

**ESCOLA POLITÉCNICA
DA
UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO**

Sys. 1849801

**Projeto de Ferramenta
de
Forjamento
(Parte I)**

Aluno : Marcos Auad
Orientador : Fernando A. da Costa Nery

1989

new 185

DEDICATÓRIA

Serviço de Bibliotecas
Biblioteca de Engenharia Mecânica

Às pessoas que lutam ou lutaram a vida toda por ideais,
em especial aos meus avós e pais.

AGRADECIMENTOS

Ao Prof. Fernando A. da Costa Nery pela orientação e atenção prestada sempre quando solicitada, e em especial a minha irmã Denise Avad pelo apoio no trabalho de correção e a namorada Maria A. Ganzerli devido ao trabalho de digitação, além da compreensão, carinho e incentivo.

ÍNDICE

1) INTRODUÇÃO

1.1) OBJETIVOS DO TRABALHO.	1
1.2) JUSTIFICATIVAS DO TRABALHO.	2

2) PROCESSO DE FORJAMENTO

2.1) CARACTERÍSTICAS DO PROCESSO.	
2.1.A) DEFINIÇÃO.	3
2.1.B) CLASSIFICAÇÃO.	3
2.1.B.1) SEGUNDO O ESTADO TÉRMICO DA PEÇA.	
- PROCESSO DE CONFORMAÇÃO A FRIO.	4
- PROCESSO DE CONFORMAÇÃO A QUENTE.	4
2.1.B.2) SEGUNDO O TIPO DE CONFORMAÇÃO.	
- FORJAMENTO LIVRE.	6
- FORJAMENTO EM MATRIZ FECHADA.	24
2.1.C) PROPRIEDADES DE PEÇAS FORJADAS.	
- CUSTOS DE FABRICAÇÃO.	30
- PROPRIEDADES MECÂNICAS.	31
- ACABAMENTO SUPERFICIAL.	33
- PROPRIEDADES DIMENSIONAIS.	35
2.1.D) FALHAS EM PEÇAS FORJADAS.	
- FALTA DE REDUÇÃO.	38
- TRINCAS.	38
- GOTA FRIA.	43
- INCRUSTAÇÃO DE ÓXIDOS.	43
- DESCARBONETAÇÃO.	44

- QUEIMA DO MATERIAL.	45
- ERROS DIMENSIONAIS.	45
2.2) FATORES DE INFLUÊNCIA.	
2.2.A) FATORES DE NATUREZA MECÂNICA.	
- TEMPERATURA.	48
- VELOCIDADE DE DEFORMAÇÃO.	57
- GRAU DE DEFORMAÇÃO.	61
- LUBRIFICAÇÃO.	64
- FERRAMENTA.	76
2.2.B) FATORES DE NATUREZA METALÚRGICA.	
- COMPOSIÇÃO QUÍMICA.	79
- MICROESTRUTURA.	80
2.3) MATERIA PRIMA PARA FORJAMENTO.	
2.3.A) AÇOS.	81
2.3.B) METAIS NÃO FERROSOS.	
- COBRE.	91
- LATÃO.	92
- BRONZE.	93
- ALUMÍNIO.	94
- TITÂNIO.	102
2.4) ENSAIOS DE CONFORMABILIDADE.	
2.4.A) ENSAIO DE TRAÇÃO.	104
2.4.B) ENSAIO DE COMPRESSÃO.	109
2.4.C) ENSAIO DE TORÇÃO.	111
2.4.D) ENSAIO DE ANEL.	115

3) ANÁLISE MECÂNICA DO PROCESSO DE FORJAMENTO

3.1) MÉTODO DE SLAB.	119
3.2) EXEMPLO.	125

4) FERRAMENTAS PARA FORJAMENTO

4.1) PROPRIEDADES MECÂNICAS.	
4.1.A) RESISTÊNCIA A ESFORÇOS MECÂNICOS.	131
4.1.B) RESISTÊNCIA A ESFORÇOS TÉRMICOS.	132
4.2) CARACTERÍSTICAS CONSTRUTIVAS.	
4.2.A) FORJAMENTO LIVRE.	
4.2.A.1) TENAZES.	133
4.2.A.2) FERRAMENTAS DE CONFORMAÇÃO.	
- MODELAGEM SIMPLES.	134
- ESTAMPOS.	139
4.2.B) FORJAMENTO EM MATRIZ.	
4.2.B.1) MATRIZES DE CONFORMAÇÃO.	
- QUANTO A FORMA.	141
- QUANTO AO SISTEMA DE ALINHAMENTO.	149
- QUANTO A CAVIDADE DA BACIA DE REBARBA.	151
- QUANTO A GEOMETRIA.	154
4.2.B.2) MATRIZES DE REBARBAÇÃO.	176
4.3) MATERIAIS PARA FERRAMENTAS.	
4.3.A) MATERIAIS PARA MATRIZES DE CONFOR- MAÇÃO E ESTAMPOS.	
- AÇOS PARA FORJAMENTO A FRIO.	182
- AÇOS PARA FORJAMENTO A QUENTE.	185
4.3.B) MATERIAIS PARA MATRIZES DE REBARBAÇÃO.	187

4.4) TRATAMENTO TÉRMICO DAS FERRAMENTAS.

4.4.A) RECOZIMENTO.188

4.4.B) TEMPERA.192

4.4.C) REVENIDO.196

4.5) PROCESSOS DE FABRICAÇÃO DE FERRAMENTAS DE CONFORMAÇÃO.

4.5.A) USINAGEM.197

4.5.B) CONFORMAÇÃO.198

4.5.C) ELETROEROSÃO.201

5) MÁQUINAS PARA FORJAMENTO

5.1) TIPOS DE MÁQUINAS.

5.1.A) MARTELOS DE FORJAR.204

5.1.B) PRENSAS DE FRICÇÃO.208

5.1.C) PRENSAS EXCÊNTRICAS.211

5.1.D) PRENSAS HIDRÁULICAS.212

5.1.E) PRENSAS RECALCADORAS HORIZONTAIS.215

5.2) SELEÇÃO E ESPECIFICAÇÃO.216

APÊNDICE

APÊNDICE A - TABELAS DE (C) E (m) REFERENTES AO CAPÍTULO 3.

APÊNDICE B - TABELAS DE EQUIVALÊNCIA ENTRE MATERIAIS.

BIBLIOGRAFIA

ÍNDICE DE FIGURAS

1) Temperatura de conformação em função da porcentagem de carbono em aços.	5
2) Forjamento livre.	7
3) Operação de recalagem.	8
4) Recalcado de uma peça numa posição extrema.	8
5) Recalcado de uma peça numa posição intermediária.	9
6) Matriz de recaladora horizontal para fabricação de um eixo pinhão em 4 passadas.	10
7) Eletrorecalagem de uma peça.	11
8) Forjamento por estiramento.	13
9) Estiramento de um lingote com auxílio de manipulador.	14
10) Estiramento seguido de alizamento em uma peça.	15
11) Estiramento realizado sob moldes.	16
12) Estiramento de barras redondas para obtenção de perfis.	17
13) Estiramento para confecção de tubos.	18
14) Efeito sobre uma barra de seção quadrada que sofre dobramento.	19
15) Operação de dobramento utilizando moldes.	19
16) Operação de dobramento utilizando ferramenta.	20
17) Operação de corte.	21
18) Operação de furacão no forjamento.	22
19) Operação de estrangulação.	23
20) Operação de modelagem.	24

21) Forjamento em matriz fechada.	25
22) Seqüência de fases no forjamento em matriz fechada, indicando a união destas na etapa final.	26
23) Estampo de corte.	27
24) Matriz contendo várias fases de um forjado.	28
25) Formas de escoamento do material em matriz fechada.	29
26) Comparação de custo de material em distintos métodos de fabricação.	31
27) Disposição das fibras em uma rosca.	32
28) Orientação das fibras de uma peça forjada em recalçadora de 4 fases.	33
29) Estados superficiais de uma peça forjada.	33
30) Tolerâncias em peças forjadas.	36
31) Peça com trinca superficial longitu- dinal.	39
32) Propagação de trinca nas várias fases de um forjado devido a ferramenta desgastada.	40
33) Peça com trinca superficial transver- sal.	40
34) Trinca longitudinal provocada pelo dobramento das fibras.	41
35) Trinca interior em uma peça.	42
36) Trinca na região de rebarba.	42
37) Orientação das fibras interiores mos- trando o dobramento de uma sobre a outra.	43
38) Desalinhamento das ferramentas oca- sionando momento de tombamento.	46
39) Ferramenta montada com desalinhamento.	46

47) Diagrama de recristalização.	49
41) Propriedades mecânicas devido ao tamanho de grão.	51
42) Condutibilidade térmica em aços-carbono e suas ligas.	57
43) Gráfico da perda de calor em função do tempo de contato peça ferramenta.	55
44) Calor gerado por Kg de material (devido à conformação) que foi absorvido pela ferramenta em função da velocidade de deformação para 3 tipos de prensas.	56
45) Resistência à conformação de aço C15 em função da temperatura para vários graus de deformação.	56
46) Relação entre tensão aplicada e velocidade de discordâncias para diversos materiais.	59
47) Gráfico da resistência de conformação em função da velocidade de deformação (material Ck 15).	60
48) idem anterior (material Ck 45).	60
49) idem anterior (material 16 Mn Cr 15).	61
50) Gráfico da resistência de conformação em função do grau de deformação.	64
51) Rugosidade superficial de um material metálico.	66
52) Esquema de aparelho utilizado na determinação da rugosidade.	67
53) Pontos de contato entre duas superfícies metálicas, mostrando a área real e a área aparente de contato.	68
54) Formação de dobras na peça acabada devido o mau dimensionamento das pré-formas.	77
55) Formação de dobras na peça acabada pelo mau dimensionamento do canal de rebarba.	78

56) Corpos de prova para o ensaio de tração.	104
57) Diagrama geral "tensão-deformação".	105
58) Diagrama "tensão-deformação" de um metal dútil, apresentando o fenômeno de escoamento.	106
59) diagrama "tensão-deformação" de um material com pouca capacidade de deformação.	107
60) Representação esquemática das propriedades resiliência e tenacidade.	108
61) Avaliação da rigidez entre dois materiais.	109
62) Torção em um corpo de prova.	111
63) Corpo de prova para o ensaio de torção.	112
64) Diagrama "tensão-deformação" obtido do ensaio de torção mostrando o limite de escoamento.	114
65) Corpo de prova do ensaio de anel mostrando a variação no diâmetro interno após conformação.	117
66) Gráfico de calibração dos valores do coeficiente de atrito.	118
67) Modelo de cavidade utilizado.	120
68) Principais características da biela a ser forjada.	125
69) Tipos de tenazes.	134
70) Ferramentas manuais para forjamento livre.	135
71) Operações de forjamento livre com ferramentas manuais.	136
72) Ferramentas para forjamento livre de fixação em máquina.	137
73) Ferramentas para forjamento livre (com geometria específica) de fixa-	

ção em máquina.	139
74) Estampo de forjamento livre.	140
75) Esquema de matriz simples de acaba- mento.	142
76) Matriz simples bipartida.	144
77) Tipos de blocos de impressão.	144
78) Bloco de impressão montado em matriz.	145
79) Ferramenta de matriz múltipla.	146
80) Disposição simétrica em matriz múlti- pla.	147
81) Ferramenta de matriz múltipla bipar- da.	148
82) Ferramenta de matriz múltipla bipar- tida fixa por atrito.	149
83) Centragem de ferramentas através de colunas.	150
84) Centragem de ferramentas por acantos macho-fêmea.	151
85) Bacia de rebarba localizada na ferra- menta superior.	152
86) Peça confeccionada com bacia de re- barba na ferramenta superior.	152
87) Bacia de rebarba localizada na ferra- menta inferior.	153
88) Bacia de rebarba simétrica.	153
89) Bacia de rebarba livre.	154
90) Peça confeccionada com bacia de re- barba livre.	154
91) Peça forjada com eixo principal curvo.	158
92) Peça com linha de rebarba curvada as- simétrica.	158
93) Linha de rebarba localizada em região que não coincide com alguma aresta da peça.	158

94) Linha de rebarba localizada em região de maior perímetro da peça.	159
95) Superfície com raios de arredondamento.	160
96) Dimensões em peças forjadas.	162
97) Esquema de peça indicando parâmetros de espessura, comprimento de parede e raio de curvatura.	164
98) Esquema indicando as dimensões do canal e bacia de rebarba.	165
99) Rebarba e profundidade de corte.	166
100) Corpo envolvente de peças forjadas.	168
101) Estampo simples de rebarbação.	176
102) Estampo de rebarbação com fixação horizontal.	177
103) Estampo de rebarbação com fixação vertical.	177
104) Estampo de rebarbação com sistema de extração de rebarba.	178
105) Estampo de rebarbação com sistema de extração da peça.	178
106) Punção indicando o afastamento (s).	179
107) Valores do ângulo da face interna e espessura de apoio da peça em estampos de rebarbação.	180
108) Ferramenta de recalagem que sofreu alto grau de descarbonetação e formação de carepa.	194
109) Fabricação de ferramenta por conformação.	199
110) Dispositivo para fabricação de ferramenta por conformação a frio.	200
111) Martelo de queda livre acionado por tambores de atrito.	206
112) Martelo de ação.	207

113) Prensa de fricção de três discos.	208
114) Prensa de fricção de quatro discos.	210
115) Prensa excêntrica de uma e duas bie- las respectivamente.	212
116) Prensa hidráulica.	214
117) Recalcadora horizontal.	216

ÍNDICE DE TABELAS

1) Limite de tolerâncias para diâmetros de eixos pinhões conformados a frio.	36
2) Tabela da porcentagem de contração de material devido ao resfriamento a partir de suas respectivas temperaturas de forjamento à quente.	47
3) Temperatura de conformação a quente para diversos materiais.	52
4) Principais tipos de lubrificantes e respectivos coeficientes de atrito.	73
5) Tipo e composição química de aços para conformação a frio que não permitem tratamento térmico após forjamento.	82
6) Propriedades mecânicas de aços para conformação a frio conforme tabela 5.	82
7a ₁) Tipos e características mecânicas de aços para forjamento a quente.	83
7a ₂) Tipos e características mecânicas de aços para forjamento a quente.	84
7b ₁) Temperaturas de tratamento térmico e empregos usuais de aços para forjamento a quente conforme tabela 7a ₁	85
7b ₂) Temperaturas de tratamento térmico e empregos usuais de aços para forjamento a quente conforme tabela 7a ₂	86
8) Tipo e composição química de aços para conformação a frio que permitem cementação após forjamento.	87
9) Propriedades mecânicas de aços para forjamento a frio conforme tabela 8.	87
10) Tipo e composição química de aços para deformação a frio que permitem têmpera e revenido após forjamento.	88
11) Propriedades mecânicas de aços para forjamento a frio conforme tabela 10.	88

12) Tipo e composição química de aços para forjamento a frio que são resistentes a corrosão.	89
13) Propriedades mecânicas de aços para forjamento a frio conforme tabela 12.	89
14) Tipo e composição química de aços-inoxidáveis para forjamento a frio.	90
15) Propriedades mecânicas de aços-inoxidáveis para forjamento a frio conforme tabela 14.	90
16) Tipos de cobsres utilizados para forjamento.	92
17) Principais latões utilizados para forjamento.	93
18a) Barras de alumínio utilizadas para forjamento a frio.	95
18b) Perfis de alumínio utilizados para forjamento a frio.	96
19a ₁) Barras de ligas de alumínio (AlMg e AlMgMn) utilizadas para forjamento.	97
19a ₂) Barras de ligas de alumínio (AlSi e AlMgSi) utilizadas para forjamento.	98
19a ₃) Barras de ligas de alumínio (AlCuMg) utilizadas para forjamento.	99
19b ₁) Perfis de ligas de alumínio utilizadas para forjamento.	100
19b ₂) Perfis de ligas de alumínio (AlSi e AlMgSi) utilizadas para forjamento.	101
20) Titânio e suas ligas utilizadas para forjamento.	103
21) Dilatação percentual dos materiais no forjamento a quente.	155
22) Dimensões normalizadas de altura e espessura de parede para matrizes de forjamento.	156
23) Dimensões normalizadas de ângulos de saída.	159

24)	Dimensões normalizadas de raios de arredondamento.	161
25)	Sobremetal indicado para o forjamento em matriz fechada.	163
26)	Dimensões normalizadas de espessura, comprimento de parede e raios de curvatura em peça forjada.	164
27)	Dimensões normalizadas do canal e bacia de rebarba.	165
28)	Tolerâncias e afastamentos admissíveis para dimensões de comprimento, largura, altura (diâmetros), deslocamentos, excentricidades, rebarba e profundidade de corte -Qualidade F de forjamento.	171
29)	idem anterior -Qualidade E de forjamento.	172
30)	Tolerâncias e afastamentos admissíveis para dimensões de espessura e marcas de extratores -Qualidade F de forjamento.	173
31)	idem anterior -Qualidade E de forjamento.	174
32)	Tolerâncias para flexão e empenamento admissíveis.	175
33)	Afastamentos admissíveis para raios de reentrâncias e arredondamentos de cantos.	175
34)	Afastamentos admissíveis para distâncias entre centros.	175
35)	Dimensões normalizadas para o afastamento (s) nos punções.	179
36)	Aços para ferramentas de trabalho a frio que possibilitam têmpera superficial.	183
37)	Aços para ferramentas de trabalho a frio que possibilitam têmpera total.	184
38)	Aços para ferramentas de trabalho a quente.	186

39a) Temperaturas de recozimento brando para aços de ferramentas destinadas ao trabalho a frio.	190
39b) idem anterior (destinadas ao trabalho a quente).	191
40a) Temperaturas e meios de têmpera para aços de ferramentas destinadas ao trabalho a frio.	193
40b) idem anterior (destinadas ao trabalho a quente).	194

CAPÍTULO

1

Introdução

1) INTRODUÇÃO

1.1) OBJETIVOS DO TRABALHO:

O desenvolvimento de um projeto de ferramenta de forjamento envolve o estudo sistemático do processo de uma maneira global. Necessita-se então o conhecimento dos tipos de forjamento existentes, suas características, particularidades e máquinas adequadas para cada operação. Associa-se ainda conceitos mecânicos e metalúrgicos, ligados intimamente com o fenômeno da conformação plástica dos materiais, através dos mecanismos da deformação e os fatores de influência.

Por meio deste conhecimento é possível formular modelos matemáticos representativos do processo, o que possibilita a quantização de algumas variáveis essenciais para o dimensionamento da ferramenta.

No projeto em si, além das características apresentadas, deve ser observado o conhecimento adquirido através do tempo que ditam certos detalhes construtivos. Tais considerações estão descritas nas normas técnicas e são abordadas em capítulos subsequentes.

O trabalho possibilita assim uma visão mais detalhada do processo de conformação plástica, aprofundando-se no tópico de forjamento, na medida que a maioria dos conceitos são válidos para outros processos de conformação. Um projetista é capaz com o conteúdo deste texto, dimensionar

adequadamente a ferramenta de trabalho, utilizando técnicas modernas empregadas hoje em dia, sendo alguma delas de uso prático em empresas nacionais como pôde ser verificado em visitas à Belzer e Corneta.

1.2) JUSTIFICATIVAS DO TRABALHO:

Dos processos de fabricação conhecidos, o de conformação plástica de metais toma uma grande importância pela sua facilidade de execução, maquinário adequado disponível, flexibilidade, produtividade, perda de material (refugo), custos de operação e qualidade do produto acabado.

A combinação destas características torna viável a implantação desse sistema produtivo, tendo em vista o grande número de peças que podem ser fabricadas e as propriedades que elas apresentam.

Torna-se pertinente um estudo detalhado do processo de conformação, fornecendo subsídios para a elaboração adequada e precisa do projeto de ferramenta de forjamento que assume o papel principal na sequência de fabricação.

Assim, para que se cumpra os objetivos, obtendo-se o máximo rendimento do processo, deve-se ter atenção especial com a ferramenta de trabalho quanto ao seu processo de fabricação, formas construtivas, características geométricas e normas de dimensionamento.

CAPÍTULO

2

Processo de Forjamento

2) PROCESSO DE FORJAMENTO

2.1) CARACTERÍSTICAS DO PROCESSO:

2.1.A) DEFINIÇÃO

O forjamento se caracteriza por um processo de conformação plástica de material através do qual, partindo-se de uma peça de trabalho com uma geometria simples, obtida previamente de outros processos de fabricação como barras laminadas ou chapas, chega-se a uma forma desejada onde o grau de complexidade geométrica, mecânica e dimensional atende as mais diferentes aplicações na indústria moderna.

2.1.B) CLASSIFICAÇÃO

Podemos considerar que o processo de forjamento apresenta uma evolução contínua desde o início da nossa civilização quando o homem passou a utilizar os metais, trabalhando-os convenientemente para a fabricação de seus utensílios de caça. Neste caminho de aperfeiçoamento contínuo do processo distingue-se claramente, hoje em dia, dois tipos de classificação.

2.1.B.1) SEGUNDO O ESTADO TÉRMICO DA PEÇA

PROCESSO DE CONFORMAÇÃO A FRIO

Neste caso, a peça a ser trabalhada não sofre nenhum processo térmico de aquecimento anterior ao seu manuseio, isto é: o operador lidará com o material no seu estado normal e à temperatura ambiente. Pelo fato do material estar à baixa temperatura (ambiente) exige-se a aplicação de altas tensões para obter a deformação desejada. Em vista disto, este é um processo que necessita um controle rigoroso das tensões aplicadas a fim de evitar a ruptura da peça. No entanto, este tipo de forjamento possibilita algumas vantagens importantes como: um melhor estado superficial das peças propiciando condições mais favoráveis a tratamentos térmicos posteriores; maior exatidão dimensional pela ausência de aquecimento, este provocaria perdas de material devido a descarbonetação, presença de carepa e aumento de redução (abordadas com mais detalhes no capítulo 2.1.D); e maior resistência da peça pelo fenômeno de encruamento provocada durante o trabalho de deformação.

PROCESSO DE CONFORMAÇÃO A QUENTE

A maioria das operações de forjamento utilizam a peça de trabalho a quente, ou seja, esta é aquecida à temperaturas que variam de material, mas que no entanto apresentam uma faixa ampla, isto é: uma variação de 300°C

a 450°C atingindo um limite máximo de 100°C a 150°C abaixo da linha de solidificação do material como podemos constatar no gráfico da figura 1.

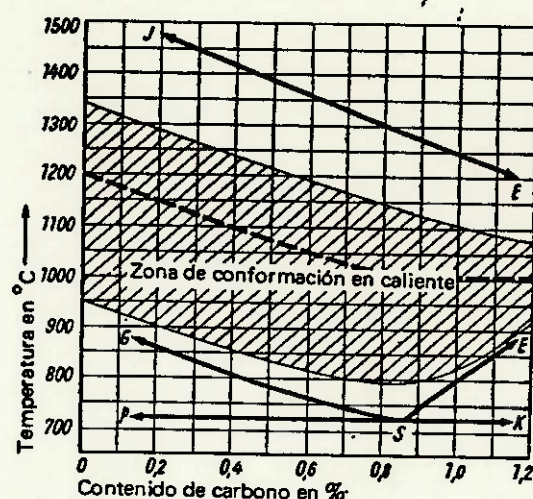


FIGURA 1: Temperatura de conformação em função da porcentagem de carbono em aços.

Esta técnica possibilita a redução da resistência à deformação além de outras particularidades convenientes ao processo e que serão abordadas detalhadamente no capítulo 2.2.A.1.

2.1.B.2) SEGUNDO O TIPO DE CONFORMAÇÃO

Este critério de classificação não se relaciona com estado da peça a ser trabalhada, mas sim está ligada diretamente com a maneira pela qual esta se deforma. Sob tal

ponto de vista podemos destacar dois processos que se distinguem quanto suas características e aplicações.

FORJAMENTO LIVRE

O forjamento livre consiste em uma operação de conformação do material realizada sob ferramentas geometricamente simples e baratas. Obtem-se com isto peças com pré-formas adequadas que sofrerão trabalhos posteriores como conformações em matrizes fechadas. Eventualmente o produto deste processo vem a ser a forma final da peça como por exemplo: âncoras de navios, ganchos de moitões e picaretas.

A deformação plástica é exercida pela aplicação de pressões manuais, onde a peça é acionada em uma bigorna recebendo golpes de um martelo de mão, ou mecanicamente através de prensas e martelos de forjas. Neste último caso, substitui-se a bigorna pela mesa com selim e o martelo de mão pelo urso com a ferramenta superior (ver figura 2). A utilização do trabalho mecânico para conformação possibilita o forjamento de peças com maiores dimensões, justificando claramente o seu emprego industrial. No entanto, uma característica importante em ambos os processos é a habilidade do operador. A experiência e manuseio adequado das ferramentas de trabalho, determinam a qualidade do forjado, bem como a obtenção de geometrias diversas.

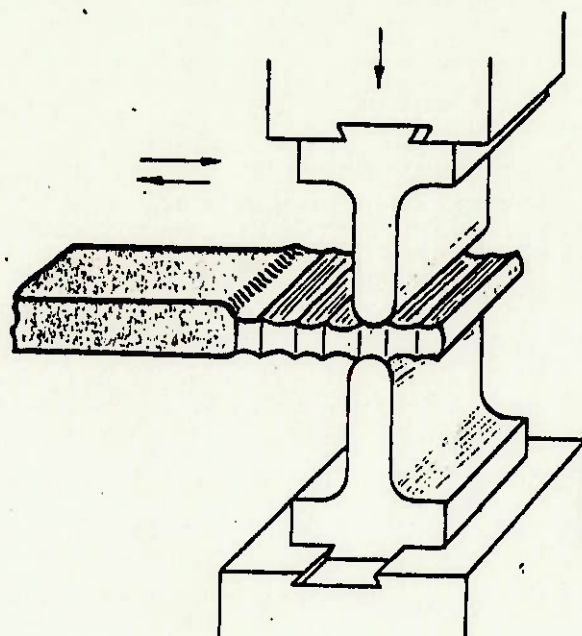


FIGURA 2: Forjamento livre.

Pela própria característica artesanal do forjamento livre, este tipo de processo não é viável economicamente para seriados em grandes lotes, sendo mais conveniente nestes casos o forjamento em matrizes fechadas.

Podemos destacar uma série de operações executadas no forjamento livre e que são:

- Recalcagem

Visa-se especificamente o aumento da seção transversal de uma barra exercendo uma força de compressão na direção do eixo desta. Pode-se deformar a barra inteira, resultando

bolachas (ver figura 3) que servirão de matéria prima para confecção de engrenagens, ou em uma posição determinada desta como em suas extremidades e seções intermediárias (figuras 4 e 5).

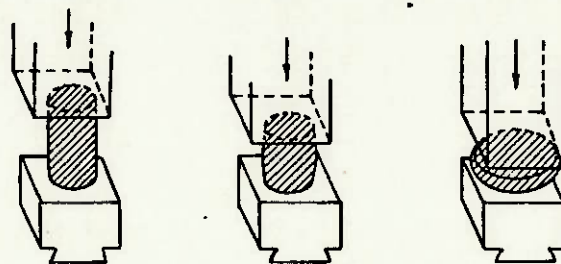


FIGURA 3: Operação de recalagem.

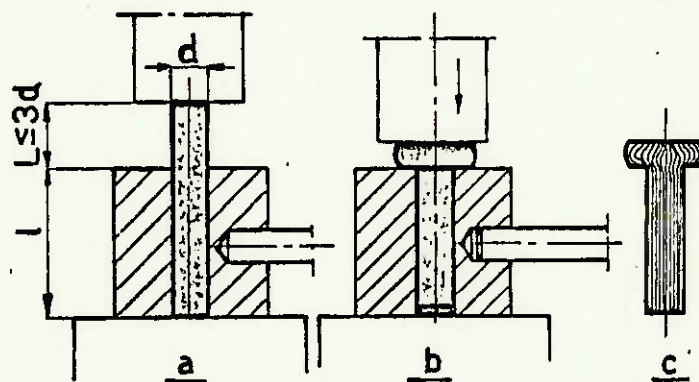


FIGURA 4: Recalcado de uma peça numa posição extrema.
 a) Fase inicial
 b) Fase final
 c) Distribuição das fibras na peça.

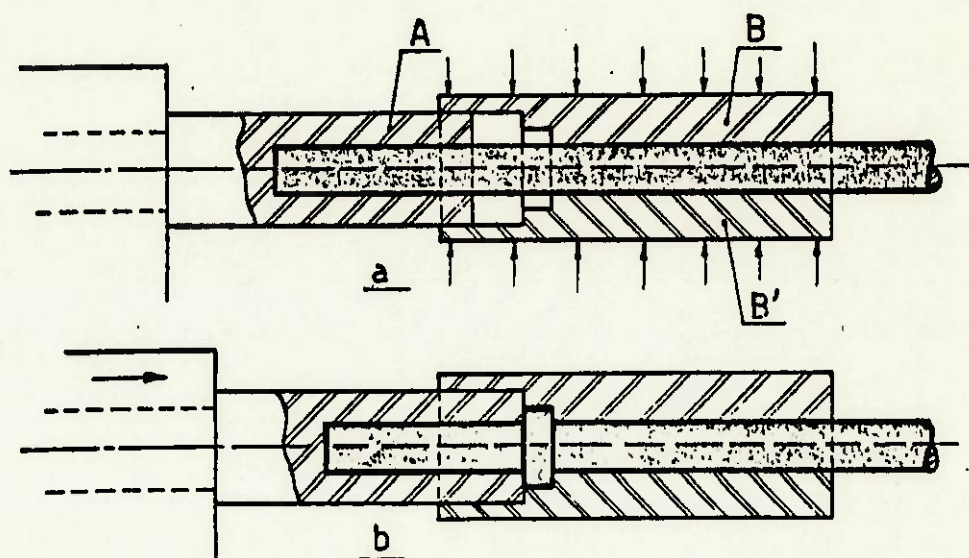


FIGURA 5: Recalcado de uma peça numa posição intermediária
a) Fase inicial
b) Fase final.

O recalco é obtido por prensagem em prensas ou recaladoras horizontais. Estas últimas, se destacam no processo de recalcagem pela grande utilização na indústria devido a sua rentabilidade e rapidez de operação, sendo geralmente destinadas à peças de pequeno até médio tamanhos como eixo, pinhões e parafusos. Para peças de grandes dimensões, pela dificuldade de conformação, recomenda-se as prensas verticais e velocidades de deformações menores o que acarreta uma produção mais lenta.

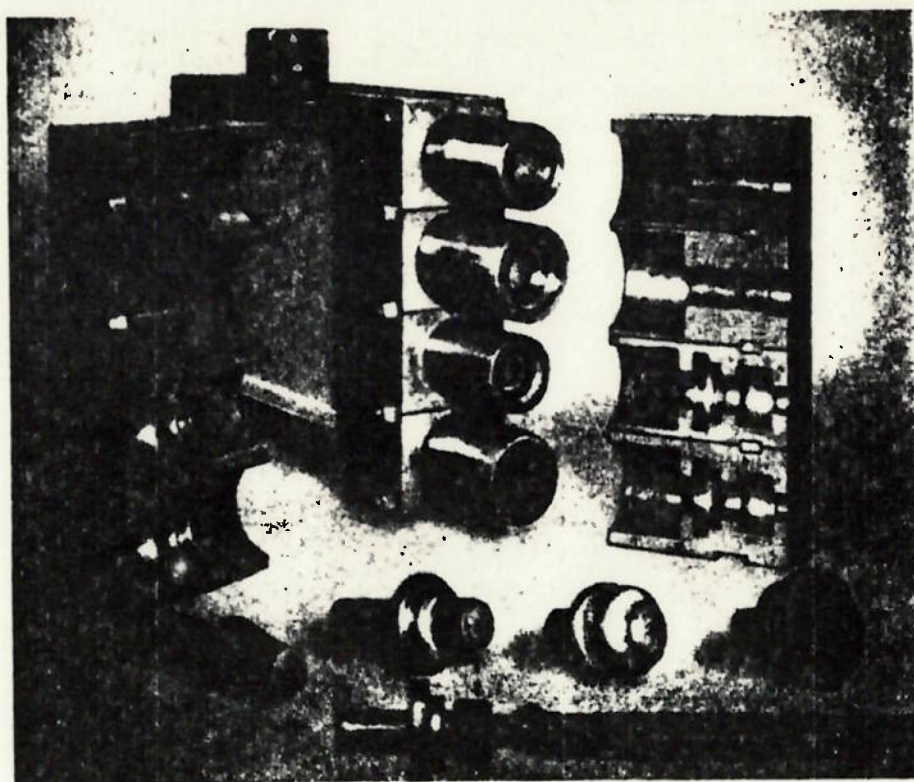


FIGURA 6: Matriz de recalçadora horizontal para fabricação de um eixo pinhão em 4 passadas.

Uma subclassificação do processo em questão é a eletro-recalçagem. A diferença fundamental que os distingue está no aquecimento do material executado apenas na região de interesse de deformação. O aquecimento é provocado pela conversão de energia elétrica em térmica por dissipação. A porção da peça a ser deformada assume o papel de elemento resistivo no circuito e reside entre as ferramentas de trabalho A e C que funcionam como eletrodos (figura 7). A conformação ocorre simultaneamente ao aquecimento, ou seja, a medida que se diminui a resistência à deformação. Para

isto, a peça é colocada na máquina entre a ferramenta A e o carro B. Após a ajustagem da ferramenta C, definindo a distância (d) a ser recalçada, ocorre o deslocamento do carro B até que a extremidade da peça toque a ferramenta A. Neste instante fecha-se o circuito dando início à operação.

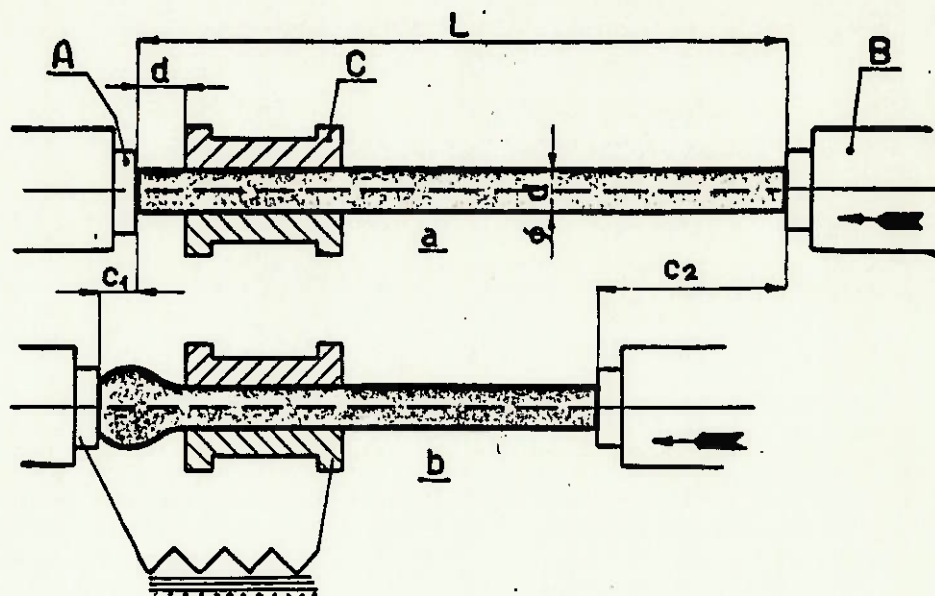


FIGURA 7: Eletrorecalcagem de uma peça
 a) Fase inicial
 b) Fase final
 c₂) Deslocamento do carro B
 c₁) Encurtamento da peça.

A eletro-recalcagem não apresenta o inconveniente da recalcagem simples a qual limita o comprimento da peça de trabalho com relação a sua espessura, isto é: o comprimento

não deve ser superior a 3 vezes o valor da espessura para evitar o fenômeno da flambagem, o que causaria deformações distorcidas e inconvenientes na peça. Na eletro-recalcagem praticamente não existe limite já que o aquecimento é localizado. A única restrição está na dimensão da máquina, fator limitante do comprimento de trabalho.

- Estiramento

O estiramento é uma operação com características opostas ao recalque. Pretende-se aqui o aumento de tamanho da peça em detrimento de sua espessura. Tal efeito é realizado por prensas que aplicam pressões de deformação perpendicularmente ao eixo da peça em pancadas sucessivas, fazendo o material escoar na direção de seu eixo e em suas laterais.

O efeito secundário que se obtém neste processo como o alargamento da peça exige que o operador a gire após o término da operação, rebatendo, em seguida, a parte alongada. Para uma diminuição deste efeito, pode-se girar a peça num sentido um quarto de volta a cada golpe da prensa ou então, girá-la um quarto de volta para a esquerda e em seguida à direita sucessivamente.

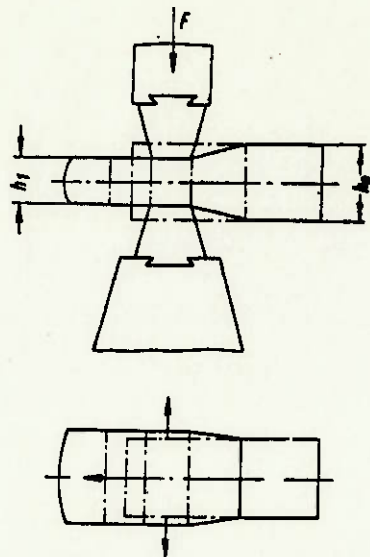


FIGURA 8: Forjamento por estiramento

 h_0) Altura anterior à conformação h_1) Altura posterior à conformação.

Para peças de grandes dimensões evitam-se as técnicas apresentadas acima, forjando-as em um único sentido, pois o tempo gasto para girá-las provoca seu resfriamento indesejável e a perda do custoso calor aplicado anteriormente, a não ser que sejam giradas por máquinas especiais comandadas pelo operador e que recebem o nome de manipuladores.

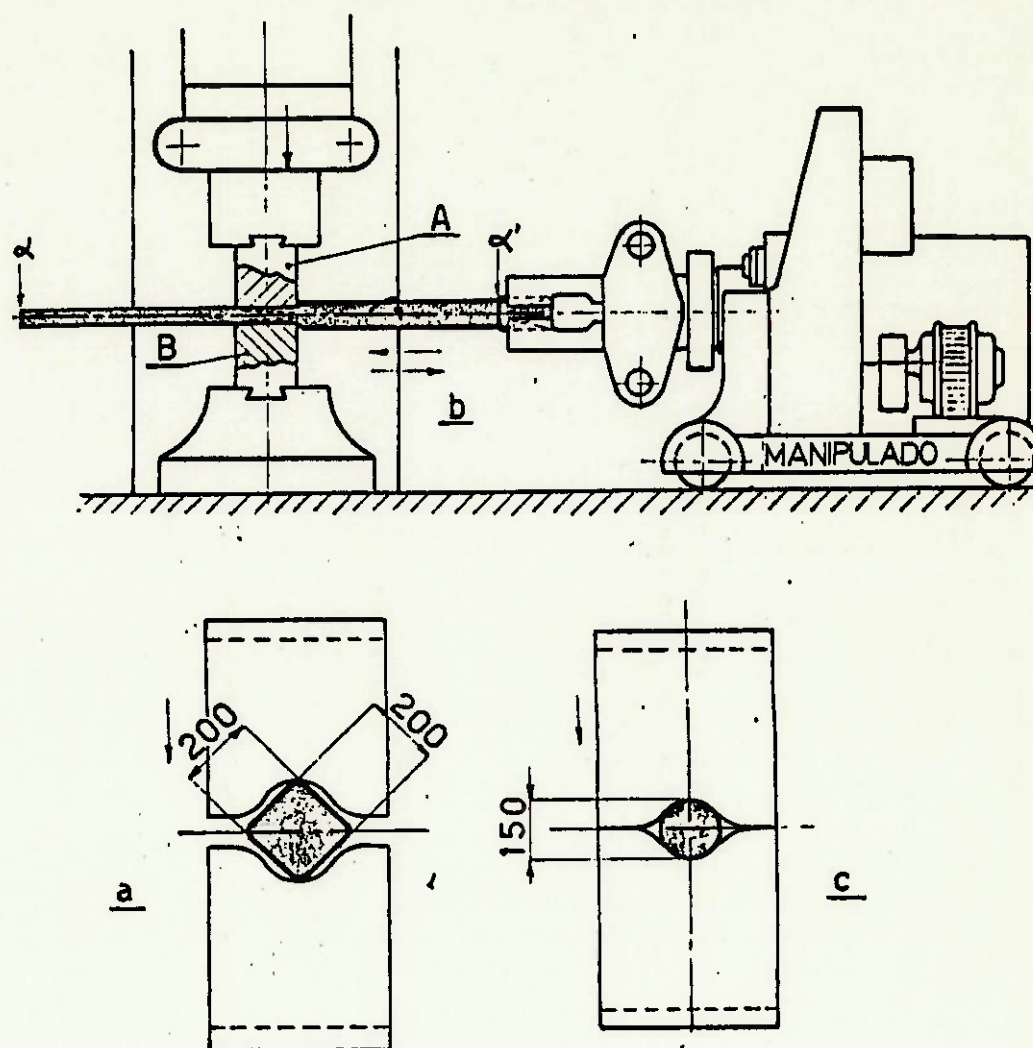


FIGURA 9: Estiramento de um lingote com auxílio de manipulador
 a) Seção inicial
 b) Operação
 c) Seção final.

As ferramentas utilizadas apresentam geralmente uma superfície abaolada que deixam sulcos nas peças. No caso de superfícies que necessitam melhor acabamento, procede-se a operação de alisamento.

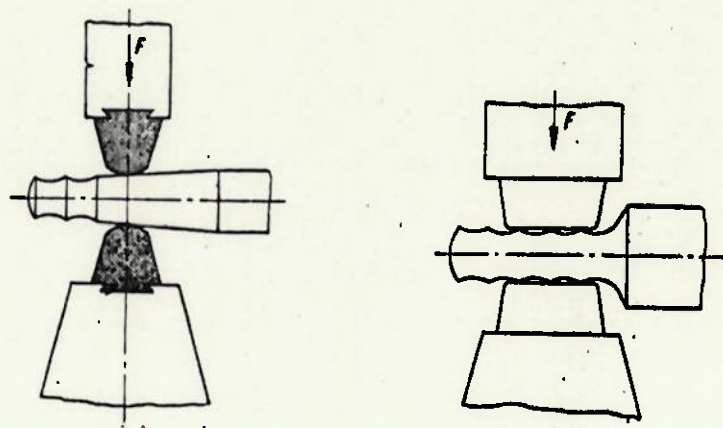


FIGURA 10: Estiramento seguido de alisamento em uma peça.

Pode-se obter também mudanças na geometria das peças, produzindo barras sextavadas, retangulares, etc. Exige-se, neste caso, grande habilidade do operador pois todas as operações citadas podem ser realizadas em moldes (ver figuras 11 e 12), principalmente quando se requerem dimensões mais restritas e melhores acabamentos superficiais.

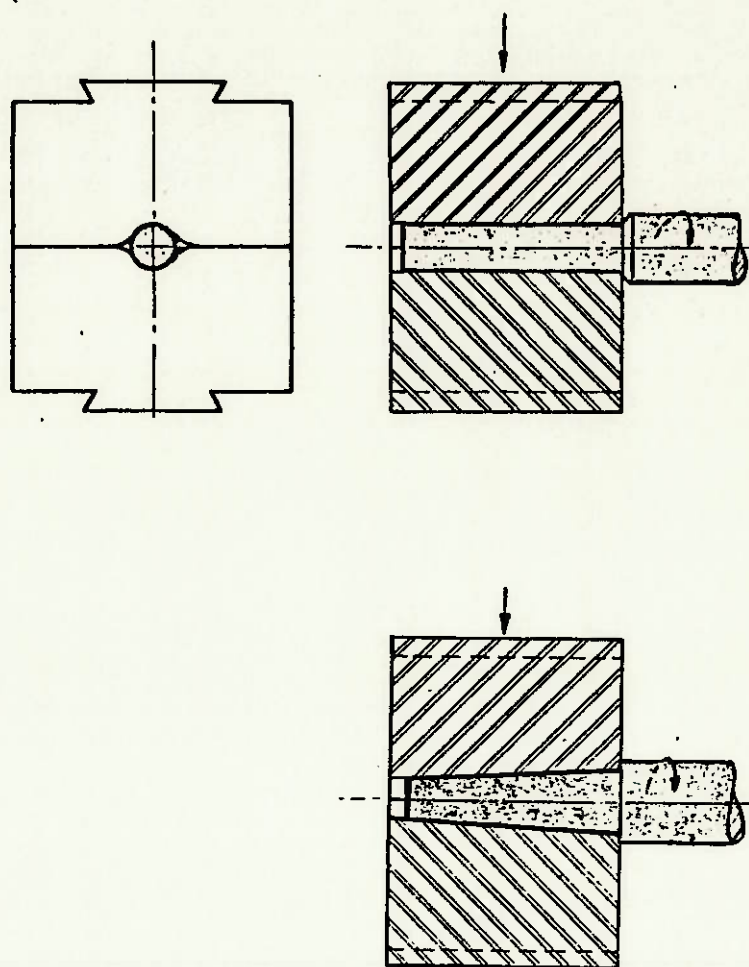


FIGURA 11: Estiramento realizado sob moldes.

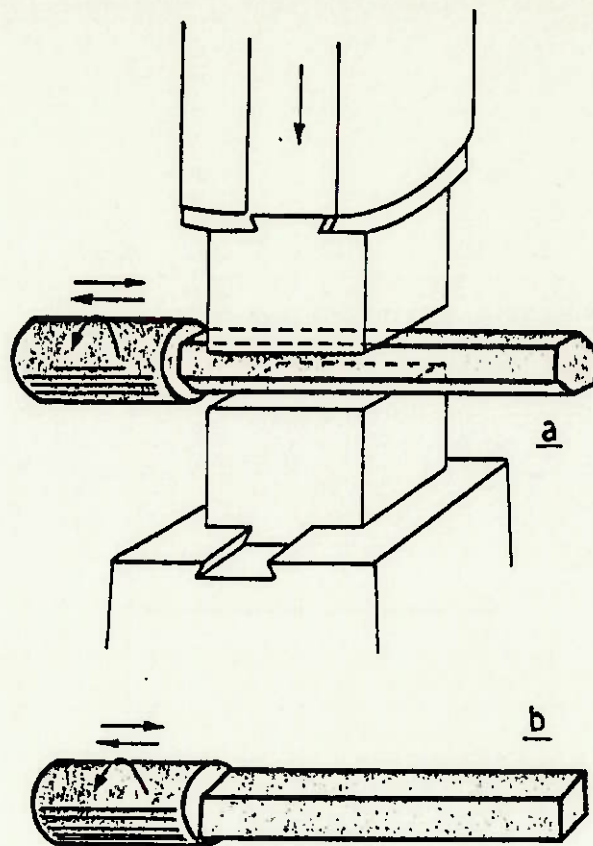


FIGURA 12: Estiramento de barras redondas para obtenção de perfis:
a) Sextavados
b) Quadrados.

Uma outra operação de estiramento frequentemente realizada é feita em tubos. Neste caso, a peça inicial é assentada em um mandril redondo colocado sobre a base da prensa. Esta aplica golpes repetidos na direção perpendicular ao eixo da peça na medida que se deslocam ao longo de sua extensão, provocando seu alongamento. Em seguida aplica-se golpes na direção do eixo da peça,

fazendo-a girar até que volte a posição inicial. Consegue-se com isto cilindros bem maiores que os iniciais.

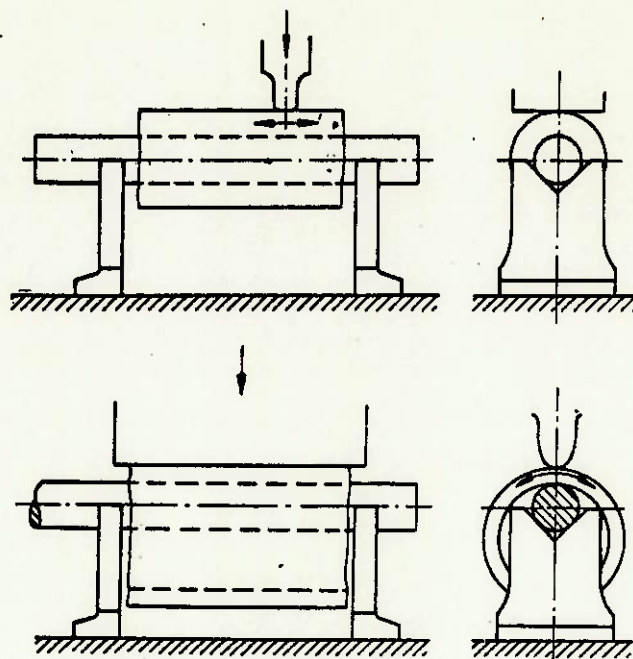


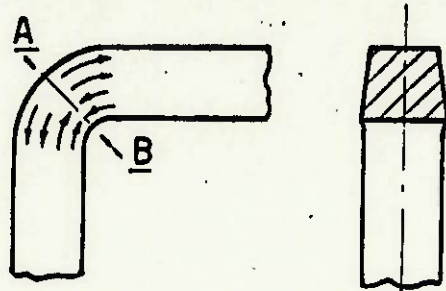
FIGURA 13: Estiramento para confecção de tubos.

- Dobramento

Basicamente destina-se à execução de peças que necessitam ser curvadas como árvore de manivelas. Pode-se obter ângulos diversos em peças com seções redondas, retangulares ou quadradas. Observa-se entretanto um alargamento e um estreitamento respectivamente nas superfícies internas e externas da peça na zona de deformação. Isto é decorrente da compressão que sofre as fibras do material na região de menor curvatura e a tensão destas na região de maior curvatura. Devido a este efeito as

peças de seção quadrada adquirem uma configuração trapezoidal como mostrado na figura 14.

A operação de dobramento realiza-se em marteletes exigindo-se vários golpes rápidos ou em prensas sob moldes onde a deformação é gradual.



Sec. A÷B

FIGURA 14: Efeito sobre uma barra de seção quadrada que sofre dobramento.

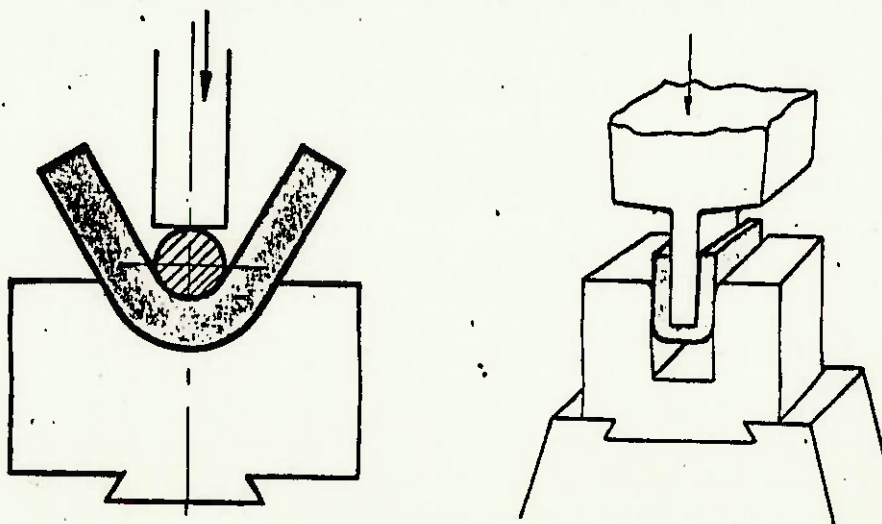


FIGURA 15: Operação de dobramento utilizando moldes.

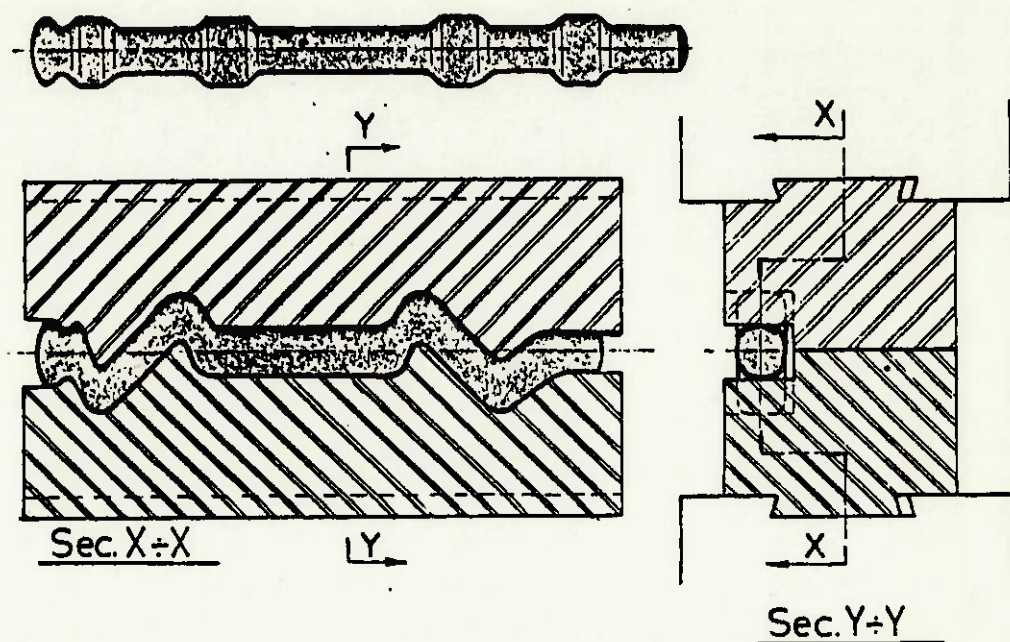


FIGURA 16: Operação de dobramento utilizando ferramenta.

- Corte

O corte é executado para separação do material excedente de peças a forjar. Utiliza-se para isto uma ferramenta parecida com um machado, colocada sobre a peça na posição desejada. A cada golpe da máquina gira-se a peça até obter o corte desejado.

