

# Princípios das Máquinas de Conformação (Prensas)

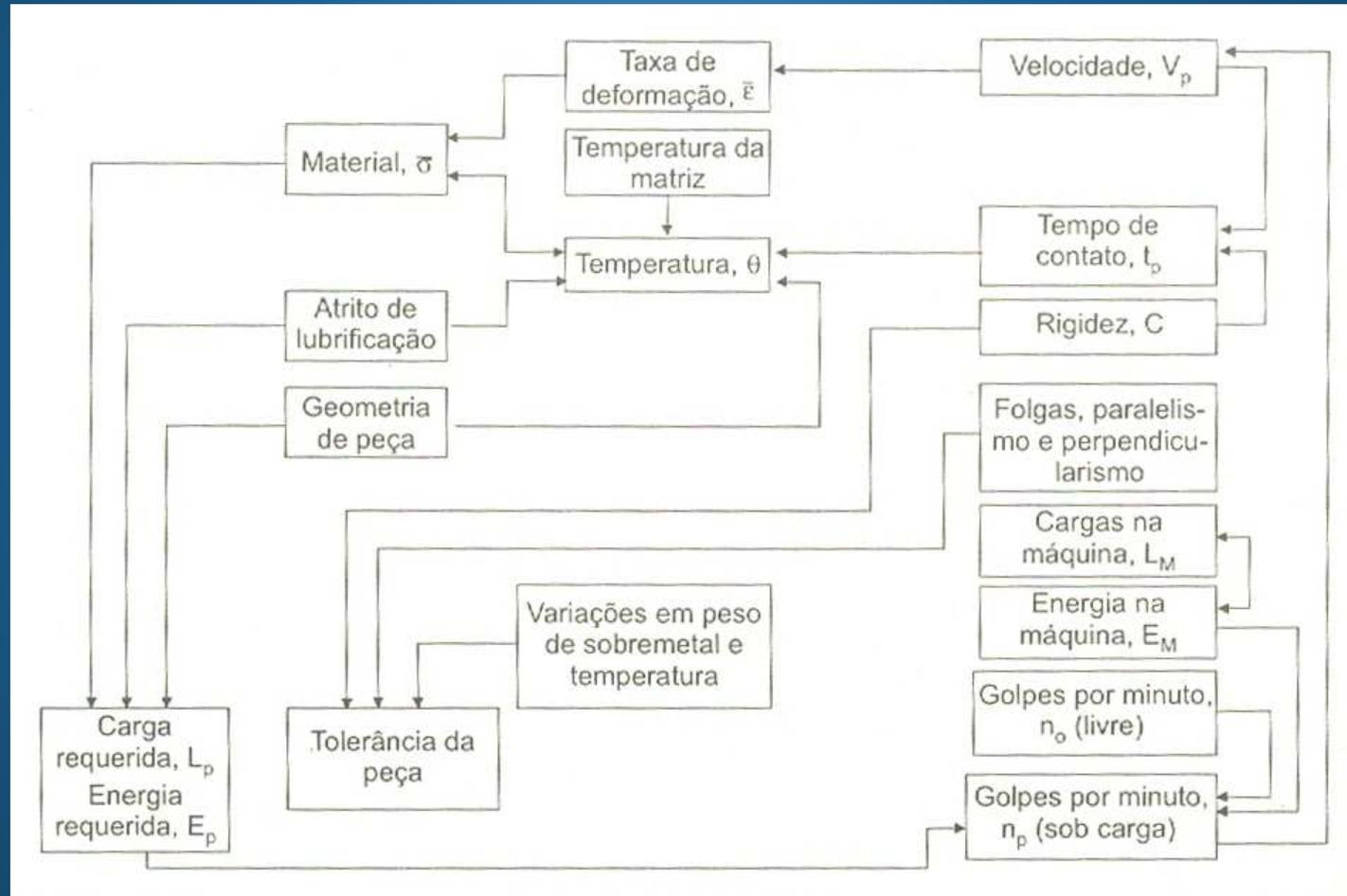
# Máquinas de conformação

- O conhecimento das máquinas de conformação permite:
  - Usar o maquinário existente com eficiência
  - Definir a capacidade produtiva da fábrica
  - Discutir tecnicamente com os fornecedores de máquinas
  - Desenvolver máquinas novas ou modificações das existentes.

# Necessidades de processo x máquinas de conformação

- Tensão de escoamento e capacidade do material de ser conformado
- Temperaturas no material e na matriz
- Necessidades de carga e energia para o material e a geometria do produto
- Tolerâncias do material conformado
- Produtividade

# Interação



# Classificação das máquinas de conformação

- Máquinas de prensagem estão entre as mais utilizadas para uma gama de processos
  - Máquinas com carga restrita
  - Máquinas com curso ou deslocamento restrito
  - Máquinas de energia restrita

# Características significativas

- Características de carga e energia
- Características relacionadas ao tempo
- Características de precisão

# Carga e energia

- Energia disponível  $E_M$  (dada em m.kg) — Energia fornecida pela máquina para efetuar a deformação plástica
- Carga disponível  $L_M$  (dada em toneladas) — Carga disponível no cabeçote para realizar a deformação
- Fator de eficiência  $\eta$ : razão entre a energia disponível para deformação e a energia total fornecida pela máquina

# Condições para completar a operação

1.  $L_M \geq L_P$  (Carga total maior que a carga necessária para o processo)

2. Em um golpe:

$E_M \geq E_P$  (Energia total maior do que a energia requerida para o processo ao longo do golpe)

# Características dependentes do tempo

- Golpes por minuto —  $n$  — Determina a razão de produção
- Tempo de contato sob pressão —  $t_p$  — Tempo que o material permanece na matriz sob carga de deformação
- Velocidade sob pressão —  $V_p$  — velocidade de deslizamento sob carga

# Características para precisão

- Trabalho em vazio:
  - Folgas nas guias
  - Paralelismo entre mesa superior e inferior
  - Planicidade das mesas superior e inferior
  - Perpendicularismo entre o movimento de descida e a mesa inferior
  - Concentricidade das fixações de ferramenta

# Características para precisão

- Discussão:
- Imagine uma prensa que faz uma lata de alumínio:
  - O que acontece com o produto se houver um desvio no perpendicularismo da descida da mesa superior em relação à mesa inferior?

# Características para precisão

- Sob condições de carregamento
  - Desvios no movimento vertical e deflexão estrutural resultam em desgaste excessivo nas guias, desvios de espessuras nas peças e desgaste de ferramenta
  - O centro de carga da peça (ponto de aplicação do vetor resultante da carga de conformação) deve estar alinhado com o centro de carga da prensa.

# Rigidez da prensa

- Característica muito significativa em prensas, em que a estrutura e o mecanismo de acionamento estão sujeitas a carga
- Razão entre a carga  $L_M$  e a deflexão elástica total  $d$  entre a mesa inferior e superior

$$C = L_M / d$$

# Rigidez da prensa

- Deflexão elástica total (d) inclui:
  - Deflexão da estrutura da prensa – 25-35% do total
  - Deflexão do mecanismo de acionamento – 65-75%
- Para a mesma carga LM, a energia elástica armazenada na prensa durante o aumento da carga é menor para uma prensa mais rígida.

## Rigidez da prensa

$$E_d = dL_M / 2 = L_M^2 / 2C$$

- Uma vez que prensas mais rígidas têm menos deformação elástica,
- Em prensas menos rígidas, o tempo de contato sob pressão é maior.
- O que se espera da vida da ferramenta em prensas menos rígidas?

# Prensas e martelos

- Três tipos de prensas:
  - Hidráulicas
  - Mecânicas
  - De fricção ou fuso
  
- Martelos
  - Uso limitado
  - Forjamento a quente, cunhagem, conformação de chapas

# Prensas hidráulicas

- Movimento de um pistão hidráulico guiado dentro de um cilindro
- Carga restrita – capacidade de conformação é dada pela máxima carga disponível

# Prensas Hidráulicas

- Acionamento direto – carga máxima está disponível em qualquer momento do movimento do cabeçote
- Acionamento cumulativo – Carga diminui ligeiramente dependendo do curso do cabeçote e de características do processo de conformação

# Prensas Hidráulicas

- Carga máxima disponível durante todo o curso do cabeçote – ideal para processos em que se requer uma carga alta e constante (ex. extrusão)
- Carga máxima pode ser limitada para proteção do ferramental
  - Limite é feito por uma válvula de retorno
- Velocidade do cabeçote pode ser variada continuamente durante o curso total, melhorando o controle do processo

# Prensa de acionamento direto

- Utiliza óleo hidráulico como meio
- Prensas antigas verticais – o cabeçote cai por gravidade, e as válvulas são fechadas quando a ferramenta superior toca a peça;
- Prensas modernas – uma pressão residual é mantida nos cilindros de retorno

