FORJAMENTO E ESTAMPAGEM

Antonio Luiz Adami

ÍNDICE

7 - FORJADOS - ASPECTOS MERCADOLÓGICOS 01

7.1 - Introdução 01

7.2 - Tendências atuais 01

7.3 - Forjado e situação nacional 03

8 - PREPARAÇÕES E ESCOAMENTO DO MATERIAL 05

8.1 - Generalidades 05

8.2 - Preparações no forjamento 06

8.3 - Fibragem 08

8.4 - Previsões de escoamentos do material 11

8.5 - Fatores de influência no fluxo do material 11

9 - ESFORÇOS E REBARBAS NO FORJAMENTO EM MATRIZ 13

9.1 - Rebarbas, dimensionamento 15

9.2 - Cálculo de esforços no forjamento 18

9.3 - Resistência dos aços a deformação plástica 19

9.4 - Modelo de cálculo conforme Geleji 22

9.5 - Força de forjamento - modelo de Storoshev 24

9.6 - Cálculo de Siebel para esforço de forjamento 25

10 - EQUIPAMENTO DE FORJAR 26

10.1 - Martelos 27

10.1.1 - martelos de queda 28

10.1.2 - martelos de duplo efeito 29

10.1.3 - martelos contra golpes 29

10.1.4 - martelos contra golpes horizontais 30

10.1.5 - martelos - princípio de operação 31

10.1.6 - eficiência do golpe 32

10.1.7 - seleção do tamanho do martelo 32

10.2 - Prensas 34

10.2.1 - prensas excêntricas 34

10.2.2 - prensas de cunha 36

10.2.3 - prensas de fricção 37

10.2.4 - prensas hidráulicas 39

10.3 - Recalcadoras 39

11 - EQUIVALÊNCIA ENTRE EQUIPAMENTOS DE FORJAR 44

11.1 - Prensa hidráulica e prensa mecânica 44

11.2 - Prensa mecânica e martelo 44

11.3 - Martelo duplo efeito e martelo contra golpe 45

11.4 - Martelo duplo efeito e martelo de queda 45

12 - REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS 46

ESCOLA DE ENGENHARIA DE SÃO CARLOS
BIBLIOTECA

7 - FORJADOS - ASPECTOS MERCADOLÓGICOS

7.1 - Introdução

A indústria automobilística e o veículo industrial, em particular, foram sempre os grandes consumidores de peças forjadas. Embora a porcentagem de produtos forjados para veículos tenha diminuído nestes últimos anos, as séries de peças têm acompanhado o crescimento do mercado automobilístico.

Em Forjaria fala-se frequentemente de peças para automóveis, pois elas representam produções em massa. Este não é, entretanto, o único elemento que permite justificar a utilização do forjamento. A qualidade e as características mecânicas do produto obtido, levam diretamente a utilização desta técnica de fabricação de peças. O preço da peça forjada, principalmente no caso de pequenas séries, é o fator negativo do forjado.

A peça forjada encontra então suas principais aplicações na fabricação de peças mecânicas que necessitam numerosas usinagens e propriedades mecânicas elevadas, caso típico das peças para indústrias aeroespacial e aeronáutica.

7.2 - Tendências atuais

A indústria do forjado está continuamente pressionada por uma crescente competição de outros processos produtivos tais como a fundição, metalurgia do pó e vários processos de usinagem. De modos a manter sua presença e mesmo aumentar o mercado do forjado, a indústria está desenvolvendo novas técnicas e melhoramentos nos forjados, com ligas metálicas mais sofisticadas, formas mais complexas e forjados mais precisos.

O termo precisão em um forjado pode ser entendido como a "proximidade do acabado" ou como a quantidade de sobremetal a ser retirado por usinagem de um esboço, a fim de atender às exigências dimensionais e detalhes exigidos pela peça acabada.

Como regra geral, o tipo de forjamento que exige menos usinagem para satisfazer as exigências requeridas para a peça final oferece as melhores propriedades. A redução do sobremetal que de um lado acarreta aumento de custos de matrizes e eleva igualmente a capacidade do equipamento, traz contudo uma economia bastante grande de usinagem e consequentemente um custo total menor. Custos comparativos para diversos graus de precisão são indicados no gráfico da figura 49.

Como se pode verificar no esquema da figura 49, para o forjado em si, a diminuição de custo na matéria-prima não é suficiente para equilibrar os aumentos relativos a ferramental e equipamento, resultando para o produto forjado um custo crescente com a precisão.

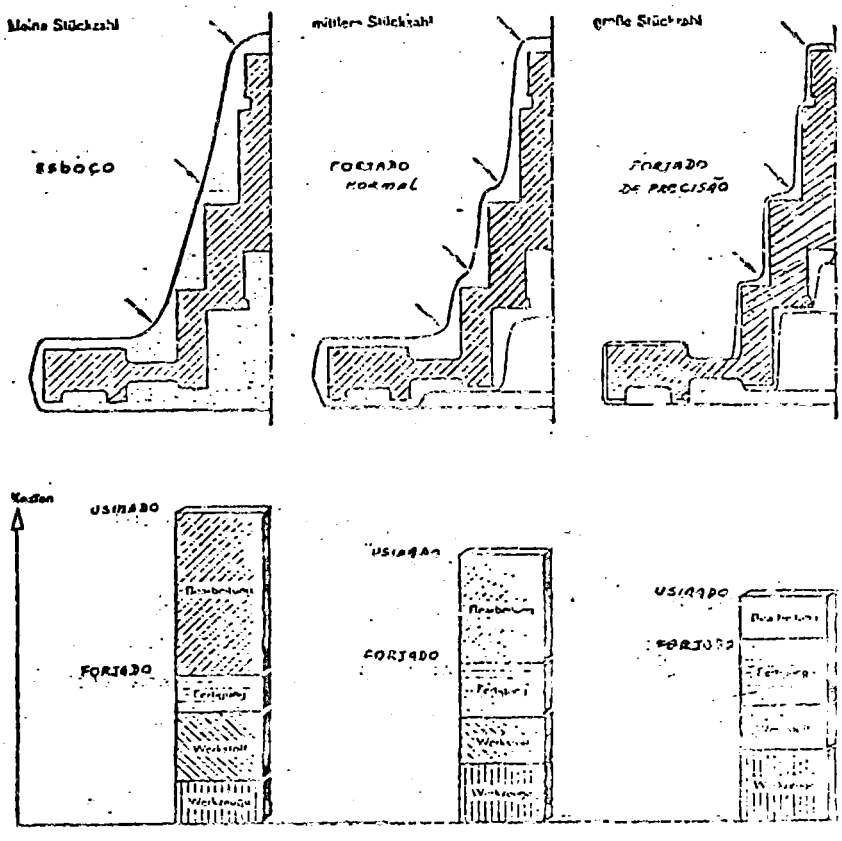


Fig. 49 - Variação de custos em função da precisão do forjado

Em face da economia final gerada pelo forjado de precisão e das circunstâncias econômicas atuais, os fabricantes de equipamentos para conformação, estão orientando sua produção para equipamentos de alta qualidade e projetos aprimorados. Pode-se dizer mesmo que muitas destas indústrias hoje sobrevivem graças aos insumos devidos a sua Engenharia de Projetos e as suas pesquisas.

Os resultados anteriores sobre economia de custos, contudo, não se aplicam paralelamente à precisão do forjado se dispuser de um processamento adequado de conformação, figura 50.

É evidente que se adequando o processo de fabricação ao tipo particular do forjado, haverá uma diminuição do custo de forjamento ao lado da redução do custo final do produto e isso acontece apesar do ganho em precisão obtido sobre o forjado.

Se, todavia, a conformação se fizer dentro de um mesmo processo, o custo de forjamento sempre aumentará com a precisão exigida.

Este comportamento de custo de fabricação versus precisão do forjado, rege e conduz os termos de negociações que fazem entre si os usinadores e os fornecedores de forjado, pois sempre, como se observa, as tendências de diminuições de custos de um acarreta acréscimo de custo de outro. Ambos, porém, devem usufruir das tecnologias disponíveis para angariar os benefícios de processos, a exemplo do indicado na figura 50.

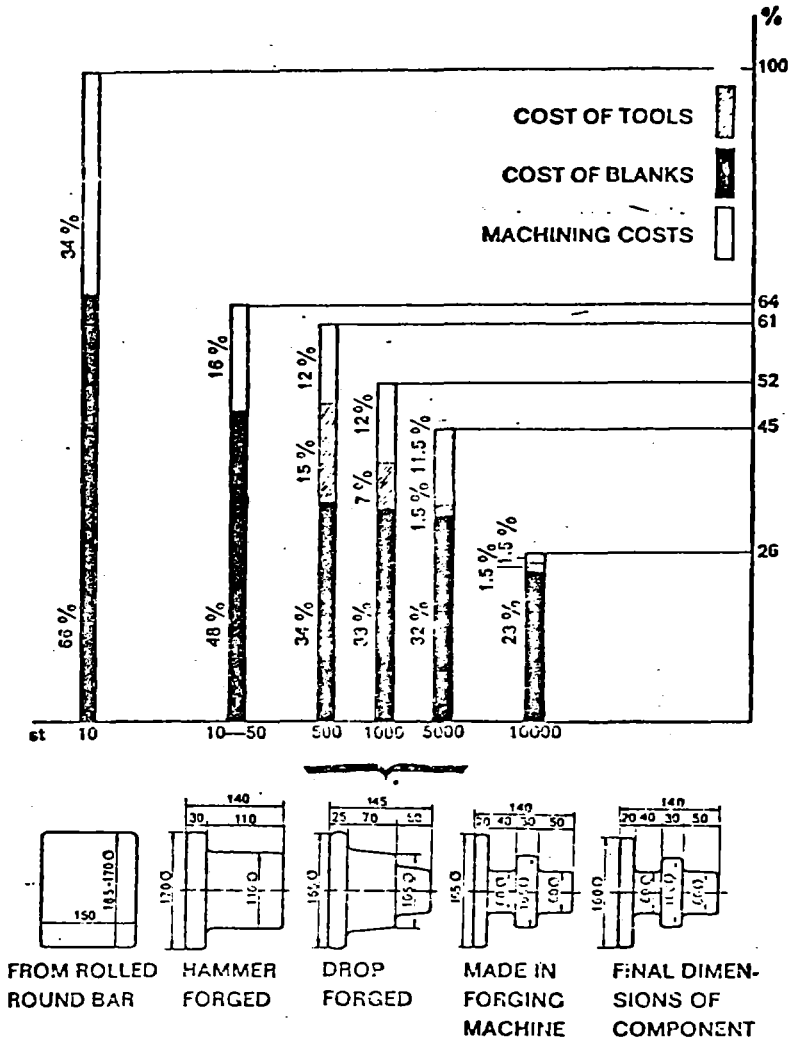


Fig. 50 - Comparação entre custos para fabricação de carretel de engrenagens por diferentes processos (1).

A precisão é conseguida pelo processo e em cada condição se está dentro da precisão normal do forjado, para a fabricação correspondente. Neste caso, a redução de custo é resultado da economia dos três principais fatores acima considerados, ou sejam, matéria-prima, ferramental e usinagem.

7.3 - Forjado e situação nacional

O país, atualmente com produção de aço em lingotes da ordem de 12,5 milhões de toneladas/ano, participa com pouco mais de 1% da produção mundial do mesmo produto.

Deste total, a produção nacional de forjado atinge a cifra de 500.000 t/ano, representando cerca de 4% da produção de aço.

O parque forjador brasileiro é constituído por cerca de 50 forjarias concentradas na Região Centro-Sul do país.

As forjarias nacionais que podem ser classificadas em três tipos principais, são divididas como se segue:

1 . forjarias leves, com produtos pesando até alguns quilos

2 . forjarias médias, com produtos até 250 kg

3 . forjarias pesadas, com produtos até 300 toneladas,

são agrupadas em 6 categorias (2):

GRUPO 1 . forjarias pesadas típicas, sendo em geral usinas integradas; partem de lingotes para forjamento de semi-acabados e esboços,

GRUPO 2 . forjarias cativas: são forjarias que integram empresas que produzem seus próprios forjados,

GRUPO 3 . forjarias de grande porte: são aquelas que produzem basicamente para a indústria automobilística,

GRUPO 4 . forjarias de médio e pequeno porte: como as anteriores, com nível de produção anual menor que 9.000 t,

GRUPO 5 . cutelaria e ferramentas,

GRUPO 6 . abrangem aquelas forjarias especializadas na produção de anéis, conexões e flanges, ferragens eletrotécnicas etc.

A produção nacional de forjados destina-se quase que exclusivamente a indústria automobilística, destinando-se a ela cerca de 75% da produção total. Do restante 25%, sobressaem a indústria ferroviária com 7% de participação e a indústria mecânica com 6%; o restante se pulveriza entre os demais ramos industriais sempre com participações menores de 3%.

Situação completamente adversa é encontrada em níveis de completo desenvolvimento industrial. Assim, para nações com maior diversificação industrial, o espectro de participação dos vários ramos industriais na produção de forjado, seria considerado desta maneira (3):

. Indústria aeroespacial 32%
. Indústria automobilística 23%
. Máquinas e equipamentos de elevação 12%
. Máquinas e equipamentos agrícolas 5,3%
. Indústria de armamentos 4,6%
. Indústria ferroviária 3,5%

O restante é pulverizado entre os demais ramos com participação não superiores a 0,6%.

O quadro acima pode revelar as chances reservadas às indústrias de forjaria nacionais e que virão se consagrar pelos desenvolvimentos industriais futuros, visto estarmos desprovidos de participação em campos tão promissores de consumo de forjados.

8 - PREPARAÇÕES E ESCOAMENTO DO MATERIAL

8.1 - Generalidades

A tecnologia do forjamento em matriz fechada é, aparentemente, muito simples. Trata-se de fazer, por deformação, a massa plástica de metal preencher um molde que é a cavidade da ferramenta, também chamada de matriz.

Como regra geral, o forjamento deve ser feito segundo um escoamento o mais expontâneo e natural possível dentro da matriz, figura 51.

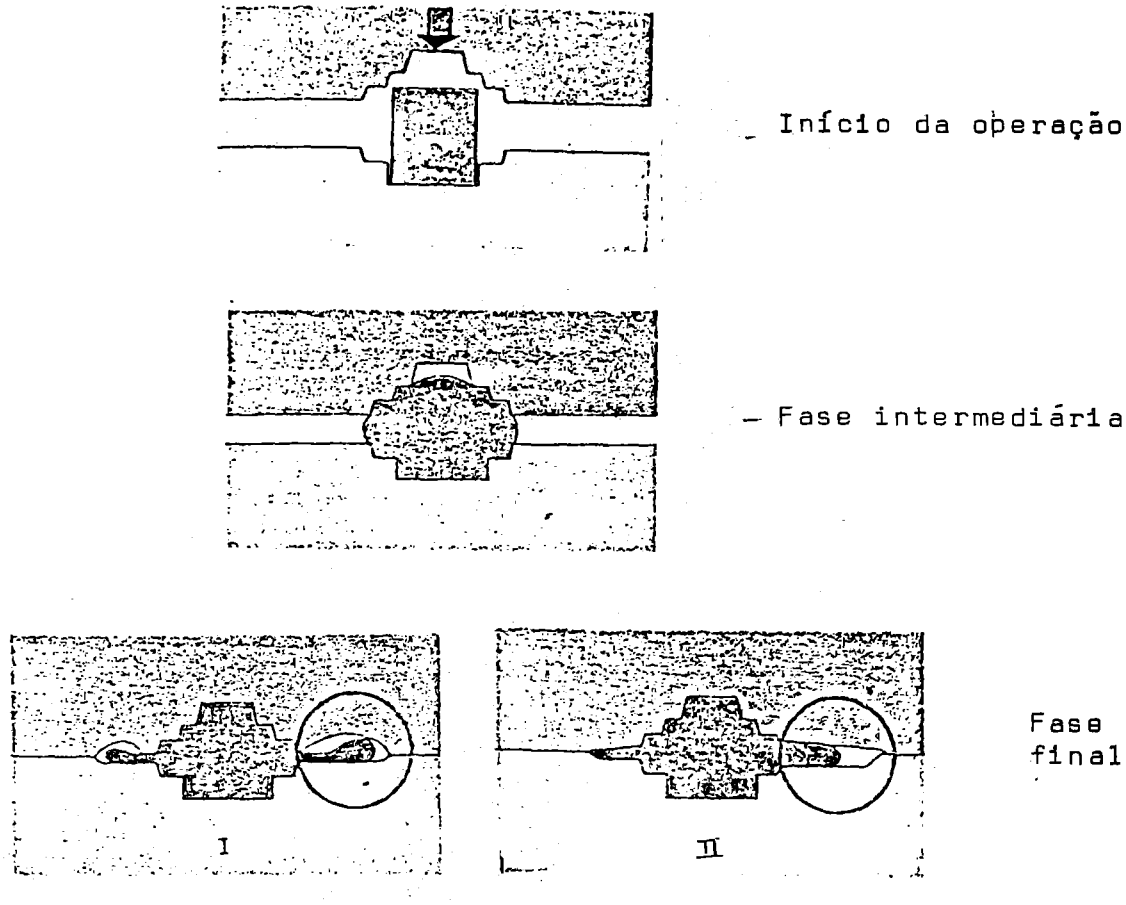


Fig. 51 - Fases do forjamento em matriz.

À exceção de forjados muito simples, o fluxo perfeito do material na cavidade da matriz é conseguido a custa de operações sucessivas nas quais o metal passa por formas progressivas, respeitando-se a regra acima, até se obter a operação final, figura 52.

O número de operações de preparação é muito variável e é função principalmente:

a - da forma final do forjado

b - do material a forjar

c - do lote de fabricação.

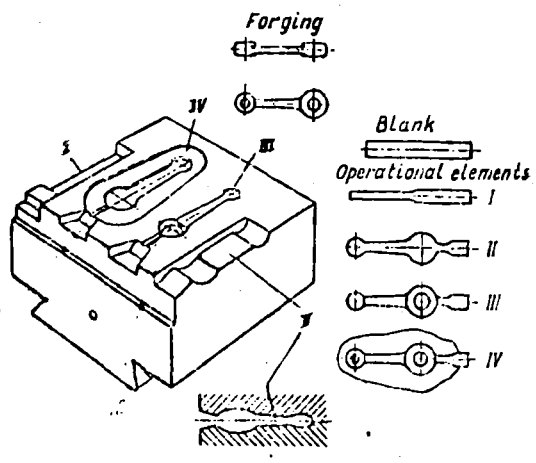


Fig. 52 - Ferramenta de martelo e várias operações para obtenção do forjado.

