial de deformação são mais altas nas prensa de acionamento com acumulador. Isto melhora as condições de conformação à quente devido à redução do tempos de contato, porém o desgaste nos elementos hidráulicos do sistema também aumentam. Problemas de vedação são de alguma maneira menos severos nos sistema de acionamento direto com óleo, e o controle e acionamento nas operações manuais são aproximadamente os mesmos para ambos os tipos de acionamento.

Do ponto de vista prático, numa nova instalação, a escolha entre acionamento direto ou com acumulador é decidida pela economia de operação. Usualmente, o acionamento com acumulador é mais econômico se o sistema de acumuladores pode ser usado por diversas prensas, ou se prensa de grande capacidade (10.000 até 50.000 toneladas) são consideradas. A estrutura de uma prensa hidráulica deve suportar toda a carga de conformação exercida pelo cilindro hidráulico sobre a mesa da prensa. A capacidade de carga da estrutura é atingida pelo uso diversos tipos de estrutura tais como fundida (ou soldada) pré-tensionada pelo forjamento de barras entrelaçadas, ou placas laminadas montadas por grandes pinos transversais. Como pode ser visto na Figura 9.2, os dois principais tipos de construção de prensas são chamados de projetos “pull-down” e “push-down”⁽⁹⁻⁷⁾.

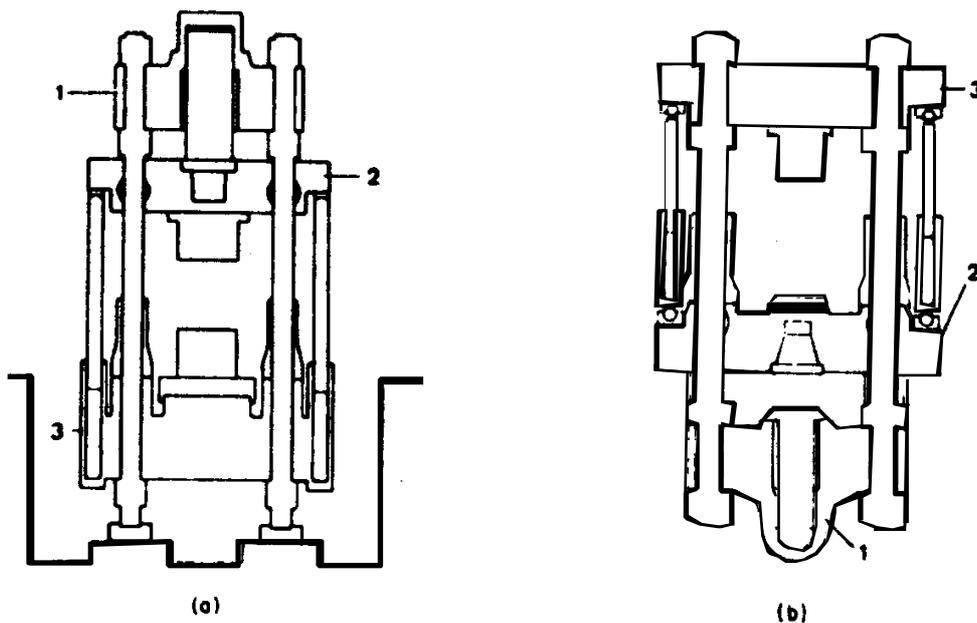
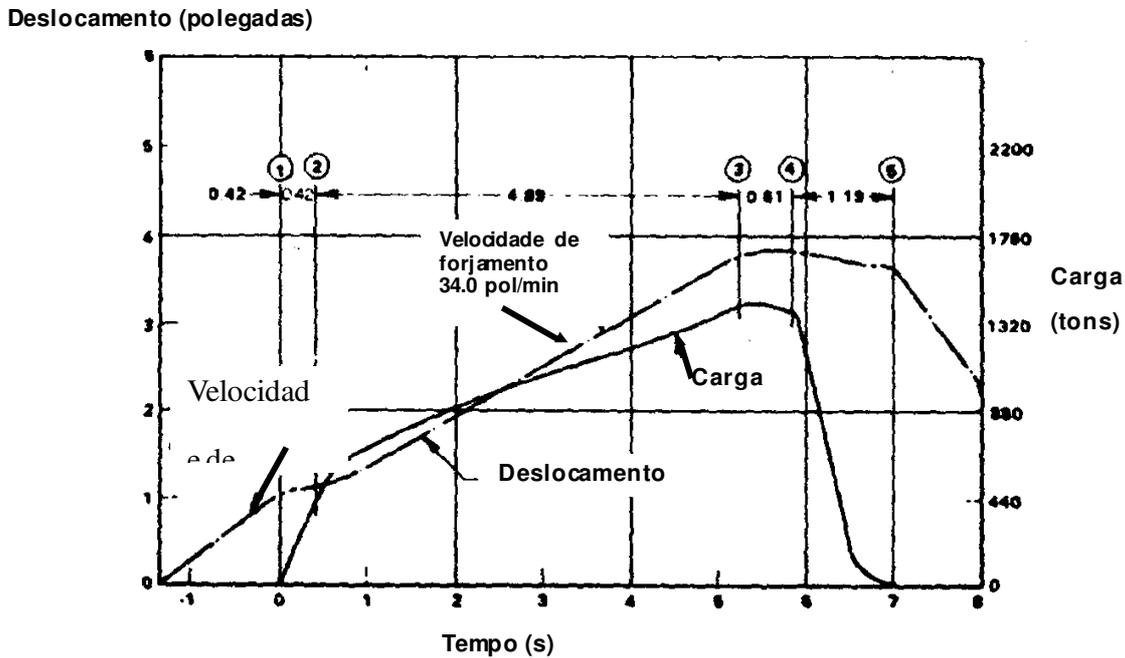


Figura 9.2 - Esquema ilustrando os dois tipos de acionamento de prensa hidráulicas. (a) acionamento “push-down”: 1 - cabeça transversal com cilindro estacionário, 2 - estrutura do pistão-cabeçote, 3 - mesa de prensagem estacionária com cilindro de retorno. (b) acionamento “pull-down”: 1 - Cilindro-estrutura móvel, 2 - mesa de prensagem com cilindro de retorno, 3 - Cabeçote móvel⁽⁹⁻¹⁾.

O projeto convencional de “push-down” é freqüentemente selecionado para prensas de quatro colunas de todos os tamanhos. O cilindro do cabeçote e a placa de base são rigidamente conectadas por quatro colunas que suportam toda a carga e simultaneamente guiam a estrutura do pistão-cabeçote. Consideráveis deflexões são exibidas sob ação de cargas fora-de-centro. Este tipo de prensa requer um alto pé direito de oficina. No projeto “pull-down”, a placa de base se apoia na fundação. O cilindro do cabeçote, localizado abaixo do nível do chão, está rigidamente conectado às colunas da prensa. Este conjunto é móvel e guiado pela placa na base. O centro de gravidade da prensa é baixo, aproximadamente ao nível do chão e a rigidez estática e dinâmica da prensa é aumentada por esta razão. As prensas do tipo “pull-down” são particularmente indicadas para instalações em prédios de baixo pé direito. A maior parte do equipamento hidráulico e auxiliar podem então ser acondicionados abaixo do nível do piso. Este arranjo é bastante favorável para sistema de acionamento direto por óleo, uma vez que minimiza o risco de incêndio e reduz os comprimentos de tubos entre a bomba e os cilindros hidráulicos.



1 pol = 25.4 mm

Figura 9.3 - Curvas de deslocamento e carga versus tempo obtidas em uma prensa hidráulica de 2500 toneladas recalando diretamente (1) início de deformação, (2) início do tempo de espera, (3) fim da deformação, (4) espera antes do alívio de pressão, (5) remoção do punção.

9.5 Características das prensas hidráulicas

Nas prensas hidráulicas com sistema de acionamento direto, a máxima carga de prensagem é estabelecida pela capacidade de pressão da bomba e esta está disponível durante todo o curso da prensa. Portanto, prensas hidráulicas são idealmente indicadas para operações do tipo extrusão requerendo grandes quantidades de energia. Com o adequado dimensionamento do sistema de pressão, uma prensa de sistema de acionamento com acumulador exibe somente uma ligeira redução na carga de prensagem disponível à medida que a operação de conformação acontece.

Em comparação com o sistema de acionamento direto, o sistema com acumulador normalmente oferece altas velocidades de aproximação e penetração e curto tempo de contato antes do início da deformação. No entanto, o tempo de permanência no fim do curso e antes do alívio da carga é maior em sistemas com acumulador. Isto é ilustrado nas Figuras 9.3 e 9.4, onde as variações de carga e deslocamento são dadas para um processo de conformação usando uma prensa hidráulica de 2500 toneladas equipada com sistema de acumulador ou de acionamento direto.