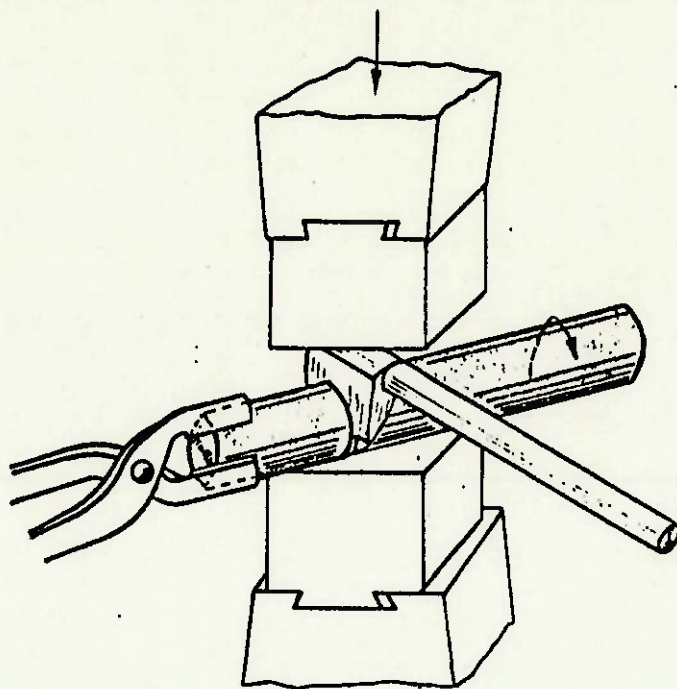


FIGURA 17: Operação de corte.

- Furação

Consiste em obter-se um furo em uma peça através da penetração de um punção com o formato que se deseja obter. A peça elevada à temperatura de forja é assentada em uma base que a acomoda convenientemente e permite a passagem do material proveniente da peça. Inicialmente o material escoa na direção perpendicular ao movimento do punção. Attingido um determinado curso deste, o material passa a escoar na direção de deslocamento.

Aplica-se principalmente na produção de bolachas destinadas a fabricação de engrenagens que necessitam de um furo central.

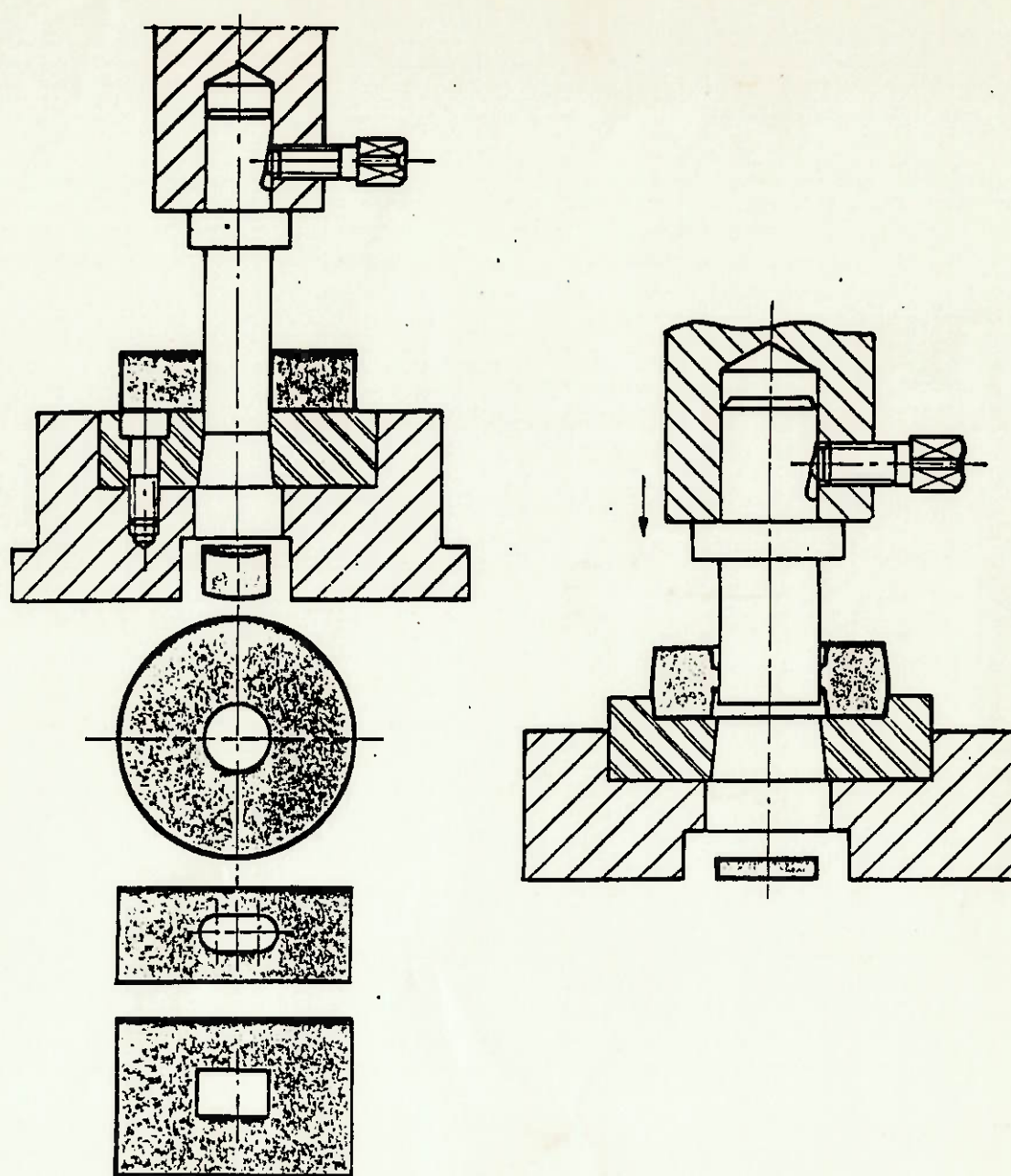


FIGURA 18: Operação de furacão no forjamento.

- Estrangulação

Obtem-se com a estrangulação uma fenda na peça através de golpes de uma prensa ou martetele provido de um mandril em forma de gume. Destina-se às operações preliminares que

preparam o material para as demais etapas de forjamento como a furação.

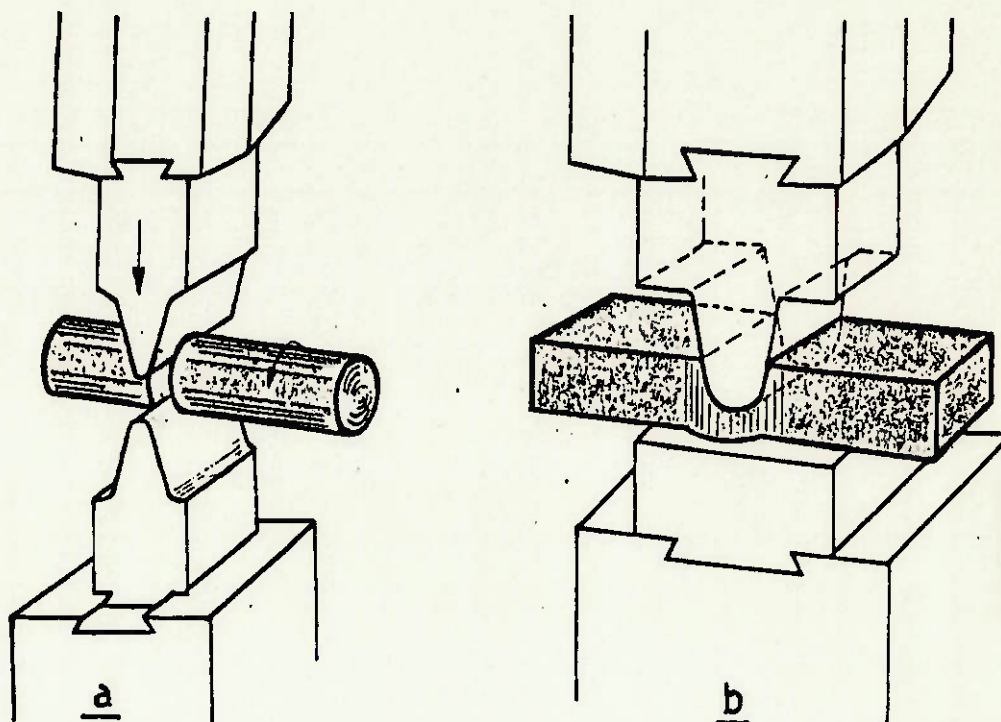


FIGURA 19: Operação de estrangulação
a) Barra cilíndrica
b) Barra retangular.

- Modelagem

Tipicamente consiste em uma operação preliminar. Através de ferramentas com cavidades de geometria variada dá-se a peça as mais diferentes pré-formas, moldando-a. Isto fornecerá condições mais próprias para que o material escoe adequadamente e adquira a forma final no processo de forjamento em matriz.

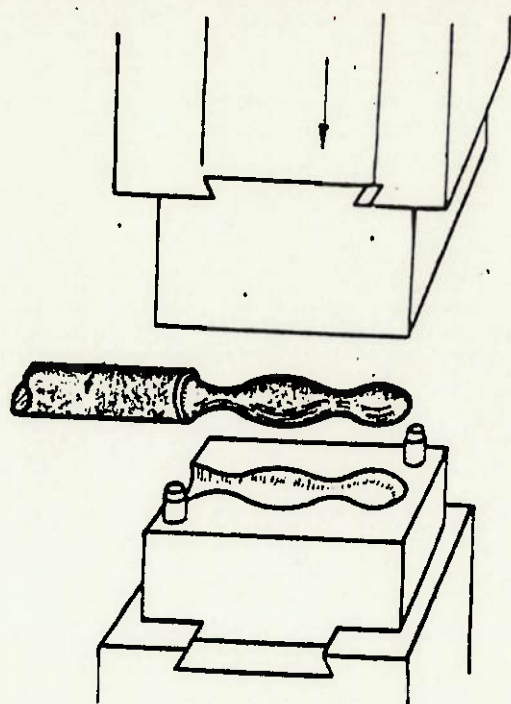


FIGURA 20: Operação de modelagem.

FORJAMENTO EM MATRIZ FECHADA

Este tipo de forjamento diferencia-se das demais operações pelo fato de obrigar o material a escoar dentro de uma cavidade totalmente fechada, formada por um par de ferramentas, sendo uma superior fixa no martelo e outra inferior fixa na mesa. Neste caso, costura-se chamar tais ferramentas de matrizes.

Tal cavidade apresenta além de uma geometria determinada, que é a forma final da peça que se deseja obter, um canal lateral em toda a sua extensão a qual possibilita que o material excedente escoe, propiciando sua

fuga e acomodação em uma outra cavidade, chamada bacia de rebarba.

A presença do canal e bacia de rebarba nas matrizes é importantíssimo no processo pois garante que toda a cavidade com o formato da peça seja preenchida pelo material, evitando que se a obtenha incompleta. Além disso, permite que as faces das matrizes se juntem, o que produz sempre peças com as mesmas dimensões (figura 22). A fase final no processo caracteriza-se pela eliminação da rebarba em estampas especiais que executam o seu corte (figura 23).

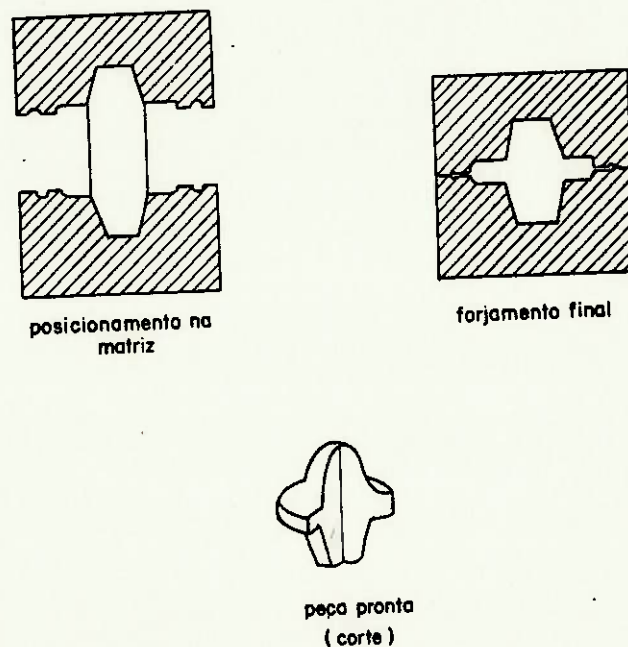


FIGURA 21: Forjamento em matriz fechada.

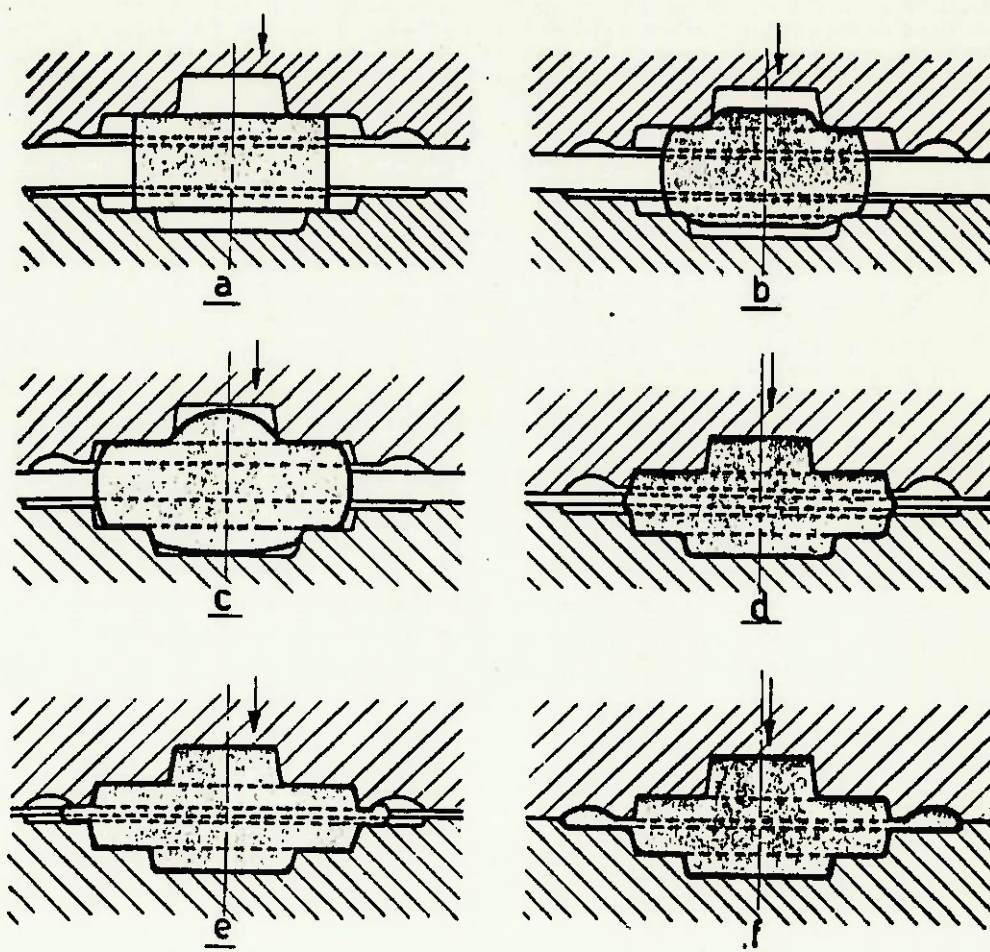


FIGURA 22: Sequência de fases no forjamento em matriz fechada indicando a união das matrizes na etapa final.

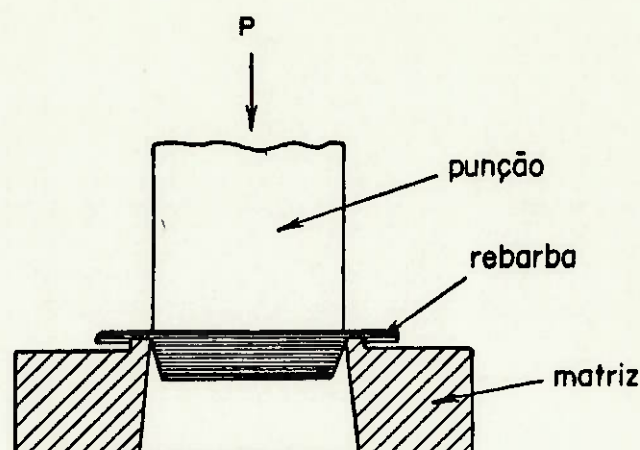


FIGURA 23: Estampo de corte.

Pode-se, após a operação de rebarbação, submeter a peça a um processo de cunhagem a fim de atribuir-lhe acabamentos superficiais e dimensionais mais restritos, provocando até a calibração da peça. Esta última operação dá-se em ferramentas semelhantes àsquelas utilizadas na confecção da peça com a particularidade de não apresentarem canal e bacia de rebarba, além de possuírem maior precisão e uma superfície mais lisa.

Geralmente a peça de trabalho antes de ser conformada em matriz fechada sofre uma série de operações de forjamento. Todos estes processos eventualmente podem estar contidos em uma única ferramenta como mostra a figura 24.

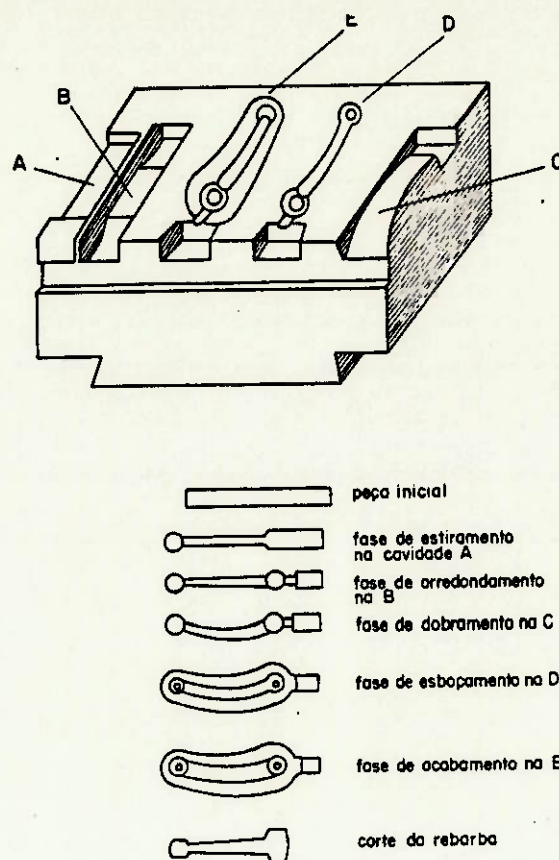


FIGURA 24: Matriz contendo várias fases de um forjado.

As matrizes empregadas neste tipo de operação devem propiciar a fácil extração da peça, requerindo uma série de normas quanto a ângulos e arredondamentos que serão tratadas no capítulo 4.2. Podemos adiantar entretanto que ela deve seguir uma metodologia intimamente ligada ao projeto da peça a ser produzida.

O processo pode ser obtido em marteletes, prensas mecânicas, hidráulicas ou de fricção, onde o material em forma de barra ou tarugo laminado é disposto sobre a matriz inferior, tendo seu eixo orientado verticalmente e neste

caso ele sofre uma compressão no sentido das fibras. Orientando o eixo horizontalmente provoca-se pressões de deformação no sentido transversal das fibras.

Durante a deformação podemos caracterizar três formas de escoamento do material que são: o recalçamento, o alargamento e a ascensão. No primeiro as deformações não são muito grandes, obrigando o material a escoar apenas no sentido transversal para preencher a cavidade na matriz. O alargamento exige maior deformação, já que a peça a ser obtida apresenta um diâmetro maior e uma altura mais baixa que o material de partida. Já na ascensão ocorrem grandes deformações pois, obriga o material a escoar no sentido inverso da aplicação da força, fazendo-o preencher longas cavidades na matriz superior.

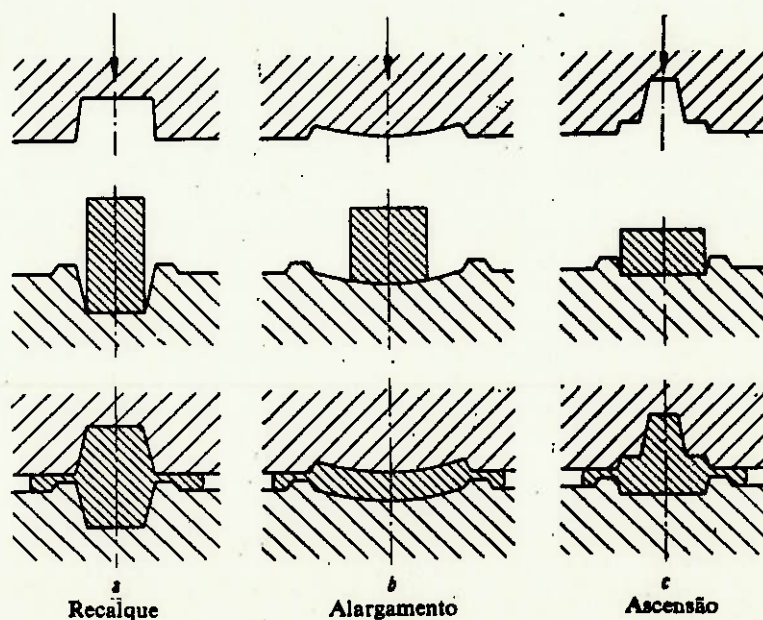


FIGURA 25: Formas de escoamento do material em matriz fechada.

2.1.C) PROPRIEDADES DE PEÇAS FORJADAS

As técnicas do forjamento apresentadas permitem, pela combinação de suas operações, uma infinidade de aplicações. Estas aplicações não restringem-se ao processo de conformação, visto que, poder-se-ia obter uma mesma peça para uma determinada função através dos processos de usinagem, fundição ou mais recentemente pela metalurgia do pó.

Cabe então qualificar as vantagens apresentadas pelo forjamento e os custos envolvidos na produção para uma escolha conveniente da técnica a ser utilizada na confecção do produto.

- Custos de Fabricação

Os custos de fabricação abrangem uma série de fatores que dependem do custo da mão-de-obra, hora-máquina, da quantidade de peças a fabricar, dos desgastes nas máquinas e ferramental, do custo de material e até das condições político-econômicas da época como: taxa de inflação, segurança de investimentos e oportunidades de mercado. Todos estes itens devem ser levados em conta e quantificados cuidadosamente antes da decisão de qual o processo que implica no menor custo. Podemos salientar que, de uma maneira geral, com relação aos custos de material

envolvidos, o forjamento caracteriza-se como o mais conveniente, pois a perda de material é minimizada principalmente na conformação a frio, podendo alcançar por exemplo, de 20% a 80% de economia comparado à fabricação da mesma peça pelo processo de usinagem. Esta diferença reflete-se mais em peças cuja variação no diâmetro é mais pronunciada ou naquelas que apresentem cavidades.

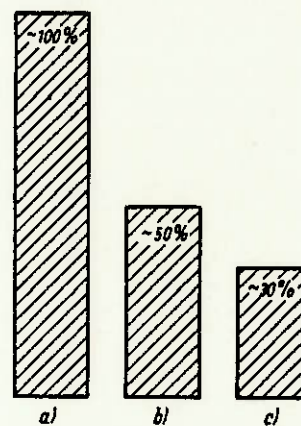


FIGURA 26: Comparação de custo de material em distintos métodos de fabricação:
a) Usinagem
b) Forjamento a quente com usinagem de acabamento
c) Forjamento a frio com usinagem de acabamento.

- Propriedades mecânicas

As peças fabricadas pelo processo de conformação apresentam características mecânicas de grande interesse como o aumento da resistência à tração e à ruptura, além do aumento do limite de escoamento e da dureza. Ao mesmo tempo ocorre uma diminuição do alargamento e estricção da ruptura.

Tais propriedades conferem uma vida útil maior da peça frente às solicitações mecânicas de vibrações e fadiga. Sem dúvida isto está associado às orientações que as fibras do material assumem, não havendo, como no caso da usinagem, suas interrupções. Uma adequada orientação das fibras pode elevar a carga na qual a peça está sendo solicitada de 20% a 80%. Obtem-se então peças com dimensões e pesos menores capazes de executarem trabalhos de maior responsabilidade.

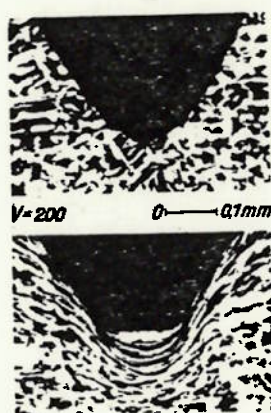


FIGURA 27: Disposição das fibras em uma rosca:
a) Obtida por usinagem
b) Obtida por conformação.

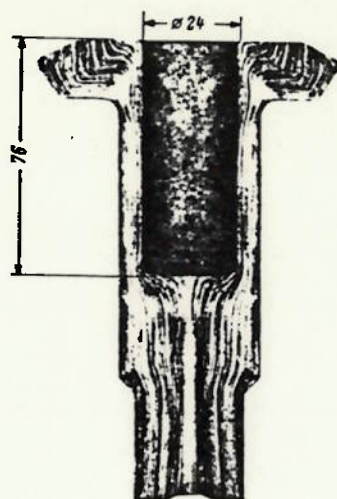


FIGURA 28: Orientação das fibras em uma peça forjada em recalçadora de 4 fases.

- Acabamento superficial

O estado superficial de peças conformadas apresentam uma excelente qualidade. A rugosidade assume menores valores nas peças trabalhadas a frio do que nas trabalhadas a quente e tais valores diminuem a medida que se aumenta o grau de deformação e o número de recalques.

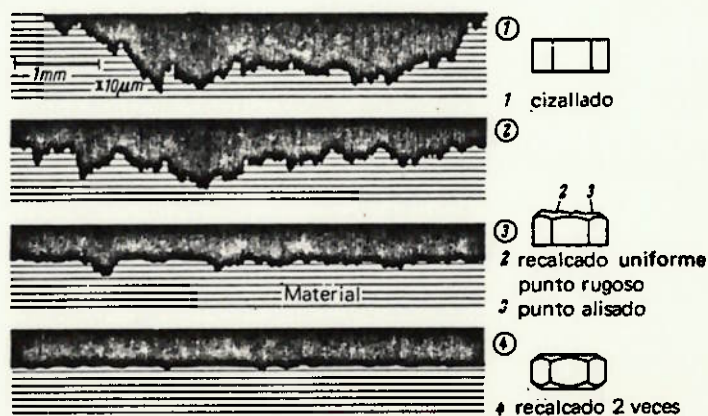


FIGURA 29: Estados superficiais de uma peça forjada.

Genericamente podemos situar a profundidade de rugosidade (R_t) e a profundidade de alizados (R_p) para peças trabalhadas a frio entre:

$R_t=1$ até $20\mu m$ \ $R_p=1$ até $20\mu m$ (direção de conformação):

$R_t=1$ até $10\mu m$ \ $R_p=1$ até $5\mu m$ (transversal a direção de conformação):

$R_t=1$ até $15\mu m$ \ $R_p=0,5$ até $10\mu m$ (na superfície frontal de conformação).

No caso de peças conformadas a quente tem-se:

$R_t=20$ até $60\mu m$ \ $R_p=5$ até $30\mu m$.

Para se obter as condições de rugosidades citadas, utilizam-se lubrificantes sólidos ou líquidos em quantidades adequadas. O primeiro em excesso evita o contato entre a ferramenta e a peça, propiciando o surgimento de uma rugosidade livre. Já o segundo, em grande quantidade, provoca o surgimento de microburacos na peça. No campo das excessões temos o caso do forjamento de impacto (martelo de forjar) onde a utilização de grandes quantidades de lubrificantes (abaixo do utilizado) ou lubrificantes pouco viscosos causam o mesmo efeito dos lubrificantes sólidos.

- Propriedades dimensionais

A tolerância dimensional é um parâmetro de difícil controle no forjamento, pois depende do tipo e estado das máquinas e ferramentas de trabalho, da quantidade de material utilizado, bem como suas características de fabricação. Soma-se a isto, nos processos de conformação a quente, a perda de material pela formação de carepa e a uniformidade de temperatura da peça.

O campo de variação das tolerâncias depende mais pela organização da empresa e pelo departamento de qualidade que vistoria e analisa todos os parâmetros citados. No entanto, a norma apresenta campos de variações admissíveis para o processo como em DIN 7524 (variações admissíveis para pesos em peças conformadas a quente), DIN 7526 (variações admissíveis dimensionais para aços), DIN 1749 (alumínio), DIN 9005 (magnésio), DIN 17673 (cobre e suas ligas) e DIN 17864 (titânio).

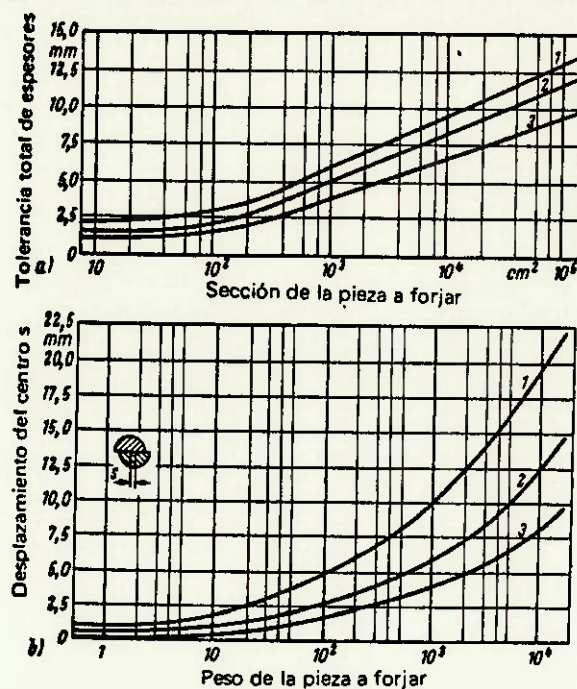


FIGURA 30: Tolerâncias em peças forjadas:
 a) Espessura em função da seção da peça
 b) Excentricidade em função do peso da peça
 1) Aços-ligas resistentes ao calor
 2) Aços inoxidáveis e titânio
 3) Aço-carbono e aços de baixa liga.

Diámetro nominal del eje mm	Límites de tolerancias mm		
	Tipo 1	Tipo 2	Tipo 3
1,6...5	0,20	0,10	0,05
6	0,25	0,13	0,06
8	0,31	0,15	0,08
10	0,33	0,15	0,08
11 y 12	0,38	0,18	0,09
14 y 16	0,43	0,20	0,10
20	0,46	0,23	0,11
22	0,51	0,23	0,11
25	0,56	0,25	0,13

TABELA 1: Limite de tolerâncias para diâmetros de eixos-pinhões conformados a frio.

A tabela 1 refere-se à conformação a frio onde os valores do tipo 1 são facilmente obtidos. Os do tipo 2 exigem em alguns casos ferramentas especiais. É importante salientar que um campo de tolerância pequeno como o especificado no tipo 3 requer um aumento de custo considerável, só justificado se as exigências dimensionais forem relativamente muito mais importantes que o custo da peça.

2.1.D) FALHAS EM PEÇAS FORJADAS

Uma peça forjada pode apresentar, durante a sua fabricação ou quando estiver acabada, falhas provenientes de diferentes causas, sejam elas devido ao emprego inadequado de material, processo de fabricação inconveniente, concentração de tensões localizadas, desgaste de máquinas e ferramentas ou temperatura desfavorável ao forjamento a quente.

Algumas destas falhas são constatadas imediatamente pela simples observação visual, porém algumas delas necessitam o emprego de técnicas especiais ou são observadas somente após a utilização da peça. Podemos classificá-las em seis grupos apresentando a seguir:

FALTA DE REDUÇÃO

Quando a peça é conformada nas máquinas conhecidas como martelos de forjar recebe golpes rápidos que, associados a um mau dimensionamento da carga a ser aplicada causam uma penetração incompleta de forjamento ou seja, a região interna do material não sofre esforço de conformação, permanecendo então, com uma estrutura dendrítica proveniente de seu aquecimento à temperatura de trabalho. Sabe-se que tal estrutura apresenta uma resistência mecânica menor àquela a qual sofreu o trabalho de conformação localizada na superfície. Esta variação de propriedades causa uma fragilidade na peça, tornando inconveniente a sua utilização.

O defeito só pode ser identificado submetendo a peça a uma análise metalográfica de sua seção transversal. Um meio de contornarmos a situação é redimensionando os cálculos ou partindo-se para o forjamento em prensas que provocam uma conformação mais uniforme.

TRINCAS

Consistem em uma descontinuidade do material podendo manifestarem-se superficialmente, no interior da peça ou na

região de formação de rebarbas (caso específico do processo de forjamento em matriz fechada).

- Trinca Superficial Longitudinal

É causada basicamente por defeitos na qualidade do material de partida, manifesta-se na direção de aplicação da carga, como pode ser observado na figura 31. Dependendo da extensão do defeito no material inicial e do grau de deformação, tendo em mente que o aumento deste último parâmetro provoca o surgimento de maiores tensões, este tipo de falha pode alcançar grandes dimensões na peça.



FIGURA 31: Peça com trinca superficial longitudinal

Um outro meio que propicia este tipo de falha é devido ao desgaste da ferramenta de trabalho. Na figura 32 pode-se observar este fato pelo surgimento da trinca numa etapa inicial de fabricação e sua propagação até o produto final.



FIGURA 32: Propagação de trinca nas várias fases de um forjado, devido a ferramenta desgastada.

- Trinca Superficial Transversal

Ac contrário do caso anterior, este tipo de trinca ocorre em uma direção perpendicular à aplicação da carga (ver figura 33). Pode ser proveniente tanto de um material inadequado ou seja, com pouca capacidade de deformação, como por falha no processo, produzindo uma configuração inadequada das fibras (ver figura 34), ultrapassando a temperatura de conformação ou ainda excedendo o limite admissível de conformação.



FIGURA 33: Peça com trinca superficial transversal.

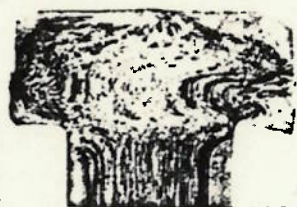


FIGURA 34: Trinca longitudinal provocada pelo dobramento das fibras.

- Trinca Interior

Por localizar-se no interior da peça, é constatada apenas quando ocorre a quebra do material em serviço, o que torna este tipo de defeito imperceptível na fase fabril e muito mais perigoso que a trinca superficial. Manifesta-se nas regiões de maior conformação a que é submetido o material quando é ultrapassado o seu limite de conformabilidade (figura 35).

Se a peça exige alta confiança, deve-se projetar convenientemente as pré-formas para diminuir o grau de deformação de uma etapa para outra na região crítica durante o processo. Finalmente um ensaio estatístico via ultrassom pode ser realizado para detectar a presença de eventual falha.

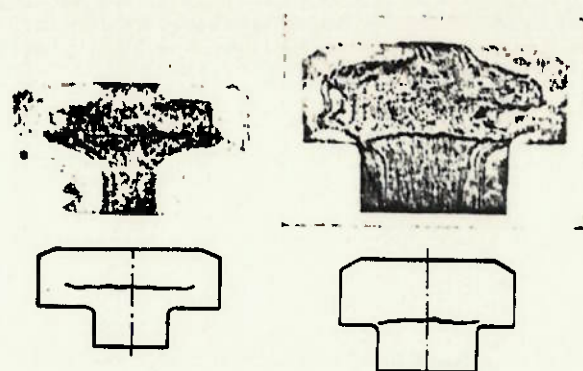


FIGURA 35: Trinca interior em uma peça.

- Trinca na Região de Rebarba

Ocorre devido a existência de uma grande redução entre o canal de rebarba e a parede lateral do forjado, provocando um abrupto aumento de tensão sobre o material. Ela situa-se ao longo da rebarba e pode, durante o processo de rebarbação, estender-se adentro da peça (ver figura 36).

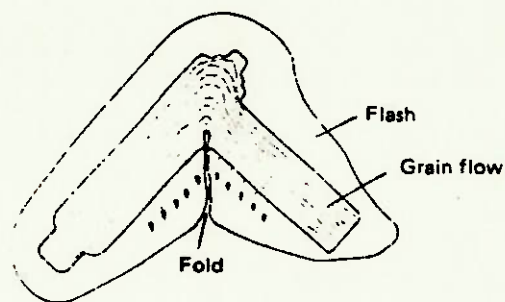


FIGURA 36: Trinca na região de rebarba.

Pode ser provocada também pelo uso de um material fragilizado, ou seja, pela presença indesejável de impurezas no aço. Para contornarmos este problema, utilizam-se materiais de boa qualidade, além de projetarem-se canais de rebarbas mais longos.

GOTA FRIA

Caracteriza-se exclusivamente nos processos em matrizes fechadas devido a uma configuração inadequada das fibras, fazendo com que elas se dobrem umas sobre as outras sem se soldarem, como pode ser observado na figura 37.

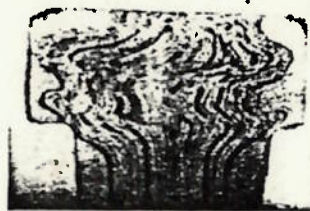


FIGURA 37: Orientação das fibras interiores mostrando o dobramento de uma sobre a outra.

A forma que tais fibras assumem é consequência de alguns fatores: o fluxo desordenado de material quente na cavidade da matriz, o seu posicionamento incorreto para o forjamento e a má distribuição de massa em operações de pré-forma.

INCRUSTAÇÃO DE ÓXIDOS

Também refere-se ao processo em matriz fechada sendo consequência do não desprendimento da carepa de óxido, formada após o material ter sido aquecido para a execução do forjado. Esta camada se solta do corpo da peça durante a

rebarbação, ocasionando vazios na sua superfície. Evita-se esta falha instruindo o operador a dar algumas pancadas na peça quente antes de submetê-la ao forjamento, o que propicia o descolamento e queda da camada de óxido.

DESCARBONETAÇÃO

A descarbonetção é a perda de carbono do aço na superfície da peça pelo aquecimento demasiado desta em forno de atmosfera agressiva (O_2 , umidade relativa alta, CO_2 , etc). Ela provoca uma queda na fluência e capacidade de conformação do material). Além disso, a superfície assume valores de resistência mais baixos influyendo na vida útil da peça. A profundidade de descarbonetção deve ser a menor possível, assim toma-se cuidado com seus agentes causadores que são: o tipo de atmosfera do forno, a temperatura de aquecimento e o tempo de aquecimento.

O processo mais utilizado para evitar o fenômeno é fazer o aquecimento das peças envoltas em um material protetor adequado (carvão vegetal em pequenas partículas, coquei queimado ou ainda uma mistura de areia pura de quartzo de alta granulação com pequenos pedaços de carvão de madeira) em caixas de recozimento.

QUEIMA DO MATERIAL

Dizemos que ocorreu a queima do material quando este é submetido a uma temperatura de aquecimento superior a temperatura adequada de trabalho, além de permanecer em demaziado sob tal condição. O efeito pronunciado da queima deve-se à modificação da estrutura cristaliza do material, seja pela transformação de fase ou através da penetração intercrystalina de gases oxidantes do metal que atacam os contornos de grãos, formando óxidos e conseqüentemente sua fragilidade.

A queima deve ser evitada através do aquecimento lento às temperaturas recomendadas para cada tipo de material.

ERROS DIMENSIONAIS

As falhas dimensionais são ocasionadas por circunstâncias específicas do processo e podem ser facilmente identificadas quando a produção é submetida a um trabalho de controle de qualidade bem implantado na empresa, associada a manutenção constante dos equipamentos e ferramentas.

Muitas vezes ocorre a fabricação de peças incompletas, principalmente no forjamento em matriz fechada. Isto se deve a uma quantidade insuficiente de material colocada na

matriz, fazendo com que este não ocupe todas as cavidades da ferramenta. Um recálculo do processo é bastante para sanar este problema.

Devemos citar também o caso da fabricação de peças com suas dimensões totalmente em desacordo com o previsto. Falhas deste tipo podem ter suas origens em um desalinhamento das matrizes, provocando o chamado momento de tombamento com indicado na figura 38.

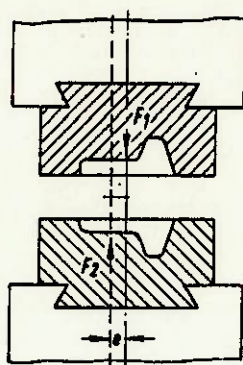


FIGURA 38: Desalinhamento das ferramentas ocasionando momento de tombamento.

Um outro tipo de desalinhamento é provocado pela montagem inadequada da matriz como indicado na figura 39.

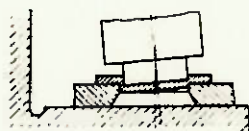


FIGURA 39: Ferramenta montada com desalinhamento.

Os desvios dimensionais podem decorrer também do desgaste na impressão da matriz pelo tempo de uso da ferramenta, ou seja, ultrapassada sua vida útil.

Além disso, podemos destacar o fato da contração do material quando no processo de forjamento a quente ocorre o resfriamento da peça fabricada. Deste modo deve-se levar em conta a dilatação volumétrica do material em questão na temperatura de trabalho, projetando a matriz com uma cavidade de impressão com dimensões maiores do que o requerido no produto final.

Material	Medida de retracción %
Aluminio	1,5...1,8
Bronce	~ 1,6
Cobre	~ 0,8
Aleaciones de magnesio	1,2...1,6
Acero duro al manganeso	~ 2,0
Latón	1,2...1,5
Materiales de níquel	~ 2,0
Acero, sin alear	1,2...1,5
Acero aleado	1,5...2,0
Acero prensado posterior al rojo	0,8...1,2
Cinc	~ 1,6

TABELA 2: Tabela da porcentagem de contração de material devido ao resfriamento a partir de suas respectivas temperaturas de forjamento à quente.

2.2) FATORES DE INFLUÊNCIA:

O forjamento, por se constituir em um processo de conformação plástica, recebe influência de uma série de

parâmetros que contribuem na capacidade de deformação e fluência do material a qual designa-se trabalhabilidade.

Assim, um material apresenta uma melhor condição de trabalho pela associação adequada destes parâmetros que subdividem-se em fatores de natureza mecânica e fatores de natureza metalúrgica.

A escolha de um determinado valor para este ou aquele parâmetro é embasada nos conhecimentos experimentais acumulados durante os anos, associada aos conhecimentos técnicos que desenvolveram, em alguns casos, teoriais para justificar a observação prática.

2.2.A) FATORES DE NATUREZA MECÂNICA

Relacionam-se com as condições específicas do processo de conformação. Podemos dizer que tais fatores descritos a seguir exercem suas influências sobre o material.

- Temperatura

A temperatura pode ser considerada como um dos mais importantes fatores de influência mecânica, juntamente com a velocidade de deformação que será apresentada no item posterior.

A consequência básica do aumento da temperatura é a diminuição da tensão de escoamento do material. Tal observação relaciona-se ao estado cristalino do material ou

seja, o estado do tamanho de grão, presença de solução sólida e segunda fase.

Como a deformação ocorre por movimentos de discordâncias nos planos de deslizamento e o contorno de grão representa uma região de grande imperfeição no reticulado cristalino, impede de maneira mais acentuada este fenômeno. Assim, um metal com tamanho de grão pequeno apresenta uma grande superfície de contorno e uma alta tensão de escoamento (ver figura 40), necessitando então uma maior solicitação mecânica.

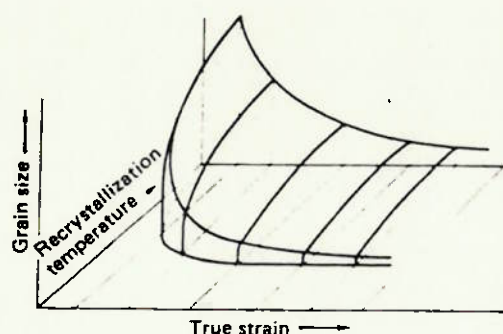


FIGURA 40: Diagrama de recristalização.

O mesmo pode-se dizer a respeito de soluções sólidas, ocasionadas pela presença de átomos de outros elementos sob a forma intersticial, deformando o reticulado cristalino e dificultando o movimento de discordâncias. Estes átomos podem ser maiores ou menores que o do elemento solvente (átomo do metal de base) e recebem a designação de soluto. Por difusão atômica, eles se posicionam na direção de movimento das discordâncias e interagem com elas, criando um

patamar de escoamento com tensão variável a qual necessita de um nível de energia maior para ser vencido.

A precipitação de segunda fase também atua impedindo o movimento de discordâncias. A quantidade, forma das partículas e a distância entre elas influem no comportamento da deformação plástica. Podemos citar que partículas alongadas interferem mais no movimento de discordâncias do que partículas esferoidais. Na medida que uma discordância encontra um átomo de segunda fase, fica impedida de movimentar-se ou a contorna, encontrando uma outra partícula e assim por diante. Tal fenômeno eleva o nível de tensão necessário para a deformação. Com o aumento da temperatura, propicia-se o movimento de átomos ou vacâncias na rede cristalina ao mesmo tempo que aumenta o movimento de discordâncias pelo acúmulo de energia interna, chamado ativação térmica (fenômeno estudado por Cottrell-Stokes). Paralelamente a isto, a temperatura altera o formato do grão por nucleação e crescimento a partir de grãos deformados (fenômeno de recristalização). Por facilitar o movimento de discordâncias, através dos processos citados acima, é que o aumento de temperatura favorece uma melhor trabalhabilidade do material. No entanto, estas mudanças microestruturais só ocorrem com aceitável intensidade a partir da temperatura de recristalização. Esta é definida como a temperatura necessária para que um determinado metal, com um certo grau de encruamento se recristalize completamente para um tempo de aquecimento de uma hora.

Na prática, processa-se a recristalização do material em tempos inferiores ao descrito na definição, porém utilizam-se temperaturas mais altas.

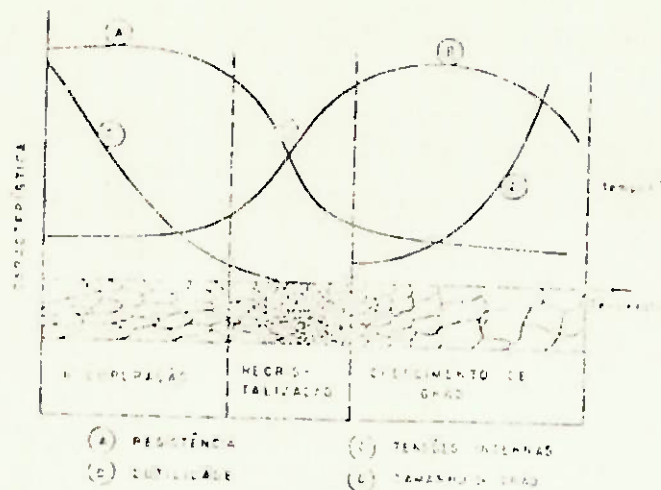


FIGURA 41: Propriedades mecânicas devido ao tamanho de grão.

Cada material apresenta uma temperatura de recristalização, constituindo-se no limite inferior de aquecimento do metal para trabalho a quente. O máximo valor de temperatura que se pode atingir é aquele na qual não se verifica valores acentuados de descarbonetação, crescimento exagerado de grão, queima do material e formação de carepa de óxido.

Pretende-se com isto evitar falhas nas peças forjadas (ver item 2.1.D) e obter peças com tolerâncias mais restritas. Em vista disto, a máxima temperatura situa-se, como já citado no item 2.1.B.1, em torno de 1000°C a 1500°C abaixo da linha de solidificação do material.

Pode-se definir agora uma faixa de temperaturas no forjamento a quente que se constitui na Zona de Temperatura adequada de trabalho. A seguir será apresentada uma tabela da Zona de Temperatura.

Material	Zona de temperaturas °C
Aluminio puro	340... 550
Al-aleaciones de forja	320... 520
Aleaciones prensadas de magnesio	270... 400
Cobre	650... 900
Aleaciones Cu, latón	650... 850
Acero, bajo contenido de C	900...1150
Acero, contenido medio de C	850...1100
Acero, contenido elevado de C	800...1050
Acero, aleado al Mn	850...1100
Acero, aleado al Ni	850...1100
Acero, aleado al Cr	870...1100
Acero, aleado al Cr-Ni	870...1100
Acero, aleado al Cr-Mo	850...1050
Acero, inoxidable (18/18)	750...1100
Aceros para rodamientos	850...1100
Acero para tuercas prensadas en caliente	1150...1350
Níquel y aleaciones Ni	850...1250
Metal Monel	960...1170
Plata alemana	700... 800
Titanio	870... 900
Aleaciones al titanio	700... 970
Cinc y aleaciones al cinc	200... 250

TABELA 3: Temperatura de forjamento a quente para diversos materiais.

Esta faixa leva em consideração um fator muito importante: a perda de calor durante o processo. As causas destas perdas devem ser estudadas, pois abaixam a temperatura do material, levando-o a uma condição de forjabilidade desfavorável e ocasionam defeitos como trincas, falta de redução, etc (ver item 2.1.D).

As perdas são decorrentes da radiação do material a ser trabalhado ou por transmissão térmica no contato peça-ferramenta. Quanto as perdas por radiação, pode-se dizer que são pequenas, pois dependem da temperatura do material e do

tempo de exposição, ocorrendo apenas durante o seu transporte do forno até a máquina de conformação. Esta operação realiza-se rapidamente e apenas no caso de surgirem problemas com a máquina é que o material acaba ficando exposto a um ambiente de temperatura inferior a sua, possibilitando ao fenômeno da radiação alcançar valores consideráveis.

A maior parcela de perdas ocorre por transmissão de calor no contato peça-ferramenta devido a diferença de temperatura entre estas duas, ocasionando o fenômeno da condução térmica. Este fenômeno é altamente influenciado pela condutibilidade térmica do material de trabalho que varia em função da temperatura. Assim, quanto menor a temperatura da peça, maior o seu valor de condutibilidade e por conseguinte as perdas por condução.

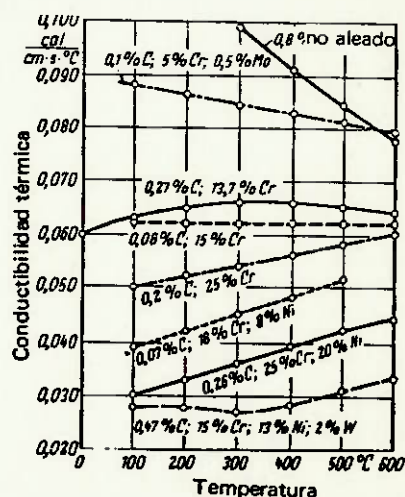
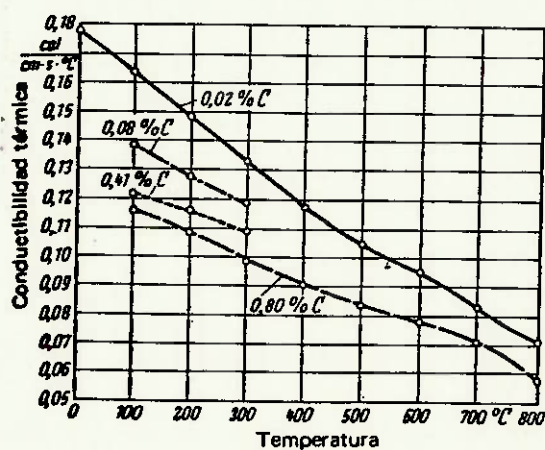


FIGURA 42: Condutibilidade térmica em aços-carbono e aços-liga.

Como podemos observar na figura 42, a condutibilidade térmica diminui com o aumento de temperatura bem como, com o aumento da porcentagem de carbono. É bom salientar que os aços-liga geralmente apresentam condutibilidade térmica menores que os aços comuns. Em relação à diferença de temperaturas, quanto maior for o seu valor, maior as perdas evidenciadas. Para diminuir esta diferença aquece-se a ferramenta entre 150°C e 300°C conseguindo-se uma redução nas perdas de 13% a 20%. Se o material a forjar apresenta baixa temperatura de trabalho, este efeito pode ser eliminado aquecendo-se a ferramenta a tal condição.

Finalmente devemos citar o tempo de contato entre estes dois elementos e a geometria da ferramenta. No primeiro caso, o tempo de contato prolongado aumenta as perdas. Quanto ao segundo, se a peça a ser fabricada apresenta muitas reentrâncias, a ferramenta que se constitui no seu negativo não possibilita um contato maior entre as duas superfícies, contribuindo para uma diminuição nas perdas por condução.

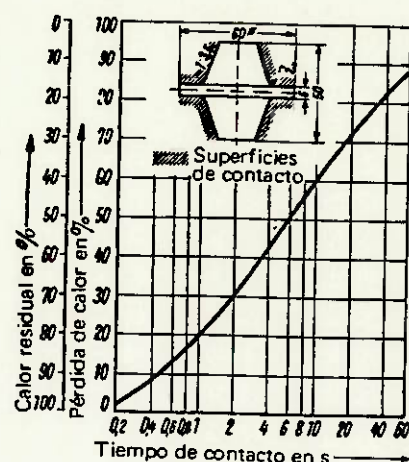


FIGURA 43: Gráfico da perda de calor em função do tempo de contato peça-ferramenta.

Durante a conformação, pela deformação plástica do metal, gera-se calor interno. Este fenômeno age apenas como atenuante no que se refere as perdas de calor no processo de forjamento a quente, pois esta última é muito grande em relação ao calor gerado e somente no caso de grandes deformações podemos levá-lo em consideração.

Já no forjamento a frio, o aquecimento devido a deformação tem uma importância significativa, pois o material pode alcançar altas temperaturas, atingindo a faixa de coloração azul no espectro onde ocorre uma grande fragilidade e aumento da resistência ao escoamento que representam propriedades não desejáveis no material.