8.2 - Preparações no forjamento

Um dos mais importantes aspectos do processo de forjamento com matrizes fechadas é o projeto adequado das pré-formas, para permitir distribuição conveniente de metal. Assim, através das operações prévias, obtém-se na operação final um fluxo de material sem defeito, completo enchimento da matriz e as perdas de metal são reduzidas.

Para formas simples com simetria axial, por exemplo, ou o forjamento é direto, (figura 53.a) ou se faz comumente uma bolacha (panqueca), figura 53.b).

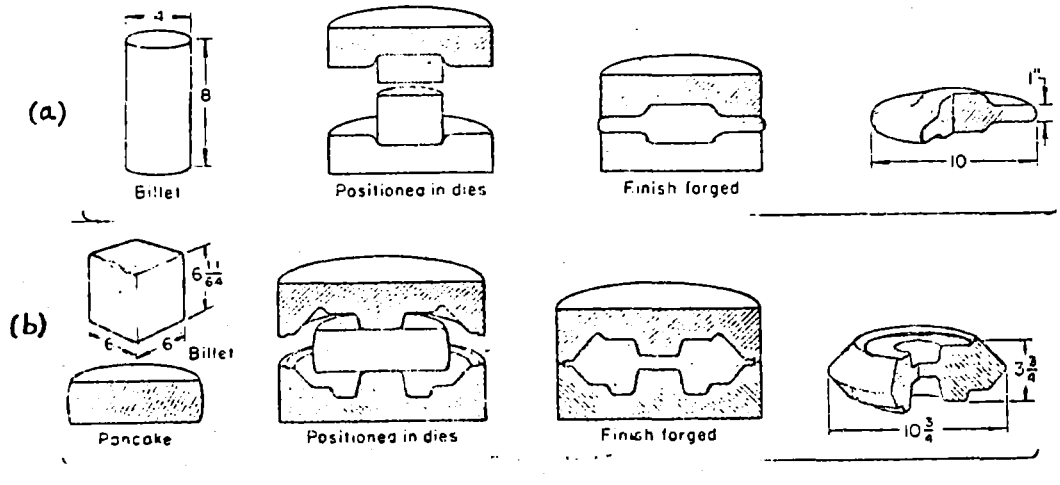


Fig. 53 - Forjamento de peça redonda, (a) direto, (b) com preparação (4).

Para as formas mais complexas de forjado, as operações de preparação mais comuns são:

. FULLERING - ou laminação, a gravação chama-se Fuller, sua função é redução da seção reta da peça. Operação I na figura 52.

. EDGING - a gravação chama-se Edger, usado para movimentação de porção do material de uma parte para outra. Operação II na figura 52.

. ESBOÇAMENTO - a gravação Esboçador ou Buster, basicamente associa as operações anteriores em uma única operação.

. DOBRAMENTO - Bending, a gravação é o Bender.

. BLOCKING - a gravação é o bloqueador (Blocker), é uma aproximação grosseira do final com o objetivo de aumentar a vida da gravação final. Operação III na figura 52.

. ACABAMENTO - ou final, a gravação é chamada de final ou Finisher, é a forma final da peça, considerada a contração.Operação IV na figura 52.

Para forjamento em martelos, as formas de preparação são gravadas em um mesmo bloco e conforme a necessidade, têm-se diversos arranjos (lay-out), conforme a figura 54.

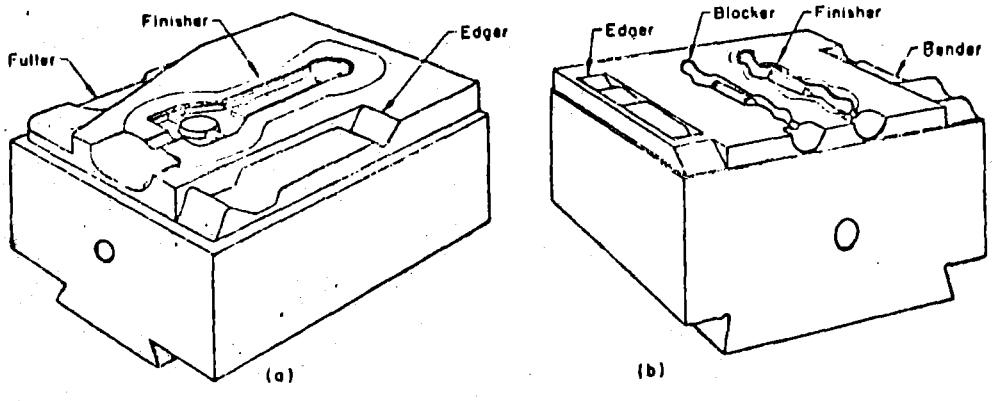


Fig. 54 - Arranjos de múltiplas gravações em blocos para forjamento em martelos.

No forjamento de prensas, a preparação correspondente as duas primeiras modalidades é feita geralmente em rolos laminados e/ou mais raramente em martelos e prensas preparadoras.

No caso mais geral, a preparação é feita através de sequência de ferramentas individuais e montadas como indicado na figura 55.

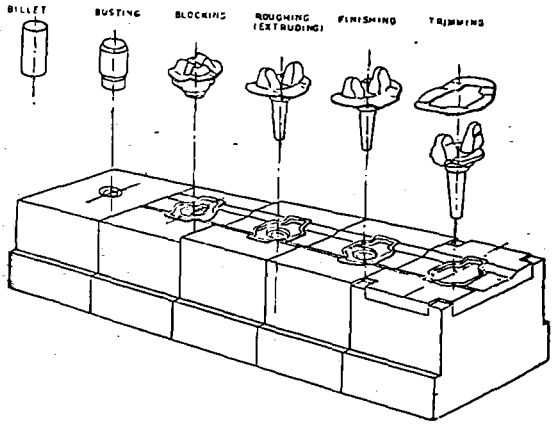


Fig.55 - Sequência de forjamento de manga de eixo em prensa excêntrica.

Para o trabalho em recalcadoras, a preparação é geralmente feita através de vários passes na própria máquina e envolve basicamente operações de conificação e pré-furação. Figura 56.

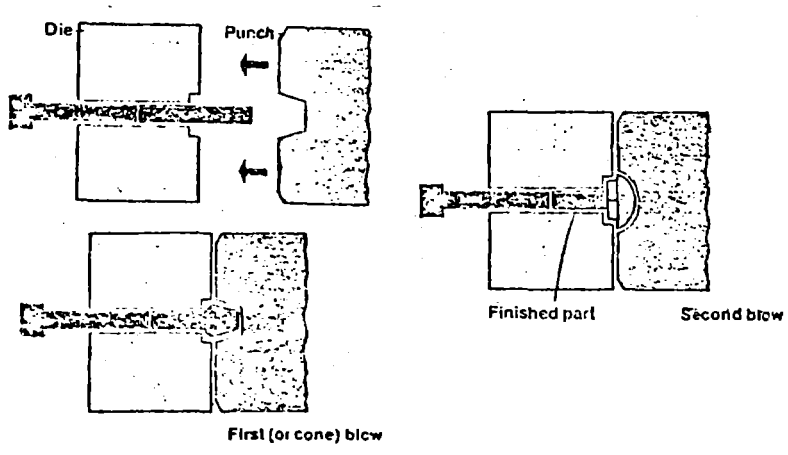


Fig. 56 - Exemplo de preparação no recalmento.

8.3 - Fibragem

O escoamento do metal provoca um alinhamento de certo tipo de defeito da matéria-prima, as macro-segregações, que conferem ao forjado quando convenientemente observado um aspecto fibroso, a que se dá o nome de "fibragem", (5), figura 57.

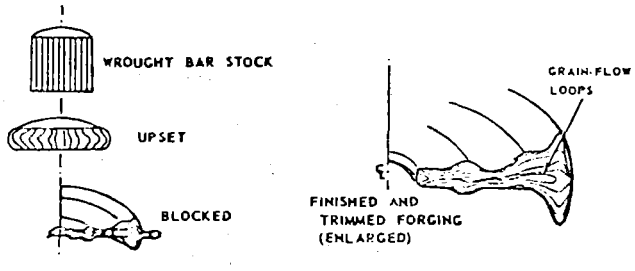


Fig. 57 - Sequência típica de forjamento engrenagem, mostrando o desenvolvimento da fibragem.

A fibragem é responsável por certa anisotropia das propriedades mecânicas. Assim, para melhor adequar o forjado no desempenho de suas funções, a fibragem deve ser ordenada de acordo com os padrões exigidos. Isto pede um escoamento pré-estabelecido que só é conseguido, em geral, por uma prévia distribuição de massas do "blank" e através do conhecimento do caminhamento seguido pelo material no decorrer da deformação.

Para tanto, fazer forjamento em matriz fechada, impõe-se conhecer as leis de escoamento do material na ferramenta. No caso específico do recalque plano, as trajetórias dos pontos podem ser determinadas do seguinte modo (6):

$E_x + E_y + E_z = 0$ (condição de incompressibilidade)

$E_y = 0$ (deformação plana)

$E_z = - E_x = \frac{d_h}{d_t} \cdot \frac{1}{h} = \frac{u}{h_o - u.t}$ (considerado deformação homogênea)

para o caso de u = constante = velocidade da ferramenta. Mas desde que:

$$E_x = \frac{d_x}{d_t} \cdot \frac{1}{x} \quad e \quad E_z = \frac{d_z}{d_t} \cdot \frac{1}{z}$$

Para um ponto genérico, então:

$$\frac{\dot{x}}{x} = \frac{u}{h_o - u.t} \quad , \quad \frac{\dot{z}}{z} = \frac{u}{h_o - u.t} \qquad \text{(eq. 23)}$$

Sendo x_o e z_o as coordenadas do ponto para t = 0. Por integração da equação 23, chega-se, para a trajetória do ponto considerado, na equação da hipérbole:

$$x \cdot z = x_o \cdot z_o = \text{constante.}$$

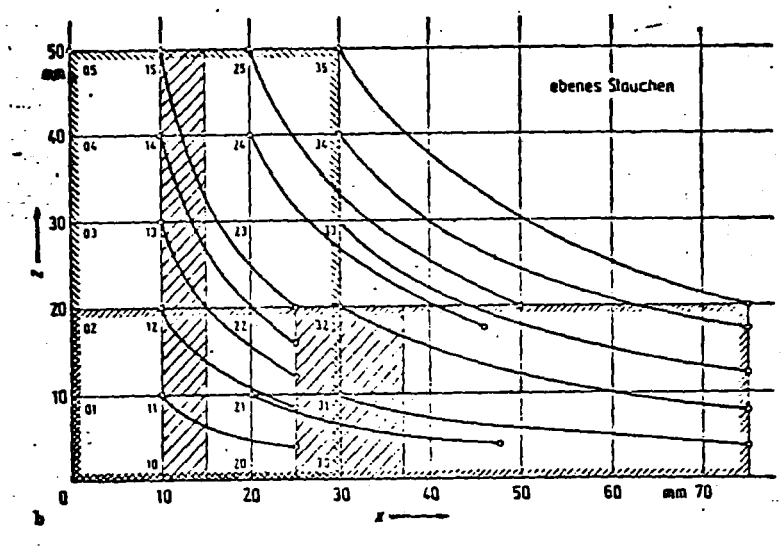


Fig. 58 - Trajetórias dos pontos de Blank no recalque plano.

As considerações sobre homogeneidade das deformações, feitas para obtenção dos resultados acima, não correspondem à realidade, pois no forjado, distingue-se facilmente regiões de concentração acentuada de fibragem e que sofreram maiores deformações. Não é raro, contudo, encontrar-se uma peça com regiões severamente deformadas ao lado das "zonas mortas" (7) praticamente indeformadas.

Para o escoamento do material além dos limites da ferramenta, ou seja, nas operações de "abrir" o material, esquema da figura 60, as trajetórias poderão ser previstas da seguinte forma (6):

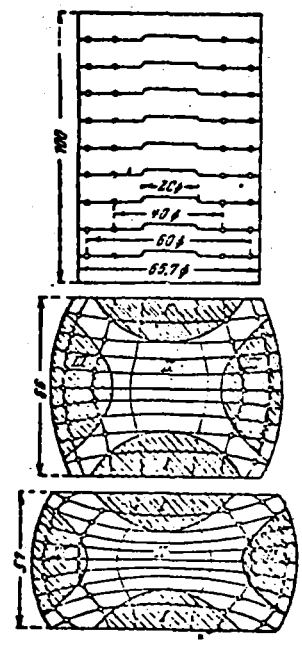


Fig. 59 - Recalque plano evidenciando regiões fortemente deformadas II, ao lado de zonas mortas I e III.

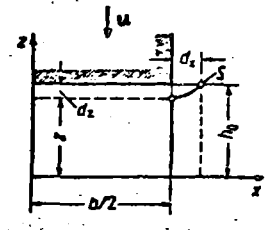


Fig. 60 - Trajetórias na abertura de material.

Feitas as mesmas considerações anteriores sobre a distribuição das deformações e sobre o comportamento do material:

$$\frac{b}{2}(-d_z) = z\,d_x \quad \therefore \quad -\frac{b}{2}\frac{d_z}{z} = d_x \qquad \text{(eq. 24)}$$

Integrando a equação 24 e sendo $z = h_o$ e $x = b/2$, condições de contorno

$$x = \frac{b}{2}\left(\ln\frac{h_o}{z} + 1\right) \qquad \text{(eq. 25}$$

onde a equação 25 descreve o lugar geométrico de s em função da coordenada z.

Para deformações com simetria axial, a expressão será:

$$x = \frac{b}{2}\left(\frac{1}{2}\ln\frac{h_o}{z} + 1\right) \qquad \text{(eq. 26)}$$

8.4 - Previsões de escoamentos do material

Pelos resultados anteriores e consideradas as limitações impostas ao escoamento do material pelos contornos da ferramenta, as trajetórias das partículas no decorrer da conformação poderão ser previstas, situando-se passo a passo a deformação pretendida, figura 61.

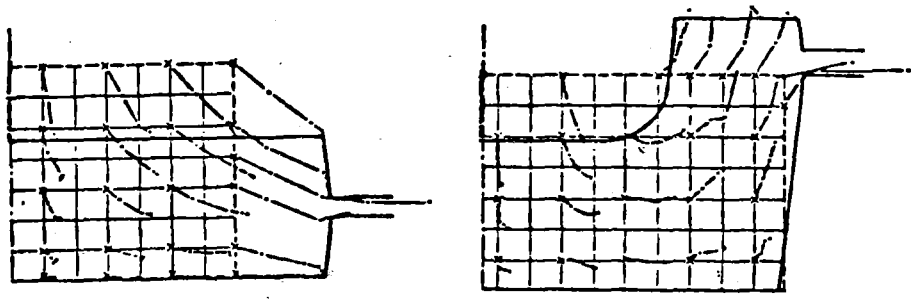


Fig. 61 - Previsão de fluxo no forjamento em matriz. Pontos marcados com (x): início da trajetória.

Mesmo nos casos mais complexos de conformação envolvendo extrusão de partes, onde há reversão no fluxo do material, é possível fazendo-se hipóteses convenientes prever tais deformações, figura 62.

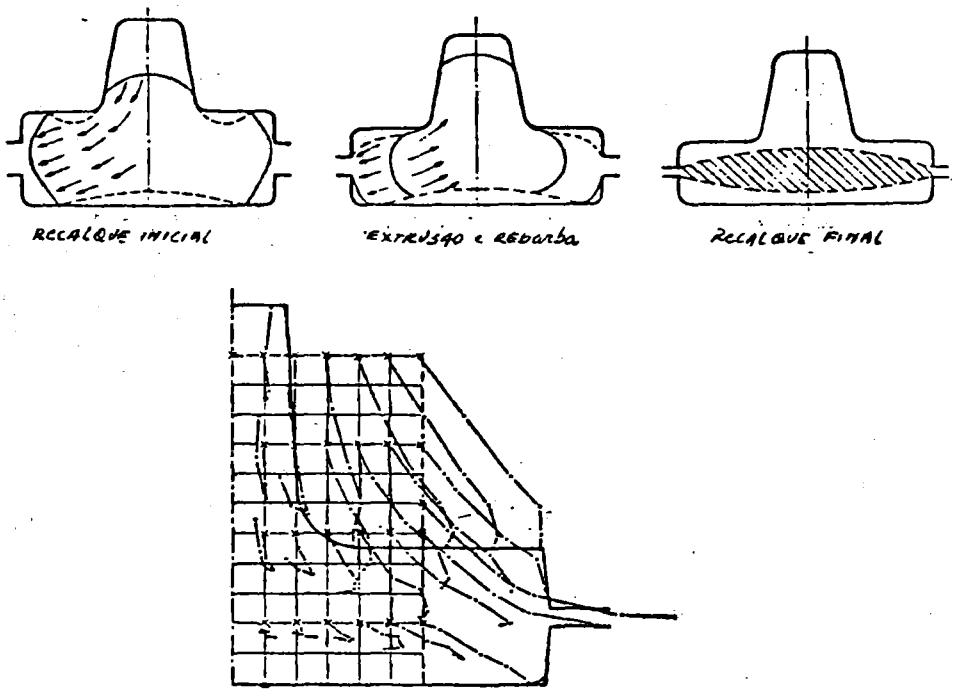


Fig. 62 - Previsão de trajetória no forjamento com extrusão no pino, evidenciando retorno do material.

8.5 - Fatores de influência no fluxo de material

Além do formato da ferramenta que caracteriza a peça forjada, o fluxo de material em uma dada matriz é grandemente afetado pela severidade do atrito superficial e pelo grau de suavidade de contornos da ferramenta.

As figuras abaixo ilustram por si a atuação destes fatores (6).

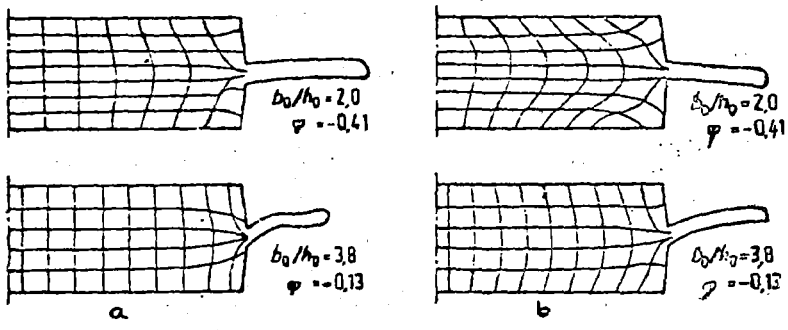


Fig. 63 - Diferentes padrões de fluxo obtidos para condições de forjamento idênticas: a) com lubrificação b) sem lubrificação.

