

UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO

ESCOLA POLITÉCNICA



# GEOLOGIA E METALURGIA

---

PUBLICAÇÃO DO  
CENTRO MORAES REGO

---

BOLETIM N.º 22  
1961

---

C. M. R.

---

Praça Cel. Fernando Prestes, 74 - São Paulo - Brasil

CENTRO MORAES REGO

**FORJAMENTO DE AÇO, A QUENTE,  
EM MATRIZ FECHADA.  
MATRIÇAGEM**

ENG.º JOÃO MENDES FRANÇA

Professor da disciplina de Transformações Mecânicas de Metais e Ligas do curso de metalurgistas da Escola Politécnica da Universidade de São Paulo.

Assistente da Diretoria da Companhia Brasileira de Material Ferroviário —  
COBRASMA.

As Forjarias do tipo «drop forging» apareceram no Brasil só muito recentemente, com desenvolvimento paralelo ao da indústria automobilística, da qual são um dos principais apoios.

Tão nova essa indústria se apresenta, que nem mesmo terminologia adequada existe em português, de onde a necessidade que se teve de criá-la.

A circunstância de ter trabalhado em duas companhias pioneiras nesse ramo, a Cia. Aços Especiais Itabira — Acesita e a Cia. Brasileira de Material Ferroviário — COBRASMA, permitiram-me tomar conhecimento prático dos problemas relacionados ao forjamento em matriz e verificar pessoalmente a falta de engenheiros com conhecimento do assunto. Gradativamente êsses engenheiros vão agora se formando, mas sem uma base racional de estudo que reduziria consideravelmente o seu tempo de treinamento.

A Escola Politécnica da Universidade de São Paulo tomou conhecimento do problema e está procurando resolvê-lo.

O extraordinário progresso que vem tendo o curso de engenheiros metalúrgistas da Escola Politécnica da Universidade de São Paulo levou a Congregação a criar a disciplina de Transformações Mecânicas de Metais e Ligas, subordinada à cadeira de Metalurgia Geral e Siderurgia, da qual tenho a honra de ser assistente.

O presente trabalho resume parte do programa daquela disciplina referente a forjamento em matriz e foi publicado unicamente com fins didáticos. Se algum mérito possui, pertence exclusivamente aos rapazes do Centro Moraes Rego, cuja insistência, constância e paciência fizeram com que eu me decidisse a escrevê-lo.

## Í N D I C E

I — CONCEITOS FUNDAMENTAIS		
a — Metais e ligas . . . . .		11
b — Textura dos metais e ligas . . . . .		11
c — Ductilidade e resistência à deformação . . . . .		12
d — Conformação ou trabalho a quente ou a frio . . . . .		13
e — Propriedades direcionais . . . . .		14
f — Matricagem (forjamento em matriz) . . . . .		14
II — FATORES DE INFLUÊNCIA NO PROCESSO DE CONFORMAÇÃO PLÁSTICA DOS METAIS		
a — Influência da temperatura de conformação . . . . .		15
1. Influência da temperatura na resistência à deformação . . . . .		16
2. Influência de temperatura na ductilidade . . . . .		17
b — Influência da composição . . . . .		17
c — Influência da velocidade de transformação . . . . .		19
d — Influência da textura . . . . .		20
e — Influência da matéria prima — qualidade para forjamento . . . . .		21
f — Influência da direção do trabalho — fibramento . . . . .		23
III — EQUIPAMENTO PARA FORJAMENTO		
a — Martelos de queda . . . . .		25
1. Martelos de queda livre . . . . .		27
2. Martelos de queda acelerada . . . . .		29
b — Prensas hidráulicas . . . . .		30
c — Prensas de rebarbar . . . . .		31
d — Prensas mecânicas de forjar . . . . .		32
1. Horizontais (recalcadoras) . . . . .		32
2. Prensas verticais . . . . .		33
e — Equipamentos auxiliares . . . . .		33
1. De corte . . . . .		33
2. Rolos de forjar . . . . .		34
3. Marteletos . . . . .		34
4. Dobradoras . . . . .		35
5. De transporte . . . . .		36
1. Características principais . . . . .		37
2. Combustíveis . . . . .		37
1. Características principais . . . . .		37
3. Tipos mais comuns . . . . .		37
IV — TÉCNICA DE FABRICAÇÃO DE MATRIZES		
a — Matéria prima para as matrizes . . . . .		40
b — Matrizes para martelos e prensas verticais . . . . .		42
1. Planejamento . . . . .		42
2. Formação de rebarba . . . . .		43
3. Diagrama de distribuição de massas . . . . .		45
4. Estágios intermediários . . . . .		46
5. Estágio final e considerações gerais . . . . .		50
— ângulo de saída . . . . .		50
— determinação da linha divisória . . . . .		51
6. Rebarbação . . . . .		52
c — Características próprias de martelos e prensas no que se refere a matrizes . . . . .		54
d — Matrizes para recalcadoras . . . . .		55
e — Matrizes para rolo de forjar . . . . .		58
ANEXO I — TOLERÂNCIAS PARA FORJADOS . . . . .		63



## I — CONCEITOS FUNDAMENTAIS

### a) METAIS E LIGAS

O termo «metal» aplica-se em metalurgia industrial a material metálico obtido por processo economicamente viável e (nê-se sentido) formado de um único elemento. Já o termo «liga» define a união de dois ou mais elementos, sendo pelo menos um deles metal, uma vez que a massa aparentemente homogênea resultante tenha características metálicas.

Pela definição anterior vê-se que a existência de impurezas em um metal não autoriza a sua classificação como liga.

Na grande maioria dos casos, havendo exceções que o uso consagrou, a liga é definida por um metal base, aquêle que participa em maior porcentagem. Essa deve ser a norma a ser seguida, prática e fácil de guardar. Assim, uma liga de alumínio com 5% de silício é uma liga alumínio-silício, uma liga com 70% de Cu e 30% de Zn (latão) é uma liga Cu-Zn, etc. Anàlogamente para as ligas terciárias e quaternárias.

### b) TEXTURA DOS METAIS OU LIGAS

Textura é a forma particular do arranjo dos cristais de um metal ou liga. A textura é observada ao microscópio ou a olho nu, através de uma superfície polida e atacada quimicamente.

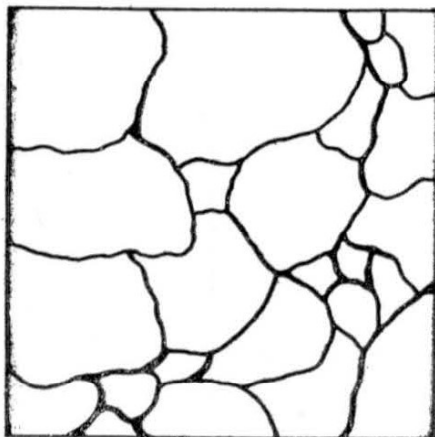


Fig. 1 - Aspecto típico da textura de um metal ou liga monofásica.

Num metal ou liga monofásica policristalina a textura apresenta-se sob forma de um agregado cristalino homogêneo (fig. 1), constituído dos grãos individuais que são os cristais alotrópicos formados por elementos do metal ou liga, cada grão tendo a mesma composição que o agregado em seu todo.

No caso da liga monofásica é o facto de os elementos constituintes formarem uma solução sólida que faz com que se apresentem à observação como se fôsem um metal único.

Entretanto, isso nem sempre se dá e aparecem então as texturas heterogêneas, compostas de duas ou mais fases sólidas, cujos diferentes tipos de arranjos são aquêles constantes da fig. 2.

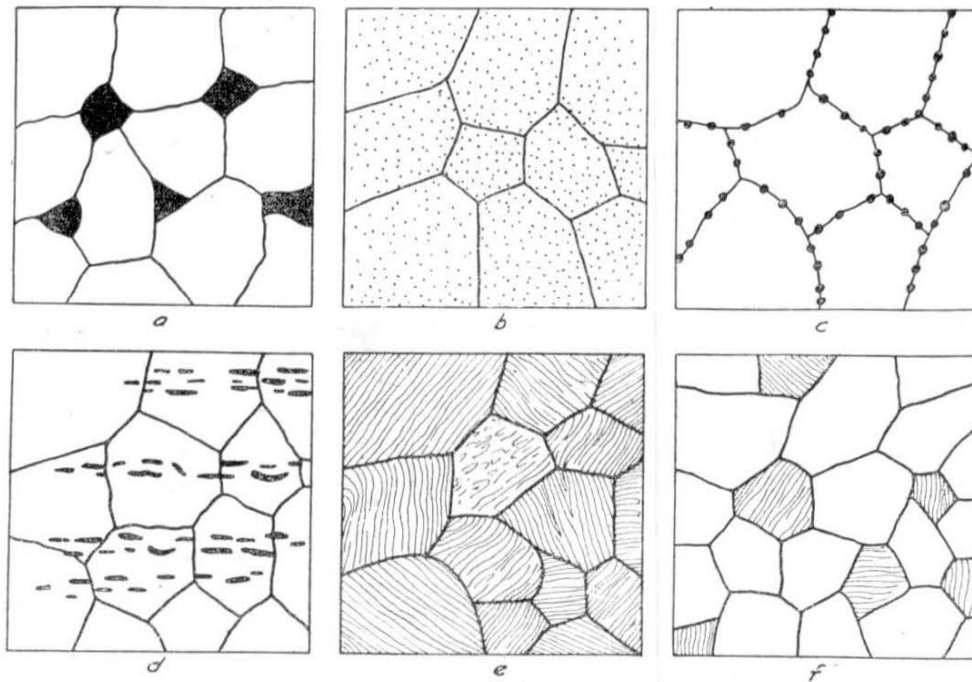


Fig. 2 — Texturas representativas de metais contendo duas fases: a) heterogêneo básico; b) segunda fase embebida em matriz da primeira; c) segunda fase nos contornos dos grãos da primeira; d) segunda fase em cordões; e) mistura fina de ambas as fases em colônias (eutético, eutectoide); f) grãos de uma fase e colônias de ambas as fases. (Sachs (1), ob. cit., pg. 17).

As observações acima e as texturas delas decorrentes se aplicam tanto a ligas binárias como às terciárias, quaternárias, etc., e os aspectos típicos descritos na fig. 2 são comuns nas micrografias obtidas na prática diária dos laboratórios metalográficos.

### c) DUCTILIDADE E RESISTÊNCIA À DEFORMAÇÃO

No estudo da conformação dos metais duas propriedades são fundamentais: a ductilidade e a resistência à deformação: a primeira é indicativa da capacidade do metal sofrer deformação plástica ou permanente sem se romper e fixa, para cada metal ou liga, a maior ou menor facilidade com que ele pode ser deformado ou trabalhado. A segunda exprime o esforço com que o metal pode ser deformado. Da combinação dessas duas propriedades resulta a escolha do equipamento adequado para esse metal ser trabalhado.

Essas propriedades, como se verá adiante, variam, para um dado metal ou liga, de acordo com as condições em que se processa o trabalho de conformação.

d) CONFORMAÇÃO OU TRABALHO A FRIO OU A QUENTE

Comercialmente ou popularmente, o conceito de trabalho a frio está ligado ao conceito de trabalho à temperatura ambiente. Esse conceito, embora seja verdadeiro na maioria dos metais é, no entanto, tècnicamente errado. O termo aplica-se ao trabalho, ou conformação, realizados a temperaturas em que o metal ou liga endureça progressivamente com o aumento da intensidade de deformação e retenha essa dureza quando cessa êsse trabalho. Em outras palavras: o trabalho a frio produz encruamento.

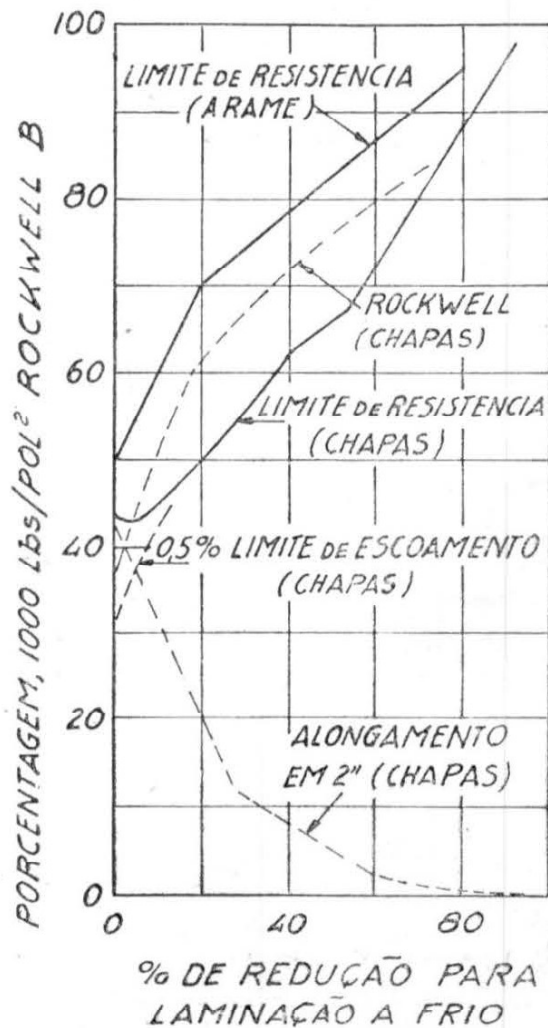


Fig. 3 - Efeito do trabalho a frio nas propriedades do aço doce. (Metals Handbook, ASM, pg. 437).

A figura 3 ilustra êsse conceito.

Das considerações anteriores conclue-se o conceito de trabalho a quente. É o trabalho realizado a temperaturas nas quais, para o metal ou liga em questão, qualquer que seja a intensidade dêsse trabalho, o metal não endurece ou o faz de modo muito limitado, não retendo a dureza cessada a deformação.

Êsses dois últimos conceitos fundamentais podem ser definidos do modo mais preciso cientificamente da seguinte maneira: todo o metal ou liga, conforme a temperatura e a intensidade das deformações a que foi sujeito, sofre o fenômeno chamado de recristalização e que consiste na formação de novos cristais não deformados. A formação dêsses cristais é acompanhada de alívio das tensões e não aumento de dureza.

A temperatura de recristalização é aquela em que se inicia a recristalização do metal ou liga e é uma função, para um dado metal

ou liga, da intensidade de trabalho sofrido previamente pelo material e do tempo. Dentro dêsse conceito o trabalho a frio é o trabalho realizado abaixo da temperatura de recristalização e trabalho a quente o realizado acima daquela temperatura.

Embora estas últimas definições sejam mais precisas, as definições iniciais não são menos verdadeiras e igualmente devem ser aceitas.

### e) PROPRIEDADES DIRECIONAIS

O metal trabalhado tem sua estrutura orientada pelo processo de deformação. O metal se orienta em «fibras» no sentido da deformação e a maioria das propriedades difere quando medidas paralelas ou normalmente à direção da deformação. A resistência à tração e o escoamento não apresentam grande variação, o mesmo não acontecendo com as propriedades ducteis. A resiliência varia apreciavelmente ao passo que a resistência à fadiga não apresenta diferença. As propriedades que variam numa mesma peça quando medidas num ou noutro sentido, em relação às fibras resultantes da direção de deformação, são denominadas direcionais.

### f) MATRIÇAGEM (FORJAMENTO EM MATRIZ)

O forjamento em matriz ou matriçagem consiste na conformação do metal ou liga, a quente, entre matrizes, habitualmente por impactos sucessivos ou então por compressão contínua. Não sendo aconselhável o forjamento de peças complicadas numa operação única, o material inicial, ou geratriz, geralmente um laminado de seção quadrada, redonda ou retangular, é submetido a várias operações que mudam sua forma progressivamente até que se obtenha a forma final. Essas formas são entalhadas na matriz, podendo ser incluídas tôdas numa matriz única, em duas ou mais.

A figura 4 mostra uma matriz de garfo de junta universal, com a série de operações a partir da geratriz. A matriz de rebarbar não é mostrada no caso.

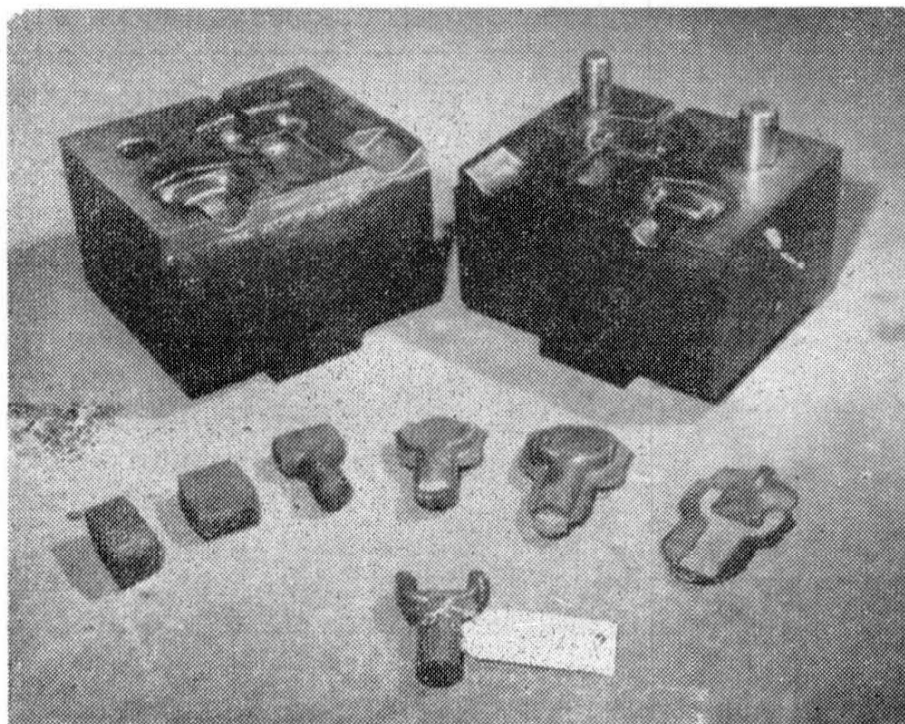


Fig. 4 — Matriz e seqüência de operações de um garfo de junta universal. (Gentileza da COBRASMA).



## II — FATORES DE INFLUÊNCIA NO PROCESSO DE CONFORMAÇÃO PLÁSTICA DE METAIS

### a) INFLUÊNCIA DA TEMPERATURA DE CONFORMAÇÃO

#### 1. Influência da temperatura na resistência à deformação

Essa influência é a mais simples: a resistência à deformação geralmente decresce com a elevação da temperatura, tornando-se mínima ao ser atingido o ponto de fusão. A forma da curva, mantidos constantes outros fatores, é característica de cada metal.

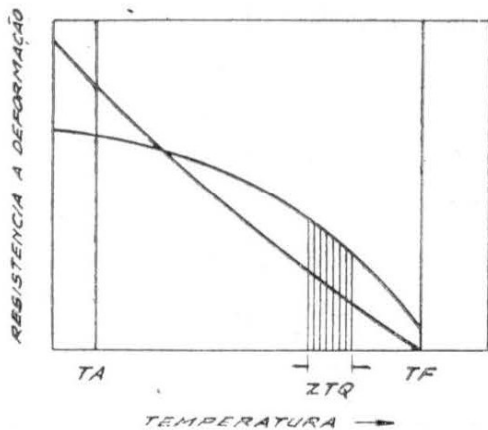
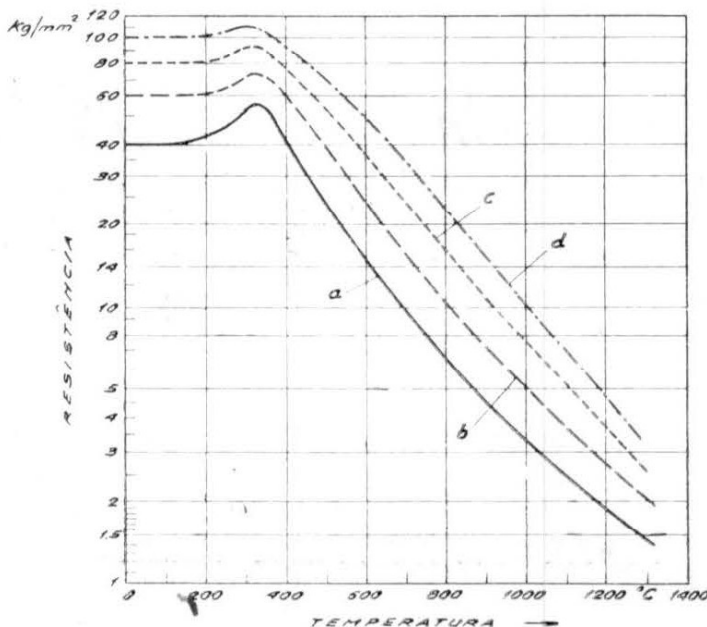


Fig. 5 - Influência da temperatura na resistência à deformação. (Sachs, (1) ob. cit., pg. 6).