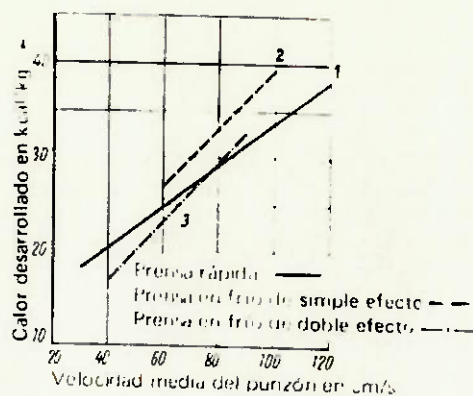


FIGURA 44: Calor gerado por Kg de material (devido à conformação) que foi absorvido pela ferramenta em função da velocidade de deformação para 3 tipos de prensas.

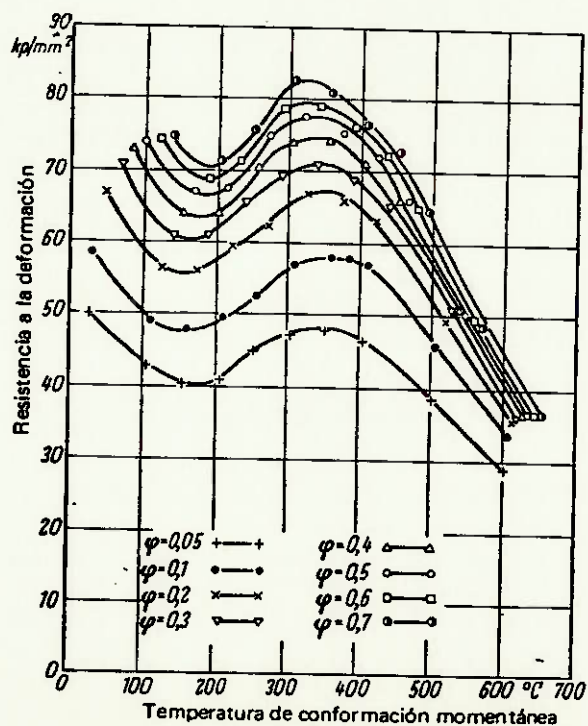


FIGURA 45: Resistência à conformação de aço C 15 em função da temperatura para vários graus de deformação.

- Velocidade de deformação

A velocidade de deformação relaciona-se diretamente com a velocidade do movimento de discordâncias. Estas para passarem de uma posição de equilíbrio a outra, necessitam atingir um certo valor de tensão cisalhante que caracteriza o nível mínimo de energia para provocar o deslocamento. Esta energia é em sua maioria dissipada (90% a 95%), sendo apenas uma pequena parcela acumulada como energia geradora de defeitos. O processo de dissipação é consequência das alterações no reticulado cristalino durante o movimento das discordâncias que são manifestadas principalmente por:

- ULTRAPASSAGEM DAS TENSÕES DE PEIERLS-NABARRO

Força necessária para mover uma discordância reta em um reticulado perfeito.

- INTERAÇÃO DE DISCORDÂNCIAS C/ DEFEITOS DE PONTO
- INTERAÇÃO DE DISCORDÂNCIAS C/ DISCORDÂNCIAS-FLORESTAS
- INTERAÇÃO DE DISCORDÂNCIAS C/ VIBRAÇÕES TÉRMICAS
- INTERAÇÃO DE DISCORDÂNCIAS C/ ELÉTRONS
- EFEITO DE RELAXAÇÃO DO NÚCLEO DE DISCORDÂNCIAS

Assim, a medida que se processa mais rapidamente estas interações, a velocidade de movimento das discordâncias é acelerado, necessitando para tal maiores valores do nível de energia de ativação. Em outras palavras, a medida que

aumentamos a velocidade de deformação temos um aumento da tensão de escoamento do material.

Como a velocidade de discordâncias não pode ultrapassar a velocidade de onda elástica cisalhante, quanto mais ela se aproxima deste valor devemos fornecer uma energia de ativação infinita. Fazendo um paradoxo com a relatividade quando um corpo se aproxima da velocidade da luz sua massa torna-se muito grande, necessitando de uma força infinita para acelerá-lo.

Muitos pesquisadores estudaram este fenômeno, destacando-se Gilman e Johnston. Eles, utilizando uma técnica chamada etchpitting determinaram as posições inicial e final de uma discordância. Dividindo esta distância percorrida pelo tempo de duração do movimento, obtiveram uma velocidade média de deslocamento. Os valores medidos para vários materiais foram plotados em um gráfico mostrado na figura 46.

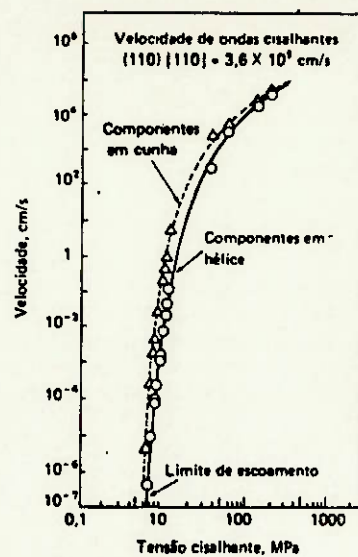


FIGURA 46: Relação entre tensão aplicada e velocidade de discordâncias para diversos materiais. Os termos componentes em cunha e componentes em hélice referem-se ao tipo de discordância.

Além disso, estes pesquisadores aproximaram a curva obtida por uma equação matemática que relaciona a velocidade de discordâncias com a tensão cisalhante dada por:

$$v = K \cdot \tau^m \cdot e^{(-E/R \cdot T)}$$

onde: τ (é a tensão cisalhante)

R (é a constante de Boltzmann)

T (é a temperatura)

E (é a energia de ativação do processo)

K e m (são parâmetros)

Devido ao efeito relativístico já explicado, esta equação não é aplicada para altas velocidades. O efeito

macroscópico obtido pode ser observado nas figuras 47, 48 e 49.

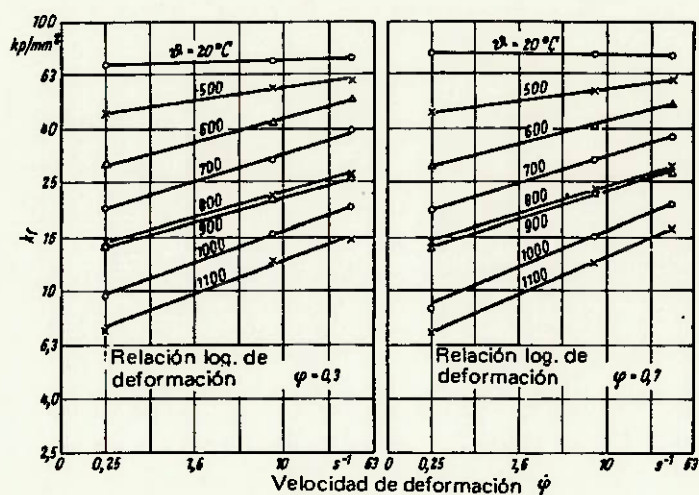


FIGURA 47: Gráfico da resistência de conformação em função da velocidade de deformação: material Ck 15.

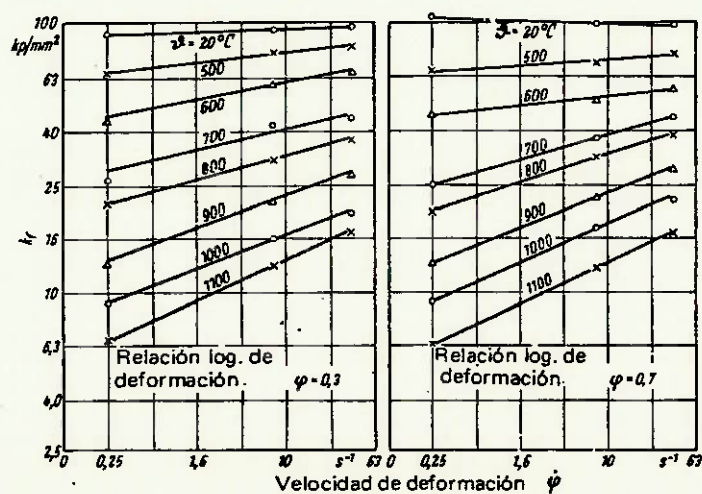


FIGURA 48: idem anterior: material Ck 45.

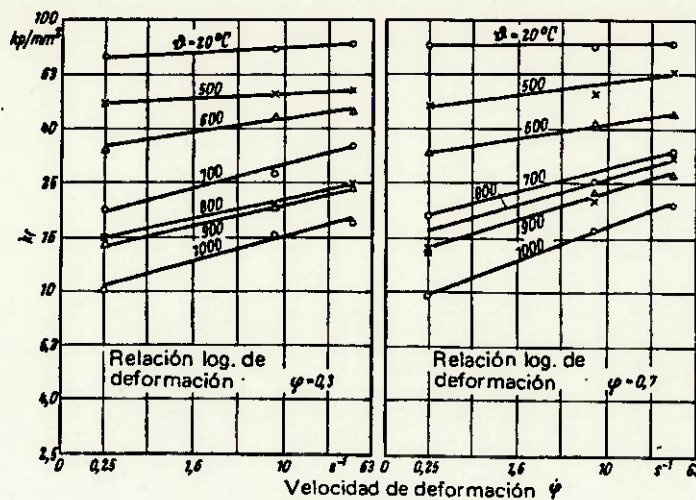


FIGURA 49: idem anterior: material 16 Mn Cr 15.

Observa-se claramente o aumento da tensão de escoamento do material para maiores velocidades de conformação. Por este fato, muitas vezes substitui-se no processo de conformação os martelos de forjar por prensas hidráulicas. Além disso, devemos levar em conta a associação velocidade-temperatura de deformação onde pelas próprias figuras evidencia-se menores valores de resistência para maiores temperaturas. Por isto, quando se trata de forjamento a frio, o efeito da velocidade é bem menos acentuado e fica em torno de apenas de 20%, prevalecendo outros parâmetros como o grau de deformação e o atrito.

- Grau de Deformação

Define-se grau de deformação como a variação logarítmica da relação de alturas da peça após ser trabalhada e no seu estado inicial. Assim temos:

$$Q = \ln (h_f/h_0)$$

A medida que ocorre a deformação temos o escorregamento das discordâncias nos planos de deslizamento. Estas por sua vez não atingem a superfície do material, interagindo com outras discordâncias que acabam por obstruir a passagem destas últimas através da rede cristalina. Forma-se uma espécie de barreira dificultando cada vez mais o deslocamento das discordâncias, o que exige uma tensão cisalhante maior para provocar uma nova deformação. Estas observações foram constatadas inicialmente por Taylor e demonstram o aumento da tensão de escoamento do material a medida que aumenta-se o grau de deformação.

Este processo é hoje em dia chamado trabalho de endurecimento (encruamento) onde o material passa por três estágios diferentes. No estágio 1, o trabalho de endurecimento é pequeno, pois não existem um número grande de barreiras para impedir a livre movimentação das discordâncias que se deslocam em longos planos de deslizamento, formando sistemas únicos de escorregamento (em uma única direção). O estágio 2 é caracterizado pela maior contribuição no processo de endurecimento. Seeger propôs que devido a diminuição no comprimento dos planos de escorregamento, as discordâncias se movimentam em pequenos espaços onde as barreiras ao seu deslocamento são em maior número. Isto provocaria um acúmulo de discordâncias nestas

regiões. O endurecimento ocorreria pelo acréscimo de tensões provocado pelo empilhamento de discordâncias que interagem entre si. No entanto, Mott discorda de Seeger e questiona o fato de que as altas tensões criadas na extremidade dos empilhamentos originariam outros planos de deslizamento. Além disso, a teoria de Seeger não explica o porquê, quando cessada a força externa aplicada sobre o material não ocorre o desempilhamento de discordâncias. Deste modo Mott e Hirsch tentam explicar o endurecimento no estágio 2 pelas intersecções das discordâncias que provocam o deslocamento lento e desordenado destas nos planos de deslizamento, causando uma resistência ao escoamento do material. A conclusão final atribui o endurecimento ao acréscimo da densidade de intersecções de discordâncias nas regiões de maior acúmulo de barreiras de deslocamento.

No último estágio (estágio 3) ocorre um decréscimo do endurecimento devido o material atingir um estágio na qual as discordâncias sobrepõem as barreiras que impediam seus movimentos. Há duas teorias onde analisa-se o mecanismo citado. Na primeira, ocorre um colapso das barreiras por uma reorganização das discordâncias. Já a segunda, leva em consideração a formação de planos de escorregamento que mantinham a mesma direção do plano inicial, fazendo as discordâncias atravessarem as barreiras. A ocorrência do fenômeno está ligada ao nível de energia do material. Assim, materiais que não apresentam uma alta energia interna armazenada necessitam de uma ativação externa como o aumento

de temperatura por exemplo. Caso isso não aconteça, esta ativação é obtida submetendo o material a maiores tensões de deformação. Este é o caso do cobre, na qual a temperatura ambiente necessita uma força de deformação maior comparado com o alumínio.

A figura 50 ilustra o fato do aumento da tensão de escoamento com o grau de deformação.

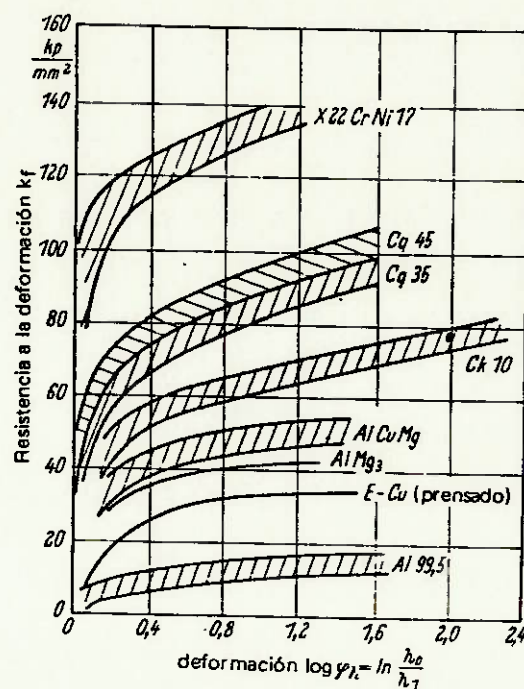


FIGURA 50: Gráfico da resistência de conformação em função do grau de deformação.

- Lubrificação

No forjamento, devido ao escoamento do material, surge um deslocamento relativo entre este e a ferramenta. A associação deste fenômeno com a força de compressão normal

nos pontos de contato da interface faz surgir uma força de cisalhamento de atrito.

Esta força é melhor caracterizada por um adimensional chamado coeficiente de atrito. Pela definição de Coulumb ele é simplesmente a razão entre a força de atrito e a força normal.

$$\mu = F_{at}/N \quad \text{ou} \quad \mu = \tau_t/P$$

onde: τ_t (é a tensão resistente ao cisalhamento na interface)

P (é a tensão normal)

No entanto, define-se também o fator de atrito cisalhante dado por:

$$m = \tau_t/K$$

onde: τ_t (é a tensão resistente ao cisalhamento na interface)

K (é a tensão cisalhante limite de escoamento do material)

Pelo critério de Von Mises, $K \approx 0,557 \cdot \sigma_e$, onde σ_e é a tensão de escoamento no ensaio de tração do material. O atrito é um dos componentes nos modelos matemáticos os quais descrevem a força e potência, ou seja, a energia necessária para executar a operação de forjamento.

A presença de lubrificante afeta as condições de atrito na medida que diminui o valor do coeficiente de atrito (μ) ou o fator de atrito cisalhante (μ). Para entender como eles efetivamente atuam, deve-se descrever os mecanismos de atrito e as conseqüências de existência de uma camada de lubrificante na interface de contato peça-ferramenta.

Microscopicamente, a superfície de qualquer material não é perfeitamente lisa, apresentando irregularidades onde existem picos e vales como indicado na figura 51.

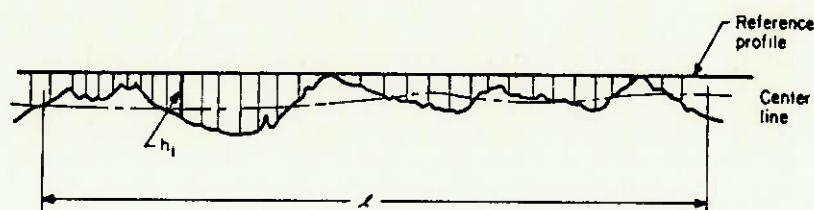


FIGURA 51: Rugosidade superficial de um material metálico.

A este aspecto irregular dá-se o nome de rugosidade. Esta pode ser medida de várias maneiras, no entanto a mais usual utiliza um equipamento no qual um pequeno sensor mapeia a superfície enquanto se desloca sobre esta, desenhando em uma folha o seu aspecto. Traça-se então uma linha média e mede-se as alturas dos picos e vales em relação a esta, calculando-se a rugosidade pela expressão:

$$R_a = 1/L \cdot \int_0^L |y| \cdot dl$$

Pode-se entretanto calcular a rugosidade por outros dois critérios. O primeiro utiliza a raiz quadrada das distâncias ao quadrado em relação a linha média.

$$R_t = \left(\frac{1}{l} \cdot \int_0^l y^2 \cdot dl \right)^{1/2}$$

No segundo critério, estabelece-se uma linha de referência que contém o ponto superior do maior pico e mede-se a distância dos demais pontos em relação à esta linha. Assim temos:

$$R_p = \frac{1}{l} \cdot \int_0^l h_i \cdot dl$$

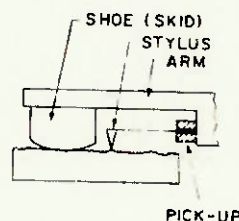


FIGURA 52: Esquema de aparelho utilizado na determinação da rugosidade.

Quanto maior o valor da rugosidade, mais irregular é a superfície, diminuindo os pontos de contato entre a peça e o material. Deste modo, a área real de contato é inferior a área aparente, como mostrado na figura 53.

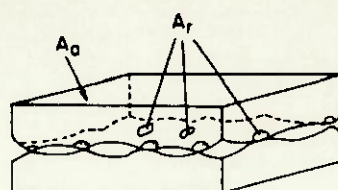


FIGURA 53: Pontos de contato entre duas superfícies metálicas mostrando a área real e a área aparente de contato.

A intensidade, distribuição e direção da rugosidade são parâmetros importantes para estabelecer, juntamente com o tipo de atrito existente na interface, o lubrificante adequado para a operação de forjamento a ser executado. É também a rugosidade inicial, fator de influência na qualidade superficial da peça acabada que ultimamente tem se tornado um parâmetro importante de projeto.

O escoamento do material sobre a ferramenta, constituída de material mais resistente, é provocado pelo alto valor de tensão na interface (σ_{int}), já que se trata de uma força aplicada sobre a área real de contato. Desde que esteja ocorrendo a deformação, a tensão resistente ao cisalhamento na interface é igual a tensão cisalhante limite de escoamento do material ($\tau_i = K$). Rapidamente e na proporção que os pontos de contato se deformam surgem novas superfícies de contato. O processo caminha fazendo com que a área real aproxime-se da área aparente. Em cada ponto de contato, o coeficiente de atrito pode ser dado pela expressão $\mu = (K/P)$, logo com o aumento da área, a pressão de contato diminui e temos o acréscimo do coeficiente de

atrito. Quando se atinge a situação $A_1 \leq A_2$, a tensão passa ao valor $P = d_1$ e o coeficiente é máximo ($\mu = 0.557$).

Nesta situação, predomina o fenômeno da aderência, constituindo-se no surgimento de forças inter-atômicas na interface devido a grande aproximação dos pontos de contato. Em decorrência disto, cessa-se o escoamento do material na superfície, dando-se início a sua deformação interna por cisalhamento de sub-camadas próximas à interface. Tal procedimento representa a condição de máxima força de atrito que pode ocorrer.

O trabalho de deformação na superfície juntamente com a teoria da aderência são os responsáveis pelo surgimento da força de atrito.

No caso de interfaces sem presença de lubrificantes, também chamado condição de atrito seco, formam-se regiões de aderência entre os materiais intercaladas por uma película contaminante com resistência ao cisalhamento (τ_c). A medida que se desenvolve a deformação, cada vez mais o fenômeno de aderência domina o processo. Para esta situação, a tensão resistente ao cisalhamento é dada por:

$$\tau_t = a.K + c.\tau_c$$

onde: a (é a proporção relativa da área da superfície que sofre adesão)

c (é a proporção relativa da área da superfície coberta pela película contaminante)

Quando na interface temos a presença de uma película sólida suficientemente espessa para separar as duas superfícies, esta pode agir como lubrificante se sua resistência ao cisalhamento for inferior a K , caso contrário dizemos que se trata de um separador. A tensão do cisalhamento é dada por:

$$\tau_1 = \tau_0$$

onde: τ_0 (é a tensão de cisalhamento da película sólida)

As películas podem ser a base de óxidos (desde que possuam a propriedade de uma dureza inferior aos dos metais em contato e recubram totalmente a peça de trabalho sem ruptura), revestimento de metais (geralmente são os melhores lubrificantes sólidos), polímeros ou grafites.

Os polímeros são sensíveis ao acréscimo de pressão, desse modo a tensão de cisalhamento é dada por:

$$\tau_1 = \tau_0 + \alpha \cdot P$$

onde: τ_0 (é a tensão de cisalhamento sem a aplicação de pressão)

α (é o coeficiente corretivo)

P (é a pressão)

Para pressões elevadas o valor de τ_0 é desprezível e a tensão de cisalhamento vale:

$$\tau_1 = \alpha \cdot P$$

onde: α assume o valor de β

Certos compostos orgânicos contendo fósforo, enxofre e/ou cloro sob alta pressão reagem com superfícies metálicas produzindo substâncias com baixa tensão de cisalhamento. Este processo é chamado de lubrificação a alta pressão. Por outro lado, alguns compostos orgânicos polares atacam a superfície metálica ou camadas de óxidos independentes da pressão, formando uma película lubrificante com alto ponto de fusão. Neste caso, chamamos de lubrificação superficial.

A lubrificação hidrodinâmica é descrita como uma película de fluido que separa totalmente duas superfícies metálicas. Na prática esta é uma condição impossível de se obter, no entanto pode-se alcançar resultados próximos do ideal para certas condições como: altas velocidades de conformação, geometria adequada e aumento da espessura da película lubrificante.

O último caso de lubrificação a ser considerado baseia-se nas propriedades dos lubrificantes líquidos o qual possibilitam a formação de uma condição hidrodinâmica. Sua baixa compressibilidade e a capacidade de formarem películas protetoras, contribui para o surgimento de bolsas entre as superfícies. Estas são intercaladas por alguns pontos de

contato metal-metal, daí o nome de lubrificação por filme-misto. Quanto maior a velocidade de conformação e a viscosidade do lubrificante, maior é a quantidade de fluido arrastado sob a forma de bolsas. Gradativamente diminuem-se os pontos de contato, o que provoca uma queda no coeficiente de atrito.

Empregando-se lubrificantes, altera-se as condições de interface dos materiais, passando-se de uma situação de atrito seco para uma outra das apresentadas. Além disso, uma série de vantagens associadas à aplicação de lubrificantes podem ser obtidas como:

- DIMINUIÇÃO DO DESGASTE DOS MATERIAIS EM CONTATO
- DIMINUIÇÃO DA TENSÃO DE CIZALHAMENTO DE ATRITO
- PREVENÇÃO DE MICRO-SOLDADURA (ADERÊNCIA)
- CONTROLE DA RUGOSIDADE SUPERFICIAL DA PEÇA ACABADA
- CONTROLE DA TEMPERATURA NAS SUPERFÍCIES DA INTERFACE
- FÁCIL APLICAÇÃO E REMOÇÃO
- FÁCIL MANUSEIO, SEGURO E DE BAIXO CUSTO

Os principais lubrificantes são apresentados a seguir:

Process	Steel	Stainless steel, nickel base	Titanium	Copper-brass	Aluminum magnesium
Rolling	None (GR suspension) (MO FA-EM)	As steel	As steel	MO-FA-EM ^b	0.2
Extrusion ^d	GL (GR)	GL 0.02	GL 0.02	None (GR) (GL)	ST 0.2 0.02
Forging	None GR	ST 0.2	GL MoS ₂ 0.1	GR	GR MoS ₂ 0.1-0.2 0.1-0.2

^aThe symbol ST indicates sticking friction

^bHyphenation indicates that several components are used in the lubricant

^cLess frequent lubricant usage is shown in parentheses

^dInterface pressures can be very high, and sticking may occur even if μ is low

EM emulsion, the listed lubricants are emulsified and 1-5% is dispersed in water

FA fatty acid, alcohol, esters, esters

GL glass sometimes in conjunction with GR on the die

GR graphite

MO mineral oil

TABELA 4: Principais tipos de lubrificantes e respectivos valores de coeficientes de atrito.

Process	Steel	Stainless steel, ^a nickel base ^c	Titanium ^b	Copper, brass	Aluminum, magnesium ^d
Bar drawing	EP FO-MO on line or PH grease or CR grease	CL-EP-MO 0.1	As extrusion, or PC	FO-MO 0.1	SP 0.1
		0.1		SP 0.05	FO-MO(50-400) 0.05
Tube drawing	EP FO-MO	SP on oxalate 0.05	as bar	as bar	as bar
	SP on PH	PC 0.05			
Light pressing	MO, SP-EM	EP-MO 0.05	MoS ₂ -MO	MO-EM 0.1	FA-MO 0.05
		EP-MO-EM 0.1			
Heavy sheet drawing	FO, FO-EP-MO	SP 0.1	CR-grease ^e	FO-MO 0.05	FO 0.05
	SP, SP on PH Pigmented FO SP	CL, MO 0.1 0.05		Pigmented FO SP 0.05	
Heavy ironing	EP CR-grease	SP on oxalate 0.1	CR-grease ^e	FO 0.1	Lardol 0.05
	SP on PH	0.05	CL + CR	SP 0.05	

^a Chlorine is the most effective; EP agent on stainless steel.

^b Chlorine is avoided for titanium.

^c Sulfur is avoided for nickel because of reaction and for copper because of staining.

^d Magnesium alloys are usually worked warm (above 200°C).

^e This information indicates that several components are used in lubricant.

Interface pressures can be very high, and sticking may occur even if μ is low.

CL = usually conditioned hot.

CL = chlorinated paraffin.

EM = emulsion, the listed lubricants are emulsified and 1-20% is dispersed in water.

EP = extreme pressure compounds containing S, Cl, and/or P.

FA = fatty acids, alkylol amines, ester.

FO = fats and fatty oils such as palm oil, synthetic palm oil.

GR = grease.

MO = mineral oil (viscosity in units of centistoke ($= \text{mm}^2/\text{s}$) at 40°C).

PH = phosphate surface conversion.

PC = polymer coating.

SP = soap (powder, or dried aqueous solution) or as a component of an EM.

TABELA 4: Continuação 30

Process	Steel	μ	Stainless steel, ^a nickel base ^c	μ	Titanium ^b	μ	Copper, brass	μ	Aluminum, magnesium ^d	μ
Rolling	EO	0.03	CL-MO ^e	0.07	FO-MO	0.1	FO-MO(10-50)	0.03	1-5% FA-MO	0.03
	FO-EM	0.07	CL-FO-EM	0.1	MO on oxidized surface	0.1	FO-MO-EM	0.07	(5-20) (or synthetic MO)	
	(FO-MO)	0.05			SP	0.1				
Extrusion/ light severe	EP-MO	0.1	CL-MO	0.1	SP or GR grease on fluoride-PH	0.05	FO-MO	0.1	Lanolin	0.05
	SP on PH	0.05	SP on oxalate	0.05			GR-FO	0.05	Zn stearate	0.05
	MoS ₂ + SP on PH	0.05					GR-grease	0.05	SP on PH	0.05
Forging, light severe	EP-MO	0.1	EP-MO	0.1	As extrusion		FO	0.05	FO	0.05
	SP on PH	0.05	CL-MO SP on oxalate	0.1 0.05			SP	0.05	Lanolin	0.05
Wire drawing, light heavy	SP-FO-EM	0.1	CL-MO	0.1	As extrusion		SP-FO-EM	0.1	FO-MO(20-40)	0.03
	SP on lime or borax	0.05	SP on oxalate	0.05			FO-MO(20-80)	0.05	FO-MO(100-400)	0.03
			PC or CL-MO	0.05			SP-FO-EM	0.1	FO-MO-EM	0.1

TABELA 4: Continuação

- Ferramenta

O problema da rugosidade abordado no item anterior é uma característica importante, pois a boa qualidade superficial da ferramenta influi decisivamente no estado da superfície da peça acabada. A medida que se exigem tolerâncias superficiais mais restritas, deve-se trabalhar com matrizes polidas além de utilizar-se uma camada adequada de um apropriado lubrificante para os materiais e o forjamento em questão.

A vida útil da matriz é outro parâmetro importante que influi no processo de forjamento. O desgaste devido à conformação causa uma alteração nas tolerâncias dimensionais acarretando, a partir de um determinado ponto, o refugo da peça. Para tal deve-se observar alguns cuidados como evitar sobrecarga de conformação pelo bom dimensionamento do processo e dos esforços necessários, desenvolver um método de controle de qualidade eficiente e utilizar máquinas e equipamentos adequados associados a correta montagem das ferramentas.

Finalmente deve ser abordada as características geométricas das ferramentas no forjamento em matrizes fechadas. O correto dimensionamento das pré-formas evita que na conformação final ocorra um escoamento não uniforme do material, provocando dobras na peça como mostrado nas figuras 54 e 55.

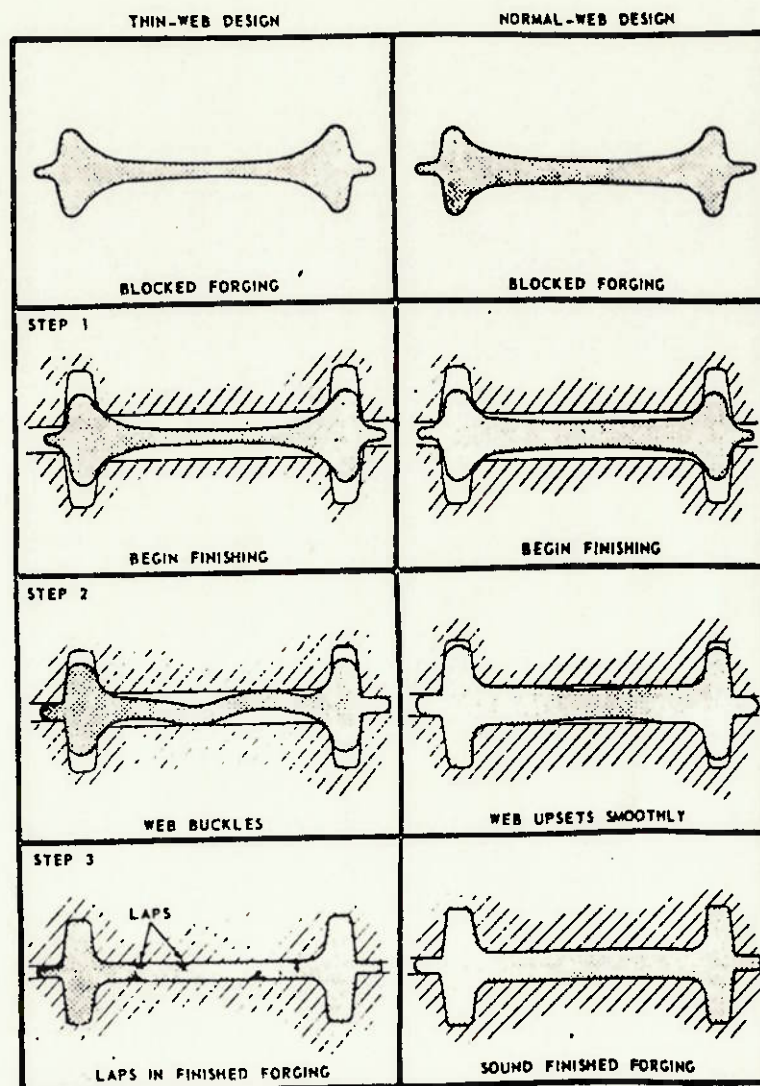
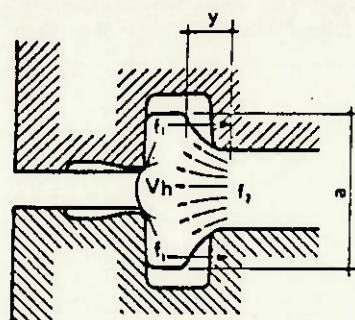
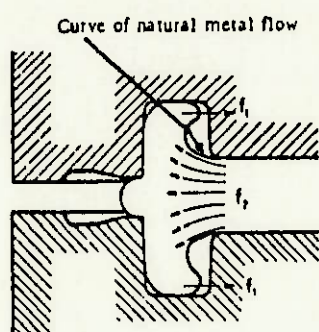


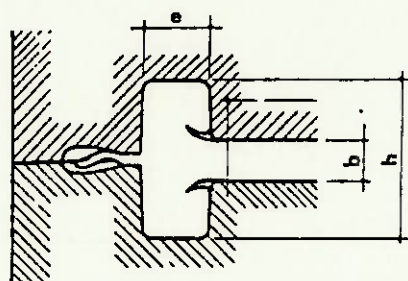
FIGURA 54: Formação de dobras na peça acabada devido ao mau dimensionamento das pré-formas.



Formation of Flash



Reverse Flow Forming a Fold



Formed Forging Defect

FIGURA 55: Formação de dobras na peça acabada pelo mau dimensionamento do canal de rebarba.

Passagens muito estreitas após regiões com grandes cavidades também não são adequadas. O canal de rebarba deve ter as suas dimensões corretas para evitar o escoamento excessivo de material (canal muito aberto) ou provocar uma

severa restrição à passagem deste acarretando a necessidade de cargas de conformação mais elevadas (canal estreito).

2.2.B) FATORES DE NATUREZA METALÚRGICA

Relacionam-se com as propriedades dos materiais a serem conformados. São as características impostas por eles ao processo de forjamento.

- Composição Química

Os materiais podem estar em seu estado puro ou apresentarem elementos de liga na sua constituição. As propriedades mecânicas variam muito dependendo do número de elementos de liga e suas quantidades, bem como da presença de impurezas. Os valores característicos de dureza, alongamento, extrusão, tenacidade, resistência conformação, faixa de temperatura de aquecimento, condutibilidade térmica, resistência a corrosão e etc., dependentes em grande parte da composição química, influem no processo de forjamento e no estado da peça acabada.

Assim, a variação nas propriedades mecânicas torna-se fator determinante na trabalhabilidade dos materiais, conferindo melhores condições para o forjamento a frio ou a quente. No item 2.3 será destacado mais detalhadamente as características dos materiais e a presença de elementos de liga e impurezas.

- Microestrutura

A composição química associada à microestrutura caracterizam o estado e as propriedades do material. Quanto ao primeiro, este já foi exposto no item anterior. Já a microestrutura envolve problemas de tamanho de grão, presença de solução sólida, precipitação de segunda fase, recristalização e encruamento.

O comportamento do material frente as variações destes elementos e consequentemente a influência na sua trabalhabilidade foram explicados com detalhes no item 2.2.A.

2.3) MATERIAIS PARA FORJAMENTO:

A técnica do forjamento possibilita a utilização de inúmeros tipos de materiais. A escolha adequada da matéria-prima tem como principal objetivo atender às especificações de projeto da peça acabada. Assim, critérios de resistência, dimensionais, qualidade superficial, tipo de forjamento e outros já abordados devem ser levados em conta pelo projetista. Os principais materiais utilizados e suas características apresentam-se a seguir.

2.3.A) AÇOS

Os aços são os materiais mais comuns na fabricação de peças forjadas. Apresentam características importantes quanto a quantidade de carbono e a presença de elementos de liga. No forjamento a quente, deve-se observar a faixa de temperatura de conformação na qual se trabalha. Para aços não ligados, esta faixa diminui com o aumento da porcentagem de carbono, exigindo um maior controle do processo. A presença de elementos de liga influem na diminuição da faixa de temperatura de conformação, e na condutibilidade térmica do material, provocando a necessidade de um aquecimento lento para obter-se maior homogeneização da temperatura na peça, evitando grandes diferenças entre a superfície e sua parte central, o que pode provocar trincas durante a conformação.

O forjamento a frio por se desenvolver sob condições mais austeras, restringe a faixa de aços apropriados para a conformação. Os aços com alto teor de gases em sua constituição devem ser excluídos, principalmente aqueles com a presença de nitrogênio na ordem de 0,01% até 0,03%, pois provoca um acentuado aumento de dureza e uma diminuição na tenacidade. O aumento da porcentagem de carbono e de elementos de liga dificultam a conformação a frio. Alguns aços para forjamento a frio não são adequados se utilizados

no forjamento a quente porque não permitem cementação em caixa ou têmpera e revenido posterior à conformação. Estes tipos de aços encontram-se nas tabelas de 5 a 15.

Tipo de acero (según DIN 17006)	Tipo de des-oxidación ¹⁾	C %	Si %	Mn %	P % máximo	S % máximo
UQSt36-2 ³⁾	U	0,13	Trazas	0,25/0,45	0,040	0,040
UQSt38-2	U	0,19	Trazas	0,25/0,45	0,040	0,040
(Mbk 6) ²⁾	RR	0,18	0,15	0,20/0,40	0,040	0,040
(Ma 8) ²⁾	RR	0,06/0,12	0,15	0,20/0,40	0,040	0,040
(Ma 12) ²⁾	RR	0,10/0,16	0,15	0,25/0,50	0,040	0,040

¹⁾ U = efervescente, RR = muy desoxidado (mediante elementos neutralizantes del nitrógeno)

²⁾ Abreviación solamente provisional

³⁾ Conocido también como MUK 7

TABELA 5: Tipo e composição química de aços para conformação a frio que não permitem tratamento térmico após forjamento.

Tipo de acero (según DIN 17 006)	no tratado (conformado en caliente), no tratado y descortezado		Endurecido en frío (según el grado de conformación) Valores informativos sin compromiso		
	Resistencia a la tracción kg/mm ²	Estricción % mínimo	Límite de fluencia kg/mm ²	Resistencia a la tracción kg/mm ²	Alargamiento L = 5d ₀ %
UQSt36-2	34/44 ¹⁾	—			
UQSt38-2	38/47	—			
(Mbk 6) ²⁾	30/42	60	≥ 40	50 hasta 65	≥ 10
(Ma 8) ²⁾	32/44	60			
(Ma 12) ²⁾	36/48	55			

¹⁾ El valor mínimo no se garantiza si se conviene en el pedido un contenido de C menor que el fijado

²⁾ Abreviación solamente provisional.

TABELA 6: Propriedades mecânicas de aços para conformação a frio conforme tabela 5.

Siglas UNI	Siglas de Fabricantes					Estado del material	R kg./mm ²	HD Brinell	A % L = 5 d
	COGNIS	BRUDA	FIAT	SIAU	RÖCHLING de la Saar				
A 90	PALM F00	—	—	—	—	Natural	—	—	—
A 37	PALM F 37	—	—	—	—	Natural	≥ 37	—	24
Aq 34	PALM FQ 34	—	—	—	—	Natural	34 a 42	—	30
Aq 42	PALM FQ 42	—	—	—	—	Natural	42 a 50	—	24
Aq 50	PALM FQ 50	—	—	—	—	Natural	50 a 60	—	22
C 10	A0	B0	CA	CU	—	Crudo Normalizado Templado y rev.	35 + 45 42 + 65	143 127 —	30 20
De cem.									
C 15	A1	B1	C1A	C1	RE2	Crudo Normalizado Templado y rev.	— 40 + 50 55 + 80	163 — —	28 16
De cem.									
15 NC 11	CG2 CG2-Pb	CN25	F2C	G2	RAE2	Recocido Templado y rev.	100 a 130	211 —	— 10
De cem.									
15 NC 13	—	CN35	F2D	—	RAE3	Normalizado Recocido Templado	80 75 90 a 120	238 223 269 a 350	— — ≥ 9
De cem.									
15 CN 5	NG4	—	FOE	G14	—	Recocido Templado y rev.	125 a 150	263 —	— 5
De cem.									
C 20	A2	B2	C2	C2	—	Recocido Normalizado Bonificado	— 45 + 60 55 + 65	163 — —	— 28 22
De bonificac.									

TABELA 7a1: Tipos e características mecânicas de aços para forjamento a quente.

Siglas UNI	Siglas de Fabricantes					Estado del material	R kg./mm ²	HD Brinell	A % L = 5 d
	COGN	BREDA	PIAT	SIAD	RÜCHLING de la Saar				
C 30	A3	B3	C3	C3	RM3	Recocido Normalizado Bonificado	— 80 + 80 80 + 70	178 — —	— 23 19
De bonificac.									
C 40	A4	B4	C4	C4	RM4	Recocido Normalizado Bonificado	— 80 + 70 70 + 80	207 — —	— 18 14
De bonificac.									
C 50	A5	B5	C5	C5	RM5	Recocido Normalizado Bonificado	— 70 + 80 80 + 90	235 — —	— 14 12
De bonificac.									
35 CM 4	K4S	CM3	VMC3	YCM	—	Recocido Bonificado	— 85 + 100	223 —	— 14
De bonificac.	K4S-Pb								
30 CD 4	KM0	—	—	UM6	—	Recocido Normalizado Bonificado	— 65 + 80 80 + 90	207 — —	— 14 13
De bonificac.									
35 NC 9	GN5	CN2	V2B	KN	RAN3H	Recocido Bonificado	— 80 + 100	212 —	— 15
De bonificac.									
38 NCD 4	GNB 2 GNB2-Pb	R2	V0MBC	NCM2	Monix 35	Recocido Bonificado	— 95 + 110	223 —	— 14
De bonificac.									
30 NCD 12	GNM	R3	V3M	KNM0	—	Recocido Bonificado	— 100 + 115	255 —	— 15
De bonificac.									
30 CD 10	KMV	—	—	—	—	Recocido Bonificado	— 90 + 110	241 —	— 13

TABELA 7a2: Tipos e características mecánicas de aceros para forjamento a quente.

Siglas UNI	Temperaturas de					Medio de temple	Características y empleo
	Forjatura °C	Normalización °C	Recocido °C	Temple °C	Revenido °C		
A 00	1150 + 850	650 + 700	—	—	—	—	Para elementos sometidos a bajas sollicitaciones y trabajos corrientes.
A 37	1150 + 850	650 + 700	880 + 980	—	—	—	Para elementos a forjar, poco sollicitados y que no se han de bonificar.
Aq 34	1200 + 900	650 + 700	890 + 910	—	—	—	De uso común, soldable; se puede trabajar fácilmente; para órganos poco sollicitados.
Aq 42	1150 + 850	650 + 700	870 + 890	—	—	—	Para árboles, tornillería corriente, ganchos medianamente sollicitados.
Aq 50	1100 + 850	650 + 700	860 + 880	—	—	—	Cubos, ejes, tensores, tornillos, engranajes poco sollicitados, tornillería varia.
C 10	1250 + 850	910 + 930	650 + 680	910 + 930	120 + 150	agua	Elementos poco sollicitados, pernos, árboles de distribución, cubos, casquillos, engranajes, tornillos, mandriles, etc.
De cem.							
C 15	1250 + 850	900 + 920	650 + 680	900 + 920	120 + 150	agua	Para ejes, árboles de distribución, cubos, espárragos medianamente sollicitados, engranajes, casquillos para utillajes.
De cem.							
15 NC 11	1100 + 850	860 + 880	840 + 860	830 + 850	150 + 180	aceite	Empleado especialmente en la industria de automoción para árboles y engranajes, coronas, piñones y para piezas de medianas y grandes dimensiones muy sollicitadas.
De cem.							
15 NC 13	1050 + 850	850 + 880	820 + 850	790 + 810	180 + 200	aceite	Como anteriormente, para elementos de grandes dimensiones y para grandes esfuerzos.
De cem.							
19 CN 8	1100 + 850	860 + 880	850 + 880	850 + 870	150 + 180	aceite	Indicado para elementos cementados de medias y grandes dimensiones medianamente sollicitados. Piñones, coronas cónicas, engranajes, pernos, púas articuladas.
De cem.							
C 20	1200 + 850	900 + 940	650 + 700	880 + 920	560 + 640	agua	Para ejes, grandes árboles, bulones, piezas de máquina, elementos forjados en general, ejes para cubos de bicicletas, tirantes de dirección, palas para ventiladores.

TABELA 7b₁: Temperaturas de tratamiento térmico e empregos usuais de aços para forjamento a quente conforme tabela 7a₁.

Símbolos UNI	Temperaturas de					Medio de temple	Características y empleo
	Forjadura °C	Normalización °C	Recocido °C	Temple °C	Revenido °C		
C 30	1200 ÷ 850	880 ÷ 920	650 ÷ 700	870 ÷ 900	560 ÷ 640	agua	Para tornillos, engranajes poco solicitados, ejes, árboles, bielas, cubos, tornillos para prensas, ganchos, piezas forjadas en general.
De bonificac.							
C 40	1200 ÷ 850	860 ÷ 900	650 ÷ 700	840 ÷ 880	560 ÷ 640	agua	Para partes de máquinas donde se requiere dureza, cilindros, laminadores, bayonetas, rejas de arados, punzones, estampas, engranajes; piezas forjadas en general.
De bonificac.							
C 50	1150 ÷ 850	850 ÷ 880	650 ÷ 700	820 ÷ 850 840 ÷ 870	560 ÷ 640	agua aceite	Partes de máquina donde se requiere una dureza elevada engranajes, piezas de armas, chavetas, útiles agrícolas, bielas, muelles, pedales de bicicleta, grandes forjados.
De bonificac.							
35 CM 4	1150 ÷ 850	860 ÷ 880	680 ÷ 720	820 ÷ 850 860 ÷ 900	580 ÷ 640	agua aceite	Para órganos de máquinas muy solicitados: pequeños elementos estampados, árboles cigüeñales poco solicitados, piezas forjadas.
De bonificac.							
30 CD 4	1150 ÷ 850	890 ÷ 920	680 ÷ 720	870 ÷ 910	560 ÷ 640	aceite	Adecuado para órganos de máquinas de pequeñas y medianas dimensiones. Usado para tubos y chapas de elevada resistencia. Adecuado para endurecerse superficialmente HRC > 53
De bonificac.							
35 NC 9	1150 ÷ 850	850 ÷ 880	650 ÷ 680	840 ÷ 870	580 ÷ 640	aceite	Adecuado para órganos de gran resistencia. Muy empleado en las construcciones automovilísticas, árboles motores, ejes, bielas, tornillería gruesa, palancas, etcétera.
De bonificac.							
38 NCD 4	1150 ÷ 850	850 ÷ 880	650 ÷ 700	840 ÷ 870	560 ÷ 640	aceite	Tenaz y de elevada resistencia a los esfuerzos dinámicos y a los alternados; muy usado en la industria de automoción; adecuado para tornillería tratada.
De bonificac.							
30 NCD 12	1150 ÷ 900	840 ÷ 860	640 ÷ 680	840 ÷ 870	560 ÷ 640	aceite	Usado para órganos de máquinas de cualquier dimensión cuando se requieren elevadas resistencias a la fatiga. Tornillería tratada de elevada resistencia.
De bonificac.							
30 CD 10	1150 ÷ 850	880 ÷ 900	700 ÷ 750	860 ÷ 900	550 ÷ 650	aceite	Usado para órganos que requieren mucha tenacidad y resistencia al desgaste; cilindros nitrurados para motores; árboles cigüeñales de motores de aviación, etcétera. Después de la nitruración, la dureza superficial es > 650 Vickers.

TABELA 7b₂: Temperaturas de tratamiento térmico e empleos usuais de aços para forjamento a quente conforme tabela 7a₂.

Tipo de acero (según DIN 17006)	C %	Mn %	Cr %	Mo %	Ni %
Cq 15	0,15	0,45	—	—	—
15 Cr 3	0,15	0,50	0,55	—	—
16 Mn Cr 5	0,16	1,15	0,95	—	—
20 Mo Cr 4	0,20	0,75	0,40	0,45	—
15 Cr Ni 6	0,15	0,50	1,55	—	1,55
17 Cr Ni Mo 6	0,17	0,50	1,65	0,30	1,55

TABELA 8: Tipo e composição química de aços para deformação a frio que permitem cementação após forjamento.

Tipo de acero (según DIN 17 006)	Estirado en frío, recocido blando y ligeramente reestirado en frío		Templado por inducción, 30 mm diámetro	
	Resistencia a la tracción kg/mm ² máximo	Estricción de rotura % mínimo	Resistencia a la tracción kg/mm ²	Resiliencia (KCU) kgm/cm ² mínimo
Cq 15	52	65	55/80	6
15 Cr 3	52	62	70/95	6
16 Mn Cr 5	56	62	85/115	5
20 Mo Cr 4	56	62	80/110	6
15 Cr Ni 6	58	62	95/125	5
17 Cr Ni Mo 6	65	58	105/135	5

TABELA 9: Propriedades mecânicas de aços para forjamento a frio conforme tabela 8.

Tipo de acero (según DIN 17 006)	C %	Mn %	Cr %	Mo %	Ni %
Cq 22	0,22	0,45	—	—	—
Cq 35	0,35	0,65	—	—	—
Cq 45	0,45	0,65	—	—	—
38 Cr 1	0,38	0,65	0,28	—	—
37 Cr 4	0,37	0,75	1,05	—	—
42 Cr Mo 4	0,42	0,65	1,05	0,23	—
34 Cr Ni Mo 6	0,34	0,65	1,50	0,23	1,50

TABELA 10: Tipo e composição química de aços para deformação a frio que permitem têmpera e revenido após forjamento.

Tipo de acero (según DIN 17 006)	Estirado en frío, recocido blanco y ligeramente reesti- rado en frío		Templado en aceite		Templado y revenido ≤ 16 mm ϕ	
	Resistencia a la tracción kp/mm ² máximo	Estricción de rotura % mínimo	Diámetro máximo mm	Para la dureza mínima nu- clear HRc	Resistencia a la tracción (KCU) kpm/cm ² kp/mm ²	Resiliencia (KCU) kpm/cm ² mínimo
Cq 22	56	62	—	—	55/70	7
Cq 35	59	60	7	40	63/78	5
Cq 45	62	58	11	40	71/86	3
38 Cr 1	60	60	12	40	75/90	5
37 Cr 4	64	60	22	40	95/115	4
42 Cr Mo 4	66	58	28	45	110/130	4
34 Cr Ni Mo 6	70	62	40	45	120/140	5

TABELA 11: Propriedades mecânicas de aços para forjamento a frio conforme tabela 10.

Tipo de acero (según DIN 17006)	C %	Cr %	Mo %	Ni %	Ti %
X6Cr13	0,06	13,0	-	-	-
X8Cr17	0,08	17,0	-	-	-
X12Cr13	0,12	13,0	-	-	-
X21CrNi17	0,21	17,0	-	2,0	-
X6CrNi18 10	0,06	18,0	-	9,5	-
X6CrNiTi 18 10	0,06	18,0	-	10,5	$\geq 5 \times \%C$
X8CrNi18 12	0,08	18,0	-	12,0	-
X6CrNiMo17 12 2	0,06	17,2	2,2	12,0	-
X6CrNiMoTi17 12 2	0,06	17,2	2,2	12,0	$\geq 5 \times \%C$

TABELA 12: Tipo e composição química de aços para forjamento a frio que são resistentes à corrosão.

Tipo de acero (según DIN 17006)	Estirado en frío, recocido blando o bien templado y reestirado en frío		Características de resistencia en estado de montaje		
	Resistencia a la tracción kg/mm ² máximo	Estricción de rotura % mínimo	Estado de tratamiento	Resistencia a la tracción kg/mm ²	Alargamiento de rotura % mínimo
X6Cr13	65	65	recocido	45/65	20
X8Cr17	65	65	recocido	45/65	18
X12Cr13	65	62	templado y revenido	60/80	16
X21CrNi17	95	50	templado y revenido	90/115	9
X6CrNi18 10	75	55	templado	50/70	40
X6CrNiTi 18 10	75	50	templado	50/70	35
X8CrNi18 12	75	55	templado	50/70	40
X6CrNiMo17 12 2	75	55	templado	50/70	40
X6CrNiMoTi 17 12 2	75	50	templado	50/70	35

TABELA 13: Propriedades mecânicas de aços para forjamento a frio conforme tabela 12.

Tipo de acero		Composición química en % de peso (análisis de la fusión)						
Abreviación	Núm. de material	C	Si máximo	Mn máximo	Cr	Mo	Ni	Otros
<i>Aceros ferríticos</i>								
X10Cr13	1.4006	0,08...0,12	1,0	1,0	12,0...14,0	-	-	-
X 8Cr17	1.4016	0,08...0,10	1,0	1,0	16,0...18,0	-	-	Ti $\geq 7 \times C$
X 6CrMo17	1.4113	0,07	1,0	1,0	16,0...17,5	0,9...1,2	-	-
<i>Aceros austeníticos</i>								
X12CrNi188	1.4300	0,12	1,0	2,0	17,0...19,0	-	8,0...10,0	-
X 5CrNi189	1.4301	0,07	1,0	2,0	17,0...20,0	-	9,0...11,5	-
X 2CrNi189	1.4306	0,03	1,0	2,0	17,0...20,0	-	10,0...12,5	-
X10CrNiTi189	1.4541	0,10	1,0	2,0	17,0...19,0	-	9,0...11,5	Ti $\geq 5 \times C$
X 5CrNiMo1810	1.4401	0,07	1,0	2,0	16,5...18,5	2,0...2,5	10,5...13,5	-
X10CrNiMoTi1810	1.4571	0,10	1,0	2,0	16,5...18,5	2,0...2,5	10,5...13,5	Ti $\geq 5 \times C$
X 2CrNiMo1812	1.4435	0,03	1,0	2,0	16,5...18,5	2,5...3,0	12,5...15,0	-

TABELA 14: Tipo e composição química de aços inoxidáveis para forjamento a frio.