# Prensa de acionamento direto



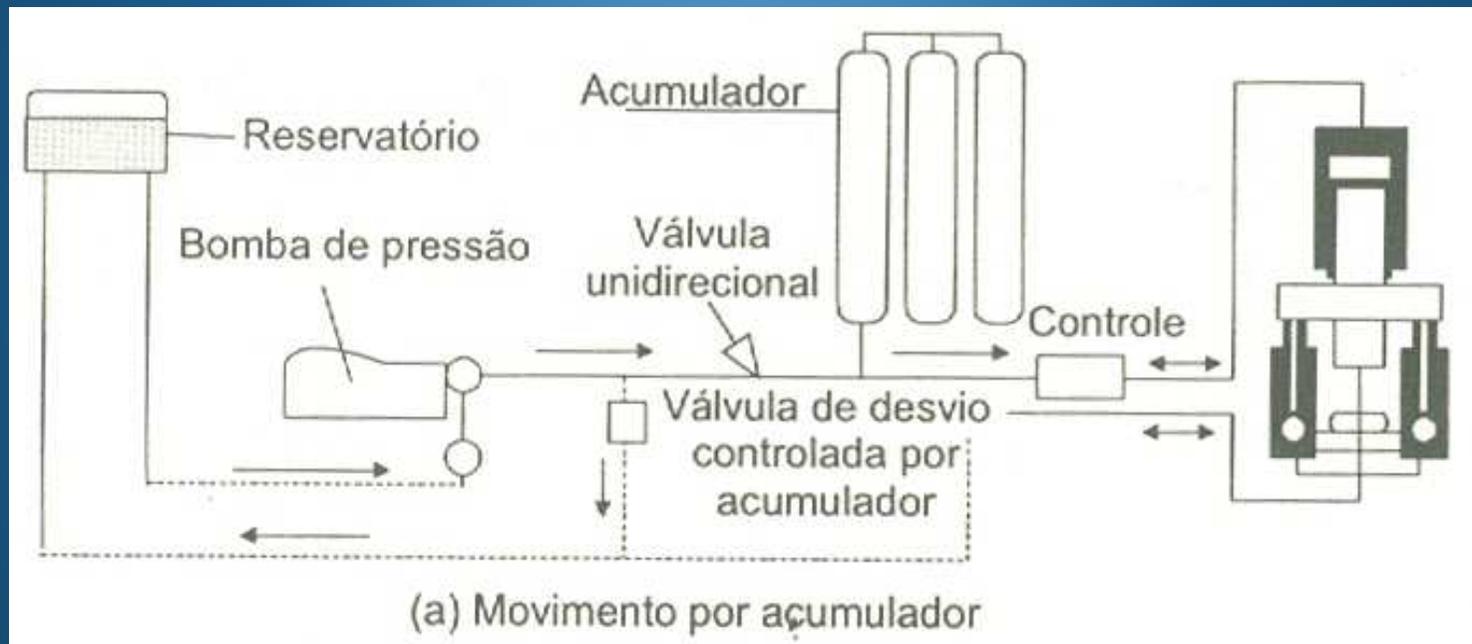
# Prensas com acumulador

- Utilizam emulsão óleo-água como meio de trabalho
- Utilizam nitrogênio, vapor ou ar comprimido em acumuladores que mantêm a pressão na linha

# Prensas com acumulador

- Velocidade não é diretamente dependente da bomba, e pode variar de acordo com
  - Pressão no acumulador
  - Compressibilidade do meio de pressão
  - Resistência do material sendo deformado
- No final do curso, o meio de pressão se expande, e a velocidade de penetração e carga disponível diminuem

# Prensa com acumulador



# Prensas Hidráulicas

- Pressão cresce e o meio de pressão é comprimido
- Taxa de penetração diminui
- Óleo é mais compressível que emulsão  $\Rightarrow$  ~queda na taxa de penetração é maior nas prensas diretas

# Prensas Hidráulicas

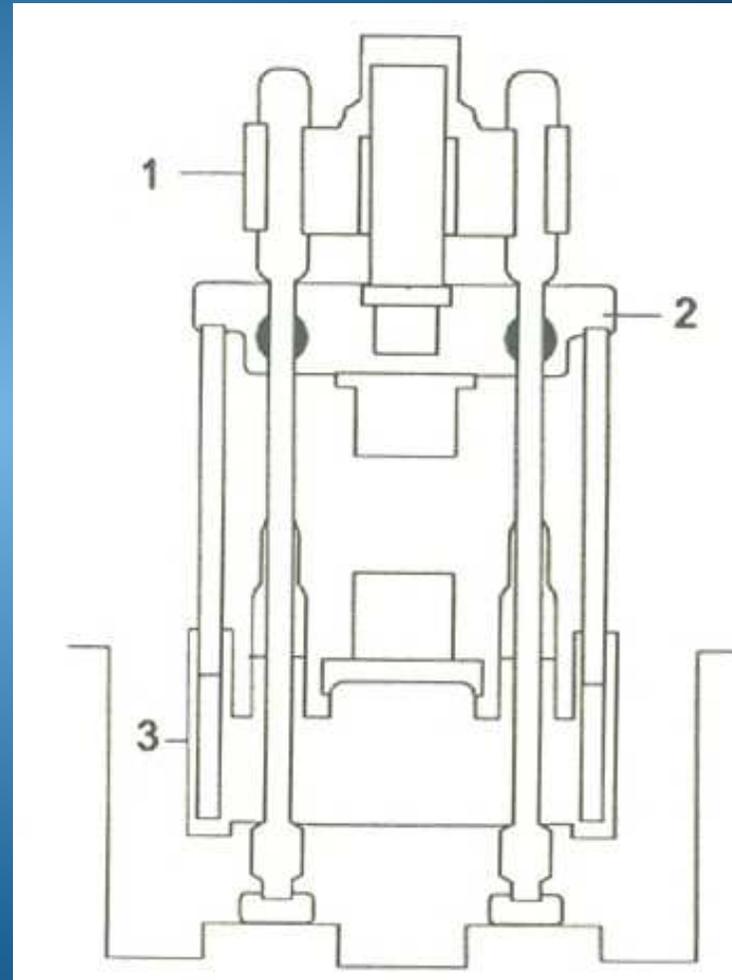
- Velocidade de aproximação é maior nas prensas com acumulador
  - Melhora nas condições de conformação a quente devido a menores tempos de contato
  - Maior solicitação do sistema hidráulico
- Escolha do tipo de prensa depende de fatores econômicos
  - Prensas com acumulador tendem a ser mais viáveis se o sistema de acumuladores for compartilhado entre várias máquinas

# Prensas Hidráulicas

- Push-down
  - Cilindro do cabeçote e placa de base são conectadas por colunas que suportam a carga e guiam a estrutura pistão-cabeçote
  - Muito sensível a cargas fora de centro

# Prensas Hidráulicas

- Push-down
  1. Cabeça com cilindro estacionário
  2. Estrutura de pistão e cabeçote
  3. Mesa de prensagem estacionária com cilindro de retorno



# Prensas Hidráulicas

- Push-down
  1. Cabeça com cilindro estacionário
  2. Estrutura de pistão e cabeçote
  3. Mesa de prensagem estacionária com cilindro de retorno

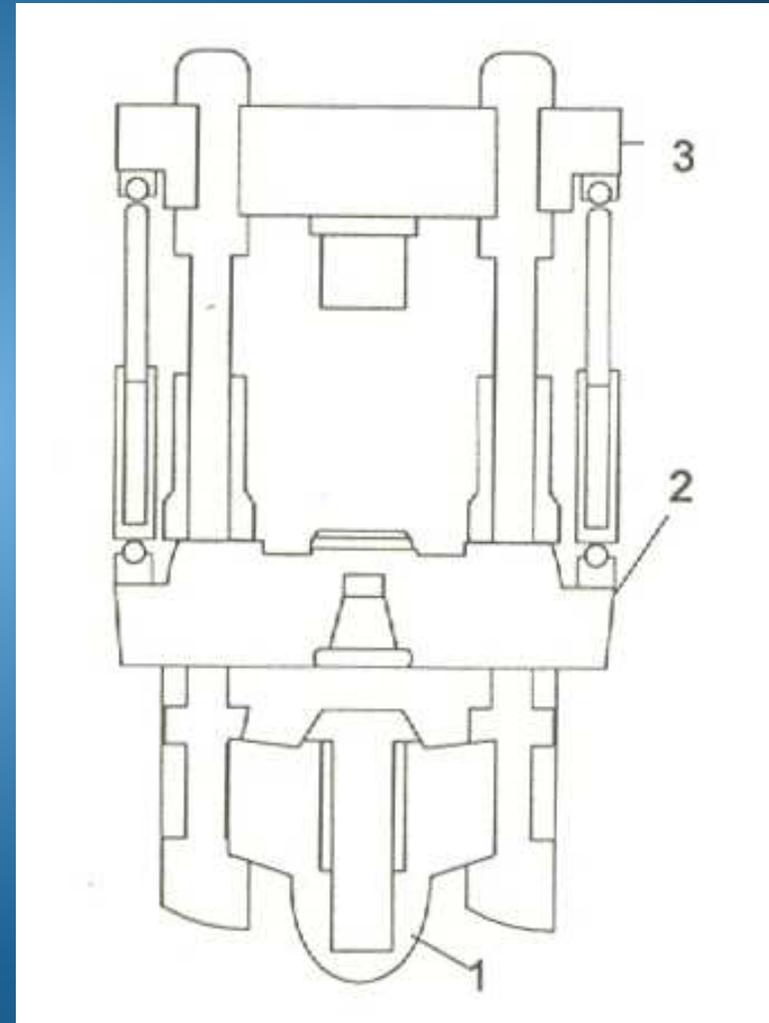


# Prensas Hidráulicas

- Pull-down
  - Placa de base se apóia na fundação
  - Cilindro do cabeçote está abaixo do nível do chão e conectado às colunas da prensa
  - Centro de gravidade no nível do chão
  - Maior rigidez
  - Adequada para edifícios de pé-direito baixo