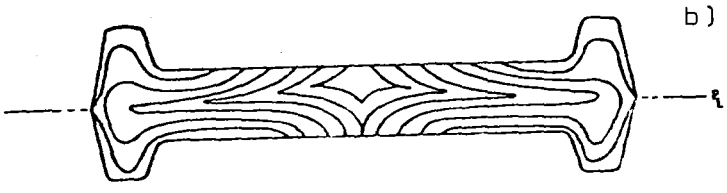


Fig. 64 - Desuniformidade na fibragem do disco forjado devido a condições adversas de lubrificação entre matriz inferior e superior (5).

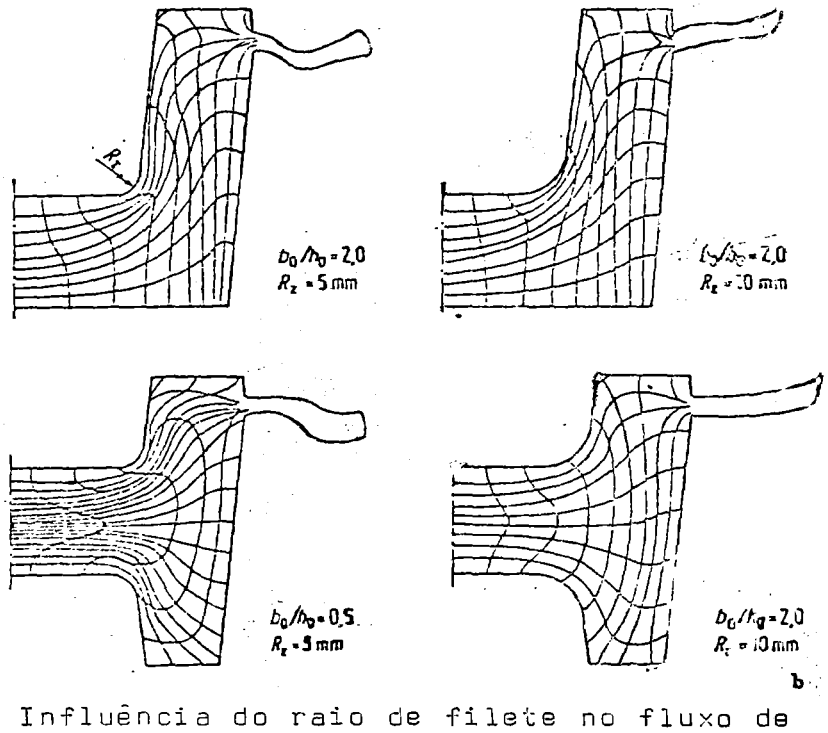


Fig. 65 - Influência do raio de filete no fluxo de material do forjado.

Observa-se pelos padrões acima que as condições adversas, atrito e raios pequenos, concorrem para acentuar a desuniformidade de deformações na peça forjada, acentuando-se as concentrações de fibragem, colaborando para um maior desgaste da ferramenta e para um aumento da energia de conformação.

9 - ESFORÇOS E REBARBAS NO FORJAMENTO EM MATRIZ

A presença da rebarba é bem característica do forjamento em matriz fechada,(figura 51).

A rebarda é constituída por um excesso de material que escapa entre as matrizes em espaço e espessura previamente estabelecidos. Figura 66.

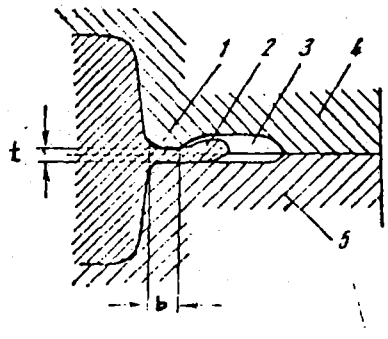


Fig. 66 - Esquema indicando:

1 - dimensões b e t da saída de rebarba
2 - rebarba
3 - alojamento de rebarba
4 e 5 - matrizes superior e inferior.

Para bem compreender a atuação da saída de rebarba e sua importância no projeto da ferramenta de forjar, deve-se notar, conforme indicado no diagrama da figura 67, que a matéria-prima de modo geral corresponde a 50% do custo do forjado e então qualquer redução do material que vai constituir a rebarba, representará ganhos bastante significativos no custo total.

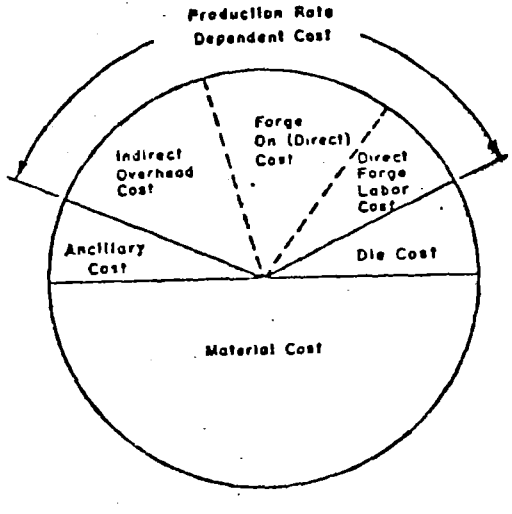


Fig. 67 - Distribuição média dos custos do forjado (8).

A saída de rebarba imaginada como válvula de segurança, permite escape do excesso de material evitando-se que toda energia seja, eventualmente, transmitida às matrizes por preenchimento total de suas cavidades.

Em forjamento com matriz fechada, as perdas de matéria-prima estão situadas entre 10 e 50%, tendo-se, portanto, em média 30% de perdas. Sabendo-se que os demais fatores de perdas são representados pelo corte e queima no aquecimento, pode-se deduzir a significância da rebarba no custo do forjado.

Como válvula reguladora da pressão interna na ferramenta, as influências da largura e espessura da rebarba, são muito bem entendidas do ponto de vista qualitativo. Essencialmente porque a pressão aumenta com:

a) - diminuição da espessura da rebarba

b) - aumento da largura

pelo efeito combinado do aumento da restrição de saída do material. Efeito este que é a combinação do aumento das forças de atrito e diminuição da temperatura do material, o que acarreta grande restrição ao fluxo de material através do canal da rebarba.

Uma curva típica de força x deslocamento para o forjamento em matriz fechada está indicada na figura 68. As forças são relativamente baixas até o preenchimento parcial das cavidades mais estreitas, quando o material alcança a saída de rebarba. Este estágio corresponde ao recalque inicial, ponto p_1 no gráfico da figura 68.

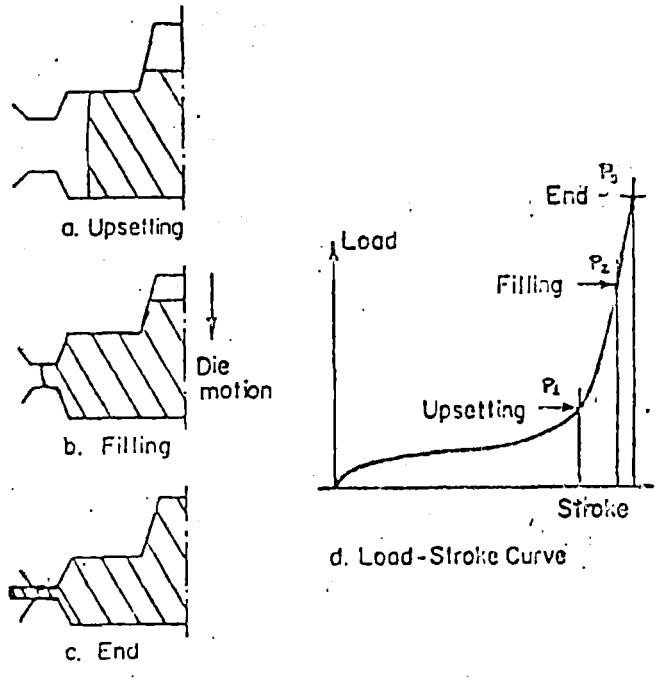


Fig. 68 - Típico diagrama de carga de forjamento em matriz mostrando três distintos estágios da operação.

Para um forjamento bem sucedido, duas condições devem ser satisfeitas, quando o ponto p_1 for atingido:

a) . um volume suficiente de metal deverá estar confinado entre as matrizes para o enchimento dos vazios restantes.

b) . a extrusão do metal através da saída de rebarbas deve apresentar maior dificuldade do que o enchimento dos detalhes mais difíceis da gravação.

Com a continuação do fechamento das matrizes a força cresce rapidamente para o ponto p_2; é o estágio no qual se dá o enchimento da matriz. Neste ponto, teoricamente, a pressão dentro da matriz determinada pela geometria da rebarba, seria suficiente para o enchimento completo da gravura. Entretanto, p_3 representa a força final alcançada normalmente na prática para assegurar que o enchimento seja completo e que o forjado tenha as dimensões desejadas. Durante o fechamento de p_2 a p_3, todo o fluxo de material se dá através da saída de rebarbas e assim as dimensões da rebarba determina a carga final de fechamento de matrizes.

9.1 - Rebarbas, dimensionamento

Existem muitas publicações sugerindo fórmulas diversas para o dimensionamento da saída de rebarbas; elas são baseadas, quase sempre, em dados empíricos-experimentais obtidos no trabalho dentro de forjarias.

Fundamentado em extensivos estudos feitos com quatro diferentes tipos de forjados redondos, Vieregge (8) sugeriu a seguinte fórmula para estabelecimento da espessura de rebarba:

$$t = 0{,}017\ D + 1/\sqrt{D + 5} \qquad \text{(eq. 27)}$$

onde

t - espessura da rebarba em mm

D - diâmetro do forjado em mm (forjado redondo)

- largura da seção em mm (forjado plano).

Como fórmula bastante usual para determinação da relação b/t é também sugerida a seguinte fórmula, por Teterin e Tarnovski (8):

$$\frac{b}{t} = 0{,}02 + 0{,}0038\ s\ \left(\frac{D_o}{t}\right) + \frac{4{,}93}{Q^{0{,}2}} \qquad \text{(eq. 28)}$$

onde

t - espessura da rebarba em mm

D_o - diâmetro do blank inicial em mm

s - fator de complexidade da forma da seção

Q - peso do forjado em kg para forjado redondo, ou peso do forjado redondo equivalente no caso de forjamento plano.

O fator de complexidade de forma pode ser definido pelo produto de dois outros fatores, ou seja:

$$s = \alpha \cdot \beta$$

sendo α para os forjados redondos definido como:

$$\alpha = \frac{x_f}{x_c}$$

e

$$\beta = \frac{2\ R_g}{R_c}$$

onde

x_f = fator de forma = $\frac{p^2}{F}$

p - perímetro da seção axial

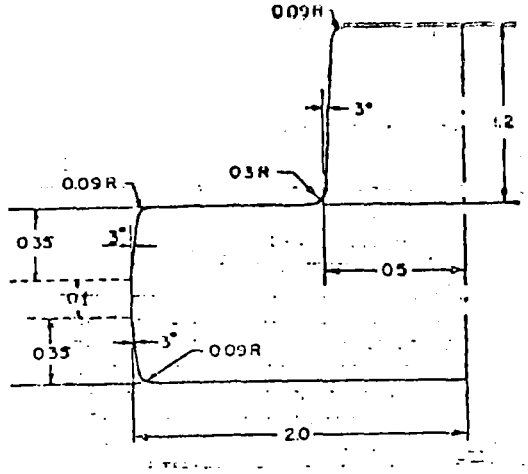
F - área da seção reta axial

x_c - valor de x_f para o cilindro circunscrito ao forjado

R_g - distância radial do eixo do forjado ao centro de massa do meio da seção axial

R_c - raio máximo do forjado que é igual ao raio do cilindro circunscrito.

Para o forjado indicado na figura abaixo, cujas dimensões são dadas em polegada, foram calculados os parâmetros acima descritos e comparados com os reais nas condições de produção.



Actual and calculated values for forging

	Actual	Calculated
Shape-difficulty factor	—	1.316
Total forging weight	3.42 lb	3.42 lb
Flash thickness in die	0.1 in	0.085 in
Flash width in die	0.5 in	0.41 in
Flash ratio in die	5	4.8

Fig. 69 - Condições reais e calculadas para o forjado indicado.

A formação de rebarba, entretanto, é grandemente influenciada pela quantidade de material em excesso disponível para o forjamento, visto que ele determinará o início de formação da mesma. No relacionamento entre excesso de material e formação de rebarba, pode-se verificar que uma gravação pode ser preenchida com várias geometrias de

rebarbas, conquanto se tenha o excesso de material suficiente. Neste caso, é possível "encher" a matriz com rebarba grossa e portanto com pequena carga, se for dado o excesso de material suficiente. Aí reside o ponto básico na determinação da geometria da rebarba, qual seja, o compromisso entre esforços baixo na gravura e perda de matéria-prima.

Os fatos acima expostos, podem ser visualizados através dos dados experimentais, como os obtidos por K. T. Chang (9) e que são indicados na figura 70.

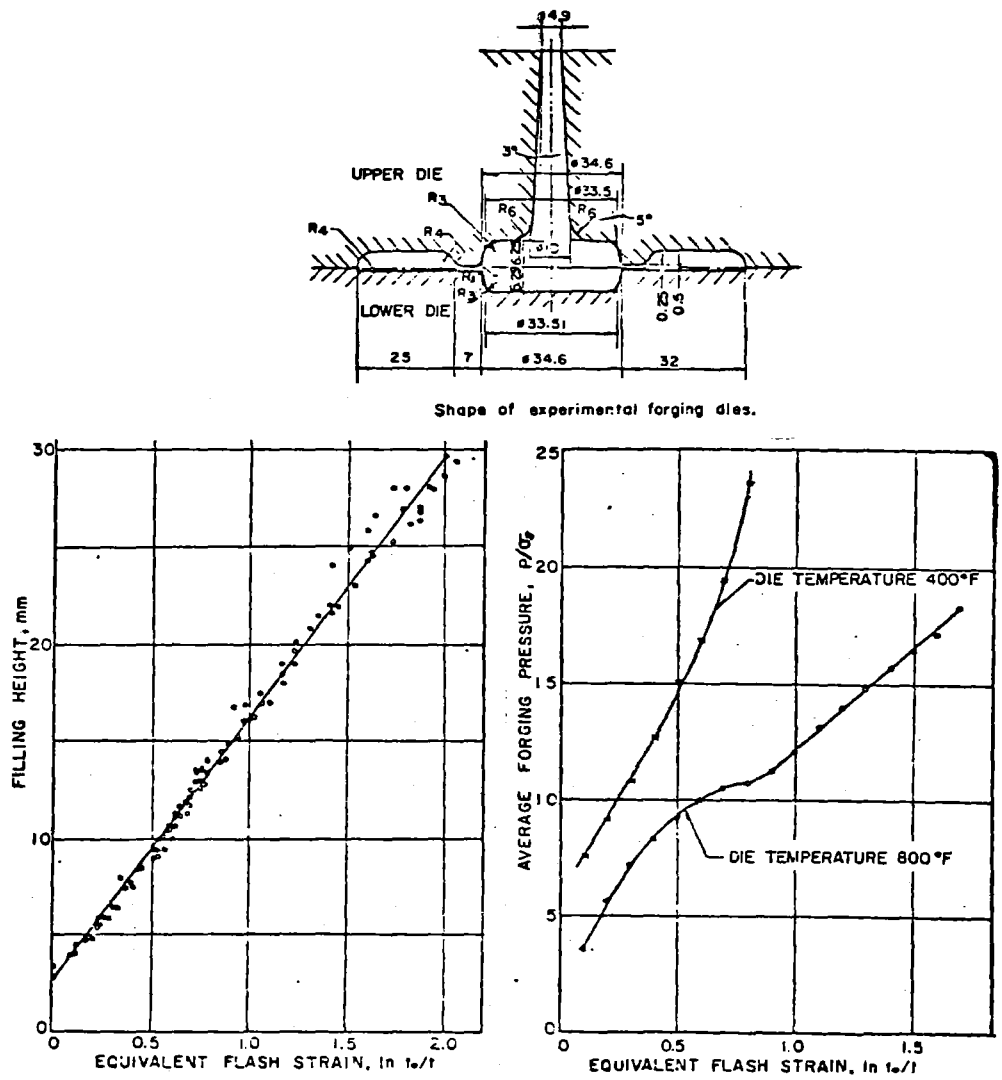


Fig. 70 - Relação entre o volume de material, enchimento da espiga e pressão interna na matriz (t_o é espessura de início de formação da rebarba).

No trabalho acima indicado, analisou-se experimentalmente as influências de fatores como o atrito, esforço de forjamento, temperatura de matriz e dimensões da rebarba no enchimento da gravura.

Ficou esclarecido, conforme mostram os diagramas da figura 70 que a altura da espiga do forjado é linearmente proporcional à deforma

ção equivalente da rebarba (flash), $\ln t_o/t$ e que a temperatura da matriz influi mais significativamente na extrusão do que as variações das condições de lubrificação.

Tais experiências foram realizadas com ligas de alumínio e os resultados obtidos podem ser extrapolados com boa aproximação para o forjamento de aço, uma vez que o forjamento for feito a quente.

9.2 - Cálculo de esforços no forjamento

Como já se observou em várias ocasiões, o esforço máximo no forjamento ocorre no instante final; neste momento todo o escoamento é feito através da saída de rebarbas. Assim, além dos fatores normais de reação que são a resistência do material e o atrito, o formato da zona de deformação é de importância fundamental na determinação deste esforço.

Pode-se ensaiar o estabelecimento da referida zona de deformação, para uma determinada peça, pelo método de linhas de fluência, conforme o diagrama abaixo, figura 71, (6, 10).

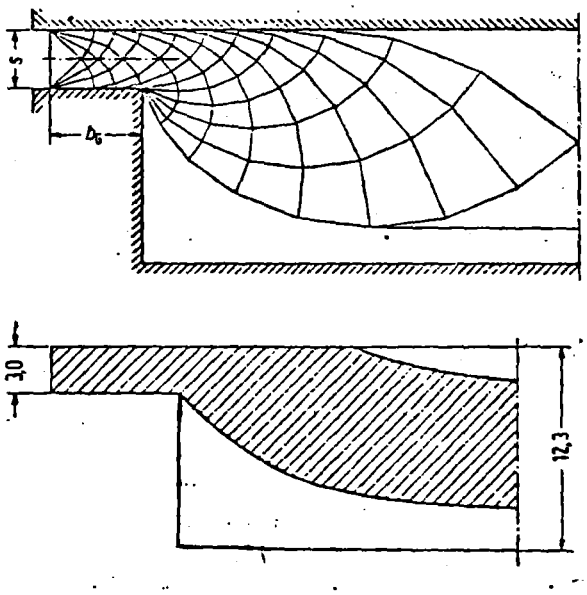


Fig. 71 - Campo de linhas de fluência e zona de deformação para o forjado indicado.