Abreviación	Resistencia a la tracción σ_B kp/mm ²	Límite de fluencia o bien límite 0,2 kp/mm ² mín.	Alargamiento de rotura δ_5 %
<i>Aceros ferríticos - recocidos</i>			
X10Cr13	55...65	30	15...20
X 8Cr17	45...60	27	15...20
X 6CrMo17	45...60	30	22...30
<i>Aceros austeníticos - templados</i>			
X12CrNi188	50...70	22	30...50
X 5CrNi189	50...70	19	30...50
X 2CrNi189	45...70	18	30...50
X10CrNiTi189	50...75	21	22...40
X 5CrNiMo1810	50...70	21	26...45
X10CrNiMoTi1810	50...75	23	22...40
X 2CrNiMo1812	45...70	20	26...45

TABELA 15: Propriedades mecânicas de aços inoxidáveis para forjamento a frio conforme tabela 14.

2.3.2) METAIS NÃO FERROSOS

O campo de aplicação dos metais não ferrosos reside em peças cuja utilização deve ser resistentes à corrosão, observado em alguns equipamentos da indústria alimentícia e farmacêutica. Além disso, propriedades como baixo peso específico, condutibilidade elétrica e térmica são fatores de influência na escolha de um material não ferroso para conformação. Novamente as características a qual se destina a peça impõem o material adequado.

- COBRE

O cobre apresenta uma excelente conformabilidade a quente e a frio. No forjamento a quente, a faixa de temperaturas permitida situa-se entre 850°C e 750°C, admitindo-se também faixas de 900°C a 650°C. Já a boa trabalhabilidade a frio é devida ao baixo grau de encruamento deste material. No entanto, o custo de uma peça de cobre é elevado em função de seu preço no mercado, o que restringe a sua aplicação, sendo adotado apenas quando os custos de manutenção advindos do tipo de solicitação justificarem o seu emprego. Na tabela 16 pode ser observada as características deste material.

Denominación según DIN 1708	Abreviación	Peso % Cu min.	Límite 0,2 σ 0,2 kp/mm ² min.	Resistencia a la tracción σ_B kp/mm ² min.	Alargamiento de rotura δ 10 %	Dureza Brinell HB kp/mm ² valores aproximados	Aplicación		
C—Cobre	C—Cu	99,5	= 10 4...8	21	38	55 30 sin valores de resistencia prescritos 30...40 40...65	Piezas recalculadas y prensadas Idem con conductibilidad especial Espárragos, cajas de fuego		
D—Cobre	D—Cu	99,75		20...25	30				
F—Cobre	F—Cu	99,90		sin valores de resistencia prescritos					
E—Cobre	E—Cu	99,90		20...25	30...40			40...65	
SA—Cobre	SA—Cu	99,0	= 26 = 33	30...37 = 37	6 3	95 110	Piezas recalculadas y prensadas Idem con conductibilidad especial		
SB—Cobre	SB—Cu	99,25							
SD—Cobre	SD—Cu	99,8							
SF—Cobre	SF—Cu	99,90							
SE—Cobre	SE—Cu	99,90							

TABELA 14: Tipos de cobres utilizados para forjamento.

- LATÃO

As ligas de cobre contendo zinco são denominadas latão. Este material encontra grande aplicação em peças forjadas, devido uma grande resistência mecânica e excelente trabalhabilidade. O latão apresenta diferentes composições químicas. O chamado latão α que contém no máximo 36% de zinco conforma-se bem a frio, no entanto é um dos poucos materiais cuja conformação a quente torna-se menos vantajosa. O latão β com uma percentagem de zinco entre 36% e 45% tem boa trabalhabilidade tanto a quente, em torno de 700°C a 850°C, quanto a frio. Inversamente oposto, o latão δ com mais de 45% de zinco não apresenta boa trabalhabilidade a quente e a frio.

Quanto ao aspecto corrosivo é importante resaltar o fato de latão não ser resistente a ácidos oxidantes, sais e soluções aquosas do mesmo tipo. O latão é atacado também por amoníaco e por soluções alcalinas, cloradas e sulfurosas.

Apesar destas desvantagens em comparação com o cobre o custo relativo entre eles é considerável, favorecendo o emprego do latão. As principais ligas são apresentadas na tabela 17.

Abreviação	Núm. de material	Límite 0,2	Resistencia a la tracción	Alargamiento de rotura		Dureza Brinell HB kp/mm ² valores medios aproximados	Aplicación
nueva	hasta ahora	$\sigma_{0.2}$ kp/mm ²	σ_B kp/mm ²	δ_5 % mín.	δ_{10} % mín.		
CuZn5	Ms95	2.0220	13	22	20	18	60
CuZn10	Ms90	2.0230	15	24	18	15	60
CuZn15	Ms85	2.0240	16	25	16	14	65
CuZn20	Ms80	2.0250	18	27	15	13	65
CuZn28	Ms72	2.0261	20	30	14	12	70
CuZn30	Ms70	2.0265	22	32	14	12	70
CuZn33	Ms67	2.0280	24	34	13	10	70
CuZn36	Ms63	2.0335	25	36	10	8	75
CuZn37	Ms63	2.0321	26	36	10	8	75
CuZn36 Pb 1	Ms63 Pb	2.0330	30	40	10	8	75
CuZn36 Pb 3	Ms63 Pb	2.0375	30	40	10	8	75
CuZn40	Ms60	2.0360	25	42	12	9	90
CuZn38 Pb 1	Ms60 Pb	2.0370	25	42	12	9	90
CuZn39 Pb 2	Ms58	2.0380					
CuZn39 Pb 3		2.0401					
CuZn40 Pb 2		2.0402	25	44	11	8	100
CuZn40 Pb 3		2.0405					
CuZn41 Pb 2		2.0406					
CuZn44 Pb 2	Ms56	2.0410	Los valores no están determinados				
CuZn 20 Al	SoMs76	2.0460	10...20	34...40	40	-	-

muy buena conformabilidad en frío

buena conformabilidad en frío

todavía un poco conformable en frío y conformable en caliente

buena hasta muy buena conformabilidad en caliente no adecuado para la conformación en frío

Estado F 34 y F 40 empleado para la fabricación de remaches y tornillos resistentes al agua del mar. La elaboración es difícil tanto en frío como en caliente.

TABELA 17: Principais latões utilizados para forjamento.

- BRONZE

Uma outra liga de cobre é obtida com a combinação deste com estanho, a qual chamamos bronze. Este tipo de material apresenta características similares ao latão β com a desvantagem de ser susceptível a tenso-corrosão, ocasionando trincas. A sua utilização justifica-se pelo custo, além de apresentar melhor resistência à corrosão em comparação ao cobre.

- ALUMÍNIO

A aplicação do alumínio tem se difundido principalmente em peças que necessitam limitação de peso. As ligas de alumínio são temperáveis, o que confere maior resistência mecânica associada à boa resistência à corrosão do material.

O alumínio puro oferece excelente trabalhabilidade a frio, permitindo todo tipo de conformação. No entanto, quanto maior o grau de pureza, menor a resistência da peça acabada. Caso seja necessário uma resistência maior, empregam-se elementos de liga como cobre, magnésio, manganês e silício que conferem melhores propriedades mecânicas, porém com pronunciada queda na resistência à corrosão. A quantidade de elementos adicionada no alumínio puro varia conforme se deseja, afim de se obter o material com as características adequadas de projeto. Uma outra forma de produzir a peça acabada com maior resistência mecânica é partir para a conformação dos chamados Alumínios Duros e os Duralumínios. Estes materiais apresentam o inconveniente de não permitirem grandes deformações e neste caso aconselha-se um recozimento anterior.

O forjamento a quente do alumínio e suas ligas também apresentam excelente conformabilidade, superior ao dos aços. A faixa de temperaturas situa-se entre 300°C e 500°C. Os principais tipos de alumínio e suas ligas, tanto para conformação a frio como a quente, são apresentados nas tabelas 18 e 19.

Abreviação	Número de material	Estado	Dimensões		Liantas, espesor en mm	Resistencia a la tracción σ_B kp/mm ² mínimo	Límite 0,2 $\sigma_{0,02}$ kp/mm ² mínimo	Alarga- miento de rotura δ_5 %	Dureza Brinell HB
			Barra redonda, alambres diámetro en mm	Barra cuadrada, barra exagonal, anchura entre caras en mm					
AI99,98 R zh	3.0385.20	estirado	todas	todas	todas	sin valores de resistencia prescritos			
AI99,98 R F4	3.0385.08	prensado	todas	todas	todas	4	27	23	15
AI99,98 R w	3.0385.10	blando	hasta 30	hasta 30	hasta 6	4	29	25	15
AI99,98 R F7	3.0385.26	semiduro	hasta 18	hasta 18	hasta 5	7	9	8	20
AI99,98 R F11	3.0385.30	duro	hasta 10	hasta 10	hasta 3	11	5	4	25
AI99,9 zh	3.0305.20	estirado	todas	todas	todas	sin valores de resistencia prescritos			
AI99,9 F4	3.0305.08	prensado	todas	todas	todas	4	27	23	15
AI99,9 w	3.0305.10	blando	hasta 30	hasta 30	hasta 6	4	29	25	15
AI99,9 F7	3.0305.26	semiduro	hasta 18	hasta 18	hasta 5	7	9	8	20
AI99,9 F11	3.0305.30	duro	hasta 10	hasta 10	hasta 3	11	5	4	25
AI99,8 zh	3.0285.20	estirado	todas	todas	todas	sin valores de resistencia prescritos			
AI99,8 F6	3.0285.08	prensado	todas	todas	todas	6	25	22	18
AI99,8 w	3.0285.10	blando	hasta 30	hasta 30	hasta 6	6	27	23	18
AI99,8 F9	3.0285.26	semiduro	hasta 18	hasta 18	hasta 5	9	8	7	25
AI99,8 F12	3.0285.30	duro	hasta 10	hasta 10	hasta 3	12	5	4	30
AI99,7 zh	3.0275.20	estirado	todas	todas	todas	sin valores de resistencia prescritos			
AI99,7 F6	3.0275.08	prensado	todas	todas	todas	6	25	22	18
AI99,7 w	3.0275.10	blando	hasta 30	hasta 30	hasta 6	6	27	23	18
AI99,7 F9	3.0275.26	semiduro	hasta 18	hasta 18	hasta 5	9	8	7	25
AI99,7 F12	3.0275.30	duro	hasta 10	hasta 10	hasta 3	12	5	4	30
AI99,5 zh	3.0255.20	estirado	todas	todas	todas	sin valores de resistencia prescritos			
AI99,5 F7	3.0255.08	prensado	todas	todas	todas	7	23	20	20
AI99,5 w	3.0255.10	blando	hasta 30	hasta 30	hasta 6	7	25	22	20
AI99,5 F10	3.0255.26	semiduro	hasta 18	hasta 18	hasta 5	10	7	6	30
AI99,5 F13	3.0255.30	duro	hasta 10	hasta 10	hasta 3	13	5	4	35
AI99 zh	3.0205.20	estirado	todas	todas	todas	sin valores de resistencia prescritos			
AI99 F8	3.0205.08	prensado	todas	todas	todas	8	18	16	22
AI99 w	3.0205.10	blando	hasta 30	hasta 30	hasta 6	8	20	18	22
AI99 F11	3.0205.26	semiduro	hasta 18	hasta 18	hasta 5	11	5	4	32
AI99 F14	3.0205.30	duro	hasta 10	hasta 10	hasta 3	14	4	3	38

TABELA 19: Barras de alumínio utilizadas para ferjamento a frio.

Abreviación	Número de material	Estado	Espesor mm	Resistencia a la tracción σ_B kp/mm ² mín.	Límite 0,2 $\sigma_{0.2}$ kp/mm ² mín.	Alargamiento de rotura δ_5 δ_{10} % mínimo		Dureza Brinell HB kp/mm ² Valores aproximados
AI99.98 R F4	3.0385.08	prensado	cual- quiera	4	—	27	23	15
AI99.9 F4	3.0305.08			4	—	27	23	15
AI99.8 F6	3.0285.08			6	2	25	22	18
AI99.7 F6	3.0275.08			6	2	25	22	18
AI99.5 F7	3.0255.08			7	2	23	20	20
AI99 F8	3.0205.08			8	3	18	16	22

TABELA 18b: Perfís de aluminio utilizados para forjamento a frío.

AlMg1 zh	3.3315.20	estirado	todas ≥ 10	todas ≥ 10	todas ≥ 2	sin valores de resistencia prescritos ⁴⁾			
AlMg1 F10	3.3315.08	prensado	todas ≥ 10	todas ≥ 10	todas ≥ 2	10	4	17	15
AlMg1 w	3.3315.10	blando	todas ≥ 10	todas ≥ 10	todas ≥ 2	10	4	18	16
AlMg1 F13	3.3315.26	semiduro	hasta 35	hasta 30	hasta 8	13	9	7	6
AlMg1 F16	3.3315.30	duro	hasta 25	hasta 15	hasta 3	16	14	4	3
AlMg2 zh	3.3325.20	estirado	todas ≥ 10	todas ≥ 10	todas ≥ 2	sin valores de resistencia prescritos ⁴⁾			
AlMg2 F15	3.3325.08	prensado	todas ≥ 10	todas ≥ 10	todas ≥ 2	15	6	15	13
AlMg2 w	3.3325.10	blando	todas ≥ 10	todas ≥ 10	todas ≥ 2	15	6	17	15
AlMg2 F18	3.3325.26	semiduro	hasta 35	hasta 30	hasta 8	18	11	9	8
AlMg2 F21	3.3325.30	duro	hasta 20	hasta 15	hasta 3	21	16	4	3
AlMg3 zh	3.3535.20	estirado	todas ≥ 10	todas ≥ 10	todas ≥ 2	sin valores de resistencia prescritos ⁴⁾			
AlMg3 F18	3.3535.08	prensado	todas ≥ 10	todas ≥ 10	todas ≥ 2	18	8	14	12
AlMg3 w	3.3535.10	blando	todas ≥ 10	todas ≥ 10	todas ≥ 2	18	8	16	14
AlMg3 F23	3.3535.26	semiduro	hasta 35	hasta 30	hasta 10	23	14	9	8
AlMg3 F26	3.3535.30	duro	hasta 20	hasta 10	hasta 5	26	18	4	3
AlMg5 zh	3.3555.20	estirado	todas ≥ 10	todas ≥ 10	todas ≥ 2	sin valores de resistencia prescritos ⁴⁾			
AlMg5 F24	3.3555.08	prensado	todas ≥ 10	todas ≥ 10	todas ≥ 2	24	11	14	12
AlMg5 w	3.3555.10	blando	todas ≥ 10	todas ≥ 10	todas ≥ 2	24	11	16	14
AlMg5 F26	3.3555.26	semiduro	hasta 35	hasta 30	hasta 10	26	15	8	6
AlMg5 F30	3.3555.30	duro	hasta 15	hasta 10	hasta 5	30	20	4	3
AlMgMn zh ⁵⁾	3.3527.20	estirado	todas ≥ 10	todas ≥ 10	todas ≥ 2	sin valores de resistencia prescritos ⁴⁾			
AlMgMn F20 ⁵⁾	3.3527.08	prensado	todas ≥ 10	todas ≥ 10	todas ≥ 2	20	10	12	10
AlMg4,5Mn F28	3.3547.08	prensado	todas ≥ 10	todas ≥ 10	todas ≥ 2	28	16	12	10
									60

1) Los valores indicados son mínimos excepto para los valores máximos señalados por $\leq$.

2) Los coeficientes de alargamiento de esta norma valen solamente para diámetros ≥ 6 mm u otras secciones equivalentes. Para dimensiones inferiores han de convenirse los coeficientes de alargamiento.

3) Condiciones de control respecto a la dureza, ver el apartado 5.

4) Los coeficientes de resistencia para el material semiacabado, suministrado en estado estirado (zh), pueden variar entre los del estado blando y los del estado duro. Lo mismo vale para aquellos estados "prensado" (p) para los que no hay coeficientes de resistencia prescritos.

5) Para AlMgMn y AlMgSi11 con un máximo de 0,05% en peso de Cu y un máximo de 0,4% en peso de Fe, en caso de soliciación por agua del mar, valen las mismas características de resistencia indicadas.
Los números de material son en este caso 3.3528 en lugar de 3.3527 o bien 3.2318 en lugar de 3.2315 (comp. DIN 1725 hoja 1).
Los coeficientes indicados en la tabla permanecen invariables.

TABELA 19a1: Barras de ligas de aluminio (AlMg e AlMgMn) utilizadas para forjamento.

AlSi5 F13	3.2345.51	templado en frío	-	2000	13	7	15	13	40
AlMgSi0,5 F13	3.3206.51	templado en frío	-	2000	13	7	15	13	45
AlMgSi0,5 F22	3.3206.71	templado en caliente	-	2000	22	16	12	10	70
AlMgSi0,5 F25	3.3206.72	templado en caliente	-	2000	25	20	10	8	75
AlMgSi0,8 F20	3.2316.51	templado en frío	-	350	20 hasta 27	10	16	14	60
AlMgSi0,8 F28	3.2316.71	templado en caliente	-	350	28	20	12	10	80
AlMgSi1 p	3.2315.08	presado	-	2000	sin valores de resistencia prescritos ⁴⁾	-	16	14	35
AlMgSi1 w	3.2315.10	blando	-	2000	≤ 15	-	14	12	60
AlMgSi1 F20	3.2315.51	templado en frío	-	500	20 hasta 27	10	12	10	60
AlMgSi1 F20 ⁵⁾	3.2315.51	templado en frío	-	2000	20 hasta 27	20	12	10	80
AlMgSi1 F28	3.2315.71	templado en caliente	-	2000	28	20	10	8	80
AlMgSi1 F32	3.2315.72	templado en caliente	-	2000	32	26	10	8	95
AlMgSi1 F32	3.2315.72	templado en caliente	-	2000	32	25	9	7	95
Aleaciones para tornos automáticos									
AlMgSiPb F20	3.0615.51	templado en frío	-	5000	20	10	10	8	60
AlMgSiPb F28	3.0615.71	templado en caliente	-	5000	28	18	8	6	80
AlCuBiPb F32	3.1655.53	templado en frío	-	1200	32	27	10	8	90
AlCuBiPb F30	3.1655.53	y endurecido en frío	1200	2000	30	25	10	8	90
AlCuBiPb F29	3.1655.53	y endurecido en frío	2000	5000	29	21	10	8	90
AlCuBiPb F37	3.1655.73	y templado en caliente	-	2000	37	28	8	6	110
AlCuMgPb F38	3.1645.51	templado en frío	-	2000	38	25	8	6	100
AlCuMgPb F35	3.1645.51	templado en frío	2000	8000	35	22	8	6	90

TABLA 19a: Barras de aluminio (AlSi y AlMgSi) utilizadas para tornos automáticos.

AlCuMg1 F38	3.1325.51	templado en frío	-	2000	38	26	12	10	100
AlCuMg1 F40	3.1325.51		2000	8000	40	27	10	8	100
AlCuMg1 F36	3.1325.51			31000	36	22	8	6	90
AlCuMg2 F44	3.1355.51	{ prensado y recristado templado en frío	-	2000	44	28	10	8	110
AlCuMg2 F45	3.1355.51	{ prensado, tem- plado en frío	500	2000	45	31	9	7	115
AlCuMg2 F48	3.1355.51		2000	8000	48	34	8	6	125
AlCuMg2 F40	3.1355.51		8000	31000	40	25	6	5	105
Aleaciones AlZnMg									
AlZnMg1 F36	3.4335.71	templado en caliente	-	2000	36	28	10	8	80
AlZnMg1 F36	3.4335.71		2000	5000	36	30	8	6	80
AlZnMg1 F34	3.4335.71			11300	34	29	6	5	75
AlZnMgCu0,5 F47	3.4345.71	templado en caliente	-	2000	47	39	7	6	125
AlZnMgCu0,5 F50	3.4345.71		2000	5000	50	43	7	6	130
AlZnMgCu0,5 F48	3.4345.71		5000	11300	48	41	7	6	130
AlZnMgCu1,5 F53	3.4365.71	templado en caliente	-	5000	53	47	7	6	140
AlZnMgCu1,5 F52	3.4365.71		5000	11300	52	46	6	5	140

4) Los coeficientes de resistencia de material semiacabado que se suministra en estado estirado (zh), pueden variar entre los del estado blando y los del estado duro.
Lo mismo vale para aquellos estados "prensado" (p) para los que no hay coeficientes de resistencia prescritos.

5) Para AlMgMn y AlMgSi con un máximo de 0,05% en peso de Cu y un máximo de 0,4% en peso de Fe, en caso de sollicitación por agua del mar, valen las mismas características de resistencia, indicadas.
Los números de material son en este caso 3.3528 en lugar de 3.3527, o bien 3.2318 en lugar de 3.2315 (comp. DIN 1725 hoja 1).
Los coeficientes indicados en la tabla permanecen invariables.

TABELA 1994: Barras de ligas de aluminio (AlCuMg) utilizadas para forjamento.

Abreviación	Número de material	Estado	Espesor en mm	Resistencia a la tracción σ_B kp/mm ² mínimo	Límite 0,2 $\sigma_{0,2}$ kp/mm ² mínimo	Alargamiento de rotura δ_5 % mínimo	Dureza Brinell ¹⁾ HB kp/mm ² Valores aproximados
Aleaciones forjables a base de Al 99,99R							
AlMg0,5 F7	3.3309.08	templado	todos	7	-	20	18
AlMg1 F10	3.3319.08			10	-	20	18
AlMg2 F13	3.3329.08			13	-	20	18
Aleaciones forjables a base de Al 99,9H							
Al99,9Mg0,5 F7	3.3308.08	prensado	todos	7	-	20	18
Al99,9Mg1 F10	3.3318.08			10	-	20	18
Al99,9MgSi F13	3.3208.51	templado en frío templado en caliente templado en caliente	todos	13	8	17	15
Al99,9MgSi F21	3.3208.71			21	12	16	14
Al99,9MgSi F24 ²⁾	3.3208.72			24	16	14	12
Al99,9ZnMg F25 ²⁾	3.4338.71	templado en caliente	todos	25	17	14	12
Aleaciones de AlMn, AlMg, AlMgMn							
AlMn F10	3.0515.08	prensado	todos	10	4	17	15
AlMg1 F10	3.3315.08			10	4	17	15
AlMg2 F15	3.3325.08			15	6	15	13
AlMg3 F18	3.3535.08			18	8	14	12
AlMg5 F25	3.3555.08			25	12	13	11
AlMgMn F20 ³⁾	3.3527.08			20	10	12	10
AlMg4,5Mn F28	3.3547.08			28	16	12	10

TABELA 19b.: Perfil de ligas de aluminio utilizadas para forjamento.

AlSi5 F13	3.2345.51	templado en frío	todos	13	7	15	13	40
AlMgSi0,5 F13	3.3206.51	templado en frío	todos	13	7	15	13	45
AlMgSi0,5 F22	3.3206.71	templado en caliente	todos	22	16	12	10	70
AlMgSi0,5 F25	3.3206.72	templado en caliente	todos	25	20	10	8	75
AlMgSi0,8 F20	3.2316.51	templado en frío	hasta 10	20 hasta 27	10	16	14	60
AlMgSi0,8 F28	3.2316.71	templado en caliente	hasta 10	28	20	12	10	80
AlMgSi1 F21 ¹⁾	3.2315.51	templado en frío	todos	21 hasta 28	11	14	12	65
AlMgSi1 F28 ²⁾	3.2315.71	templado en caliente	todos	28	20	12	10	80
AlMgSi1 F32 ³⁾	3.2315.72	templado en caliente	todos	32	26	10	8	95
Aleaciones de AlCuMg, AlZnMg								
AlCuMg1 F40	3.1325.51	templado en frío	todos	40	26	14	12	100
AlCuMg2 F42	3.1355.51	templado en frío	hasta 2,0	42	30	12	10	110
AlCuMg2 F44	3.1355.51	templado en frío	más de 2,0	44	32	12	10	110
AlZnMg1 F36	3.4335.71		hasta 1,5	36	28	10	8	80
AlZnMgCu0,5 F48	3.4345.71		hasta 2,5	48	40	7	6	130
AlZnMgCu0,5 F50	3.4345.71	templado en caliente	más de 2,5	50	43	7	6	130
AlZnMgCu1,5 F53	3.4365.71		hasta 2,5	53	46	7	6	140
AlZnMgCu1,5 F54	3.4365.71		más de 2,5	54	47	7	6	140

1) Condiciones de control respecto a la dureza ver el apartado 5.

2) En caso de pequeñas exigencias respecto a la conformabilidad pueden también convenirse en el pedido coeficientes de resistencia más elevados.

3) Para aleaciones AlMgMn y AlMgSi con un máximo de 0,05% en peso de Cu y un máximo de 0,4% en peso de Fe, en caso de sollicitación por agua de mar valen las mismas características de resistencia indicadas.
Los números de material en este caso son 3.3528 en lugar de 3.3527 o bien 3.2318 en lugar de 3.2315 (comp. DIN 1725 hoja 1).
Los coeficientes indicados en la tabla permanecen invariables.

TABELA 106a: Perfil de ligas de aluminio (AlSi o AlMgSi) utilizadas para forjamento.

- TITÂNIO

O titânio vem tomando destaque como material para forjamento nos últimos anos, principalmente pelo seu baixo peso específico, grande resistência à corrosão, altos valores de resistência mecânica a frio e a quente e por não ser magnetizável. Além disso, as ligas de titânio apresentam alta resistência térmica, podendo ser utilizadas em equipamentos que trabalham a altas temperaturas.

A conformação a quente deste tipo de material exige alguns cuidados especiais. O primeiro problema refere-se à faixa de temperatura a qual situa-se entre 870°C a 900°C para titânio puro e de 700°C a 970°C para os materiais com elementos de liga. Deve-se observar também a alta reatividade deste elemento, principalmente ao oxigênio, nitrogênio e hidrogênio, obrigando a um aquecimento sob atmosfera controlada de gás inerte onde pode-se destacar o argônio.

A conformação a frio não é adequada para o titânio puro apresentando pequena trabalhabilidade e necessitando de baixas velocidades. As ligas de titânio não apresentam um aspecto diferente, sendo que algumas delas não permitem conformação. Os principais materiais estão listados na tabela 20.

Tipo de aleação	Denominação	Estado	Características mecânicas			Conformabilidade em frio Raio de curvatura (mm) s	
			Lím. fluência kp/mm ²	Res. tração kp/mm ²	Alarga- mento %	no soldado	soldado
α	TiAl5Sn2,5	recocido	84	88	18	3,5...1,5	4...6
	TiAl5Sn5Zr5	recocido	86	91	18	2,5...5	4...6
	TiAl8Nb2Ta1	recocido	84	90	17	1...6	4...6
	TiAl8Mo1V1	recocido	95	103	16	1...5	7...8
	TiAl6Nb2Ta1Mo1	recocido	85	91	13	aprox.	-
	TiAl6Zr4Mo2Sn2	recocido	96	103	11	5...7	8...10
$\alpha + \beta$	TiMn8	recocido	88	97	15	3...5	no soldado
	TiAl3V2,5	recocido	60	70	15	2...3	4...6
	TiAl4Mo4	recocido	94	104	16	-	frágil
	TiAl6V4	templado	98	114	9	-	frágil
	TiAl6V4	recocido	84	95	14	4,5...6	9...12
	TiAl7Mo4	templado	105	119	10	-	-
	TiAl7Mo4	recocido	105	112	12	-	frágil
	TiAl7Mo4	templado	122	133	10	-	-
	TiAl6V6Sn2(FeCu)	recocido	106	114	17	5	16
	TiAl6V6Sn2(FeCu)	templado	127	133	8	-	-
	TiAl4Mo3V1	recocido	67	98	16	3...4	-
	TiAl4Mo3V1	templado	117	137	6	3,5...4,5	-
β	TiV13Cr11Al3	recocido	91	95	16	2,5...3	3
	TiV13Cr11Al3	templado	123	130	8	-	-
	TiV13Cr11Al3	end. por lam. em frio	172	183	4	-	-
α Comp.	TiCu2	recocido	40...58	50...70	20...30	2...3	3
	TiCu2	templado	59...70	74...83	20...24	-	-
	TiAl6Zr5W1Si0,2	recocido	93	105	17	-	-
	TiSn11Zr5Al2,5Mo1Si0,2	recocido	91	105	12	-	-
$\alpha + \beta$ Comp.	TiSn11Mo4Al2,5Si0,2	templado	107	126	10	-	-
	TiAl6Zr5Mo4Cu1Si0,2	templado	124	140	7	-	-

TABELA 22: Titânio e suas ligas utilizadas para forjamento.

2.4) ENSAIOS DE CONFORMABILIDADE:

Os ensaios de conformabilidade têm o objetivo de verificação prática da trabalhabilidade do material. Trata-se da constatação experimental do seu comportamento. Os ensaios devem seguir normas pré-estabelecidas que especificam corpos de prova, procedimentos e técnicas. Os resultados obtidos podem ser usados nos modelos matemáticos para o cálculo das forças e energias necessárias no processo de conformação.

2.4.1) ENSAIO DE TRAÇÃO

Trata-se de um dos mais importantes ensaios mecânicos de materiais. A ABNT especifica, através do método MP-4, os corpos de prova utilizados neste ensaio que podem apresentar seção retangular ou circular, como indicada na figura 56.

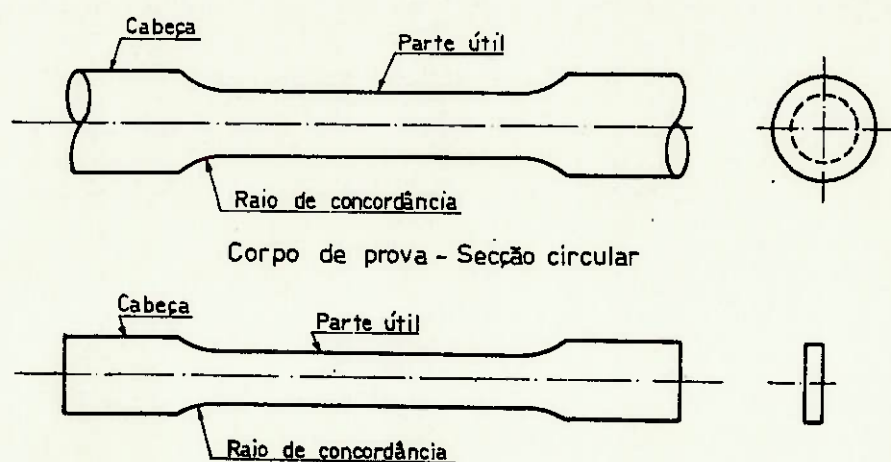


FIGURA 56: Corpo de prova para ensaio de tração.

O corpo de prova assim especificado é preso na máquina de ensaio constituída basicamente de uma bancada rígida, sistema de aplicação de carga, sistema de fixação do material e sistemas de medição (extensômetros, strain-gages, etc.). Aplica-se gradativamente cargas no corpo de prova no sentido de esticá-lo e verifica-se até um determinado ponto o seu comportamento elástico seguindo a lei de Hooke, ou seja, dada uma carga ocorre um alongamento

(deformação) que desaparece caso esta seja retirada. Porém, se a carga atinge um limite, o material sofre uma deformação permanente (escoamento) não retornando ao seu estado inicial. Neste caso se comportou plasticamente.

Aumentando-se o valor da carga aplicada, atinge-se uma situação de máxima tensão seguida de queda e rompimento do mesmo. Pode-se definir três pontos de tensão: tensão limite de escoamento, tensão limite de resistência e tensão de ruptura (ver figura 57).

Convencionou-se plotar num gráfico de tensão em função da deformação os pontos obtidos no ensaio, como mostrado na figura 57.

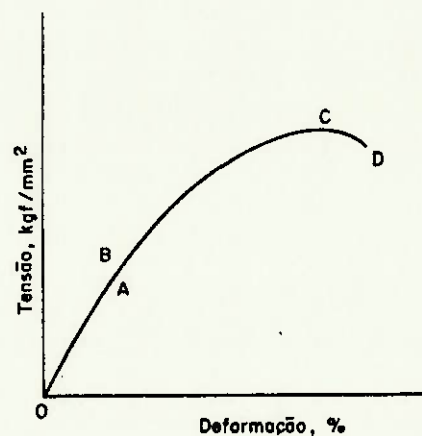


FIGURA 57: Diagrama geral "tensão-deformação".

Existe uma diferença expressa nitidamente nos gráficos entre um material dútil e um outro que não apresenta grande capacidade de escoamento. O primeiro possui uma região de

transição entre a fase elástica e a fase plástica não observada no segundo. Para definir claramente, neste último caso, o limite de resistência ao escoamento, adota-se o critério de 0,2% de deformação, isto é: traça-se uma reta deslocada de 0,2% no eixo de deformação, cruzando o gráfico em um ponto assumido como o valor limite de escoamento.

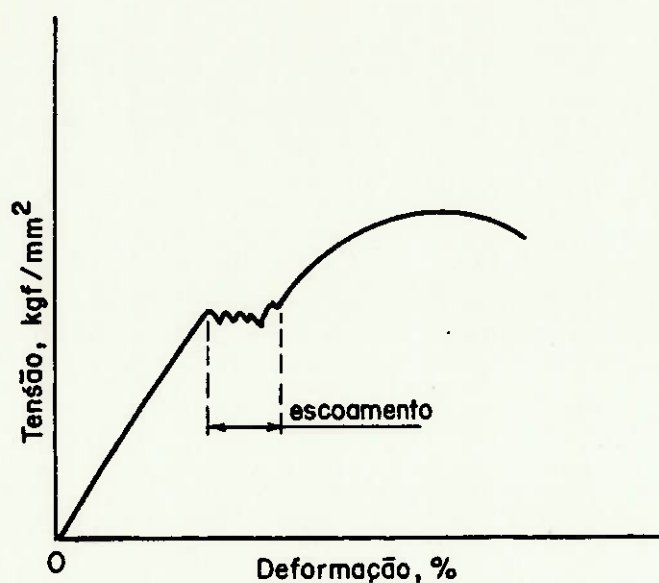


FIGURA 50: Diagrama "tensão-deformação" de um metal dútil, apresentando o fenômeno de escoamento.

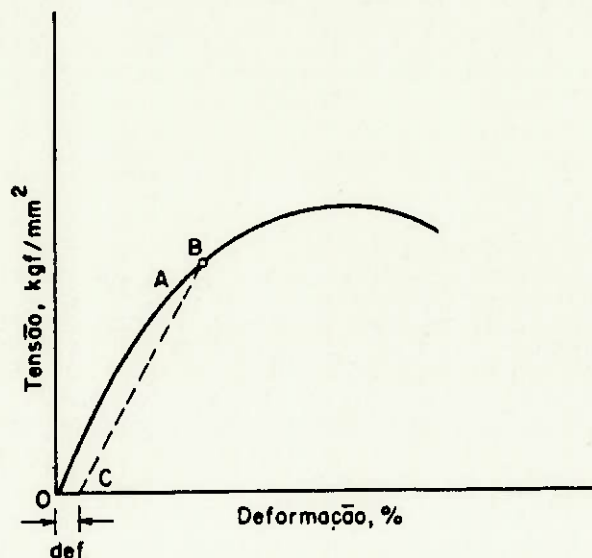


FIGURA 59: Diagrama "tensão-deformação" de um material com pouca capacidade de deformação.

O valor de 0,2% como critério de determinação do valor limite de tensão de escoamento não é fixo. Ele é adotado para a maioria dos materiais, mas para aços com alto teor de carbono ou ligas não ferrosas de alta dureza, costuma-se adotar o valor de 0,1% de deformação. Já no caso do cobre e suas ligas como o latão e bronze, adota-se o valor de 0,5% de deformação.

Além dos valores de tensão de escoamento e ruptura, uma série de outras propriedades mecânicas são extraídas deste ensaio, também importantes para o processo de conformação como: o módulo de resiliência, tenacidade e módulo de elasticidade. A resiliência é a capacidade de um material absorver energia durante sua fase elástica, ou seja, é a

quantidade de energia capaz de ser transmitida ao material sem que este sofra escoamento. Por outro lado, a tenacidade é a capacidade do material absorver energia na faixa plástica de deformação, isto é: a quantidade máxima de energia armazenada sem ocorrer o seu rompimento.

Estes valores são calculados a partir do gráfico tensão-deformação como a área abaixo do mesmo, indicados na figura 60.

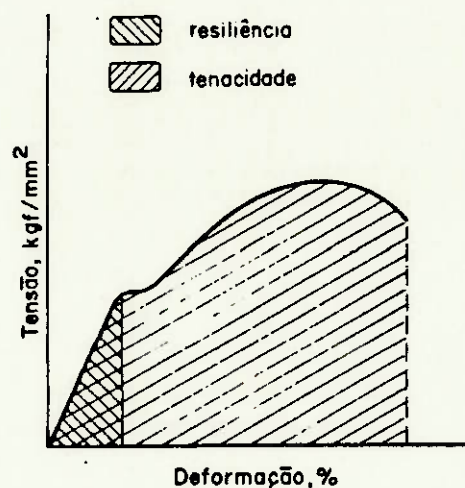


FIGURA 60: Representação esquemática das propriedades resiliência e tenacidade.

O módulo de elasticidade mede a rigidez do material. Desse modo, quanto maior este valor, menor é a capacidade deste se deformar para um dado valor de tensão. Na figura 61 o material A apresenta um valor de módulo de elasticidade maior do que o material B. Este é calculado tomando-se a tangente do ângulo da região reta da curva tensão-deformação. Como esta propriedade relaciona-se à estrutura

cristalina do metal, o seu valor é influenciado pela temperatura, diminuindo a medida que a aumentamos.

Pode-se ainda determinar outras propriedades: alongamento, extrusão e coeficiente de Poisson, porém não tão importantes para análise do forjamento, motivo pelo qual não serão abordados.

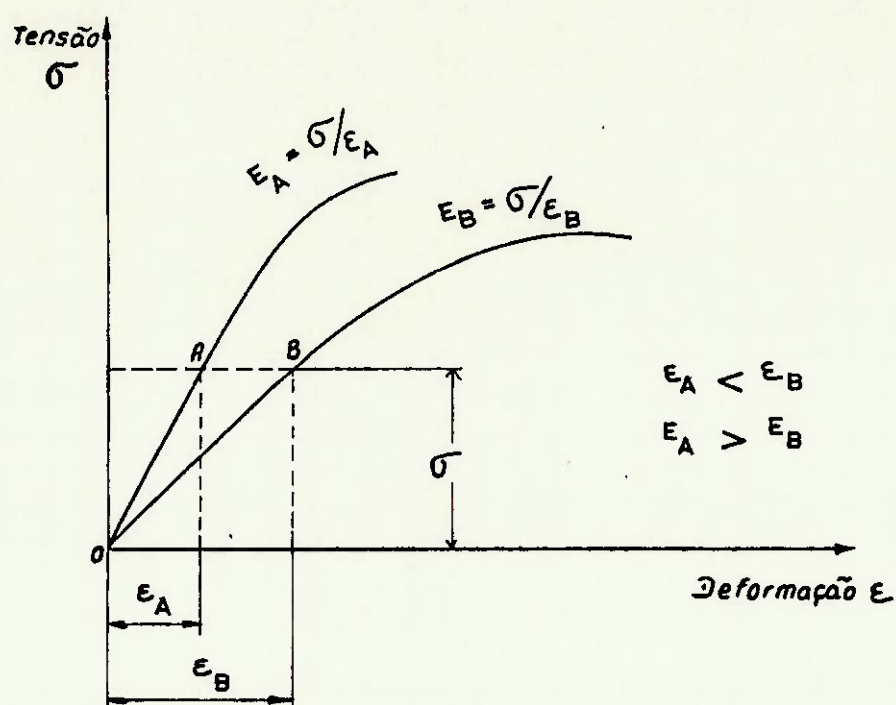


FIGURA 61: Avaliação da rigidez entre dois materiais.

2.4.B) ENSAIO DE COMPRESSÃO

O ensaio de compressão não é muito utilizado na prática, devido a dificuldade e imprecisão na determinação das

medidas decorrentes do fenômeno de flambagem e a existência de atrito entre o corpo de prova e as placas.

As propriedades mecânicas obtidas neste ensaio são as mesmas daquelas do ensaio de tração referidas à compressão. O procedimento para obtenção dos valores são os mesmos, devendo-se primeiramente levantar a curva de tensão-deformação. Toma-se o máximo cuidado para uma perfeita centralização das placas em relação ao eixo do corpo de prova, evitando a aplicação desigual da carga sobre o mesmo, o que comprometeria os resultados.

Existe ainda uma diferença muito importante, dependendo se o material é dútil ou frágil. No primeiro, a medida que se acrescenta carga, há a tendência de deformação com aumento da área da seção transversal, elevando sua resistência. Desse modo, apenas avalia-se com precisão as propriedades na região elástica. O segundo, em função de sua indeformabilidade, apresenta uma ruptura por cisalhamento num plano inclinado de 45° , o que propicia a valiação de algumas propriedades na região plástica, principalmente a tensão limite de ruptura.

O corpo de prova utilizado tem a forma cilíndrica onde a relação entre comprimento e diâmetro varia de 3 até 8. Limita-se os maiores valores desta relação pelo receio da ocorrência de flambagem.

2.2.5) ENSAIO DE TORÇÃO

Trata-se de um ensaio mais elaborado tanto em relação ao equipamento, quanto ao corpo de prova. A máquina de ensaio possui uma cabeça giratória onde é aplicado o momento torçor e uma cabeça fixa ligada a um pêndulo. Deslocando-o de sua posição de equilíbrio, transmite-se o momento através da peça, cujo valor é lido numa escala adequada instalada no mesmo. É importante que o eixo do momento torçor coincida com o eixo longitudinal do material de teste. Um outro valor medido neste ensaio é a deformação angular de um ponto perto da cabeça giratória e um outro sobre a mesma linha longitudinal na cabeça fixa, como mostrado na figura 62.

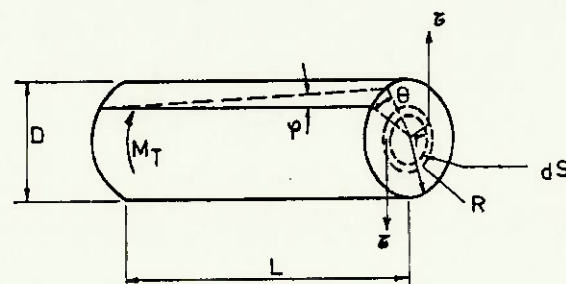


FIGURA 62: Torção em um corpo de prova circular sólido.

Dispõe-se ainda de sistemas auxiliares capazes de medir o número de voltas atingido durante a torção e outro capaz de medir o encurtamento do corpo de prova durante o regime plástico. Este apresenta forma cilíndrica com diâmetro maior

em suas extremidades, justamente para a fixação nas placas. A região central de menor diâmetro tem um comprimento L , chamado comprimento útil, sendo utilizada efetivamente para as medidas. Empregam-se também corpos de prova tubulares, desde que contenham uma espessura mínima de parede para evitar a ruptura por flambagem. Adotam-se algumas relações práticas onde o comprimento útil sobre o diâmetro externo deve ser de 10 e o diâmetro externo sobre a espessura deve estar entre 8 e 10.

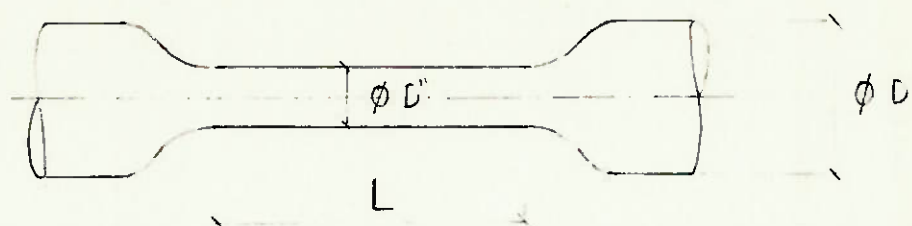


FIGURA 63: Corpo de prova para o ensaio de torção.

Para obtenção das propriedades mecânicas referidas a este ensaio, adota-se um procedimento similar àquele do ensaio de tração, o que implica no levantamento do gráfico tensão-deformação. O momento torçor é dado pela expressão:

$$M_t = \int_0^R \tau \cdot r \cdot dS = \frac{\tau}{r} \int_0^R [r^2 \cdot dS]$$

A integral referida assim representa o momento polar de inércia (J_p) que para seções circulares assumem o seguinte valor:

$$J_p = \pi \cdot D^3 / 32$$

onde: D (é o diâmetro do corpo de prova)

Substituindo a expressão acima na do momento torçor chega-se a:

$$\tau_{max} = 16 \cdot M_t / \pi \cdot D^3$$

onde: τ_{max} (é a tensão de cisalhamento máxima)

M_t (é o momento torçor aplicado)

Observe-se que a tensão de cisalhamento varia de 0 a um valor máximo dado pela expressão acima. Por esta razão, um valor preciso do limite de escoamento ao cisalhamento é de difícil determinação, principalmente nos metais dúcteis, pois submetendo-se o corpo de prova a uma carga, as camadas externas podem atingir o limite plástico enquanto as camadas mais internas continuam no regime elástico. Por este motivo utilizam-se corpos de prova tubulares com o único objetivo de se evitar o gradiente de tensões e obter medidas mais precisas. Assim a expressão torna-se:

$$\tau = 16 \cdot M_t \cdot D_1 / \pi \cdot (D_1^4 - D_2^4)$$

onde: D_1 (é o diâmetro externo do tubo)

D_2 (é o diâmetro interno do tubo)

O valor mais preciso do limite do escoamento ao cisalhamento é extraído do gráfico tensão-deformação utilizando-se o método de $n\%$ de deformação como indicado na figura 44.

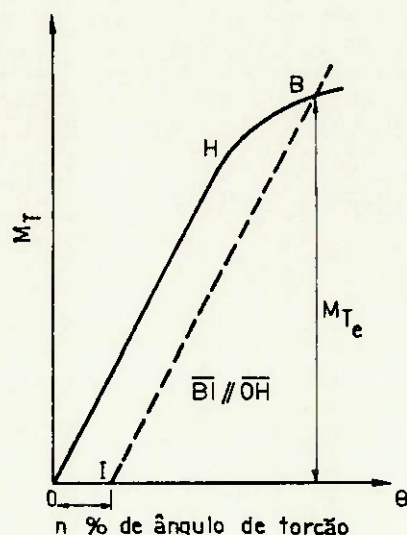


FIGURA 44: Diagrama "tensão-deformação" obtido do ensaio de torção, mostrando o limite de escoamento.

Como pode ser observado na figura anterior, o ponto B situa-se na região plástica, daí os resultados serem aproximados. Por este método, os valores do limite do escoamento ao cisalhamento tornam-se:

$$\tau_e = M_{Te} \cdot R / J_p \quad (\text{seção circular})$$

onde: M_{Te} (é o momento torçor extraído do gráfico)

$$\tau_e = M_{Te} / 2 \cdot \pi \cdot r^2 \cdot e \quad (\text{seção tubular})$$

onde: e (é a espessura do tubo)

r (é a média entre D_1 e D_2)

Analogamente ao ensaio de tração, determina-se aqui o valor do limite de resistência ao cisalhamento. Sua obtenção é extremamente dificultada pela não proporcionalidade entre o momento torçor e a deformação angular na região plástica. Adota-se neste caso a mesma expressão deduzida para o regime elástico, substituindo o valor de M_t pelo máximo valor do momento torçor observado (M_{tr}) antes de ocorrer a ruptura do material. Os resultados assim obtidos servem apenas de comparação e seleção entre os materiais sendo dados pelas expressões a seguir:

$$\tau_p = M_{tr} \cdot R / J_p \quad (\text{seção circular})$$

$$\tau_p = M_{tr} / 2 \cdot \pi \cdot r^2 \cdot e \quad (\text{seção tubular})$$

Outros valores também podem ser extraídos deste ensaio como o módulo de elasticidade transversal (G), módulo de resiliência e tenacidade. Estas propriedades são pouco consideradas no forjamento e não serão discutidas neste item.

2.4.D) ENSAIO DE ANEL

O ensaio de anel tem sido desenvolvido para a determinação do coeficiente de atrito entre o material e a ferramenta sob condições de deformação plástica volumétrica.

Esta técnica envolve apenas a medida de parâmetros geométricos de um anel antes e depois da conformação entre ferramentas planas.

O coeficiente de atrito é relacionado com a variação do diâmetro interno do corpo de prova. Assume-se uma situação ideal, onde inexistisse a ocorrência de atrito entre o anel e a ferramenta, cada elemento deste escorria com uma velocidade de deformação proporcional à sua distância do centro da peça e no sentido de sua borda externa. A presença do atrito provoca uma diminuição da velocidade de deformação na superfície de contato, obtendo-se para a mesma carga de compressão um anel com diâmetro externo menor do que seria obtido no caso ideal. No entanto, se o coeficiente de atrito na interface ultrapassar um determinado valor, uma parte do material tende a se deslocar no sentido da borda externa e o restante se desloca no sentido da borda interna, o que provoca uma diminuição ainda maior no diâmetro externo após a deformação, além da evidência da diminuição do diâmetro interno.

A primeira conclusão obtida é que a ocorrência de um pequeno valor de atrito na interface provoca um aumento no diâmetro interno do anel, enquanto altos valores de atrito provocam uma diminuição deste parâmetro, como pode ser observado na figura 65.

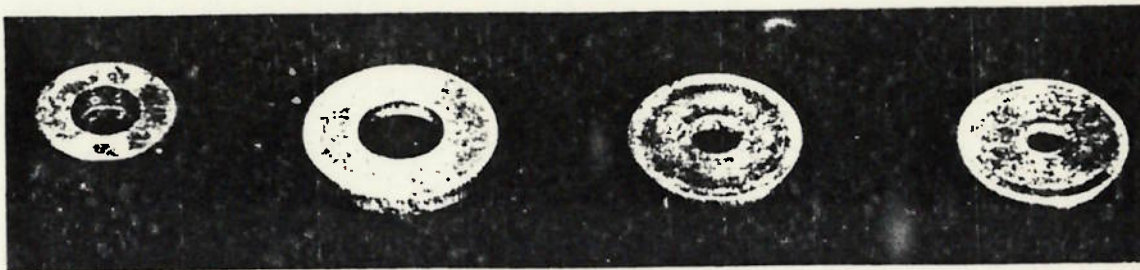


FIGURA 25: Corpo de prova do ensaio de anel, mostrando a variação no diâmetro interno após conformação.

Uma das principais vantagens deste método é a não necessidade de medir valores de força e tensão aplicados, eliminando uma das principais dificuldades de medição para os casos de compressão a altas temperaturas ou altas velocidades de deformação. A desvantagem reside no fato de que dos valores de T só poderão ser obtidos por um método de calibração, pois a análise mecânica e matemática de compressão do anel ainda não está completamente desenvolvida, principalmente pelo efeito de abaulamento que não pode ser tratado teoricamente hoje em dia.

As dimensões ideais para o anel não seguem nenhuma informação concreta, no entanto a experiência prática forneceu um campo de valores para os diâmetros e alturas que foram adotados como padrão. Assim, convencionou-se que o corpo de prova padrão deve ter 0,750 polegadas no diâmetro externo, 0,375 polegadas no diâmetro interno e 0,250 polegadas de altura. Outros corpos de prova podem ser

confeccionados, devendo obedecer a proporção entre as medidas apresentadas.

O processo de calibração, que permite a construção do gráfico mostrado na figura 46, adota dois casos extremos: o de aderência total, onde o valor de atrito é máximo, e o de inexistência de atrito (caso ideal). Nas situações intermediárias, para cada valor de deformação de um disco plano com as proporções padrão, o coeficiente de atrito é calculado em relação a variação no diâmetro interno do anel pelo método de análise de Schroeder e Webster.

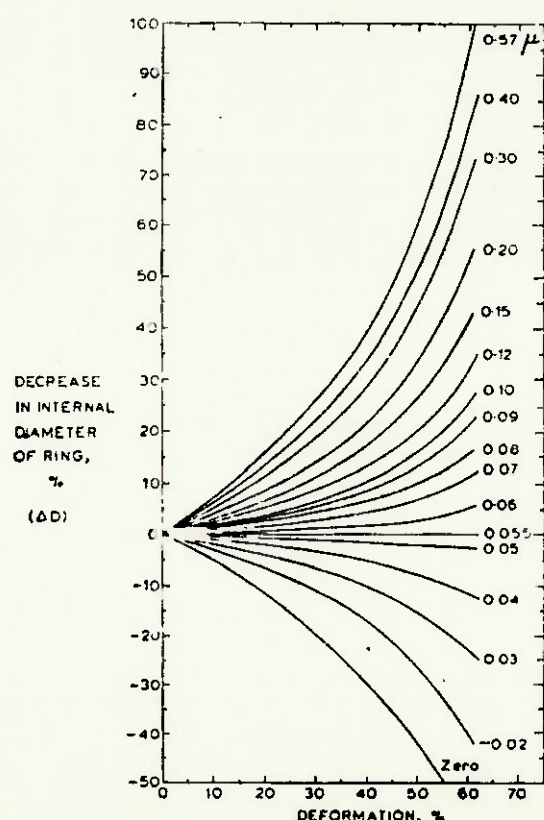


FIGURA 46: Gráfico de calibração dos valores do coeficiente de atrito.

CAPÍTULO

3

Análise Mecânica do Processo de Forjamento

3) ANÁLISE MECÂNICA DO PROCESSO DE FORJAMENTO:

No capítulo anterior foi apresentada uma série de variáveis que influenciam o processo de forjamento alterando, na maioria dos casos, o valor da tensão de escoamento do material. A excessão fica por conta das condições de lubrificação na qual modificam significativamente o valor do coeficiente de atrito. Todos estes fatores interagem simultaneamente e devem ser considerados nos modelos matemáticos desenvolvidos para análise do forjamento. Muitos estudiosos, entre eles Avitzur, Grunning, Billigman, Dieter, Langue, Slab e outros, apresentaram soluções que dentro do campo de conhecimento científico existente hoje em dia tentam desenvolver, a partir da teoria da elasticidade dos materiais, um método mais próximo possível daquilo que é observado na realidade. Em função da maior proximidade de resultados será descrito de forma resumida o método de Slab, apresentando em seguida um exemplo ilustrativo desenvolvido pelo próprio autor.