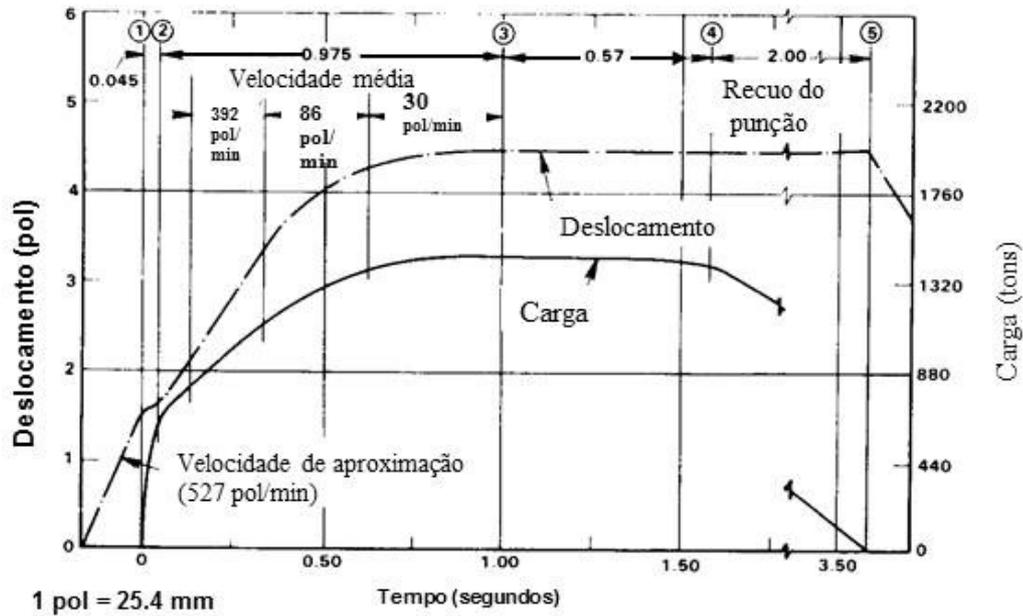


Figura 9.4 - Curvas de carga/deslocamento vs. tempo obtidas em uma prensa hidráulica de 2500 toneladas recalando com sistema de acionamento com acumulador: (1) início de conformação, (2) tempo de contato inicial, (3) fim da conformação, (4) contato antes do alívio da carga, (5) leantamento do martelo.

9.6 Prensas com sistema biela-manivela e excêntricas

O sistema de acionamento empregado na maioria das prensa mecânicas (biela-manivela ou excêntrico) é baseado no mecanismo de biela-manivela que transforma movimento circular em linear recíproco. O eixo excêntrico é conectado, através de um sistema de embreagem e freio, diretamente ao volante (Figura 9.5).

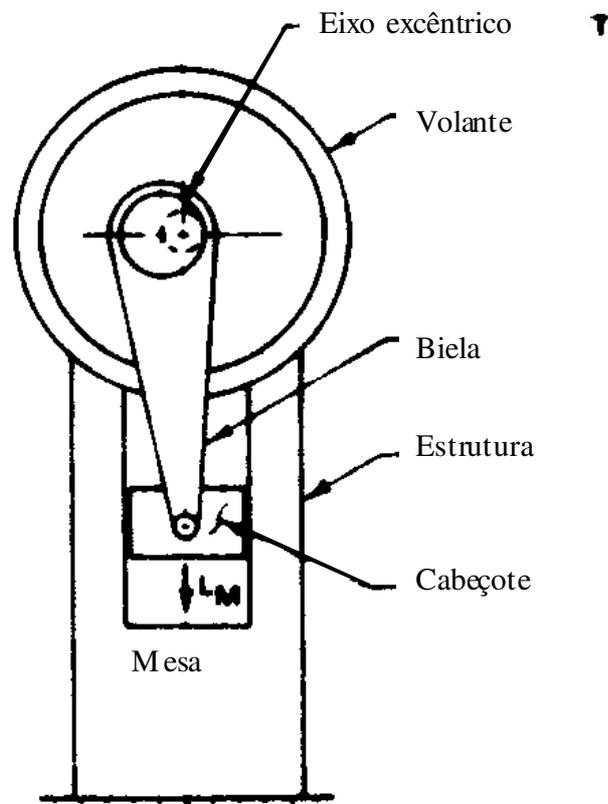


Figura 9.5 - Esquema de uma prensa mecânica com sistema de acionamento por excêntrico (embreagem e freio sobre o eixo excêntrico)

Em projetos para grande capacidade, o volante está localizado num eixo intermediário, o qual aciona o eixo excêntrico através de engrenagens (Figura 9.6). O torque constante da embreagem, M , está disponível no eixo excêntrico, o qual transmite o torque e a energia do volante para o cabeçote através da biela (pitman arm), como ilustrado na Figura 9.6.

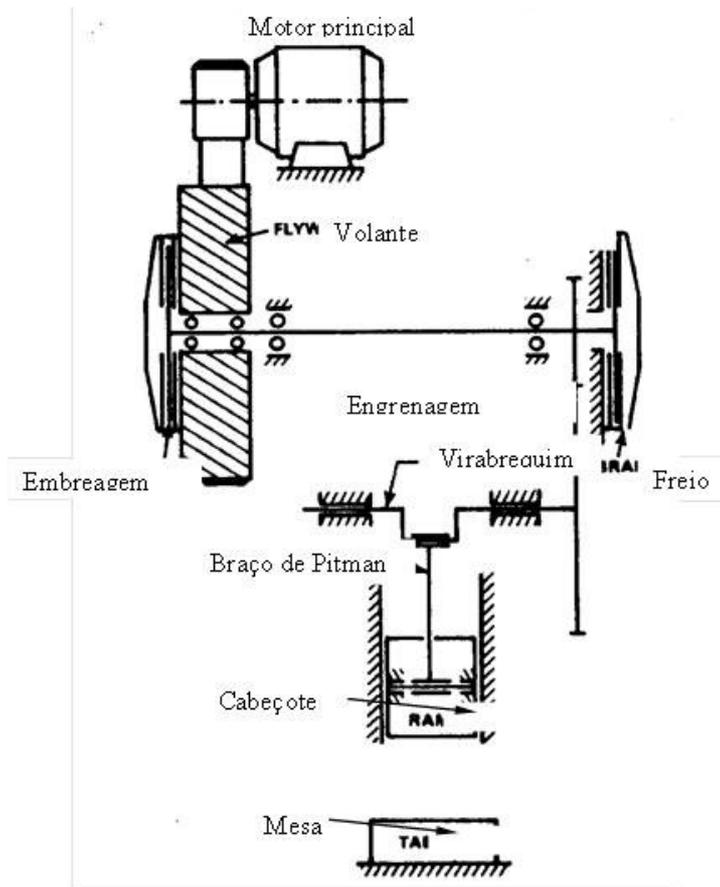


Figura 9.6 - Esquema de uma prensa de manivela com pinhão (embreagem e freio estão no eixo do pinhão; para máquinas de grande capacidade este projeto é mais estável e fornece volantes de alta energia.

O volante que é acionado por um motor elétrico e carrega perfil “V”, armazena energia que é usada durante uma pequena porção da revolução do excêntrico, a saber, durante a deformação do material sendo conformado ⁽⁹⁻¹⁾.

A Figura 9.7 mostra o mecanismo básico biela-manivela. Através do acionamento da embreagem um torque constante, M , é transmitido para o eixo excêntrico (ou manivela). O diagrama de força dá a relação entre o torque, M , a força na biela, P , e a força tangencial, T :

$$T = P \sin(\alpha + \beta) \tag{9.1}$$

e

$$M = rT \tag{9.2}$$

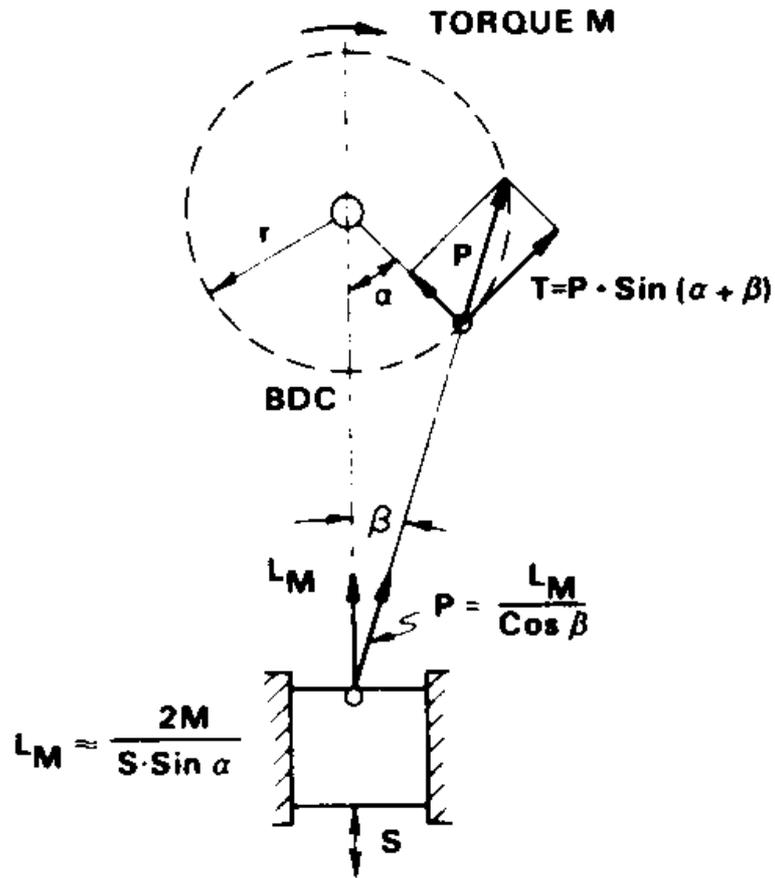


Figura 9.7 - Mecanismo básico de biela-manivela usado em prensas excêntricas: S = curso, PMI = ponto morto inferior, α = ângulo da biela antes do PMI , L_M = carga da máquina

Usualmente, a razão, λ , do raio da manivela, r , para o comprimento da biela l , é pequena, aproximadamente:

$$\lambda = \frac{r}{l} = \frac{1}{10} \text{ ou } \frac{\sin \beta}{\sin \alpha} = \frac{1}{10} \tag{9.3}$$

Usando-se a equação (9.1) e considerando-se que o curso total da prensa é $S = 2r$, a carga da máquina, L_M , agindo no martelo é

$$L_M = P \cos \beta = \frac{T \cos \beta}{\sin(\alpha + \beta)} = \frac{2M \cos \beta}{S \sin(\alpha + \beta)} \tag{9.4}$$

Quando os ângulos α e β se aproximam de zero, isto é próximo do ponto morto inferior, L_M , tende para infinito para um torque constante, M . Isto é ilustrado na Figura 9.8.