Uma vez definida a região da peça onde se dá a deformação, soluções para os esforços podem ser encontradas através dos métodos de cálculos expostos em Forjamento de Metais, Parte I.

Paralelamente, às soluções que se pode encontrar para um determinado caso, existem muitas soluções já propostas por vários autores, segundo modelos de deformação os mais variados, como indicados no quadro da figura 72.

A seguir, a figura 73 mostra uma comparação entre os resultados experimentais com as várias soluções propostas para um forjado relativamente simples.

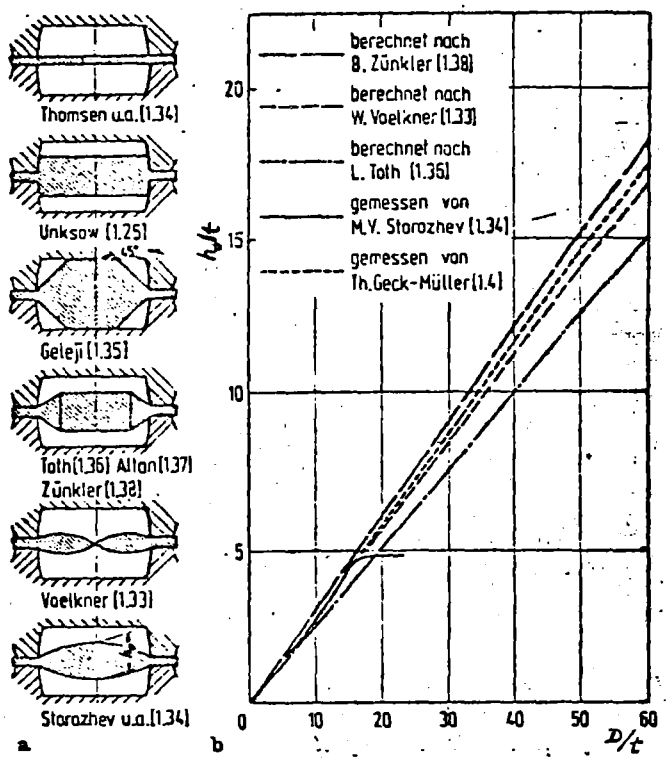


Fig. 72 - Fatores geométricos de zonas de deformação para modelos de vários autores.

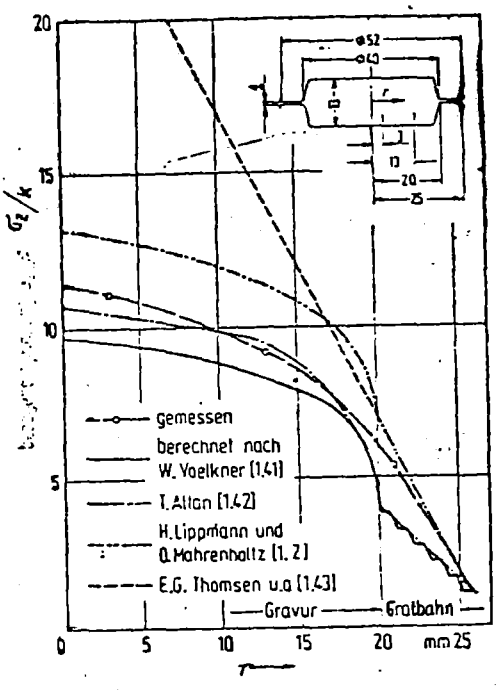


Fig. 73 - Soluções de vários autores para distribuição de pressões no anel de rebarba e gravura, e valores experimentais.

9.3 - Resistência dos aços à deformação plástica

Os efeitos da temperatura, composição química do metal, do grau e da velocidade de deformação na resistência mecânica dos metais, são geralmente investigados nos ensaios de tração ou compressão uniaxial. A tensão encontrada nestes experimentos, na seção transversal do corpo de prova, é denominada resistência à deformação e designada por

σ_s. Esta é a resistência ao escoamento característica do material e é muito utilizada nos cálculos de esforços nos processos de conformação.

Valores indicativos das resistências à deformação plástica de diversos tipos de aços em função da temperatura, para velocidades de deformações muito baixas, podem ser encontrados nos gráficos das figuras 74 e 75.

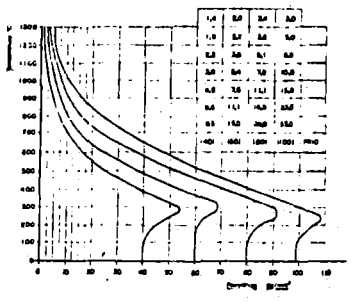


Fig. 74 - Resistência de aços carbono em função da temperatura.

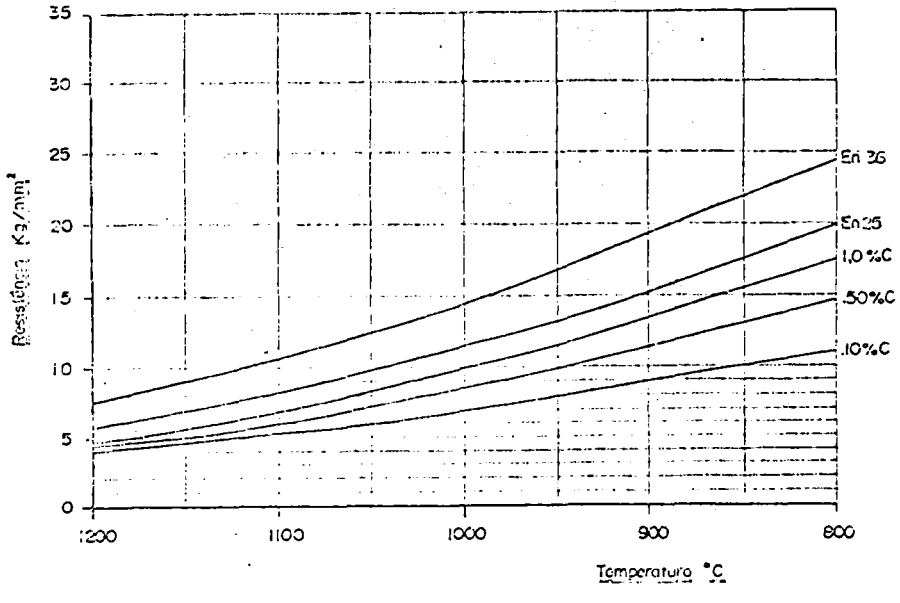


Fig. 75 - Valores da resistência ao escoamento na saída de rebarbas para aços de várias composições químicas em função da temperatura (10).

Para trabalho em altas temperaturas, o encruamento atua paralelamente ao enfraquecimento causado pela recristalização. A resistência do material, à deformação, obviamente, dependerá de velocidade de ocorrência destes efeitos contrários.

Como exemplo de atuação destes efeitos, a figura 76 nos dá a variação de resistência em aço baixo-carbono (C = 0,17%) para vários graus e taxas de deformações à temperatura de forjamento.

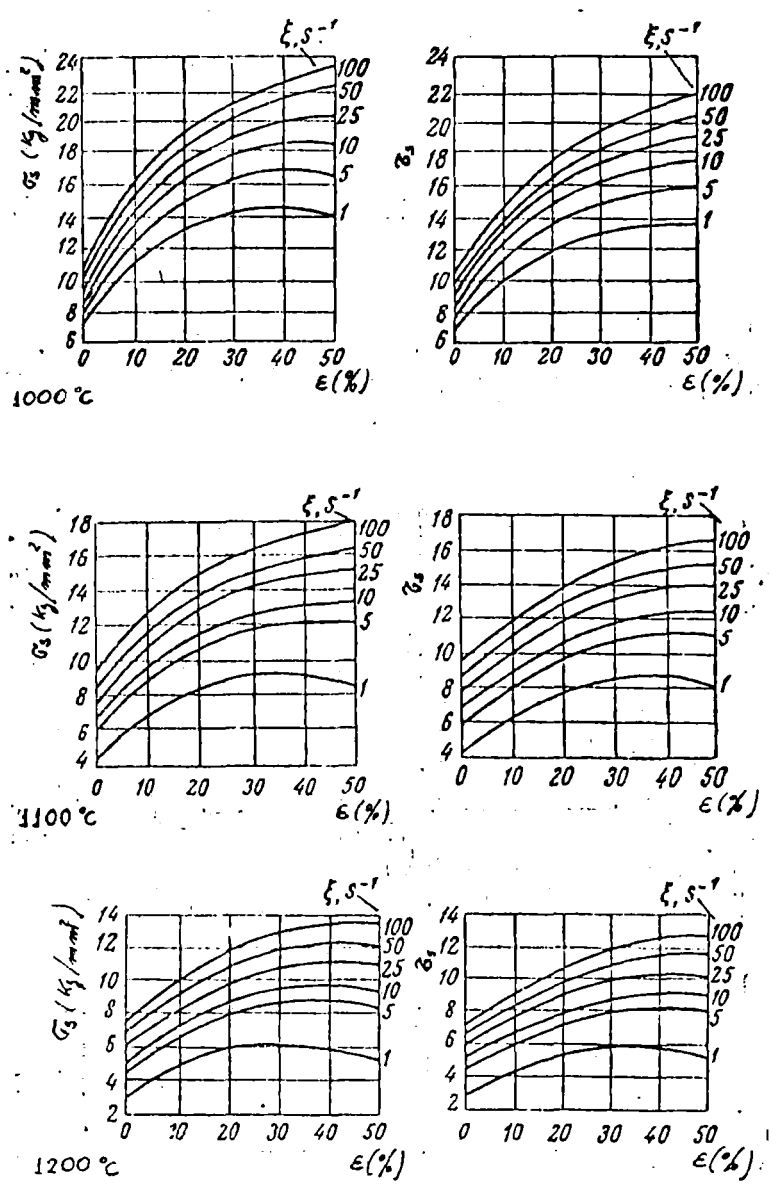


Fig. 76 - Resistência ao escoamento: função $\varepsilon = \frac{\Delta h}{h_o}$ (%) e $\xi = \frac{u}{h}$ (seg^{-1}) (10)

Para os aços em geral a influência da velocidade na resistência pode ser encontrada em primeira aproximação por (11):

$$\sigma s = \sigma s_o \left(1 + 0{,}02 \frac{u}{h}\right) \qquad \text{(eq. 29)}$$

e o encruamento pode ser aproximado pela seguinte expressão:

$$\sigma s = \sigma s_o + D \cdot \ln \frac{h_o}{h} \qquad \text{(eq. 30)}$$

onde:

σs_o - resistência inicial, determinada à razão de deformação quase-estática

D - módulo de encruamento a uma dada temperatura

u - velocidade da ferramenta.

ESCOLA DE ENGENHARIA DE SÃO CARLOS
BIBLIOTECA

9.4 - Modelo de cálculo conforme Geleji (11)

Para o recalcamento, Geleji, propõe a seguinte fórmula:

$$p_s = \frac{\sigma s}{1 - \mu \frac{b}{2h}} \qquad \text{(eq. 31)}$$

onde:

b - largura da seção

h - altura

μ - coeficiente de atrito (0,4 - 0,45) para recalque a quente.

Para forjamento em matriz fechada de uma peça conforme indicado na figura 77, a força necessária, de acordo com o mesmo autor, é encontrada pela seguinte expressão:

$$p = 2\, p_m \left(\frac{\pi d^2}{4} + \psi\, V\right) + p_{mg} \frac{\pi}{4} (D^2 - d^2) \qquad \text{(eq. 32)}$$

Sendo:

$$p_m = \frac{\sigma s + \sigma_{rm}}{1 - 0{,}93 \frac{A}{a}}$$

$$a = (d - 2\, h_G)\, h_2\, \pi \qquad h_G = \frac{h_2 - t}{2}$$

$$A = a - c \qquad c = \pi\, d\, t$$

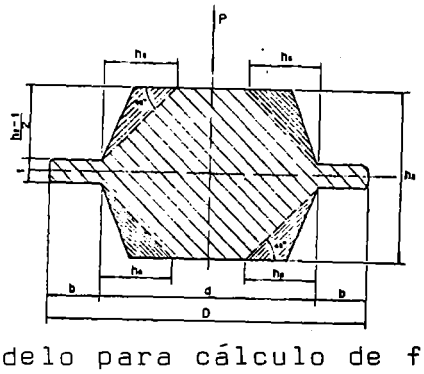


Fig. 77 - Modelo para cálculo de força de forjamento conforme Geleji

onde:

t = espessura da rebarba

h_2 = espessura da peça

$$\sigma_{rm} = \frac{\sigma r}{2} \left\{1 + \frac{d\, t}{(d - 2\, h_G)\, h_2}\right\}$$

$$\sigma r = p_{mg}\ \mu \cdot \frac{D^2 - d^2}{2\, d\, t}$$

$$p_{mg} = \sigma s \frac{t}{2\, \mu\, b} \left\{ e^{2\mu b/t} - 1 \right.$$

$$\nu = 0{,}025 \sqrt[4]{\frac{um}{h_2}}$$

um = velocidade média da ferramenta

ν = volume do material em forjamento.

Para a determinação da força de forjamento no forjado da figura 78, adotou-se as seguintes condições:

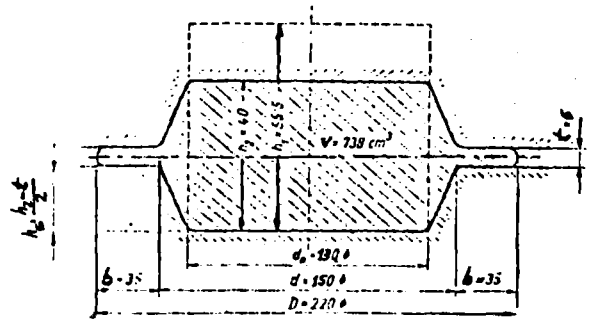


Fig. 78 - Dimensões para cálculo de força de forjamento.

. temperatura: 1.100 °C

. material: aço 40 kg/mm², resistência a frio

. conforme gráfico da figura 74: σs = 2,2 kg/mm²

. volume de material conforme dimensões acima: 738 cm³

. dimensões do pré-forjado: ϕ 130 x 55,5

. velocidade do cabeçote do martelo: u = 7 m/s ∴ um = 3,5 m/s.

$$\nu = 0{,}025 \sqrt[4]{\frac{350}{4}} = 0{,}077$$

$$\mu = 0{,}2$$

$$p_{mg} = 220 \frac{0{,}6}{2 \times 0{,}2 \times 3{,}5} \left(e^{\frac{2 \times 0{,}2 \times 3{,}5}{0{,}6}} - 1\right) = 878 \text{ kg/cm}^2$$

$$\sigma r = 878 \times 0{,}2 \frac{22^2 - 15^2}{2 \times 15 \times 0{,}6} = 2.525 \text{ kg/cm}^2$$

$$a = (15 - 3{,}4)\ 4 \ .\ \pi = 145{,}6 \text{ cm}^2$$

$$c = 15\ \pi\ 0{,}6 = 28{,}2 \text{ cm}^2$$

$$A = a - c = 117{,}4 \text{ cm}^2$$

$$\sigma_{rm} = \frac{2.525}{2} \left\{1 + \frac{15 \times 0{,}6}{(15 - 3{,}4)4}\right\} = 1.450 \text{ kg/cm}^2$$

$$p_m = \frac{220 + 1.450}{1 - 0{,}93 \frac{117{,}4}{145{,}6}} = 6.680 \text{ kg/cm}^2$$

e portanto

$$P = 2\, p_m \left(\frac{\pi d^2}{4} + \psi\, V\right) = 3.118 \text{ t no início da formação da rebarba}$$

$$P = 2\, p_m \left(\frac{\pi d^2}{4} + \psi\, V\right) + p_{mg}\, \frac{\pi}{4}\,(D^2 - d^2) \simeq 3.200 \text{ t com matriz totalmente fechada}$$

9.5 - Força de forjamento - modelo Storozhev

Outro procedimento de cálculo é o proposto por Storozhev(10) conforme a figura 72.

A região plastificada no final do forjamento é suposta ter a forma de lentes, figura 79.

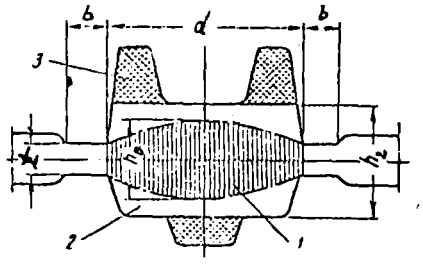


Fig. 79 - Zonas de deformação no forjamento final:
1 - zonas de grande formação
2 - zonas de deformações leves
3 - zonas rígidas sem deformação.

A concavidade da forma lenticular dependerá da razão **d/t**, figura 72. Para os casos de $h_2/t \geq 5$ e $d/t \leq 15$, a deformação do metal dentro da matriz pode ser tomada como sendo uma compressão da lente combinada com uma contra-pressão da rebarba. A solução aproximada para este modelo, aplicado a forjados redondos, seria:

$$P = \sigma s \left\{\left(1{,}5 + 0{,}5\,\frac{b}{t}\right) A_{reb} + \left(1{,}5 + \frac{b}{t} + 0{,}08\,\frac{d}{t}\right)\right\} A_f \qquad \text{(eq. 33)}$$

onde:

A_{reb} = área do anel de rebarbas
A_f = área do forjado sem rebarbas.

Exemplo:

Para um forjado do tipo indicado na figura 79 e sendo

$t = 1{,}5$ mm ; $h_2 = 9{,}0$ mm ; $d = 80$ mm ; $b = 10$ mm

considerando o forjamento em prensa excêntrica $u_m = 0{,}5$ m/s material aço baixo carbono e à temperatura de 1.200 °C. Então:

$$\xi = \frac{500}{9} \simeq 55 \text{ seg}^{-1} \quad \text{e assumindo } \varepsilon = 50\%$$

$\sigma s = 12$ kg/mm^2 de acordo com diagramas da figura 76.