3.1) MÉTODO DE SLAB:

Este método calcula as forças e tensões em uma peça forjada. Slab divide a peça em vários planos de deformação localizados em seções assimétricas. Estas são analisadas

comparativamente a um modelo simplificado de cavidade com geometria retangular e canal de rebarba padrão, como indicado na figura 67. A carga de forjamento total será a soma das cargas calculadas nas diferentes seções.

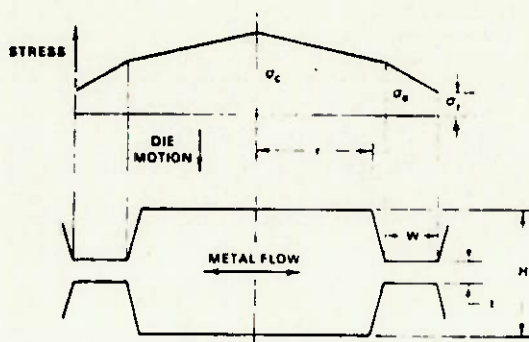


FIGURA 67: Modelo de cavidade utilizado.

Em uma seção de simetria axial, a tensão de escoamento na entrada do canal de rebarba é dada por:

$$\sigma_s = \left[\frac{2}{\sqrt{3}} \cdot m \cdot \frac{w}{t} + 1 \right] \cdot \sigma_f \quad (3.1)$$

onde: m (é o coeficiente de atrito de cisalhamento)
 w e t (são dimensões do canal de rebarba em pol.)
 σ_f (é a tensão de escoamento do material na região de entrada da bacia de rebarba em lbf/in²)

Integrando a equação acima obtém-se a força agindo na região do canal de rebarba dada pela equação (3.2) a seguir:

$$F_f = 2 \cdot \pi \cdot \sigma_f \cdot \left[\frac{2}{3} \cdot \frac{m}{\sqrt{3}} \cdot \frac{1}{t} \cdot (R^3 - r^3) + \left(1 + \frac{2 \cdot m}{\sqrt{3}} \cdot \frac{R}{t} \right) \cdot \left(\frac{R^2 - r^2}{2} \right) \right]$$

onde: $R = r + w$

r (é uma dimensão da cavidade em polegadas)

σ_f (é dada pela expressão 3.1)

Analogamente, pode-se obter a força na região da cavidade a qual é dada pela expressão:

$$F_c = 2 \cdot \pi \cdot r^2 \cdot \left(\frac{m}{\sqrt{3}} \cdot \frac{\sigma_c}{3} \cdot \frac{r}{H} + \frac{\sigma_c}{2} \right) \quad (3.3)$$

onde: σ_c (é dada pela expressão 3.1)

H (é uma dimensão da cavidade em polegadas)

σ_c (é a tensão de escoamento do material na região da cavidade em lbf/in²)

A carga total em uma seção deste tipo é obtida somando-se as forças agindo no canal de rebarba e na cavidade ou seja:

$$F_t = F_f + F_c \quad (3.4)$$

Por outro lado, em seções que não apresentam simetria em relação a um eixo e sofrem, por consequente, deformação plana, as expressões da tensão e da força, tanto no canal de rebarba quanto na cavidade, são dadas em função da unidade de profundidade. Entende-se por isto a uma unidade de comprimento tomada em um plano perpendicular à seção em

estudo. Tais equações são apresentadas a seguir:

$$\sigma_{\bullet p} = \frac{2}{\sqrt{3}} \cdot \sigma_f \cdot \left[1 + m \cdot \frac{w}{t} \right] \quad (3.5)$$

$$P_{fp} = \frac{2}{\sqrt{3}} \cdot w \cdot \sigma_f \cdot \left[2 + \frac{m \cdot w}{t} \right] \quad (3.6)$$

$$P_{cp} = \left[\sigma_{\bullet p} + \frac{L}{2 \cdot H} \cdot \frac{m}{\sqrt{3}} \cdot \sigma_c \right] \cdot L \quad (3.7)$$

onde: L (é o comprimento em polegadas da cavidade)

Para o cálculo através das expressões anteriores, falta a determinação das tensões de escoamento σ_f e σ_c , levando-se em consideração os parâmetros já mencionados. Assim, a tensão pode ser calculada por:

$$\sigma = C \cdot (\dot{\epsilon})^m \quad (3.8)$$

onde: C e m (são coeficientes obtidos em função do tipo de material, da temperatura média da cavidade ou do canal de rebarba e do grau de deformação na hora do forjamento)

$\dot{\epsilon}$ (é a velocidade média de deformação).

A temperatura é influenciada pelo tempo e velocidade de deformação, geração de energia durante a conformação, temperatura da ferramenta e esfriamento desta durante o processo. Assumindo a hipótese de que a temperatura da peça é uniforme e o resfriamento ocorre simetricamente de ambos

os lados, a temperatura média da cavidade ou no canal de rebarba pode ser dado pela expressão:

$$\theta_t = \theta + \theta_d \quad (3.9)$$

onde: θ (é a temperatura média da peça durante o processo em F dada através da equação 3.10)

θ_d (é o aumento de temperatura devido à deformação obtido da equação 3.12).

$$\theta = \theta_1 + (\theta_s - \theta_1) \cdot \exp \left[- \frac{\alpha \cdot T}{c \cdot \rho \cdot t} \right] \quad (3.10)$$

onde: θ_1 (é a temperatura inicial da ferramenta em F)

θ_s (é a temperatura no início da deformação em F)

α (é o coeficiente de transferência de calor em BTU/in²/F)

t (é a espessura da cavidade ou do canal de rebarba após a deformação em polegadas)

c (é o calor específico do material em BTU/lb/F)

ρ (é a densidade do material em lb/in³)

T (é o tempo de contato na deformação em s).

O tempo de contato por sua vez depende do tipo de máquina utilizada e das características cinemáticas desta, a qual determinam a velocidade média da ferramenta de impacto.

$$T = \frac{(e_i - e_f)}{V_m} \quad (3.11)$$

onde: e_i (é a espessura média inicial da cavidade ou do canal de rebarba em mm)

e_f (é a espessura média final da cavidade ou do canal de rebarba em mm)

V_m (é a velocidade média da ferramenta de impacto em mm/s).

Basta calcular θ_d dado por:

$$\theta_d = \frac{A \cdot \bar{\sigma}_a \cdot e}{C \cdot \rho} \quad (3.12)$$

onde: A (é o fator de conversão de energia mecânica para energia térmica em BTU/in.lb)

$\bar{\sigma}_a$ (é a tensão média de escoamento do material obtida no ensaio de tração em lbf/in² = psi)

e (é a deformação logarítmica).

$$e = \ln \left(\frac{e_i}{e_f} \right) \quad (3.13)$$

Conhecido o valor de θ_t , tiram-se os valores de C e m das tabelas desenvolvidas por Langue, a qual encontram-se no apêndice.

Falta calcular o valor da velocidade média de deformação dado por:

$$\bar{e} = \frac{V_m}{m} \quad (3.14)$$

onde: $\bar{e}$ (é a espessura média dada pela equação 3.15)

$$\bar{e} = \frac{e_i + e_f}{2} \quad (3.15)$$

3.2) EXEMPLO:

A peça escolhida para demonstração do método é uma biela indicada na figura 68, sendo o material de partida de aço-carbono AISI 1016.

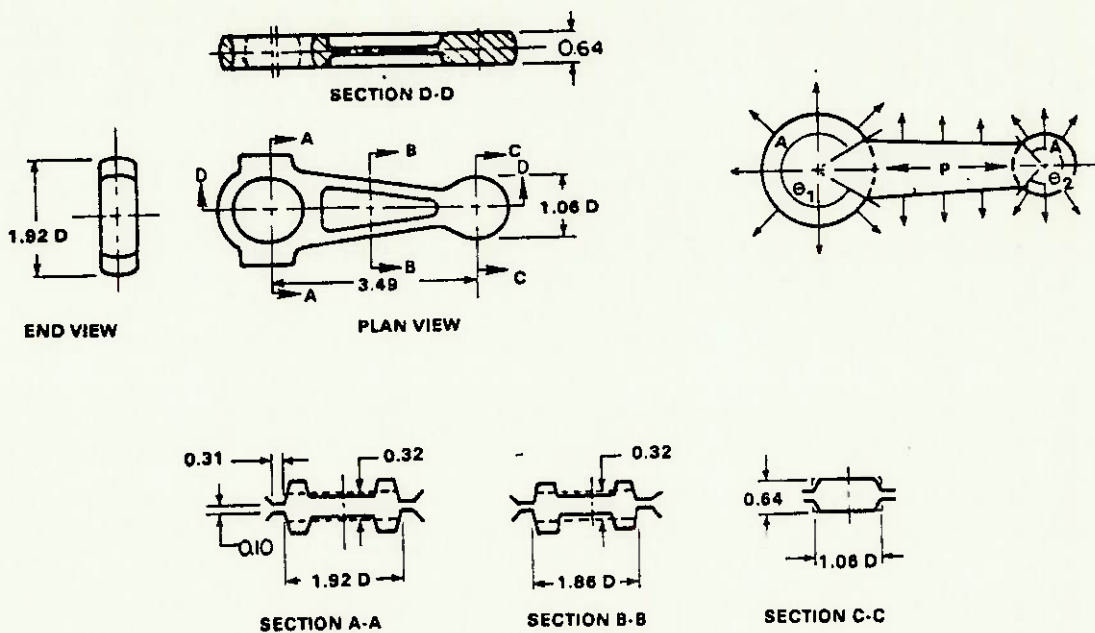


FIGURA 68: Principais características da biela a ser forjada.

Ela será confeccionada em duas etapas. Na primeira passará do material em bruto para uma pré-forma e desta para a forma final. É importante salientar que não serão expostas todas as passagens do cálculo, pois o procedimento é análogo para cada seção. Em contrapartida, será apresentado o resultado final, comparando-o com aqueles obtidos pelo monitoramento do processo em uma operação real efetuada.

Inicialmente, divide-se a peça em três partes, ou seja, três seções assimétricas. As seções A e C, por apresentarem simetria em relação ao eixo de revolução, serão calculadas pelas expressões 3.1, 3.2, 3.3 e 3.4. Já a seção B é caracterizada por uma deformação plana a qual utilizará as expressões 3.5, 3.6 e 3.7. No entanto, para as duas etapas de deformação serão consideradas as mesmas dimensões, em todas as seções, no canal de rebarba da ferramenta. São elas:

Pré-forma: $t = 0,10$ in (espessura)
 $w = 0,31$ in (comprimento)

Acabado : $t = 0,06$ in
 $w = 0,31$ in

Para o emprego do método, as cavidades foram consideradas retangulares cujas dimensões estão espostas a seguir:

Seção A-A

Pré-forma: $r = 0,96$ in ; $H = 0,32$ in
 Acabado : $r = 0,20$ in ; $H = 0,18$ in

Seção B-B

Pré-forma: $L = 0,93$ in ; $H = 0,32$ in
 Acabado : $L = 0,95$ in ; $H = 0,18$ in

Seção C-C

Pré-forma: $r = 0,53$ in ; $H = 0,64$ in
 Acabado : $r = 0,55$ in ; $H = 0,59$ in

Tomando-se a seção A-A e considerando o material de partida com uma altura inicial de 0,75 in, o deslocamento da ferramenta de impacto na região da cavidade durante a operação de pré-forma será:

$$W_d = \frac{0,75 - 0,32}{2} = 0,215 \text{ in}$$

Como o forjamento será realizado em uma prensa mecânica excêntrica de 90 batidas por minuto e curso de ferramenta de 10 in, a velocidade média da ferramenta de impacto é dada pela sua expressão cinemática:

$$V_m = W_d \cdot \frac{\pi \cdot n}{30} \cdot \sqrt{\frac{S}{W_d} - 1} = \frac{0,215 \cdot \pi \cdot 90}{30} \cdot \sqrt{\frac{10}{0,215} - 1}$$

$$V_m = 13,67 \text{ in/s}$$

Deste modo, o tempo de contato dado pela expressão 3.11 será:

$$T = \frac{0,75-0,32}{13,67} = 0,0315 \text{ s}$$

As características do material fornecem:

$$\bar{\sigma} = 18.000 \text{ psi}$$

$$\alpha = 0,0039 \text{ BTU/ in}^2 \text{ / F}$$

$$c = 0,108 \text{ BTU/ lb / F}$$

$$\rho = 0,285 \text{ lb/ in}^3$$

O material de partida será aquecido a 2100 F e as ferramentas a 350 F. Assim, a temperatura média da peça dada pela expressão 3.10 será:

$$\theta = 350 + (2100 - 350) \cdot \exp \left[- \frac{0,0039 \cdot 0,0315}{0,108 \cdot 0,285 \cdot 0,32} \right] = 2078,3 \text{ F}$$

A deformação na região da cavidade será:

$$\epsilon = \ln \left(\frac{0,75}{0,32} \right) = 0,85$$

Sendo o fator de converção $A = 1,07 \times 10^{-4} \text{ BTU/in.lb}$, o aumento de temperatura devido a deformação dado pela expressão 3.12 será:

$$\theta_d = \frac{1,07 \cdot 10^{-4} \cdot 18000 \cdot 0,85}{0,108 \cdot 0,285} = 53,2 \text{ F}$$

Calcula-se agora a temperatura média na cavidade, dada pela expressão 3.9:

$$\theta_t = 2078,3 + 53,2 = 2131,5 \text{ F}$$

Com os valores de θ_t e e , obtém-se na tabela para aço-carbono 1016 os valores $C = 9,8 \cdot 10^3$ e $m = 0,187$.

Finalmente a velocidade média de deformação é obtida por:

$$\dot{\epsilon} = \frac{13,67}{(0,75+0,32)/2} = 25,55 \quad 1/s$$

Pela expressão 3.8 temos a tensão de escoamento na seção A-A na região da cavidade.

$$\sigma = 9,8 \cdot 10^3 \cdot (25,55)^{0,187} = 17967 \text{ psi} \approx 18000 \text{ psi}$$

Em operações análogas determinam-se os demais valores de σ . Considerando o valor do coeficiente de atrito cizalhante ($m = 0,4$) e a profundidade na seção B-B, característica de deformação plana igual a 2,0 in, estima-se as cargas nesta seção e nas demais para a pré-forma e o acabado. Os resultados para cada seção podem ser observados a seguir:

	carga (lb) na seção			total	tons
	A-A	B-B	C-C	lb	
Pré-forma	337214	196998	89285	623497	311,7
Acabado	407234	285509	123947	816690	408,3

Os valores reais medidos foram:

Pré-forma: 320,67 tons

Acabado : 425,00 tons

Comparando os resultados observa-se uma discrepância em torno de 4%, o que é aceitável.

CAPÍTULO

4

Ferramentas para Forjamento

4) FERRAMENTAS PARA FORJAMENTO

4.1) PROPRIEDADES DAS FERRAMENTAS:

As ferramentas devem apresentar certas propriedades que possibilitem suas utilizações por um determinado tempo (apresentar uma vida útil) sem provocar alterações significativas nas peças de trabalho. O nível de solitação a que são submetidas é o responsável pela imposição dessas condições. Tais conceitos estão ligados à produtividade e aos custos de operação. Existe assim uma intercambiabilidade dos pontos de vista técnico e econômico a fim de se obter um produto competitivo.

4.1.A) RESISTÊNCIA ÀS ESFORÇOS MECÂNICOS

Durante a conformação a ferramenta é submetida a esforços de tração, compressão, flexão e torção que atuam simultaneamente sobre ela. A magnitude destes esforços é avaliada, em parte, através do modelo matemático desenvolvido no capítulo 3. Evidentemente dependem do tipo de material e das dimensões da peça a ser conformada, das condições de lubrificação e características de operação (temperatura, velocidades, etc. já abordadas no capítulo 2).

Torna-se essencial as ferramentas apresentarem uma excelente resistência associada a um alto valor de

tenacidade. Além disso, a superfície de contato é submetida a um grande desgaste impondo a necessidade de determinados valores de dureza superficial e rugosidade.

4.1.5) RESISTÊNCIA A ESFORÇOS TÉRMICOS

A superfície da ferramenta sofre uma variação brusca de temperatura decorrente do mecanismo de deformação e de solicitações adicionais, no caso de forjamento a quente, seguida de resfriamento natural (ar) ou forçado (ar a alta pressão ou água). As áreas mais afetadas são aquelas onde existem cantos salientes. Isto se verifica pela má distribuição superficial de temperatura provocando regiões de alta concentração de tensões térmicas e conseqüente surgimento de trincas localizadas.

A ferramenta deve ter uma constituição capaz de suportar tais variações, evitando a aparecimento de trincas precoces ou o desgaste excessivo por decarbonetação.

4.2) CARACTERÍSTICAS CONSTRUTIVAS:

As ferramentas existentes no forjamento livre e forjamento em matriz apresentam uma variedade de formas construtivas dependendo da sua aplicação, da geometria e material da peça a fabricar e de sua utilização. O projeto deve seguir recomendações baseadas nas normas brasileiras.

que serão citadas adiante, a qual especificam detalhes técnicos extraídos da observação prática através dos anos e são essenciais para o seu dimensionamento.

4.2.A) FORJAMENTO LIVRE

Subdivide-se em dois tipos principais. O primeiro é constituído por ferramentas que servem para segurar o material e conformar conhecido como Tenazes. O segundo são as de conformação e servem para modelagem do material. Dependendo da habilidade e experiência do forjador, pode-se através destes utensílios produzir um grande número de peças diferentes e complexas.

4.2.A.1) TENAZES

As suas características geométricas assemelham-se aos alicates. A diferença de forma na extremidade da garra assegura a utilização adequada para cada tipo de material, desde perfil redondos, retangulares e sextavados a barras planas. A figura 69 ilustra as tenazes existentes.

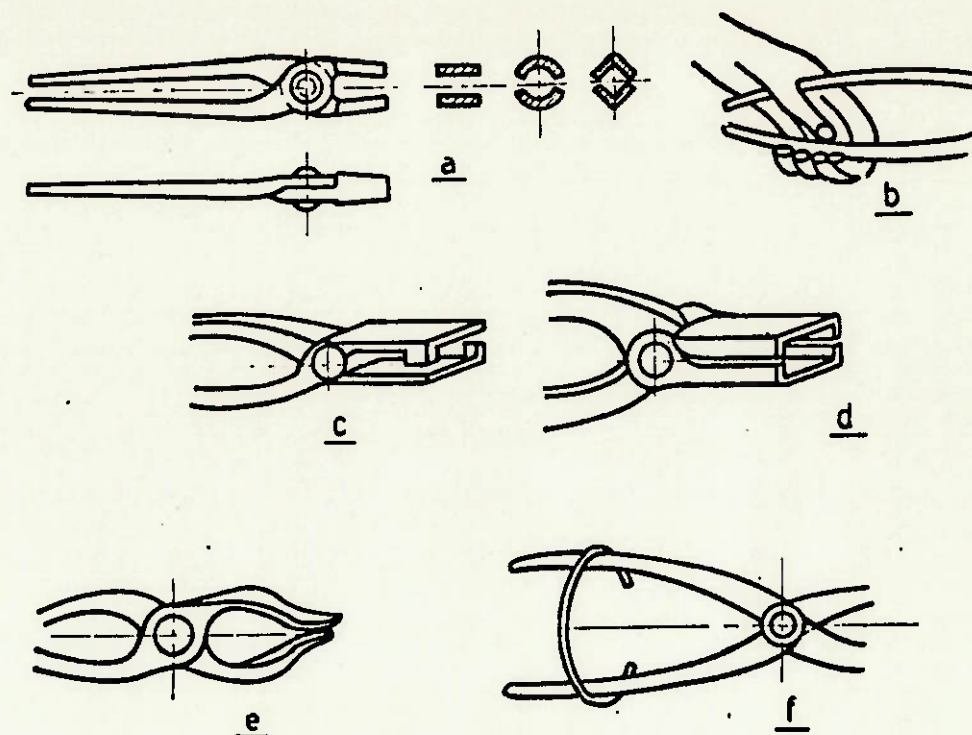


FIGURA 69: Tipos de tenazes:

- a) Tenazes para pequenas peças
- b) Tenaz de braço elastico
- c e d) Tenazes para barras planas
- e) Tenazes para peças delgadas
- f) Anel de fixação dos braços de tenaz

4.2.A.2) FERRAMENTAS DE CONFORMAÇÃO

- Modelagem simples

São ferramentas que executam conformações simples. Algumas são operadas manualmente, outras são fixadas no martelo. Dentre as manuais, podemos destacar aquelas empregadas nas operações de corte (conhecidas como Cinzéis), punções de furacão, ferramentas de entalhe e as de contorno de superfície. Estas últimas são as mais variadas,

englobando desde as operações de estiramento de barras redondas, aplainamento e geração de geometrias específicas.

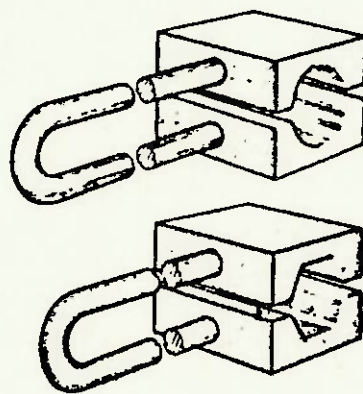
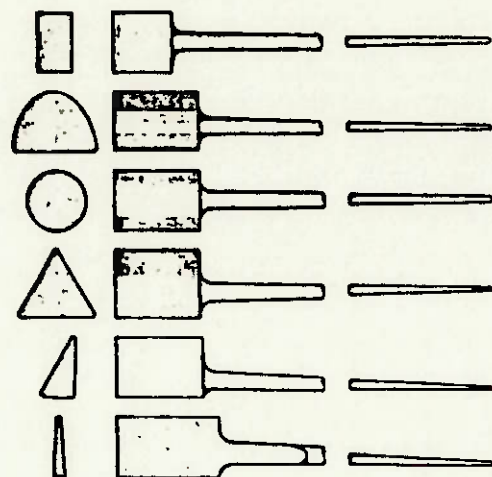


FIGURA 70: Ferramentas manuais para forjamento livre.

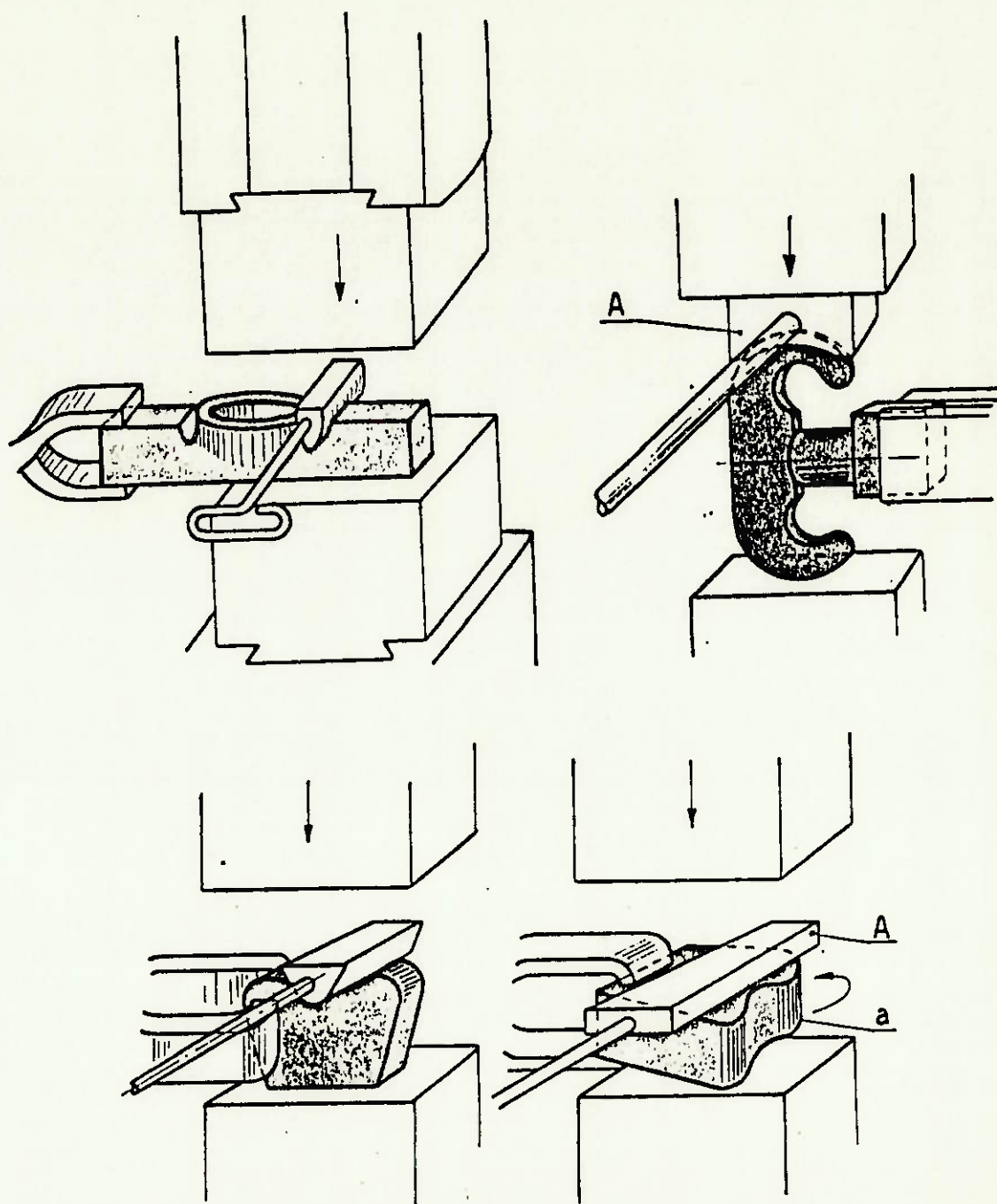


FIGURA 71: Operações de forjamento livre com ferramentas manuais. A (ferramenta), a (peça).

As ferramentas cuja utilização depende de fixação em martelo são empregadas no estiramento de barras e anéis, nas operações de recalque, dobramento e conformação de contornos em superfícies, como indicado nas figuras 72 e 73.

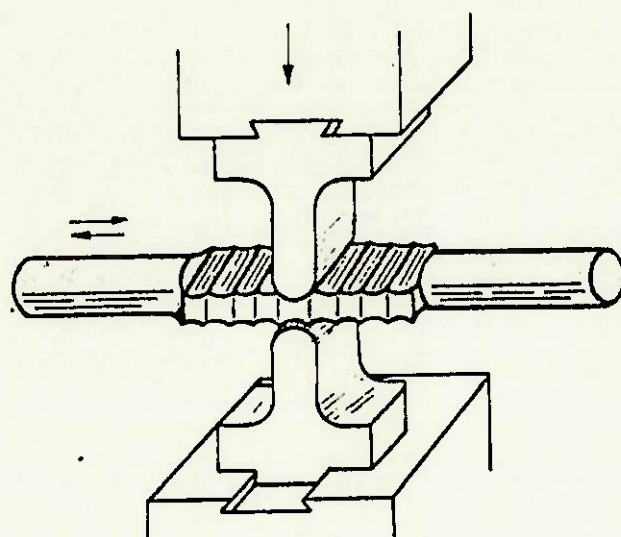


FIGURA 72a: Ferramenta de forjamento livre de fixação em máquina (estiramento de barra).

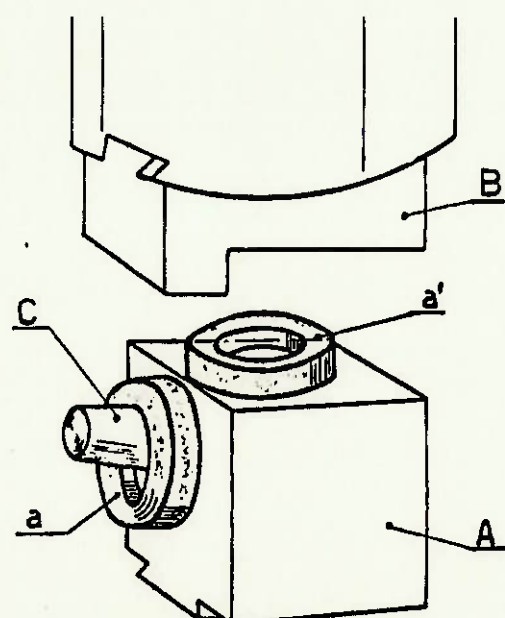


FIGURA 72b: ídem anterior (estiramento de anéis -a-).
A, B e C (ferramentas)

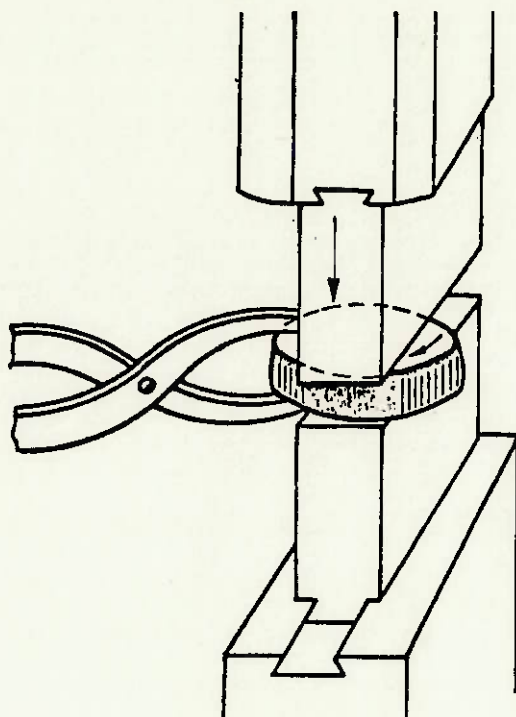


FIGURA 72c: idem anterior (recalcagem).

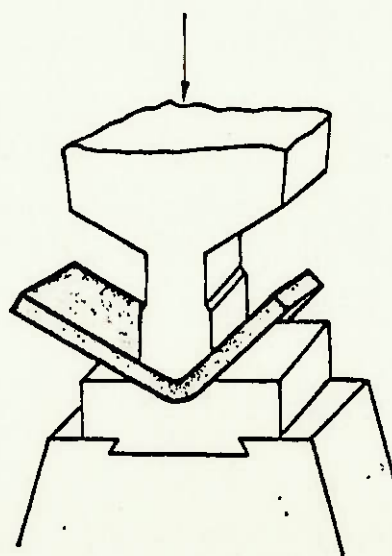


FIGURA 72d: idem anterior (dobramento).

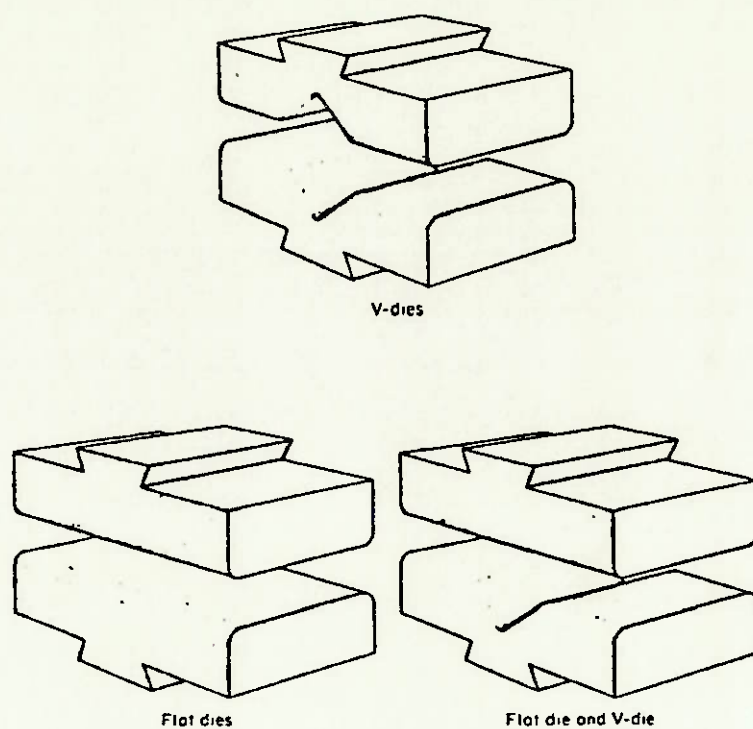


FIGURA 73: Ferramentas para forjamento (com geometria específica) de fixação em máquina.

- Estampos

Os estampos no forjamento livre não possuem canal de rebento, podendo o material escoar livremente entre as superfícies da metade superior e inferior. São empregados na configuração de geometrias especiais visto no capítulo 2.1.5.2.

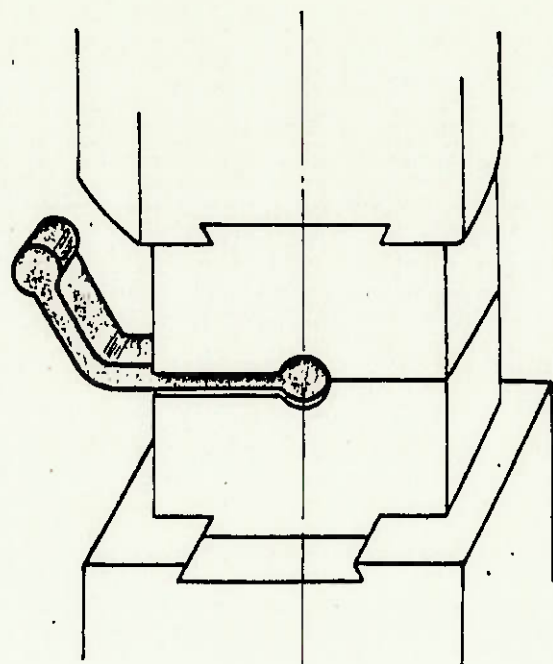


FIGURA 74: Estampo de forjamento livre.

4.2.B) FORJAMENTO EM MATRIZES

Quando a peça é fabricada através do forjamento em matriz, formase ao seu redor uma rebarba que deve ser extraída. Temos então as matrizes divididas em conformação e rebarbação.

4.2.B.1) MATRIZES DE CONFORMAÇÃO

Em oposição às ferramentas utilizadas no forjamento livre, com exceção dos estampas, um par dessas matrizes (superior e inferior) possibilita a fabricação de um único tipo de peça (ver capítulo 2.1.B.2). Elas diferenciam-se umas das outras por vários aspectos, e não apenas pela impressão de peças distintas, se observa no desenvolvimento dos critérios a seguir.

QUANTO A FORMA

O corpo da matriz pode ser único ou composto, podendo esta executar apenas a conformação final do produto ou possibilitar outras operações.

- Matrizes Simples de Acabamento

O corpo da matriz é constituído por um bloco único no qual existe apenas uma cavidade com a forma geométrica de uma parte da peça. A união das metades superior e inferior possibilitam a conformação final, ou seja, a obtenção do produto acabado.

É utilizada para médias produções ou em casos onde a peça é confeccionada em uma única operação. Emprega-se este tipo de ferramenta para tais situações devido a sua simplicidade, além da capacidade de fabricar peças bem

concêntricas. O desgaste provocado na matriz na superfície de escoamento do material altera gradativamente as dimensões da peça. No entanto, pode-se antecipadamente projetar o sobremetal para que esta permita a reusinagem de sua superfície conferindo uma vida útil mais alongada, reutilizando-a novamente.

O procedimento citado acima torna o produto economicamente barato pela redução no custo de operação através da fabricação de um número de peças mais elevado.

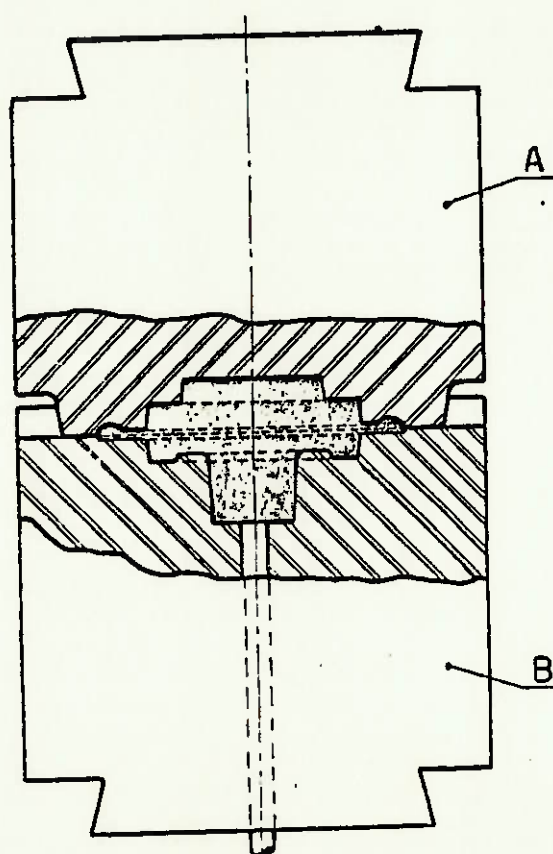


FIGURA 75: Esquema de matriz simples de acabamento A e B (ferramentas).

- Matrizes Simples Bipartidas

Cada matriz (A e A_1) é composta por um corpo duplo, contendo respectivamente uma parte principal e uma intercambiável. O bloco principal apresenta uma cavidade cilíndrica central onde se aloja o bloco que contém o formato da impressão da peça (bloco de impressão). Como pode ser observado na figura 76 os parafusos indicados com a letra C impedem o deslocamento dos blocos de impressão (B e B_1) durante o forjamento. Já os parafusos indicados com a letra D servem como extratores, possibilitando a substituição da ferramenta.

Aplica-se principalmente à produção de pequenas peças que exigem alta precisão. O fato de possuir uma parte intercambiável permite uma sensível diminuição no custo da peça pois, tendo-se em vista as suas restrições dimensionais atinge-se rapidamente a vida útil da ferramenta e como o bloco de impressão é de menor tamanho, pode-se trocá-lo a um encargo econômico mais baixo.

Analogamente as matrizes simples de acabamento, obtém-se apenas o forjamento final da peça ou sua confecção em uma só operação.

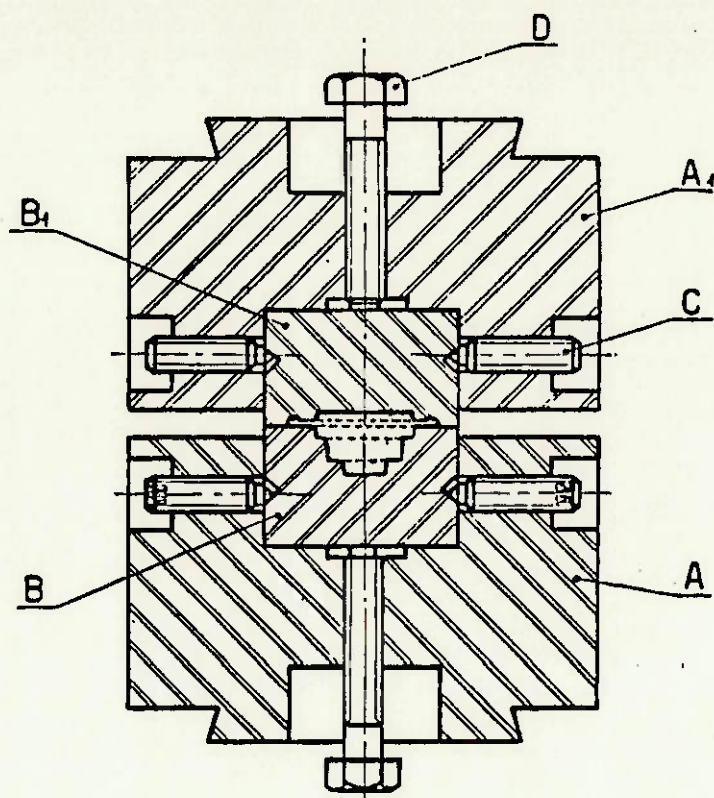


FIGURA 76: Matriz simples bipartida.

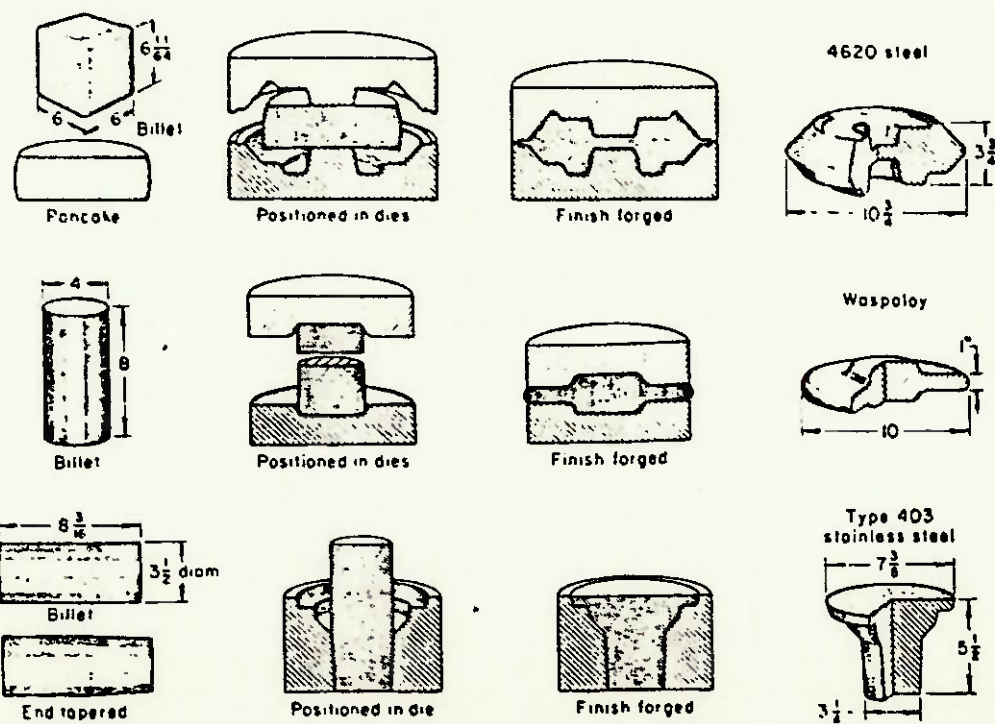


FIGURA 77: Tipos de blocos de impressão.

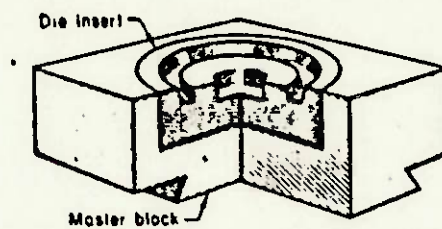


FIGURA 78: Bloco de impressão montado na matriz.

- Matrizes MÚltiplas

Este tipo de matriz caracteriza-se por apresentar um corpo único contendo mais de uma cavidade para a conformação de uma determinada peça. Estas cavidades distribuem-se na superfície da matriz numa sequência tal que a partir do material em bruto, forja-se certas pré-formas de maneira adequada, já especificadas em projetos, até a obtenção do produto acabado. Para isto, basta que o operador troque ordenadamente o material de uma cavidade para outra após cada conformação (ver figura 79).

Em alguns casos as várias cavidades são iguais e de acabamento final, possibilitando a fabricação de mais peças a cada golpe da máquina. Aqui a disposição das cavidades é simétrica em relação a linha de centro da matriz, evitando esforços não conjugados capaz de propiciar maiores momentos de tombamento (ver figura 80).

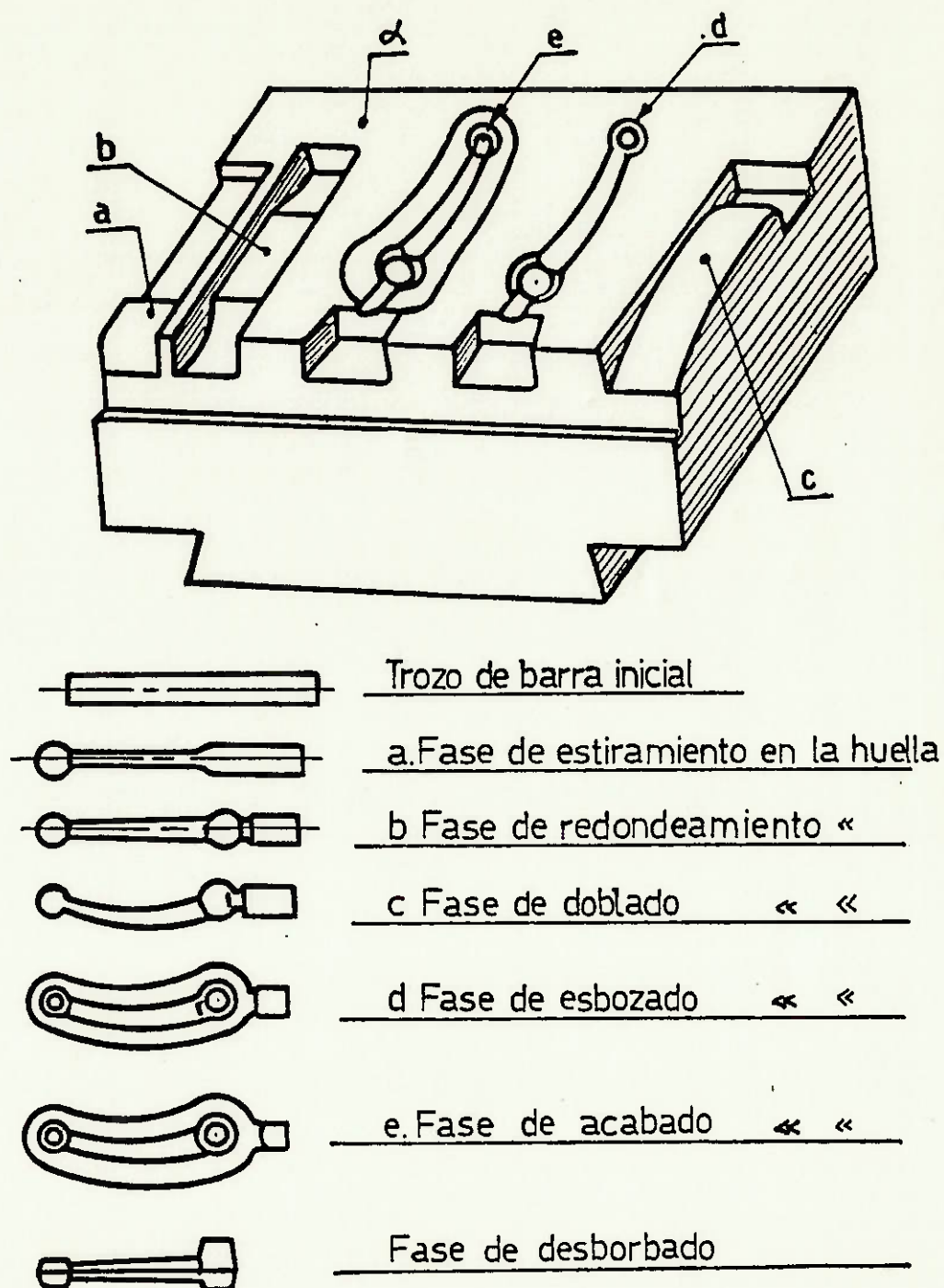


FIGURA 79: Ferramenta de matriz múltipla
 α (corpo da ferramenta).

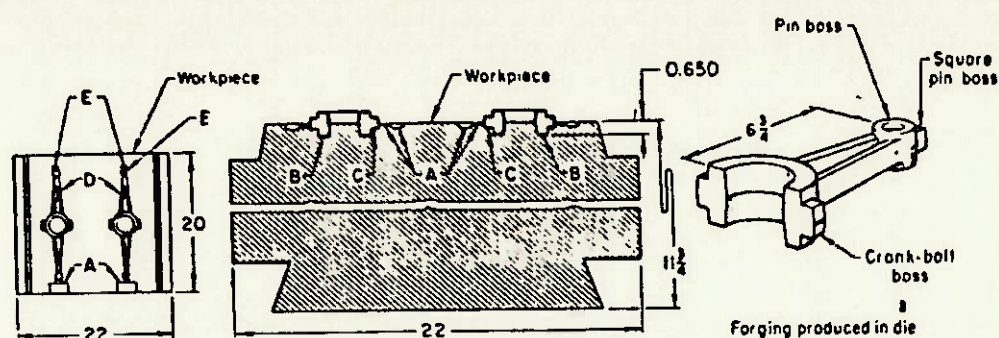


FIGURA 80: Disposição simétrica em matriz múltipla
A (diâmetros de 1 e $\frac{1}{2}$)
B, C, D e E (raios de arredondamento de $\frac{3}{8}$ ").

As matrizes múltiplas são utilizadas para peças cuja complexidade é alta associada a uma grande produção. Pode-se, devido as diferentes pré-formas estarem contidas em um só bloco, economizar tempo de máquina e energia, necessária para elevar novamente a temperatura da peça a aquela adequada ao forjamento. As operações não são executadas em partes, ou seja, não é necessária a troca da ferramenta.

- Matrizes Múltiplas Bipartidas

Assemelham-se as matrizes simples bipartidas pois o corpo é constituído de duas partes como especificado anteriormente. A diferença está na existência de dois ou mais blocos de impressão (B e B₁ na figura 81) e podem conter mais de uma cavidade cada ou ainda um único bloco de impressão com várias cavidades. Observando-se a figura 81 nota-se a presença de um parafuso de fixação, indicado com a letra E, que mantém os blocos unidos devido a força de

aperto sobre o bloco de pressão (indicado pela letra C). Além disso, em vista dos esforços transversais adota-se uma chave (D) para garantir o alinhamento nesta direção, como indicado na figura 81. Na figura 82 temos um outro exemplo deste tipo de matriz. Aplicam-se a casos de alta produtividade com as mesmas vantagens listadas no item matrizes simples bipartidas relativo à diminuição dos custos.

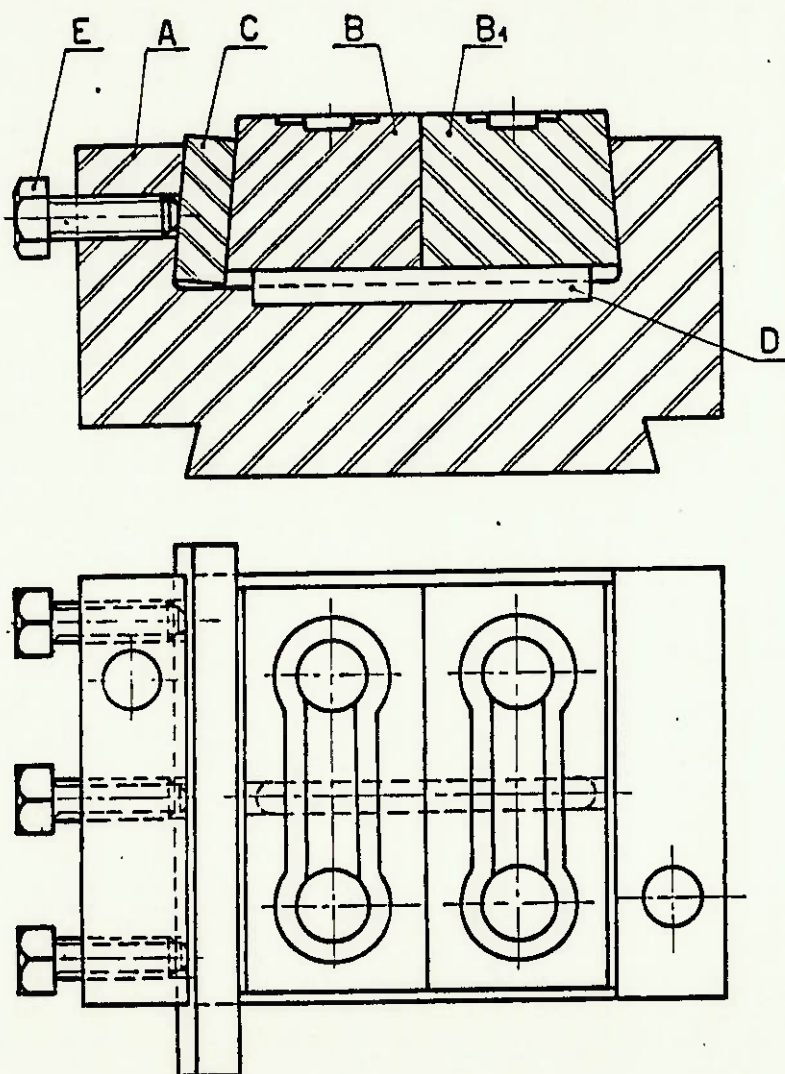


FIGURA 81: Ferramenta de matriz múltipla bipartida
A (corpo de base).

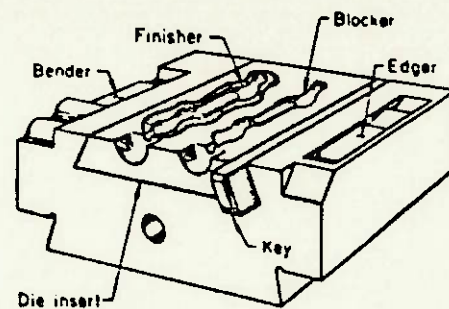


FIGURA 82: Ferramenta de matriz múltipla bipartida fixa por atrito.

QUANTO AO SISTEMA DE ALINHAMENTO

Para execução precisa do forjado a matriz superior deve ser guiada adequadamente de encontro a inferior, buscando uma perfeita centragem entre as duas metades afim de se obter os mínimos desvios de excentricidades. Assim, as matrizes são dotadas de sistemas de alinhamento que garantem a condição acima.

- Colunas em Diagonal

A centragem, como o próprio nome diz, é feita por duas colunas dispostas em uma diagonal da matriz. Nos casos onde este sistema é adotado, deve-se dimensionar com rigor o diâmetro das colunas para impedir que ocorra flambagem durante a conformação, o que acarretaria em falhas dimensionais na peça. O uso excessivo provoca uma certa desgastes, ocasionando uma folga no alinhamento, fato

indesejável no processo. Quando tal situação ocorrer é essencial a substituição das colunas por um novo par.