# Prensas Hidráulicas

- Pull-down
  1. Cilindro-estrutura móvel
  2. Mesa de prensagem com cilindro de retorno
  3. Cabeçote móvel



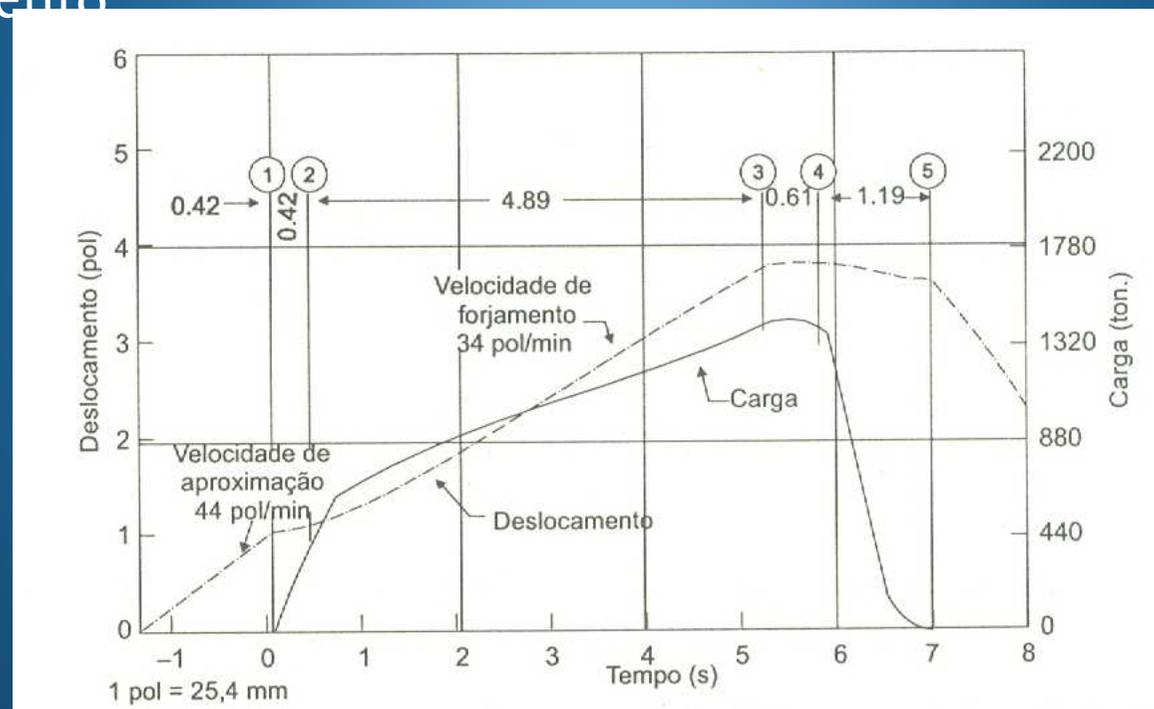
# Prensas Hidráulicas

- Pull-down
  1. Cilindro-estrutura móvel
  2. Mesa de prensagem com cilindro de retorno
  3. Cabeçote móvel



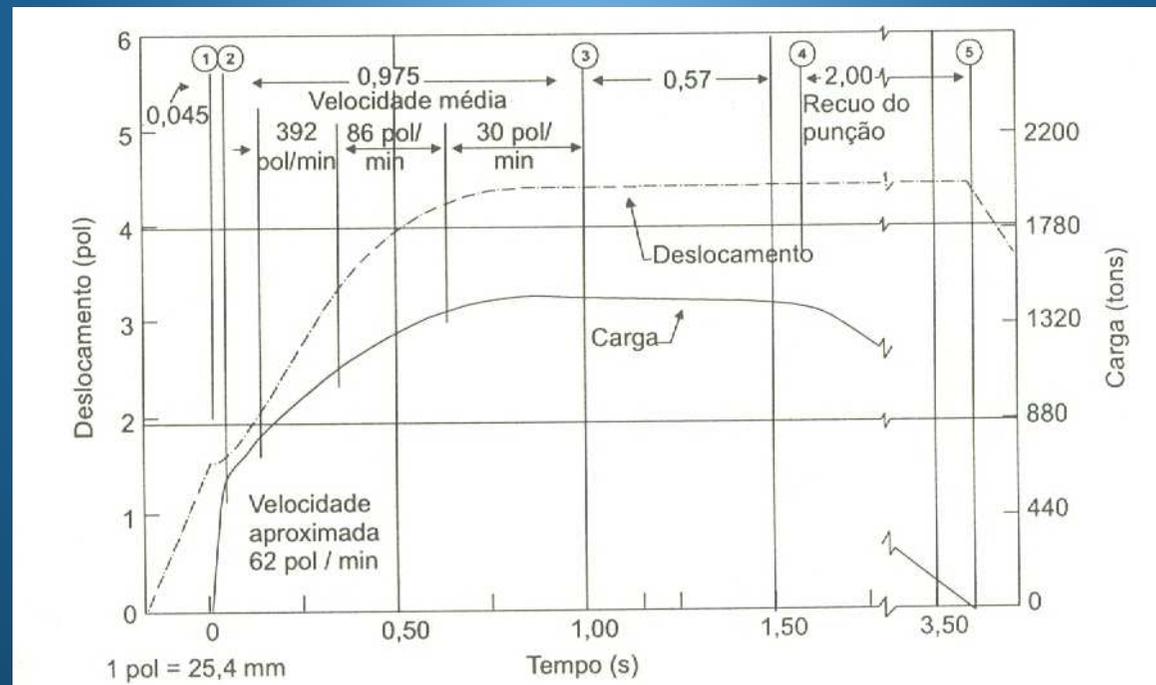
# Características das prensas hidráulicas

- Acionamento direto – carga máxima está disponível ao longo de todo o deslocamento



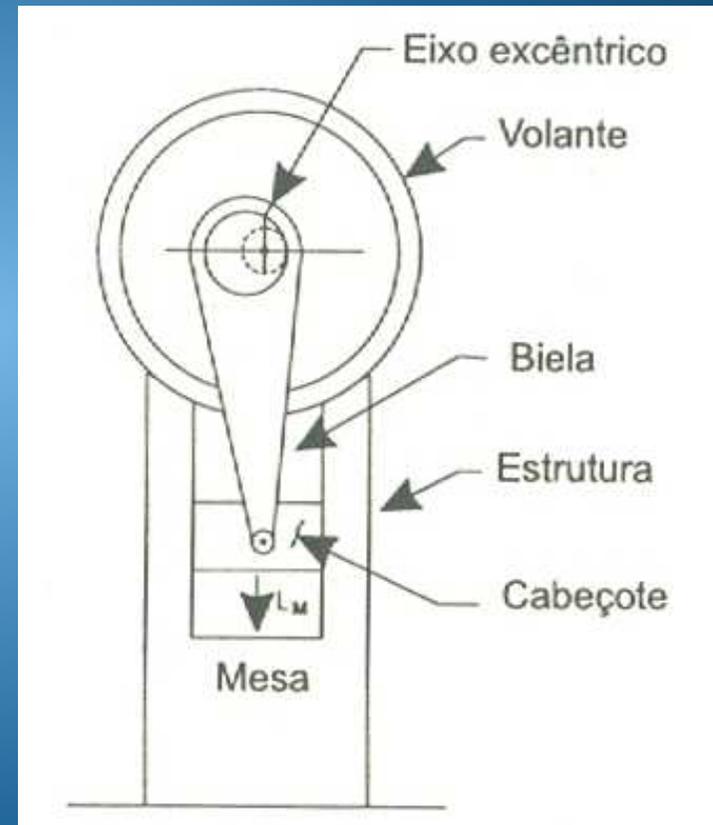
# Características das prensas hidráulicas

- Sistema com acumulador – oferece altas velocidades de aproximação
  - Tempo de contato ao final da conformação é maior