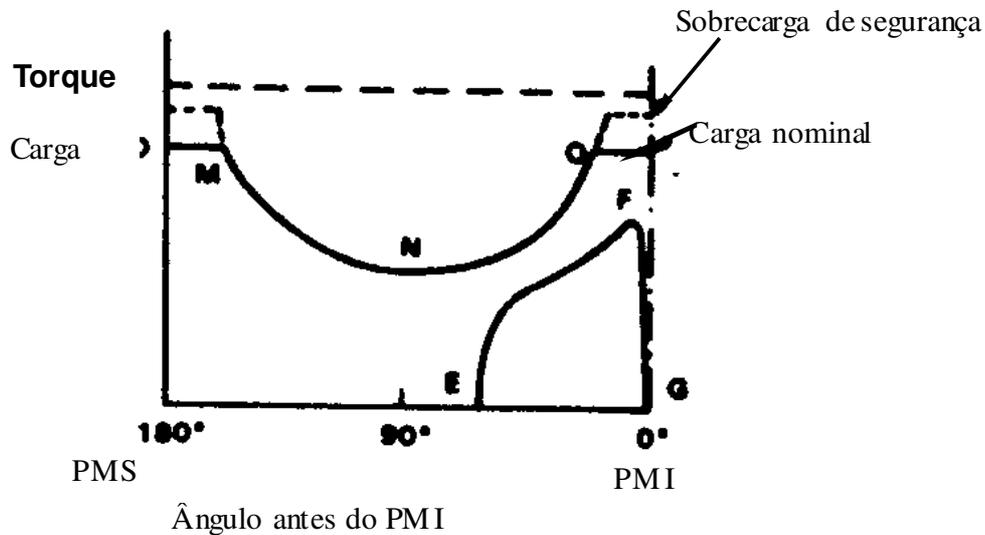


Figura 9.8 - Variação de torque na embreagem a carga da máquina com o ângulo da biela numa prensa excêntrica ou de manivela

A posição dentro do curso, isto é, a distância h do ponto morto inferior (PMI), como função do ângulo da manivela, α , pode ser derivado de relações geométricas ilustradas na Figura 9.7, podendo ser:

$$h = (r + l) - \left(r \cos \alpha + \sqrt{l^2 - r^2 \sin^2 \alpha} \right) \quad \text{ou}$$

$$h = r(1 - \cos \alpha) + l \left(1 - \sqrt{1 - \left(\frac{r}{l}\right)^2 \sin^2 \alpha} \right) \tag{9.5}$$

Usando a expansão em série do termo da raiz quadrada este pode ser aproximado por

$$1 - \frac{1}{2l^2} r^2 \sin^2 \alpha.$$

Portanto a equação (9.5) pode ser transformada em:

$$h = r(1 - \cos \alpha) + \frac{r^2}{2l} \sin^2 \alpha \tag{9.6}$$

Para pequenos valores de α , isto é, próximo do PMI, a equação (9.6) pode ser aproximada por:

$$h = r(1 - \cos \alpha) = \frac{S}{2} (1 - \cos \alpha) \tag{9.7}$$

A velocidade do cabeçote, V , é obtida da equação (9.6) por diferenciação com relação ao tempo, t :

$$V = \frac{dh}{dt} = \frac{dh}{d\alpha} \frac{d\alpha}{dt} = \frac{dh}{d\alpha} \omega = \left(r \sin \alpha + \frac{r^2}{l} \sin \alpha \cos \alpha \right) \omega \tag{9.8}$$

onde, n é a rotação da manivela em revoluções por minuto (rpm), e a velocidade angular $\omega = 2\pi n/60$ e o curso total $S = 2r$. Desprezando-se o segundo termo que é muito pequeno comparado ao primeiro, a equação (9.8) se torna:

$$V = \frac{S\pi n}{60} \sin \alpha \tag{9.9}$$

Usando-se as relações geométricas da Figura 9.7, a velocidade do martelo pode ser expressa como:

$$V = \frac{\pi n}{30} h \sqrt{\left(\frac{S}{h}\right) - 1} \tag{9.10}$$

Portanto, com as equações (9.9) e (9.10) pode-se calcular a velocidade, V , em cada ponto h durante o curso do cabeçote. A Figura 9.9 ilustra a variação destes valores com o ângulo da manivela antes do PMI.

9.7 Carga e energia numa prensa mecânica

Com os símbolos usados na Figura 9.7, a carga, L_M , é dada pela equação (9.4). Considerando-se que o ângulo β é muito menor que o ângulo α , L_M pode ser aproximada por:

$$L_M = \frac{2M}{S \text{ sen } \alpha} \tag{9.11}$$

Conforme mostrado na Figura 9.8, a equação (9.11) ilustra a variação da carga, L_M , com relação ao ângulo da manivela α , antes do PMI (ponto morto inferior), para valores dados de torque, M e curso S da prensa. O torque M na embreagem tem um valor constante para cada mecanismo de acionamento (isto é, eixo excêntrico, eixo pinhão, embreagem, feio, etc.). Portanto, da equação (9.11) pode-se ver que, à medida que o cabeçote se aproxima do PMI, isto é, quando o ângulo α se aproxima de zero, a carga disponível na máquina, L_M , tende para infinito, limitando-se à aquela disponível na embreagem, dada pelo torque M , isto é, sem causar deslizamento na embreagem. Das observações feitas até o presente ponto no texto, as seguintes conclusões podem ser escritas:

- Prensas biela-manivela ou excêntricas são máquinas deslocamento restrito. A velocidade do cabeçote, V , e a carga disponível, L_M , variam de acordo com a posição do cabeçote próximo ao ponto morto inferior (PMI). A maioria dos fabricantes nos Estados Unidos classificam suas máquinas de acordo com a carga nominal a 6.35 mm (1/4”) ou 3.175mm (1/8”) antes do PMI. Para diferentes aplicações, a carga nominal pode ser especificada em diferentes posições antes do PMI, de acordo com a normalização estabelecida pela AJIC (American Joint Industry Conference) ⁽⁹⁻⁹⁾.

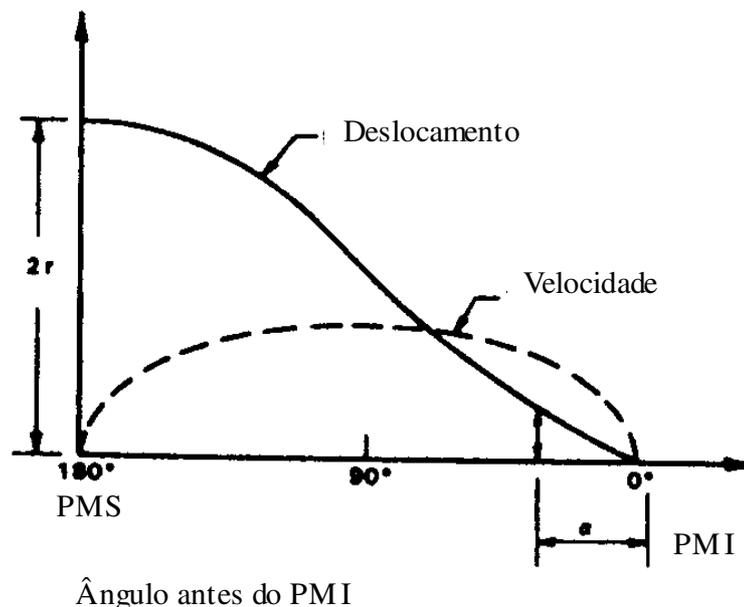


Figura 9.9 - Deslocamento e velocidade num mecanismo simples de biela-manivela (curso=2r)

- Se a carga necessária para o processo de conformação é menor do que aquela disponível na prensa (isto é, se a curva EFG na Figura 9.8 permanece abaixo da curva NOP), o processo pode ser realizado desde que o volante possa suprir a energia necessária em cada curso.
- Para pequenos ângulos a antes do PMI, dentro da porção OP da curva NOP na Figura 9.8, a carga **LM**, pode se tornar maior do que a nominal da prensa se não houver segurança contra sobrecarga na prensa (hidráulica ou mecânica). Neste caso, a prensa trava, o volante para e toda a energia deste é empregada para deformar a estrutura da prensa, a biela e o mecanismo de acionamento. Nestas situações as ferramentas normalmente devem ser desmontadas ou cortadas com maçarico para que a prensa seja destravada.
- Se a curva de carga EFG excede a da prensa NOP (Figura 9.8) antes do ponto 0, então a embreagem desliza e a prensa para, mas o volante continua girando. Neste caso a prensa pode ser liberada pelo aumento da pressão na embreagem e por reversão na rotação do volante se o martelo parou antes do PMI.

A energia necessária para a operação de conformação durante cada golpe é fornecida pelo volante, o qual diminui de rotação para uma porcentagem permitida - normalmente entre 10 e 20% - da sua rotação normal. A energia total armazenada no volante é:

$$E_{FT} = \frac{I\omega^2}{2} = \frac{I}{2} \left(\frac{\pi n}{30} \right)^2 \tag{9.12}$$

onde *I* é o momento de inércia do volante, ω é a velocidade angular, em radianos por segundo e *n* é a rotação do volante em rotações por minuto. A energia total, *E_S*, usada durante um golpe é:

$$E_S = \frac{1}{2} I (\omega_0^2 - \omega_1^2) = \frac{I}{2} \left(\frac{\pi}{30} \right)^2 (n_0^2 - n_1^2) \tag{9.13}$$

onde ω_0 é a velocidade angular inicial, ω_1 é a velocidade depois do golpe, *n₀* é a rotação inicial (em rpm) e *n₁* é a rotação após o golpe.

Note que a energia total *E_S*, também inclui as perdas com atrito e deformação elástica. O motor elétrico deve trazer o volante de sua velocidade baixa *n₁* (depois do golpe) para a velocidade normal *n₀* (antes do golpe), antes do próximo golpe. O tempo disponível entre dois golpes consecutivos depende do modo de operação, contínuo ou intermitente.