Desde que $h_2/t = 6$ e $d/t \simeq 53$ é válido neste caso aplicar-se a fórmula da equação 31, resultando:

$$P = 120\ (1{,}5+0{,}5\frac{0{,}01}{0{,}0015})\ (0{,}08+0{,}01) \times 0{,}01 + (1{,}5+\frac{0{,}01}{0{,}0015} + 0{,}08\ \frac{0{,}08}{0{,}0015})\ \frac{\pi}{4}\ 0{,}08^2 = 915{,}0\ t.$$

9.6 - Cálculo de Siebel para esforço de forjamento

O esforço de forjamento pode também ser determinado através do desenvolvimento da resistência de escoamento de acordo com Siebel(7, 12). Vide Forjamento de Metais, parte I.

Um esquema do estabelecimento básico deste método pode ser visto na figura 80, onde as tensões de escoamento são tomadas do gráfico da figura 75.

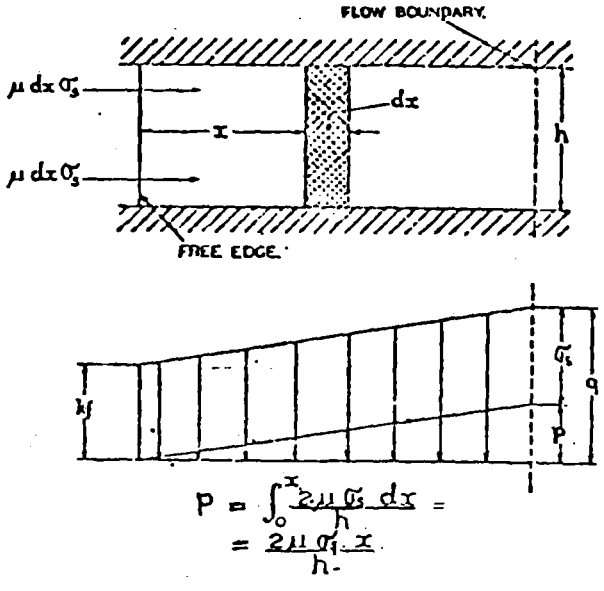


Fig. 80 - Esquema de desenvolvimento de esforços de escoamento conforme Siebel.

Como resultado direto da aplicação deste método, obtém-se uma distribuição de pressões, secionalmente contínua, visto que a seção é dividida em partes com espessuras constantes, o que facilita este tipo de cálculo. Na figura 81, dois exemplos de aplicação do método apresentado.

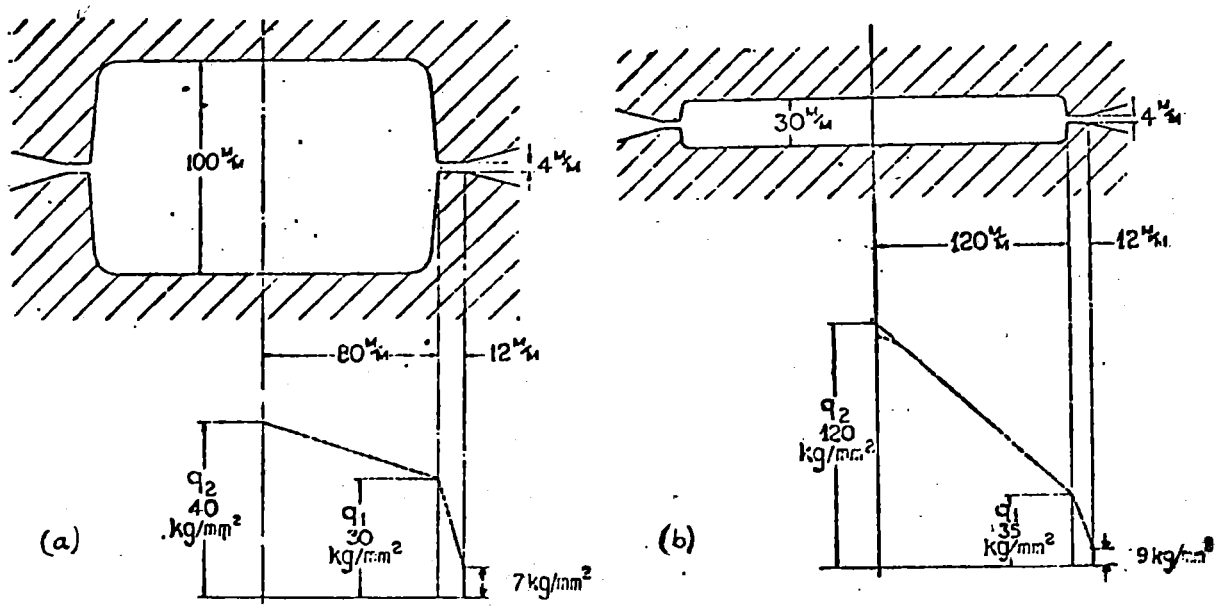


Fig. 81 - Resultados de cálculo para dois tipos de forjados:
a) temperatura da rebarba 1.000 °C . Força 930 t
b) temperatura da rebarba 900 °C . Força 2.600 t

10 - EQUIPAMENTOS DE FORJAR

O espectro total de equipamentos usados nas operações de forjaria (13), figura 82, é extremamente amplo, abrangendo desde máquinas de preparação da matéria-prima até fornos e equipamentos de inspeção final.

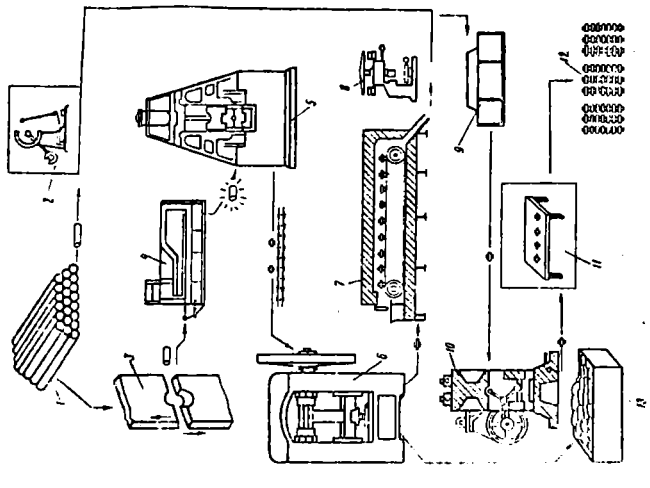


Fig. 82 - Diagrama mostrando os processos envolvidos em forjaria:
1 - páteo matéria-prima; 2 - laboratórios; 3 - corte matéria-prima; 4,7 - fornos; 5 - equipamento forjador; 6 - prensa de rebarbas e acabamento; 8 - inspeção metalúrgica; 10 - prensa cunhagem; 9 - limpeza; 11 - inspeção final; 12 - expedição.

Neste trabalho se limitará a descrição dos equipamentos que executam o forjamento propriamente dito e são representados basicamente pelos martelos, prensas e recalcadoras. Na figura 83, está indicado em planta o posicionamento clássico de um núcelo forjador empregado na fabricação de forjados.

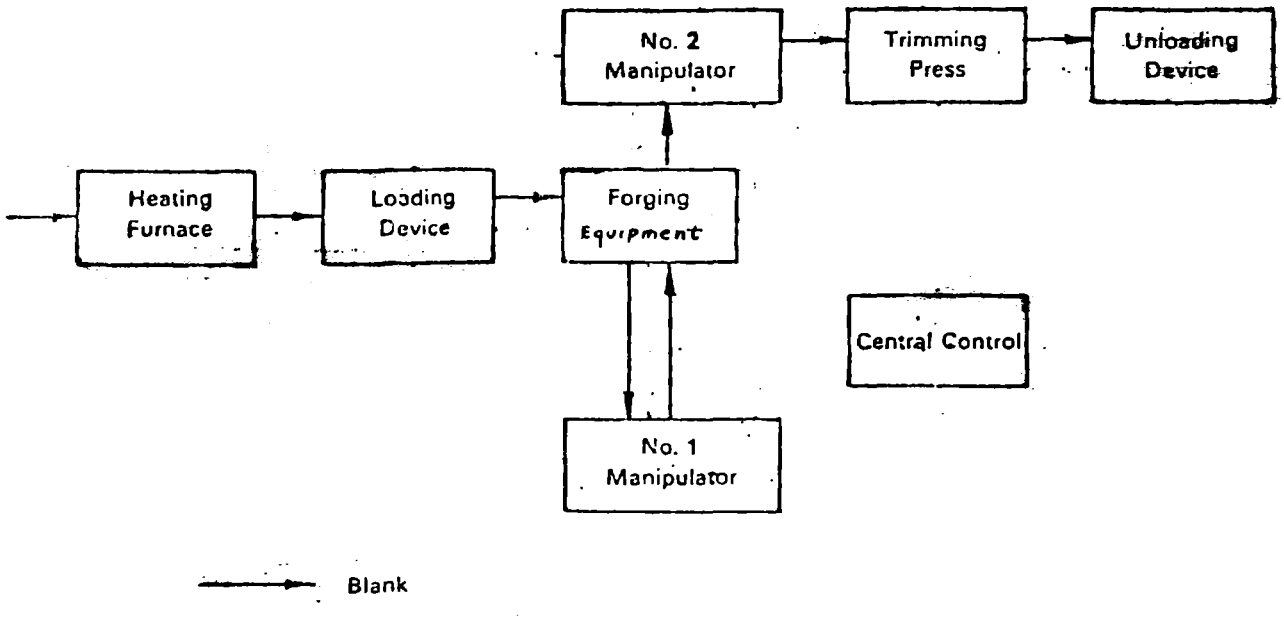


Fig. 83 - Lay-out operacional para sistema forjador em forjaria.

10.1 - Martelos

O tipo de equipamento de forjar mais largamente empregado é o martelo, o qual pode deformar o material com um ou mais golpes de substancial força e energia. É empregado no forjamento da maioria dos forjados comerciais.

Os martelos variam muito em conceito e projeto, principalmente com respeito ao acionamento do cabeçote. Basicamente o martelo se compõe de três partes principais:

1 . Base (cepo) - é a parte do martelo destinada a suportar rigidamente os impactos do forjamento.

2 . Cabeçote (malho) - massa móvel que produz o golpe.

3 . Colunas (estrutura) - parte do martelo destinada a suportar mecanismos de acionamento do cabeçote e/ou guiar o mesmo.

Os martelos de forjaria pode-se classificar em:

1 - Martelos de queda: de tábua
de correia
simples efeito (hidráulico/vapor/ar comprimido)

2 - Martelos duplo efeito: hidráulico/vapor/ar comprimido

3 - Martelos de contra golpe: acoplamento mecânico (cinta)
acoplamento hidráulico.

10.1.1 - martelos de queda

O mecanismo de elevação do cabeçote pode ser por atrito, usando-se tábua, correia ou por cilindros através do vapor, ar comprimido ou hidraulicamente. São disponíveis martelos deste tipo na seguinte gama de tamanho, peso do cabeçote em libras, 400 a 10.000 lb (14).

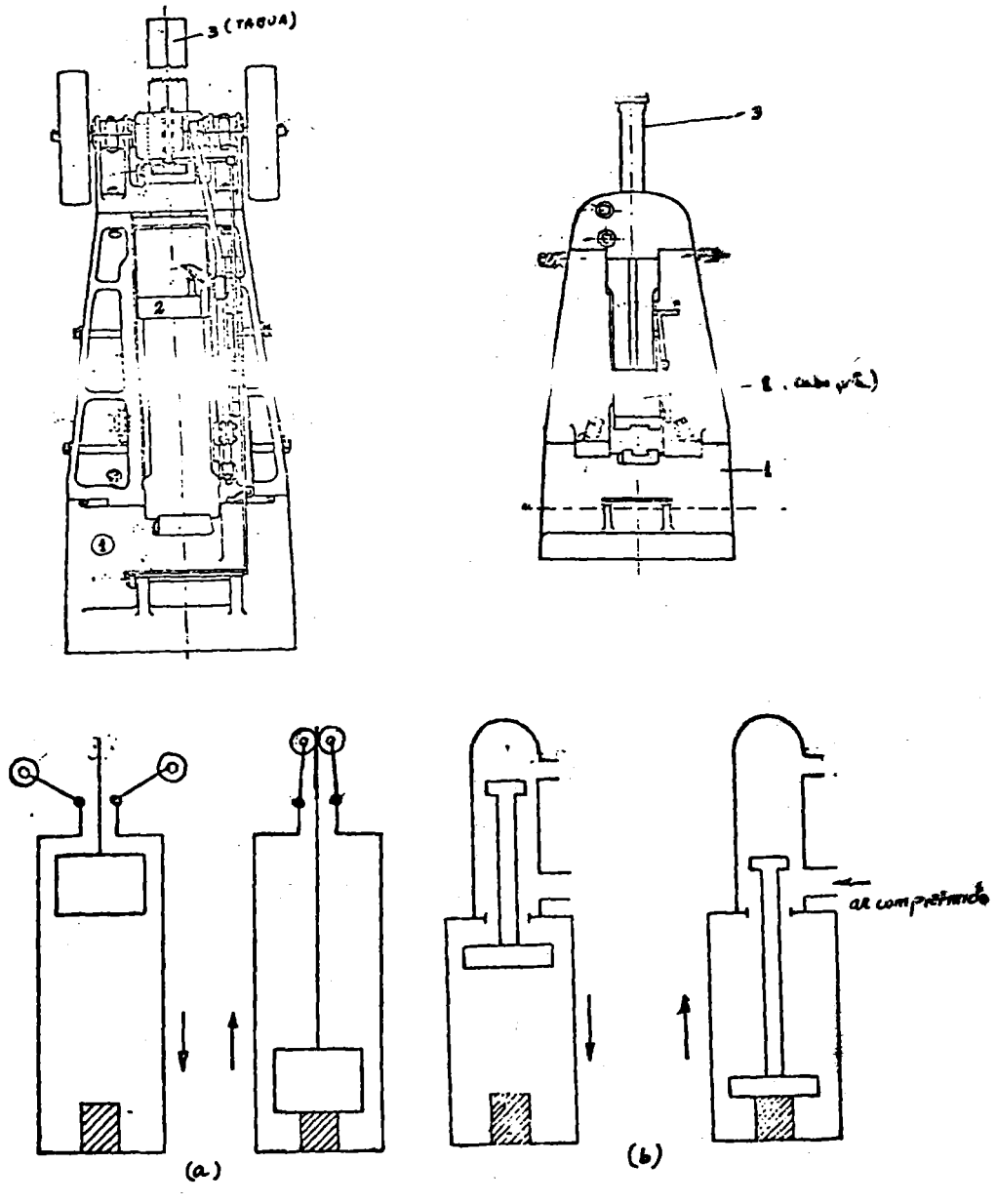


Fig. 84 - Martelos de queda e respectivos esquemas de funcionamento:
a - martelo de tábua
b - martelo simples efeito ar comprimido.

10.1.2 - Martelos de duplo efeito

Neste caso se tem ar comprimido, vapor ou potência hidráulica aplicada durante a elevação e também durante a operação do golpe. Para um mesmo tamanho de cabeçote e altura de queda, estes martelos possuem maior energia do que os martelos de queda. Em média, para um mesmo peso de cabeçote, o martelo duplo efeito desenvolve 2,5 vezes mais energia de golpe que o martelo de queda. A figura 85 mostra os elementos fundamentais deste tipo de martelo e o esquema de seu acionamento.

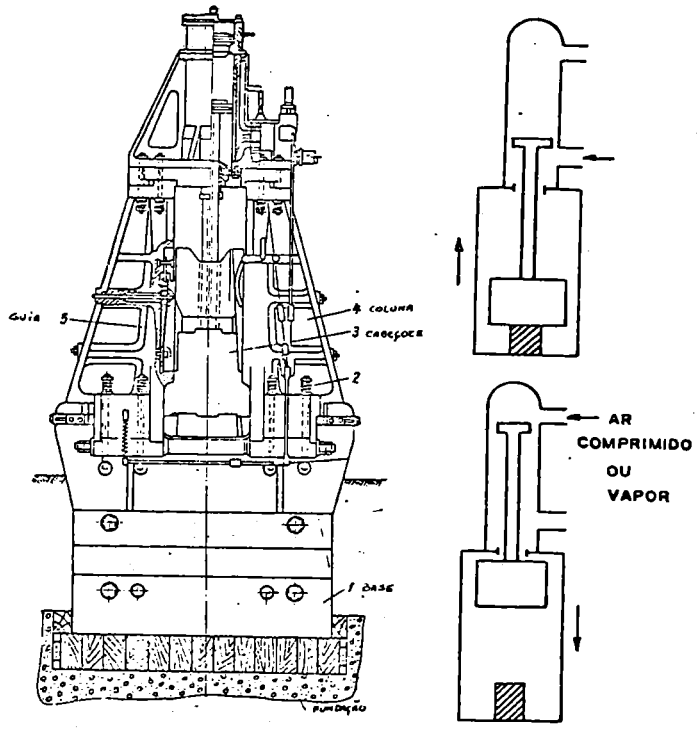


Fig. 85 - Martelo de duplo efeito, elementos básicos e esquema de funcionamento.

Martelos deste tipo são encontrados na gama de tamanho, peso do cabeçote de 1.000 a 50.000 lb.

10.1.3 - Martelos contra golpe

São máquinas de forjar que possuem basicamente dois cabeçotes de massas aproximadamente iguais que são dirigidas uma contra a outra com velocidade comum. O acoplamento entre os cabeçotes pode ser mecânico (cinta) ou hidráulico. Existem duas variedades destes martelos,

o de construção vertical usualmente limitado a forjamento de matrizes com gravura única. São construídos com capacidades variando de 3,0 tm até 200 tm. A figura 86 mostra alguns aspectos do martelo contra golpe, assim como vários esquemas de acoplamento.