# Prensas Mecânicas

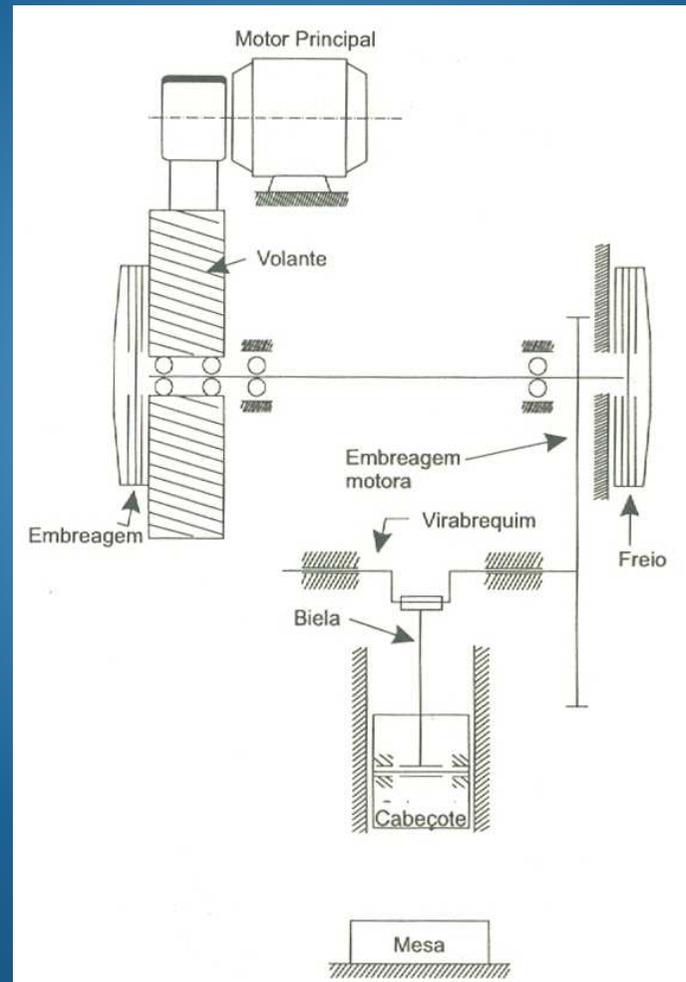
- Maioria das prensas mecânicas é baseada no princípio biela-manivela
- Movimento circular é transformado em movimento linear recíproco
- O eixo excêntrico é diretamente ligado ao volante por um sistema de embreagem e freio



# Prensas Mecânicas

- Projetos de grande capacidade
  - Volante está em um eixo intermediário
  - Eixo intermediário aciona o eixo excêntrico por meio de engrenagens
  - Torque do volante fica disponível no eixo excêntrico e é transmitido para o cabeçote

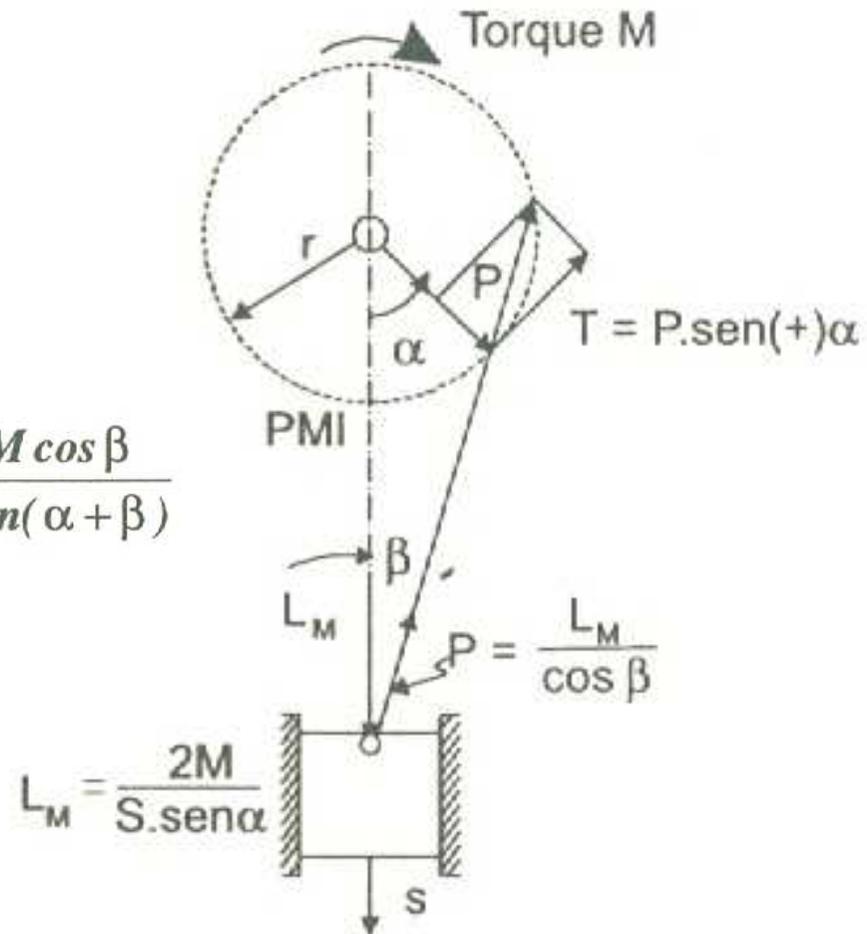
# Prensas mecânicas



# Prensas Mecânicas

$$\lambda = \frac{r}{\ell} = \frac{1}{10} \quad \text{ou} \quad \frac{\text{sen} \beta}{\text{sen} \alpha} = \frac{1}{10}$$

$$L_M = P \cos \beta = \frac{T \cos \beta}{\text{sen}(\alpha + \beta)} = \frac{2M \cos \beta}{S \text{sen}(\alpha + \beta)}$$



# Prensas Mecânicas

- Posição do curso  $h$  em função do ângulo  $\alpha$ :

$$h = (r + \ell) - \left( r \cos \alpha + \sqrt{\ell^2 - r^2 \operatorname{sen}^2 \alpha} \right), \text{ ou}$$

$$h = r(1 - \cos \alpha) + \ell \left( 1 - \sqrt{1 - \left( \frac{r}{\ell} \right)^2 \operatorname{sen}^2 \alpha} \right)$$

# Prensas mecânicas

- A raiz pode ser expandida em série de Taylor resultando em

$$1 - \frac{1}{2\ell^2} \text{sen}^2 \alpha$$

- E a equação que descreve  $h$  pode ser escrita como:

$$h = r(1 - \cos \alpha) + \frac{r^2}{2\ell} \text{sen}^2 \alpha$$

# Prensas mecânicas

- Para baixos valores de  $\alpha$ , ou seja, próximo ao ponto morto inferior:

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

- A velocidade pode ser obtida derivando-se a equação de posição de  $h$  em função do tempo:

$$V = \frac{dh}{dt} = \frac{dh}{d\alpha} \frac{d\alpha}{dt} = \frac{dh}{d\alpha} \omega = \left( r \operatorname{sen} \alpha + \frac{r^2}{\ell} \operatorname{sen} \alpha \cos \alpha \right) \omega$$

# Prensas Mecânicas

- Se  $n$  for o número de rotações por minuto do volante, então:

$$\omega = 2\pi n/60$$

$$S = 2r.$$

- O segundo termo da equação da velocidade é muito menor do que o primeiro, de forma que:

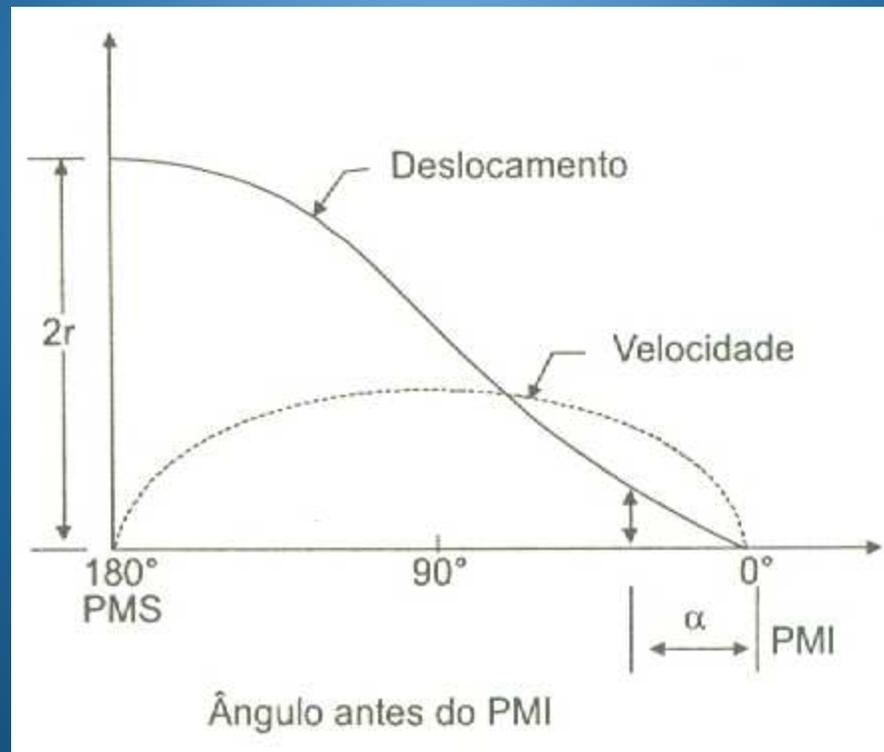
$$V = \frac{S\pi n}{60} \operatorname{sen} \alpha$$