Nela se observa a variação da resistência a quente em função da temperatura para aços de 40, 60, 80 e 100 kg/mm<sup>2</sup> de resistência à tração à temperatura inicial de ensaio. O quadro evidencia ainda a elevação da resistência acima da temperatura ambiente,



atingindo o valor máximo entre 200 e 300°C para depois cair continuamente com a elevação da temperatura. Essa anomalia resulta de um processo de endurecimento por precipitação, modificação estrutural que ocasiona a fragilidade ao

Fig. 6 - Variação da resistência à deformação com a temperatura, para diversos aços. Resistência à temperatura: a 40 b 60, c 80 e d 100 kg/mm<sup>2</sup>. (J. Billigmann (14), pg. 105).

Qualitativamente, se denominarmos:

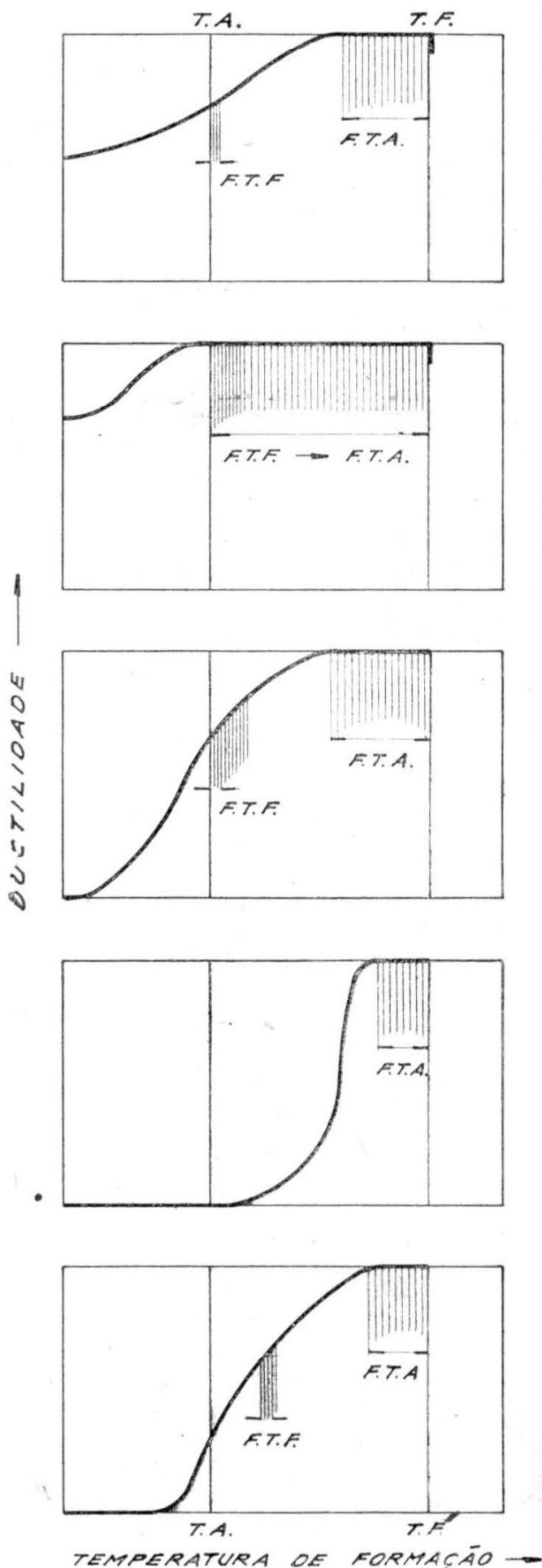
TA → Temperatura ambiente

ZTQ — Zona de trabalho a quente quente

TF — Temperatura de fusão

a curva representativa do fenômeno seria a do tipo apresentado na fig. 5, para dois metais de mesmo ponto de fusão em idênticas condições de deformação.

A figura 6 ilustra esse comportamento para o caso dos aços.



azul nos aços. Não se pretende aqui entrar em considerações sobre esse fenômeno, bastante complexo, uma vez que o objetivo em vista é o forjamento de aços a quente, isto é, a temperatura bem acima das de ocorrência do fenômeno descrito.

## 2. Influência da temperatura na ductilidade

De acôrdo com Sachs (1), no que se refere à ductilidade, deve-se considerar as seguintes faixas de temperatura no trabalho de metais ou ligas:

- (a) faixa de trabalho a quente
- (b) faixa de trabalho a frio
- (c) faixa de fragilidade a frio

A ductilidade de um metal a uma dada temperatura, de um lado, e as condições de obtenção dessa temperatura, de outro lado, determinam as faixas a serem utilizadas no trabalho.

Sachs classifica os metais (fig. 7) em cinco grupos básicos, de acôrdo com seu comportamento relativo à temperatura-ductilidade. No grupo (a) existem dois intervalos distintos, um para trabalho a quente (ductilidade ilimitada) e outro para trabalho a frio (ductilidade limitada). Estão nesse caso a maioria dos aços e outros metais, tais como o Zn. Em (b) estão os metais ducteis, mes-

Fig. 7 - Relações básicas entre ductilidade e temperatura para diferentes metais. (Sachs (1), ob. cit., pg. 4).  
 TA — Temperatura ambiente  
 TF — Temperatura de fusão  
 FTF — Faixa de trabalho a frio  
 FTQ — Faixa de trabalho a quente.

mo à temperatura ambiente, podendo conformar-se à temperaturas mesmo abaixo de zero — é o caso de metais ou ligas de alumínio, cobre, níquel, prata e aços inoxidáveis do tipo austenítico. No grupo (c) os metais tornam-se frágeis a temperaturas baixas e só podem ser conformados em intervalos bem limitados de temperatura: é o caso do magnésio e suas ligas. Finalmente, nos dois últimos casos (d) e (e) o metal só pode ser trabalhado a quente a altas temperaturas ou a quente e a frio também a temperaturas elevadas. São êsses os metais de alto ponto de fusão.

## b) INFLUÊNCIA DA COMPOSIÇÃO QUÍMICA

G. P. Contractor e W. A. Morgan (3), ambos da Physical Metallurgy Division do Department of Mines and Technical Surveys, Ottawa, Canadá, publicaram um sumário bastante completo de tôda a literatura existente sôbre forjabilidade dos aços.

As conclusões dêsse sumário, no que interessa ao assunto em estudo podem ser assim resumidas:

De todos os tipos de ensaio característicos da forjabilidade de um dado material o que melhor representa os valores da prática é o ensaio de torção a quente.

O método consiste na torção de corpos de prova a uma série de temperaturas controladas; a temperatura à qual o material resiste ao maior número de torções antes da ruptura é a temperatura mais favorável para o trabalho a quente.

A figura 8 mostra o diagrama do aparelho descrito por Ihrig (4).

O aparelhamento consiste essencialmente de um forno para aquecimento e manutenção do corpo de prova a uma dada tempe-

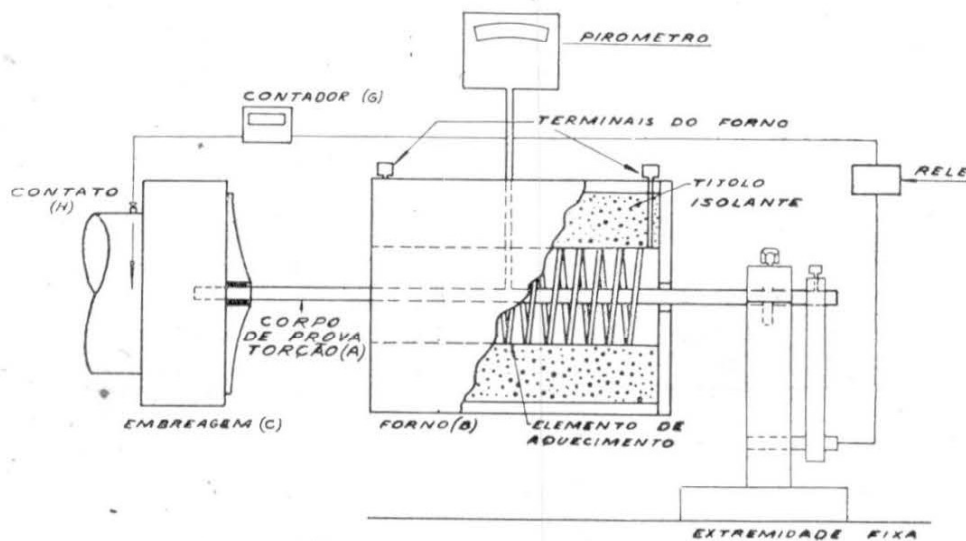


Fig. 8 - Aparelhamento para o ensaio de torção a quente utilizado por Ihrig (4) para determinação da forjabilidade (combinação simultânea de ductibilidade e resistência à deformação).

ratura e de um motor de velocidade variável para torção do corpo de prova a uma velocidade desejada. Um contador, que automaticamente dá partida e para no início e no fim do ensaio, registra o número de revoluções necessárias para a ruptura. A determinação do esforço em cada ensaio sendo obtido com auxílio de um dinamômetro.

O corpo de prova utilizado por Clark e Ihrig foi uma barra redonda de cerca de 14 mm (9/16") por 600 mm (22" a 24" de comprimento).

As figuras 9 e 10 são exemplos de duas curvas representativas desses ensaios, onde são mostradas as influências do C e do Mn na forjabilidade (função da ductilidade).

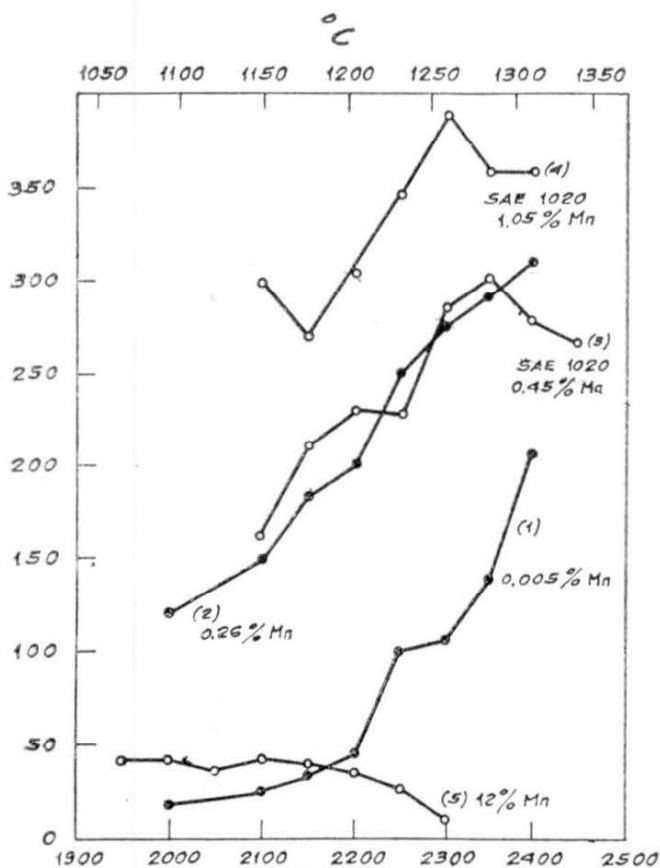
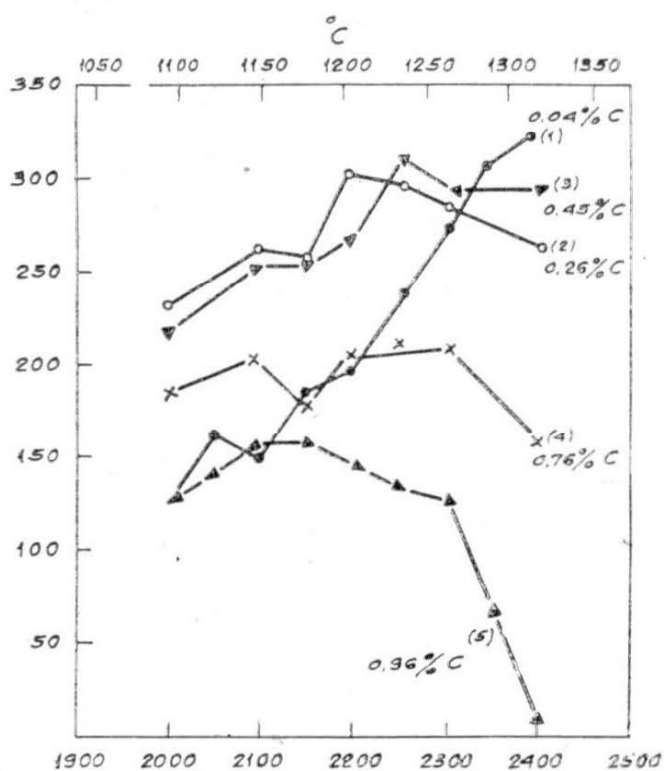


Fig. 9 - Efeito do teor de C na trabalhabilidade a quente nos aços carbonos. Em ordenadas o n.º de giros para ruptura. (H. K. Ihrig).

Composição %

	(1)	(2)	(3)	(4)	(5)
C	0.04	0.26	0.45	0.76	0.96
Mn	0.26	0.49	0.84	0.84	0.34
Si	0.003	0.19	0.08	0.20	0.31
S	0.024	0.030	0.042	0.035	0.045
P	0.024	0.014	0.026	0.016	0.019

Fig. 10 - Efeito do teor de manganês na trabalhabilidade a quente dos aços de baixo carbono. Em ordenadas o n.º de giros para ruptura. (H. K. Ihrig).

Composição %

	(1)	(2)	(3)	(4)	(5)
C	0.02	0.04	0.22	0.26	0.64
Mn	0.005	0.26	0.45	1.05	12.88
Si	0.02	0.003	0.08	0.23	0.88
S	0.026	0.024	0.021	0.028	0.032
P	0.009	0.004	0.014	0.021	0.017



Os autores acentuam que, muito embora já tenham sido publicados vários trabalhos interessantes sobre o efeito dos elementos de liga na trabalhabilidade dos aços a quente, o campo para estudos ainda está aberto. Quanto aos elementos mais comuns, as influências podem ser resumidas da forma seguinte:

1. As adições visando grande melhoria de usinagem (free machining), tais como enxofre e chumbo abaixam tanto a temperatura de torção máxima como o número de torções a essa temperatura. Em outras palavras, esses elementos diminuem a trabalhabilidade a quente dos aços. Isso é claro uma vez que constituintes tais como sulfureto de ferro ou Pb possuem um ponto de fusão relativamente baixo, a temperatura de trabalho não podendo exceder o ponto de fusão desses constituintes.
2. O níquel e o manganês em geral melhoram a trabalhabilidade a quente dos aços carbono.
3. Os elementos formadores de ferrita, tais como o silício e o molibdênio, prejudicam a trabalhabilidade dos aços de baixo carbono, se esses elementos estão presentes em excesso de 0,20%.
4. O cromo produz efeito prejudicial até cerca de 9% nos aços de baixo carbono.

Embora os resultados apresentados possam ser considerados qualitativamente como definitivos, o ensaio de torção a quente ainda não ultrapassou a fase de laboratório, conforme acentuam Contractor e Morgan. A razão dessa restrição está em que, muito embora os resultados obtidos com o material de uma mesma corrida sejam reproduzíveis, isso não acontece quando se compara corridas diferentes de aços do mesmo tipo. As curvas obtidas variam de forma.

As variações nos resultados podem, porém, ser diminuídas por um controle apurado da (a) velocidade de aquecimento e do tempo de permanência à temperatura do forjamento e (b) de velocidade de deformação, o que faz com que o ensaio seja considerado de grande utilidade na determinação de forjabilidade a quente dos aços.

#### c) INFLUÊNCIA DA VELOCIDADE DE TRANSFORMAÇÃO

Sachs (6) constata efeito bem pronunciado, embora relativamente simples, da velocidade na faixa de temperatura de trabalho a quente. Quanto mais alta a velocidade maior a resistência, enquanto que a ductilidade é geralmente ilimitada (fig. 11).

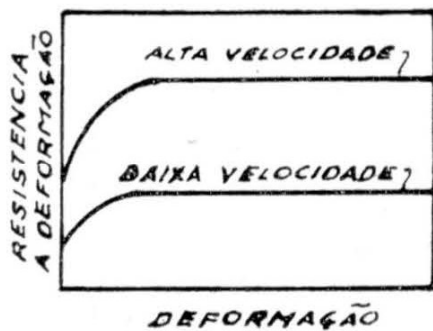


Fig. 11 - Influência da velocidade no trabalho a quente (Sachs, ob. cit., página 11).

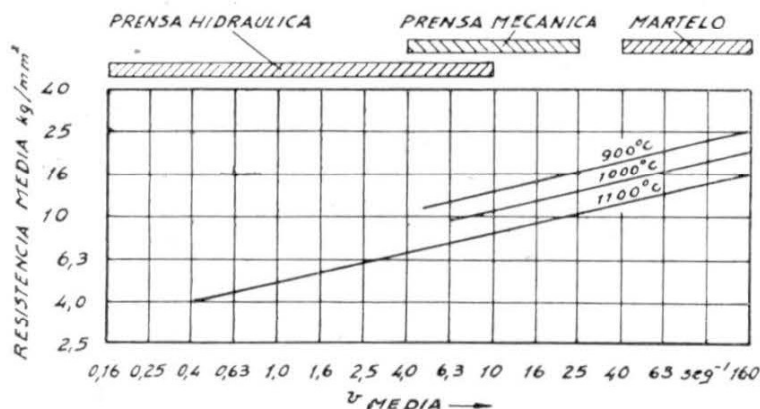


Fig. 12 - Relação entre a resistência média ao recalçamento e a velocidade de deformação. Aço 0,15% C. Kurt Lange (7).

Quando a velocidade de deformação é dobrada, o esforço é acrescido de 10 a 20%. Sachs preconiza um ensaio a baixa velocidade, como base para se prever o comportamento no processo a temperaturas de trabalho.

A fim de que se tenha idéia dos valores numéricos, no caso dos aços, é aqui apresentada a fig. 12 (7) onde aparecem os valores de resistência ao recalçamento

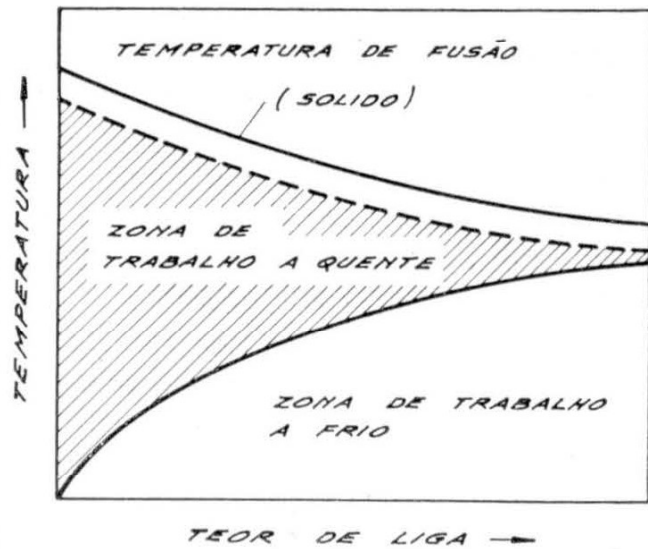
para velocidades crescentes de deformação para três temperaturas. No caso trata-se de um aço carbono (DIN St. 60.11, C 0,15%). A figura é tanto mais ilustrativa quanto indica o equipamento correspondente a cada velocidade.