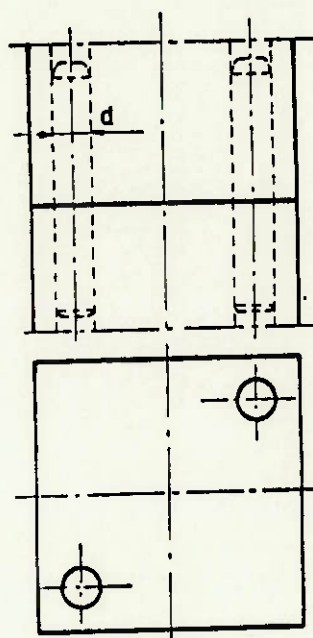


FIGURA 83: Centragem de ferramentas através de colunas.

- Assentos Macho-Fêmea

Caracterizam-se por apresentar um sistema de acoplamento tipo macho-fêmea localizado nas bordas das ferramentas. Neste caso a centragem é realizada pelo contato das paredes de encaixe e medida que prossegue o movimento de aproximação. As paredes podem ter um perfil inclinado ou cônico.

Este tipo de sistema tem se mostrado mais eficiente que o anterior, além de ser mais econômico pois ele é incorporado à matriz durante o seu processo de fabricação. Já o alinhamento por colunas exige a confecção de duas peças sobressalentes.

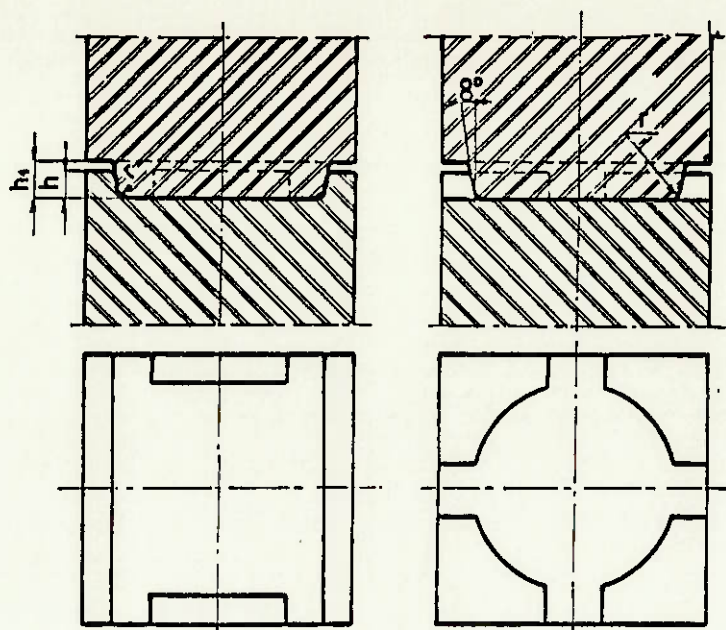


FIGURA 84: Centragem de ferramentas por assentos macho-fêmea ($h_2 \approx 20 \text{ mm a } 25 \text{ mm}$, $h_1 \approx 26 \text{ mm a } 32 \text{ mm}$ e $r \approx 5 \text{ mm a } 6 \text{ mm}$)
 a) Paredes inclinadas
 b) Paredes tronco-cônicas.

QUANTO A CAVIDADE DA BACIA DE REBARBA

Na bacia de rebarba aloja-se o material excedente da conformação. Neste item será abordado as formas existentes, deixando para o item posterior as especificações e normas dimensionais. Pode-se caracterizar quatro tipos construtivos diferentes que apresentam certas peculiaridades, propiciando seu emprego adequado em função da peça forjada.

- Bacia na Ferramenta Superior

A cavidade da bacia de rebarba localiza-se integralmente na ferramenta superior. A ferramenta inferior, nesta região, é responsável apenas pela formação de uma base

reta. Esta configuração permite a presença de uma região plana, oferecendo uma superfície de fácil assentamento para a operação de rebarbação.

Utiliza-se tal construção geralmente em peças assimétricas em relação a um plano de referência horizontal. Escolhe-se de preferência o plano de união entre as ferramentas superior e inferior, onde a maior parte da peça é conformada na ferramenta inferior, evitando um possível preenchimento da bacia de rebaba antes da própria cavidade. Não se exclui, entretanto, casos na qual a peça conforma-se em sua maioria na ferramenta superior. Nesta situação observa-se certas características geométricas.

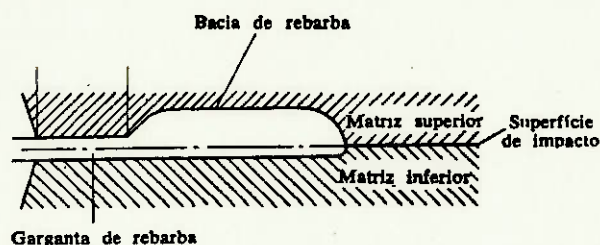


FIGURA 85: Bacia de rebaba localizada na ferramenta superior.

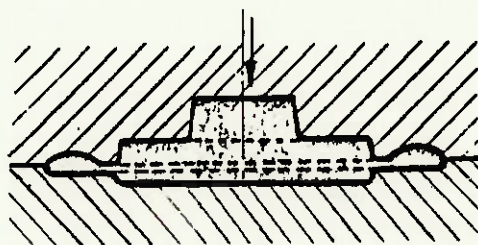


FIGURA 86: Peça confeccionada com bacia de rebaba na ferramenta superior.

- Bacia na Ferramenta Inferior

Difere do tipo anterior apenas pelo fato da cavidade da bacia de rebarba localizar-se exclusivamente na ferramenta inferior. Aplica-se ao mesmo tipo de peça citado, desde que a maior parte a ser conformada esteja na ferramenta superior, salvo algumas exceções.

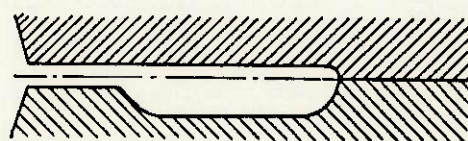


FIGURA 87: Bacia de rebarba localizada na ferramenta inferior.

- Bacia Simétrica

Este tipo construtivo caracteriza-se por apresentar a cavidade da bacia de rebarba dividida igualmente, estando metade na ferramenta superior e metade na inferior. Aplica-se na maioria dos casos para peças simétricas devido a proporcionalidade na conformação ou peças cuja complexidade geométrica exige um volume extra de material para o forjamento.

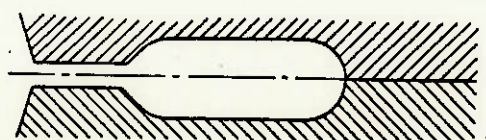


FIGURA 88: Bacia de rebarba simétrica.

- Bacia Livre

A bacia livre não limita a quantidade de material que pode escoar através da sua cavidade. Esta é dividida em duas metades, sendo uma na ferramenta superior e outra na inferior.

Utiliza-se geralmente numa operação de acabamento a partir de materiais em bruto, ou seja, sem pré-forma definida tais como: tarugos, barras e chapas.

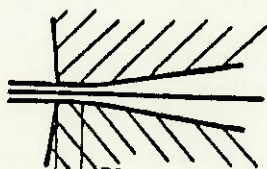


FIGURA 89: Bacia de rebarba livre.

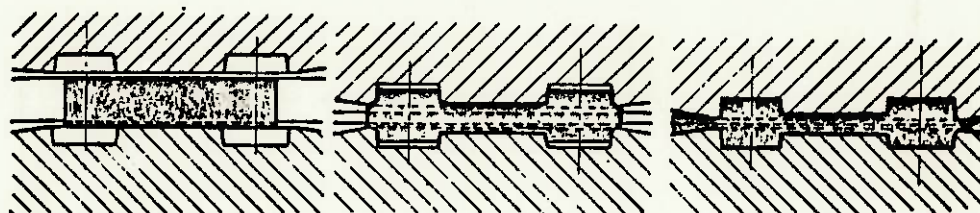


FIGURA 90: Peça confeccionada com bacia de rebarba livre.

QUANTO A GEOMETRIA

Trata-se de todas as especificações geométricas referentes à ferramenta e à cavidade de impressão, bem como os valores característicos das dimensões e suas tolerâncias

relativos ao forjado. É importante ressaltar que o projeto da cavidade segue os mesmos parâmetros da peça com um pequeno acréscimo de volume em função da dilatação do material conformado, principalmente no forjamento a quente. Sua contribuição se verifica por um aumento percentual em todas as medidas lineares da cavidade. Na tabela 21 encontram-se discriminados os valores desta porcentagem para cada tipo de material, tratando-se de forjamento a quente. Deve-se levar em conta também, desde que se deseja uma peça com alta precisão, o fato da dilatação da matriz (pelas razões já explicitadas no item 2.2.A) provocando uma diminuição na porcentagem de variação das medidas lineares da cavidade. É evidente que tal influência constata-se com maior intensidade nos casos onde se provoca o aquecimento da matriz, pois o aumento de temperatura deste apenas por condução térmica peça-ferramenta é muito pequeno e até desprezível.

para el acero:	1,00 % (de $1.020 \div 20^{\circ}\text{C}$);
" bronce:	0,80 % (" $520 \div 20^{\circ}\text{C}$);
" latón:	0,90 % (" $520 \div 20^{\circ}\text{C}$);
" cobre:	0,80 % (" $520 \div 20^{\circ}\text{C}$);
" las aleaciones ligeras:	0,90 % (" $420 \div 20^{\circ}\text{C}$).

TABELA 21: Dilatação percentual dos materiais no forjamento a quente (acréscimo nas dimensões lineares).

- Dimensões da Matriz

O bloco da ferramenta apresenta suas dimensões de altura e espessura de parede em função da profundidade da cavidade de impressão. Deve ser levado em conta o fato da presença de mais impressões no mesmo bloco. Nestes casos adota-se o menor valor de profundidade entre as cavidades adjacentes à parede que se pretende dimensionar, como parâmetro de seleção. Os valores de largura e comprimento são obtidos a partir das espessuras mínimas de parede somando-se as dimensões da peça. Todos os dados são extraídos da norma DIN 7529, dando-se preferência para as dimensões normalizadas imediatamente superiores a aquelas obtidas.

As matrizes simples de acabamento e as matrizes múltiplas possibilitam uma reusinagem nas cavidades de impressão para prolongar sua vida útil, como abordado no item 4.2.B.1, o que ocasiona um acréscimo na altura do bloco de até 100 mm dependendo do número de reusinagens.

Profundidade da impressão h (mm)	Espessura mínima de parede a (mm) entre		Altura mínima do bloco da matriz H (mm)
	aresta exterior e impressão	impressão e impressão	
6	12	10	100
10	20	16	100
16	32	25	125
25	40	32	160
40	56	40	200
63	80	56	250
100	110	80	315
125	130	100	355
160	160	110	400

TABELA 20: Dimensões normalizadas de altura e espessura de parede para matrizes de forjamento.

O rato de andorinha para fixação da ferramenta na máquina também tem suas dimensões normalizadas. Tais valores são geralmente pré-fixados em função do tipo de máquina disponível para o forjamento, pois nela já está especificado uma medida padrão em função de sua capacidade e forma construtiva.

- Linha de Rebarba

Esta representa, após executada a rebarbação, a área onde se localizou o canal de rebarba para escoamento do material excedente. A sua boa escolha representa repartir convenientemente as áreas de deformação do material em cada metade da matriz, obtendo-se uma conformação bem distribuída, de fácil execução e propiciando o perfeito acabamento das diversas partes da peça. A eleição da linha de rebarba depende em grande parte da geometria da peça e da experiência e bom senso do projetista. Dá-se preferência a linhas de rebarba situadas em um único plano e ao redor do maior perímetro da peça, evitando-se, na medida do possível, que esta coincida com alguma aresta da peça, fato prejudicial à rebarbação, podendo danificá-la. Para peças simétricas este procedimento é aplicado com muita frequência e êxito. Já a assimetria pode provocar a necessidade de linhas de rebarba oblíquas, também chamadas curvas assimétricas, principalmente se o eixo principal é curvo (ver figuras 91 e 92), ocasionando o surgimento de uma

componente de força horizontal, inexistente no caso anterior, responsável pela tendência de deslocamento da ferramenta nesta direção.

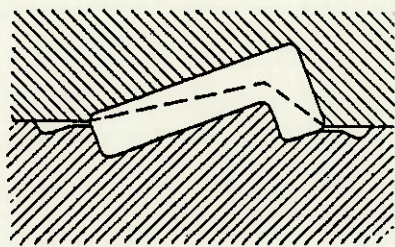


FIGURA 91: Peça forjada com eixo principal curvo.

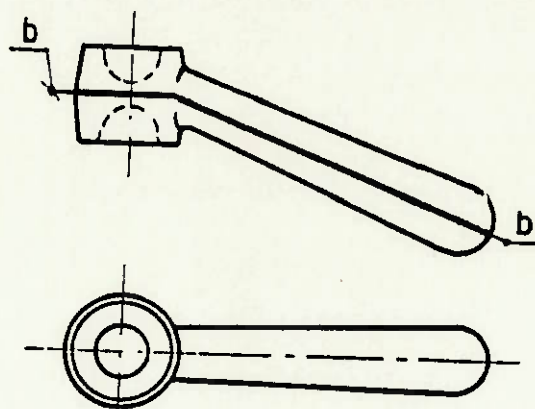


FIGURA 92: Peça com linha de rebarba (b) curva assimétrica.

Por este motivo o sistema de alinhamento deve ser periodicamente inspecionado para não se produzirem peças fora das especificações de tolerâncias.

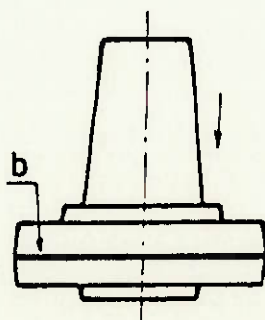


FIGURA 93: linha de rebarba (b) localizada em região que não coincide com alguma aresta da peça.

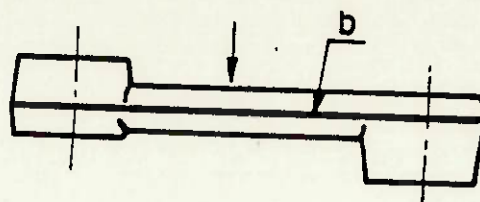


FIGURA 94: Linha de chanfro (b) localizada em região de maior perímetro da peça.

- Ângulos de Saída

Segundo a norma NBR 8999, é definido que os ângulos de saída são ângulos introduzidos na peça forjada com relação à direção de forjamento para facilitar sua extração da ferramenta. Geralmente os ângulos internos são maiores que os externos, a fim de evitar um possível travamento da peça na ferramenta.

Os valores recomendados baseiam-se na norma DIN 7523, variando em função do tipo de máquina e da característica da parede da peça, como indicado na tabela 23.

em	em superfícies internas			em superfícies externas		
	Ângulo interno	Inclinação	Utilização	Inclinação	Ângulo interno	Utilização
A Martelos	1:6 1:10	9° 6°	normal mandris baixos	1:6 1:10 1:20	9° 6° 3°	nervuras altas normal peças redondas chatas
B Prensas	1:6	9°	rebaixos profundos	1:10	6°	peças redondas chatas
	1:10 1:20	6° 3°	normal com extratores	1:20 1:50	3° 1°	normal com extratores
C Máquinas de forjar			segundo a profundidade do furo ou rebaixo	1:20	3°	no mandril, ou para superfícies perpendiculares à direção do movimento
	1:20 a 1:50	3° 0 a 1°		1:50	1° 0°	normal em superfícies laterais

TABELA 23: Dimensões normalizadas de ângulos de saída.

- Raios de Arredondamento

Todos os cantos de uma peça forjada deve apresentar certo arredondamento evitando-se arestas vivas, o que exigiria altos esforços de conformação para o total preenchimento da cavidade. Nestes pontos atingir-se-iam concentrações de tensões elevadas, propiciando o rápido desgaste, o aparecimento de fissuras no forjado e até o surgimento de trincas nas ferramentas, inutilizando-as completamente.

Dependendo da característica do arredondamento este é classificado em dois grupos: salientes e reentrantes. O primeiro apresenta uma característica geométrica convexa e o segundo côncavo (ver figura 95).

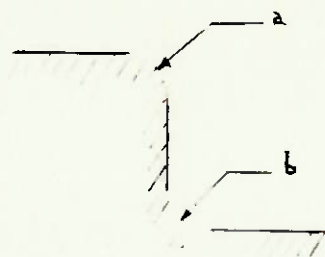


FIGURA 95: Superfícies com raios de arredondamentos:
a) Saliente
b) Reentrante.

Os valores variam em função da profundidade e diâmetro da impressão, sendo também baseados na norma DIN 7523.

Dimensão λ_1 ou λ_2 ou d_1 mm		Arredondamento dos cantos salientes em todas as peças forjadas em matriz r_1 mm	Arredondamento dos cantos reentrantes em todas as peças forjadas em matriz r_2 mm		Raios de transição para o corpo em peças forjadas em recalco- ras horizontais r_4 mm
de	até		Peças normais	Peças precisas	
—	25	2	4	4	2
25	40	3	6	5	3
40	63	4	10	6	5
63	100	6	16	8	8
100	160	8	25	10	12
160	250	10	40	16	20

TABELA 2-1: Dimensões normalizadas de raios de arredondamento

- Dimensões da Peça Forjada

Em uma peça forjada pode-se identificar uma série de dimensões que são classificadas pela norma NBR 8999, baseada na norma DIN 7526, como temos a seguir:

Dimensões de Espessura (a_1 , a_2)

Dimensões do forjado que cruzam a linha de rebarba e são medidas paralelamente a direção de forjamento.

Dimensões de Comprimento, Largura e Diâmetro

(l_1 , l_2 ; b_1 , b_2 e d_1 , d_2)

Dimensões perpendiculares à direção de forjamento, podendo ser dimensões externas ou internas. As dimensões de diâmetro empregam-se para superfícies cilíndricas.

Dimensões de Altura (h_1 , h_2)

Dimensões paralelas à direção de forjamento que não cruzam a linha de rebarba.

Dimensões de Rebaixo (p_1 , p_2)

Dimensões de profundidade de cavidades nas superfícies da peça.

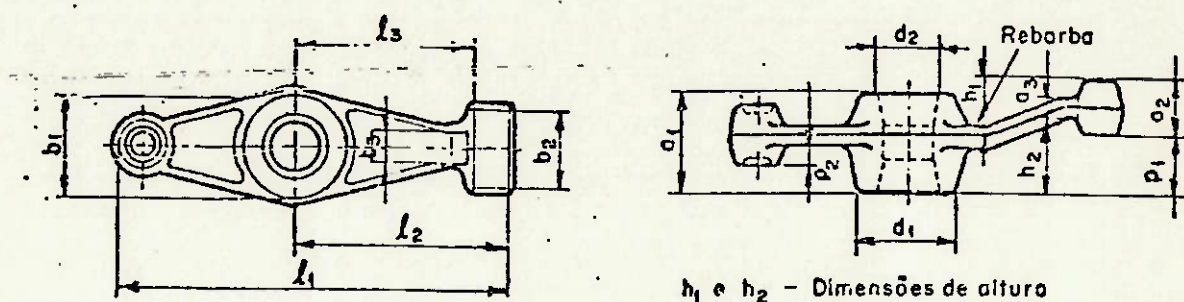


FIGURA 96: Dimensões em peça forjada.

Para a execução do forjamento o volume de material a ser utilizado deve satisfazer o volume calculado da peça somado a quantidade de material perdida por oxidação e decarbonetação (ver item 2.1.D), alcançando a ordem de 38% do volume final e um sobremetal extra que deve ser adicionado na espessura, sendo dado em função das dimensões da peça conforme tabela 25.

maior dimensão do corpo (mm)	sobremetal (mm)
até 20	0,5 a 1,0
20 a 80	1,0 a 1,5
80 a 150	1,5 a 2,0
acima de 150	2,0 a 3,0

TABELA 25: Sobremetal indicado para o forjamento em matriz fechada.

Com relação às dimensões deve-se ainda destacar alguns valores mínimos de espessura e comprimento de parede recomendados, a fim de se evitar um sobrecarregamento da matriz, indicado na tabela 26.

h (mm)		s2 (mm)	r3 mm)
até 10		3	5
de 10 a 16		4	6
de 16 a 25		5	8
de 25 a 40		8	12
de 40 a 63		12	20
de 63 a 100		20	32
de 100 a 160		32	50

b ou d (mm)	s1 (mm)	
	1 até 3b (3d)	1 acima de 3b (3d)
até 25	2	3
de 25 a 40	3	4
de 40 a 63	5	6
de 63 a 100	6	8
de 100 a 160	8	10
de 160 a 250	12	16

TABELA 26: Dimensões normalizadas de espessura, comprimento de parede e raio de curvatura em peça forjada.

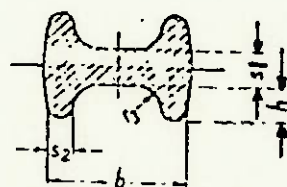


FIGURA 97: Esquema de peça indicando parâmetros de espessura, comprimento de parede e raio de curvatura.

- Dimensões do Canal e Bacia de Rebarba

Conforme visto no capítulo 2.2.A o canal de rebarba deve apresentar dimensões adequadas para garantir maior vida útil da ferramenta e a boa qualidade do forjado. Conseqüentemente, a bacia de rebarba deve seguir uma coerência dimensional com o canal, evitando medidas desproporcionais, antiprodutivas e não econômicas.

Os valores indicados na tabela 27 variam em função da área projetada da peça no plano da rebarba, sem incluíla.

(As) Área projetada em cm ²	l	m	n	o	h	h1	r	m1
(0 até 4,5)	2,0	4,0	11,0	15,0	3,5	5,0	2,5	2,0
(4,5 até 71)	2,5	5,0	20,0	25,0	5,0	8,0	4,0	3,0
(71 até 450)	3,0	6,0	29,0	35,0	6,5	10,0	5,0	4,0

TABELA 27: Dimensões normalizadas do canal e bacia de rebarba.

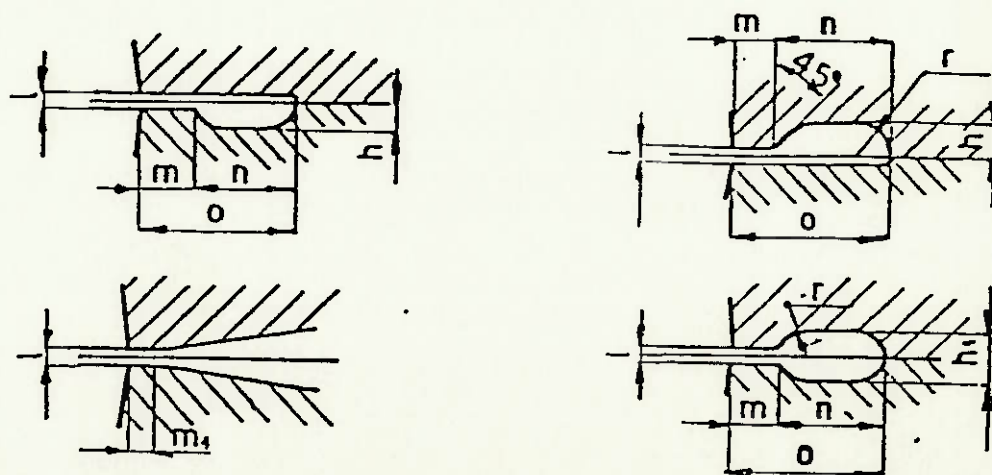


FIGURA 93: Esquema indicando as dimensões no canal e bacia de rebarba.

- Tolerâncias da Peça Forjada

A norma NBR 8999/1985, baseada na norma DIN 7526, estabelece um procedimento para a determinação das tolerâncias nas peças forjadas em todas as dimensões apresentadas no item "Dimensões da Peça Forjada". Ela fornece também tolerâncias relativas a flexão e empenamento admissíveis, distância entre centros, raios de concentricidades e arredondamento (salientes), inclinações de superfícies, rebarba e profundidade de corte admissível.

Define-se a medida de rebarba como o comprimento da sua extremidade à linha de interseção do plano do ângulo de saída de uma face com o plano adjacente à rebarba. Já a profundidade de corte é a medida entre a face de corte e a linha de interseção dos planos do ângulo de saída da ferramenta.

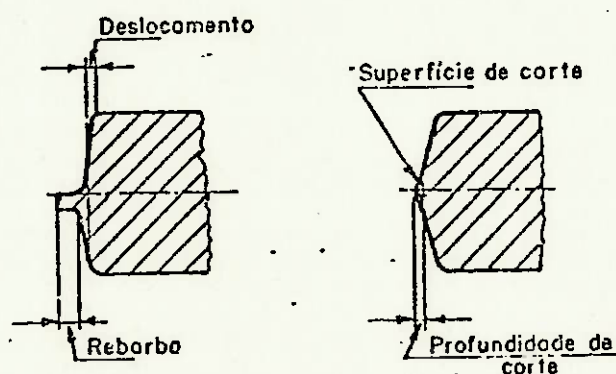


FIGURA 99: Rebarba e profundidade de corte.

Todos os valores estão contidos em tabela e suas determinações dependem de alguns parâmetros como: qualidade

da peça forjada, massa da peça, tipo de linha de rebarba, tipo de material e esbeltez da peça forjada.

A qualidade é subdividida em dois grupos, sendo os forjados classificados em qualidade F que é normal, possuindo tolerâncias e exatidão suficientes para a maioria das aplicações e os de qualidade E que representam um forjado de precisão, com tolerâncias restritas, exigindo um processo de fabricação mais rigoroso.

Quanto à massa da peça considera-se apenas o valor técnico relativo ao volume e massa específica do material. O tipo de linha de rebarba enquadra-se ângulos apresentados no item "Linha de Rebarba".

Os materiais, pelas diferentes dificuldades de conformação que apresentam e para efeito de escolha de tolerâncias, são agrupados em duas classes. A classe M1 é representada principalmente pelos aços e aços-liga com teor de carbono inferior a 0,65%. Nos aços-liga os elementos de liga não devem ultrapassar 5% em massa. Dos metais não ferrosos pertencentes a esta classe pode-se considerar o cobre, os latões (alfa e beta), bronze e alumínio. A outra classe chamada M2 compõe-se dos aços e aços-liga com teor de carbono superior a 0,65% e cujo teor de elementos de liga seja superior a 5% em massa. Encontram-se também os alumínios duros, duralumínios e o titânio.

A esbeltez de um forjado mede a complexidade de uma peça frente a outra mais simples e compacta, sendo dada pela expressão:

$$S = m_1 / m_2$$

onde: m_1 (é a massa da peça forjada)

m_2 (é a massa do corpo envolvente da peça)

S (é a esbeltez do forjado)

O corpo envolvente de uma peça forjada é dado pelas dimensões máximas da peça. Assim, para peças redondas toma-se o maior cilindro e nas peças retangulares paralelepípedos como indicado na figura 100.

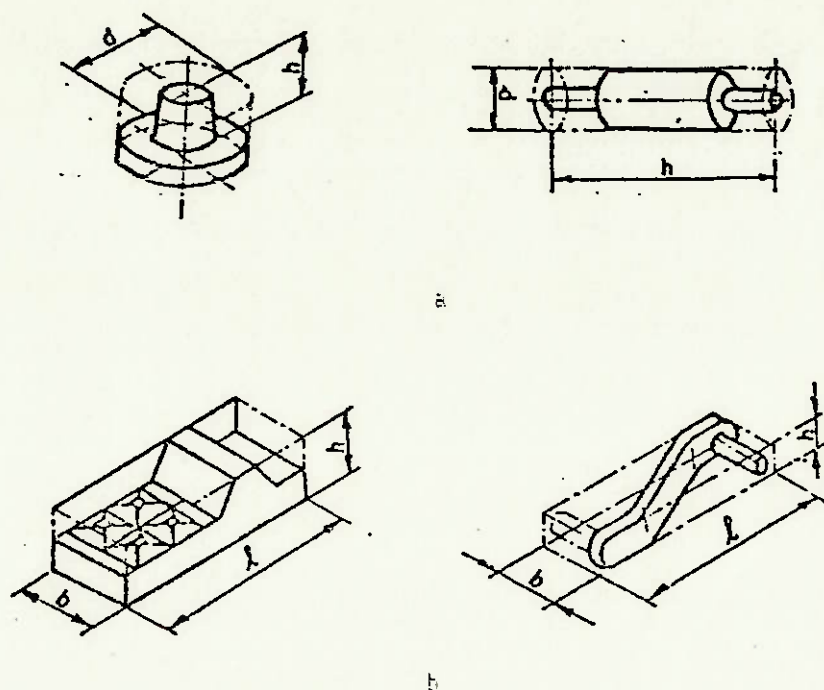


FIGURA 100: Corpos envolventes de peça forjada:
a) Peças redondas
b) Peças não-redondas.

A norma NBR 8999 subdivide os valores de esbeltez em quatro grupos:

Grupo S1 - $0,63 < S \leq 1$;

Grupo S2 - $0,32 < S \leq 0,63$;

Grupo S3 - $0,16 < S \leq 0,32$;

Grupo S4 - $0,0 < S \leq 0,16$.

É importante ressaltar que as exceções na determinação da tolerância de determinadas peças, como espessura de discos e flanges finas, constam na norma NBR 8999 a qual deve ser consultada.

A partir dos parâmetros listados anteriormente para seleção das tolerâncias, deve-se inicialmente determinar as maiores dimensões de comprimento, largura, espessura e altura da peça, bem como o tipo de linha de rebarba. Em seguida, calcula-se a sua esbeltez classificando-a quanto ao grupo e verifica-se também a classe do material. Com o auxílio das tabelas 28 ou 29, parte-se da coluna correspondente à massa caminhando para a direita até a coluna da classe do material em linha horizontal, caso ele pertença a M1, ou em diagonal para baixo, se for do tipo M2. Caminha-se novamente para a direita até a coluna da esbeltez novamente em sentido horizontal, se a peça pertencer ao grupo S1, ou em diagonal para baixo para os demais grupos. Attingido o grupo da peça, desloca-se horizontalmente para a direita até o campo da dimensão, obtendo-se as tolerâncias, seja para comprimento, largura ou altura.

As tolerâncias de deslocamento, excentricidade, medida de rebarba e profundidade de corte também utilizam as tabelas 28 ou 29. Para tal parte-se da coluna correspondente à massa deslocando-se para a esquerda até a coluna do tipo de rebarba de maneira horizontal, se esta for plana ou simétrica, ou em diagonal para baixo, caso seja assimétrica. A partir da coluna do tipo de rebarba caminha-se horizontalmente para a esquerda, obtendo-se as tolerâncias em questão.

Na determinação das tolerâncias de espessura procede-se igualmente ao efetuado na seleção das tolerâncias de comprimento, largura ou altura utilizando-se, porém, as tabelas 30 e 31.

Para a flexão e empenamento utiliza-se diretamente a tabela 32, o mesmo ocorrendo nos afastamentos admissíveis dos raios de arredondamento e reentrâncias com o auxílio da tabela 33 e distâncias entre centros, tabela 34.

Os valores assim obtidos devem ser empregados para todas as demais dimensões da peça. No entanto, caso os afastamentos tenham valores altos demais para certas dimensões isoladas, empregarse tais campos de dimensões refazendo o cálculo especificamente nestas medidas ao invés de adotarmos os valores iniciais. A exceção fica por conta da espessura que não admite tal procedimento, permanecendo o primeiro resultado.

[illegible]

Marcas de extrator	Massa kg		Dificuldade do material	Espeltoz				Campo de dimensões ruminice												
	Acima de	Até		Acima de 0,63 até 1	Acima de 0,32 até 0,63	Acima de 0,16 até 0,32	Acima de 0 até 0,16	Tolerâncias e afastamentos admissíveis (A)												
								Acima de 0	16	40	63	100	160	250						
1	0	0,4					1	+0,7 -0,3	1,1	+0,7 -0,4	1,2	+0,8 -0,4	1,4	+0,9 -0,5	1,6	+1,1 -0,5	1,8	+1,2 -0,6	2	+1,3 -0,7
1,2	0,4	1,2					1,1	+0,7 -0,4	1,2	+0,8 -0,4	1,4	+0,9 -0,5	1,6	+1,1 -0,5	1,8	+1,2 -0,6	2	+1,3 -0,7	2,2	+1,5 -0,8
1,6	1,2	2,5					1,2	+0,8 -0,4	1,4	+0,9 -0,5	1,6	+1,1 -0,5	1,8	+1,2 -0,6	2	+1,3 -0,7	2,2	+1,5 -0,7	2,5	+1,7 -0,8
2	2,5	5					1,4	+0,9 -0,5	1,6	+1,1 -0,5	1,8	+1,2 -0,6	2	+1,3 -0,7	2,2	+1,5 -0,7	2,5	+1,7 -0,8	2,8	+1,9 -0,9
2,4	5	8					1,6	+1,1 -0,5	1,8	+1,2 -0,6	2	+1,3 -0,7	2,2	+1,5 -0,7	2,5	+1,7 -0,8	2,8	+1,9 -0,9	3,2	+2,1 -1,1
3,2	8	12					1,8	+1,2 -0,6	2	+1,3 -0,7	2,2	+1,5 -0,7	2,5	+1,7 -0,8	2,8	+1,9 -0,9	3,2	+2,1 -1,1	3,6	+2,4 -1,2
4	12	20					2	+1,3 -0,7	2,2	+1,5 -0,7	2,5	+1,7 -0,8	2,8	+1,9 -0,9	3,2	+2,1 -1,1	3,6	+2,4 -1,2	4	+2,7 -1,3
5	20	36					2,2	+1,5 -0,7	2,5	+1,7 -0,8	2,8	+1,9 -0,9	3,2	+2,1 -1,1	3,6	+2,4 -1,2	4	+2,7 -1,3	4,5	+3 -1,5
6,4	36	63					2,5	+1,7 -0,8	2,8	+1,9 -0,9	3,2	+2,1 -1,1	3,6	+2,4 -1,2	4	+2,7 -1,3	4,5	+3 -1,5	5	+3,3 -1,7
8	63	110					2,8	+1,9 -0,9	3,2	+2,1 -1,1	3,6	+2,4 -1,2	4	+2,7 -1,3	4,5	+3 -1,5	5	+3,3 -1,7	5,6	+3,7 -1,9
10	110	200					3,2	+2,1 -1,1	3,6	+2,4 -1,2	4	+2,7 -1,3	4,5	+3 -1,5	5	+3,3 -1,7	5,6	+3,7 -1,9	6,3	+4,2 -2,1
12,6	200	250					3,6	+2,4 -1,2	4	+2,7 -1,3	4,5	+3 -1,5	5	+3,3 -1,7	5,6	+3,7 -1,9	6,3	+4,2 -2,1	7	+4,7 -2,3
							4	+2,7 -1,3	4,5	+3 -1,5	5	+3,3 -1,7	5,6	+3,7 -1,9	6,3	+4,2 -2,1	7	+4,7 -2,3	8	+5,3 -2,7
							4,5	+3 -1,5	5	+3,3 -1,7	5,6	+3,7 -1,9	6,3	+4,2 -2,1	7	+4,7 -2,3	8	+5,3 -2,7	9	+6 -3
							5	+3,3 -1,7	5,6	+3,7 -1,9	6,3	+4,2 -2,1	7	+4,7 -2,3	8	+5,3 -2,7	9	+6 -3	10	+6,7 -3,3
							5,6	+3,7 -1,9	6,3	+4,2 -2,1	7	+4,7 -2,3	8	+5,3 -2,7	9	+6 -3	10	+6,7 -3,3	11	+7,3 -3,7
							6,3	+4,2 -2,1	7	+4,7 -2,3	8	+5,3 -2,7	9	+6 -3	10	+6,7 -3,3	11	+7,3 -3,7	12	+8 -4

TABELA 30: Tolerâncias e afastamentos admissíveis para dimensões de espessura e marcas de extratores - Qualidade F de forjamento:
(A): As tolerâncias são subdivididas em 2/3 e 1/3 (valores arredondados).

Marcos do extrator	Massa kg		Dificuldade do material	Acima de 0,53 até 1	Acima de 0,22 até 0,53	Acima de 0,05 até 0,22	Acima de 0 até 0,05	Campo de dimensões nominais																									
								Acima de 0 Até 16	16 40	40 63	63 100	100 160	160 250	250	Tolerâncias e afastamentos admissíveis (A)																		
	Até 0,5	Até 1,2																															
				M1	M2	S1	S2	S3	S4																								
1	0	0,5								0,6	+0,4 -0,2	0,7	+0,5 -0,2	0,8	+0,5 -0,3	0,9	+0,6 -0,3	1	+0,7 -0,3	1,1	+0,7 -0,4	1,2	+0,8 -0,4										
1,2	0,5	1,2								0,7	+0,5 -0,2	0,8	+0,5 -0,3	0,9	+0,6 -0,3	1	+0,7 -0,3	1,1	+0,7 -0,4	1,2	+0,8 -0,4	1,4	+0,9 -0,5										
1,6	1,2	2,5								0,8	+0,5 -0,3	0,9	+0,6 -0,3	1	+0,7 -0,3	1,1	+0,7 -0,4	1,2	+0,8 -0,4	1,4	+0,9 -0,5	1,6	+1,1 -0,5										
2	2,5	5								0,9	+0,6 -0,3	1	+0,7 -0,3	1,1	+0,7 -0,4	1,2	+0,8 -0,4	1,4	+0,9 -0,5	1,6	+1,1 -0,5	1,8	+1,2 -0,6										
2,4	5	8								1	+0,7 -0,3	1,1	+0,7 -0,4	1,2	+0,8 -0,4	1,4	+0,9 -0,5	1,6	+1,1 -0,5	1,8	+1,2 -0,6	2	+1,3 -0,7										
3,2	8	12								1,1	+0,7 -0,4	1,2	+0,8 -0,4	1,4	+0,9 -0,5	1,6	+1,1 -0,5	1,8	+1,2 -0,6	2	+1,3 -0,7	2,2	+1,5 -0,7										
4	12	20								1,2	+0,8 -0,4	1,4	+0,9 -0,5	1,6	+1,1 -0,5	1,8	+1,2 -0,6	2	+1,3 -0,7	2,2	+1,5 -0,7	2,5	+1,7 -0,8										
5	20	36								1,4	+0,9 -0,5	1,6	+1,1 -0,6	1,8	+1,2 -0,6	2	+1,3 -0,7	2,2	+1,5 -0,7	2,5	+1,7 -0,8	2,8	+1,9 -0,9										
6,4	36	63								1,6	+1,1 -0,5	1,8	+1,2 -0,6	2	+1,3 -0,7	2,2	+1,5 -0,7	2,5	+1,7 -0,8	2,8	+1,9 -0,9	3,2	+2,1 -1,1										
8	63	110								1,8	+1,2 -0,6	2	+1,3 -0,7	2,2	+1,5 -0,7	2,5	+1,7 -0,8	2,8	+1,9 -0,9	3,2	+2,1 -1,1	3,6	+2,4 -1,2										
10	110	200								2	+1,3 -0,7	2,2	+1,5 -0,7	2,5	+1,7 -0,8	2,8	+1,9 -0,9	3,2	+2,1 -1,1	3,6	+2,4 -1,2	4	+2,7 -1,3										
12,6	200	250								2,2	+1,5 -0,7	2,5	+1,7 -0,8	2,8	+1,9 -0,9	3,2	+2,1 -1,1	3,6	+2,4 -1,2	4	+2,7 -1,3	4,5	+3 -1,5										
										2,5	+1,7 -0,8	2,8	+1,9 -0,9	3,2	+2,1 -1,1	3,6	+2,4 -1,2	4	+2,7 -1,3	4,5	+3 -1,5	5	+3,3 -1,7										
										2,8	+1,9 -0,9	3,2	+2,1 -1,1	3,6	+2,4 -1,2	4	+2,7 -1,3	4,5	+3 -1,5	5	+3,3 -1,7	5,6	+3,7 -1,9										
										3,2	+2,1 -1,1	3,6	+2,4 -1,2	4	+2,7 -1,3	4,5	+3 -1,5	5	+3,3 -1,7	5,6	+3,7 -1,9	6,3	+4,2 -2,1										
										3,6	+2,4 -1,2	4	+2,7 -1,3	4,5	+3 -1,5	5	+3,3 -1,7	5,6	+3,7 -1,9	6,3	+4,2 -2,1	7	+4,7 -2,3										
										4	+2,7 -1,3	4,5	+3 -1,5	5	+3,3 -1,7	5,6	+3,7 -1,9	6,3	+4,2 -2,1	7	+4,7 -2,3	8	+5,3 -2,7										

TABELA 31: Tolerâncias e afastamentos admissíveis para dimensões de espessura e marcas de extratores - Qualidade E de forjamento (B):

(A): idem tabela 30.

(B): Aplicadas somente para peças forjadas em martelos e prensas.

Unidade: mm

Qualidade de forjamento	Campo de dimensões nominais e tolerâncias														
	1	101	126	161	201	251	316	401	501	631	801	1001	1251	1601	2001
	a	a	a	a	a	a	a	a	a	a	a	a	a	a	a
	100	125	160	200	250	315	400	500	630	800	1000	1250	1600	2000	2500
F	0,6	0,7	0,8	0,9	1,0	1,1	1,2	1,4	1,6	1,8	2,0	2,2	2,5	2,8	3,2
E (A)	0,4	0,5	0,5	0,6	0,6	0,7	0,8	0,9	1,0	1,1	1,2	1,4	1,6	1,8	2,0

TABELA 32: Tolerâncias para flexão e empenamento admissíveis
(A): Não é aplicado para peças forjadas em máquinas horizontais de recalque.

Unidade: mm

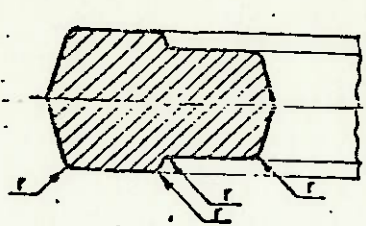
	Campo de dimensões nominais	Afastamentos nominais
	$0 < r \leq 10$	$+0,5 \text{ } r \text{ e } -0,25 \text{ } r$
	$10 < r \leq 32$	$+0,4 \text{ } r \text{ e } -0,2 \text{ } r$
	$32 < r \leq 100$	$+0,32 \text{ } r \text{ e } -0,15 \text{ } r$
	$r > 100$	$+0,25 \text{ } r \text{ e } -0,1 \text{ } r$

TABELA 33: Afastamentos admissíveis para raios de reentrâncias e arredondamentos de canto.

Unidade: mm

Qualidade de forjamento	Campo de dimensões nominais e afastamentos											
	1	101	161	201	251	316	401	501	631	801	1001	
	a	a	a	a	a	a	a	a	a	a	a	
	100	160	200	250	315	400	500	630	800	1000	1250	
F	$\pm 0,3$	$\pm 0,4$	$\pm 0,5$	$\pm 0,6$	$\pm 0,8$	$\pm 1,0$	$\pm 1,2$	$\pm 1,6$	$\pm 2,0$	$\pm 2,5$	$\pm 3,2$	
E (A)	$\pm 0,25$	$\pm 0,3$	$\pm 0,4$	$\pm 0,5$	$\pm 0,6$	$\pm 0,8$	$\pm 1,0$	$\pm 1,2$	$\pm 1,6$	$\pm 2,0$	$\pm 2,5$	

TABELA 34: Afastamentos admissíveis para distâncias entre centros:
(A): idem tabela 32.

4.2.B.2) MATRIZES DE REBARBAÇÃO

Entre os tipos de matrizes nada mais são do que estampos de corte, onde o punção pode atuar sobre a peça ou diretamente na fase de corte da rebarba, impulsionando a peça para dentro da cavidade da matriz e retendo a rebarba. Para peças de baixa produção utilizam-se estampos simples, indicado na figura 101. Por outro lado, para grandes produtividades, geralmente empregam-se as matrizes postigas na qual uma é chamada de corpo e a outra de estampo de corte. Esta última pode facilmente ser substituída bastando desapertar os parafusos de fixação, como indicado nas figuras 102 e 103.

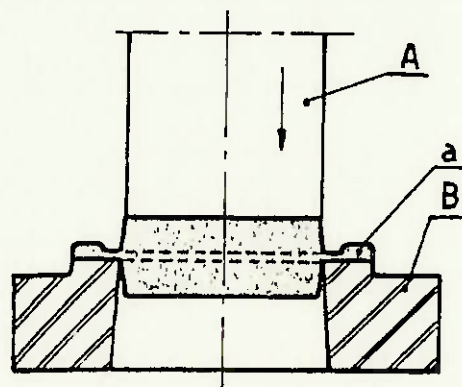


FIGURA 101: Estampo simples de rebartação;

- A) Punção
- B) Estampo
- a) Peça.

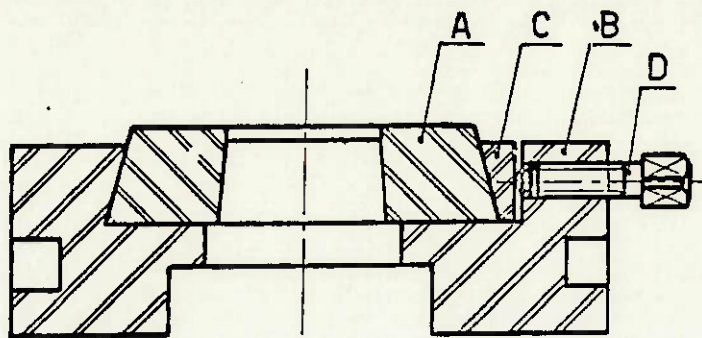


FIGURA 172: Estampo de rebarbação com fixação horizontal;
 A) Estampo de corte
 B) Corpo
 C) Encosto
 D) Parafuso de fixação.

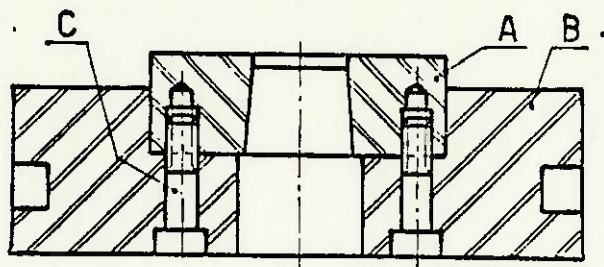


FIGURA 173: Estampo de rebarbação com fixação vertical;
 A) Estampo de corte
 B) Corpo
 C) Parafuso de fixação.

Em alguns casos além da rebarba poder-se, por medida de economia, efetuar o corte de regiões onde apresentam-se cavidades em vez de submeter a peça a uma usinagem. Nesta situação o miolo da cavidade é que acaba sendo expulso pelo punção, permanecendo a peça sobre o estampo.

As matrizes de rebarbação podem conter sistemas de extração que facilitam a separação da peça ou rebarba do punção, como indicado nas figuras 174 e 175.

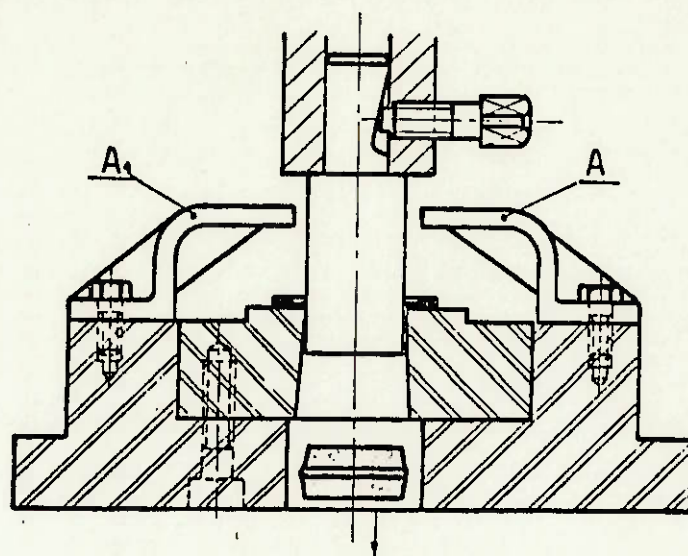


FIGURA 104: Estampo de rebarbação com sistema de extração de rebarba (A e A₁).

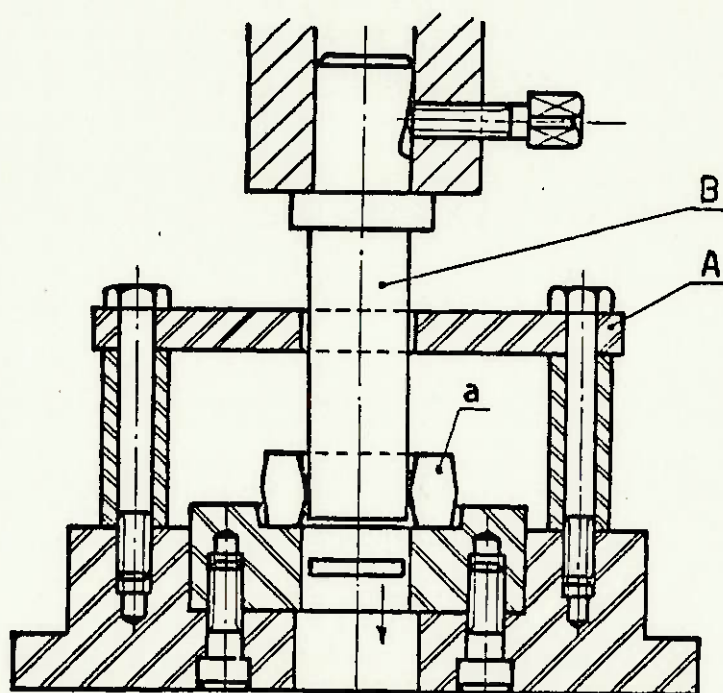


FIGURA 105: Estampo de rebarbação com sistema de extração da peça:

- A) Dispositivo de extração da peça
- B) Punção
- a) Peça.

Os punções e as matrizes apresentam uma geometria adequada devendo seguir o contorno a ser cortado. Neste particular, o formato da peça influe significativamente na determinação da folga entre a matriz de corte e o punção, indicado por (s), seguindo os valores recomendados na tabela 35.

Forma a		Forma b		Forma c
h	s	d	s	s
hasta 5	0,3	hasta 20	0,3	0,3
de 5 a 10	0,5	de 20 a 30	0,5	
de 10 a 20	0,8	de 30 a 45	0,8	
de 20 a 25	1,0	de 45 a 60	1,0	
de 25 a 30	1,2	de 60 a 70	1,2	
de 30	1,5	de 70	1,5	

TABELA 35: Dimensões normalizadas para o afastamento (s) nos punções.

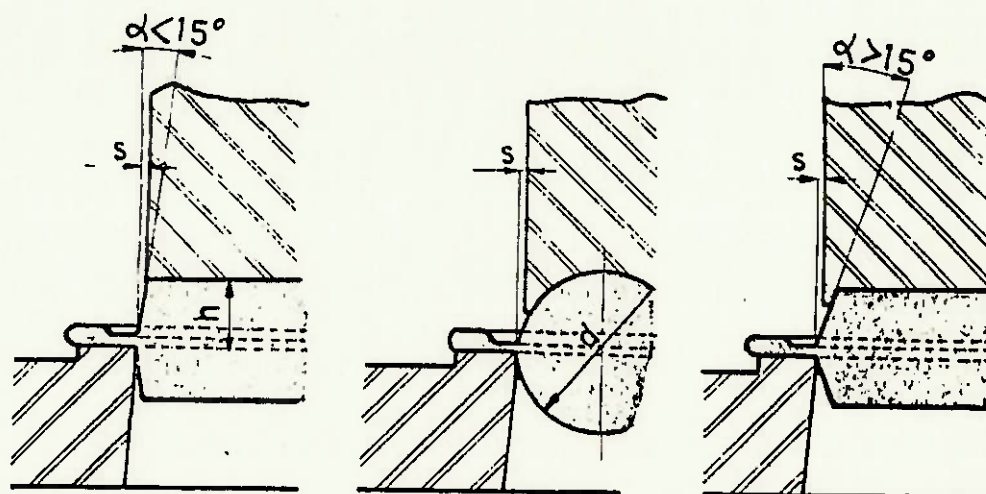


FIGURA 106: Punção indicando o afastamento (s).

As matrizes apresentam restrições quanto ao ângulo da face interna e da espessura de apoio da peça, como indicado na figura 107.

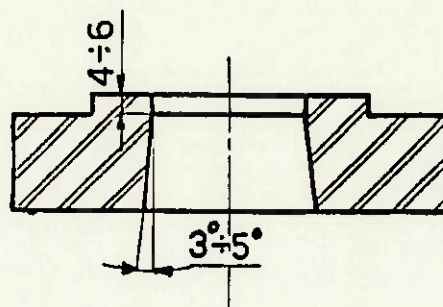


FIGURA 107: Valores do ângulo da face interna e espessura de apoio da peça nos estampos de rebabação.

4.3) MATERIAIS PARA FERRAMENTAS:

No item 4.2 classificou-se as ferramentas de forjamento em matriz em dois tipos: as de conformação e as de rebabação. A seguir será apresentado os materiais utilizados na confecção de matrizes e estampos.

4.3.A) MATERIAIS PARA MATRIZES DE CONFORMAÇÃO E ESTAMPOS

Os materiais para matrizes de conformação e estampo devem satisfazer as condições já abordadas anteriormente no item 4.1, no que se refere a resistência mecânica aos esforços de compressão e impacto (choque), além de excelente resistência ao desgaste. No caso de forjamento a quente, o

material deve suportar altas temperaturas e variações térmicas constantes.

Um outro fator importante na determinação do material deste tipo de ferramenta são as condições econômicas, e qual levar em conta tanto a quantidade a ser fabricada, como as características do material a ser conformado. Assim, em peças de alta produtividade aconselha-se um material da matriz ou estampo mais nobre, a fim de se evitar paradas constantes na máquina para sua troca. O mesmo não se deve proceder em peças de pequenos lotes, onde aplicam-se matrizes simples de acabamento e matrizes múltiplas, ambas constituídas de um único corpo e cujo volume de material é muito maior, o que encareceria demasiadamente o seu custo. No caso de conformação de materiais mais resistentes como aços-liga e alguns não ferrosos, a exigência de tolerâncias mais restritas, o tamanho da peça e a magnitude do esforço implicam também na escolha de matrizes e estampos constituídos de materiais nobres.