ou também

$$V = \frac{\pi n}{30} h \sqrt{\left(\frac{S}{h}\right)^2 - 1}$$

# Prensas mecânicas

- Variação de velocidade e deslocamento do cabeçote com o ângulo  $\alpha$



# Prensas mecânicas

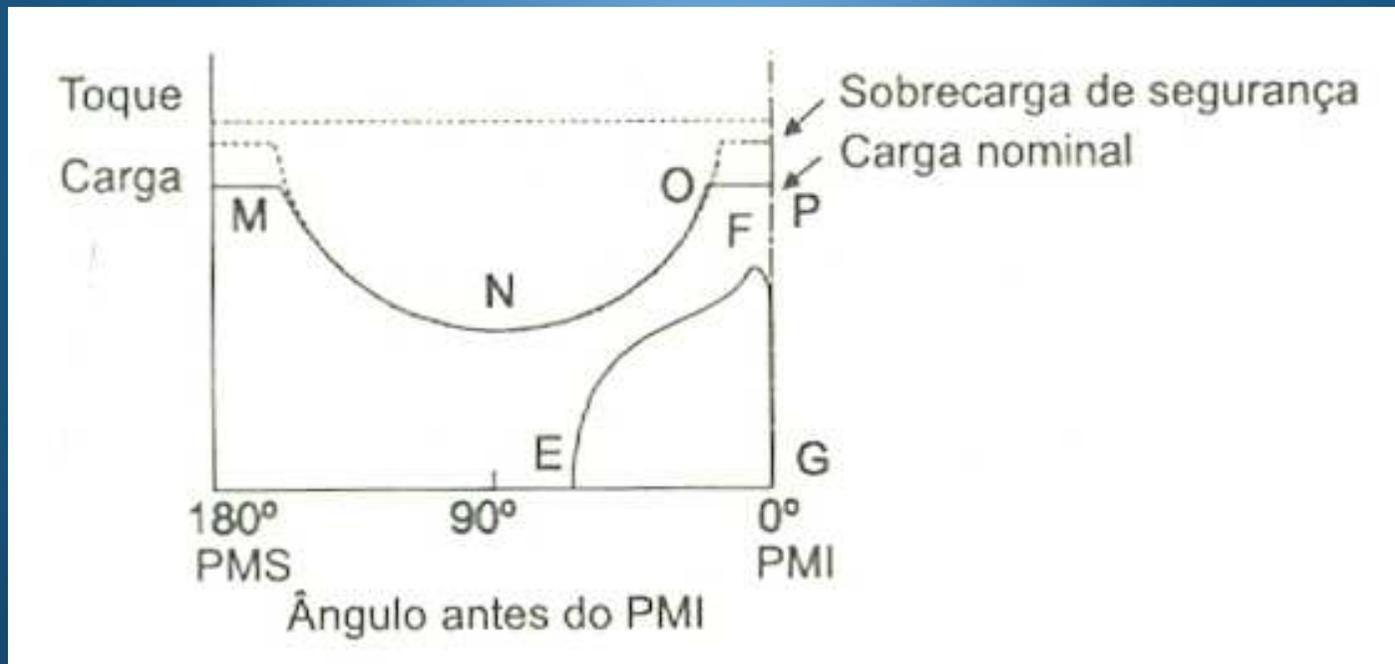
- Carga e energia:
  - A carga pode ser aproximada por:

$$L_M = \frac{2M}{S \operatorname{sen} \alpha}$$

- O torque,  $M$ , é constante e dependente do mecanismo de acionamento
- Quando o ângulo se aproxima de 0, a carga tende a infinito e é limitada à carga disponível na embreagem, dada pelo torque  $M$

# Prensas mecânicas

- Variação da carga da máquina com o ângulo da biela em uma prensa excêntrica



# Prensas mecânicas



# Prensas Mecânicas



# Prensas mecânicas

- Prensas biela-manivela têm deslocamento restrito. A velocidade de descida e a carga variam com a posição relativa entre o cabeçote e o ponto morto inferior
  - Fabricantes nos EUA especificam suas máquinas em termos de carga nominal a uma dada distância do PMI.

# Prensas mecânicas

- Se a carga necessária para a conformação é menor do que a carga disponível na prensa, o processo pode ser realizado contanto que o volante possa suprir a energia necessária para cada curso

# Prensas mecânicas

- Para pequenos ângulos próximo ao PMI, a carga pode se tornar maior que a nominal da prensa se não houver dispositivos de proteção
- Neste caso, a prensa trava, o volante pára, e toda a energia dele é usada para deformar a estrutura da prensa, a biela e o mecanismo de acionamento.
- As ferramentas têm que ser desmontadas para destravamento da prensa, podendo haver a necessidade de destruição dessas.

# Prensas Mecânicas

- Durante cada golpe, a rotação do volante é reduzida em aproximadamente 10-20%.
- Energia total no volante:

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

- Energia utilizada no golpe:

$$E_S = \frac{I}{2} I (\omega_0^2 - \omega_I^2) = \frac{I}{2} \left( \frac{\pi}{30} \right)^2 (n_0^2 - n_I^2)$$

# Prensas Mecânicas

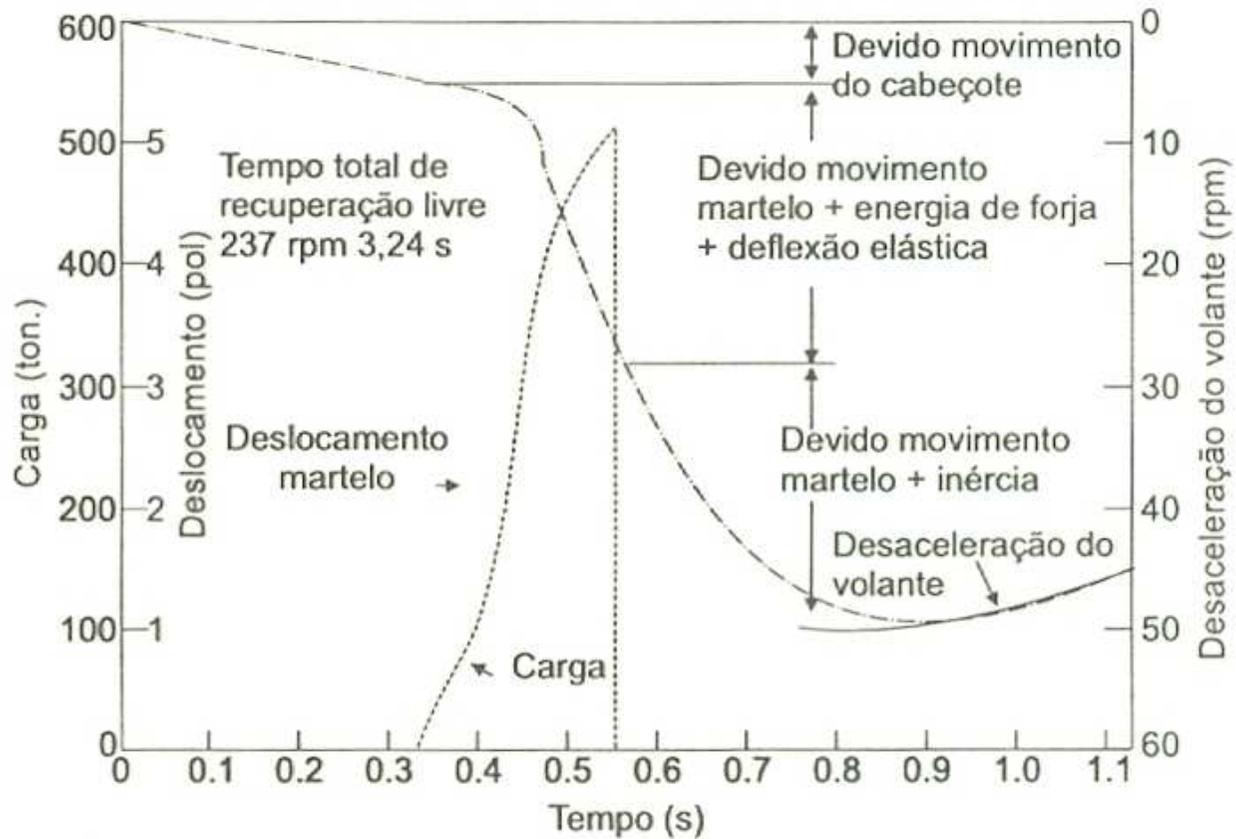
- A energia gasta em cada golpe inclui perdas com atrito e deformação elástica
- O motor deve retomar a rotação antes do golpe seguinte
- Se a operação for contínua, o tempo para recuperação é menor e há necessidade de um motor mais potente