Numa operação em modo contínuo numa prensa mecânica, menos tempo está disponível para acelerar o volante para sua velocidade normal e, conseqüentemente um motor de maior potência é necessário.

Freqüentemente a desaceleração do volante é dado como uma porcentagem do na velocidade nominal. Por exemplo, se 13% de desaceleração é permitido então:

$$\frac{n_0 - n_1}{n_0} = \frac{13}{100} \quad \text{ou} \quad n_1 = 0.87 n_0 \tag{9.14}$$

A porcentagem de energia fornecida pelo volante é obtida usando-se as equações (9.12) e (9.13) para se chegar a:

$$\frac{E_S}{E_{FT}} = \frac{n_0^2 - n_1^2}{n_0^2} = 1 - (0.87)^2 = 0.25$$

Os cálculos simples acima ilustram que para uma desaceleração de 13% no volante, 25% da energia deste será usada durante um golpe.

Como um exemplo, a variação da carga, do deslocamento e da velocidade do volante no recalque de corpos de prova de cobre numa prensa mecânica de 1600 toneladas estão ilustrados na Figura 9.10.

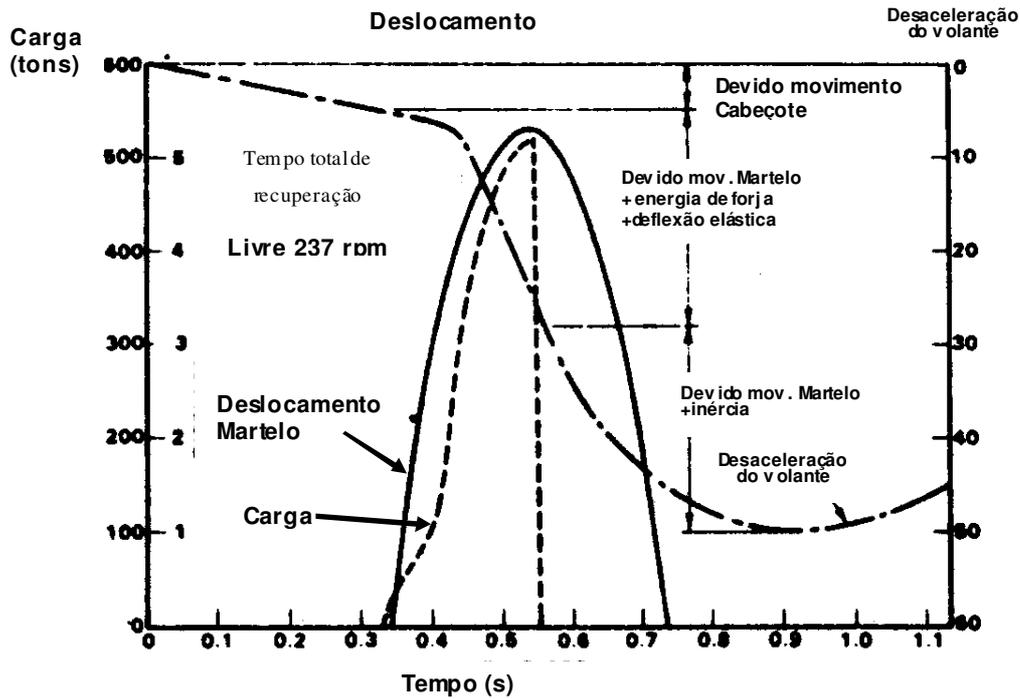


Figura 9.10 - Desaceleração do volante, deslocamento do martelo, e carga de recalque em corpos de prova de cobre numa prensa de 1600 toneladas (9-10).

Esta prensa foi instrumentada com barras de deformação fixadas na estrutura para medição da carga e transdutores indutivos (LVDT) para medição de deslocamentos e uma tacômetro de corrente contínua para medição da velocidade do volante (9-10). Na Figura 9.10 pode-se ver que, devido às perdas com atrito e inércia no sistema de acionamento, o volante se desacelera (por volta de 5 rpm) antes da deformação começar. O volante requer cerca de 3.24s para recuperar a velocidade nominal, isto é, nesta operação a prensa pode ser operada num velocidade máxima de $18(60/3.24)$ golpes por minuto. Para cada prensa mecânica existe um único relacionamento entre o número de golpes por minuto, ou taxa de produção, e a energia disponível por golpe. Como mostrado na Figura 9.11, o número de golpes por minuto disponível numa máquina decresce com o aumento da energia requerida por golpe. Este relacionamento pode ser determinado experimentalmente por operações de recalque em corpos de prova, que requerem diversas quantidades de energia de deformação e pela medição da carga, deslocamento e tempo de aceleração do volante. A energia consumida por cada corpo de provas é obtida pelo cálculo da área da superfície sob a curva carga-deslocamento.

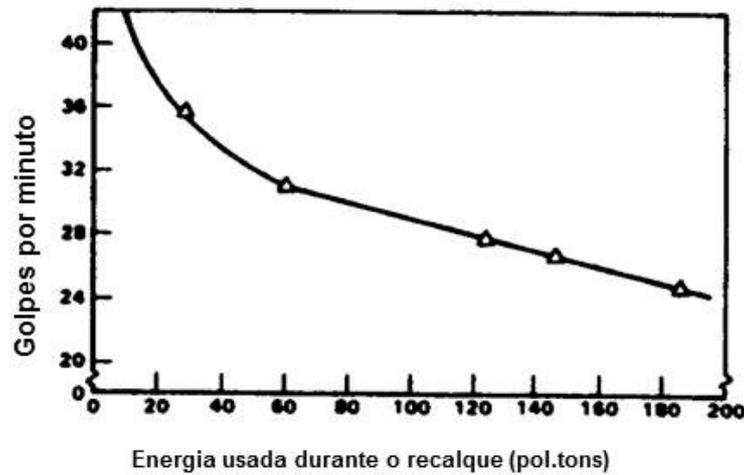
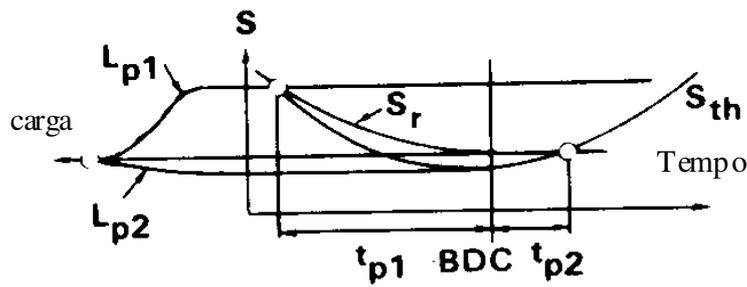


Figura 9.11 - Variação do número de golpes por minuto com a energia disponível para conformação numa prensa mecânica de 500 toneladas.

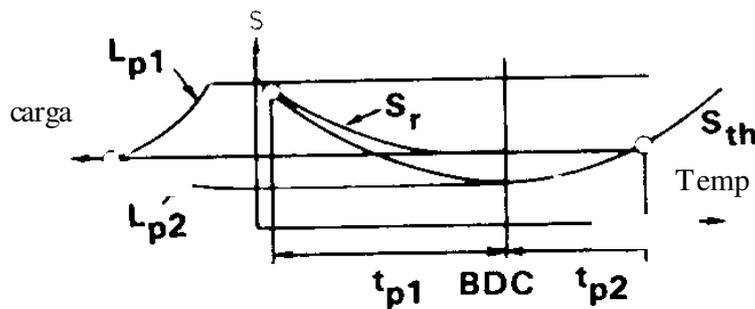
9.8 Características de prensas mecânicas que dependem do tempo

O número de golpes por minuto, n , foi discutido como parte das considerações sobre energia. Como pode ser visto pela equação (9.9), a velocidade do martelo é diretamente proporcional ao número de golpes por minuto, n , e ao curso do martelo, S . Portanto, para uma dada prensa, isto é, um dado curso, o único caminho para aumentar a velocidade do martelo durante a deformação é aumentar a taxa de golpes, n .

Para uma dada velocidade nominal do volante, o tempo de contato, t_p , e a velocidade sob pressão, V_p , depende principalmente das dimensões do mecanismo biela-manivela e do rigidez total, C , da prensa. O efeito da rigidez total da prensa no tempo de contato sob pressão, t_p , é ilustrado na Figura 9.12.



A. Prensa rígida



B Prensa menos rígida

Figura 9.12 - Efeito da rigidez da prensa no tempo de contato sob pressão (S_{th} = curva teórica de deslocamento-tempo, S_r = Curva real de tempo-deslocamento sob carga ⁽⁹⁻¹⁾).

Com o aumento da carga, a prensa se deflete elasticamente. Uma prensa mais rígida (maior valor de C), requer menos tempo t_{p1} , para que a pressão suba e também menos tempo para t_{p2} para que a pressão se alivie, como mostrado na Figura 9.12a. Conseqüentemente, o tempo total de contato sob pressão ($t_p = t_{p1} + t_{p2}$) é menor para uma prensa mais rígida ⁽⁹⁻¹⁾.

9.9 Precisão das prensas mecânicas

A precisão de trabalho de uma prensa excêntrica é substancialmente caracterizada por duas formas: o ângulo de inclinação do cabeçote com a vertical (em qualquer plano vertical) sob um carregamento fora-de-centro e a deflexão total sob carregamento ou rigidez da prensa. A inclinação do cabeçote com a vertical produz superfícies inclinadas ou com degraus; a rigidez influencia as tolerâncias de espessura ⁽⁹⁻¹¹⁾. Em condições de carregamento fora-de-centro, prensas com duas ou quatro bielas têm desempenho melhor do que prensas de uma única, porque a inclinação do cabeçote com a vertical e a redução das forças nas guias são minimizadas. Assumindo que a deformação total sob carregamento para uma prensa excêntrica de uma única biela seja 100%, a seguinte distribuição de deflexão total foi obtida de medições sob carga nominal para prensa de uma e duas bielas de mesma capacidade ⁽⁹⁻¹¹⁾.

| | Deflexão (%) | |
|----------------|-------------------------------|----------------------------------|
| | Prensa excêntrica de um ponto | Prensa excêntrica de dois pontos |
| Guias + biela | 30 | 21 |
| Estrutura | 33 | 31 |
| Eixo + mancais | 37 | 33 |
| Deflexão total | 100 | 85 |

É interessante notar que uma grande porcentagem da deflexão total está no mecanismo de acionamento, isto é, guias, biela, eixo de acionamento e mancais.