#### d) INFLUÊNCIA DA TEXTURA

Não será aqui discutida a influência da textura no trabalho a frio, muito embora as leis que governam as relações entre textura e trabalho a frio sejam relativamente bem estabelecidas.

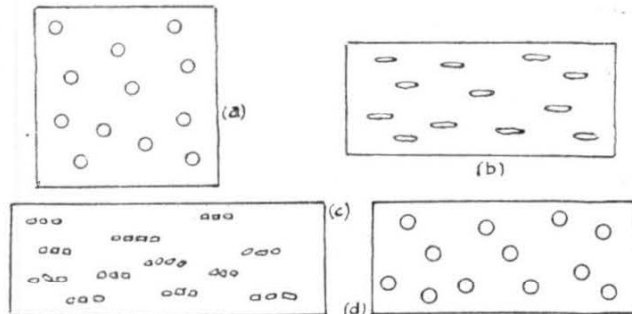
No caso de trabalho a quente, os metais puros e as soluções sólidas são trabalhadas a temperaturas nas quais possuem ductilidade ilimitada, sendo que nesse caso assume importância primordial a escolha de temperatura para condições ótimas, no que se refere à resistência à deformação. A figura 13 mostra claramente, para as soluções sólidas, a característica mais importante dos elementos de liga, isto é, o fato dos mesmos abaixarem o limite inferior de trabalho a quente e conseqüentemente restringirem a faixa de temperaturas para êsse mesmo trabalho. A restrição de faixa faz-se em conseqüência do abaixamento da temperatura de fusão com o aumento do teor em liga.

Fig. 13 - Influência das soluções sólidas na zona de trabalho a quente. (Sachs, ob. cit. (1), pg. 24).



No caso de ligas heterogêneas, exceto nos casos discutidos no capítulo anterior, relativo aos constituintes de baixo ponto de fusão, os segundos constituintes são habitualmente duros e frágeis (\*). Sendo os constituintes de dureza diferente evidentemente deformam-se diferentemente depois do trabalho a quente. Os exemplos da fig. 14, novamente retirado de Sachs, ilustram a exposição. É essa a razão das estruturas fibrosas nos materiais trabalhados, resultando ainda que a ductilidade de uma liga heterogênea é função também da quantidade e distribuição dos constituintes heterogêneos.

Fig. 14 - Mudanças de aspecto nas inclusões após deformação: (a) antes da deformação; (b) inclusões moles e ducteis depois de deformadas; (c) inclusões frágeis após deformação; (d) inclusões resistentes após deformação. (Sachs, ob. cit (1), página 23).



c) INFLUÊNCIA DA MATÉRIA PRIMA — QUALIDADE PARA FORJAMENTO

Uma característica dos aços para forjamento é a dificuldade de terem uma definição precisa, a não ser que se diga, em termos gerais, que ao serem forjados em barras ou tarugos êsses não devem ter defeitos que resultem na rejeição das peças forjadas a partir dos mesmos.

Por mais geral que se julgue essa definição é a única compatível com o fato dos tipos de defeitos toleráveis serem função da peça que se pretende obter, ou antes, da natureza da operação do forjamento. É evidente que uma operação que resulte em achatamento no sentido paralelo à direção da laminação, como no caso de um bruto para engrenagem, exige maior eliminação de defei-

(\*) Exceção são os latões com mais de 35% de Zn, onde a fase  $\beta$  é mais mole que a matriz.

tos superficiais na geratriz de que no forjamento de peças com a geratriz em posição horizontal com o esforço normal ao sentido de laminação. Análogamente, em peças cuja conformação exige dobramento, deve a matéria prima estar preparada para maior solicitação na superfície do que para peças sem aquela exigência. Há portanto uma série de fatores, em cada caso, que dilatam ou restringem as características da matéria prima em função do processo de fabricação de peça.

Não sendo economicamente possível fundir lingotes sem defeitos superficiais, é muitas vezes necessário o seu condicionamento antes da laminação, isto é, a remoção ao máximo daqueles defeitos.

Nos aços doces essa remoção pode ser feita a frio, pela escarfigem do lingote pela chama oxi-acetilênica, ao passo que nos aços liga ou carbono essa remoção, a frio, pode ser feita por plainamento ou torneamento da superfície. Esses métodos, embora os mais seguros, nem sempre se justificam economicamente.

O processo mais econômico é o de escarfigem a quente, que pode ser feita também por oxi-acetileno, num intervalo de operação de laminação. Das barras, ainda quentes, tiram-se corpos de prova que são experimentados em martelo manual, para verificação de sua forjabilidade. Os testes são mais ou menos severos em função do ulterior processo a que serão submetidas como matéria prima.

Em casos de ainda maior responsabilidade, as barras são decapadas para remoção de carepa e aparecimento de defeitos. Esses defeitos são então removidos a talhadeira ou esmeril.

Não só os defeitos superficiais são importantes no aço para forjamento. Eliminação de vazios de retração e redução de segregação ao mínimo são também de grande importância. Em lingotes pequenos, sempre que economicamente possível, prefere-se o vazamento pelo fundo, o aço sendo alimentado por um alimentador central distribuído pelos diversos lingotes.

Na obtenção dos melhores resultados influe bastante o desenho da lingoteira, utilização de cabeça quente, inclinação, secção e relação altura/largura. Muito embora a segregação seja maior nas grandes lingoteiras, suas vantagens econômicas recomendam seu uso.

Em resumo, as condições do fornecimento da matéria prima para forjamento são função do processo e severidade do trabalho posterior, variando assim em cada caso. Suas características principais são:

ausência de vazios de retração .

bom acabamento superficial

redução de segregação (homogeneidade do material).

f) INFLUÊNCIA DA DIREÇÃO DO TRABALHO — FIBRAMENTO

A história da peça forjada começa no lingote e, até que esta peça seja obtida, o lingote inicial sofre uma série grande de transformações. Entretanto a dureza e a resistência à tração da peça forjada ou trabalhada praticamente em nada diferem dessas mesmas propriedades quando obtidas do lingote inicial esfriado lentamente: a diferença aparece na ductilidade. A ductilidade não só difere da do lingote inicial como, numa mesma peça trabalhada, varia conforme o sentido em que foi exercida a deformação. Essa última propriedade é chamada de «fibramento» do material. É Sachs (8), novamente, quem sintetiza melhor o fenômeno. (Figuras 15 e 16).

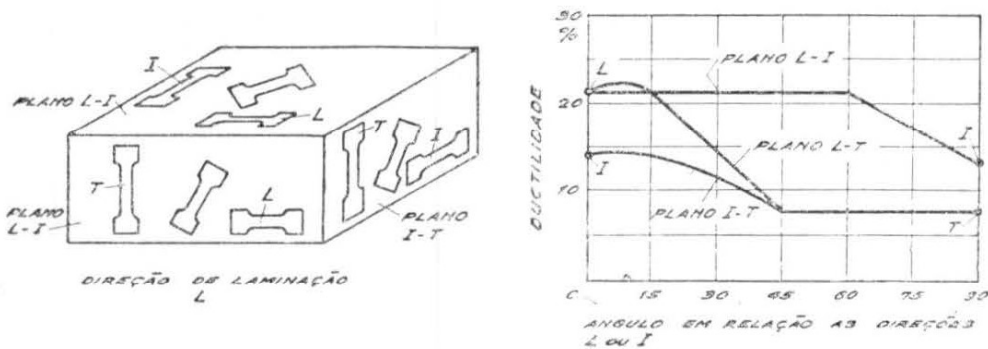


Fig. 15 - Variação da ductilidade em diferentes direções (fibramento) em uma chapa de liga de alumínio. (Sachs, (1), ob cit., pg. 51).

As figuras 15 e 16 mostram que as diferenças em ductilidade variam grandemente quando o corpo de prova é tirado numa ou noutra direção, sendo máximas as propriedades ducteis quando medidas na direção de deformação. Essas diferenças são maiores no metal trabalhado a frio que no metal trabalhado a quente e tanto maiores quanto maior fôr o teor de impurezas no metal.

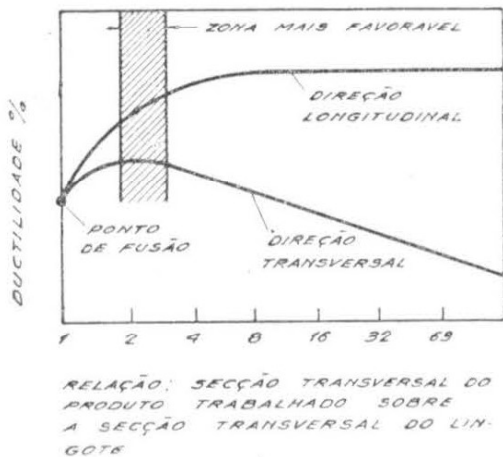


Fig. 16 - Influência da redução sucessiva da seção sobre a ductilidade, nos sentidos transversal e longitudinal. (Sachs, ob. cit., pg. 52).

A figura 16 mostra que a redução que apresenta a melhor combinação de propriedade ducteis tanto no sentido transversal como o longitudinal está entre 2 e 4 vezes. Nesse intervalo a ductilidade transversal atinge o máximo.





### III — EQUIPAMENTO PARA FORJAMENTO

As ferramentas de forjamento são: instalações de aquecimento, máquinas operatrizes, aparelhos de medição e facilidades de transporte.

Trataremos inicialmente das máquinas de deformação, cuja tarefa é produzir as forças necessárias à deformação transferindo-as para a peça a ser forjada e ao mesmo tempo manter em reserva a capacidade necessária de serviço.

O equipamento mais comum é o seguinte:

#### a) MARTELOS DE QUEDA

Um martelo de queda para forjamento em matriz, retirado o mecanismo de elevação, consta essencialmente dos elementos da figura 18. São êles:

- a — colunas, com guias, onde corre a massa (porta matriz);
- b — meio de ligação da massa ao mecanismo de elevação;
- c — matriz superior, ligada à massa;
- d — matriz inferior ligada ao sub-bloco;
- e — sub-loco, intermediário entre a matriz e a chabota;
- f — chabota ou base, sôbre a qual se assentam as colunas e os sub-blocos;
- g — bloco de fundação sôbre o qual se assenta todo o conjunto.

De acôrdo com o sistema utilizado para elevação da massa ou porta matriz o martelo de queda pode ser:

- 1 — de queda livre;
- 2 — de queda acelerada.

No caso do martelo de queda livre a capacidade do golpe é medida pelo produto do pêso da massa cadente (matriz + massa + meio de suspensão)  $P$  pela altura de queda  $h$ .

$$\text{Energia do golpe} = P \times h.$$

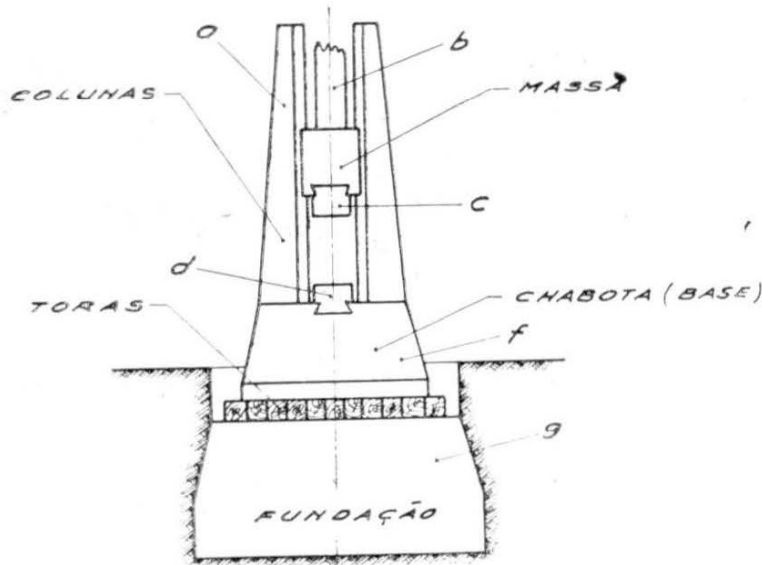


Fig. 18 - Esquema de um martelo de queda, excluindo o cabeçote onde se localiza o mecanismo de elevação do porta-matriz.

FIG. 19

No caso em que a massa cadente é ainda acelerada por um processo de pressão superior, que permite que o golpe se dê a uma velocidade  $V$ , a energia do golpe  $E$  é igual a

$$E = \frac{PV^2}{2g}$$

A figura 19 mostra os diversos sistemas de elevações utilizados nos martelos de queda.

	a MARTELO DE QUEDA LIVRE COM CORREA		b MARTELO DE QUEDA LIVRE COM CORRENTE		c MARTELO DE QUEDA LIVRE COM TABOIA		d MARTELO DE QUEDA SIMPLES EFfeito DUPLO EFfeito	
	ENROLAMENTO	FRICÇÃO	ENROLAMENTO	FRICÇÃO	MEIO DE AÇÃO	MEIO DE AÇÃO	MEIO DE AÇÃO	MEIO DE AÇÃO
TIPOS DE SUSPENSÃO DA MALHA OU PORTA-MATRIZ								
1 ENERGIA DE QUEDA: $E(mts)$	$P_h$	$P_h$	$P_h$	$P_h$	$P_h$	$P_h$	$P_h$	$P \frac{V^2}{2g}$
2 TRANSMISSOR	COURA	FITA	DISCO DE FRICÇÃO	TABOIA	VÁLVULA			
3 MEIO DE ACIONAMENTO	CORREA		CORRENTE		TABOIA		HASTE E PISTÃO	
4 AGENTE DE PRESSÃO	—		—		—		HASTE E PISTÃO	
5 ACUMULADOR	VOLANTE				CILINDRO E PRESSÃO			

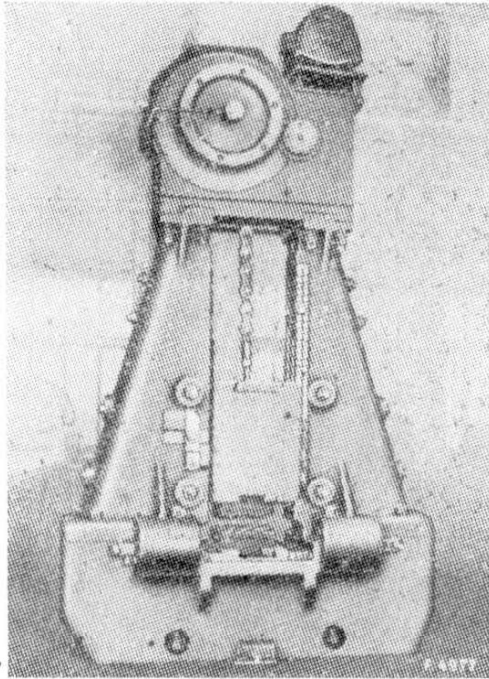
Fig. 19 - Tipos de acionamento dos martelos de queda (Kurt Lange, (7), pg. 133).



1 — Martelos de queda livre

Os dois primeiros sistemas de elevação *a* e *b* são utilizados em martelos de pequena capacidade.

O terceiro permite a construção de martelos com uma energia de golpe até cerca de 10.000 quilogrâmetros, com peso da massa cadente até quasi 8 toneladas, permitindo 45 golpes por minuto em curso máximo (fig. 20). A corrente é ligada ao martelo por



meio de amortecedores de borracha, que limitam, juntamente com a embreagem, a tensão sobre a mesma.

O quarto sistema de suspensão e sustentação, indicado na figura 19, é feito por meio de táboas fixadas por cunhas ao portamatriz e que são presas, por atrito, a dois rolos que giram em sentido contrário constituindo o mecanismo de elevação ilustrado na figura 21.

Fig. 20 - Martelo de queda com suspensão por corrente (Eumuco).

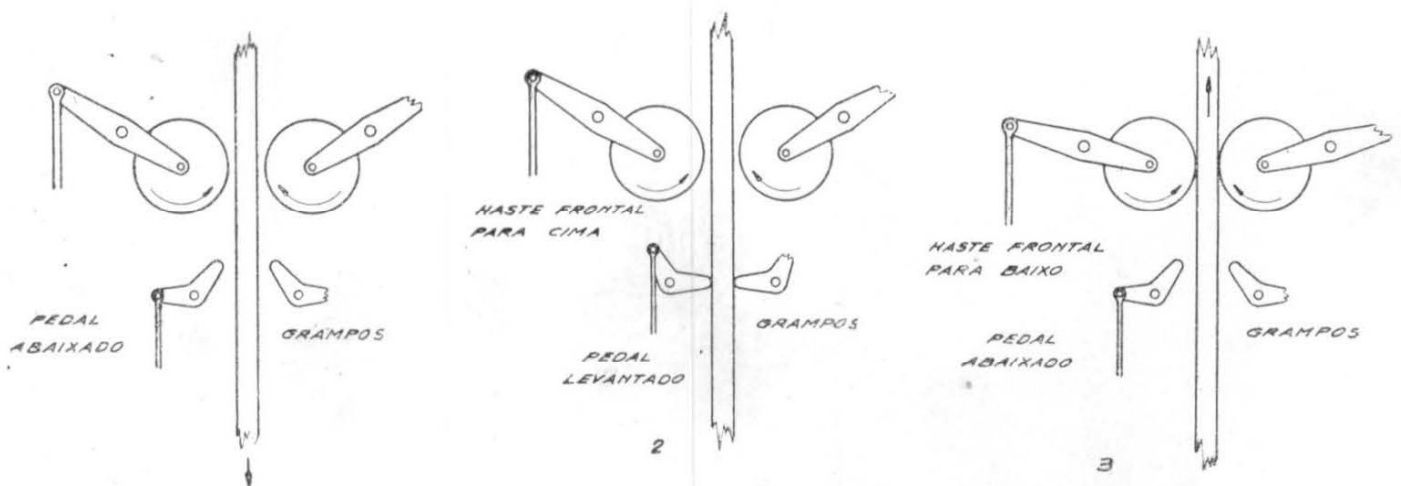


Fig. 21 - Diagrama esquemático das operações de levantamento dos rolos nos martelos de queda com taboa (Chambersburg Engineering Company). 1) queda da massa; 2) massa na altura de queda. 3) levantamento da massa.

• Atingida a parte superior, o afastamento dos rolos produz a queda de toda a massa. A figura 22 mostra um martelo desse tipo.

No quinto e último sistema de queda livre, o processo de elevação consiste na utilização de vapor ou ar comprimido para acionamento de um êmbolo ligado pela haste ao porta matriz. No caso, sendo o martelo de queda livre, depois que o êmbolo atinge a posição no cilindro, abre-se a válvula de escape e o conjunto cai por gravidade. Martelos desse tipo são os da figura 23.

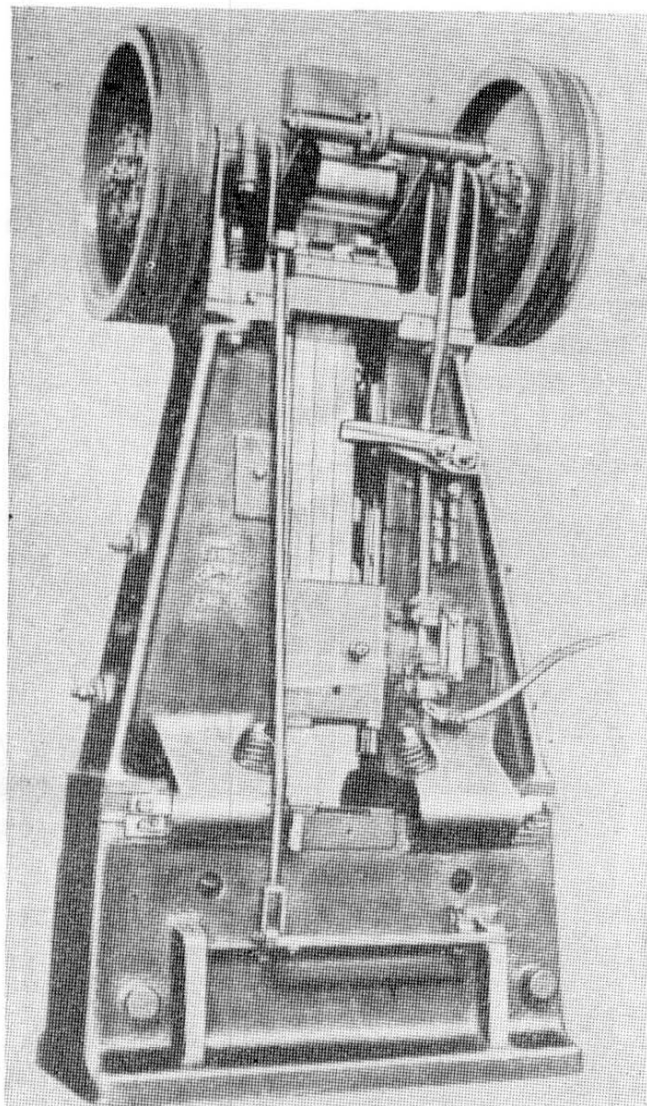


Fig. 22 - Martelo de queda com tábua. (Erie Foundry Co.).