# Prensas Mecânicas

- A desaceleração do volante é dada como uma porcentagem da velocidade nominal
- Para 13% de redução da rotação:

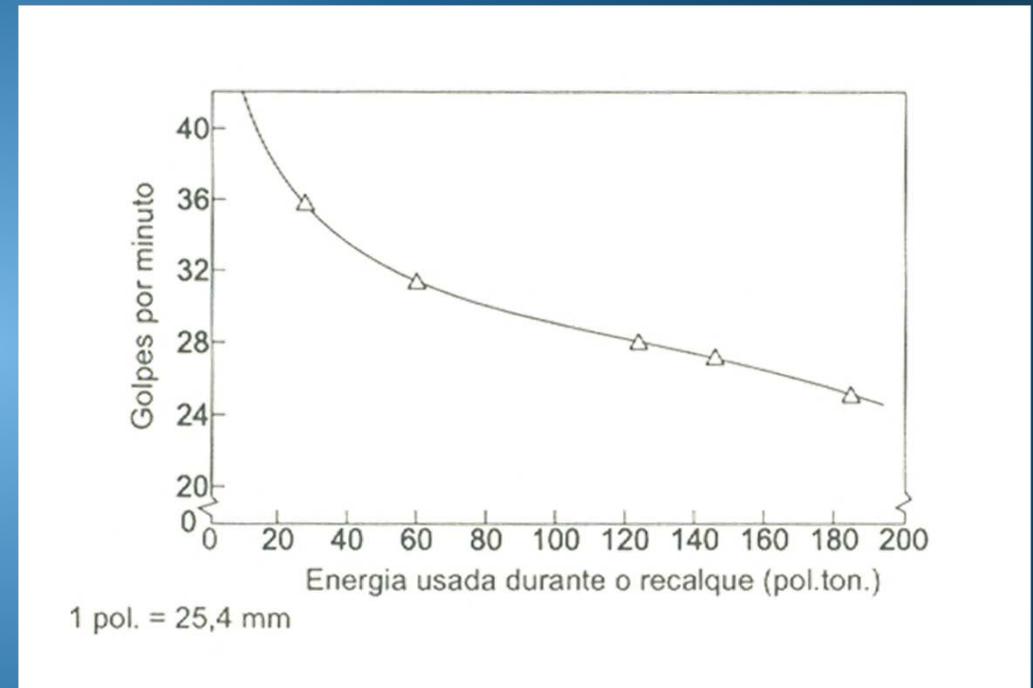
$$\frac{E_S}{E_{FT}} = \frac{n_0^2 - n_1^2}{n_0^2} = 1 - (0,87)^2 = 0,25$$

# Prensas Mecânicas



# Prensas mecânicas

- A prensa do exemplo leva 3,24 s para retomar a velocidade após o início do ciclo
- Portanto, pode realizar  $60/3,24$  golpes em um minuto, ou seja, 18.
- Para cada prensa, existe uma relação única entre golpes por minuto e energia disponível por golpe



# Características dependentes do tempo

- A velocidade do cabeçote é dependente das rotações por minuto,  $n$  (diretamente proporcional ao número de golpes por minuto) e ao curso do cabeçote
- Para aumentar a velocidade durante a deformação é necessário aumentar  $n$ .

# Características dependentes do tempo

- O tempo de contato e a velocidade sob pressão ( $V_p$ ) dependem das dimensões do mecanismo e da rigidez da prensa ( $C$ )
- Aumentando a carga, aumenta-se a deformação elástica da prensa
- Em uma prensa mais rígida, o tempo para que a pressão suba e para que ela decresça é menor
- O tempo total de contato é menor quanto maior a rigidez da prensa.

# Precisão das prensas mecânicas

- Caracterizada de duas formas:
  - Inclinação do cabeçote em relação à vertical sob carregamento fora de centro: produz superfícies inclinadas ou com degraus
  - Rigidez da prensa: influi nas tolerâncias de espessura.
  - Prensas com mais bielas tendem a ter desempenho melhor, porque a inclinação do cabeçote e as forças nas guias são minimizadas

# Prensa de fuso ou fricção

- Utilizam engrenagens para transmitir a rotação do volante para um fuso, que converte o movimento rotacional em um movimento linear.



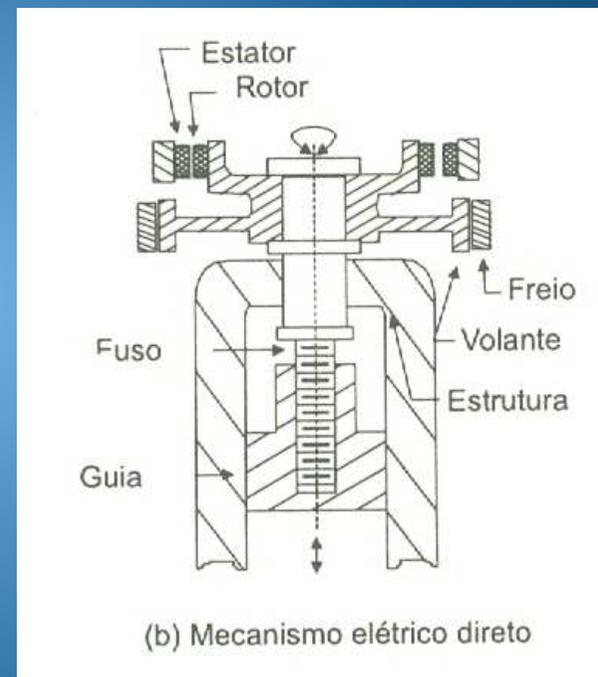
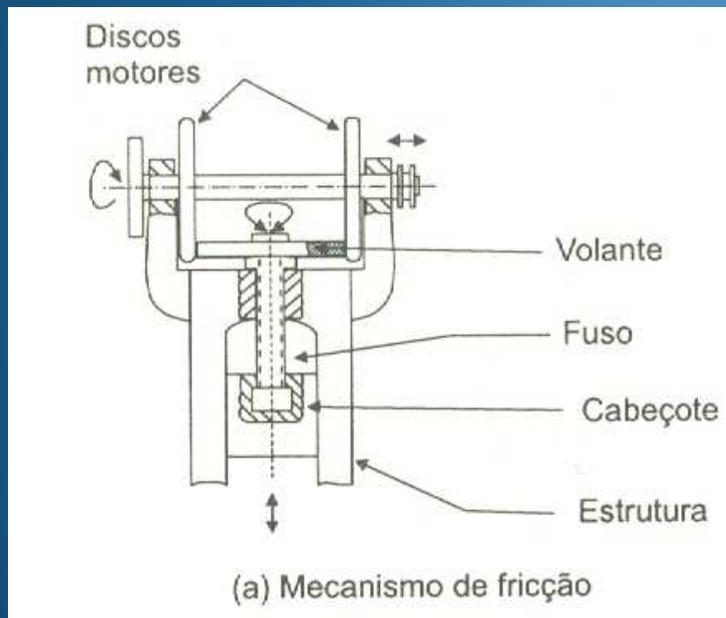
# Prensa de fuso

- Discos de acionamento montados em eixos horizontais
- O disco é pressionado ao volante por um servomotor
- O fuso, conectado diretamente ou por embreagem, é acelerado.
- A velocidade aumenta até o contato da matriz com a peça
- A carga necessária é transmitida pelas guias, fuso e mesa para a estrutura da prensa

# Prensa de fuso

- Quando toda a energia é utilizada, o volante, o fuso e as guias param
- O servomotor aciona outro disco, que inverte o movimento do fuso
- Em prensas com acionamento direto, um motor elétrico reversível é acoplado diretamente ao fuso