9.10 Prensas biela-manivela com mecanismo de acionamento modificado

As características de velocidade vs. curso e carga vs. curso da prensa de manivela podem ser modificadas usando-se diferentes mecanismos de acionamento. Uma variação muito conhecida da prensa de manivela é o projeto de junta em forma de joelho (Figura 9.13).

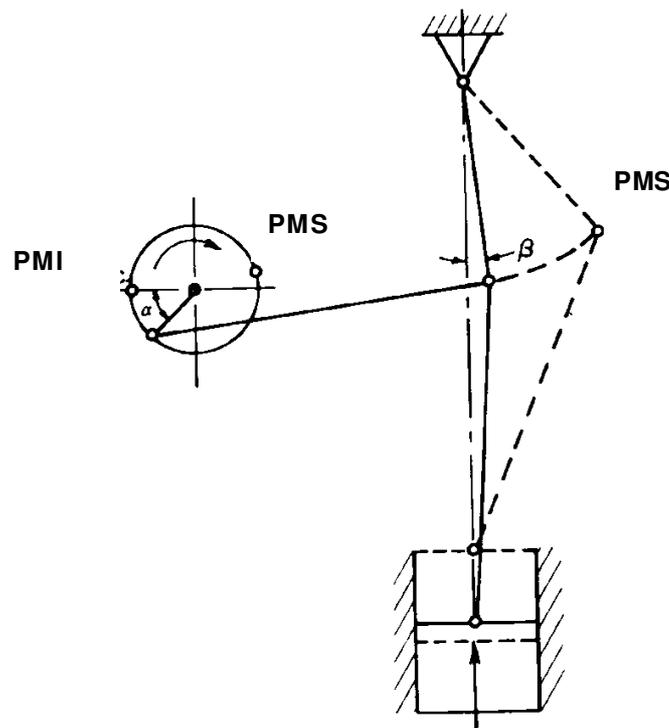


Figura 9.13 - Esquema de uma mecanismo de prensa de joelho

Este projeto é capaz de gerar altas forças com manivelas de acionamento relativamente pequenas. Na junta em forma de joelho, a velocidade do cabeçote diminui muito mais rapidamente próximo do PMI, do que nos mecanismos regulares de acionamento por manivela. Esta máquina é usada com sucesso para forjamento a frio e cunhagens.

Um desenvolvimento recente em mecanismos de acionamento de prensas mecânicas usa um mecanismo de quatro barras, como aquele mostrado na Figura 9.14⁽⁹⁻¹²⁾.

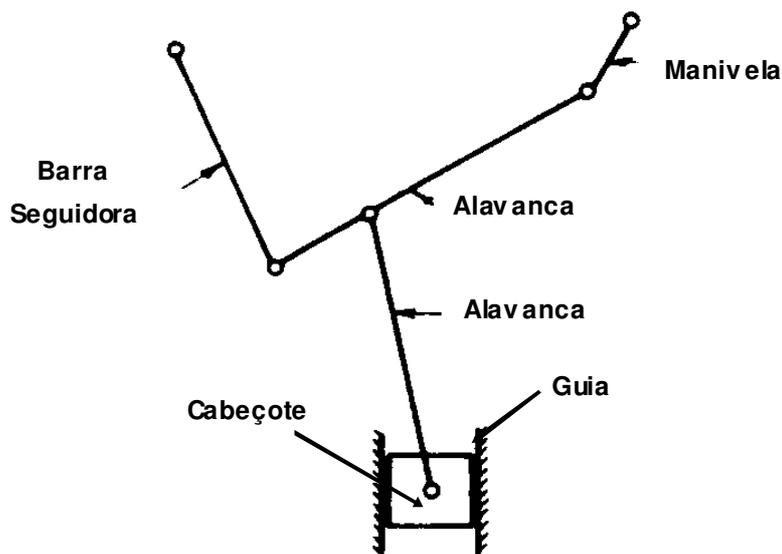
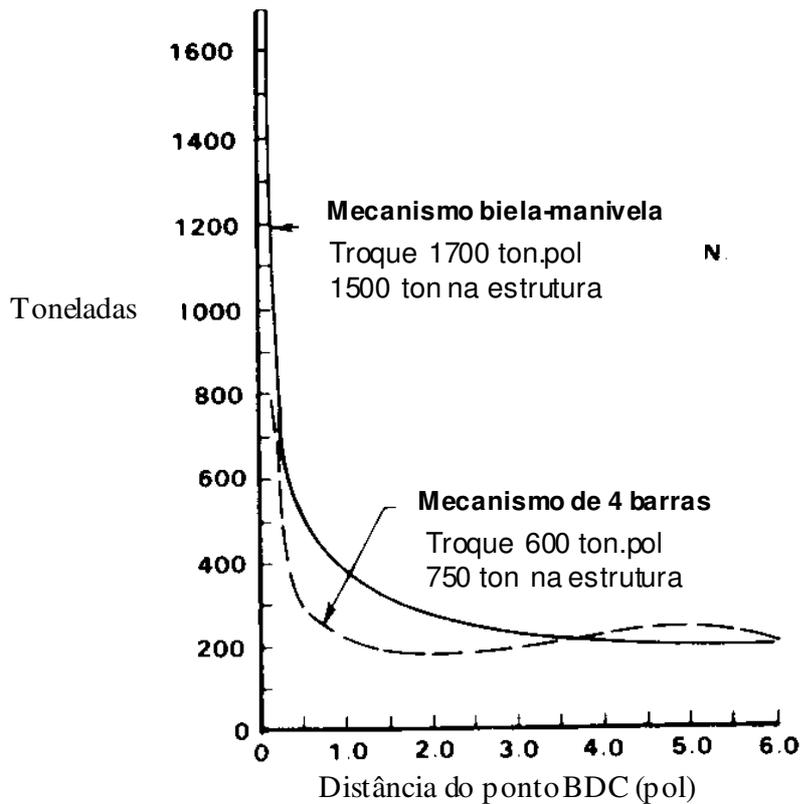


Figura 9.14 - Mecanismo de quatro barras para acionamento de prensas mecânicas

Neste mecanismo o comportamento da velocidade e carga no curso pode ser estabelecido, no estágio de projeto, pelo ajuste do comprimento de uma das quatro barras ou através da variação do ponto de conexão da barra de ligação com a de arraste. Portanto, com esta prensa é possível manter a máxima carga, como especificado pela capacidade da prensa, sobre um relativamente longo curso de deformação. Usando uma prensa com um mecanismo comum de manivela, esta capacidade só pode ser atingida usando-se uma prensa de muito maior capacidade de carga. Uma comparação está ilustrada na Figura 9.15, onde são mostradas as curvas de carga-curso de uma prensa empregando um mecanismo de quatro barras e de outra empregando um mecanismo de manivela.



1 pol = 25.4 mm

Figura 9.15 - Curvas de carga-curso para uma prensa de 750 toneladas com mecanismo de quatro barras e uma prensa 1500 toneladas com mecanismo de manivela comum.

Pode-se notar que a prensa de manivela equipada com um mecanismo de 43.18 toneladas-metro de torque pode gerar uma força de 1500 toneladas à 0.8 mm antes do PMI. Uma prensa com mecanismo de quatro barras equipada com um mecanismo de acionamento de 15.24 toneladas-metro gera uma força de aproximadamente 750 toneladas na mesma localização. Contudo, em ambas as máquinas uma força de 200 toneladas está disponível a 152.4 mm do PMI. Portanto, uma prensa de quatro barras de 750 toneladas poderia desempenhar a mesma operação de forjamento que requeria 200 toneladas em 6 pol. (152.4 mm), que uma de 1500 toneladas excêntrica. A prensa de quatro barras, que foi originalmente desenvolvida para conformação de chapas e extrusão à frio, serve bem para operações de conformação do tipo extrusão, onde uma carga quase constante é necessária sobre um longo curso.

9.11 Prensa de fuso ou de fricção

As prensa de fuso ou de fricção utilizam uma fricção, engrenagens, acionamento elétrico ou hidráulico para acelerar um volante montado num fuso, e este converte a energia cinética angular em energia linear de um martelo. A Figura 9.16 mostra dois projetos básicos de prensa de fuso ⁽⁹⁻¹³⁾.