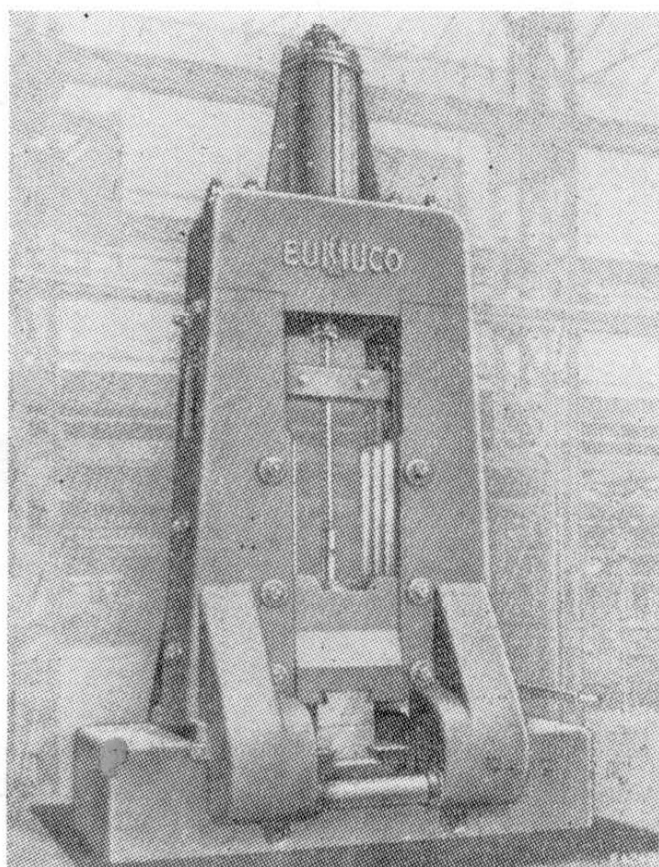


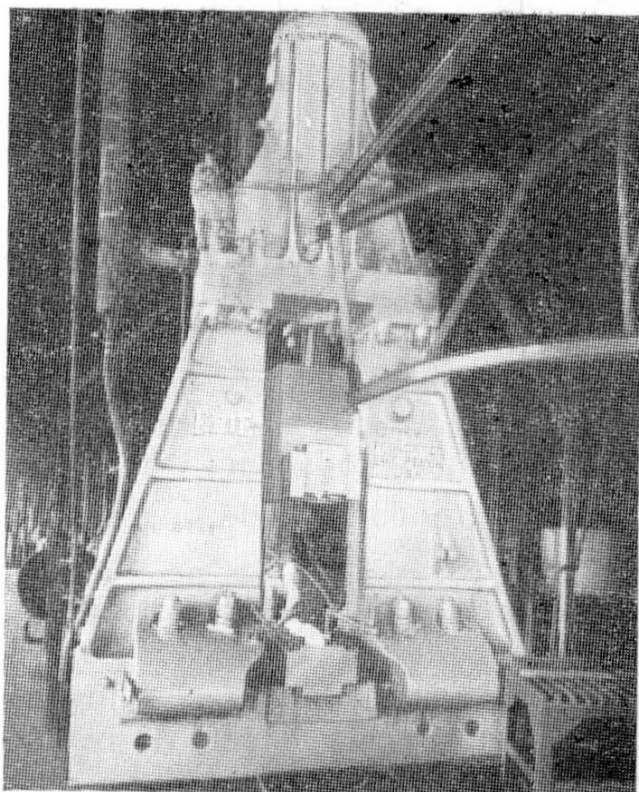
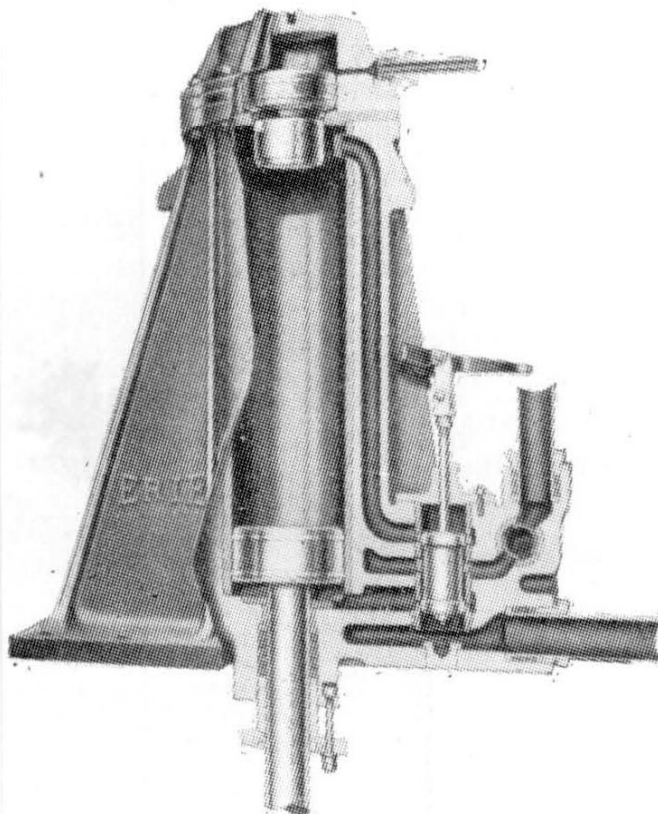
Fig. 23 - Martelo a vapor de ar comprimido de simples efeito. (Eumuco).

## 2 — Martelos de queda acelerada

O processo de acionamento, êmbolo-cilíndrico, pode ser acrescido de admissão do ar ou vapor por cima. Nêsse caso (figura 24) a pressão é utilizada igualmente para acelerar a queda.

A energia disponível, no golpe de maior intensidade, será nêsse caso evidentemente igual à soma das energias devidas à queda livre da massa cadente e à ação do vapor ou ar comprimido durante tôda a duração dessa queda. A velocidade, tôdas as outras condições permanecendo iguais, poderá atingir de 3 a 6 vêzes o valor da velocidade atingida sômente pela queda livre.

Fig. 24 - Seção do cilindro e válvulas num martelo de duplo efeito. (Erie Foundry Co.).



Nos Estados Unidos é costume identificar os martelos de queda pelo pêso da massa cadente. Êsse dado não serve para efeito comparativo com martelos de fabricantes diversos; unicamente a energia do golpe define a capacidade do martelo e essa depende, nos martelos de duplo efeito, da pressão de trabalho e do contrôle da mesma, bem como das dimensões do cilindro. Todo o tipo de comparação deve levar isso em conta.

Fig. 25 - Martelo de duplo efeito. (Erie Foundry Co.).



### b) PRENSAS HIDRÁULICAS

Grande progresso tem sido feito nos últimos anos na constituição de prensas hidráulicas para forjamento, principalmente no que se refere ao acionamento hidráulico. R. M. L. Elkan e J. T. Lewis (9) resumem nas seguintes as razões das altas performances das prensas hidráulicas modernas:

- 1 — Uso de altas velocidades de penetração, bem como altas velocidades de avanço e retôrno.
- 2 — Utilização da prensa a cêrca de 85 a 90% de sua capacidade, juntamente com alta velocidade de trabalho (80/90 golpes por minuto).
- 3 — Projeto cuidadoso de válvulas e, pela atuação de servo motor, contrôle instantâneo da operação com pressão de dedo do operador.
- 4 — Utilização cada vez maior, de dispositivo automático de mudança das matrizes.

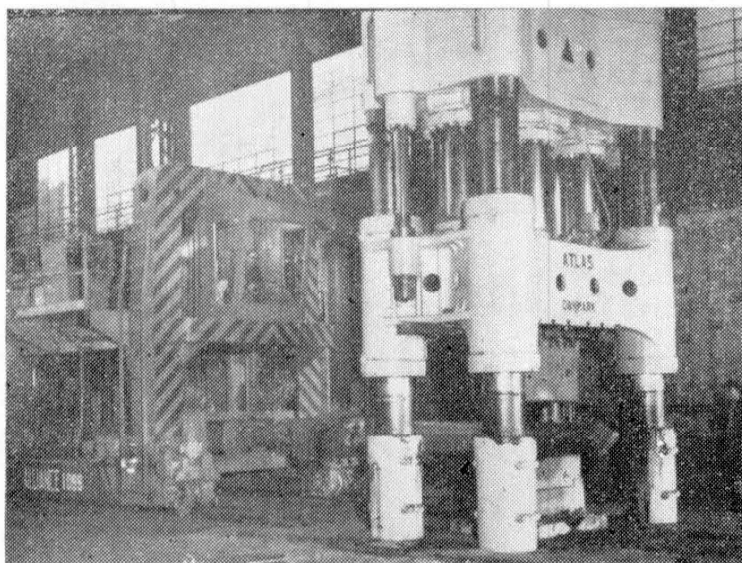


Fig. 26 - Prensa Hidráulica Atlas, dinamarquesa (gentileza de Aços Villares S. A.).

Êsse tipo de prensa é utilizado últimamente para desbaste de lingotes e forjamento de blocos. As vantagens intrinsicas da prensa são acrescidas, numa usina bem projetada por:

- 1 — Utilização ao máximo de manipuladores de lingotes (figura 27) onde aplicáveis.
- 2 — Emprêgo de pontes rolantes e monovias de grande eficiência. Deve-se dispor de pontes ou monovias em número suficiente de modo a que o transporte de lingotes ou forjados acabados não atrazem as operações de forjamento.

- 3 — Instalação de fornos com capacidade suficiente para utilização efetiva de capacidade total da prensa.
- 4 — Planificação cuidadosa da disposição do equipamento e fluxo do material.

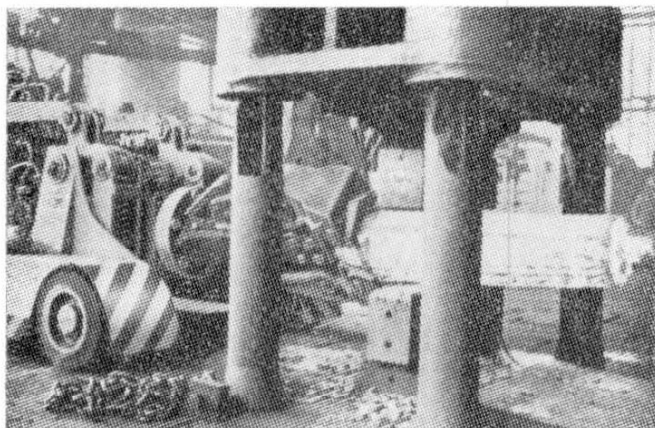


Fig. 27 - Manipulador de 15 toneladas metro, trabalhando em uma prensa de 5 toneladas. (Dango & Dienenthal K. G.).

A prensa da fig. 26 consiste de três cilindros de trabalho, com todos os eixos no mesmo plano vertical e recebendo água sob pressão de um sistema hidro-pneumático.

Variações na capacidade são obtidas conforme se atue o cilindro central, os dois laterais e os três em conjunto. Essas prensas são utilizadas principalmente no forjamento de lingotes pesados para eixos, blocos, etc.

### c) PRENSAS DE REBARBAR

O excesso de metal existente na peça após o forjamento e que acompanha o contôrnio da peça constitui a rebarba e sua eliminação da operação de rebarbação. A operação de rebarbação é geralmente feita em prensa mecânica do tipo do da figura 28, atuando sobre uma ferramenta de corte.

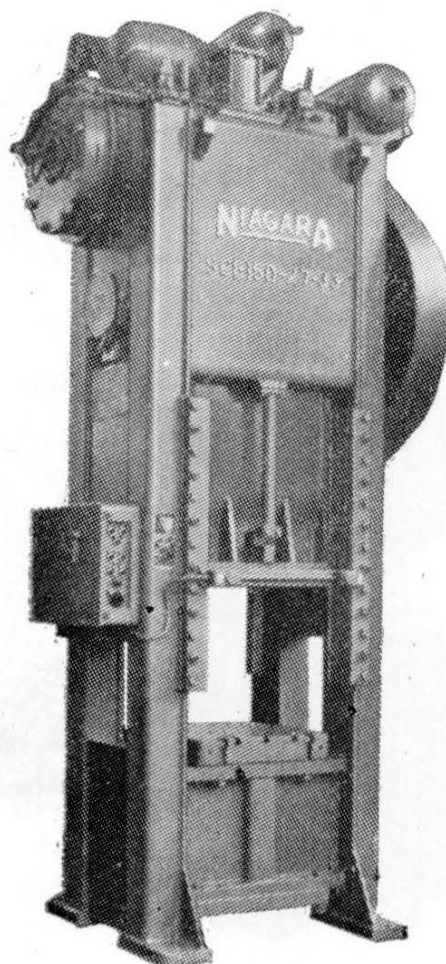


Fig. 28 - Prensa (Niagara Machine & Toolworks).

## d) PRENSAS MECÂNICAS DE FORJAR

## 1 — Horizontais (recalcadoras)

As prensas horizontais ou recalcadoras, tem função dupla, sendo construídas para prender o material da geratriz ao mesmo tempo que carregar impressões nas quais o metal quente é recalçado por um punção transportado pelo cabeçote frontal da máquina.

A recalcadora (fig. 29) consta então de um corpo maciço de aço contendo dois estampos, um fixo e outro móvel. A barra a ser forjada é colocada no estampo fixo e a máquina posta em operação, aproximando-se o estampo móvel que prende firmemente a geratriz contra o estampo fixo. Um cabeçote frontal, porta punção, avança e comprime a punção contra o material forçando-o a encher a cavidade do estampo. Em seguida o cabeçote e o estampo móvel voltam à posição primitiva e a geratriz, só parcialmente conformada, é transferida para a posição seguinte, se uma segunda operação é necessária. O processo continua, enquanto neces-

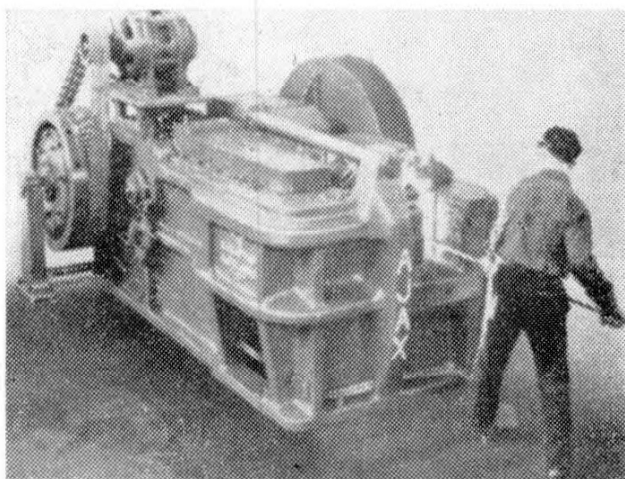
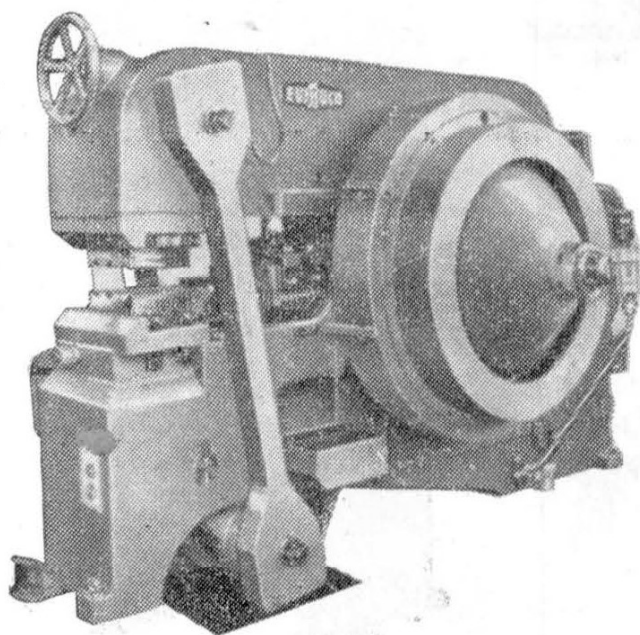


Fig. 29 - Recalcadora. (The Ajax Manufacturing Co.).



sário, sendo possível, nas máquinas maiores, até 4 operações sucessivas. Os estampos laterais, fixo e móvel, são chamados mordentes, a conformadora do cabeçote é chamada punção.

A recalcadora pode ser construída com mordentes horizontais (figura 30).

Fig. 30 - Recalcadora com mordente horizontal. (Eumuco).

## 2 — Prensas verticais

Nêsse caso a compressão é exercida verticalmente e não existem estampos laterais. A pressão máxima é exercida no fim do curso, obrigando o metal a preencher na matriz a cavidade correspondente à forma que se deseja obter.

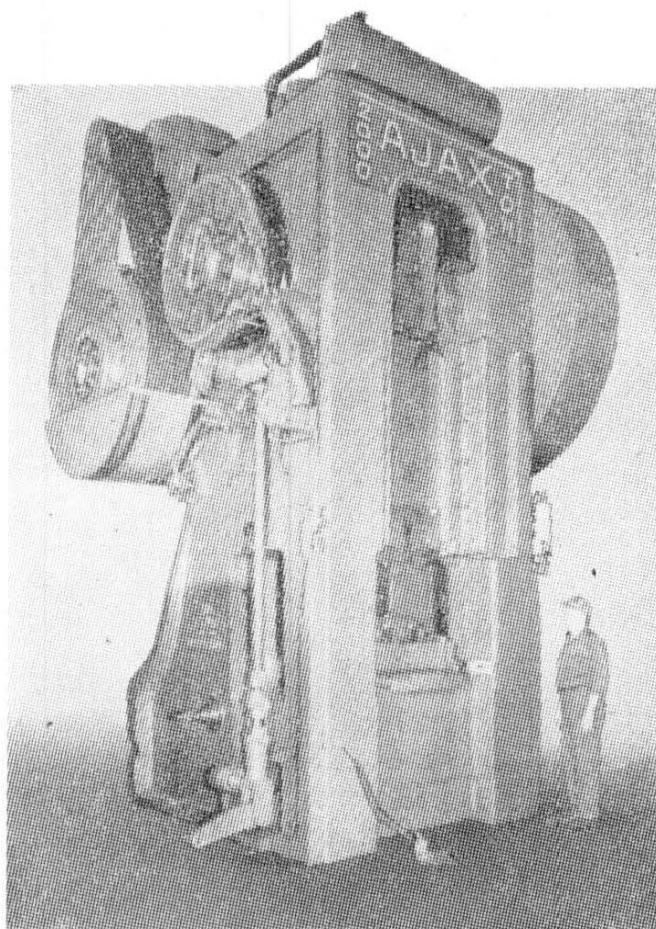


Fig. 31 - Prensa mecânica de forjar de 2.000 toneladas. (Ajax Manufacturing Co.).