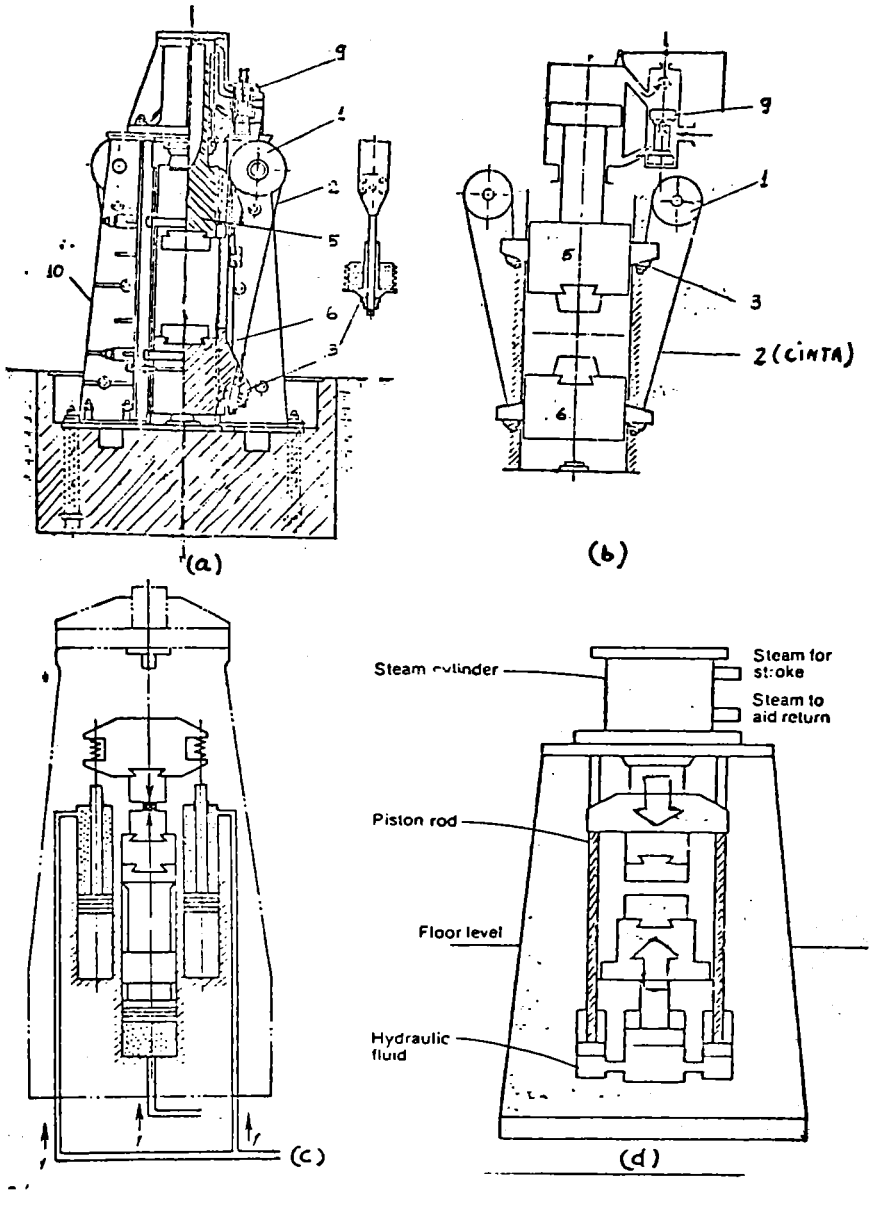


Fig. 86 - Martelo contra golpe vertical:
a,b - acoplamento mecânico
c - acionamento hidráulico independente
d - acoplamento hidráulico.

10.1.4 - Martelos contra golpe horizontais

Neste tipo de equipamento os dois cabeçotes de massas iguais são movidos horizontalmente por cilindros de ar comprimido de dupla ação. O material aquecido é posicionado verticalmente entre as matrizes por um manipulador automático. Como no tipo vertical, aqui tam-

bém a energia disponível para conformação é a maior possível.Podem ser encontrados na seguinte gama de tamanhos: 405 kgm até 5,4 tm. A figura 87 esquematiza os elementos principais destes martelos.

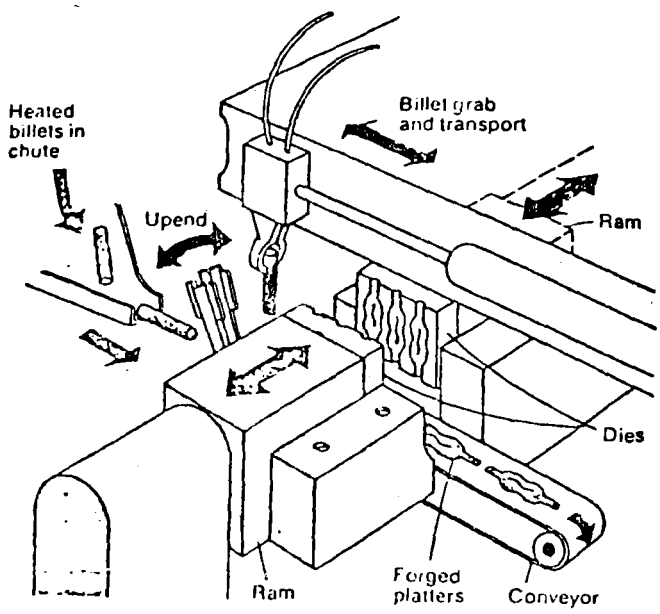


Fig. 87 - Elementos básicos de martelo contra golpe horizontal.

10.1.5 - Martelos: princípio de operação

Os martelos são classificados como máquinas de forjamento por impacto. O trabalho de conformação é progressivo e descontínuo e a energia para o trabalho é dada pela energia cinética das partes móveis (cabeçote, haste, pistão e matrizes).

Para martelos de queda:

$$u = 0,87 \sqrt{2g\ h} \qquad \text{(eq. 34)}$$

Para martelos duplo efeito:

$$u = 0,70 \sqrt{\frac{2g\ (Q_o + A\ .\ p)}{Q_o}} \qquad \text{(eq. 35)}$$

Para martelos contra golpe:

$$u = \sqrt{\frac{g\ E}{Q_o}} \qquad \text{(eq. 36)}$$

onde:

u - velocidade do cabeçote (m/s)

g - aceleração da gravidade (9,8 m/s^2)

A - área do pistão (cm^2)

p - pressão do ar comprimido

Q_o - peso dos elementos cadentes (kgf)

h - altura de queda, curso (m)

E - energia do martelo (kgfm).

10.1.6 - Eficiência do golpe

Os modelos para estudo dinâmico do martelo convencional são indicados na figura 88.

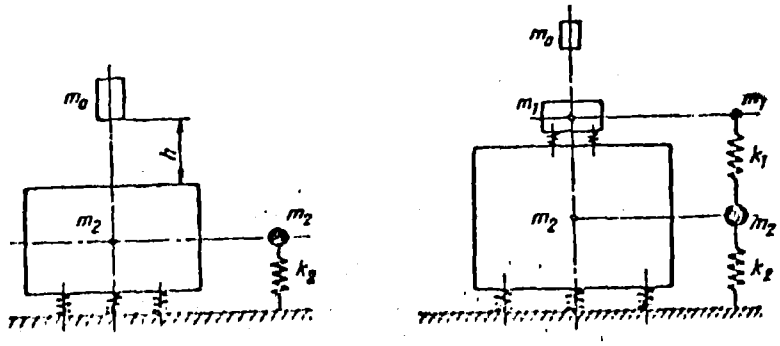


Fig. 88 - Modelos para estudo dinâmico do martelo.

Durante o choque de m_o (malho) sobre m_1 (base), aplicando-se o princípio da conservação da quantidade de movimento, deduz-se que a energia remanescente nos elementos da máquina é dada por:

$$E = 1/2\ m_o\ u^2\ (1 - \eta) \qquad \text{(eq. 37)}$$

que representa uma perda para o trabalho utilizado. Sendo o rendimento do martelo

$$\eta = \frac{1}{1 + \frac{m_o}{m_1}}\ (1 - k^2) \qquad \text{(eq. 38)}$$

onde k é o coeficiente de restituição que descreve a elasticidade da peça. Para forjamento em matriz $k \simeq 0,5$ (15) e com $m_o/m_1 \simeq 1/20$ o rendimento da operação do martelo será:

$$\eta \simeq 70\%$$

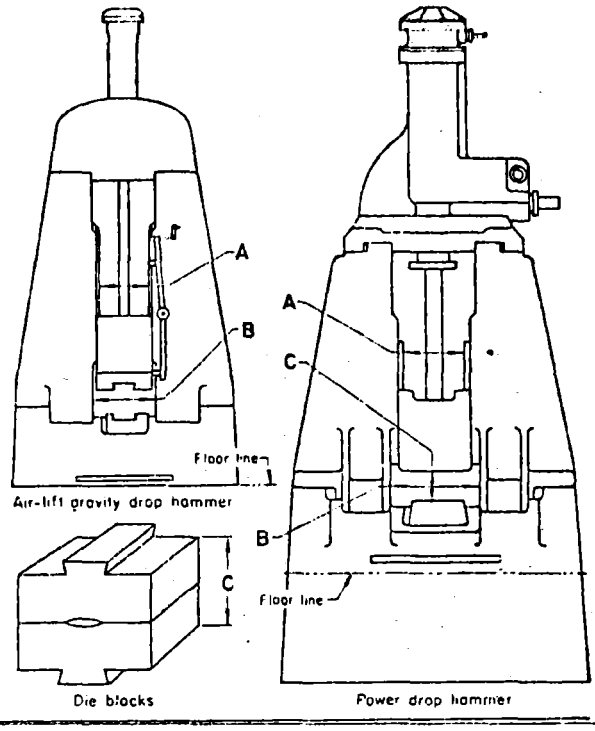
10.1.7 - Seleção do tamanho do martelo

O martelo deve ser selecionado com base na máxima energia requerida. A classificação dos martelos é feita primeiramente com base no peso do cabeçote e este valor não é indicativo da máxima energia disponível, embora seja esta o fator primordial do forjamento.

A seleção de martelos pela tabela da figura 89 é feita da seguinte maneira:

1 - Calcula-se a área total (mm^2) do forjado incluindo setor de rebarbas; para tal fazer uso das equações 27 e 28.
2 - Considera-se os seguintes fatores (4) para determinação da energia máxima (kgm). A energia é obtida pela multiplicação destes fatores pela área do forjado:

Ligas de alumínio	fator	0,050 - 0,070
Aços carbono	fator	0,055 - 0,075
Aços ligas	fator	0,075 - 0,110
Aços inoxidáveis	fator	0,085 - 0,150
Titânio e suas ligas	fator	0,130 - 0,200
Ligas resistentes ao calor	fator	0,150 - 0,250.



Rated size, lb	Maximum energy (b) Ft-lb	Mkg	Ram, front to back, in.	Between guides, A, in.	Anvil cap, front to back, in.	Between frames, B, in.	Closed die height, C, in Max	Min	Maximum effective stroke, in. (c)
Air-Lift Gravity Drop Hammers									
1,000	3,850	533	14	17	21	21¼	12	6	37
1,500	5,870	812	16	18	23	22¾	15	8	38½
2,000	8,830	1,220	20	19	26	24	16	9	42½
2,500	11,320	1,570	21	20½	27	25¼	16	9	43½
3,000	14,200	1,960	23	23	30	28½	17	10	45½
4,000	19,400	2,690	25	25	32	30¾	18	11	46½
5,000	24,700	3,420	27	27¾	36	33¼	19	12	47½
6,000	30,000	4,160	30	28	36	35½	21	13	48
8,000	41,600	5,770	33	29	40	36¾	22	14	50
10,000	52,000	7,230	36	30	44	38¾	23	15	50
Power Drop Hammers									
1,000	11,100	1,540	16	16	20	21¼	...	9	...
1,500	16,700	2,310	19	18	23	23¼	...	9	...
2,000	22,500	3,120	21	20	26	25¾	...	9	...
2,500	28,500	3,950	22	21	27	27¼	...	11	...
3,000	34,400	4,770	25	23	30	29¼	...	11	...
4,000	46,000	6,370	27	25	32	31¼	...	12	...
5,000	58,000	8,030	29	27	36	34	...	14	...
6,000	70,000	9,700	31	28	36	36	...	14	...
8,000	94,000	13,000	35	29	40	38	...	16	...
10,000	118,000	16,300	38	30	44	38⅞	...	16	...
12,000	142,000	19,600	42	32	48	40⅞	...	16	...
16,000	190,000	26,300	44	34	51	43⅝	...	18	...
20,000	240,000	33,200	46	37	58	46⅞	...	20	...
25,000	300,000	41,500	50	39	62	48⅞	...	20	...
35,000	425,000	59,000	54	44	73	54⅞	...	22	...

(a) Data originally published by Chambersburg Engineering Co. in "Guide to Die Making for Multiple Impression Closed-Die Drop Forging", by L. George Drabing, 1967. (b) Maximum energy per stroke. A meter-kilogram (mkg) is equivalent to 7.23 ft-lb. Foot-pound ratings are actual and include die weight, estimated at 25% of rated weight. (c) Refers to maximum stroke with medium die height.

Fig. 89 - Tabela com capacidade e dimensões características de martelos disponíveis no mercado.

10.2 - Prensas

De modo geral, pode-se classificar as prensas de forjamento em duas grandes categorias:

1 . Prensas mecânicas - prensas excêntricas (Crank presses)
- prensas de cunha (Wedge-type presses)
- prensas de fricção (Screw presses).

2 . Prensas hidráulicas.

10.2.1 - Prensas excêntricas

O princípio básico de construção, conforme o esquema da figura 90, é o sistema completo biela-manivela acionado por embreagem pneumática.

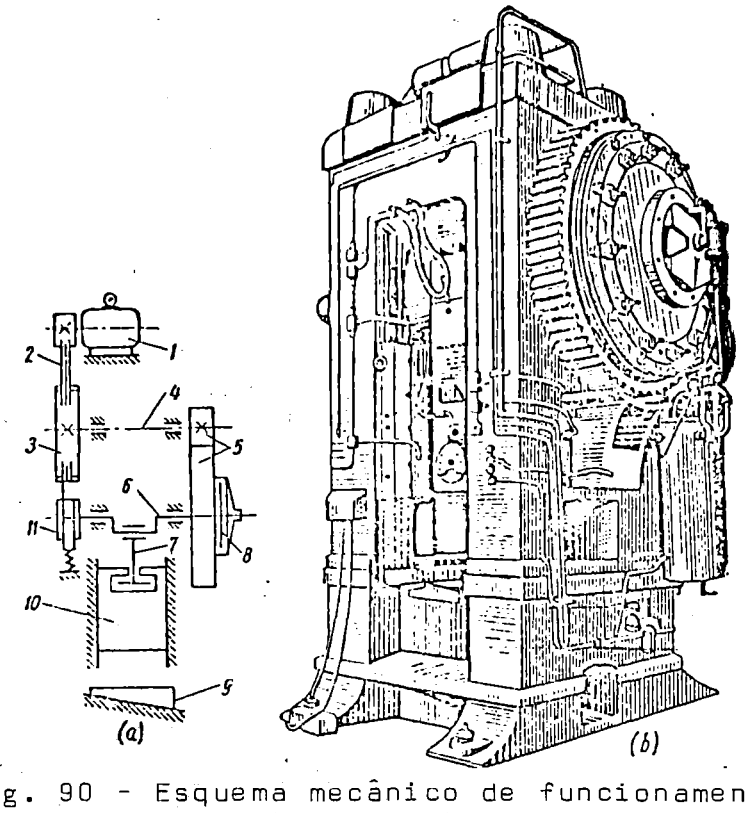


Fig. 90 - Esquema mecânico de funcionamento a)
b) - prensa excêntrica de 1.600 t

Uma prensa excêntrica para forjamento deve possuir um volante para armazenamento de uma grande energia, de modos a vencer a demanda exigida para as operações de recalque. O motor deverá ter a capacidade suficiente para restaurar a energia do volante no intervalo dos passes do forjamento.

Para o caso de uma prensa excêntrica de 2.500 t de capacidade, dotada de um motor de 150 HP, a energia liberada na ferramenta é de até 6.000 HP, o que corresponde a um pacote de energia de 30 tm em uma descida do cabeçote. Prensas desta capacidade podem desenvolver em um curso a energia de até 67 tm (10).

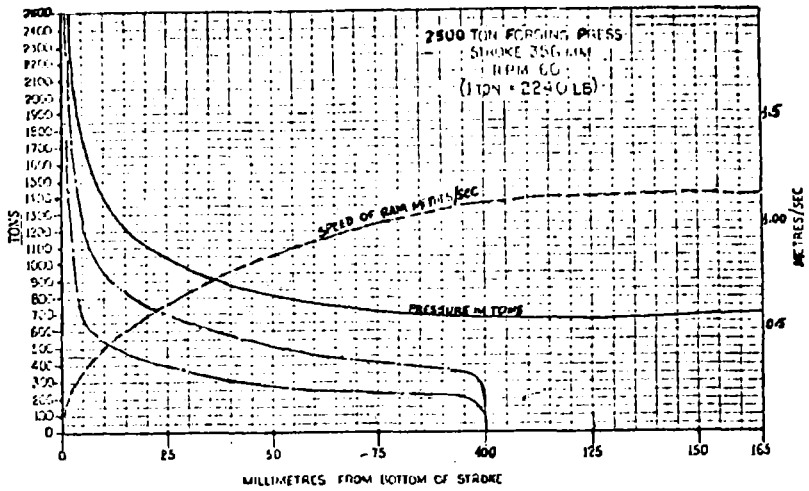


Fig. 91 - Curvas características de cargas e velocidade do cabeçote para prensa de 2.500t

Abaixo, segue um quadro indicativo da gama comercial para prensas excêntricas e características básicas. Nas figuras 92 e 93 há esquema de linhas automáticas de produção com pressão excêntrica.

Capacidade(t)	300	600	1.000	1.300	1.600	2.500	3.000	4.000	5.000
Golpes/min	110	100	95	90	70	60	60	55	50
Curso (mm)	205	205	255	255	280	355	355	381	406

A popularidade das prensas excêntricas de forjaria se deve a dois fatores principais (16):

1 . desde que o impacto é menor (comparado ao do martelo) a ferramenta pode ser menos robusta e com dureza mais elevada. Estes fatos resultam em maior economia de ferramenta e maior vida de gravação.

2 . a razão de produção também é maior do que o martelo pois enquanto para prensas se tem em média 3 golpes, para forjamento de peças a martelo, este valor é de 6 a 8. Considerou-se aqui martelo de tamanho médio, pois em martelos pesados a média de golpes é ainda maior.