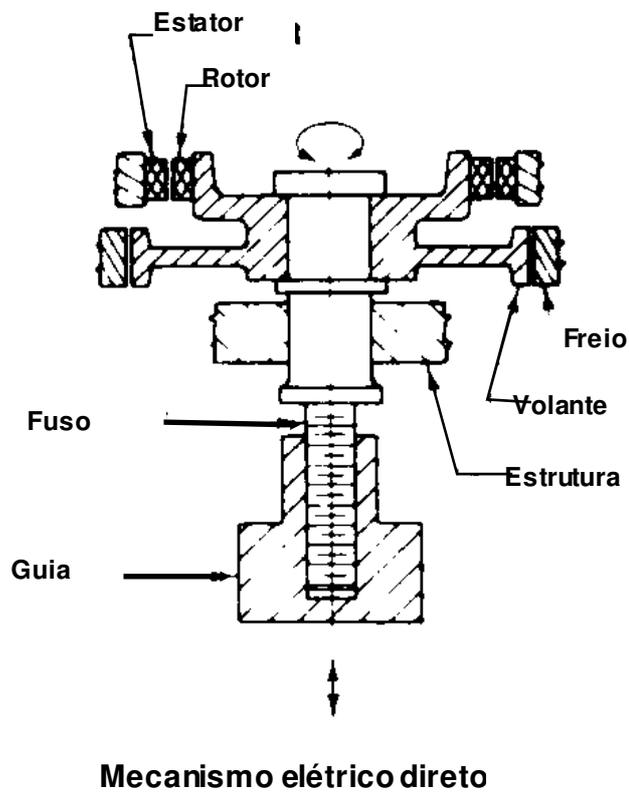
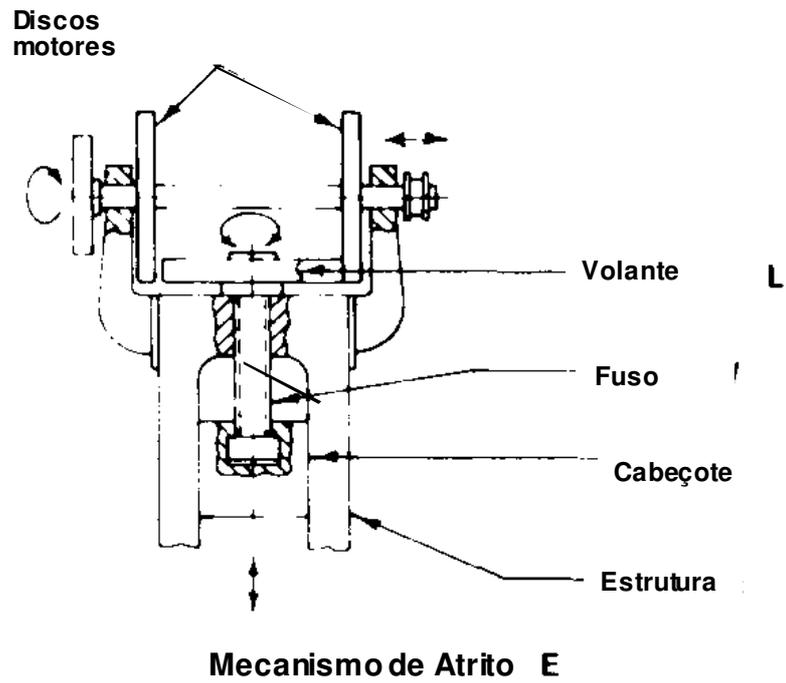


Figura 9.16 - Dois tipos de prensa de fuso largamente usadas

Nas prensas de fricção, os discos de acionamento são montados num eixo horizontal que se mantém girando continuamente. Para um golpe na descendente, um dos discos é pressionado contra o volante por um servomotor. Este, conectado ao fuso positivamente ou por uma embreagem de fricção, é acelerado por este disco motor através da fricção. A energia do volante e velocidade do cabeçote continua a aumentar até que a parte superior do estampo atinja a peça. Portanto, a carga necessária para a conformação cresce e é transmitida através das guias, o fuso e a mesa para a estrutura da prensa. Quando toda a energia do volante é usada na deformação do componente e na deflexão elástica da prensa, o volante, o fuso e as guias param. Neste momento o servomotor ativa o eixo horizontal o que pressiona o disco que aciona a volante para cima. Desta forma, o volante e o fuso são acelerados na direção inversa e o martelo é levantado para sua posição superior. Nas prensas com motor elétrico direto, um motorelétrico reversível é construído diretamente no para fuso e na estrutura, sobre o volante. O fuso é roscado diretamente sobre o martelo e não se move verticalmente. Para reverter a direção de rotação do volante, o motor elétrico é revertido, após cada golpe descendente e ascendente.

9.12 Carga e energia em prensa de fricção

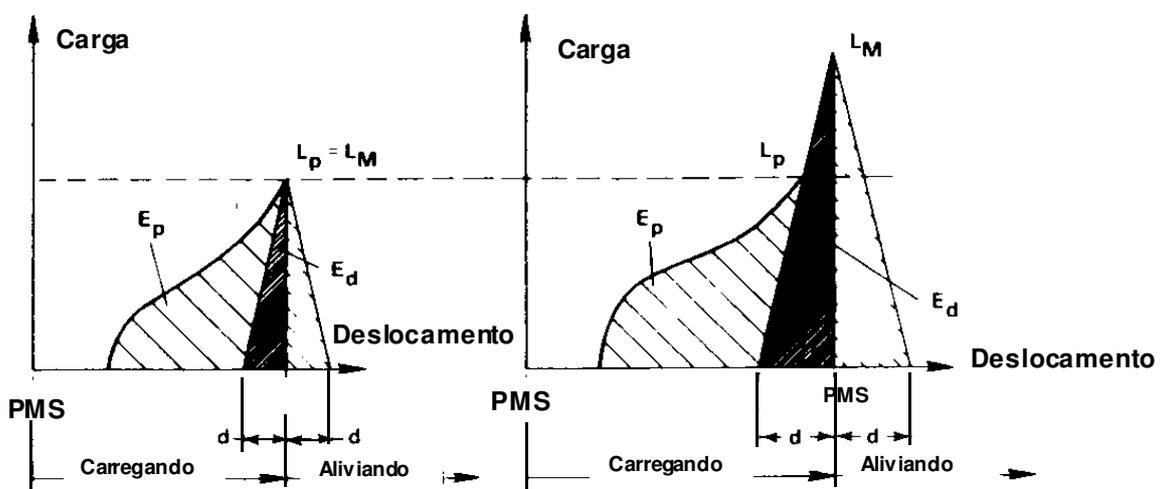
Numa prensa de fricção a carga é transmitida através de uma guia, fuso e mesa para a estrutura. A carga disponível numa posição determinada do golpe é suprida pela energia armazenada no volante. No fim do golpe, o volante e o fuso atingem uma posição estacionária antes de reverter a direção de rotação. Sendo assim, a seguinte relação se mantém:

$$E_T = E_p + E_f + E_d \tag{9.14}$$

onde E_T é a energia total do volante, E_p é a energia consumida pelo processo de conformação, E_f é a energia requerida para vencer o atrito da máquina e E_d é a energia requerida para a deflexão na prensa (mesa+coluna+fuso).

Se a energia total do volante, E_T é maior do que a necessária para vencer as perdas na máquina e para realizar o processo de conformação, o excesso é transformado em energia adicional de deflexão e ambos o estampo e a prensa são submetidos a uma alta energia desnecessariamente. Isto está ilustrado na Figura 9.17⁽⁹⁻¹⁾. Para anular este excesso de energia, o que resulta em aumento de desgaste na ferramenta e ruído, as modernas prensa de fuso são equipadas com um dispositivo medidor de energia que controla a velocidade do volante e regula a energia total do volante. O medidor de energia pode também ser programado de modo que a máquina forneça quantidades diferentes de energia durante sucessivos golpes.

Numa prensa de fricção, a qual é essencialmente uma máquina de energia fixa (como um martelo), carga e energia estão relacionados diretamente entre si. Para uma dada prensa, (isto é para a mesma quantidade de perdas com atrito, deformações, deflexão elástica e energia de volante), a carga disponível no fim do golpe depende principalmente da energia de deformação requerida pelo processo (isto é, da forma, temperatura e material da peça). Portanto, para um volante de energia constante, baixa energia de deformação, E_p , resulta em alta carga final, L_M , e alta energia de deformação, E_p , resulta em baixa carga final, L_M .



A. Com medidor de carga ou deslocamento

B. Sem medidor de carga ou deslocamento

Figura 9.17 - Relação carga-energia na conformação em uma prensa (E_p = energia requerida pelo processo, L_M = carga máxima da máquina, E_d = energia de deflexão elástica, d = deflexão da prensa)

Estas relações estão ilustradas no diagrama carga-energia na Figura 9.18⁽⁹⁻¹⁴⁾. As prensa de fuso podem suportar cargas máximas, L_{max} de até 160 ou 200% do valor nominal, L_M . Neste sentido a carga nominal de uma prensa de fricção é fixada arbitrariamente. A informação significativa sobre a carga de uma prensa de fuso é obtida de seu diagrama carga-energia (Figura 9.18). Esta curva tem a forma de uma parábola porque a energia de deflexão, E_d , é dada por uma equação de segunda ordem:

$$E_d = \frac{(L_M)^2}{2C} \tag{9.15}$$

onde L_M é a carga da máquina e C é a rigidez total da prensa.

Uma prensa de fricção projetada para uma operação de conformação, onde grande energia, E_M , é necessária, pode também ser usada para operações onde pequenas energias são requeridas. Aqui, contudo, uma embreagem de fricção é instalada entre o volante e o fuso. Quando o cabeçote atinge a carga nominal, esta embreagem começa a deslizar e usa uma parte da energia do volante como perdas por atrito, E_c , na embreagem. Consequentemente, a máxima carga no fim do golpe descendente é reduzida de L para L_{max} e a prensa está protegida contra sobrecarga (Figura 9.18). Prensas de fricção empregadas para cunhagem são designadas para duras pancadas (isto é, estampo contra estampo sem qualquer peça) e não têm embreagem de deslizamento no volante.