### e) EQUIPAMENTOS AUXILIARES

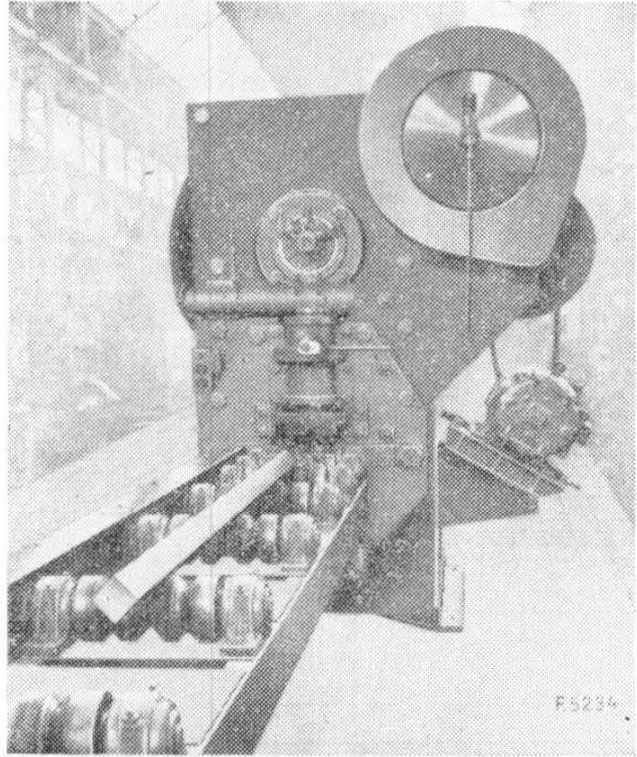
#### 1 — De corte

A matéria prima de forjamento, geralmente barras ou tarugos, deve ser cortada em medidas que permitam sua manipulação pelo ferreiro. Tesouras verticais (fig. 32) são geralmente utilizadas nas forjarias. Como norma geral as lâminas inferiores são fixas, movendo-se sôbre elas as lâminas superiores.

A capacidade dessas prensas, conforme o tipo de construção, permite cortes até mesmo em barras de ordem de 250 mm de diâmetro, a frio (1.600 toneladas em aço doce).

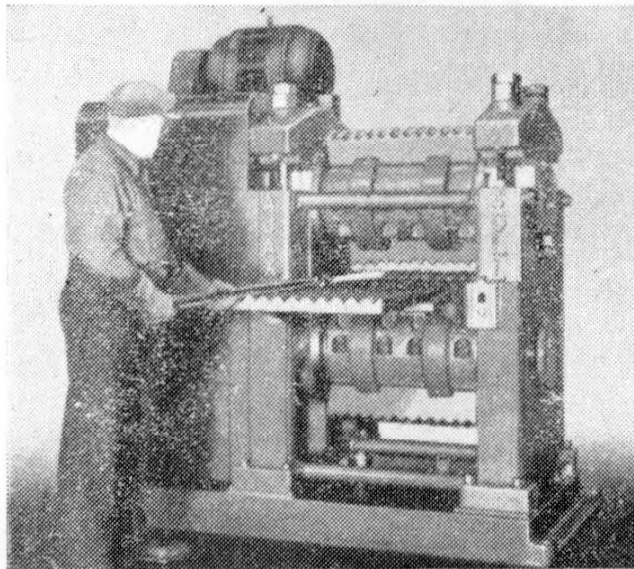


Fig. 32 - Tesoura com capacidade máxima de corte 700 toneladas. (Eumuco).



## 2 — Rolos de forjar

Os rolos de forjar (fig. 33) são máquinas de preformação que reduzem a secção e alongam a geratriz pela passagem entre dois cilindros matrizes.



A matriz cilíndrica é entalhada de modo a que esse alongamento se produza pelo movimento do metal somente nos comprimentos e secções necessárias para esboçar a geratriz de acôrdo com o formato de peças que se deseja obter.

Fig. 33 - Rolo de forjar. (The Ajax Manufacturing Co.).

## 3. — Marteletes

Os marteletes, com seus vários mecanismos de acionamento, são utilizados na preformação das peças de modo que se adaptem melhor às impressões subseqüentes em matrizes fechadas.



Os marteletes trabalham, normalmente, com matrizes abertas (figura 34) e constituem o remanescente do serviço de ferraria, a mais antiga modalidade de conformação metalúrgica do mundo.

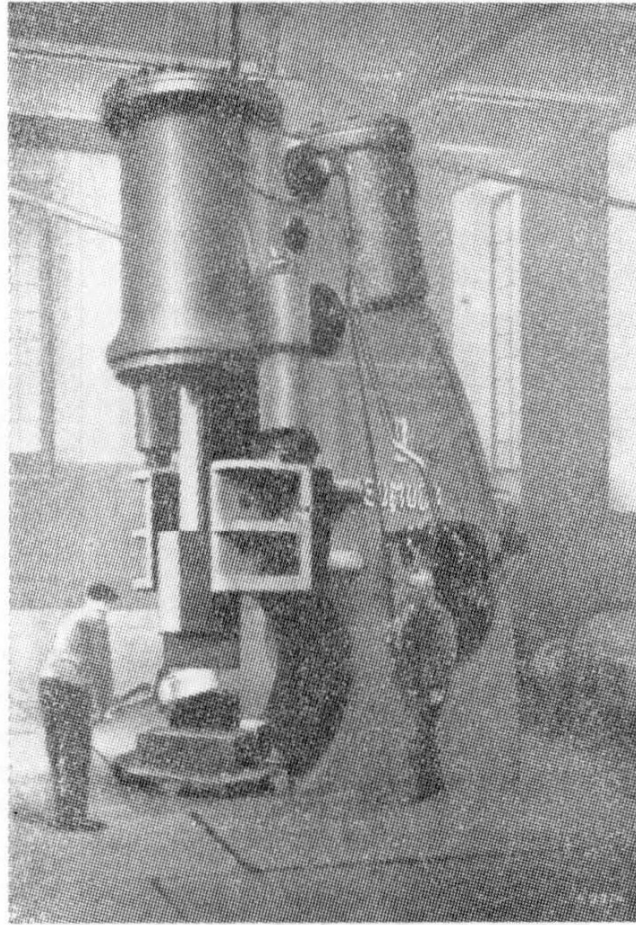


Fig. 34 - Martelete pneumático.  
(Eumuco).

#### 4 — Dobradoras (Bulldozer)

São prensas horizontais (figura 35) mecânicas de longo curso. Um lado da prensa contém o acionamento da matriz e o outro é aparador. O cabeçote porta-matriz é geralmente

movimentado através de bielas laterais acionadas por pinos ligados ao motor, rodas e engrenagens do sistema motor.

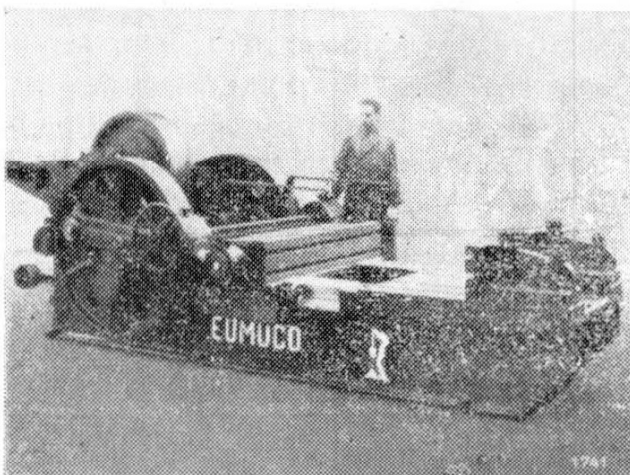


Fig. 35 - Dobradora. (Bulldozer).  
(Eumuco).

### 5 — De transporte

Problema fundamental numa forjaria é o de adequado sistema de transporte para os blocos de matrizes, matéria prima e produto acabado. Nas forjarias modernas, o processo mais comum é o da utilização das empilhadeiras (figura 36) ou outros carros análogos. Os braços das empilhadeiras elevam o material à altura desejada, seja transportando as caçambas a serem empilhadas, seja transportando os blocos à altura para colocação no martelo.



Fig. 36 - Empilhadeira. (Baker Industrial Truck Co.).

Para o trabalho mais pesado, como o forjamento de lingotes ou blocos, são utilizados, juntamente com prensas ou martelos, os manipuladores pesados (fig. 27), cuja função é segurar e mover a geratriz, enquanto ela está sendo conformada pela máquina de forjamento. Os manipuladores, sob certas condições, fazem o serviço correspondente a cinco homens e aumentam consideravelmente a produtividade da máquina.

Os manipuladores são calibrados em metrotons, representando o momento definido pelo peso do lingote pela distância do centro do lingote ao centro da roda dianteira.

Em consequência de diversificação de tamanho de peças, característica da maioria das forjarias, é menos comum nessas o sistema de transportadores por correia ou aéreos.

## g) FORNOS PARA AQUECIMENTO

### 1 — Características principais

A característica essencial do forno de forja é que êle deve ser apto a suprir completamente a máquina de forjar, cuja produção é o índice a ser adotado. Em outras palavras, é o martelo ou a prensa que marca a produção, todo o equipamento auxiliar sendo bitolado para acompanhá-la.

De outro lado, a própria natureza do processo de forjamento, exigindo tempos mortos para provas, mudança de matrizes, ajustes, etc. ocasiona variações na alimentação de calor afetando bastante a eficiência térmica do forno. Nessas condições, o forno de forjar deve ser caracterizado por alta velocidade de aquecimento, isto é:

- a) máxima velocidade na alimentação do combustível que pode ser queimado completamente dentro da câmara;
- b) refratários de baixa capacidade de armazenar calor e baixa reatividade química com o material a ser aquecido.

A razão primordial do primeiro requisito está na economia de combustível, pois possibilita ao operador desligar o forno durante os tempos mortos na operação, sem preocupar-se com o tempo de aquecimento. Reduz-se assim também o período de aquecimento quando se trabalha com um ou dois turnos.

O segundo requisito é também essencial para a velocidade de aquecimento, uma vez que é menor o tempo gasto com perda de calor absorvido pelo refratário e não devolvido ao forno.

É fácil de se compreender que êsse tipo de operação exige atenção constante para evitar super aquecimento ou queima do material aquecido.

### 2 — Combustíveis

No caso brasileiro onde, pelo menos até agora, não é possível a utilização de gás natural nas zonas industriais, o problema dos combustíveis fica restrito ao óleo combustível e à eletricidade (aquecimento por indução).

A utilização do óleo combustível é, por enquanto, no país, muito mais utilizado que qualquer outro. É facilmente armazenado e distribuído, sendo que os tipos mais utilizados são os de viscosidade média (muitas vezes obtida por mistura com diesel) e o diesel. No primeiro caso é sempre aconselhável aquecimento a fim de diminuir a possibilidade de entupimento nos queimadores, principalmente nos dias frios nas primeiras horas após a ligação.

### 3 — Tipos mais comuns

O forno ainda utilizado na grande maioria das forjarias é o forno de fenda (figura 37) que não passa de uma caixa reves-

tida de refratário, com uma fenda para alimentação e retirada do material. O aquecimento é feito por maçaricos colocados lateralmente, tratando-se portanto de queima direta.

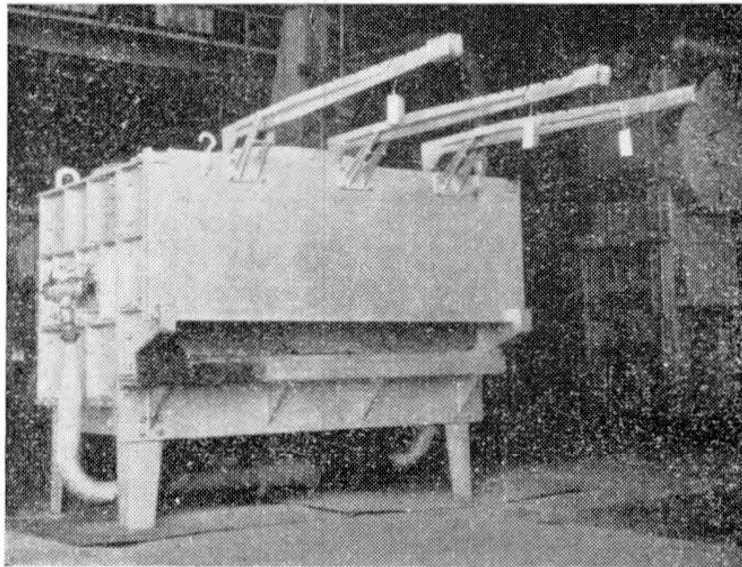


Fig. 37 - Forno de fenda. (Gentileza da Co-brasma).

Os maçaricos mais utilizados no caso são os de baixa pressão, auto-proporcionadores, isto é, mantendo constante a relação ar/óleo, após regularização.

A eficiência de um forno desse tipo não pode ser muito elevada, 15% sendo considerada razoável, com um consumo, nesse caso; de 0,15 lts de óleo por quilo de material aquecido à temperatura de forjamento. A experiência mostra que quando se passa de 4% a 6% de eficiência o consumo de óleo cai de 0,45 para 0,30 lts por kg de material, a diferença estando nessa zona, somente em evitar-se a queima de óleo fora do forno, fechar-se o forno nos períodos mortos e gastar menos tempo de acendimento (10).

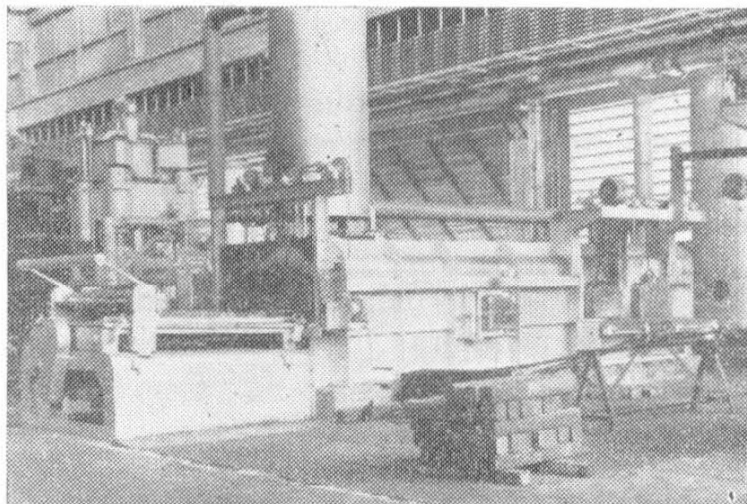


Fig. 38 - Forno de puxo, mesa de puxo automático (contínuo.) (Gentileza da Indústria Nacional de Locomotivas — Krupp).



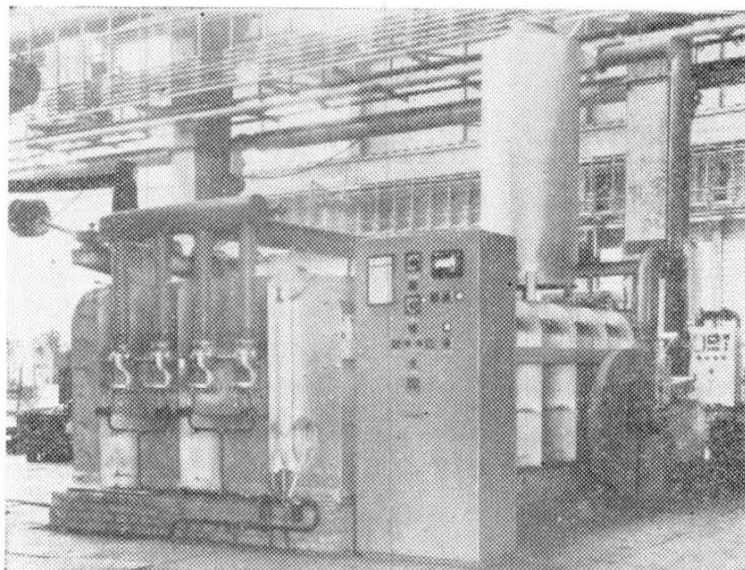


Fig. 39 - Vista do painel de controle do forno da fig. 38. O forno tem regulador automático de temperatura, medidores, regulador de óleo. (Gentileza da Indústria Nacional de Locomotivas — Krupp).

Como variante de utilização crescente estão os fornos contínuos, retos ou rotativos, para casos de forjamento de grande seriação. Os fornos retos dêsse tipo usam mecanismos de empurramento, acionados a ar comprimido e avanço regulado por engrenagem de tempo. (Figuras 38 e 39).

Os fornos rotativos apresentam sobre os retos a desvantagem de serem difíceis de carga e descarga automática. São entretanto mais flexíveis quanto à variação do tipo de peças.

Os fornos elétricos de indução estão crescendo em popularidade, tanto nos EE. UU. como na Europa. Representam entretanto uma fração pequena dos fornos comuns a óleo. O tempo necessário ao aquecimento de uma barra redonda é calculado  $(5D)^2$  segundos, sendo D o diâmetro da barra. Para serem econômicos êsses fornos exigem grande seriação, motivo pelo qual são preferivelmente utilizados conjugados a recaladoras do que a martelos.

Em resumo, no caso brasileiro, na ausência do gás natural e com o preço atual de energia elétrica, é aconselhável o uso do óleo diesel ou então do óleo combustível aquecido ou misturado com óleo de menos viscosidade.

Para o tipo de Forjaria com produção de pouca seriação, aconselha-se o tipo de fornos de fenda, com aquecimento direto.

Para produção contínua aconselha-se fornos contínuos, sendo o forno reto mais econômico, porém menos flexível que o forno rotativo. É sempre preferível o controle de temperatura, automática ou não.

## IV — TÉCNICA DE FABRICAÇÃO DE MATRIZES

### a) MATÉRIA PRIMA PARA AS MATRIZES

A técnica de fabricação de aços para os blocos de matrizes é fundamental no comportamento da mesma em serviço. Assim, cuidados especiais são usados para que o aço, antes de vasado no lingote, esteja livre de gases e inclusões de escoria. Os lingotes são do tipo «big end up», com cabeça quente, e dimensões dependendo do tamanho do bloco que se quer obter.

Os lingotes são estripados com cêrca de 800°C e imediatamente colocados em fornos de reauecimento onde são vagarosamente e uniformemente aquecidos após o que são transferidos para o forno de forja para serem aquecidos à temperatura de forjamento.

Quando a temperatura é atingida são então os lingotes forjados em prensas, com descarte de cêrca de 20% na cabeça e 5% no fundo, a fim de assegurar completa ausência de vasios de contração, e então esfriados em poços onde êsse resfriamento é controlado.

Os desbastados são, depois de frios, inspecionados quanto a defeitos superficiais ou de outra natureza e, existindo êsses defeitos, são removidos por escarfagem a frio ou esmerilhamento. Estão aí prontos para serem forjados nas dimensões necessárias.

Quando se trata de blocos para matrizes para martelo de queda, os desbastados são aquecidos lentamente à temperatura de forja e cortados em pedaços do volume que se quer obter. Cada um dêsses blocos é então forjado em prensa, nas seis faces, de modo a eliminar qualquer efeito de direcionabilidade. Após forjamento os blocos sofrem esfriamento controlado.

A redução de seção do lingote para o bloco nunca é menos do que 1 para 3, de modo a assegurar destruição completa da estrutura bruta de fusão.

A tabela I relaciona os principais tipos de aços utilizados em matrizes, classificados de acôrdo com a finalidade a ser atingida. Os aços destinados a rebarbação são indicados apenas a título informativo, pois é muito mais econômico a utilização de aço carbono com solda dura na superfície de corte.

Os valores indicados na tabela I são dados de laboratório, naturalmente valores médios (11) e não especificações de fabricantes.