Finalmente devemos considerar a forma da impressão quanto a maior irregularidade de sua superfície e sua profundidade, bem como a possibilidade de tratamento térmico para o material da matriz ou estampo. Este último item é muito importante e será abordado detalhadamente no item 4.4 pois possibilita a escolha de um material de características inferiores, mas que possa atingir excelentes propriedades com o tratamento.

Dentro de tais considerações e pelo fato do forjamento a frio diferir do forjamento a quente, será apresentado os materiais que mais se adequam a estes dois tipos de conformação.

ACOS PARA FORJAMENTO A FRIO

Podemos distinguir dois tipos de aços para matrizes de forjamento a frio. O primeiro grupo são daquelas que possibilitam têmpera superficial. São ferramentas com grande resistência ao desgaste porém, com regular tenacidade e pouca resistência à compressão. Após o tratamento térmico atinge-se com facilidade entre 58 HC e 60 HC na superfície. O outro grupo caracteriza-se pela possibilidade de têmpera total, onde pode-se incluir também os aços-rápidos e os aços-liga com 12% de cromo. Estes tipos de aços apresentam boa resistência à compressão e ao desgaste.

Tipo de acero Abreviación	C 100 W 1	145 V 33	100 V 1	X 32 CrMoV 33
Número de material	1.1540	1.2838	1.2833	1.2365
Dureza RHC	56...61	58...62	59...63	58...62
Aplicación tg	Cizalla Matrices de corte Mordazas Matrices Caja de prensado Recalcador previo Estampa de acabado Punzón Anillos de guía		Matrices de corte Mordazas Matrices Caja de prensado Recalcador previo Estampa de acabado Punzón	Mordazas Matrices Caja de prensado

TABELA 36: Aços para ferramentas de trabalho a frio que possibilitam têmpera superficial.

Tipo de acero		Dureza HRC	Cizalla	Punzón Cabeza de punzón Mandril	Matriz Caja de prensado	Anillos de contracción Armadura	Extractor Expulsor	Extrusionado en frío de metales no férreos muy resistentes a la compresión; no a la flexión
Abreviación	Número de material							
100 Cr 6	1.2067	58...60				x	x	
X210 Cr 12	1.2080	58...62	x	x	x			
X40 CrMoV 5 1	1.2344	48...62			x	xx	x	
60 WCr V 7	1.2350	55...59	x	x	x	x	x	
X165 CrMoV 12	1.2601	60...62	x	x	x			
50 NiCr 13	1.2721	54...58			x	x	x	
X45 NiCrMo 4	1.2767	54...58			x	x	x	
56 NiCrMoV 7	1.2714	48...60				xx	x	
75 CrMoNiW 67	1.2762	55...63		x			x	
60 MnSi 4	1.2826	58...62		x	x		x	
S 9-1-2 (ABCII)	1.3316	60...63	x	x				
S 12-1-2 (D)	1.3318	61...64	x		x			
S 6-5-2 (DMo5)	1.3343	59...62	x	xx	xx		xx	
S 18-0-1 (B18)	1.3355	59...62		xx				
S 10-4-3-10	1.3207	59...62		x	x			

TABELA 37: Aços para ferramentas de trabalho a frio que possibilitam têmpera total.

AÇÕES PARA FORJAMENTO A QUENTE

Como mencionado no item 4.1.B. a solicitação térmica da ferramenta exige materiais mais resistentes, tanto as oscilações de temperatura, quanto ao desgaste, além de excelente tenacidade. Todas estas propriedades devem ser adequadas à temperatura de trabalho da ferramenta. Para tais características utilizam-se aços-liga contendo molibdênio, vanádio, cromo e wolfrânio.

Tipo de acero		Dureza HRC	Cuchillas	Matriz de corte	Mordazas	Estampa Recalcador previo	Martillos	Matriz	Punzón	Expulsor	Cajas de suja	Yunque
Abreviación	Número de material											
C 100 W 1	1.1540	58...61	x	x				x			x	
C 100 W 2	1.1650	53...58								x		
100 V 1	1.2833	58...61		x		x		x				
115 Cr V 3	1.2210	53...58								x		
120 WV 4	1.2516	53...58								x		
60 WCrV 7	1.2550	53...58				x				x		
45 CrVMoW 58	1.2603	46...51 41...46			x	x	x	x				x
X 165 CrMoV 12	1.2601	58...61	x									
X 210 Cr 12	1.2080	58...61	x									
X 30 WCrV 53	1.2567	46...51 44...49 41...46			x	x	x	x	x	x		x
X 32 CrMoV 33	1.2365	46...51 44...49			x	x	x	x	x	x		x
X 30 WCrV 93	1.2581	46...51			x	x	x	x	x			
S 9-1-2 (ABCII)	1.3316	56...61	x	x								
S 18-0-1 (B 18)	1.3355	56...61	x	x								

TABELA 38: Aços para ferramentas de trabalho a quente.

4.3.2) MATERIAIS PARA MATRIZES DE REBARBAÇÃO

Os materiais para estes tipos de matrizes são os comumente usados nos estampos de corte. Uma das características principais é a dureza à temperatura ambiente. As ferramentas de rebarbação devem apresentar uma dureza superior à da peça de trabalho. Esta propriedade é obtida com aços de alto teor de carbono ou que contenham grande quantidade de elementos de liga. Dentre estes últimos deve-se destacar o cromo, tungstênio e molibdênio.

Outras propriedades também importantes são a resistência mecânica, temperabilidade e resistência ao desgaste. Na primeira visa-se elevados valores para os limites de escoamento e ruptura. A temperabilidade garante maior penetração de dureza e uniformidade de características mecânicas, evitando quebras em regiões isoladas. A resistência ao desgaste permite a fabricação de um grande número de peças para a mesma ferramenta, ou seja, maior vida útil.

4.4) TRATAMENTO TÉRMICO DAS FERRAMENTAS:

O tratamento térmico das ferramentas têm o objetivo de fornecer ao material valores mais nobres de resistência frente as solicitações a que estas se submete. Além de conferir características superficiais mais adequadas, visar-

se uma homogeneização interna de sua estrutura cristalina, diminuindo a sua susceptibilidade à fratura. Os tratamentos diferem pela faixa de temperatura, tempo de permanência a esta e modo de resfriamento, sendo suas aplicações dependentes das características finais que se pretende obter.

4.4.4.1 RECOZIMENTO

Aplica-se principalmente em etapas anteriores à fabricação da ferramenta ou como preparação a uma têmpera posterior. Deve-se aumentar gradativamente a temperatura até um certo valor, que depende de cada tipo de material, deixando-o nesta condição por um determinado tempo. Em seguida faz-se o resfriamento lento no próprio ambiente do forno, obrigando os dois esfriarem ao mesmo tempo ou na atmosfera. Quanto maior o tempo de aquecimento, permanência e resfriamento, maior a homogeneização do material e conseqüentemente de suas propriedades. Distingue-se três tipos de recozimento descritos a seguir.

RECOZIMENTO NORMAL

Eleva-se a temperatura um pouco abaixo da temperatura de recristalização, acompanhada de resfriamento à atmosfera. Aplica-se para matrizes de conformação a quente que sofreram

aumento de grão devido a constantes operações de forjamento acima da temperatura especificada. Proceder-se-á com o recozimento normal o refinamento destes grãos e a recuperação do material.

RECOZIMENTO BRANDO

Após atingida uma temperatura um pouco abaixo da de recristalização, o material permanece por algumas horas nesta faixa, fazendo-se em seguida o seu resfriamento lento. Com isto, obtém-se uma estrutura interna formada por cementita esférica de características adequadas para a fabricação da ferramenta através de usinagem ou conformação a frio (ambos abordados no item 4.5), bem como oferece excelentes condições de temperabilidade. O tempo de permanência está em torno de quatro horas, diminuindo-o no caso de materiais com maiores quantidades de wolfrâmio em sua constituição, devido a queda considerável na capacidade de têmpera se permanecerem demasiadamente na temperatura de recristalização. A tabela 39 fornece a faixa de temperaturas de recozimento brando para os materiais de matrizes de conformação.

Tipo de acero Abreviación	Recocido blando °C
C 100 W 1	680...710
100 V 1	680...720
145 V 33	680...720
X 32 CrMoV 33	710...750
100 Cr 6	710...750
X 210 Cr 12	800...840
X 40 CrMoV 51	800...840
60 WCrV 7	710...750
X 165 CrMoV 12	800...840
50 NiCr 13	610...650
X 45 NiCrMo 4	610...650
56 NiCrMoV 7	660...700
75 CrMoNiW 67	710...750 Recocido a 600...650
60 MnSi 4	680...720
S 9-1-2	770...820
S 12-1-2	770...820
S 6-5-2	770...820
S 18-0-1	770...820
S 10-4-3-10	770...820

TABELA 39a: Temperaturas de recozimento brando para aços de ferramentas destinadas ao trabalho a frio.

Tipo de material Abreviación	Recocido de ablandamiento °C
C 100 W 1	680...710
C 110 W 2	680...710
100 V 1	680...720
115 CrV 3	710...750
120 WV 4	710...750
60 WCrV 7	710...750
45 CrVMoW 58	740...780
X 165 CrMoV 12	800...840
X 210 Cr 12	800...840
X 30 WCrV 53	740...780
X 32 CrMoV 33	710...750
X 30 WCrV 93	740...780
S 9-1-2	770...820
S 18-0-1	770...820

TABELA 39b: Temperaturas de recozimento brando para aços de ferramentas destinadas ao trabalho a quente.

RECOZIMENTO PARA ALÍVIO DE TENSÕES

Independentemente do tipo de material, este é aquecido a uma faixa entre 600°C e 650°C, permanecendo nesta faixa de 1 a 2 horas a partir da qual faz-se o resfriamento lento no próprio forno. Obtem-se assim apenas um alívio de tensões proveniente dos processos de fabricação da ferramenta e que são indesejáveis na têmpera.

4.4.B) TÊMPERA

Para se realizar um tratamento de têmpera, deve-se levar primeiramente em consideração o adequado aquecimento do material, procedendo-se da maneira mais lenta e homogênia possível. Este cuidado evita deformações e acúmulo de tensões localizadas responsáveis por trincas. É importante observar que o aquecimento deve ser mais demorado quanto maior a porcentagem de elementos de liga presentes.

Geralmente leva-se o material a um forno de pré-aquecimento fazendo-o atingir uma temperatura abaixo da temperatura de têmpera. Em seguida faz-se sua transferência para o forno de têmpera. A tabela 40 fornece para os diferentes tipos de materiais as temperaturas mais adequadas para este tratamento. No caso de peças grandes e robustas escolhe-se o limite superior da faixa apresentada, enquanto que para peças pequenas e delgadas utiliza-se os menores valores. Nos aços-liga tomam-se os valores do limite superior, principalmente pelo fato de propiciar maior resistência ao trabalho a quente e ao revenido; isto é, baixas temperaturas de têmpera requerem baixas temperaturas de revenido que podem ser facilmente ultrapassadas no forjamento e conseqüentemente provocar formação de trincas. No entanto, todos os valores superiores não devem ser ultrapassados pois ocasionaria crescimento demasiado de grão e até descarbonetação e formação de carepa, inutilizando a ferramenta (ver figura 108).

Tipo de acero Abreviación	Temple		Observaciones
	En agua °C	En aceite °C	
C 100 W 1	760...790	790... 820	En aceite solamente para herramientas de pared delgada Enfriamiento lento del horno
100 V 1	790...820	—	
145 V 33	800...830	—	
X 32 CrMoV 33	—	1020...1070	Temple en baño caliente de 450 hasta 500°C
100 Cr 6	—	830... 860	
X 210 Cr 12	—	930... 980	Temple también al aire también al aire y baño caliente
X 40 CrMoV 51	—	1000...1050	
60 WCrV 7	—	870... 900	también al aire
X 165 CrMoV 12	—	980...1020	
50 NiCr 13	—	840... 880	también al aire
X 45 NiCrMo 4	—	840... 870	
56 NiCrMoV 7	—	—	860 hasta 900 al aire o al aire de ventilador
75 CrMoNiW 67	—	870... 900	
60 MnSi 4	—	820... 850	también temple en baño caliente o aire comprimido seco
S 9-1-2	—	1200...1230	
S 12-1-2	—	1210...1240	
S 6-5-2	—	1190...1220	
S 18-0-1	—	1230...1260	
S 10-4-3-10	—	1210...1250	

TABELA 40a: Temperaturas e meios de têmpera para aços de ferramentas destinadas ao trabalho a frio.

Tipo de material Abreviación	Temple		Observaciones
	En agua °C	En aceite °C	
C 160 W 1	770...800	790... 820	templar en aceite en caso de herramientas de pared delgada
C 110 W 2	760...790	790... 820	
100 V 1	790...820	-	
115 CrV 3	780...810	810... 840	en aceite < 15 mm ϕ
120 W V 4	780...810	810... 840	en aceite < 15 mm ϕ
60 WCrV 7	-	870... 900	
45 CrV MoW 58	-	1000...1050	también al aire
X 165 CrMoV 12	-	980...1020	también al aire
X 210 Cr 12	-	920... 960	también al aire
X 30 WCrV 53	-	1050...1100	
X 32 CrMoV 33	-	1020...1070	
X 30 WCrV 93	-	1100...1150	también al aire
S 9-1-2	-	1200...1230	también en baño caliente y aire caliente
S 18-0-1	-	1230...1260	

TABELA 40b: Temperaturas e meios de têmpera para aços de ferramentas destinadas ao trabalho a quente.



FIGURA 100: Ferramenta de recalagem que sofreu alto grau de decarbonetação e formação de casca.

O material deve, atingida a temperatura de têmpera, permanecer um determinado tempo no forno (entre 10 min e 30 min). Para cálculos mais exatos a experiência adota um valor de 5 min para cada 10 mm de espessura da peça. Este valor é alterado para aços com alta presença de cromo ou silício,

atingindo a faixa de 10 min para cada 10 mm de espessura. O tempo de permanência também é um fator importante pois, se a peça ficar abaixo de um valor adequado não irá atingir, após o tratamento, as propriedades desejadas. Por outro lado a permanência em um tempo demasiado afeta a microestrutura do material.

Finalmente, para completar a têmpera, deve-se fazer um resfriamento rápido. Este pode ser realizado em soluções salinas ou alótlinas, água, óleos e ar a circulação forçada. O tempo deste ou daquele meio de resfriamento varia em função da severidade a que se pretende submeter o material, obtendo-se profundidades de têmpera maior ou menor. O resfriamento com água é um dos mais severos, estando esta a uma temperatura entre 20°C e 40°C. Utilizando-se óleos o resfriamento torna-se mais lento e irregular devido a característica de diminuição da viscosidade destes com o aumento da temperatura. A faixa situa-se inicialmente entre 40°C e 60°C.

Deve-se ressaltar a peculiaridade dos resfriamentos em banhos de sais, que provocam situações diferentes dependendo da temperatura inicial. Para banhos a 20°C ocorre uma situação severa, enquanto que para banhos a 80°C tem-se um resfriamento brando. Além disso, variações de 10°C podem provocar resultados não satisfatórios como a formação de trincas.

4.4.01 REVENIDO

O revenido é um tratamento que deve ser executado imediatamente após a têmpera para alívio rápido das tensões geradas durante o resfriamento brusco. Obtem-se um aumento da tenacidade e elasticidade da ferramenta em detrimento da dureza.

Executa-se o aquecimento lento porque após a têmpera o material torna-se susceptível ao aquecimento rápido. Por isto, este é conduzido ao forno frio ou em baixa temperatura. No caso de ferramentas para forjamento a quente não devem ultrapassar 250°C. Este permanece no forno até ocorrer uma homogeneização da temperatura, sendo transferido para o forno de revenido onde o material irá atingir a temperatura adequada. No forno de revenido o aquecimento é feito por insuflação de ar seco ou mais modernamente em banhos de óleo ou sal. Após um tempo de permanência executa-se o resfriamento no próprio forno ou à atmosfera. É importante observar os casos na qual o material apresenta fragilidade ao revenido, exigindo resfriamento mais rápido.

A temperatura de revenido depende exclusivamente da dureza que se pretende obter após o tratamento, ficando entre 200°C e 700°C para aços de ferramentas de forjamento a frio. Para ferramentas de forjamento a quente a temperatura de revenido situa-se de 30°C a 50°C acima da temperatura de trabalho, evitando um desgaste superficial acelerado durante sua utilização.

4.5) PROCESSOS DE FABRICAÇÃO DE FERRAMENTAS DE CONFORMAÇÃO:

Neste capítulo será tratado as técnicas utilizadas para a fabricação de matrizes e estampos. Cada processo de fabricação engloba características distintas umas das outras que serão discutidas detalhadamente.

4.5.A) USINAGEM

A confecção das ferramentas por este tipo de processo é um dos mais difundidos e empregados hoje em dia devido a facilidade de produção, os equipamentos utilizados e o custo relativamente baixo do processo.

O material em bruto após ter sido submetido à algum tratamento térmico é enviado à ferramentaria. A primeira etapa é a preparação do rabo de andorinha e da face que conterá a impressão do formato da peça, ambas por fresamento. Com a superfície polida e o emprego de uma fresadora copiadora faz-se gradativamente a usinagem da impressão. O acabamento final é dado manualmente e depende muito do ferramenteiro. Esta etapa é praticamente artesanal, pois o operador, baseando-se nas medidas de projeto e de protótipos de peças em passo confeccionados na cavidade da própria ferramenta, ajusta todas as dimensões com lima e pequena rebolos manuais. Finalmente é dado polimento em

toda a superfície da cavidade, podendo a ferramenta ir direto à linha de produção.

4.5.8) CONFORMAÇÃO

Este tipo de processo imprime, através de um punção com o formato da peça, a cavidade na superfície da ferramenta. Esta é uma técnica muito vantajosa no que diz respeito à economia do material e da rapidez de confecção. As ferramentas obtidas por conformação apresentam uma vida útil maior do que as fabricadas pelo processo de usinagem, pois este provoca uma interrupção nas fibras do material devido ao arranque de cavaco. Destacam-se dois tipos de fabricação por conformação: a quente e a fria.

No primeiro faz-se inicialmente a preparação da superfície que receberá a impressão, analogamente ao processo de usinagem. Em seguida, a matriz é aquecida, em função do seu material, até a temperatura de forja e faz-se a conformação pela penetração lenta do punção que atinge velocidades entre 5 e 10 mm/s. A força de conformação depende das características do material da ferramenta e da temperatura que esta se encontra. Deve-se ressaltar o fato da dilatação térmica do material que, geralmente, está entre 1,3% até 1,5%, exigindo a confecção do punção com uma variação de suas medidas desta ordem.

Tanto o aquecimento quanto o resfriamento devem ser executados de maneira adequada para se evitar a

descarbonetação ou formação de casca e o surgimento de trincas por tensões localizadas, respectivamente. Deste modo, deve-se respeitar os limites máximos de aquecimento e efetuar um resfriamento o mais lento possível, de preferência ao ar.

Na figura 109 temos indicado a confecção de uma matriz pelo método descrito anteriormente.

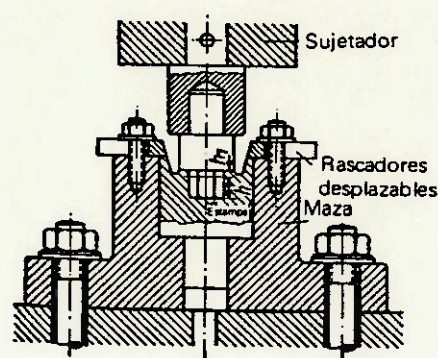


FIGURA 109: Fabricação de ferramentas por conformação.

A fabricação de ferramentas por conformação a frio é utilizada mais frequentemente na confecção de matrizes e estampas destinados ao forjamento a quente de pequenas e médias peças ou forjamento a frio. Para executar a operação deve-se dispor de um dispositivo especial cuja parte superior serve para guiar o punção e na parte inferior existe um anel cônico para centragem. Eventualmente pode conter colunas guias. Todos estes detalhes objetivam assegurar uma perfeita impressão, evitando inclinações no

processo. Na figura 110 temos esquematicamente o dispositivo escrito acima.

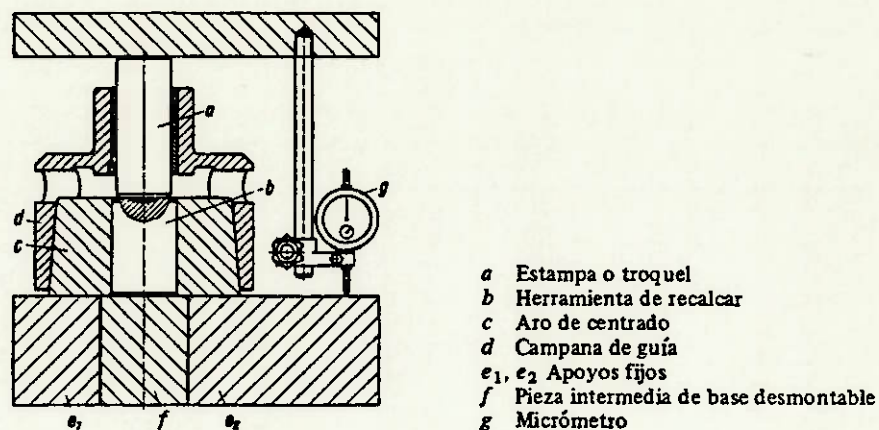


FIGURA 110: Dispositivo para fabricação de ferramenta por conformação a frio.

Como o nível de solicitação em uma operação deste tipo é maior do que no primeiro caso, deve-se trabalhar com velocidades de deformação mais baixas possíveis, estando esta entre 0,1 mm/min e 10 mm/min. A prática tem demonstrado que para 3 mm/min obtêm-se ferramentas de excelente qualidade. A necessidade de baixas velocidades exige a utilização de prensas hidráulicas para a conformação. As características de uma máquina deste tipo serão detalhadas no capítulo 5.

A força empregada neste tipo de conformação depende exclusivamente do material a ser conformado e das características geométricas da impressão. Assim, superfícies com um grau de complexidade maior necessitam valores de força mais elevados.

Toda a preparação do material em bruto para este processo segue basicamente as mesmas etapas do primeiro caso e as propriedades adquiridas, principalmente devido ao efeito de encruamento da conformação a frio, confere uma resistência superficial mais elevada que os dois processos já citados. A desvantagem reside no fato de que as altas forças empregadas para conformação impossibilitam a confecção de ferramentas para o forjamento de grandes peças. Além do seu controle preciso, pois sobrecargas de conformação originam trincas na superfície da ferramenta inutilizando-a por completo.

4.5.0) ELETROEROSÃO

A eletroerosão é o mais moderno e avançado processo de fabricação de matrizes e estampos de conformação existentes hoje em dia. Emprega-se uma máquina de eletroerosão dividida em três partes principais: o gerador de tensão, o porta-dielétrico e a parte mecânica.

A técnica é relativamente simples e baseia-se no fato da fusão da superfície do material da peça em bruto por descarga elétrica localizada e de alta intensidade. O material da ferramenta funciona como um eletrodo e o porta-dielétrico fixa em sua extremidade uma peça, geralmente de cobre, com a geometria oposta à da cavidade de impressão, que funciona como o outro eletrodo. No gerador de tensão é

criada alternadamente uma voltagem altíssima que é transmitida à peça fixa no porta-eletrodo, provocando uma DDP em intervalos determinados de tempo entre esta e a superfície do material, distâncias entre si de 0,01 mm a 0,5 mm. Isto provoca uma descarga elétrica de alta intensidade nesta região e a energia liberada é suficiente para fundir e evaporar uma pequena camada de material na superfície da ferramenta. Ambos os eletrodos estão imersos em um meio dielétrico aquoso que propicia, tanto a descarga elétrica, quanto a retina do material fundido durante o processo, evitando sua deposição em uma superfície não desejada.

Um outro processo conhecido, porém ainda pouco empregado no Brasil, é a eletroerosão a frio. Neste caso o porta-dielétrico é substituído por um rolo de fio de cobre e um braço mecânico. Neste equipamento, a peça como eletrodo é substituída pelo fio e o formato da impressão é dado pelo deslocamento automático do braço mecânico. Este se movimenta em função de um programa introduzido na máquina, contendo toda a geometria da cavidade. O fio, a medida que vai sendo utilizado, é rebobinado em um carretel e não pode ser reutilizado devido à impregnação de partículas do material da ferramenta e pelo seu desgaste propriamente dito.

Existe neste tipo de máquina um sensor capaz de avisar o sistema quando se deve trocar o rolo de alimentação. Uma vantagem deste equipamento é que as matrizes e estampos são produzidos sempre com as medidas de projeto, o que não

acontece com a eletroerosão convencional em consequência do contínuo desgaste da peça durante o processo.

Comparativamente à fabricação por usinagem e por conformação, a eletroerosão exige um investimento inicial mais elevado em função da sofisticação dos equipamentos, mas compensador em relação a qualidade da ferramenta e a quantidade capaz de ser produzida, o que torna atrativa na maioria dos casos.

CAPÍTULO

5

Máquinas para Forjamento

5) MÁQUINAS PARA FORJAMENTO

Este capítulo destina-se a apresentar os tipos de máquinas existentes para o forjamento quanto as suas características construtivas e de trabalho. A partir do qual fornece informações necessárias para a seleção adequada ao forjamento que se pretende realizar.

5.1) TIPOS DE MÁQUINAS:

5.1.A) MARTELOS DE FORJAR

Os martelos de forjar são muito usados tanto no forjamento livre, como no forjamento em matriz fechada. Em ambos os casos, devido a características construtivas da máquina, a operação de conformação é de impacto rápido. Isto ocorre pela queda do urso, com a ferramenta superior, sobre a ferramenta inferior que contém o material a forjar e permanece parada e apoiada na mesa. Os martelos de forjar subdividem-se em martelos de queda livre e martelo de arço.

Nos primeiros, um par de tambores de atrito, sendo um motor e outro livre, suspendem o urso através da passagem de uma táboa ou fita de lona entre eles, mantendo-o a uma determinada altura regulada pelo operador. Este por sua vez acionando um pedal destrava o sistema, provocando a queda da ferramenta e o seu retorno à condição inicial. O operador

pode, no entanto, mantendo o pedal pracionado, provocar sucessivas quedas da ferramenta. Esta técnica permite a troca rápida do material a forjar de uma cavidade de impressão a outra ou o seu manuseio no caso de forjamento livre, sem a necessidade de parar a máquina. Uma derivação no acionamento de martelos de queda livre possui, ao invés de raios de atrito, um êmbolo e uma haste funcionando como pistão, cuja extremidade fixa-se o unco. Uma linha de ar comprimido ou vapor supre a cavidade inferior do êmbolo, provocando a elevação da ferramenta superior, a qual permanece erguida pela abertura e fechamento de válvulas. Aqui também o operador, através de um pedal, provoca a queda da ferramenta de modo que ela complete um ciclo, analogamente ao caso anterior. Na figura 111 podemos observar um martelo de queda livre acionado por tambores de atrito.

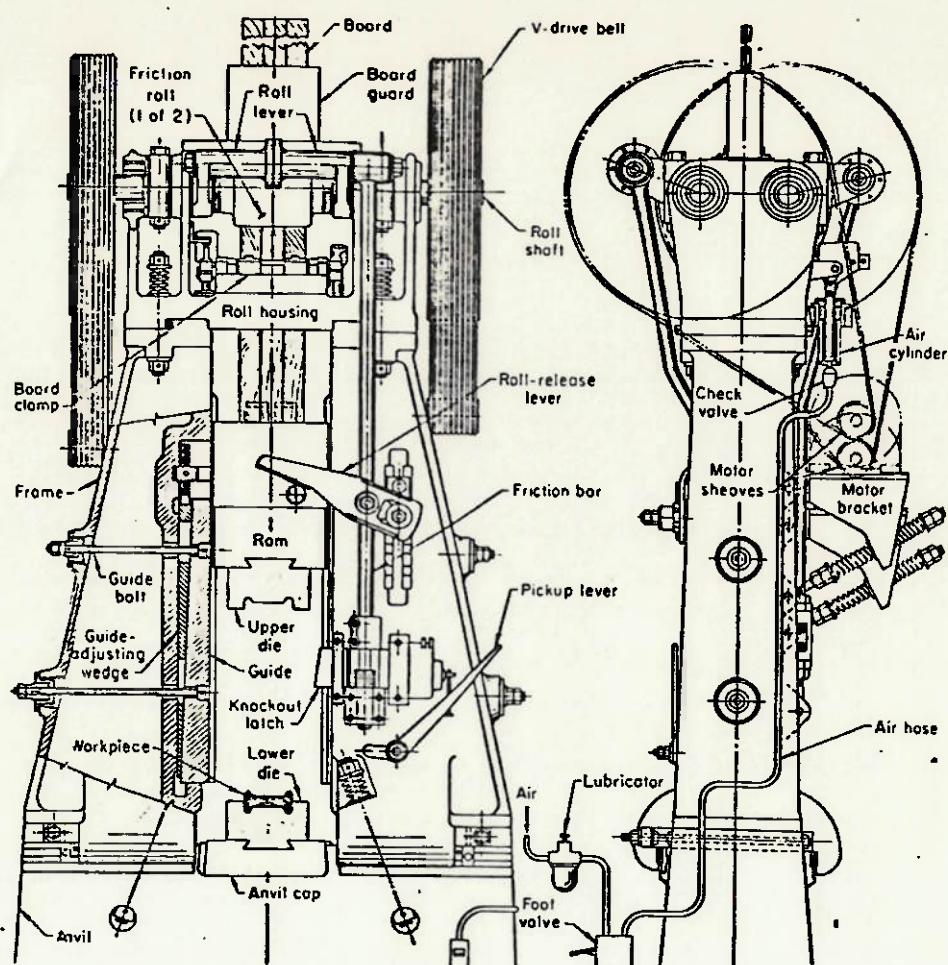


FIGURA 111) Martelo de queda livre acionado por tambores de atrito.

Já os martelos de ação diferem pelo fato da força de conformação ser suprida por um sistema de ar comprimido ou vapor ao invés da queda de uma massa imposta pela gravidade, como nos martelos de queda livre. Este tipo de equipamento é utilizado quase exclusivamente no forjamento em matriz fechada para peças de maiores dimensões e também para grandes produções. O operador possui o controle completo do equipamento, podendo regular a força de compressão e o número de quedas pela abertura e fechamento de válvulas acionadas por pedais ou alavancas manuais. Uma desvantagem

deste equipamento é a energia perdida durante a conformação, pois de 15% a 25% da energia cinética dissipada deve ser absorvida pela mesa e fundações, já que efetivamente não é aproveitada para a conformação, principalmente quando a deformação da peça de trabalho por golpe é pequena. Pode-se atingir então altas tensões na mesa, provocando sua quebra, além de forte vibração nas imediações da máquina. Isto exige uma análise mais rigorosa e a utilização de materiais absorvedores na fundação.

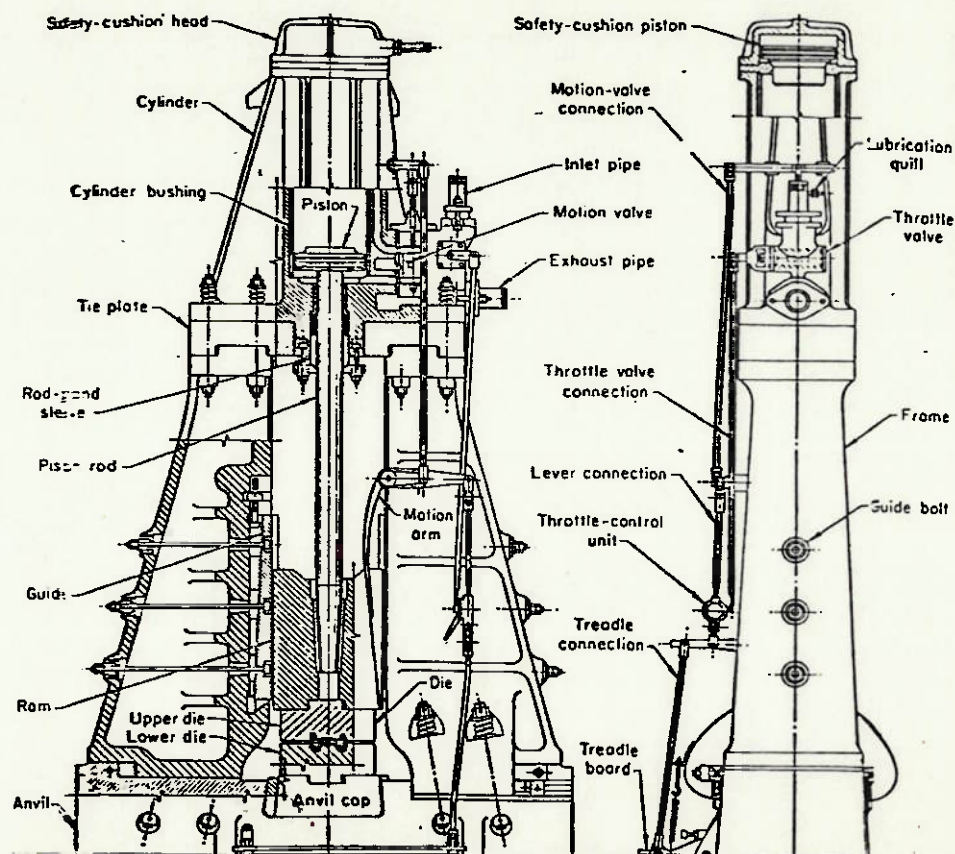
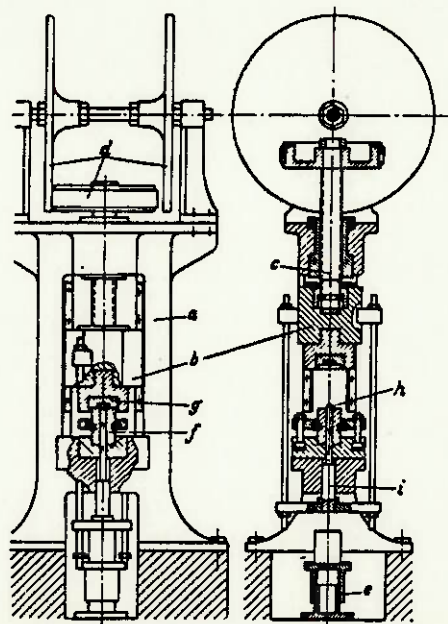


FIGURA 112: Martelo de vapor.

5.1.B) PRENSAS DE FRICÇÃO

As prensas de fricção possuem um eixo árvore rosqueado ao longo de seu comprimento útil de trabalho e cuja extremidade fixa-se o curso através de um mancal de rolamento. Esta construção possibilita o deslocamento vertical, guiado por uma porca, do conjunto eixo-ferramenta. O acionamento é provocado mecanicamente por um disco de fricção, solidário a outra extremidade do eixo árvore, e um eixo motor contendo outros dois discos disposto perpendicularmente ao primeiro, como indica a figura 113.



A la izquierda: Vista frontal (posición de trabajo: recalcado)

A la derecha: Vista lateral (posición de trabajo: expulsión de la pieza)

- a Bastidor
- b Mazo
- c Husillo
- d Discos de fricción
- e Casquillo de regulación
- f Matriz
- g Estampa de recalco (conformador de la cabeza)
- h Expulsor
- i

FIGURA 113: Prensa de fricção de três discos.

O movimento de descida ou subida dá-se pelo deslocamento axial dos discos motores sobre o seu eixo, tocando ora um ora outro no disco de fricção, que funciona também como um volante. O conjunto é acelerado e armazena energia cinética responsável pela deformação do material ou corte, caso se trate de rebarbação, pela sua dissipação durante o impacto. Existe uma relação entre a velocidade de conformação com a energia de deformação para as prensas de fricção. Para a deformação de um determinado material que necessita de um valor de energia fixo, pode-se utilizar um volante maior causando menor velocidade de deformação ou utilizar-se um volante pequeno que atingirá uma rotação maior e conseqüentemente maior velocidade de deformação.

Devido a inércia do disco de fricção no ponto morto inferior, este não é capaz de absorver imediatamente a energia cinética do disco motor de retorno pela alta velocidade periférica deste na extremidade, ocorrendo um deslizamento relativo entre ambos, responsável por uma perda de energia e um desgaste no revestimento de couro que o envolve. Para evitar este inconveniente, surgiram as prensas de quatro discos, como indicado na figura 114.

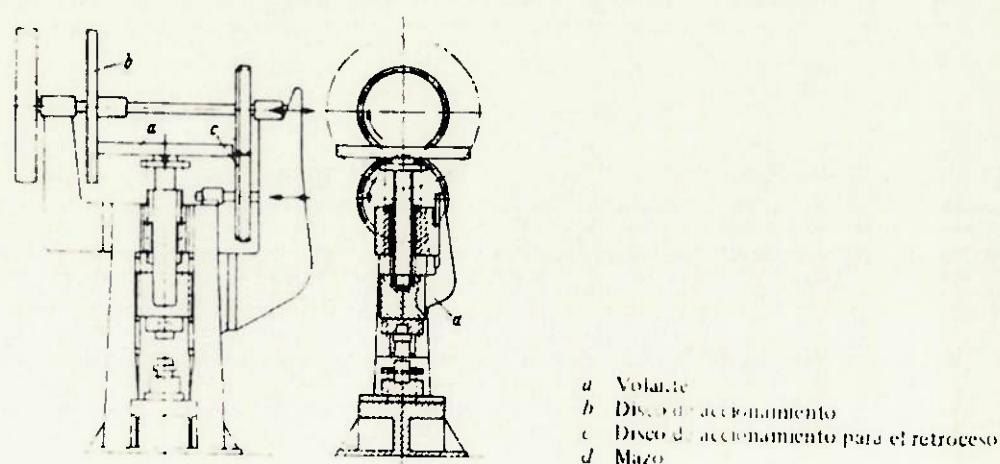


FIGURA 114: Prensa de fricção de quatro discos.

Nas prensas de quatro discos o retorno subdivide-se em duas fases. Inicia-se pelo encosto do volante próximo ao centro do disco inferior que possui, obviamente, uma velocidade periférica bem menor em relação ao caso anterior, provocando uma aceleração mais regular e diminuindo sensivelmente as perdas por atrito. A segunda fase ocorre pela mudança de contato para o disco superior que gira no sentido oposto ao inferior, induzindo uma desaceleração gradativa no disco de fricção até este atingir a posição de ponto morto superior, onde é travado.

O operador através de alavancas controla a quantidade de golpes, podendo fazê-lo contínuo ou intercalado no tempo que lhe convém.

5.1.01 PRENSAS EXCÊNTRICAS

As prensas excêntricas são muito utilizadas na operação de forjamento devido ao alto rendimento quantitativo e as suas diversas dimensões. Isto permite a confecção dos mais variados tipos de peças, desde a conformação de pré-formas, até a obtenção do produto final desbarbado, sempre de peças de médio e pequeno tamanho de alta produtividade.

Um motor elétrico aciona, através de polias e correias, um eixo motor que contém um volante de inércia e uma engrenagem pinhão a qual permanece parada graças a uma bucha, permitindo a rotação livre do eixo. O pinhão é conectado a uma outra engrenagem solidária ao eixo excêntrico. Para este último girar, é necessário que um sistema de acoplamento tipo embreagem ou mecânico, com chavetas de engate meia-lua, comes e molas de acionamento e retorno, atue no pinhão, conectando-o ao eixo motor. Durante a conformação, a energia armazenada no volante é cedida possibilitando o trabalho requerido durante o forjamento. Como as outras máquinas, após completado o ciclo, esta volta à condição inicial só executando outra operação se acionada pelo operador.

O eixo excêntrico pode conter uma ou duas bielas ligadas ao curso. Todo o conjunto exerce a maior carga no ponto morto inferior, sendo uma característica adequada de

estabilidade. Na figura 115 observe-se em corte este tipo de prensa, dependendo de uma ou duas bielas.

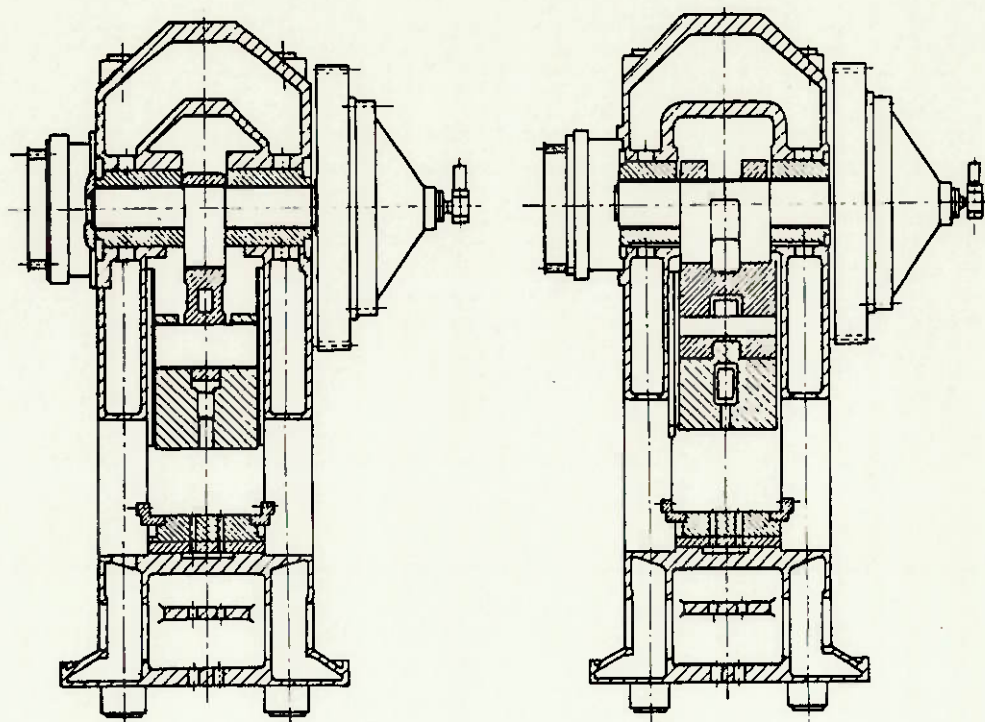


FIGURA 115: Pressas excêntricas de uma e duas bielas respectivamente.

5.1.2) PRENSAS HIDRÁULICAS

Utilizadas na conformação de peças de maiores dimensões, as prensas hidráulicas são de grande porte. A força de deformação é obtida pelo sistema hidráulico, onde por intermédio de uma bomba transfere-se óleo do reservatório para a região superior do êmbolo do pistão. A pressão hidrostática é capaz de fornecer uma força de conformação uniforme, além de baixas velocidades de

trabalho, o que facilita o escoamento do material pela cavidade de deformação. O retorno do pistão é dado invertendo-se o fluxo do óleo que preenche agora a região inferior do êmbolo, sendo todo o controle realizado por eletro-válvulas.

As principais vantagens das prensas hidráulicas são a capacidade de controle da pressão de trabalho, a possibilidade de alteração da velocidade de deformação durante a operação e a maior vida útil da ferramenta devido a diminuição do impacto, se comparado com outras máquinas.

Por outro lado, o custo inicial do equipamento é maior do que os martelos e as prensas apresentadas. Além disso, ocorre um tempo de contato entre o material e a ferramenta mais elevado, aumentando as perdas de calor, no caso de forjamento a quente, capaz de provocar uma queda maior na temperatura de conformação. Na figura 116 tem-se esquematicamente uma prensa hidráulica.

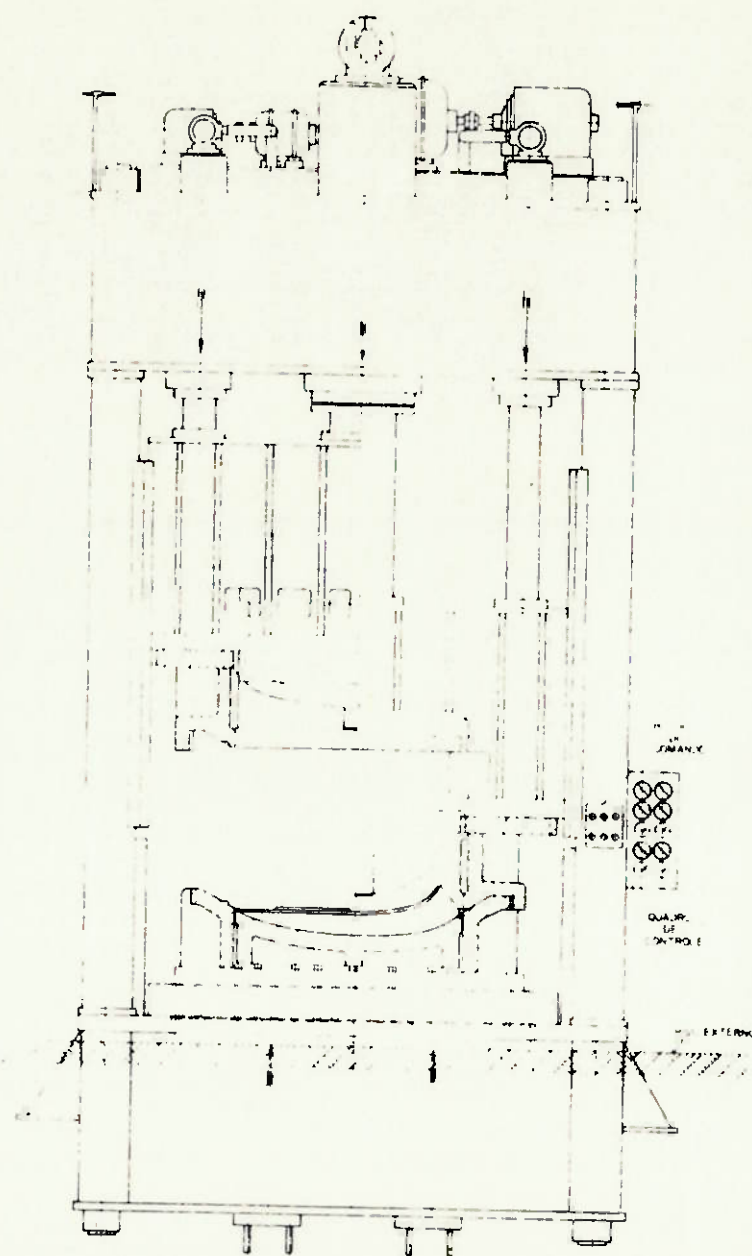


FIGURA 116: Prensa hidráulica.

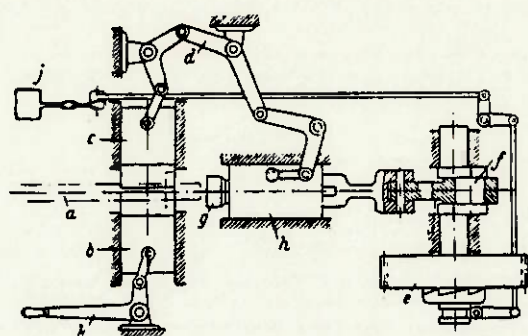
5.1.5) PRENSAS RECALCADORAS HORIZONTAIS

Este tipo de máquina assemelha-se a prensas excêntricas, pois são acionadas por um excêntrico, porém no sentido horizontal. Neste caso, a ferramenta também é bipartida, ficando uma presa à extremidade da máquina e outra na extremidade da biela (ver figura 117).

A peça antes de ser conformada fica sujeita por um par de mordidas que exercem uma pressão tão grande quanto a de conformação. Dependendo do tamanho da máquina, a carga varia em torno de 80Mp a 3150Mp.

Uma característica destas máquinas é o grau de repetibilidade, chegado a 75 golpes por minuto para máquinas pequenas e 20 golpes por minutos para máquinas maiores.

O equipamento é acionado por um motor elétrico que transmite a potência, em forma de rotação, por meio de um conjunto polia-correia e um conjunto de redução formado por pares de engrenagens a qual um deles liga-se ao volante de inércia. O operador através de comandos manuais (alavanca ou pedais) dispara o excêntrico que executa um ciclo retornando a posição inicial. Aqui o tipo de mecanismo de disparo também segue a mesma forma construtiva daqueles citados no item 5.1.C.



- a* Material de partida
- b* Mordaza de sujeción derecha (casi siempre fija; para sacar piezas grandes puede moverse con la palanca manual *k*)
- c* Mordaza de sujeción izquierda móvil
- d* Sistema de palanca acodada
- e* Volante con embrague
- f* Cigüeñal
- g* Estampa para recalcar
- h* Carro de recalcar
- j* Pedal para accionar el embrague
- k* Palanca manual para accionar la mordaza de sujeción derecha.

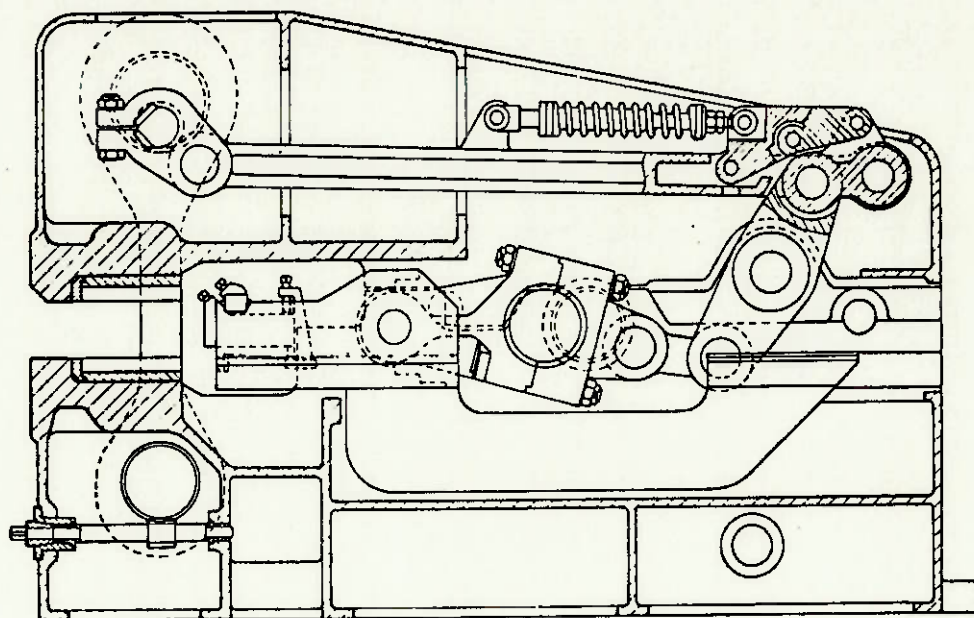


FIGURA 117: Recalcadora horizontal.

5.2) SELEÇÃO E ESPECIFICAÇÃO:

A seleção e especificação de uma máquina para forjamento depende do tipo de trabalho que se executar e das características do forjado, tanto geométricas, quanto dimensionais. O tipo de trabalho associa-se com a relação de

menor trabalhabilidade do metal, principalmente se este é susceptível ou não a fraturas para grandes deformações. Nesta situação dá-se preferência para máquinas de baixa velocidade de deformação, como prensas hidráulicas.

Por outro lado, costuma-se fazer especificação baseada no custo-quantidade de produção e máquinas disponíveis, desde que o forjado esteja dentro das condições usuais, isto é: dimensões não muito grandes ou pequenas e campos de tolerâncias normais. Por este método, a primeira limitação está no tipo de máquina que se dispõe na fábrica, vindo em seguida a quantidade estipulada do produto envolvendo uma série de fatores como: desgaste da ferramenta, custo-hora máquina do equipamento e custo de mão-de-obra. Em função da quantidade e do custo de operação, escolhe-se o equipamento mais adequado, desde que ele seja capaz de fornecer as quantidades de força e energia necessárias.

Em linhas gerais as prensas mecânicas são preferidas no caso de grandes produções, principalmente devido a racionalização do trabalho, pois consegue-se através de impressões sucessivas maior produção com poucos impactos, reduzindo substancialmente o tempo de operação.

A seleção de uma máquina deve obedecer as recomendações dos fabricantes quanto aos seus dados de catálogo. Evita-se com isto sobrecargas no equipamento, reduzindo drasticamente sua vida útil e comprometendo sua operação. Pretende-se ainda otimizar o seu aproveitamento, a fim de obter-se o máximo rendimento, ou seja, que ele trabalhe nas condições

nominais para que não se tenha custo adicional pela sua capacidade ociosa.

Existem inúmeros fabricantes de prensas, martelos e retificadoras, possibilitando um universo grande para escolha de máquinas adequadas na implantação de uma linha de produção. Se, no entanto, o investimento na aquisição de equipamentos não é viável economicamente, a escolha pelos mesmos motivos expostos anteriormente, deve ser feita em vista das capacidades nominais das máquinas disponíveis.