# Prensas de fuso



# Carga e energia em prensas de fuso

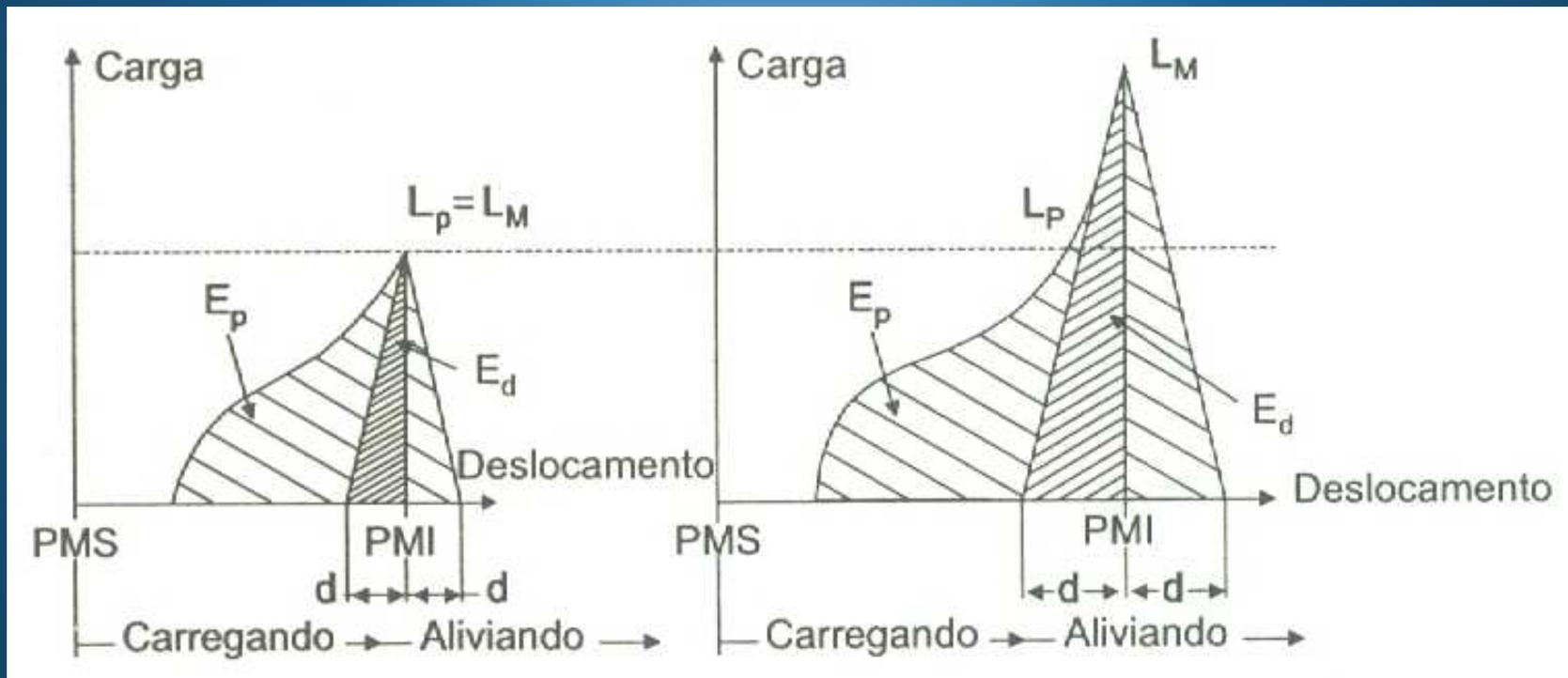
$$E_T = E_P + E_F + E_d$$

- $E_T$  = Energia total
- $E_P$  = Energia efetivamente consumida na conformação (inclui atrito na ferramenta e deformação elástica da peça)
- $E_F$  = Energia consumida para vencer o atrito nos mecanismos da máquina
- $E_D$  = Energia consumida na deformação elástica da prensa

# Carga e energia nas prensas de fuso

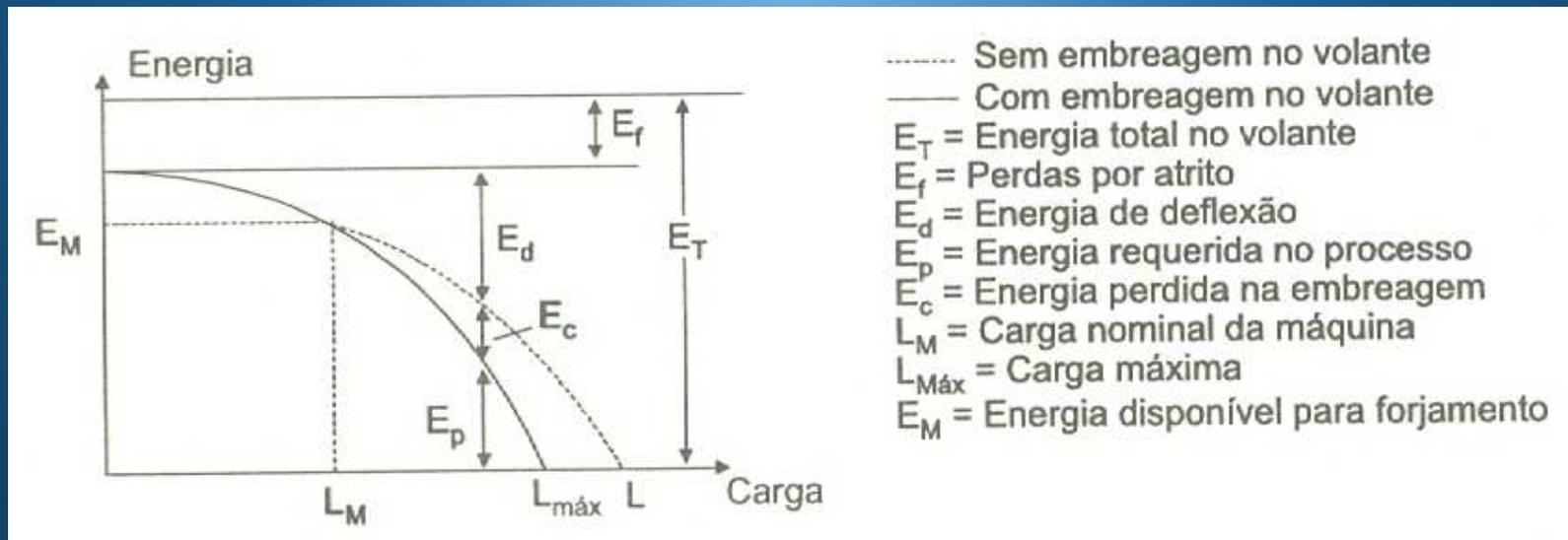
- Se  $E_T$  é maior do que a necessária para vencer o atrito nos acionamentos e para realizara conformação, o excesso vai para  $E_D$
- A prensa e a ferramenta são sobrecarregadas elasticamente sem necessidade
- Resultado – desgaste da ferramenta, ruído
- Prensas modernas têm dispositivos que regulam a velocidade do volante

# Carga e energia em prensas de fuso



# Carga e energia em prensas de fuso

- Máquina de energia fixa
- Se a energia necessária para deformação for alta, a carga disponível ao fim do golpe é pequena e vice-versa



# Carga e energia em prensas de fuso

- O diagrama carga-energia tem a forma de uma parábola porque a energia de deflexão segue uma relação quadrática:

$$E_d = \frac{L_M^2}{2C}$$

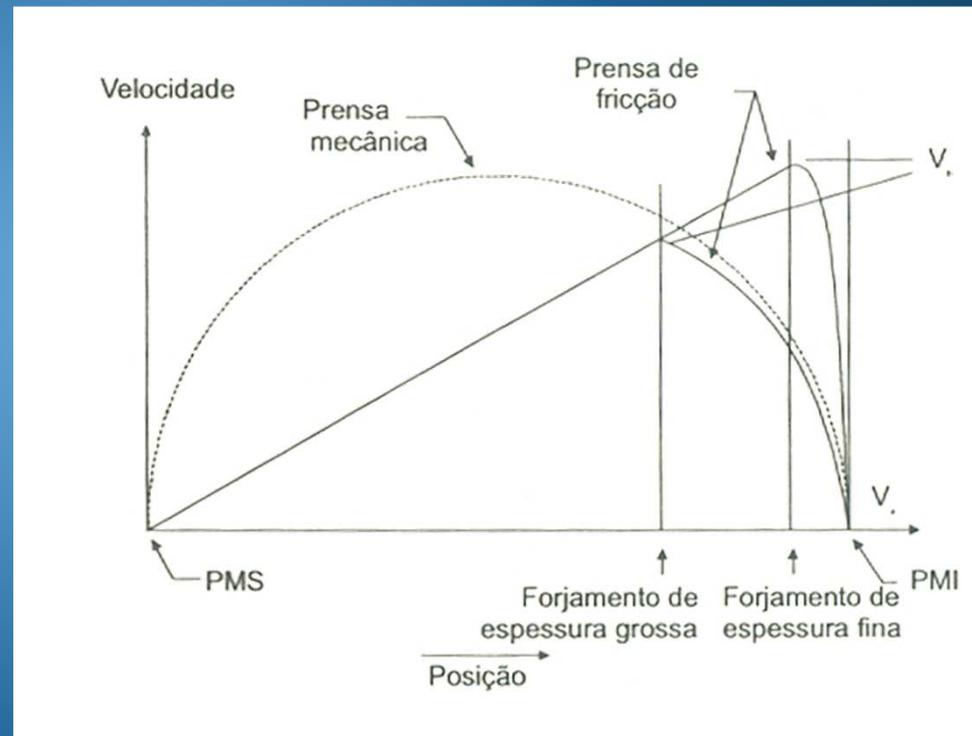
- Prensas de alta energia podem ser usadas para operações de baixa energia
- Usa-se uma embreagem entre o volante e o fuso. Quando a carga atinge um valor nominal definido, a embreagem desliza e uma parte da energia se perde por atrito nela