TABELA I

Finalidade	C	Mn	Si	S	P	Cr	Ni	Mo	Va	W	Dureza após trat. <sup>o</sup> Brinell
Martelo de queda .	.55	.55	—	—	—	.75	1.50	.30	—	—	388/429
	.53	.70	—	—	—	.92	1.54	.33	—	—	341/375
	.55	.55	—	—	—	.75	1.50	.20	—	—	302/331
Prensas . . . . .	.55	.55	—	—	—	.75	1.50	.30	—	—	341/375
	.53	.55	.90	—	—	1.0	1.65	.85	—	—	388/415
Encaixes . . . . .	.35	.35	1.0	—	—	5.0	—	1.75	—	1.3	388/415
	.84	—	—	—	—	4.15	—	4.9	1.9	6.4	
Rebarbação a frio .	1.55	.30	.30	—	—	11.5	—	.75	.25	—	555/601
	1.05	.20	.20	—	—	—	—	—	—	—	653/712
Lâminas de corte .	.44/.55	.45/.55	.20/.30	0.003 max	0.003 max	.70/.90	—	—	—	1.0/1.2	600/555
	.50	.40	1.00	—	—	—	—	.50	—	—	(só do lado do corte, lado opo- to revenido) 555

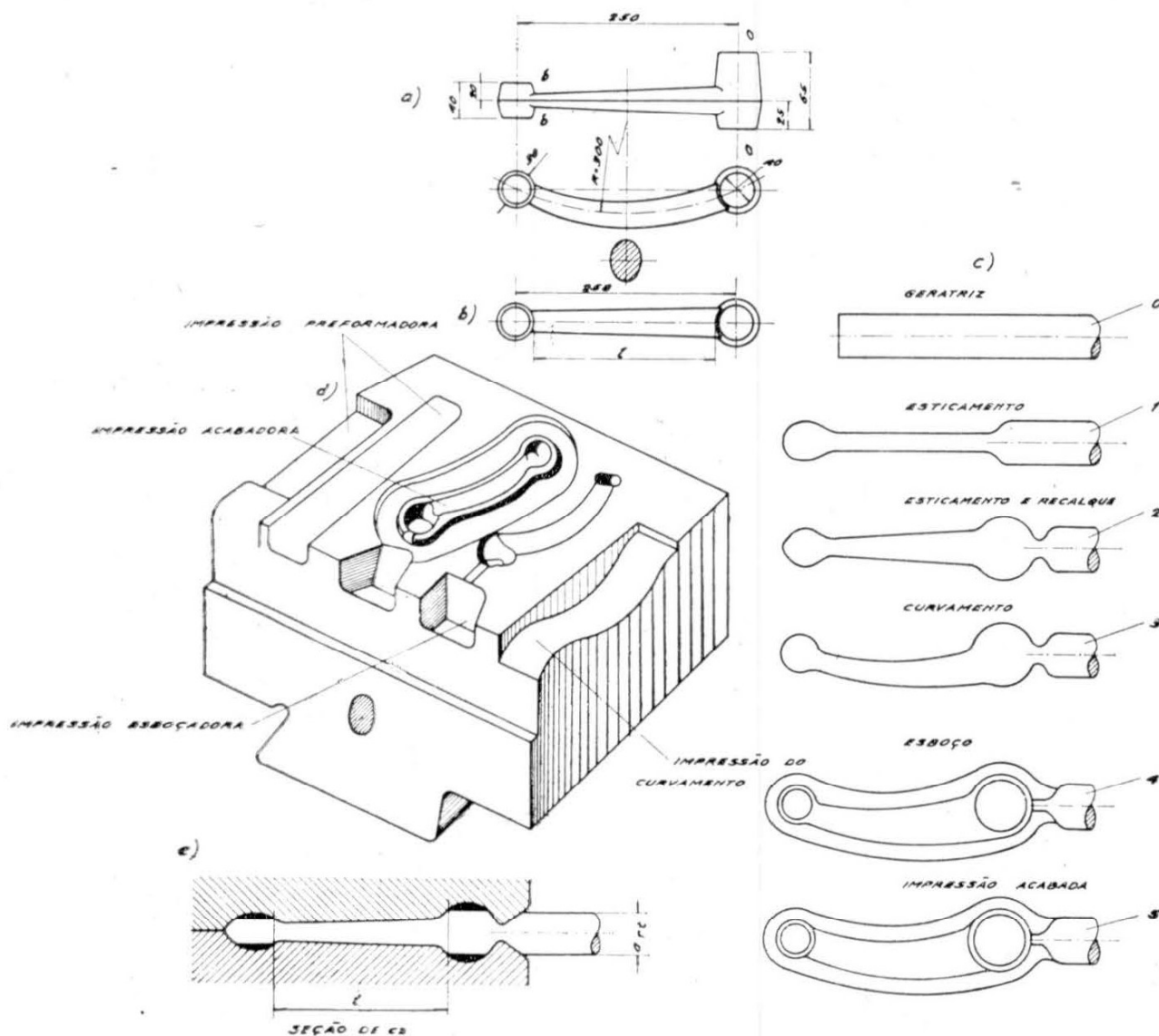


Fig. 40 - Forjamento em matriz única, com várias operações. (Bruchanow e Rebelski, ob. cit. (13), pg. 120).

- a — Desenho da peça forjada;
- b — Forma desenvolvida da peça forjada;
- c — Operações sucessivas de forjamento;
- d — Matriz de forjamento;
- e — Secção da matriz geradora do boneco da peça.

## b) MATRIZES PARA MARTELOS E PRENSA VERTICAIS

### 1 — Planejamento

Recebido o desenho da peça que se quer forjar começa a operação de planejamento do seu processo de fabricação, isto é, a seqüência de operações que alteram progressivamente a forma da geratriz, até a obtenção da forma final da peça.

O conjunto constitutivo de uma operação completa de forjamento pode assim ser resumido (figura 40):

- a — a geratriz, isto é, a barra redonda, quadrada ou de qualquer outra seção, do material escolhido como matéria prima;
- b — os forjados intermediários, isto é, as formas sucessivas que vai adquirindo a matéria prima de modo a esboçar a forma final da peça;



- c — o forjado final com rebarba;
- d — o forjado final.

Na figura 40 toda a seqüência de operações está indicada: em  $C_1$  a geratriz é esticada deixando-se nas extremidades material suficiente para as duas bossas; em  $C_2$  a haste é esticada no comprimento necessário, mantida cônica para acompanhar a forma futura depois do dobramento, ao mesmo tempo que dois estrangulamentos recalcam o material para um volume correspondente ao das bossas; em  $C_3$  a peça é dobrada e em  $C_4$  a seção transversal e as bossas esboçadas;  $C_5$  é a forma final com rebarba.

**2 — Formação da rebarba**

A rebarba (figura 41) é o material em excesso sobre o necessário para encher a peça. Tem dupla finalidade:

- 1 — assegurar material suficiente para preencher a cavidade da matriz;
- 2 — forçar a entrada do metal na cavidade, criando uma resistência ao movimento para fora.

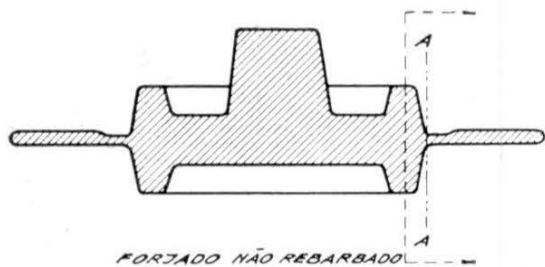


Fig. 41 - Seção transversal de um forjado pronto para ser rebarbado. (Forging Handbook, ASM, pg. 427 (14).

O primeiro objetivo é assegurado pela própria existência da rebarba, isto é, o material previsto para a mesma é mais uma segurança de que não faltará material para a peça, ao passo que o segundo objetivo resulta do seu próprio formato, isto é, o material que corre para a costura externa é logo comprimido e afinado aumentando a resistência ao movimento naquele sentido e tornando o enchimento da cavidade o caminho mais fácil para o metal.

A rebarba se forma, com raras exceções, nas últimas impressões entalhadas na matriz. Mais freqüentemente na impressão final. O entalhe se faz de várias formas, sendo as da figura 42 uma das mais comuns. Verifica-se que a seção do entalhe compõe-se de duas partes:

- 1 — a «costura», em parte mais fina, de altura  $h_c$  e largura  $l_c$ ;

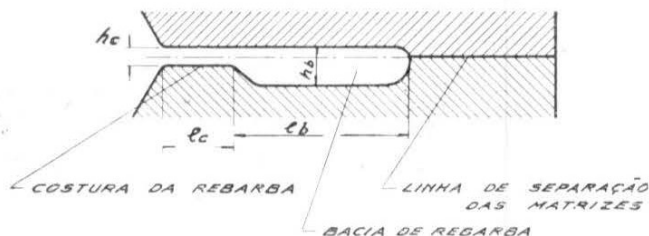


Fig. 42 - Detalhe da seção da rebarba, com indicação da costura e da bacia.

2 — a bacia, para onde flue o material em excesso, de altura  $h_b$  e largura  $l_b$ ;

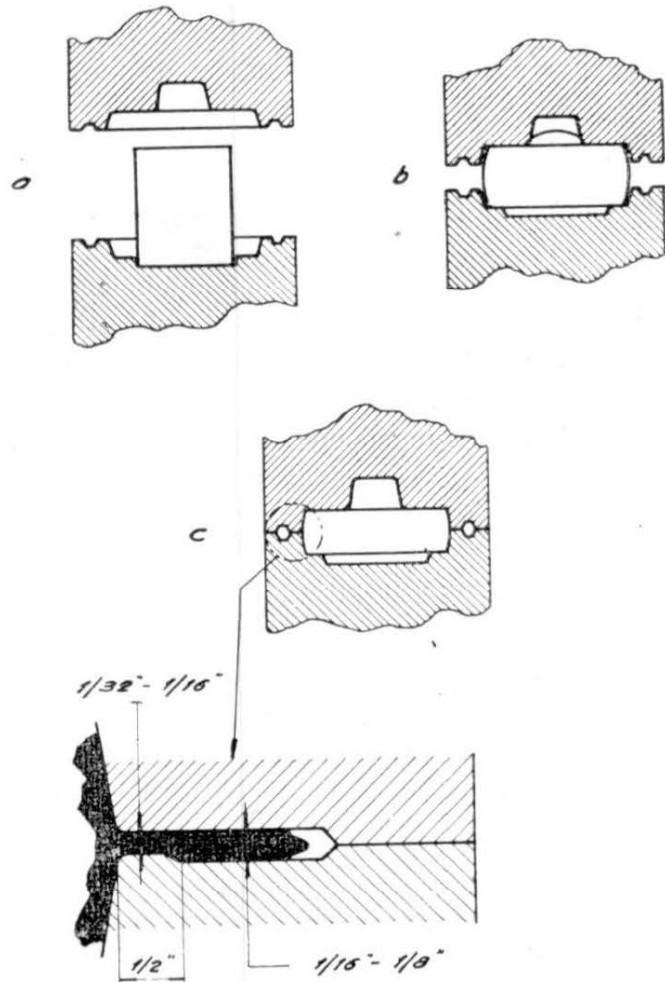
Os valores de  $l_c$ ,  $l_e$ ,  $h_b$  e  $l_b$  dependem bastante do formato da peça. De um modo geral não diferem muito dos limites fixados na figura 43.

Como elemento indicativo, para início de um projeto, pode ser utilizado o das referências (13 e 7), onde vem estabelecida a seguinte fórmula:

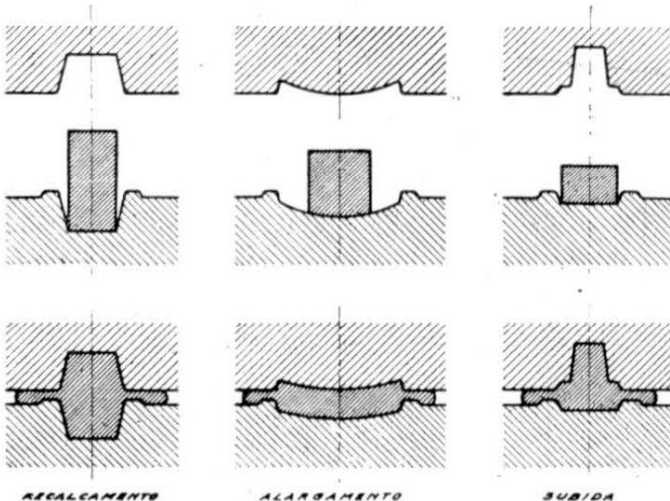
$$h_c \text{ (mm)} = 0,015 S$$

$S$  = área da projeção da peça forjada, sem rebarba.

Fig. 43 - Seqüência na fabricação de um forjado, utilizando-se somente a impressão acabadora. (Forging Handbook, ASM, ob. cit. (14), pg. 116).  
 a — geratriz;  
 b — forjamento parcial;  
 c — forjado final;  
 d — posição da rebarba num forjado, quando acabado pelo último golpe.



POSIÇÃO DA REBARBA APOS A ULTIMA PANCADA



Com êsse elemento entra-se na tabela II, conforme se trate de um processo de recalçamento simples, alargamento ou subida (fig. 44).

Fig. 44 - Formas de recalçamento, alargamento e subida. (Kurt Lange (7), ob. cit., pg. 55).

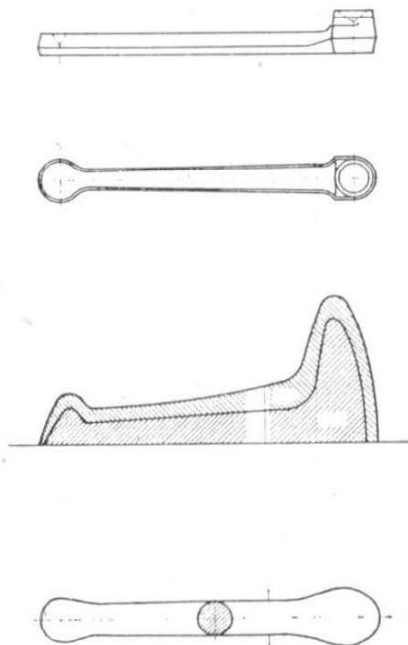
TABELA II

Área projetada da peça sobre o plano divisorio da matriz (sem rebarba) $S_{mm^2} \times 10^4$	$l_c/h_c$			
	$h_c$ mm	Recalca- mento	Alarga- mento	Subida
até 18	0.6	8	10	13
18 a 65	1.0	7	8	10
45 a 112	1.6	5	5.5	7
112 a 280	2.5	4	4.5	5.5
280 a 710	4	3	3.5	4
710 a 1800	6.3	2	2.5	3
1800 a 4500	10	1	2	2.5

Essas regras e tabelas são apenas indicativas, em geral cada peça sendo um problema em si que a experiência anterior ajuda a resolver.

3 — Diagrama de distribuição de massas

O diagrama de distribuição de massas de uma dada peça (figura 45) representa o sistema preconizado por Bruchanow e Rebelski para a determinação das formas intermediárias de forjamento. O diagrama representa, para uma dada peça, a variação da seção transversal com o comprimento da peça, incluindo na seção transversal a de qualquer saliência existente. A essa área é necessário adicionar a de rebarba.



O traçado do diagrama de distribuição de massas nem sempre é fácil como no caso do da figura 45.

Fig. 45 - Diagrama de distribuição de massas para um pedal de bicicleta. (Bruchanow e Rebelski, ob. cit. (13), pg. 147).

No caso, por exemplo, em que o eixo principal é curvo é necessário inicialmente desenhar a peça com o eixo retificado no seu comprimento total, com a peça curva.

A regra (fig. 45) é geral não podendo porém ser sempre seguida à risca, cuidados especiais devendo ser tomados quando as formas são complicadas e assimétricas (figura 46).

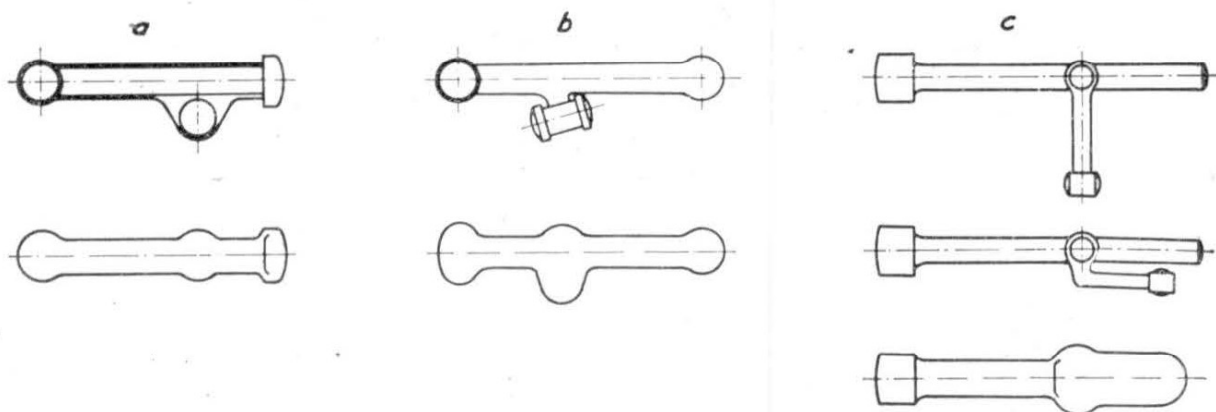


Fig. 46 — Esboços (bonecos) para peças com projeção de um lado (Kienzle e Spies, ob. cit. (12).

- a — bossa pequena;
- b — bossa maior;
- c — projeção muito grande.

#### 4— Estágios intermediários (formação do boneco)

O boneco é a forma que resulta da distribuição do material da geratriz de modo a que haja correspondência entre as diversas seções do esboço e a da forma final da peça. Dêsse modo assegura-se que haverá volume suficiente de material para preencher a forma final, sem ser necessário posterior movimento na direção do eixo longitudinal da peça e sem formação excessiva de rebarba.

Obtido o diagrama de distribuição de massas o boneco é formado por uma distribuição simétrica do material em relação ao eixo longitudinal, em seção circular ou retangular. Não há ainda nêsse caso formação de rebarba (figura 40).

O sucesso de um projeto de matriz está diretamente relacionado às precauções que se tomam na execução das formas preparatórias. Como acentuam Kienzle e Spies (12) «quanto maior o eixo principal em relação às restantes dimensões maior será a resistência do material em fluir na direção dêsse eixo. De acôrdo com as leis que governam êsse fenômeno o metal tenderá a fluir no sentido da superfície externa mais próxima, isto é, na direção normal ao eixo longitudinal. Só quando a possibilidade de movimento nessa direção é eliminada, inicialmente pelas paredes da matriz e posteriormente pela rebarba é que o metal começa a fluir no sentido longitudinal. As fôrças de atrito que então se desenvolvem resultam em desgaste rápido da matriz».

Quando se trata de forjados com partes não simétricas em relação a eixo principal, o metal é primeiro distribuído simetricamente em relação àquele eixo e depois, si a bossa está situada transversalmente à direção de movimento da impressão acabadora é que deve ser feito o deslocamento.

A figura 46 dá três exemplos de casos relativamente complicados.