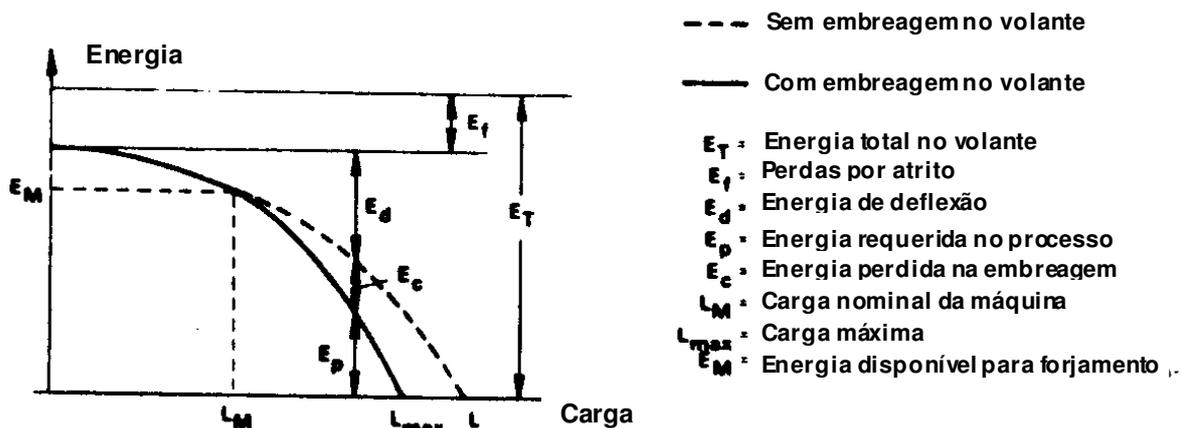


Figura 9.18 - Esquema da relação entre carga-energia em uma prensa de fuso

9.13 Características dependentes do tempo de prensas de fricção

Numa prensa de fricção o número de golpes por minuto sob carga, n_p , grandemente depende da energia requerida por um processo de conformação específico e da capacidade do mecanismo de acionamento em acelerar o fuso e o volante. Em geral, contudo, a taxa de produção de uma prensa de fricção é menor do que a de uma prensa mecânica, especialmente em operações automatizadas de alto volume.

Durante o golpe descendente, a velocidade sob pressão, V_p , aumenta até que o estampo atinja o material. Neste aspecto a prensa de fuso se comporta como um martelo de forja. Depois que a deformação real se inicia, a velocidade do martelo diminui dependendo da energia requerida no processo. Portanto, a velocidade V_p é largamente influenciada pela geometria do tarugo e da peça. Como ilustrado na Figura 9.19, este é bastante diferente das condições encontradas na prensa mecânica, onde a velocidade do cabeçote é estabelecida pela cinemática da prensa e não é influenciada significativamente pelos requerimentos de carga e energia no processo.

Esta prensa propicia diversos benefícios distintos: uma alta e praticamente constante velocidade durante o golpe, total carga de prensagem em qualquer posição do curso, alta energia de deformação, proteção contra sobrecarga e curto tempo de contato entre o material e as ferramentas.

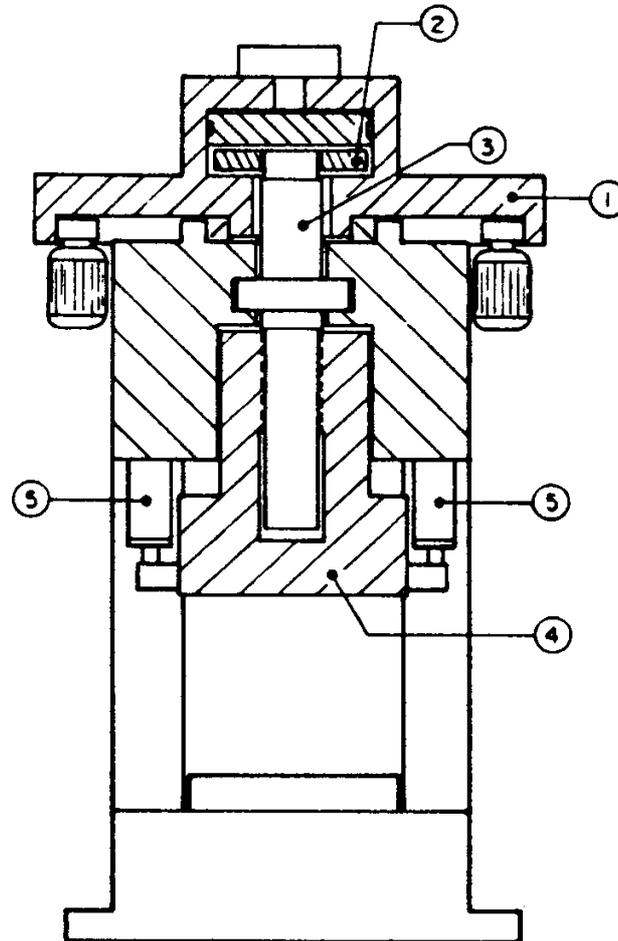


Figura 9.20 - Um novo mecanismo de acionamento para prensa de fricção que combina as características de um de prensa mecânica com um martelo de forja (1- volante, 2- embreagem acionada por ar, 3- fuso, 4- cabeçote, 5- cilindros de levantamento) ⁽⁹⁻¹⁵⁾.

A prensa pode também ser equipada com motores de velocidade variável, de modo que diferentes volantes e velocidades de martelo estejam disponíveis. Portanto, ela oferece considerável flexibilidade a pode ser usada para operações de conformação à quente ou à frio.

9.16 Martelo de forjamento (Martelo)

O martelo de forja (ou simplesmente martelo) é o tipo de equipamento de menor custo e mais versátil para geração de carga e energia necessárias para realizar uma operação de conformação. Martelos são primeiramente usadas para forjamento à quente, cunhagem, e, de forma mais limitada, para conformação de chapas em pequenos lotes - por exemplo, em aeronaves/estruturas de aeronaves. O martelo é uma máquina de energia restrita. Durante o golpe de trabalho, a deformação se segue até que toda a energia cinética seja dissipada pela deformação plástica do material e pela deformação elástica do cabeçote e chabota quando as faces do estampo entram em contato entre si. Portanto, é necessário ordenar a capacidade destas máquinas em termos de energia, isto é, libra-pés, kilograma-metro ou toneladas-metro. A regra prática de se especificar um martelo pelo

peso do cabeçote não se mostra muito útil para o usuário. O peso do deste pode ser usado somente como uma especificação do modelo ou tipo de equipamento.

Existem basicamente dois tipos de martelo: martelos de queda e martelos acionados ⁽⁹⁻¹⁾. Num martelo de queda, este é positivamente conectado a cilindros de fricção (martelo acionada por cilindro de fricção ou martelo de tábua), correia (martelo acionada por correia), corrente (martelo acionada por corrente) ou um pistão (martelo acionada por pistão de ar comprimido, óleo ou vapor), veja Figura 9.21. O martelo é levantado a uma certa altura e então abandonado sobre o tarugo colocado na mesa da prensa, também conhecida como bigorna. Durante o curso descendente, o martelo é acelerado por gravidade e acumula a energia para o golpe. O curso de subida acontece imediatamente após o golpe; a força necessária para assegurar um rápido levantamento pode ser de 3 a 5 vezes o peso do martelo. O princípio de operação de uma prensa martelo com acionamento é similar àquele de uma prensa acionada por cilindro pneumático (Figura 9.21d). No curso descendente, além da aceleração da gravidade, o martelo é acelerado por vapor, ar frio ou ar quente sob pressão. Prensas martelo eletro-hidráulicas, introduzidas nos Estados Unidos em anos recentes, são mais comuns na Europa ⁽⁹⁻¹⁶⁾. Nestes tipos de prensas, o martelo é levantado com a pressão do óleo contra uma bolsa de ar. O ar comprimido amortece o golpe do martelo e contribui para sua aceleração durante o curso descendente. Portanto, prensa martelo eletro-hidráulica também tem uma menor potência de atuação.

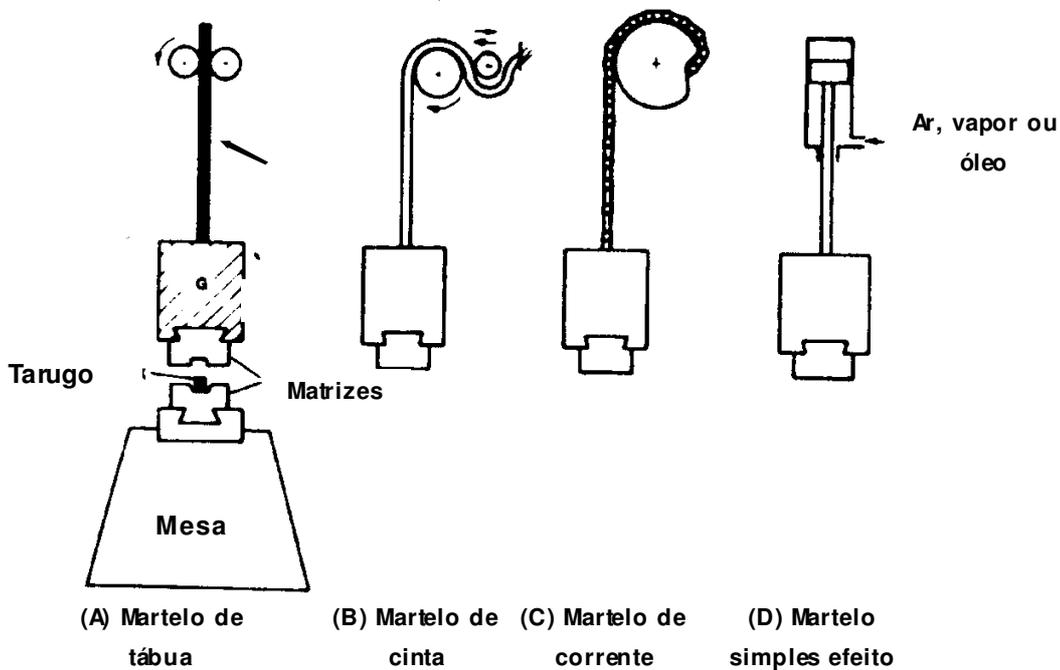


Figura 9.21 - Princípios de funcionamento de vários tipos de prensa martelo de gravidade.