# Características dependentes do tempo

- O número de golpes por minuto depende da energia para o processo de conformação e da capacidade de aceleração do fuso e volante
- Taxa de produção, é menor do que a de uma prensa mecânica
- Velocidade aumenta durante a descida do cabeçote até o contato entre matriz e material

# Características dependentes do tempo

- Após o início da conformação, a velocidade cai dependendo da energia de conformação no processo
- Velocidade é influenciada pela geometria da peça e do tarugo



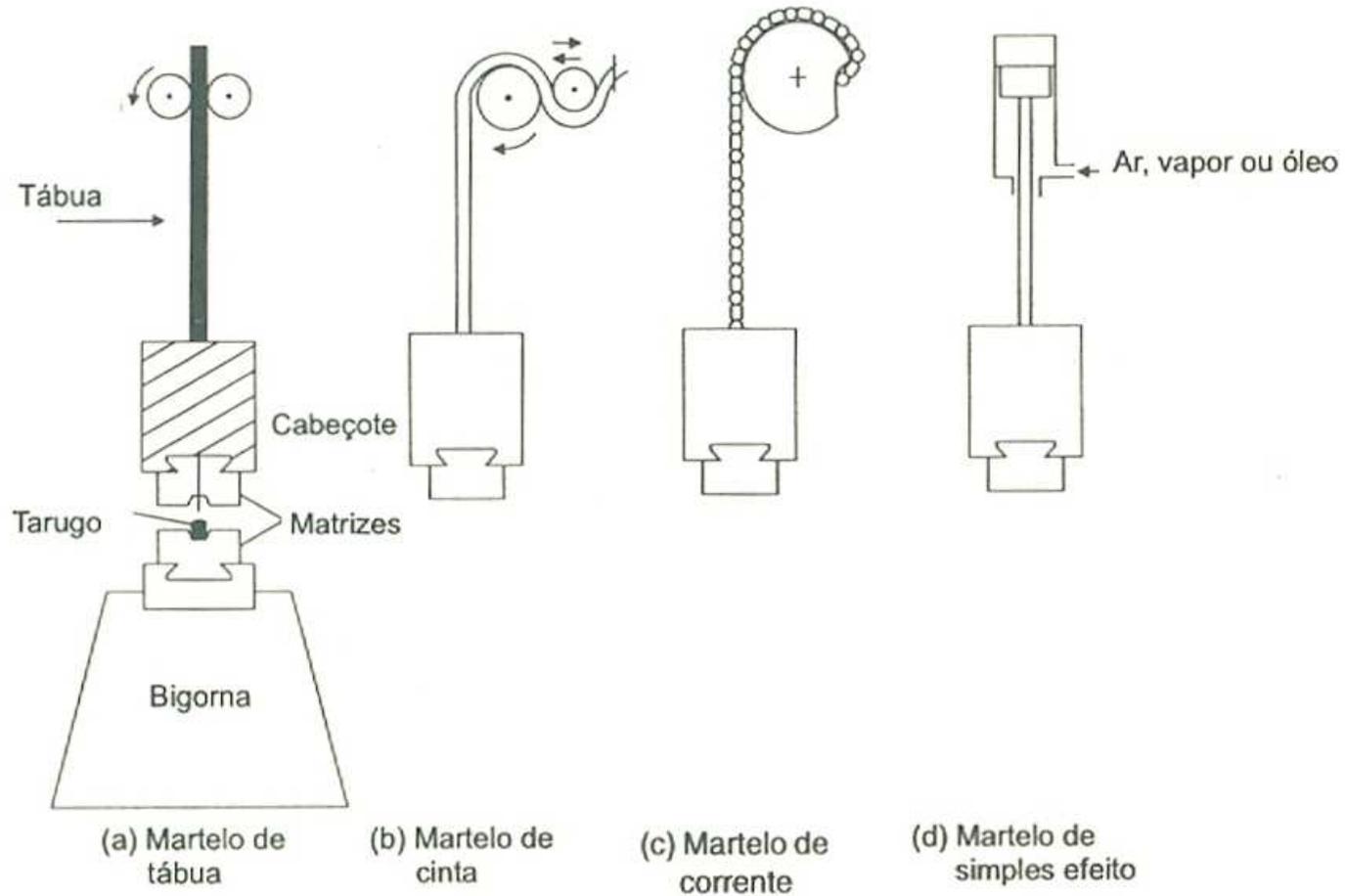
# Martelos de forja

- Equipamento de menor custo e maior versatilidade
- Máquina de energia restrita
- A deformação acontece até que toda a energia cinética seja dissipada na forma de deformação do material e deflexão elástica da máquina

# Martelos de forja

- Martelos de queda
  - Martelo é levantado a certa altura e solto.
  - Acelera-se por gravidade e acumula energia para o golpe
  - Força para garantir um rápido reerguimento do martelo pode ser de 3 a 5 vezes o seu peso.

# Martelos de queda



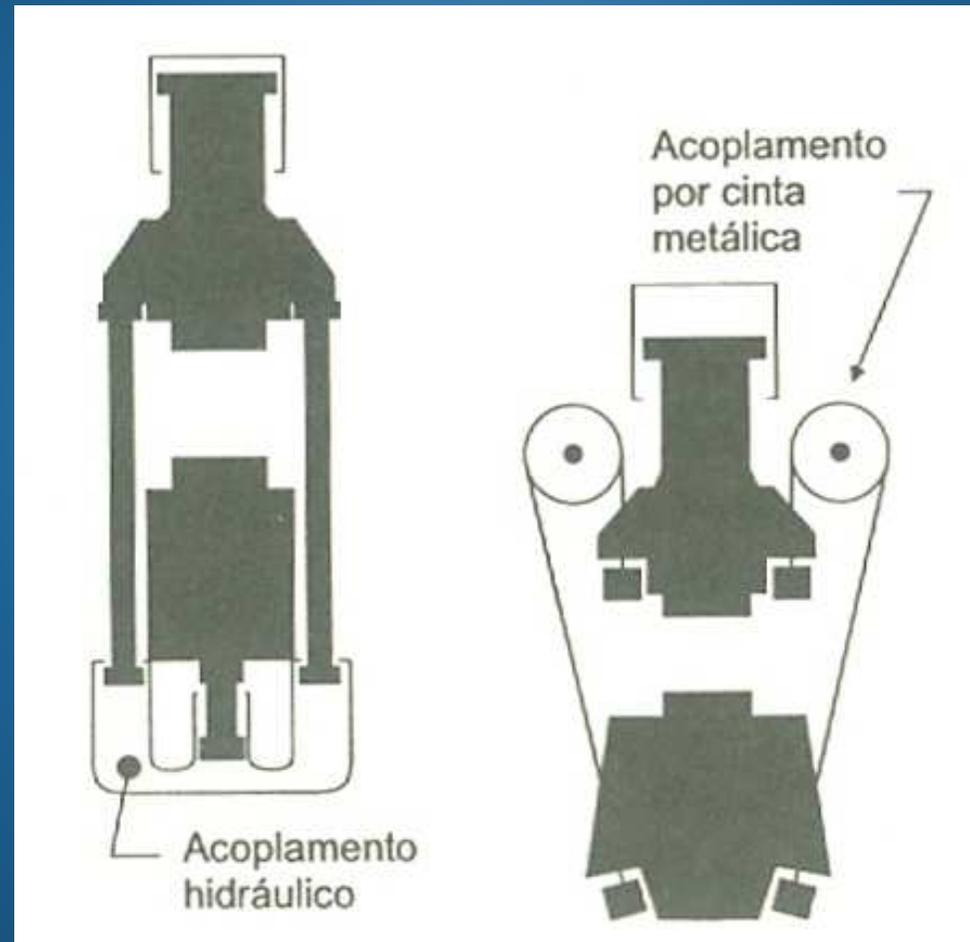
# Martelos de forja

- Martelo com acionamento ou de dupla ação
  - Além da gravidade, o martelo é acelerado por vapor, ar frio ou quente sob pressão
  - Martelo eletrohidráulico – o cabeçote é levantado por pressão de óleo contra uma bolsa de ar
  - O ar amortece o golpe do martelo e contribui para a aceleração na descida

# Martelos de forja

- Martelos com acionamento ou de dupla ação
  - Martelos de contragolpe
  - Cabeçote superior é acionado para baixo por vapor, ar frio ou quente
  - Cabeçote inferior é acionado para cima por cinta de aço ou sistema hidráulico
  - Cabeçote inferior é mais pesado do que o superior
  - Pouca energia é perdida como vibração da fundação

# Martelo de forja - contragolpe



# Energia dos martelos de forja

- Martelo de queda

$$E_T = \frac{1}{2} m_1 v_1^2 = \frac{1}{2} \frac{G_1}{g} v_1^2 = G_1 H$$

- Martelo com acionamento

$$E_T = \frac{1}{2} m_1 v_1^2 = (G_1 + pA) H$$

- Martelo de contragolpe

$$E_T = 2 \left( \frac{1}{2} m_1 v_1^2 \right) = \frac{m_1 v_1^2}{4} = \frac{G_1 v_1^2}{4g}$$