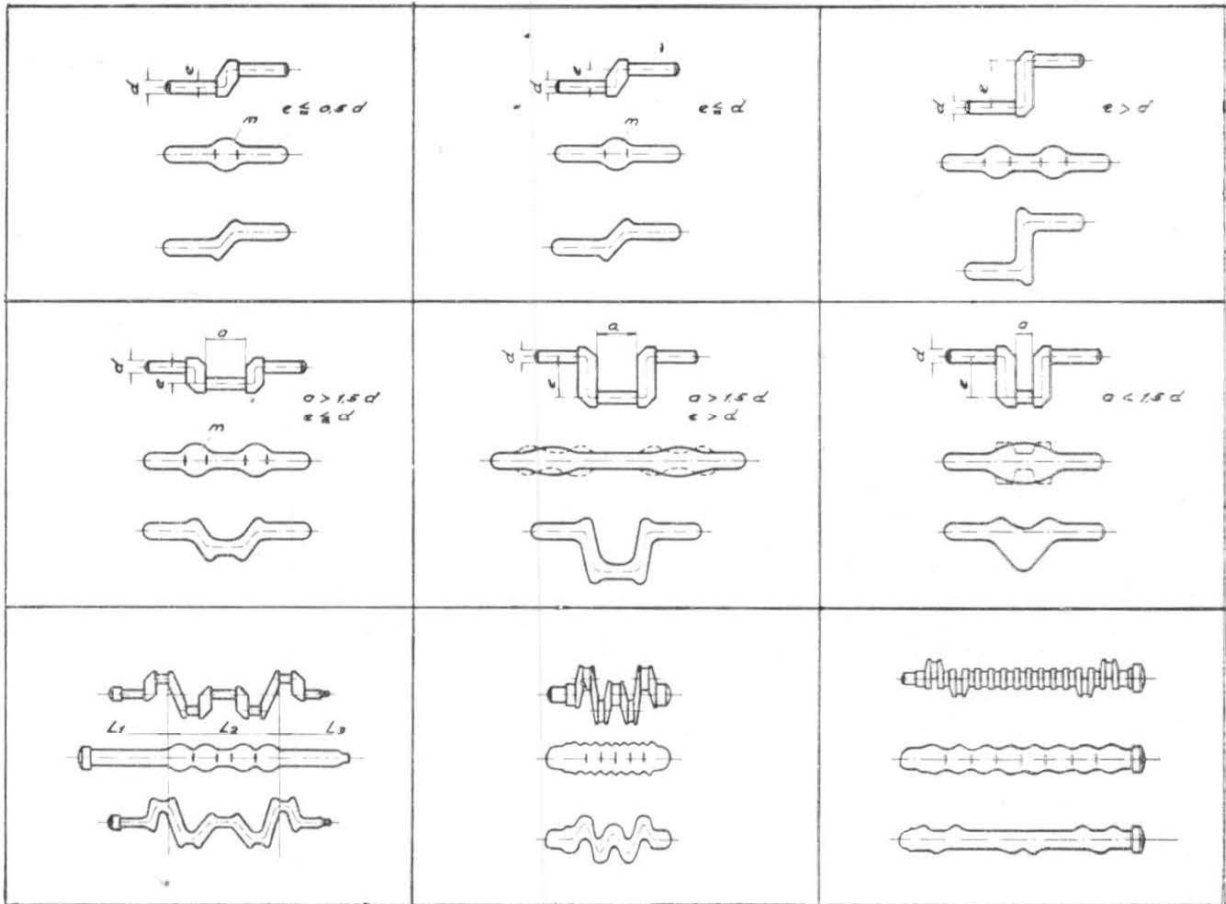


Fig. 47 - Exemplos de formas intermediárias (bonecos) onde há necessidade de várias curvaturas (12) com alongamento, sem alongamento, com deslocamento, composto, com e sem alongamento.

Ainda dentro da preparação dos estágios intermediários pode surgir a necessidade de curvar o boneco para que ele acompanhe a forma da peça final.

Novamente aparece aí o trabalho de sistematização de Bruchanow e Rebelski. Êsses diferenciam três tipos de curvatura:

- 1 — curvatura sem variação apreciável na seção transversal;
- 2 — curvatura com redução na seção transversal e alongamento simultâneo do material;
- 3 — curvatura com o fito de deslocar o metal para um lado; deslocamento.

A figura 47 dá exemplo desses casos.

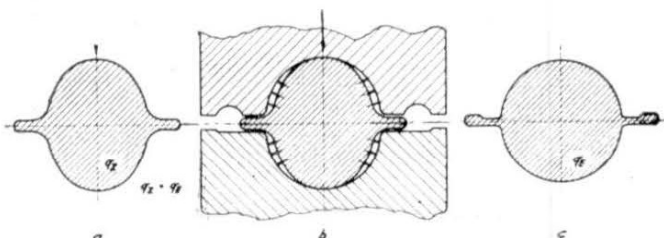


Fig. 48 - Forjamento na impressão acabadora sem fricção de escorregamento (12).

- a — Seção do esbôço;
- b — esbôço na impressão acabadora;
- c — forma final.



Após a formação do boneco é necessário passar-se ao estágio seguinte de preparação que é a preformação da seção transversal. Nesse estágio conforma-se o boneco de modo a que se forme um **esbôço** da peça final com a seção transversal tão próxima quanto possível da seção final. Com isso exige-se o mínimo de esforço na impressão acabadora que funciona também como calibradora de dimensões.

As normas para formação do esbôço são as seguintes (Kienzle e Spies).

a — a seção transversal do esbôço deve ser igual à da peça forjada e mais a da rebarba, isto é, a diferença de volume entre o esbôço e a da peça acabada é no máximo igual ao volume da rebarba.

Há casos em que há necessidade de se rebarbar o esbôço para diminuir o esforço na impressão final.

b — a seção transversal do esbôço, incluindo a rebarba, quando comparada com a da forma final, deve ser maior na direção paralela ao movimento de estampo e menor na direção transversal.

A figura 48 ilustra a regra que resulta do fato conhecido de que o desgaste da impressão acabadora é mínimo quando comprimido no sentido das paredes, sem fricção do escorregamento (12).

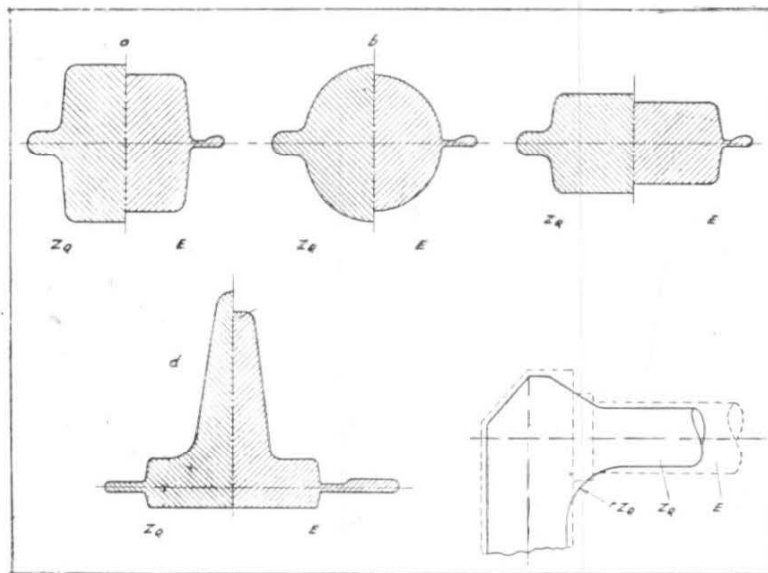


Fig. 49 - Ilustração da regra c, para diversos casos. Seções transversais de vários esbôços e respectivas seções finais. Kienzle e Spies (12).

c — os raios de tôdas as curvaturas no esbôço devem ser maiores que os correspondentes na forma final.

Essa regra facilita o fluxo do material na seção acabadora.

A figura 49 mostra vários exemplos de seções de esboços comparadas com as respectivas seções do produto final.

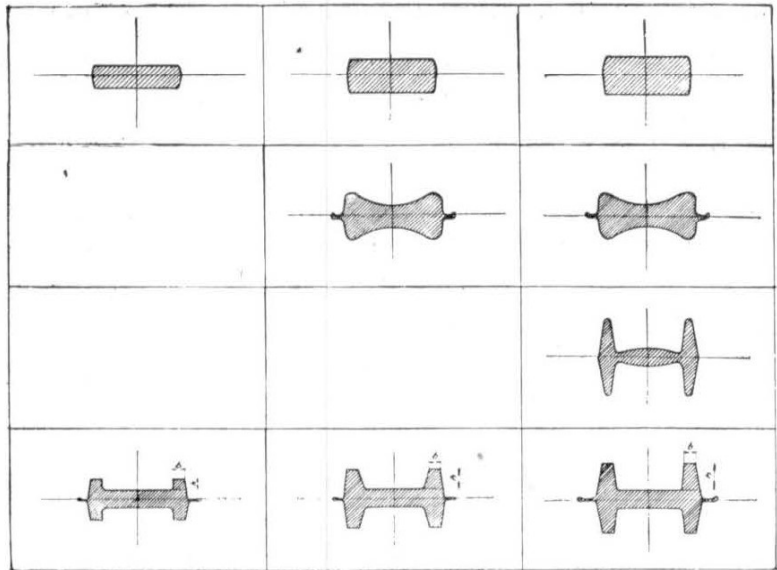


Fig. 50 - Seções de esboços para peças de seção transversal H ou duplo T. O esboçamento da seção transversal só é omitida quando  $H/b$  for menor que 2 (12).

Finalmente, ainda como ilustração, a figura 50 mostra o caso da seção de esboços para peças de seção transversal tipo H ou duplo T. O esboçamento da seção transversal só pode ser omitido quando  $H/b$  for menor que 2.

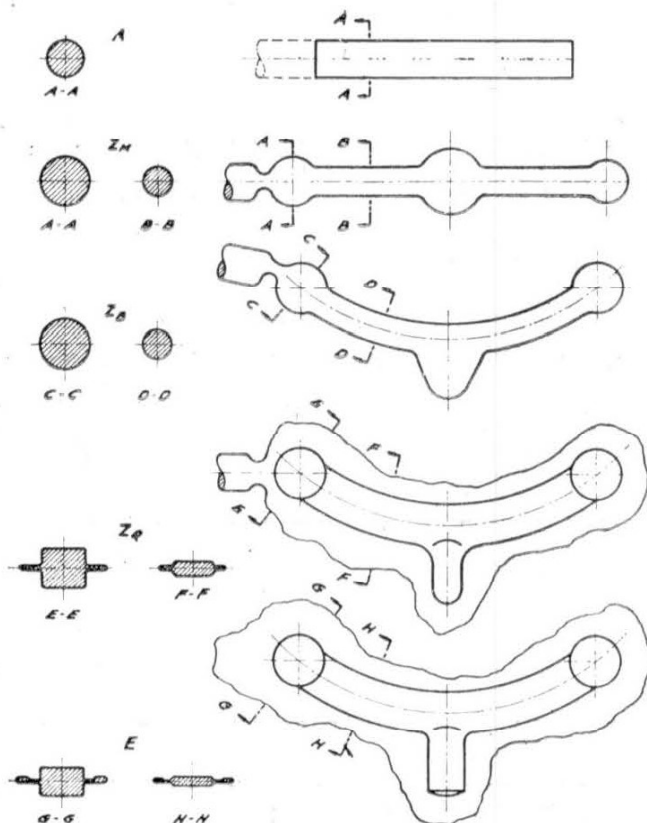


Fig. 51 - Seqüência de operações e respectivas seções na formação de forjados.

A figura 51 ilustra uma seqüência completa de operações para obtenção de um forjado assimétrico, desde a formação do bo-

neco até a impressão final com rebarba. Note-se as seções transversais correspondentes, acompanhando a execução da peça.

### 5 — Estágio final de considerações gerais

Tanto quanto possível a impressão final, centrada em relação ao eixo do martelo, deve ser utilizada como quasi calibradora. Esse sistema aumenta a vida da matriz compensando o custo extra de se fazerem mais impressões preparadoras.

No preparo das matrizes algumas considerações devem ser feitas:

#### Ângulo de saída

Ângulo de saída é a inclinação dada a fim de facilitar a saída do forjado. Varia com a forma e dimensões do forjado, conforme exemplificado na figura 51.

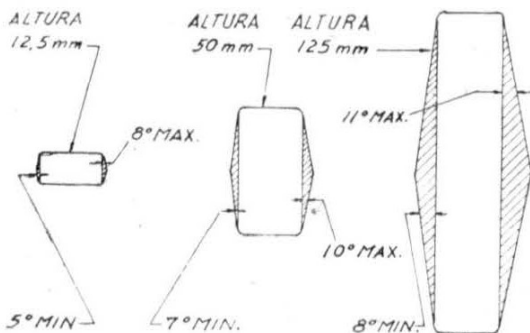


Fig. 51 - Influência das dimensões da peça sobre o ângulo de saída (ASM Metals Handbook, Suplemento de 1955).

A tabela III e IV dão os ângulos de saída de acordo com as recomendações americanas e alemãs (DIN) respectivamente.

TABELA III

Saídas e respectivas tolerâncias para forjados de aço

Altura ou profundidade da saída Polegadas	Ângulo	Norma Tolerância (1) + (graus)	De Precisão	
			Ângulo	Tolerância (1) + (graus)
SAÍDA EXTERNA				
1/4 a 1/2	—	—	3	2
1/4 a 1	5	3	—	—
1/2 a 1	—	—	5	2
1 a 3	7	3	5	3
acima de 3	7	4	7	3
SAÍDA INTERNA				
1/4 a 1	7	3	5	3
acima de 1	10	3	10	—

(1) A tolerância para menos é zero.

**TABELA IV**  
DIN 7523

Em	Tolerâncias de saída					
	Superfícies internas			Superfícies externas		
	Inclinação	Ângulo interno	Condições de emprego	Condições	Ângulo interno	Condições de emprego
A Martelo	1:6	9°	normal com punção curto	1:6	9°	em saliências altas normal em peças circulares achataadas (bolachas)
	1:10	6°		1:10	6°	
B Prensa	1:6	9°	em partes fundas normal com extra- tor	1:10	6°	em peças circulares achataadas normal com extrator
	1:10	6°		1:20	3°	
	1:20	3°		1:50	1°	
C Recalcadora	1:20	3°	conforme a profundi- dade, fu- ro ou con- cavidade	1:20	3°	em concavidades laterais (1) normal em superfície de encosto (2)
	até 1:50	0 até 1°		1:50	1° 0°	

(1) Concavidades entalhadas nos mordentes (normais ao movimento de punção).

(2) Superfícies frontais em relação ao movimento de punção.

#### Determinação da linha divisória

O problema seguinte é o da determinação da linha divisória da matriz, isto é, a linha que determina que parte do forjado deve ser colocado na matriz superior e qual a que deve ser colocada na matriz inferior. São dois os critérios iniciais, que nem sempre podem ser obedecidos, que deve seguir o projetista:

- 1 — deve-se procurar fazer com que a divisão da matriz seja feita num único plano;
- 2 — a escolha deve, tanto quanto possível, aproveitar as saídas naturais da peça.

A figura 53 dá vários exemplos de determinação da linha divisória da matriz.

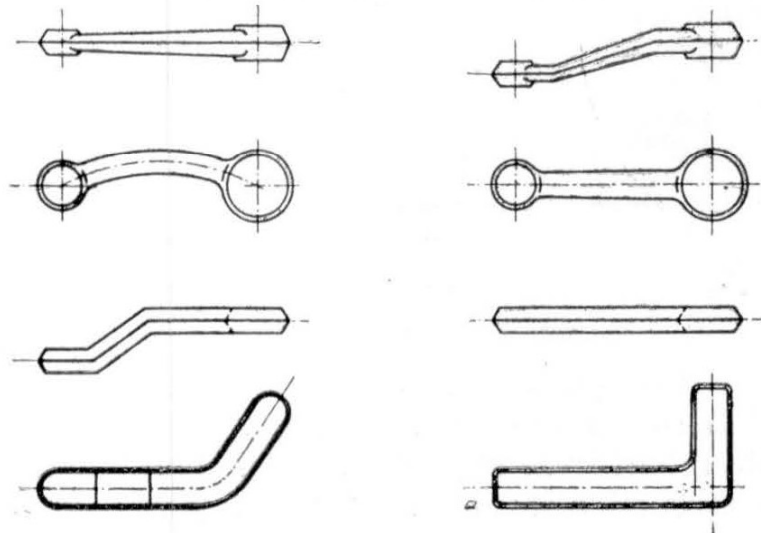


Fig. 53 - Exemplos de determinação da linha divisória da matriz, com indicação de saída. (Bruchanow e Rebelski (13).

Fig. 54 - Valores mínimos dos raios dos cantos e quintas para forjados de aço (ASM Metals Handbook, Suplemento de 1955, pg. 15).

Finalmente, os raios de curvatura, tanto das quinas (externas) como dos cantos (internos) devem seguir recomendações de valores mínimos. Êsses valores constam de tabelas e recomenda-

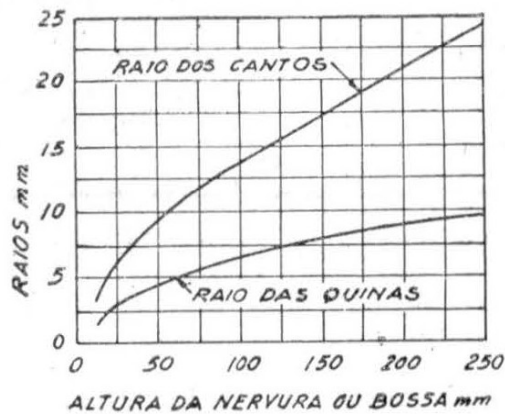
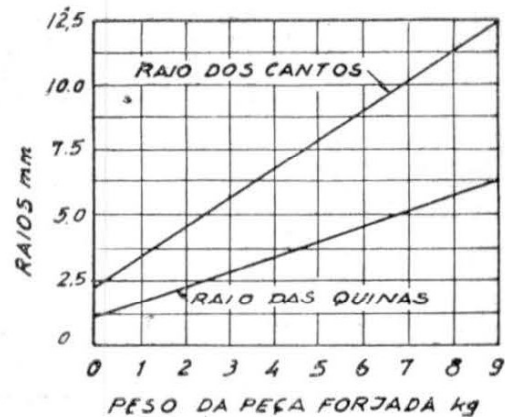


Fig. 56 - Punção e faca para rebarbar. (ASM, Forging Handbook, pg. 98).

## 6 — Rebarbação

Forjada a peça é necessário seja eliminada a rebarba, o que é feito em prensa mecânica vertical. O contôrno da ferramenta de rebarbar acompanha a linha de rebarba e o punção de rebarbar cobre a forma da superfície da peça (fig. 56).



ções, e podem ser retirados, por exemplo, dos gráficos das figuras 54 e 55, retirados do ASM Metals Handbook, Suplemento de 1955.

Fig. 55 - Valores da altura das bossas em relação dos valores dos raios dos cantos e das quinas. (ASM Metals Handbook, Suplemento de 1955, página 15).

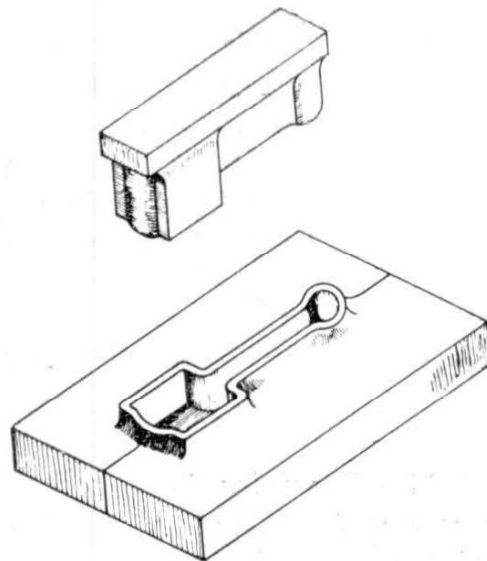
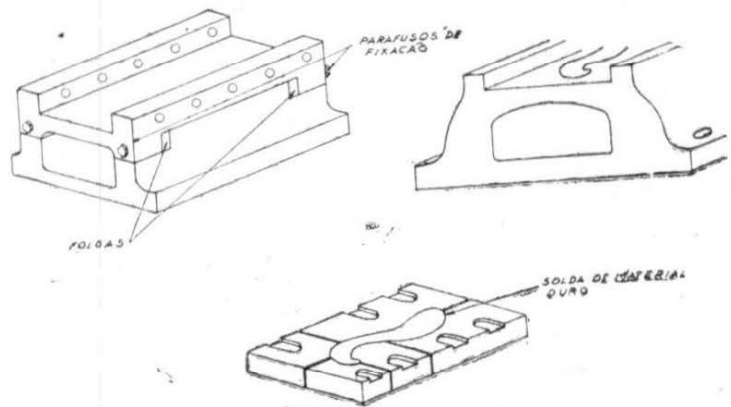




Fig. 57 - Punção e faca de rebarbar.



Peças pequenas até 1 kg devem ser rebarbadas a frio para evitar distorção. Para rebarbação a quente utiliza-se frequentemente aço 0,45 de carbono, com as quinas cortantes compostas com solda dura. As quinas quebradas podem ser removidas facilmente e refeitas.

Os punções são feitos também, frequentemente, de aço 0,45 de carbono, muitas vezes utilizando-se também para isso hastes quebradas dos martelos.

- As facas compostas (figura 57) são preferidas (11) porque:
- a — são a única maneira satisfatória de compor-se formas de contôrno irregular, recompondo-as com solda dura;
  - b — segmentos partidos ou partes são facilmente repostos;
  - c — os segmentos podem ser facilmente reajustados para acompanhar o alargamento da matriz.