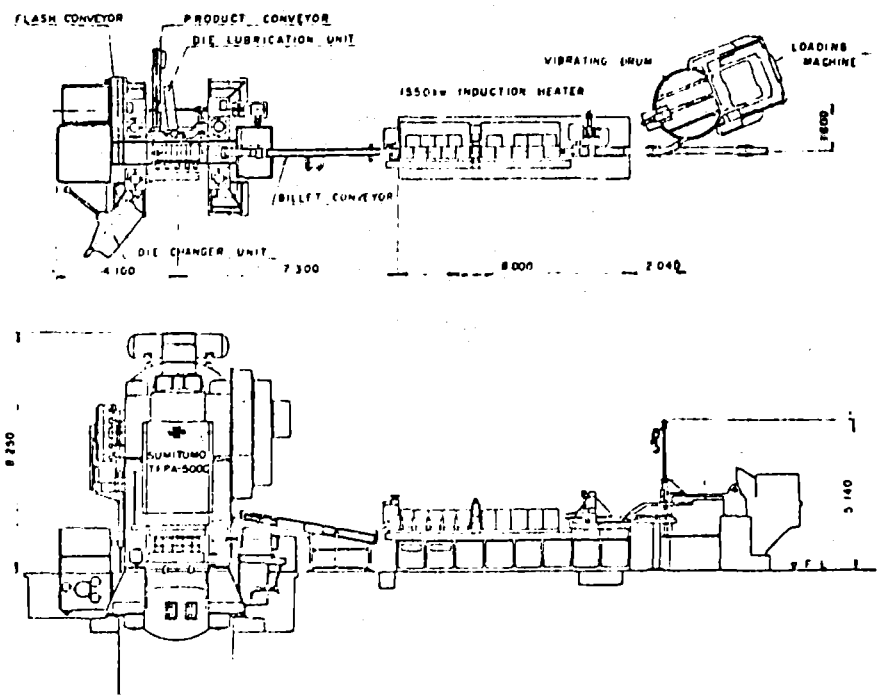


Fig. 92 - Parte da linha automática de forjamento de mangas de eixos. Prensa excêntrica de 5000 t e forno de indução de 1.550 Kw.

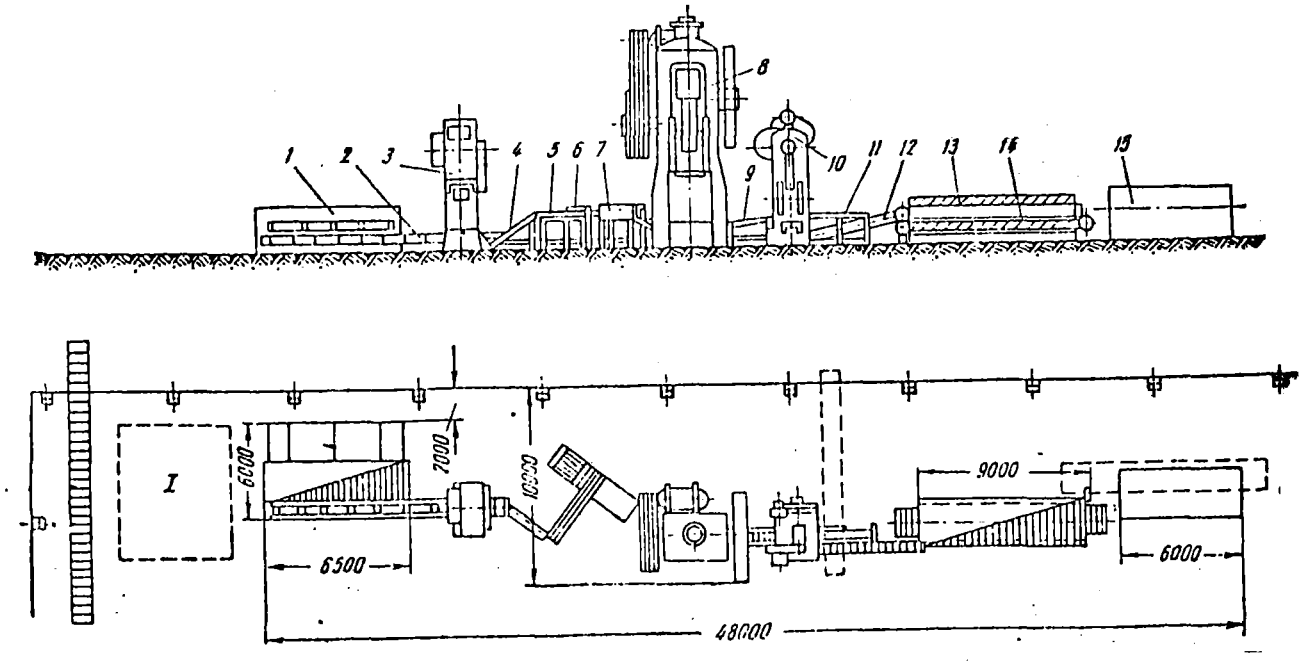


Fig. 93 - Detalhe de linha automática de forjamento de engrenagens e prensa excêntrica de capacidade média, incluindo tratamento térmico.

10.2.2 - Prensas de cunha

Neste tipo de prensa é utilizada uma cunha para a movimentação do cabeçote e o mecanismo de acionamento da cunha pode ser mecânico ou também hidráulico, figura 94(a). No caso de uma destas prensas de 12.000 t de capacidade o esforço necessário para se empurrar a cunha de 30° de inclinação, é de 6.000 t.

Em uma outra variedade deste tipo de prensa, a cunha é substituída por um bloco excêntrico diretamente acoplado ao eixo de manivela e se movimenta horizontalmente e dentro do cabeçote, ocasionando o movimento vertical do mesmo. Um esquema deste detalhe é indicado na figura 94 (b).

Em comparação com prensas excêntricas, elas oferecem uma maior rigidez, pois são mais curtas e têm melhor guiamento do cabeçote. São empregadas em forjamento de maior precisão e altas capacidades, como por exemplo, no forjamento de pás de turbinas. Na figura 95 são dados exemplos de linhas para forjamento de eixos de manivela com prensas de cunha de 8000 e 12.000 t.

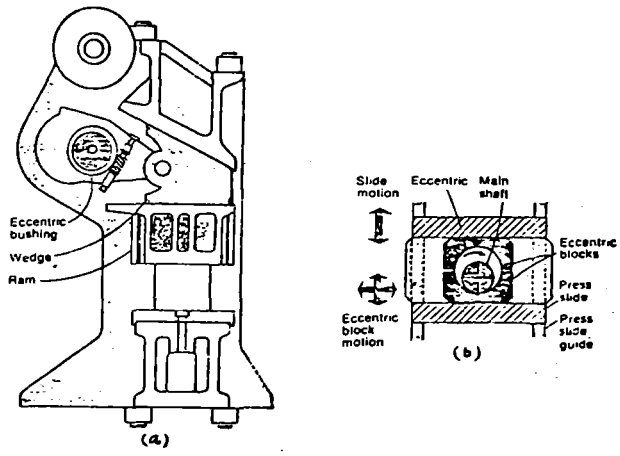


Fig. 94 - a) prensa de cunha com acionamento mecânico
b) mecanismo de blocos excêntricos para movimentação do cabeçote.

10.2.3 - Prensas de fricção

Mais propriamente denominadas prensas de rosca (Screw presses). A principal característica destas prensas é o sistema de acionamento do cabeçote - figura 96. Basicamente ele se constitui de um grande fuso vertical (podendo haver dois em algumas prensas) que gira alternativamente nas duas direções acionado por um volante, que por sua vez pode ser movimentado de maneira mecânica, hidráulica ou elétrica. Possibilitando o forjamento progressivo através de vários golpes com um martelo e possuindo precisão de guiamento como demais prensas. Elas são particularmente indicadas para forjamento que requerem elevadíssima capacidade. A maior prensa das três deste tipo, que produzem pás de turbinas, nos E.U.A., possui capacidade nominal de 16.000 t e é acionada eletricamente por quatro motores. Estas prensas são disponíveis no mercado desde a capacidade de 63 t.

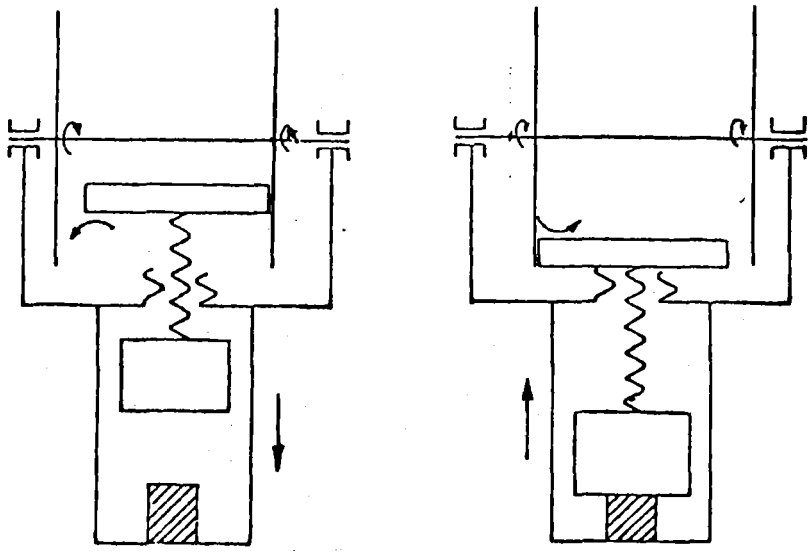


Fig. 96 - Esquema clássico de funcionamento da prensa de fricção.

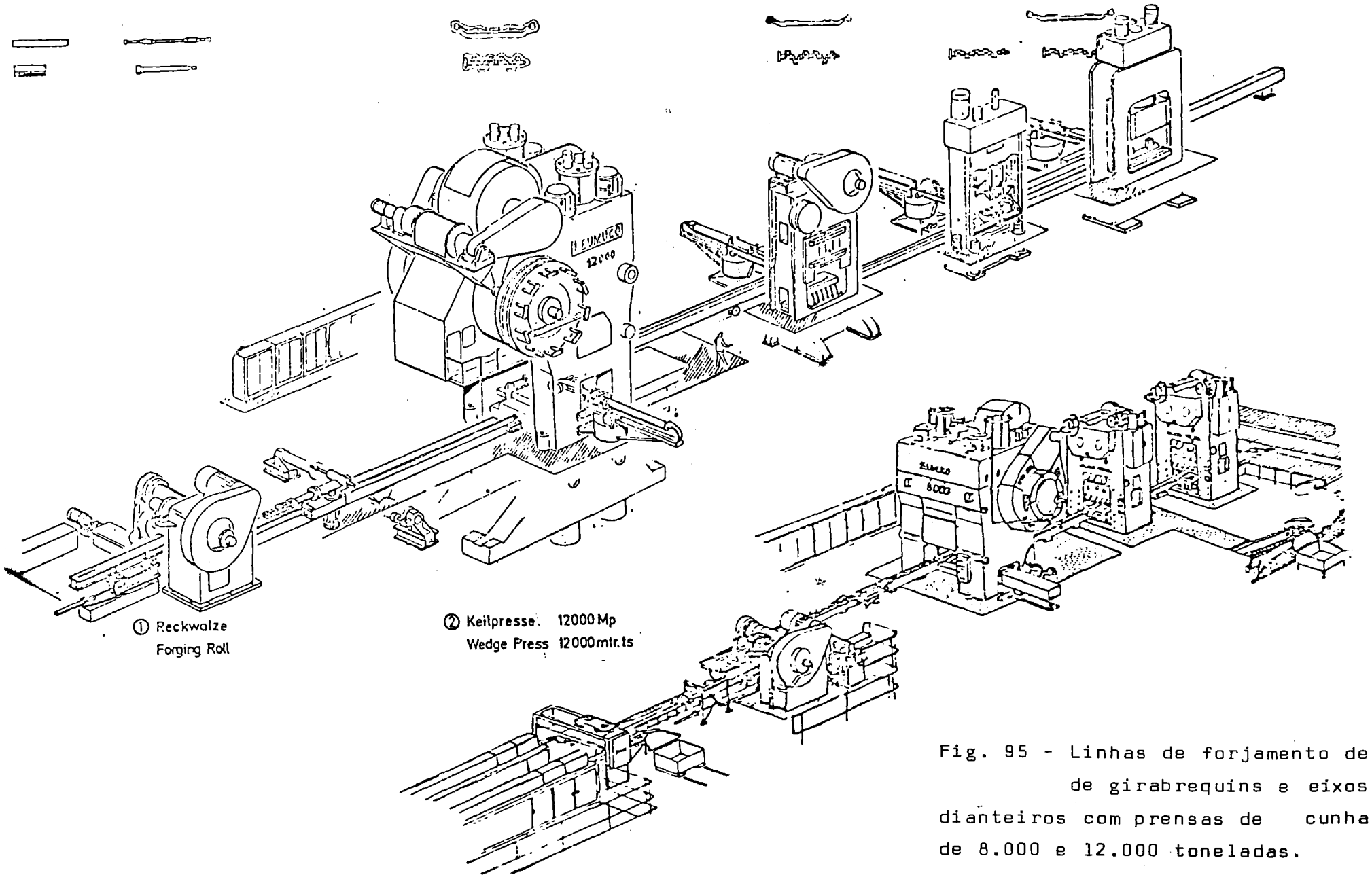


Fig. 95 - Linhas de forjamento de de girabrequins e eixos dianteiros com prensas de cunha de 8.000 e 12.000 toneladas.

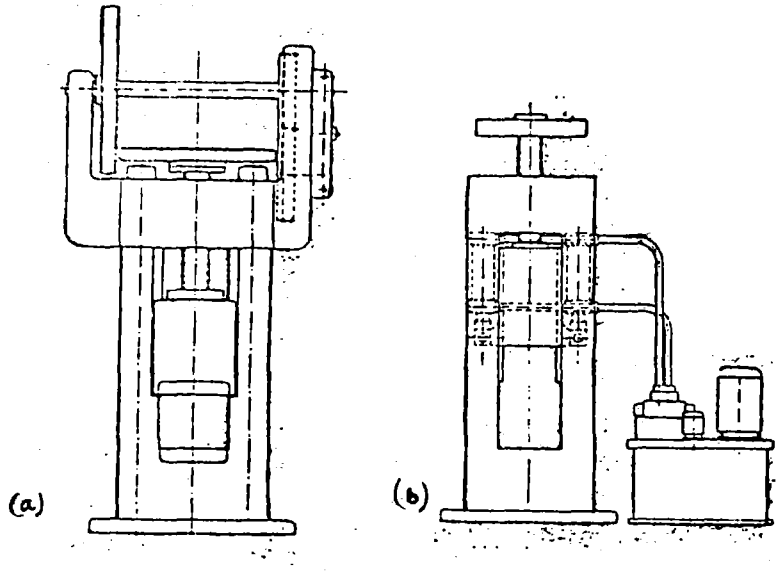


Fig. 97 - Modelos modernos de prensas de fricção
a) acionamento mecânico
b) acionamento hidráulico.

10.2.4 - Prensas hidráulicas

As maiores prensas de forjamento em uso são hidráulicas. Duas nos E. U. A., uma do tipo Push down e outra modelo Pull-down, figura 98, com capacidade de 50.000 t cada uma, estão em pleno funcionamento. A terceira está na França e possui capacidade para 66.000 t.Este tipo de máquina trabalha quase exclusivamente com material de alta resistência para a indústria aeronáutica e aeroespacial. Nenhum outro tipo de máquina de conformação existente substitui o serviços destas prensas atualmente. A atuação e o grau de controle da prensa hidráulica são as razões principais para seu alto valor em muitas operações de forjamento. Através de temporizadores, válvulas, limitadores e recentemente com controle numérico e computadores, a prensa pode ser programada a desenvolver uma sequência desejada de ações de forjamento.

Mais frequentemente esta ação de controle se faz da seguinte maneira: o cabeçote e matriz superior aproximam-se rapidamente da peça, o avanço é diminuído logo quando o contato é feito e mantém-se a velocidade correta para fazer o material fluir à razão desejada. Completada a operação, o cabeçote retorna rapidamente.

10.3 - Recalcadoras

O forjamento em recalcadoras ou "Forging Machines" como são também conhecidas, é essencialmente um processo de expansão ou alargamento da seção reta de barras, tubos ou outro produto geralmente redondo. Em seu princípio mais simples a operação, neste tipo de máquina, se faz da seguinte maneira: o material aquecido é agarrado la-

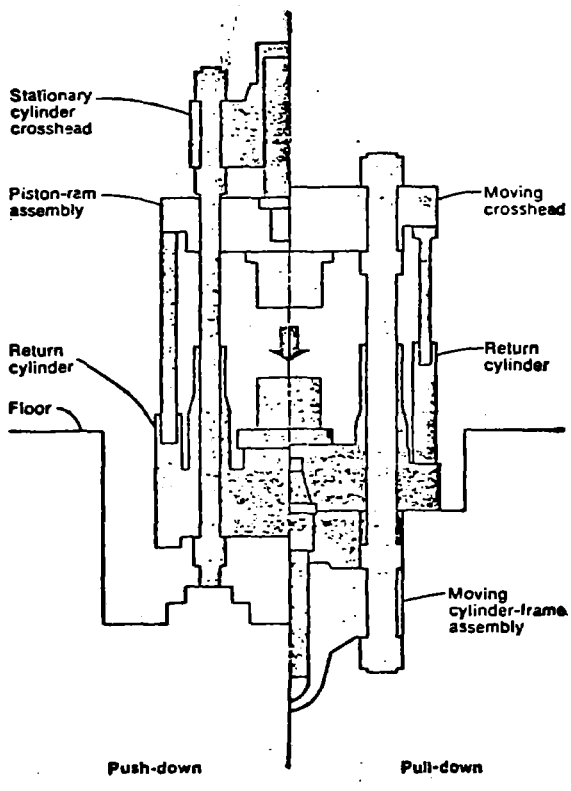


Fig. 98 - Esquema de prensa hidráulica mostrando em corte os dois modelos principais.

teralmente pelas matrizes (gripper) e a pressão é aplicada na ponta da barra do material, na direção do eixo, usando-se um cabeçote (com punções), que provoca o recalque - figura 99.

Rated size, in.	Nominal rated capacity, tons	Average strokes per minute	Average motor rating, hp
1	...	90	7.5
1¼	125	75	10
1½	300	65	10 to 15
2	400	60	15 to 20
2½	500	55	20 to 25
3	600	45	30
4	800	35	40 to 60
5	1000	30	60 to 75
6	1200	27	75
7	1500	25	125
8	1800	23	150
9	2200	...	...