Martelo de dupla-ação são largamente empregados na Europa enquanto seu uso nos Estados Unidos é limitado a um número relativamente pequeno de companhias. O princípio de dois tipos de martelos dupla-ação está ilustrado na Figura 9.22. Nos dois projetos, o martelo superior é acelerado para baixo usando vapor, ar frio ou quente ⁽⁹⁻¹⁷⁾. Ao mesmo tempo, martelo inferior, ou bigorna, é acelerada para cima por uma correia de aço (para pequenas capacidades de carga) ou por sistema hidráulico acoplado (nos casos de prensa de grande capacidade). O martelo inferior, incluído a estampo, é aproximadamente 10% mais pesado do que o superior. Portanto, após o choque, o martelo inferior se acelera para baixo e empurra o martelo superior para cima, na direção da posição inicial. A combinação de velocidades entre os martelos é de aproximadamente 7.62 m/s; ambos os martelos se move exatamente com metade da velocidade de fechamento. Devido ao efeito de dupla ação, relativamente pouca energia é perdida em vibração na fundação ou no ambiente. Portanto, para capacidades comparáveis, uma prensa martelo de duplo efeito requer uma fundação menor do que uma com bigorna.

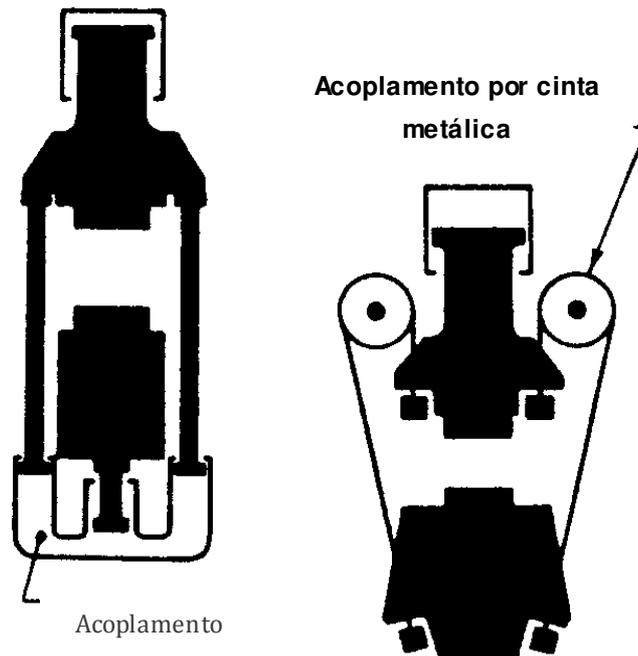


Figura 9.22 - Princípio de operação de duas prensas martelo de duplo efeito ^(9.1).

9.17 Características importantes de um martelo de forjamento

Num martelo de queda livre, a energia total do golpe é igual à energia cinética de um martelo e é gerada somente pela velocidade de queda livre, ou:

$$E_T = \frac{1}{2} m_I V_I^2 = \frac{1}{2} \frac{G_I}{g} V_I^2 = G_I H \tag{9.16}$$

onde m_I é a massa do martelo superior, V_I é a velocidade do martelo no início da deformação, G_I é o peso do martelo, g a aceleração da gravidade e H é a altura de queda do martelo.

Num martelo com acionamento, a energia total do golpe é gerada pela queda livre e pela pressão agindo no cilindro, ou:

$$E_T = \frac{1}{2} m_I V_I^2 = (G_I + pA) H \tag{9.17}$$

onde, além dos símbolos dados acima, p é a pressão do vapor, ar ou óleo agindo no cilindro do martelo no curso de descida e A é a área deste cilindro.

Em martelos de duplo efeito, quando ambos os martelos têm aproximadamente o mesmo peso, a energia total por golpe é dada por:

$$E_T = 2 \left(\frac{1}{2} m_I V_I^2 \right) = \frac{m_I V_t^2}{4} = \frac{G_I V_t^2}{4g} \tag{9.18}$$

onde m_I é a massa de apenas um martelo, V_I é a velocidade de um martelo, V_t é a velocidade real do choque dos martelos, a qual é igual a $2V_I$, e G_I é o peso de um martelo.

Durante o trabalho do golpe, a energia total nominal, E_T , do martelo não é inteiramente transformada em energia útil disponível para deformação, E_A . Uma pequena quantidade de energia é perdida para vencer a fricção nas guias, e uma porção significativa é perdida na forma de ruído e vibração no ambiente. Portanto, a eficiência, $\eta = E_A/E_T$, da prensa martelo é sempre menor que 1. A eficiência do golpe varia de 0.8 a 0.9 para prensagens consideradas macias (pequena carga e grande deslocamento) e de 0.2 a 0.5 para prensagens consideradas duras (alta carga e pequenos deslocamentos).

A transformação de energia cinética em energia de deformação durante o trabalho do golpe pode desenvolver forças consideráveis. Por exemplo, considere a deformação onde a carga P , aumenta de $P/3$ no início até P no fim do curso do golpe, h . A energia disponível, E_A , é a área da superfície sob a curva na Figura 9.23. Portanto:

$$E_A = \frac{P/3 + P}{2} h = \frac{4Ph}{6} \tag{9.19}$$

Considere um martelo com uma energia total nominal, E_T , de 5,795 m-ton e uma eficiência de golpe, η de 0.4; aqui, $E_A = E_T \eta = 2317$ m-ton. Com este valor para um trabalho de golpe, h de 5.08 mm, a equação (9.19) dá:

$$P = \frac{6E_A}{4h} = 695 \text{ ton}$$

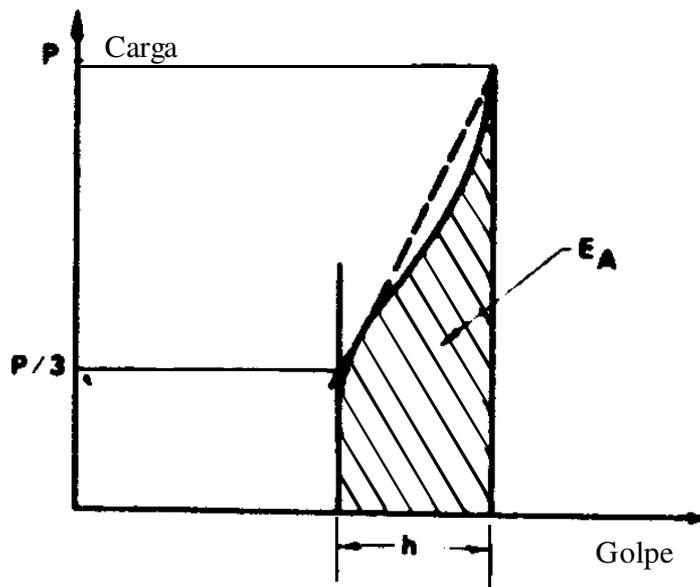


Figura 9.23 - Exemplo de uma curva de carga-curso no golpe com uma prensa martelo (E_A = energia disponível para forjamento = $E_T \eta$)⁽⁹⁻¹⁾

Se a mesma energia fosse dissipada em um golpe, h de 2.54 mm, a carga P , atingiria aproximadamente o dobro da calculada. O simples cálculo hipotético dado acima ilustra a capacidade de uma prensa martelo de custo relativamente baixo e com alta carga de conformação.

REFERÊNCIAS

- 9-1. Altan, T., "Characteristics and Applications of Various Types of Forging Equipment", SME Technical Report MFR72-02, Society of Manufacturing Engineers, Dearborn, MI.
- 9-2. Geleji, A., "Forge Equipment, Rolling Mills and Accessories" (in English), Akademiai Kiado, Budapest, 1967.
- 9-3. Mueller, E., Hydraulic Forging Presses, Springer-Verlag, Berlin, 1969.
- 9-4. Peters, K. H., "Design Features of the Hydraulic Press and Its Field of Application", Sheet Metal Industries, Vol 46, March 1969, pp 221-226.
- 9-5. Hutson, C., "An Investigation Into Press Driving Systems", Metal Forming. Vol 35, March 1968, pp 79-85.
- 9-6. Riemenschneider, F., and Nickrawietz, K., "Drives for Forging Presses" (in German), Stahl und Eisen, Vol 79, 1959, p 494.

- 9-7. Kirschbaum, Z., "A Comparative Study of the Stability and Economic Construction of Pushdown, Pulldown, and Horizontal Double-Opposed Forging Presses", *Iron and Steel*, Feb 1968, p 46.
- 9-8. Pahnke, H. J., "Technical and Economical Limitations of Conventional Four-Column Top Drive Forging Presses", *SME Paper MF70-589*.
- 9-9. Hamilton, E., "Power Presses, Their Design and Characteristics", *Sheet Metal Industries*, Vol 37, July 1960, pp 501-513.
- 9-10. Altan, T., and Nichols, D. E., "Use of Standardized Copper Cylinders for Determining Load and Energy in Forging Equipment". *ASME Transactions, Journal of Engineering for Industry*, Vol 94, Aug 1972, p 769.
- 9-11. Rau, G., "A Die Forging Press With a New Drive", *Metal Forming*, July 1967, pp 194-198.
- 9-12. Spachner, S. A., "Use of a Four-Bar Linkage as a Slide Drive for Mechanical Presses", *SME Paper MF70-216*.
- 9-13. Bohringer, H., and Kilp, K. H., "Development of the Direct-Drive Percussion Press", *Sheet Metal Industries*, Vol 43, Nov 1966, p 857.
- 9-14. Klapprodt, Th., "Comparison of Some Characteristics of Mechanical and Screw Presses for Die Forging" (in German), *Industrie-Anzeiger*, Vol 90, 1968, pp 1423.
- 9-15. Altan, T., "Metalforming at 2.EMO", *American Machinist*, Jan 1978, p 132.
- 9-16. Brauer, W., "The Development of Electrohydraulic Drop Hammers" (in German), *Werkstattstechnik*, Vol 51, 1961, p 105.
- 9-17. Kuhn, R., "Counterblow Hammers for Heavy Forgings" (in German), *Kleipzig Fachberichte*, No. 11, 1963, Düsseldorf.