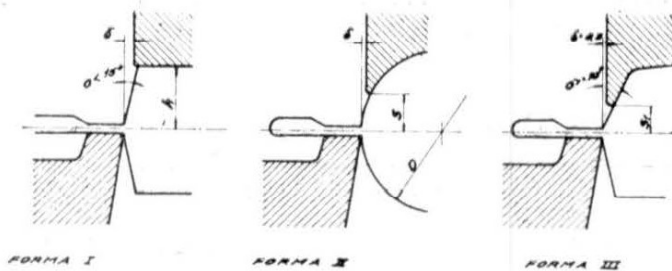


Fig. 58 - Folga entre a faca e o punção de rebarbar. (Bruchanow e Rebelski (13).

Para a forma do punção acompanhar o contôrno da matriz na região do corte (figura 58) recomenda-se o seguinte dimencionamento (13):

Formato I		Formato II	
h (mm)	$\delta$ (mm)	D (mm)	$\delta$ (mm)
até 5	0,3	até 20	0,3
5 até 10	0,5	20 até 30	0,5
10 até 19	0,8	30 até 48	0,8
19 até 24	1,0	48 até 59	1,0
24 até 30	1,2	59 até 70	1,2
acima de 30	1,5	acima de 70	1,5

Para o formato II  $S = 0,2D + 1 e$

para o formato III  $S = \frac{3.3 - 0,03}{\text{tg}\alpha}$

A determinação do esforço da rebarbação faz-se pela seguinte fórmula:

$$F_r = L.e. s_r$$

sendo:

$L$  = comprimento da linha do contorno

$e$  = espessura na região de corte

$\zeta_r$  = resistência ao cisalhamento.

Na prática adota-se um coeficiente

$$F_r = 1,25 L.e.\zeta_r$$

Os valores de  $\zeta_r$  são os seguintes, para aço 0,4% de C e de baixa liga (13):

TABELA V

Temperatura °C	Resistência ao cisalhamento kg/mm <sup>2</sup>
900	8 ..... 12
800	12 ..... 16
700	16 ..... 20
600	20 ..... 25

Os valores a frio são os seguintes:

TABELA VI

Material	Resistência ao cisalhamento kg/mm <sup>2</sup>
Aço com 0,1 C	24 ..... 30
Aço com 0,2 C	30 ..... 40
Aço com 0,3 C	36 ..... 48
Aço com 0,4 C	45 ..... 56
Aço com 0,6 C	55 ..... 70
Aço inoxidável	50 ..... 55
Aço silício	45 ..... 55

c) CARACTERÍSTICAS PRÓPRIAS DE MARTELOS E PRENSAS NO QUE SE REFERE A MATRIZES

Os martelos de queda livre caracterizam-se por:

- 1 — energia de impacto ser a mesma em todos os golpes;
- 2 — limitação no tamanho de forjados pela limitação na potência dos martelos construídos;

- 3 — dificuldade em esticamento na peça, isto é, redução da seção transversal em certas partes da geratriz, sem poder haver contrôle na energia dos golpes.

Essas características obrigam a projeto de matriz com impressões feitas de modo a aproveitar a energia total, o que torna esse tipo de martelo limitado a forjados mais simples, sem cavidade profunda ou bossas altas e seções muito finas ou assimétricas.

Essas limitações, no que se refere aos martelos de acionamento duplo, isto é, a vapor ou a ar comprimido, não existem. No caso o operador tem completo contrôle da pancada.

Quanto às prensas mecânicas verticais de forjar as vantagens e limitações, no que se refere a matrizes, são as seguintes (11):

#### Vantagens

- 1 — maior produção por unidade de tempo;
- 2 — menor capacidade técnica do operador;
- 3 — mudança rápida de estampos, uma vez que êsses são encaixados numa porta matriz que permanece alinhado;
- 4 — em certos tipos de peças a prensa pode fazer também o serviço de extrusão;
- 5 — os extratores permitem redução de saída.

#### Desvantagens

- 1 — os forjados para prensa estão limitados aos tipos que não envolvem variações muito grandes de seção;
- 2 — o projetista precisa ter grande habilidade no projeto da matriz, freqüentemente o desenvolvimento de estampos sendo lento e trabalhoso, ainda mais levando-se em conta que o princípio orientador do projetista é que não mais que um golpe deve ser necessário em cada impressão;
- 3 — dificuldade de esticamento;
- 4 — a espessura do forjado não pode ser controlada dentro de limites muito apertados, sem contrôle rigoroso de temperatura de forjamento;
- 5 — para evitar o risco de «acavalamento» da prensa há a tendência de fazer rebarbas mais grossas, agravando os problemas de rebarbação.

#### d) MATRIZES PARA RECALCADORAS

As matrizes para recaladoras, como foi dito anteriormente na descrição da máquina, tem dupla finalidade: devem prender a geratriz ao mesmo tempo que o metal em estado plástico é com-

primido por um punção transportado por um cabeçote. Essa compressão dá-se contra uma cavidade na matriz que tem a forma da peça que se quer obter.

A figura 59 é o esquema do processo de forjamento:

- a — os dois mordentes laterais  $M_1$  e  $M_2$  estão abertos e a geratriz foi colocada contra o mordente fixo  $M_1$  até uma distância, regulada por um limitador. O punção está afastado, à esquerda;
- b — o mordente móvel  $M_2$  avança e aperta a geratriz contra o mordente fixo  $M_1$ . Simultaneamente o cabeçote avança. Note-se que em tôdas as recaladoras, tanto o cabeçote como os mordentes tem movimento em plano horizontal, retilíneo e em esquadro;
- c — o punção transportado pelo cabeçote encontra a extremidade livre da geratriz e começa a comprimi-la contra a cavidade da matriz, forçando-a a encher essa cavidade. Não pode haver recuo porque a outra extremidade da geratriz está segura pelos mordentes;
- d — no fim da operação abrem-se os mordentes pelo afastamento de  $M_2$  simultaneamente com o do punção, a peça sendo retirada. Essa simultaneidade é obtida em praticamente todos os tipos de recaladoras por um eixo principal que aciona o mordente móvel em ângulo reto através de alavanca e o cabeçote por meio de excêntrico.

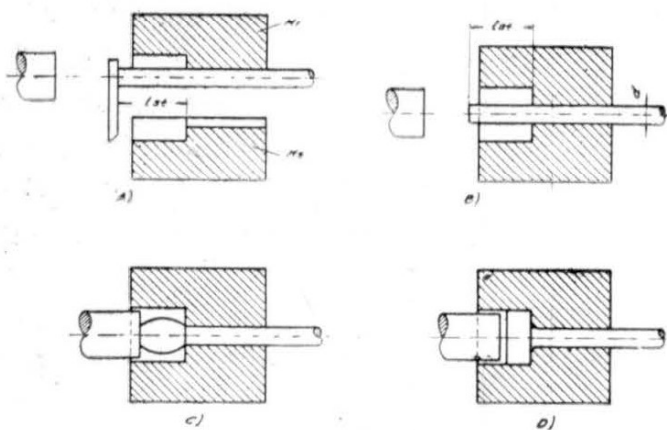


Fig. 59 - Esquema do processo de forjamento em recaladora. Bruchanow e Rebelski, ob. cit., (13).

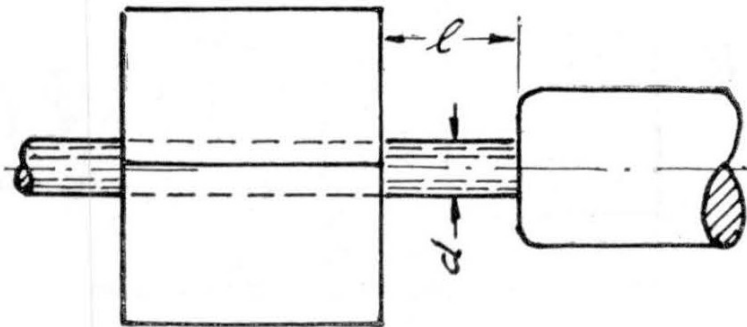
A experiência prática tem ensinado que certas normas ou regras devem ser seguidas no projeto das matrizes. São três as principais:

Regra n.º 1 — O comprimento máximo de uma geratriz não apoiada que pode ser recalçada de uma só vez, sem entortamento, não deve exceder três vezes o seu diâmetro. (Figura 60).

Recomendação prática  $l \leq 2,5 d$

sendo:  $l$  — comprimento de extremidade livre  
 $d$  = diâmetro ou dimensão principal da geratriz

Fig. 60 - Ilustração da regra n.º 1.



Regra n.º 2 — É possível recalcar, sem entortamento, uma geratriz cuja extremidade livre tenha comprimento maior que três vezes o diâmetro, si confinada a uma impressão cujo diâmetro não seja maior que 1,5 vezes o diâmetro da barra, que não deverá sobressair mais que  $1/2$  diâmetro para fora da impressão (figura 61).

$$D \leq 1,4 d \qquad l \leq D-d$$

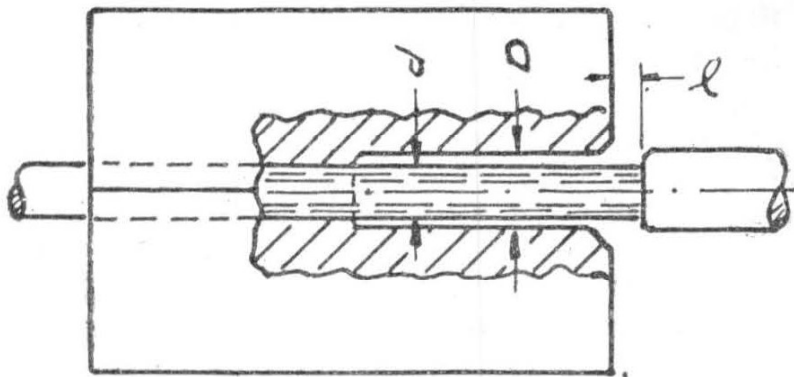


Fig. 61 - Ilustração da regra n.º 2.

É fácil verificar que a aplicação contínua da regra II torna possível recalcar grandes comprimentos da barra, em cada caso o diâmetro da geratriz passando a ser o diâmetro anterior recalcado.

Regra n.º 3 — A extremidade livre da geratriz pode ser recalcada de um comprimento maior que três vezes o seu diâmetro, sem entortamento, si protegida por uma cavidade cônica nos mordentes com um diâmetro não maior que 1,5 o diâmetro da extremidade livre na saída e 1,125 vezes no fundo. A profundidade da cavidade não pode ser maior que  $2/3$  do comprimento da extremidade livre ou esse comprimento menor 2,5 vezes o seu diâmetro (figura 62).

Recomendações práticas:

$$\begin{array}{ll} D' \leq 1,125 d & L' \leq 2,5 d \\ D \leq 1,4 d & L \leq 2/3 l \end{array}$$



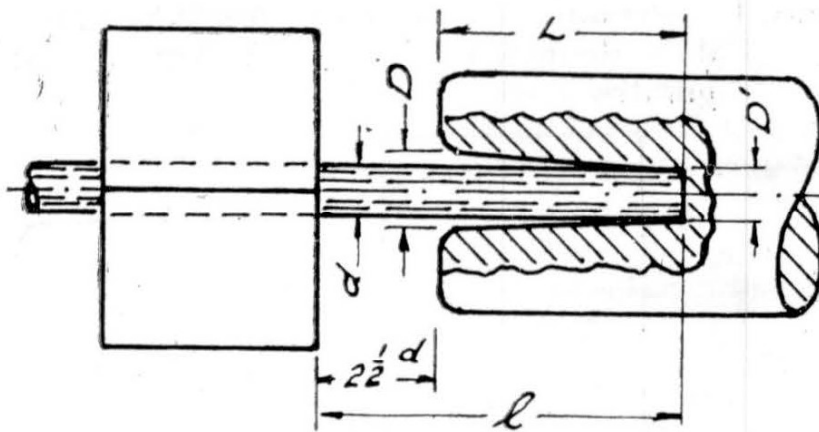


Fig. 62 - Ilustração da regra n.º 3.

Recomenda-se que as cavidades sejam usinadas nos mordentes, para evitar a formação de rebarbas que aparecem quando o recalque é feito contra a cavidade no punção.

A utilização dessa terceira regra é muito comum e é o chamado princípio da «inclinação progressiva».

Deixamos de desenvolver mais demoradamente êsse tipo de matrizes porque demandaria detalhes acima do escopo dêste trabalho. Todos os fabricantes de recaladoras fornecem livretos ilustrativos com inúmeros exemplos que servirão para campo de aplicação, em cada caso, das regras anteriores.

#### e) MATRIZES PARA ROLOS DE FORJAR

Os rolos de forjar destinam-se a conformar, por esticamento, formas intermediárias de distribuição de volume. Êsse esticamento é feito por fricção entre dois setores circulares fixos a dois rolos de eixos paralelos que giram em sentido oposto, de modo que o material é expelido de volta para o operador. (Fig. 63).

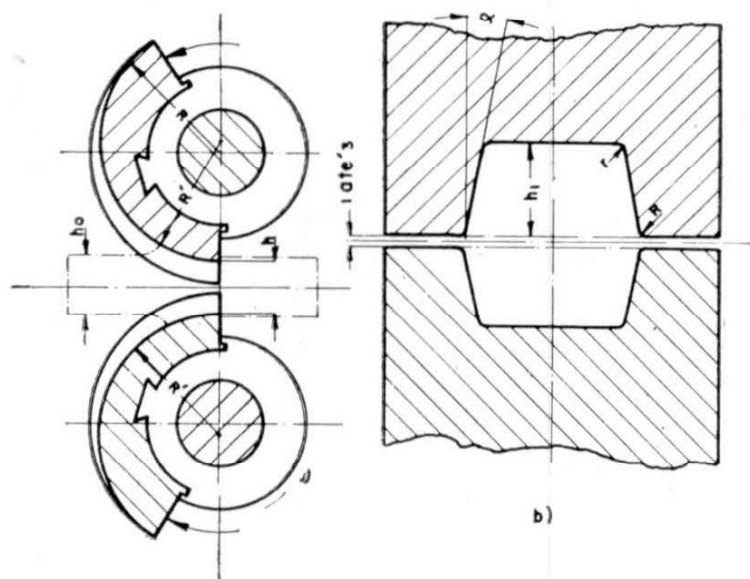


Fig. 63 - Elementos construtivos de um par de rolos com respectivas matrizes. Bruchanow e Rebelski (13).

O operador trabalha com guias na frente e atrás dos rolos, com encostos para marcação das posições de início de serviço em cada passe ou aprofundamento sucessivos num mesmo passe.

Quando a máquina entra em operação, os setores mordem o material contra os respectivos entalhes a esse flue formando o perfil desejado, sendo que esse não deve ter saliências ou cantos vivos.

A figura 64 classifica, de acordo com Spies (17), as formas mais comuns que podem ser obtidas por meio de rolamento.






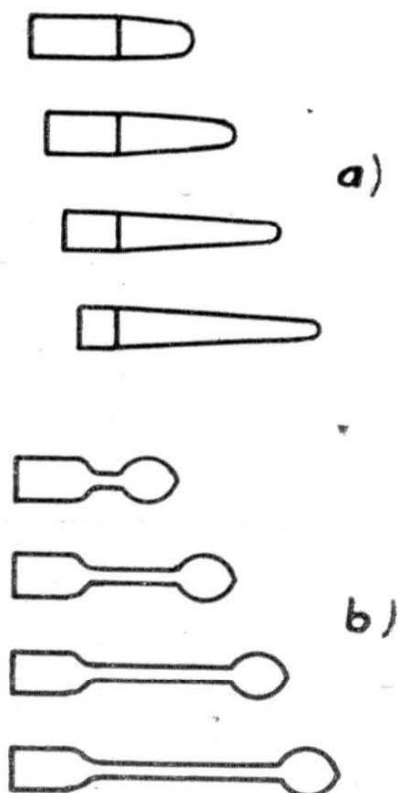
<i>Mancira de laminar</i>	<i>Perfil da Seção</i>	<i>Exemplos</i>
Setores entalhados com variação contínua da seção	Forma única, superfície variando constantemente	
	Forma e superfície constantemente variáveis	
Setores entalhados com variação brusca da seção	Forma constante	
	Variação brusca da superfície	
	Variação brusca da forma e da superfície	

Fig. 64 - Possibilidades de forjamento por rolo. Spies (17).

O coeficiente de esticamento, isto é, a relação da seção antes e a seção depois do rolamento, dentro de um mesmo entalhe, não deve ser maior que 1,45.

Quando esse coeficiente é menor que 1,45 o rolamento pode ser feito numa única ranhura. Caso o coeficiente seja maior o



rolamento ainda poderá ser feito numa única ranhura si a modificação da seção se der num sentido único como, por exemplo, no caso de uma barra cônica (fig. 65, a). Nêsse caso, havendo comprimento suficiente, deve-se fazer o avanço por estágios, com rotação de 90° na base.

Si houver variação em duas direções, como no caso de peças em forma da haste com duas cabeças, com coeficiente de esticamento maior que 1,45, essas só podem ser roladas em várias impressões. (Fig. 65, b).

Fig. 65 - Rolamento em diversos passes (13):  
a) numa única ranhura;  
b) em diversas ranhuras

W. M. Aristow, de acôrdo com referências de Bruchanow e Rebelski (13), estabeleceu uma fórmula que dá o número mínimo  $n$  de impressões. É a seguinte:

$$n = \frac{\log S_g - \log S_f}{\log K_e}$$

onde

$S_g$  = Seção da geratriz

$S_f$  = Seção final do forjado

$K_e$  = coeficiente de esticamento, que deve ser mantido entre 1,2 e 1,3.

Outras considerações de ordem prática são as seguintes (13):

No rolamento deve-se levar em conta o espixamento da peça em consequência da aceleração na saída da matriz. Assim, quando projetado o entalhe, êsse deve ser feito no sentido longitudinal menor de 3,5 a 4,5% em relação à peça acabada, sempre levando-se em conta a contração.

Os seguintes valores de contração podem ser adotados:

Temperatura °C	Contração %
900	1,0
950	1,09
1050	1,25
1100	1,32

No rolamento a peça bruta é sempre alargada, o que deve ser levado em conta ao se fixar a largura da impressão (fig. 64, a). O valor para o alargamento  $b$  é calculado pela fórmula:

$$b = 0,3 \text{ até } 0,5 (h_0 - h)$$

O coeficiente 0,5 deve ser admitido no começo do rolamento, diminuindo até 0,3 com o abaixamento da temperatura.

Ainda de acordo com (13) o plano de separação das impressões (isto é, o plano de separação da seção transversal entre os setores superior e inferior) é, ao rolar-se perfis simétricos, fixado segundo o eixo de simetria e em perfis assimétricos pela linha que divide aproximadamente a peça em partes iguais. Como precaução adicional, ao se rolarem perfis assimétricos, os raios  $R'$  e  $R''$  (63, b) devem ser iguais para evitar entortamento do boneco na direção do raio menor.

A folga entre os dois setores deve ser de 1 a 3 mm, escolhendo-se portanto (figura 63, b) de acordo com a profundidade de impressão.

<i>Profundidade da impressão</i>	$\alpha$
até 10 mm	3°
17 mm	5°
24 mm	7°
35 mm	10°

A inclinação das paredes dianteira e traseira deverá ser duas vezes maior que a das paredes laterais. Essa inclinação deve aumentar na direção do operador.

Os raios internos de arredondamento das impressões podem ser tirados da expressão  $r_1 = 0,5 (h_0 - h)$  e os externos  $r_2$  (na linha de separação) =  $0,2$  a  $0,3 (h_0 - h)$

Quanto à determinação da geratriz de uma peça destinada a rolamento são as seguintes as recomendações de Aristow, segundo (13):

Verifica-se a seção da geratriz pela fórmula

$$S_g = (1,1 \text{ a } 1,15) S_{\max}$$

onde

$$S_g = \text{Seção de geratriz}$$

$$S_{\max} = \text{Seção máxima da peça forjada}$$