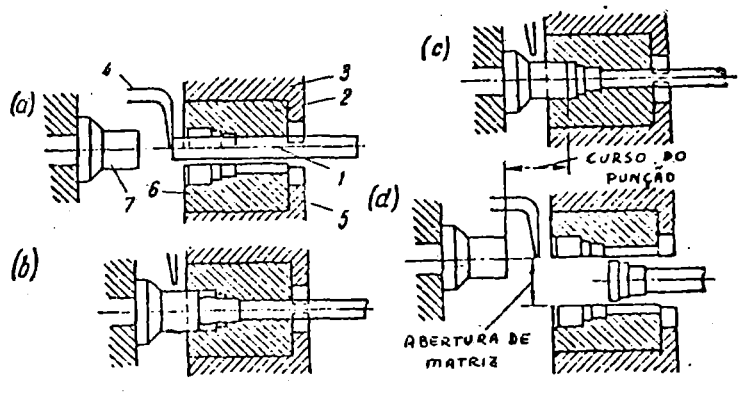


Fig. 99 - Tabela com classificação de recalcadoras e sequência completa de operação de recalque.

Existem duas variedades de recalcadoras. O tipo mais comum é a recaldora horizontal. Os componentes essenciais destas máquinas estão indicados na figura 100. Elas são operadas mecanicamente por um sistema biela manivela que movimenta o cabeçote porta-punções. O cabeçote móvel porta-matrizes é acionado por um jogo de cames. A ação do cabeçote porta-punções é semelhante à do cabeçote nas prensas mecânicas.

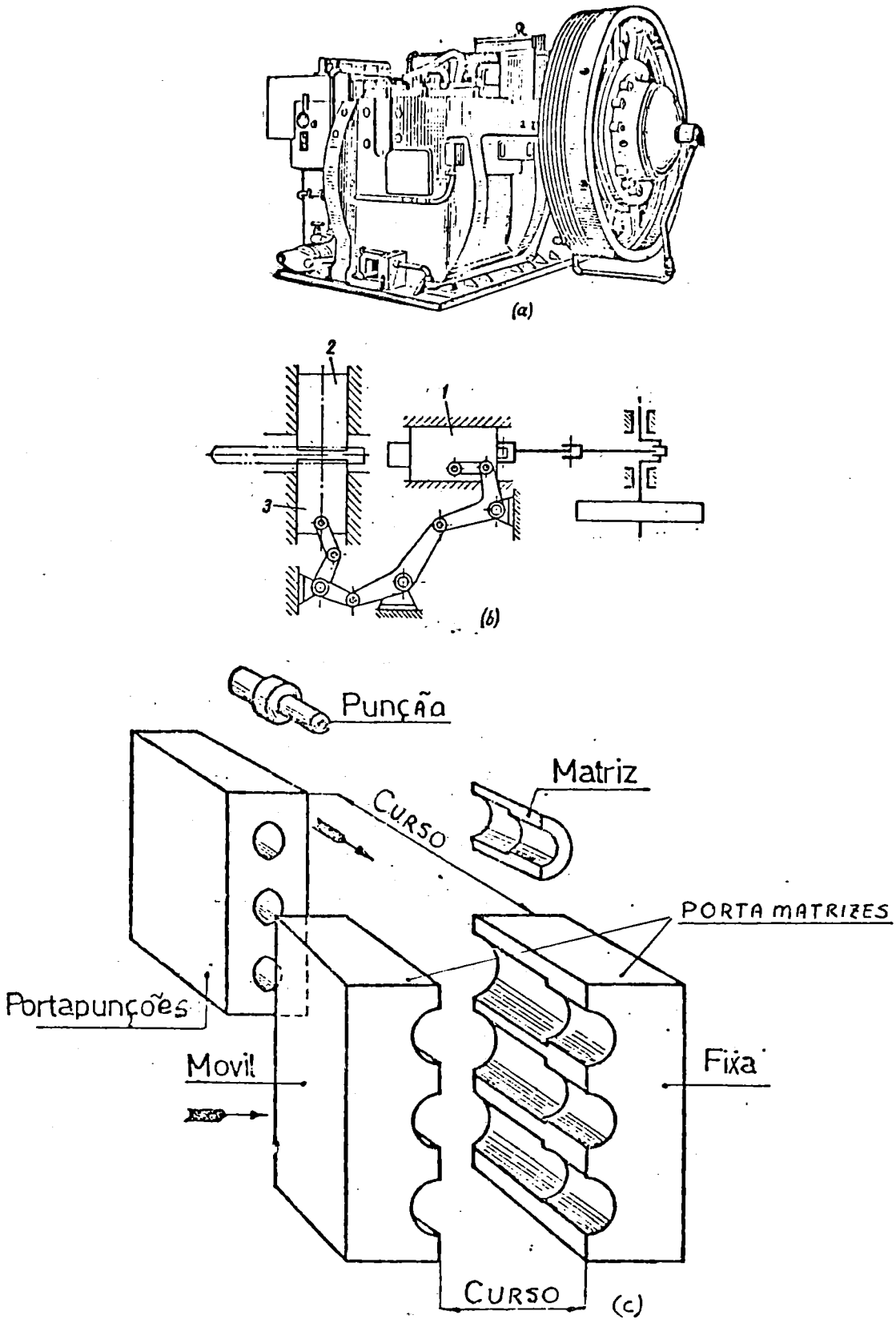


Fig. 100 - Recalcadora horizontal convencional

a) aspecto externo

b) esquema do mecanismo

c) disposição e detalhe do ferramental.

ESCOLA DE ENGENHARIA DE SÃO CARLOS
BIBLIOTECA

O curso do cabeçote móvel porta-matrizes é denominado de abertura de matriz e determina o diâmetro máximo de recalcamento, com possibilidade de movimentação entre as matrizes, que pode ser formado por uma dada recalcadora.

Outro tipo de recalcadora é aquela indicada na figura 102. A diferença básica entre uma máquina e outra é a direção de movimentação do cabeçote móvel porta-matrizes; esta movimenta-se na vertical, aquela na horizontal.

As recalcadoras são classificadas com base na dimensão indicativa do máximo diâmetro que pode ser recalcado - tabela da figura 99. Na escolha da máquina para forjamento de uma dada peça, deve-se levar em consideração a capacidade do equipamento, comparado ao esforço necessário, sabendo-se para isso que a pressão de forjamento para os aços pode variar de 40 a 60 kgf/mm^2, dependendo da complexidade de forma da peça.

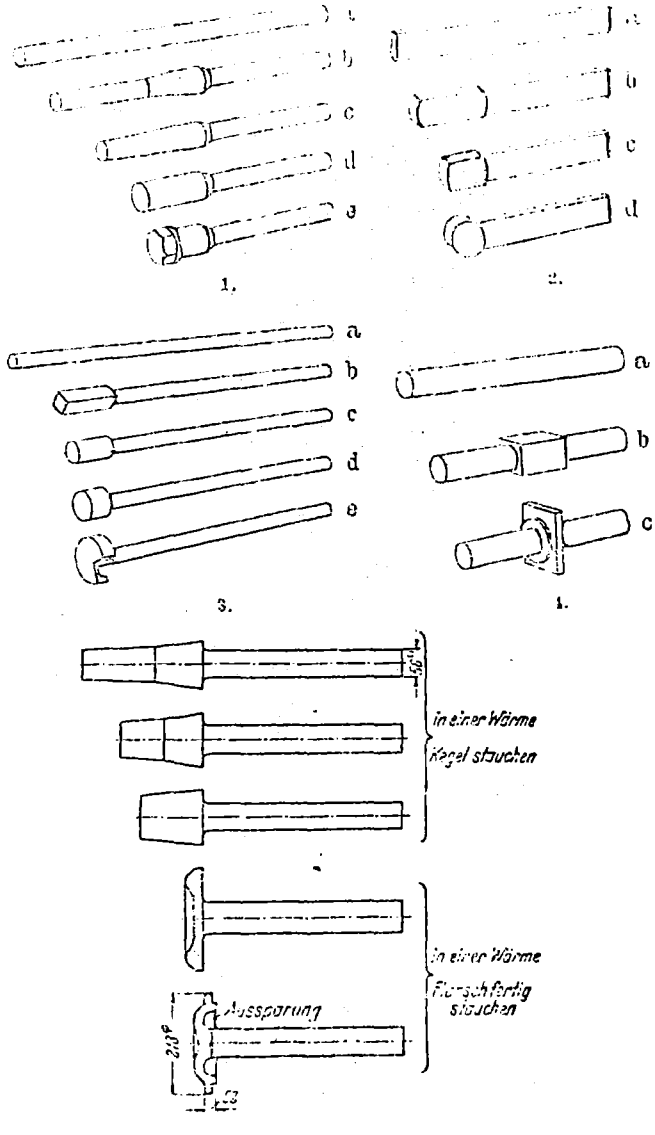


Fig. 101 - Exemplos típicos de sequências produzidas em recaldadoras a partir de barras.

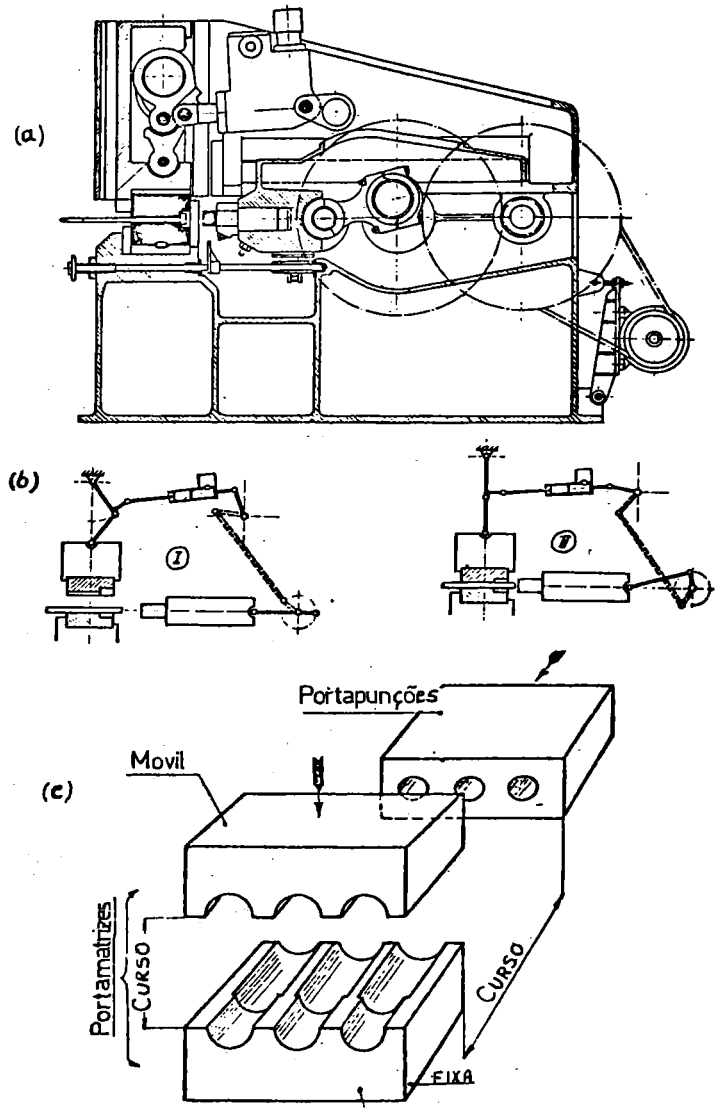


Fig. 102 - Recalcadora horizontal com abertura de matriz vertical

a) aspecto geral

b) esquema de atuação dos mecanismos

c) detalhe e posição dos porta-ferramentas.

11 - EQUIVALÊNCIA ENTRE EQUIPAMENTOS PARA FORJAR

De modo geral, com exceção de casos específicos de fabricação, uma determinada peça pode ser forjada em qualquer tipo de equipamento disponível desde que com capacidade para a operação.

Primeiramente no estabelecimento da equivalência entre equipamentos de forjar será considerado:

11.1 - Prensa hidráulica e prensa mecânica

Devido a grande diferença entre as características de cargas entre estes dois tipos de prensas, suas capacidades não podem ser diretamente relacionadas. A prensa mecânica desenvolve sua carga máxima no fim do curso enquanto que a prensa hidráulica pode apresentar força máxima ao longo de todo o seu curso.

Em termos médios e a grosso modo, pode-se tomar a seguinte relação:

$$\frac{\text{Prensa hidráulica (t)}}{\text{Prensa mecânica (t)}} = \frac{1,0}{0,8 - 1,2}$$

11.2 - Prensa mecânica e martelo

Embora neste caso não se possuam bases concretas para estabelecimento de uma equivalência real, visto as diferenças na maneira de trabalho de um equipamento e outro, ela poderá ser estabelecida na possibilidade de forjamento de determinada peça.

A relação média de equivalência pode ser considerada como sendo:

$$\frac{\text{Martelo de duplo efeito (Kgm)}}{\text{Prensa mecânica (t)}} = \frac{3,15}{1}$$

No estabelecimento da relação de equivalência acima, agiram como fatores determinantes não só as capacidades dos equipamentos em si, como também a avaliação e conceitos regionais de fabricantes e forjadores. Levantamentos e divergências neste sentido podem ser vistos nos gráficos da figura 102.

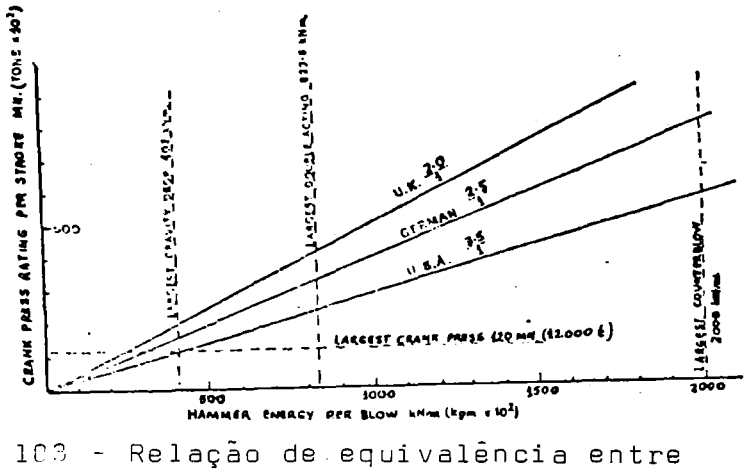


Fig. 103 - Relação de equivalência entre martelo e prensas (16).

As prensas mecânicas têm preferência com relação a martelo na produção de peças com corridas grandes, principalmente por causa da economia em ferramenta, material, aquecimento e produtividade. De outro lado, contudo, o investimento é muito maior, o custo da prensa chega a ser 4 a 6 vezes maior que o do martelo equivalente.

Os martelos em contra partida são usados mais para corridas pequenas, em peças com formatos alongados e estreitos, garfos e demais forjados que exigem cargas elevadas de conformação.

11.3 - Martelo duplo efeito e martelo contra golpe

No relacionamento entre equipamentos com princípios de funcionamento idênticos, o fator de equivalência assume aspecto mais concreto. Visto que parte da energia do golpe do martelo duplo efeito é perdida no deslocamento da base, isto não ocorre com martelo contra golpe. Sendo 25% em média, a perda de energia na base, a relação de equivalência pode ser:

$$\frac{\text{Martelo duplo efeito (Kgm)}}{\text{Martelo contra golpe (Kgm)}} = \frac{1,25}{1,0}$$

11.4 - Martelo duplo efeito e martelo de queda

A diferença básica entre um martelo é que no primeiro a massa (m_o) é acelerada pela ação de pressão externa (ar comprimido/vapor) e portanto sua energia é maior para um mesmo peso do cabeçote e a relação, como visto anteriormente é:

$$\frac{\text{Martelo duplo efeito (peso cabeçote)}}{\text{Martelo de queda (peso do cabeçote)}} = \frac{2,5}{1}$$

Abaixo segue quadro de equivalência entre capacidade de vários tipos de equipamentos para forjar, tendo como base de referência a prensa hidráulica.

Type of machine	Factor(b)	Example of equivalent rating(c)
	Intermediate-Size Machines	
Hydraulic press	1.0 ton	5,000 tons
Power drop hammer	2.0 to 2.4 lb per ton	10,000 to 12,000 lb
Mechanical press	0.8 to 1.2 tons per ton	4,000 to 6,000 tons
High-energy-rate forging machine ...	60 to 110 ft-lb per ton	300,000 to 550,000 ft-lb
	Large Machines	
Hydraulic press	1.0 ton	50,000 tons
Power drop hammer	2.0 to 2.4 lb per ton	100,000 to 120,000 lb
Vertical counterblow hammer	2.6 to 4.8 mkg per ton	130,000 to 240,000 mkg

12 - REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

1 - BOFORS, A.B. - Bofors Drop Forgings - Manual for Designers and Workshop Personnel. Karlstad, Sweden, Nermans, 1976.

2 - CTA - Estudo Preliminar sobre Quadro Forjador Nacional. 1975.

3 - FIA - Forging Handbook. Cleveland, Ohio, Forging Industry Association. John E. Jenson, 1970.

4 - ASM - Forging and Casting - Metals Handbook. Eighth Edition, Ohio, Metals Park, 1970.

5 - SABROF, A.M.; BOULGER, F.W. and HENNING, H.J. - Forging Materials and Practices, Columbus, Ohio, Batelle Memorial Institute, 1968.

6 - LANG, K. and MEYER-NOLKEMPER, H. - Gesenkschmieden. Berlim, Springer Verlag, 1977.

7 - SIEBEL, E. - Le Faconnage des Metaux par Deformation Plastique. Libraire Polythechnique ch. Berauger, 1936.

8 - ALTAN, T. and HENNING, H.J. - Closed-die Forging of Roud Shapes. Metallurgia and Metal Forming, March, 1972.

9 - CHANG, K.T. and CHOI, I.J. - Influence of Some Parameters no Die Filling in Closed-Die Forging. Annals of the CIRP, v. 24.1.75 p. 163-165.

10 - FORSTER, J. - The High-Speed Mechanical Forging Press. Metal Treatment and Drop Forging, December, 1963, p. 471-483.

11 - GELEJI, A. - The Calculation of the Forces and Work Required for Shaping Metals in the Plastic State. Kiado, Budapest, Akademiai, 1955.

12 - LANG, K. - The Influence of the Dimensions of the Flash Gap on the Compression Stresses in the Gap and the Die Cavity and the Filling of the Die in Die Forging. Metal Treatment and Drop Forging, September, 1962, p. 373-380.

13 - VLADIMIROV, V. - Dies, Moulds and Jigs. Moscow, Mir Publishers, 1977.

14 - WINSHIP, J. - Fundamentals of Forging. American Machinist, Special Report 705, July 1978, p. 100-122.

15 - LIPINSK, J. - Fundamente und Tragkoustruktioner fur Maschinen. Bauverlag, GMBH, Wesbaden, 1972.

16 - SCOTT, K. and WILSON, G. - Hammers versus Presses. Metallurgia and Metal Forming, July, 1975.