APÊNDICES

APÊNDICE

A

Material	Material history	Strain rate Inch./in.	Strain	ε	σ	ε	σ	ε	σ	ε	σ	ε	σ	ε	σ
Test temperature, F (C):															
72 (22)															
0.115															
2.66															
Lead	99.98 Pb, 0.003 Cu, 0.003 Fe, 0.002 Zn, 0.002 Ag			230 (110)	415 (215)	500 (260)	570 (300)								
				1.56 0.065	0.70 0.130	0.47 0.160	0.40 0.180								
				1.47 0.100	0.55 0.135	0.36 0.180	0.28 0.225								
Test temperature, F (C):															
390 (200)															
0.1-1.0															
Magnesium	Extruded, cold drawn 15%, annealed 550 C 90 min			570 (300)	930 (400)										
				9.8 0.215	1.7 0.337										
				8.4 0.211	1.7 0.302										
				8.3 0.152	2.1 0.210										
Rem Mg															
Test temperature, F (C):															
1975 (1040)															
26.6 0.21															
U-700				2030 (1166)											
Test temperature, F (C):															
68 (20)															
0.25-16.0															
Zirconium	Annealed 15 min at 1780 F in high vacuum			392 (200)	752 (400)	1472 (800)	1652 (900)	1832 (1000)							
				74.0 0.052	23.8 0.069	16.8 0.069	6.8 0.227	4.6 0.301							
				92.2 0.058											
				105.1 0.046	29.4 0.09	18.2 0.116	7.1 0.352	4.0 0.387							
				112.8 0.041	31.3 0.089	18.8 0.118	7.2 0.264	4.0 0.387							
				118.5 0.042											
					32.0 0.081	19.4 0.101	6.9 0.252	4.1 0.403							
					32.1 0.085	19.7 0.108	6.9 0.252	4.1 0.403							
Zircaloy 2	Annealed 15 min at 1780 F in high vacuum				30.4 0.049	16.6 0.147	7.5 0.325	3.9 0.162							
					67.9 0.056										
					73.5 0.056	37.8 0.053	18.7 0.172	7.8 0.142	4.0 0.387						
					77.3 0.057										
					79.9 0.055	39.2 0.059	18.8 0.178	7.2 0.187	4.0 0.387						
					40.4 0.057	18.8 0.178	7.9 0.142	4.8 0.333							
					40.7 0.053	18.8 0.178	8.5 0.110	4.8 0.333							
Test temperature, F (C):															
68 (20)															
0.25-16.0															
Uranium	Annealed 2 hr at 1110 F in high vacuum			212 (100)	572 (300)	932 (500)	1292 (900)	1652 (1000)							
				113.0 0.042	45.9 0.044	31.9 0.051	16.0 0.081	4.5 0.069							
				132.7 0.049	53.3 0.047	33.1 0.059	16.1 0.049	4.5 0.069							
				143.1 0.047	56.0 0.056	33.4 0.054	16.1 0.049	4.5 0.069							
				149.5 0.048	59.0 0.056	32.5 0.055	16.4 0.097	4.5 0.069							

VALORES DE (C) E (m) PARA DIVERSOS MATERIALES.

Steel	Material history	Strain rate range, 1/s	Strain	Strain											
				0.2		0.5		1		2		5		10	
				F (°C)		F (°C)		F (°C)		F (°C)		F (°C)		F (°C)	
				m		m		m		m		m		m	
				C		C		C		C		C		C	
				°		°		°		°		°		°	
				°		°		°		°		°		°	
				°		°		°		°		°		°	
				°		°		°		°		°		°	
				°		°		°		°		°		°	
				°		°		°		°		°		°	
				°		°		°		°		°		°	
				°		°		°		°		°		°	
				°		°		°		°		°		°	
				°		°		°		°		°		°	
				°		°		°		°		°		°	
				°		°		°		°		°		°	
				°		°		°		°		°		°	
				°		°		°		°		°		°	
				°		°		°		°		°		°	
				°		°		°		°		°		°	
				°		°		°		°		°		°	
				°		°		°		°		°		°	
				°		°		°		°		°		°	
				°		°		°		°		°		°	
				°		°		°		°		°		°	
				°		°		°		°		°		°	
				°		°		°		°		°		°	
				°		°		°		°		°		°	
				°		°		°		°		°		°	
				°		°		°		°		°		°	
				°		°		°		°		°		°	
				°		°		°		°		°		°	
				°		°		°		°		°		°	
				°		°		°		°		°		°	
				°		°		°		°		°		°	
				°		°		°		°		°		°	
				°		°		°		°		°		°	
				°		°		°		°		°		°	
				°		°		°		°		°		°	
				°		°		°		°		°		°	
				°		°		°		°		°		°	
				°		°		°		°		°		°	
				°		°		°		°		°		°	
				°		°		°		°		°		°	
				°		°		°		°		°		°	
				°		°		°		°		°		°	
				°		°		°		°		°		°	
				°		°		°		°		°		°	
				°		°		°		°		°		°	
				°		°		°		°		°		°	
				°		°		°		°		°		°	
				°		°		°		°		°		°	
				°		°		°		°		°		°	
				°		°		°		°		°		°	
				°		°		°		°		°		°	
				°		°		°		°		°		°	
				°		°		°		°		°		°	
				°		°		°		°		°		°	
				°		°		°		°		°		°	
				°		°		°		°		°		°	
				°		°		°		°		°		°	
				°		°		°		°		°		°	
				°		°		°		°		°		°	
				°		°		°		°		°		°	
				°		°		°		°		°		°	
				°		°		°		°		°		°	
				°		°		°		°		°		°	
				°		°		°		°		°		°	
				°		°		°							

VALORES DE (C) E (m) PARA ACOS (continuacão).

1080(a) 0.56 C, 0.26 Si, 0.28 Mn, 0.014 S, 0.013 P, 0.12 Cr, 0.03 Ni	Hot rolled, annealed	Test temperature, F (C): 15-100	1650 (900) 18.5 0.127 23.3 0.114 23.3 0.118 21.3 0.132 16.2 0.128 18.3 0.127 21.8 0.119 23.3 0.114 21.7 0.112 23.6 0.110 22.8 0.129 21.3 0.129 19.3 0.146 21.9 0.133 21.8 0.130 21.0 0.128	1830 (1000) 13.3 0.143 16.9 0.123 16.4 0.139 14.9 0.161 10.4 0.193 8.7 0.161 10.1 0.149 12.1 0.126 12.8 0.132 12.5 0.146 12.7 0.143 11.7 0.169 10.7 0.181 9.8 0.159 11.7 0.147 10.6 0.176 9.7 0.191	2010 (1100) 10.1 0.147 12.6 0.135 12.0 0.154 10.4 0.193 8.7 0.161 10.1 0.149 12.1 0.126 12.8 0.132 12.5 0.146 12.7 0.143 11.7 0.169 10.7 0.181 9.8 0.159 11.7 0.147 10.6 0.176 9.7 0.191	2190 (1200) 7.4 0.172 8.9 0.154 8.6 0.180 7.8 0.207 6.5 0.190 7.5 0.165 8.5 0.157 8.8 0.164 8.8 0.171 8.7 0.176 8.4 0.189 7.8 0.201 7.1 0.181 8.0 0.183 7.3 0.209 6.5 0.232	2190 (1200) 7.6 0.116 8.6 0.122 8.8 0.141 5.3 0.173 7.5 0.196
1095(a) 1.00 C, 0.19 Si, 0.17 Mn, 0.027 S, 0.023 P, 0.10 Cr, 0.09 Ni	Hot rolled, annealed	Test temperature, F (C): 15-100	1705 (930) 16.3 0.084 19.4 0.081 20.4 0.084 20.9 0.099 20.9 0.105	1830 (1000) 13.0 0.108 15.6 0.100 17.3 0.090 18.0 0.093 16.9 0.122	2010 (1100) 9.4 0.159 11.5 0.121 13.5 0.100 14.4 0.105 14.5 0.112 14.4 0.112 14.2 0.122 13.9 0.126 12.1 0.115 15.0 0.111 15.7 0.112 15.5 0.122 11.8 0.152 14.3 0.140 13.8 0.154 11.8 0.179 8.2 0.175 9.5 0.164 11.4 0.141 11.7 0.142	2075 (1135) 2075 (1135) 9.1 0.121 10.5 0.129 11.2 0.138 11.0 0.159 9.9 0.194	2190 (1200) 7.6 0.116 8.6 0.122 8.8 0.141 5.3 0.173 7.5 0.196
1115 0.17 C, 0.153 Si, 0.62 Mn, 0.054 S, 0.012 P	Hot rolled, as received	Test temperature, F (C): 4-231	1650 (900) 16.6 0.102 19.9 0.091 23.0 0.094 24.9 0.092 26.0 0.098 25.9 0.091 25.9 0.094 25.5 0.099 22.1 0.080 28.1 0.077 29.2 0.075 28.1 0.080 22.9 0.109 28.2 0.101 27.8 0.104 25.8 0.112 16.1 0.155 18.6 0.145 20.9 0.135 21.8 0.135	1830 (1000) 12.2 0.125 14.8 0.111 17.6 0.094 19.1 0.093 19.6 0.100 19.6 0.105 19.5 0.105 19.2 0.107 16.6 0.109 20.8 0.098 21.8 0.096 21.3 0.102 17.1 0.106 20.4 0.106 20.0 0.120 18.2 0.146 12.4 0.155 14.1 0.142 15.9 0.131 16.6 0.134	2010 (1100) 9.4 0.159 11.5 0.121 13.5 0.100 14.4 0.105 14.5 0.112 14.4 0.112 14.2 0.122 13.9 0.126 12.1 0.115 15.0 0.111 15.7 0.112 15.5 0.122 11.8 0.152 14.3 0.140 13.8 0.154 11.8 0.179 8.2 0.175 9.5 0.164 11.4 0.141 11.7 0.142	2190 (1200) 7.4 0.161 8.1 0.149 9.4 0.139 10.2 0.130 10.4 0.139 10.1 0.147 9.7 0.159 9.2 0.165 8.2 0.165 10.7 0.139 11.3 0.135 11.3 0.133 8.5 0.168 10.1 0.162 9.1 0.193 7.5 0.235 6.3 0.199 6.8 0.191 8.1 0.167 8.0 0.174	
Alloy steel 0.35 C, 0.27 Si, 1.49 Mn, 0.041 S, 0.037 P, 0.03 Cr, 0.11 Ni, 0.28 Mo		Test temperature, F (C): 15-100	1650 (900) 16.6 0.102 19.9 0.091 23.0 0.094 24.9 0.092 26.0 0.098 25.9 0.091 25.9 0.094 25.5 0.099 22.1 0.080 28.1 0.077 29.2 0.075 28.1 0.080 22.9 0.109 28.2 0.101 27.8 0.104 25.8 0.112 16.1 0.155 18.6 0.145 20.9 0.135 21.8 0.135	1830 (1000) 12.2 0.125 14.8 0.111 17.6 0.094 19.1 0.093 19.6 0.100 19.6 0.105 19.5 0.105 19.2 0.107 16.6 0.109 20.8 0.098 21.8 0.096 21.3 0.102 17.1 0.106 20.4 0.106 20.0 0.120 18.2 0.146 12.4 0.155 14.1 0.142 15.9 0.131 16.6 0.134	2010 (1100) 9.4 0.159 11.5 0.121 13.5 0.100 14.4 0.105 14.5 0.112 14.4 0.112 14.2 0.122 13.9 0.126 12.1 0.115 15.0 0.111 15.7 0.112 15.5 0.122 11.8 0.152 14.3 0.140 13.8 0.154 11.8 0.179 8.2 0.175 9.5 0.164 11.4 0.141 11.7 0.142	2190 (1200) 7.4 0.161 8.1 0.149 9.4 0.139 10.2 0.130 10.4 0.139 10.1 0.147 9.7 0.159 9.2 0.165 8.2 0.165 10.7 0.139 11.3 0.135 11.3 0.133 8.5 0.168 10.1 0.162 9.1 0.193 7.5 0.235 6.3 0.199 6.8 0.191 8.1 0.167 8.0 0.174	
4137(a) 0.35 C, 0.27 Si, 0.66 Mn, 0.023 S, 0.029 P, 0.59 Cr, 2.45 Ni, 0.59 Mo	Hot rolled, annealed	Test temperature, F (C): 15-100	1650 (900) 16.6 0.102 19.9 0.091 23.0 0.094 24.9 0.092 26.0 0.098 25.9 0.091 25.9 0.094 25.5 0.099 22.1 0.080 28.1 0.077 29.2 0.075 28.1 0.080 22.9 0.109 28.2 0.101 27.8 0.104 25.8 0.112 16.1 0.155 18.6 0.145 20.9 0.135 21.8 0.135	1830 (1000) 12.2 0.125 14.8 0.111 17.6 0.094 19.1 0.093 19.6 0.100 19.6 0.105 19.5 0.105 19.2 0.107 16.6 0.109 20.8 0.098 21.8 0.096 21.3 0.102 17.1 0.106 20.4 0.106 20.0 0.120 18.2 0.146 12.4 0.155 14.1 0.142 15.9 0.131 16.6 0.134	2010 (1100) 9.4 0.159 11.5 0.121 13.5 0.100 14.4 0.105 14.5 0.112 14.4 0.112 14.2 0.122 13.9 0.126 12.1 0.115 15.0 0.111 15.7 0.112 15.5 0.122 11.8 0.152 14.3 0.140 13.8 0.154 11.8 0.179 8.2 0.175 9.5 0.164 11.4 0.141 11.7 0.142	2190 (1200) 7.4 0.161 8.1 0.149 9.4 0.139 10.2 0.130 10.4 0.139 10.1 0.147 9.7 0.159 9.2 0.165 8.2 0.165 10.7 0.139 11.3 0.135 11.3 0.133 8.5 0.168 10.1 0.162 9.1 0.193 7.5 0.235 6.3 0.199 6.8 0.191 8.1 0.167 8.0 0.174	
50100(a) 0.61 C, 1.58 Si, 0.94 Mn, 0.038 S, 0.035 P, 0.12 Cr, 0.27 Ni, 0.06 Mo	Hot rolled, annealed	Test temperature, F (C): 15-100	1650 (900) 16.6 0.102 19.9 0.091 23.0 0.094 24.9 0.092 26.0 0.098 25.9 0.091 25.9 0.094 25.5 0.099 22.1 0.080 28.1 0.077 29.2 0.075 28.1 0.080 22.9 0.109 28.2 0.101 27.8 0.104 25.8 0.112 16.1 0.155 18.6 0.145 20.9 0.135 21.8 0.135	1830 (1000) 12.2 0.125 14.8 0.111 17.6 0.094 19.1 0.093 19.6 0.100 19.6 0.105 19.5 0.105 19.2 0.107 16.6 0.109 20.8 0.098 21.8 0.096 21.3 0.102 17.1 0.106 20.4 0.106 20.0 0.120 18.2 0.146 12.4 0.155 14.1 0.142 15.9 0.131 16.6 0.134	2010 (1100) 9.4 0.159 11.5 0.121 13.5 0.100 14.4 0.105 14.5 0.112 14.4 0.112 14.2 0.122 13.9 0.126 12.1 0.115 15.0 0.111 15.7 0.112 15.5 0.122 11.8 0.152 14.3 0.140 13.8 0.154 11.8 0.179 8.2 0.175 9.5 0.164 11.4 0.141 11.7 0.142	2190 (1200) 7.4 0.161 8.1 0.149 9.4 0.139 10.2 0.130 10.4 0.139 10.1 0.147 9.7 0.159 9.2 0.165 8.2 0.165 10.7 0.139 11.3 0.135 11.3 0.133 8.5 0.168 10.1 0.162 9.1 0.193 7.5 0.235 6.3 0.199 6.8 0.191 8.1 0.167 8.0 0.174	

Steel	Material history	Strain rate range, 1/s	Strain	ϵ	m	ϵ'	m	ϵ'	m	ϵ	m	ϵ'	m	ϵ	m	ϵ'	m
50100(a), continued																	
1.00 C, 0.19 Si, 0.17 Mn,			0.10	23.0	0.134	16.8	0.134	16.8	0.134	11.2	0.155	8.4	0.164				
0.027 S, 0.023 P, 0.10 Cr,			0.50	21.5	0.111	15.6	0.150	11.1	0.158	7.4	0.190						
0.09 Ni			0.60	21.3	0.132	14.6	0.163	10.0	0.184	6.7	0.212						
52100			0.70	20.9	0.131	13.5	0.176	9.7	0.183	6.7	0.230						
Hot rolled,		1.5-100	0.10	20.9	0.123	14.3	0.146	9.5	0.169	6.7	0.203						
1.06 C, 0.22 Si, 0.46 Mn,			0.30	25.5	0.107	17.7	0.127	12.0	0.143	8.3	0.171						
0.019 S, 0.031 P, 1.41 Cr,			0.50	25.9	0.107	17.7	0.129	12.3	0.143	8.3	0.178						
0.17 Ni			0.70	23.3	0.131	16.8	0.131	12.0	0.146	7.7	0.192						
Test temperature, F(C):																	
Mn-Si steel			0.05	19.2	0.117	14.8	0.119	9.7	0.172	7.5	0.181						
0.61 C, 1.58 Si, 0.94 Mn,			0.10	22.6	0.112	17.1	0.108	11.8	0.151	8.7	0.166						
0.038 S, 0.035 P, 0.12 Cr,			0.20	25.7	0.108	19.5	0.101	13.5	0.139	9.7	0.180						
0.27 Ni, 0.06 Mo			0.30	27.6	0.108	20.5	0.109	14.8	0.126	10.0	0.161						
			0.40	27.6	0.114	20.2	0.114	14.4	0.141	9.5	0.179						
			0.50	27.2	0.113	19.8	0.125	14.1	0.144	9.1	0.183						
			0.60	26.0	0.121	18.8	0.137	12.8	0.162	8.2	0.209						
			0.70	24.7	0.130	17.8	0.152	11.9	0.178	7.5	0.224						
Cr-Si steel			0.05	19.9	0.118	23.9	0.104	15.1	0.167	10.0	0.206						
0.47 C, 3.74 Si, 0.58 Mn,			0.10	19.9	0.136	25.6	0.120	16.8	0.162	11.1	0.189						
8.20 Cr, 0.20 Ni			0.20	19.9	0.143	27.6	0.121	18.5	0.153	11.9	0.184						
			0.30	19.9	0.144	28.4	0.119	19.1	0.148	12.1	0.182						
			0.40	19.3	0.150	28.2	0.125	18.9	0.150	12.1	0.178						
			0.50	18.5	0.155	26.6	0.132	18.5	0.155	11.8	0.182						
			0.60	17.5	0.160	25.2	0.142	17.5	0.160	11.5	0.182						
			0.70	16.1	0.163	23.3	0.158	16.1	0.162	10.7	0.199						
D3(a)			0.10	39.2	0.087	29.0	0.108	21.0	0.123	14.6	0.121						
Hot rolled,		1.5-100	0.30	43.7	0.087	30.4	0.114	21.0	0.139	13.9	0.139						
annealed			0.50	39.7	0.101	27.1	0.125	18.4	0.155	12.2	0.124						
2.23 C, 0.43 Si, 0.37 Mn,			0.70	33.3	0.131	22.5	0.145	15.3	0.168	10.7	0.108						
13.10 Cr, 0.33 Ni																	

VALORES DE ϵ (C) E ϵ (m) PARA ACOS (continuación).

H-13 0.39 C, 1.02 Si, 0.60 Mn, 0.016 P, 0.020 S, 5.29 Cr, 0.04 Ni, 1.35 Mo, 0.027 N, 0.83 V		Test temperature, F (C): 230-906	1290 (700)	1510 (820)	1650 (900)	1830 (1000)
			19.1 0.232	10.2 0.305	6.0 0.373	4.8 0.374
			30.1 0.179	13.7 0.275	8.2 0.341	9.0 0.295
			31.0 0.179	15.1 0.265	10.8 0.305	11.6 0.267
		0.4	25.9 0.204	12.3 0.295	12.5 0.287	11.8 0.269
H-26(a) 0.80 C, 0.28 Si, 0.32 Mn, 4.30 Cr, 0.18 Ni, 0.55 Mo 18.40 W, 1.54 V	Hot rolled, annealed	Test temperature, F (C): 15-100	1650 (900)	1830 (1000)	2010 (1100)	2190 (1200)
			46.7 0.058	37.4 0.072	26.2 0.106	18.7 0.125
			49.6 0.075	38.1 0.087	26.0 0.121	18.3 0.140
			44.6 0.096	33.7 0.102	23.6 0.131	16.2 0.151
		0.70	39.1 0.115	27.9 0.124	20.1 0.149	13.8 0.162
301 SS(a) 0.08 C, 0.93 Si, 1.10 Mn, 0.009 P, 0.014 S, 16.99 Cr, 6.96 Ni, 0.31 Mo, 0.93 Al, 0.02 N, 0.063 Se	Hot rolled, annealed	Test temperature, F (C): 0.8-100	1110 (600)	1470 (800)	1830 (1000)	2190 (1200)
			26.5 0.147	10.5 0.051	16.3 0.117	7.6 0.161
			31.3 0.153	30.0 0.121	13.5 0.188	7.6 0.177
			17.5 0.270	45.4 0.063	16.8 0.161	6.6 0.192
		0.70	37.8 0.069			
302 SS 0.07 C, 0.71 Si, 1.07 Mn, 0.03 P, 0.005 S, 18.34 Cr, 9.56 Ni	Hot rolled, annealed	Test temperature, F (C): 310-460	26.5 0.147	25.1 0.129	11.0 0.206	4.6 0.281
			31.3 0.153	30.0 0.121	13.5 0.188	4.7 0.281
			17.5 0.270	45.4 0.063	16.8 0.161	4.1 0.310
302 SS 0.08 C, 0.49 Si, 1.06 Mn, 0.037 P, 0.005 S, 18.37 Cr, 9.16 Ni	Hot rolled, annealed	Test temperature, F (C): 0.2-30	52.2 0.031	36.6 0.042	23.1 0.040	12.8 0.082
			58.9 0.022	40.4 0.032	24.7 0.050	13.5 0.083
			63.2 0.020	41.9 0.030	24.9 0.053	13.5 0.091
			64.0 0.023	42.0 0.031	24.7 0.052	13.4 0.096
		0.70				
302 SS 0.07 C, 0.43 Si, 0.48 Mn, 18.60 Cr, 7.70 Ni		Test temperature, F (C): 15-100	1650 (900)	1830 (1000)	2010 (1100)	2190 (1200)
			24.6 0.023	16.8 0.079	13.7 0.093	9.7 0.139
			28.4 0.026	21.2 0.068	15.6 0.091	11.1 0.127
			33.6 0.031	25.2 0.067	18.1 0.089	12.5 0.120
		0.20	35.3 0.042	26.3 0.074	19.5 0.089	13.5 0.115
		0.30	35.3 0.042	26.3 0.074	19.5 0.089	14.2 0.110
		0.40	35.6 0.055	26.9 0.084	19.9 0.094	14.2 0.110
		0.50	35.6 0.060	27.0 0.093	19.6 0.098	14.2 0.115
		0.60	34.1 0.068	26.4 0.092	19.3 0.102	13.8 0.118
		0.70	33.6 0.072	25.7 0.102	18.9 0.108	13.9 0.120

VALORES DE (C) E (m) PARA AÇS (continuação).

Steel	Material history	Strain rate range 1/s	Strain	C	m	C	m	C	m	C	m	C	m
Test temperature, F (C):													
309 SS	Hot drawn, annealed	200-525	0.25	1110 (600)	1470 (800)	1830 (1000)	2190 (1200)	1650 (900)					
0.13 C, 0.42 Si, 1.30 Mn, 0.023 P, 0.008 S, 22.30 Cr, 12.99 Ni			0.40		39.4	0.079	8.7	0.141					
			0.60		45.1	0.074	9.6	0.174					
					48.1	0.076	9.5	0.185					
310 SS	Hot drawn, annealed	310-460	0.25	50.3	0.080	32.3	0.127	12.0	0.154				
0.12 C, 1.26 Si, 1.56 Mn, 0.01 P, 0.009 S, 25.49 Cr, 21.28 Ni			0.40	56.5	0.080	32.2	0.142	10.8	0.175				
			0.60	61.8	0.067	21.9	0.212	4.5	0.126				
316 SS	Hot drawn, annealed	310-460	0.25	13.5	0.263	22.2	0.149	6.4	0.317				
0.06 C, 0.52 Si, 1.40 Mn, 0.035 P, 0.005 S, 17.25 Cr, 12.23 Ni, 2.17 Mo			0.40	28.8	0.162	26.8	0.138	7.4	0.277				
			0.60	39.3	0.128	30.1	0.133	6.5	0.234				
403 SS	Hot rolled, annealed	0.8-100	0.25		26.3	0.079	15.4	0.125	7.3	0.157			
0.16 C, 0.37 Si, 0.44 Mn, 0.024 P, 0.007 S, 12.62 Cr			0.50		26.9	0.076	16.0	0.142	7.8	0.152			
			0.70		24.6	0.090	15.3	0.158	7.5	0.155			
SS	Hot rolled, annealed	0.8-100	0.25		28.7	0.082	17.2	0.082	11.9	0.079			
0.12 C, 0.12 Si, 0.29 Mn, 0.014 P, 0.016 S, 12.11 Cr, 0.50 Ni, 0.45 Mo			0.50		29.1	0.093	20.7	0.073	11.6	0.117			
			0.70		28.7	0.096	22.5	0.067	11.2	0.131			
SS	Hot rolled, annealed	3.5-30	0.25			19.5	0.099	8.9	0.128	28.3	0.114		
0.08 C, 0.45 Si, 0.43 Mn, 0.031 P, 0.005 S, 17.38 Cr, 0.31 Ni			0.50			22.3	0.097	9.5	0.115	31.9	0.105		
			0.70			23.2	0.098	9.2	0.158	37.1	0.107		
Maraging 300				1600 (870)	1700 (925)	1800 (980)	2000 (1095)	2100 (1155)					
				43.4	0.077	36.4	0.095	30.6	0.113	21.5	0.145	18.0	0.165
Maraging 300				2200 (1205)									
				12.8	0.185								

^a Approximate composition

VALORES DE (C) E (m) PARA AÇOS (continuação).

Alloy	Material history	Strain rate range 1/s	0.001	0.01	0.1	1	10	100	1000	10000
Super pure 99.98 Al, 0.0017 Cu, 0.0026 Si, 0.0033 Fe, 0.006 Mn	Cold rolled, annealed 1/2 h at 1110 F	Test temperature, F (C): 0.1311	390 (200)	570 (300)	750 (400)	930 (500)	1110 (600)			
			5.7 0.110	4.3 0.120	2.8 0.140	1.6 0.155	0.6 0.230			
			8.7 0.050	4.9 0.095	2.8 0.125	1.6 0.175	0.6 0.215			
Fe	Annealed 3h at 750 F	Test temperature, F (C): 0.25 63	165 (240)	645 (360)	825 (480)					
			10.9 0.086	5.9 0.141	3.4 0.161					
			12.3 0.069	6.3 0.146	3.3 0.169					
			13.1 0.067	6.4 0.147	3.2 0.173					
			13.8 0.064	6.7 0.135	3.4 0.161					
1100	Cold drawn, annealed	Test temperature, F (C): 0.25, 40	390 (200)	750 (400)	930 (500)					
			9.9 0.063	4.2 0.115	2.1 0.211					
			11.6 0.071	4.4 0.132	2.1 0.227					
			12.2 0.075	4.5 0.141	2.1 0.224					
1100a)	Extruded, an- nealed 1 h at 750 F	Test temperature, F (C): 4.40	300 (150)	480 (250)	660 (350)	840 (450)	1020 (550)			
			11.4 0.022	9.1 0.026	6.3 0.055	3.9 0.100	2.2 0.130			
			13.5 0.022	10.5 0.031	6.9 0.061	4.3 0.094	2.4 0.130			
			15.0 0.021	11.4 0.035	7.2 0.073	4.5 0.100	2.5 0.141			
			16.1 0.024	11.9 0.041	7.3 0.084	4.4 0.116	2.4 0.156			
			17.0 0.026	12.3 0.041	7.4 0.088	4.3 0.130	2.4 0.155			
2017	Cold drawn, annealed	Test temperature, F (C): 0.2 30	390 (200)	750 (400)	930 (500)					
			34.5 0.014	11.8 0.110	5.8 0.126					
			32.2 0.025	11.2 0.121	5.2 0.121					
			29.5 0.038	12.5 0.128	5.1 0.119					
2017ca)	Solution treated 1 h at 900 F, water quenched annealed 4 h at 750 F	Test temperature, F (C): 0.1311	570 (300)	660 (350)	750 (400)	840 (450)	930 (500)			
			10.8 0.095	9.1 0.100	7.5 0.110	6.2 0.145	5.1 0.155			
			10.0 0.100	9.2 0.100	7.7 0.080	6.8 0.090	4.6 0.155			

VALORES DE (C) E (m) PARA ALUMINIO E LIGAS.

Alloy	Material history	Strain rate range, 1/s	Strain	C	m	C	m	C	m	C	m
Test temperature, F (C):											
5052	Annealed 3 h at 790 F	0.25-63	0.20	14.3	0.038	8.9	0.067	5.6	0.125	825 (480)	
			0.40	15.9	0.035	9.3	0.071	5.3	0.130		
			0.60	16.8	0.035	9.0	0.068	5.1	0.134		
			0.80	17.5	0.038	9.4	0.068	5.6	0.125		
5056	Annealed 3 h at 790 F	0.25-63	0.20	42.6	-0.032	20.9	0.138	11.7	0.200		
			0.40	44.0	-0.032	20.8	0.138	10.5	0.205		
			0.60	44.9	-0.031	19.9	0.143	10.3	0.202		
			0.70	45.6	-0.034	20.3	0.144	10.3	0.203		
5083	Annealed 3 h at 790 F	0.25-63	0.20	43.6	-0.006	20.5	0.095	9.3	0.182		
			0.40	43.6	-0.001	19.7	0.108	8.3	0.208		
			0.60	41.9	0.003	18.8	0.111	8.5	0.201		
			0.80	40.2	0.002	19.1	0.105	9.7	0.161		
5454	Annealed 3 h at 790 F	0.25-63	0.20	33.6	-0.005	16.8	0.093	10.8	0.182		
			0.40	36.0	-0.009	16.3	0.104	10.7	0.188		
			0.60	36.9	-0.009	16.0	0.102	10.0	0.191		
			0.80	37.0	-0.009	16.2	0.097	10.2	0.183		
Test temperature, F (C):											
7075(a)	Solution treated 1 h at 870 F, water quenched, aged at 285 F for 16 h	0.4-311	0.115	10.0	0.090	6.0	0.135	3.9	0.150	1020 (550)	
			2.66	9.7	0.115	6.2	0.120	4.8	0.115	2.9	0.170
										2.7	0.115

(a) Approximate composition

VALORES DE (C) E (m) PARA ALUMINIO E LIGAS (cont.).

Alloy	Material history	Strain rate range, 1/s	Strain	C	m	C	m	C	m	C	m	C	m
Test temperature, F (C):													
Copper 0.018 P, 0.0010 Ni, 0.0003 Sn, 0.0002 Sb, 0.0005 Pb, 0.0010 Fe, 0.0020 Mn, + 0.0005 Mg, <0.0005 As, + 0.0001 Bi, 0.0014 S, less than 0.003 O ₂ , Se + Te not detected	Cold drawn, annealed 2 h at 1110 F	4-40	0.105	570 (300)	840 (450)	1110 (600)	1380 (740)	1650 (900)					
				20.2	0.016	17.0	0.010	12.7	0.050	7.6	0.096	4.7	0.134
				26.5	0.018	22.5	0.004	16.8	0.043	9.7	0.097	6.3	0.110
				0.338	0.017	25.1	0.008	18.9	0.041	10.0	0.128	6.1	0.154
				0.512	0.025	26.6	0.014	19.4	0.056	8.5	0.186	5.5	0.195
				0.695	0.024	26.8	0.031	19.0	0.078	8.2	0.182	5.2	0.190
Test temperature, F (C):													
OFHC Copper													
CDA 110 99.94 Cu, 0.0003 Sb, 0.0012 Pb, 0.0012 S, 0.0025 Fe, 0.001 Ni	Hot rolled, annealed	0.25-40	0.25	800 (427)									
				26.7	0.0413								
				750 (400)	930 (500)	1110 (600)							
				23.0	0.046	12.9	0.136	6.6	0.160				
				0.50	0.049	13.7	0.150	6.9	0.168				
				0.70	0.057	13.3	0.165	6.8	0.176				
CDA 220 90.06 Cu, 0.003 Fe, 0.004 Pb, 0.003 Sn, Rem Zn	Extruded, cold drawn 307%, annealed 650 C, 90 min	0.1-10	0.25	390 (200)	750 (400)	1110 (600)	1470 (800)						
				41.0	0.017	34.1	0.018	22.6	0.061	11.2	0.134		
				0.50	0.029	39.9	0.032	24.4	0.084	11.0	0.156		
				0.70	0.034	40.7	0.024	24.6	0.086	11.4	0.140		
CDA 260 70.05 Cu, trace Fe + Sn, Rem Zn	Hot rolled, annealed	3.5-30	0.25										
						34.9	0.036	16.0	0.194	7.1	0.144		
						42.3	0.031	14.8	0.237	7.0	0.148		
CDA 280 60.44 Cu, 0.01 Pb, 0.02 Fe, trace Sn, Rem Zn	Hot rolled, annealed	3.5-30	0.25			42.4	0.035	14.3	0.228	6.3	0.151		
						49.0	0.028	26.9	0.083	7.6	0.189	3.1	0.228
						58.6	0.027	28.6	0.075	5.4	0.281	2.8	0.239
CDA 365 59.78 Cu, 0.90 Pb, 0.12 Fe, trace Sn, Rem Zn	Hot rolled, annealed	3.5-30	0.25			60.3	0.027	26.7	0.081	4.7	0.291	2.7	0.220
						45.8	0.038	28.6	0.063	9.8	0.106	2.4	0.166
						57.2	0.032	28.9	0.085	8.5	0.137	2.1	0.187
						59.1	0.035	26.6	0.078	8.4	0.113	1.8	0.222

VALORES DE (C) E (m) PARA COBRE E LIGAS.

Alloy	Material history	Strain rate range 1/s	Strain											
			F (C)											
Test temperature, F (C)														
Type 1 0.04 Fe, 0.02 C, 0.005 H ₂ , 0.01 N ₂ , 0.04 O ₂ , Rem Ti	Annealed 15 min at 1200 F in high vacuum	0.25-16.0	0.2	92.8 0.029	60.9 0.046	39.8 0.074	25.3 0.097	12.8 0.167	5.4 0.230	1832 (1000)				
			0.4	113.7 0.029	73.3 0.056	48.8 0.081	29.6 0.115	14.6 0.181	5.5 0.248	3.6 0.289				
			0.6	129.6 0.028	82.2 0.056	53.9 0.083	32.1 0.105	14.9 0.195	5.5 0.248	3.5 0.289				
			0.8	142.5 0.027	87.7 0.058	56.3 0.082	32.7 0.099	15.4 0.180	5.9 0.186	3.2 0.264				
Type 2 0.15 Fe, 0.02 C, 0.005 H ₂ , 0.02 N ₂ , 0.12 O ₂ , Rem Ti	Annealed 15 min at 1200 F in high vacuum	0.25-16.0	1.0	150.6 0.027	90.7 0.054	56.6 0.084	32.5 0.099	15.9 0.173	5.9 0.187	70 0.254				
			0.2	143.3 0.021	92.7 0.043	54.5 0.051	33.6 0.092	17.5 0.167	6.9 0.135	4.2 0.279				
			0.4	173.2 0.021	112.1 0.042	63.1 0.047	36.3 0.101	18.4 0.190	7.2 0.151	4.9 0.167				
			0.6	193.8 0.024	125.3 0.045	65.6 0.047	36.9 0.104	18.4 0.190	7.8 0.138	4.5 0.167				
Unalloyed 0.03 Fe, 0.0084 N, 0.0025 H, Rem Ti	Hot rolled, annealed 800 C, 90 min	0.1-10	0.8	208.0 0.023	131.9 0.051	66.0 0.045	37.0 0.089	18.4 0.190	7.6 0.106	3.9 0.195				
			1.0	216.8 0.023	134.8 0.056	65.3 0.045	36.9 0.092	18.6 0.190	6.8 0.097	3.7 0.167				
			Test temperature, F (C)											
			1110 (600) 1290 (700) 1470 (800) 1650 (900)											
Ti-5Al-2.5 Sn 5.1 Al, 2.5 Sn, 0.06 Fe, 0.03 C, 0.01 H ₂ , 0.03 N ₂ , 0.1 O ₂ , Rem Ti	Annealed 30 min at 1470 F in high vacuum	0.25-16.0	0.1	173.6 0.046	125.6 0.028	97.6 0.028	86.1 0.025	58.5 0.034	44.2 0.069	5.4 0.308				
			0.2	197.9 0.048	138.8 0.022	107.4 0.026	92.8 0.020	58.7 0.040	44.8 0.082	5.1 0.294				
			0.3	215.6 0.046	147.4 0.021	112.5 0.027	95.6 0.019	58.7 0.040	44.8 0.082	5.1 0.294				
			0.4	230.6 0.039	151.4 0.022	116.0 0.022	96.7 0.021	55.6 0.024	43.0 0.078	5.2 0.264				
Ti-6Al-4V 6.4 Al, 4.0 V, 0.14 Fe, 0.05 C, 0.01 H ₂ , 0.015 N ₂ , 0.1 O ₂ , Rem Ti	Annealed 120 min at 1200 F in high vacuum	0.25-16.0	0.5	203.3 0.017	143.8 0.026	119.4 0.025	94.6 0.064	51.3 0.146	23.3 0.143	9.5 0.131				
			1.0	209.7 0.015	151.0 0.021	127.6 0.022	91.2 0.073	35.2 0.056	53 0.280					
			0.2	206.0 0.015	152.0 0.017	126.2 0.017	84.6 0.079	39.8 0.175	21.4 0.147	9.4 0.118				
			0.3	206.0 0.015	152.0 0.017	118.7 0.014	77.9 0.080	30.4 0.205	20.0 0.161	9.6 0.118				
Ti-13V-11Cr-3Al 3.6 Al, 14.1 V, 10.6 Cr, 0.27 Fe, 0.02 C, 0.014 H ₂ , 0.03 N ₂ , 0.11 O ₂ , Rem Ti	Annealed 30 min at 1290 F in high vacuum	0.25-16.0	0.4	226.3 0.026	183.5 0.026	147.9 0.046	92.8 0.045	56.7 0.088	40.9 0.127	29.2 0.155				
			0.5	226.3 0.026	183.5 0.026	147.9 0.046	92.8 0.045	56.7 0.088	40.9 0.127	29.2 0.155				
			0.6	181.4 0.029	136.3 0.015	84.7 0.036	53.9 0.081	39.1 0.172	9.3 0.154	27.8 0.157				
			0.7	181.4 0.029	136.3 0.015	84.7 0.036	52.9 0.080	38.8 0.127	28.0 0.159					
Ti-6Al-4V			0.8	1550 (843)	1750 (954)	1800 (982)								
			0.9	38.0 0.064	12.3 0.24	9.4 0.29								
			1.0											
			Test temperature, F (C)											
Ti-13V-11Cr-3Al 3.6 Al, 14.1 V, 10.6 Cr, 0.27 Fe, 0.02 C, 0.014 H ₂ , 0.03 N ₂ , 0.11 O ₂ , Rem Ti			0.1	173.1 0.041	150.5 0.030	136.5 0.035	118.4 0.040	65.4 0.097	44.6 0.147	32.4 0.153				
			0.2	188.2 0.037	150.5 0.030	136.5 0.035	118.4 0.040	65.4 0.097	44.6 0.147	32.4 0.153				
			0.3	202.3 0.034	174.2 0.024	153.9 0.030	107.5 0.039	59.5 0.096	42.1 0.139	30.9 0.142				
			0.4	215.2 0.029	181.1 0.023	163.5 0.026	92.8 0.045	56.7 0.088	40.9 0.127	29.2 0.155				

VALORES DE (C) E (m) PARA TITANIO E LIGAS.

APÊNDICE

B

EQUIVALENCIA DE NOMENCLATURA DE MATERIAIS.

BIBLIOGRAFIA

BIBLIOGRAFIA

- 1) ALTAN T. et alii
Metal Forming: fundamentals and applications
American Society for Metals - Metals Park (Ohio) - 1983
- 2) AVITZUR B.
Handbook of Metal-Forming Processes
Editora John Wiley & Sons - New York - 1976
- 3) BILLIGMANN J. e FELDMANN H. D.
Estampado e prensado à Máquina
Editora Reverté S.A. - Barcelona - 1979
- 4) BRESCIANE E. F. et alii
Conformação Plástica dos Metais VOLS. 1 e 2 (2ª edição)
Editora UNICAMP - Campinas - 1985
- 5) CHIAVERINI V.
Aços e Ferros Fundidos (5ª edição)
Associação Brasileira de Metais - São Paulo - 1987
- 6) CHIAVERINI V.
Tecnologia Mecânica (VOL. 1)
Editora McGraw-Hill do Brasil Ltda. - São Paulo - 1977
- 7) DIETER G. E.
Metalurgia Mecânica
Editora Guanabara Dois - Rio de Janeiro - 1981
- 8) DIETER G. E. (ED.)
Workability Testing Techniques
American Society for Metals - Metals Park (Ohio) - 1984
- 9) GRUNING K.
Técnica da Conformação
Editora Polígono - São Paulo - 1973
- 10) HONEYCOMBE R. W. K.
The Plastic Deformation of Metals (2ª edição)
Editora Edward Arnold - London - 1984

- 11) LANGE K. (ED.)
Handbook of Metal Forming
Editora McGraw-Hill - New York - 1985
- 12) MALE A. T. and COCKCROFT M. G.
A Method for the Determination of the Coefficient of Friction of Metals under Conditions of Bulk Plastic Deformation
Journal of the Institute of Metals, VOL. 93, 1964-65, pgs. 38-46
- 13) Metals Handbook VOL. 5 (8ª edição)
American Society for Metals - Metals Park (Ohio) - 1972
- 14) MEYERS M. A. e CHAWLA K. K.
Princípios de Metalurgia Mecânica
Editora Edgard Blücher Ltda. - São Paulo - 1982
- 15) NERY F. A. C.
Elaboração de Projeto de Ferramenta de Forjamento a Quente (notas de aula)
Departamento de Engenharia Mecânica E.P.U.S.P. - 1988
- 16) Normas Técnicas Brasileiras 8638/1984
ABNT
- 17) Normas Técnicas Brasileiras 8999/1985
ABNT
- 18) ROSSI M.
Estampado en Caliente de Los Metales
Editora Hoepli - Barcelona - 1971
- 19) SCHEY J. A. (ED.)
Tribology in Metalworking: friction, lubrication and wear
American Society for Metals - Metals Park (Ohio) - 1983
- 20) SOUSA S. A.
Ensaio Mecânicos de Materiais Metálicos (5ª edição)
Editora Edgard Blücher Ltda. - São Paulo - 1982

- 21) SUBRAMANIAN T. L. and ALTAN T.
A Practical Method for Estimating Forging Loads with the
Use of a Programmable Calculator
Journal of Applied Metal Working, VOL. 1, no 2, 1980,
pgs. 60-68

Steel	Material history	Strain rate range, 1/s	Strain	C	m	C	m	C	m	C	m	C	m	C	m	C	m
50100al, continued																	
1.00 C, 0.19 Si, 0.17 Mn,			0.40	22.0	0.134	16.8	0.134	11.2	0.155	8.4	0.161						
0.027 S, 0.023 P, 0.10 Cr,			0.50	21.5	0.1	15.6	0.150	11.1	0.158	7.4	0.199						
0.09 Ni			0.60	21.3	0.132	14.6	0.163	10.0	0.184	7.1	0.212						
52100	Hot rolled,	1.5-100	0.70	20.9	0.131	13.5	0.176	9.7	0.183	6.7	0.220						
1.06 C, 0.22 Si, 0.46 Mn,	annealed		0.40	20.9	0.123	14.3	0.146	9.5	0.169	6.7	0.203						
0.019 S, 0.031 P, 1.41 Cr,			0.50	25.5	0.107	17.7	0.127	12.0	0.143	8.3	0.171						
0.17 Ni			0.70	25.9	0.107	17.7	0.129	12.3	0.143	8.3	0.178						
				23.3	0.131	16.8	0.134	12.0	0.148	7.7	0.192						
Test temperature, F(C):																	
				1650 (900)					1430 (780)					2010 (1100)			
Mn-Si steel				0.05	19.2	0.117	14.8	0.119	9.7	0.172	7.5	0.181		2190 (1200)			
0.61 C, 1.58 Si, 0.94 Mn,				0.10	22.6	0.112	17.1	0.108	11.8	0.151	8.7	0.165					
0.038 S, 0.035 P, 0.12 Cr,				0.20	25.7	0.108	19.5	0.101	13.5	0.139	9.7	0.160					
0.27 Ni, 0.06 Mo				0.30	27.6	0.108	20.5	0.109	14.8	0.126	10.0	0.161					
				0.40	27.6	0.114	20.2	0.114	14.4	0.141	9.5	0.179					
				0.50	27.2	0.113	19.9	0.125	14.1	0.144	9.1	0.182					
				0.60	26.0	0.121	18.8	0.137	12.8	0.162	8.2	0.209					
				0.70	24.7	0.130	17.8	0.152	11.9	0.178	7.5	0.228					
Cr-Si steel				0.05	19.9	0.118	23.9	0.104	15.1	0.167	10.0	0.206					
0.47 C, 3.74 Si, 0.58 Mn,				0.10	19.9	0.136	25.6	0.120	16.8	0.162	11.1	0.183					
8.20 Cr, 0.20 Ni				0.20	19.9	0.143	27.6	0.121	18.5	0.153	11.9	0.184					
				0.30	19.9	0.144	28.4	0.119	19.1	0.148	12.1	0.182					
				0.40	19.3	0.150	28.2	0.125	18.9	0.150	12.1	0.178					
				0.50	18.5	0.155	26.6	0.132	18.5	0.155	11.8	0.182					
				0.60	17.5	0.160	25.2	0.142	17.5	0.160	11.5	0.182					
				0.70	16.1	0.163	23.3	0.158	16.1	0.162	10.7	0.199					
D3(a)				0.10	39.2	0.087	29.0	0.108	21.0	0.123	14.6	0.121					
2.23 C, 0.43 Si, 0.37 Mn,				0.30	43.7	0.087	30.4	0.114	21.0	0.139	13.9	0.130					
13.10 Cr, 0.33 Ni				0.50	39.7	0.101	27.1	0.125	18.4	0.155	12.2	0.124					
				0.70	33.3	0.131	22.5	0.145	15.3	0.168	10.7	0.108					

VALORES DE ϵ (C) E ϵ (m) PARA ACOS (continuado).

H 13 0.39 C, 1.02 Si, 0.60 Mn, 0.016 P, 0.020 S, 5.29 Cr, 0.04 Ni, 1.35 Mo, 0.027 N, 0.83 V	Test temperature, F (C): 230-906 0.1 0.2 0.3 0.4	1290 (700) 19.1 0.232 30.1 0.179 31.0 0.179 25.9 0.204	1510 (820) 10.2 0.305 13.7 0.275 15.1 0.265 12.3 0.295	1650 (900) 6.0 0.373 8.2 0.341 10.8 0.305 12.5 0.287	1830 (1000) 4.8 0.374 9.0 0.295 11.6 0.267 11.8 0.269	
H-26(a) 0.80 C, 0.28 Si, 0.32 Mn, 4.30 Cr, 0.18 Ni, 0.55 Mo 18.40 W, 1.54 V	Hot rolled, annealed	Test temperature, F (C): 1.5-100 0.10 0.30 0.50 0.70	1650 (900) 46.7 0.058 49.6 0.075 44.6 0.096 39.1 0.115	1830 (1000) 37.4 0.072 38.1 0.087 33.7 0.102 27.9 0.124	2010 (1100) 26.2 0.106 26.0 0.121 23.6 0.131 20.1 0.149	2190 (1200) 18.7 0.125 18.3 0.140 16.2 0.151 13.8 0.162
301 SS(a) 0.08 C, 0.93 Si, 1.10 Mn, 0.009 P, 0.014 S, 16.99 Cr, 6.96 Ni, 0.31 Mo, 0.93 Al, 0.02 N, 0.063 Se	Hot rolled, annealed	Test temperature, F (C): 0.8-100 0.25 0.50 0.70	1110 (600) 26.5 0.147 31.3 0.153 17.5 0.270	1470 (800) 40.5 0.051 39.3 0.062 37.8 0.069	1830 (1000) 16.3 0.117 17.8 0.108 17.4 0.102	2190 (1200) 7.6 0.161 7.6 0.177 6.6 0.192
302 SS 0.07 C, 0.71 Si, 1.07 Mn, 0.03 P, 0.005 S, 18.34 Cr, 9.56 Ni	Hot rolled, annealed	Test temperature, F (C): 310-460 0.25 0.40 0.60	26.5 0.147 31.3 0.153 17.5 0.270	25.1 0.129 39.0 0.121 45.4 0.063	11.0 0.206 13.5 0.188 16.8 0.161	4.6 0.281 4.7 0.281 4.1 0.310
302 SS 0.08 C, 0.49 Si, 1.06 Mn, 0.037 P, 0.005 S, 18.37 Cr, 9.16 Ni	Hot rolled, annealed	Test temperature, F (C): 0.2-30 0.25 0.40 0.60 0.70	52.2 0.031 58.9 0.022 63.2 0.020 64.0 0.023	36.6 0.042 40.4 0.032 41.9 0.030 42.0 0.031	23.1 0.040 24.7 0.050 24.9 0.053 24.7 0.052	12.8 0.082 13.6 0.081 13.5 0.091 13.4 0.096
302 SS 0.07 C, 0.43 Si, 0.48 Mn, 18.60 Cr, 7.70 Ni		Test temperature, F (C): 1.5-100 0.05 0.10 0.20 0.30 0.40 0.50 0.60 0.70	1650 (900) 24.6 0.023 28.4 0.026 33.6 0.031 35.3 0.042 35.6 0.055 35.6 0.060 34.1 0.068 33.6 0.072	1830 (1000) 16.8 0.079 21.2 0.068 25.2 0.067 26.3 0.074 26.9 0.084 27.0 0.093 26.4 0.092 25.7 0.102	2010 (1100) 13.7 0.093 15.6 0.091 18.1 0.089 19.5 0.089 19.9 0.094 19.6 0.098 19.3 0.102 18.9 0.108	2190 (1200) 9.7 0.139 11.1 0.127 12.5 0.120 13.5 0.115 14.2 0.110 14.2 0.115 13.8 0.114 13.9 0.120

VALORES DE (C) E (m) PARA ACOS (continuación).

Steel	Material history	Strain rate range, 1/s	Strain	F (°C)	m	F (°C)	m	F (°C)	m	F (°C)	m
Test temperature, F (°C):											
309 SS 0.13 C, 0.42 Si, 1.30 Mn, 0.023 P, 0.008 S, 22.30 Cr, 12.99 Ni	Hot drawn, annealed	200-525	0.25 0.40 0.60	1110 (800)	0.080	1470 (800)	0.079 0.074 0.076	1830 (1000)	2190 (1200)	1650 (900)	
310 SS 0.12 C, 1.26 Si, 1.56 Mn, 0.01 P, 0.009 S, 25.49 Cr, 21.28 Ni	Hot drawn, annealed	310-460	0.25 0.40 0.60	503 545 618	0.080 0.080 0.067	323 322 219	0.127 0.142 0.212	275 228 97	0.101 0.143 0.284	12.0 10.8 4.5	0.154 0.175 0.326
316 SS 0.06 C, 0.52 Si, 1.40 Mn, 0.035 P, 0.005 S, 17.25 Cr, 12.23 Ni, 2.17 Mo	Hot drawn, annealed	310-460	0.25 0.40 0.60	135 288 393	0.263 0.162 0.128	222 268 301	0.149 0.138 0.133	64 37 6.1	0.317 0.435 0.365	8.0 7.4 6.5	0.204 0.277 0.234
403 SS 0.16 C, 0.37 Si, 0.44 Mn, 0.024 P, 0.007 S, 12.62 Cr	Hot rolled, annealed	0.8-100	0.25 0.50 0.70	263 269 246	0.079 0.076 0.090	263 269 246	0.079 0.076 0.090	15.4 16.0 15.3	0.125 0.142 0.158	7.3 7.8 7.5	0.157 0.152 0.155
SS 0.12 C, 0.12 Si, 0.29 Mn, 0.014 P, 0.016 S, 12.11 Cr, 0.50 Ni, 0.45 Mo	Hot rolled, annealed	0.8-100	0.25 0.50 0.70	287 291 287	0.082 0.093 0.096	287 291 287	0.082 0.093 0.096	17.2 20.7 22.5	0.082 0.073 0.067	11.9 11.6 11.2	0.079 0.117 0.131
SS 0.08 C, 0.45 Si, 0.43 Mn, 0.031 P, 0.005 S, 17.34 Cr, 0.31 Ni	Hot rolled, annealed	3.5-30	0.25 0.50 0.70	195 223 212	0.099 0.097 0.098	195 223 212	0.099 0.097 0.098	19.5 22.3 21.2	0.099 0.097 0.098	8.9 9.5 9.2	0.128 0.135 0.133
Maraging 300				1600 (870)	0.077	36.4	0.095	30.6	0.113	2000 (1095)	2100 (1155)
Maraging 300				2200 (1205)		12.8	0.185			18.0	0.165
Test temperature, F (°C):											
Test temperature, F (°C):											

^{1/8} Approximate composition

VALORES DE (C) E (m) PARA AÇOS (continuação).

Alloy	Material history	Strain rate range, 1/s	Strain	C	m	r	m	C	m	C	m	C	m
Test temperature, F (C):													
0 25-63													
5052	Annealed 3 h at 790 F		0.20	14.3	0.038	8.9	0.067	645 (360)	825 (480)				
0.068 Cu, 0.04 Mn, 2.74 Mg, 0.10 Si, 0.19 Fe, 0.01 Zn, 0.003 Ti, Rem Al			0.40	15.9	0.035	9.3	0.071		5.6	0.125			
			0.60	16.8	0.035	9.0	0.068		5.3	0.130			
			0.80	17.5	0.038	9.4	0.068		5.1	0.134			
5056	Annealed 3 h at 790 F		0.20	42.6	-0.032	20.9	0.138		5.6	0.125			
0.036 Cu, 0.04 Mn, 4.83 Mg, 0.15 Si, 0.22 Fe, 0.01 Zn, 0.14 Cr, Rem Al			0.40	44.0	-0.032	20.8	0.138		11.7	0.200			
			0.60	44.9	-0.031	19.9	0.143		10.5	0.205			
			0.70	45.6	-0.034	20.3	0.144		10.3	0.202			
5083	Annealed 3 h at 790 F		0.20	43.6	0.006	20.5	0.095		9.3	0.182			
0.01 Cu, 0.77 Mn, 4.41 Mg, 0.10 Si, 0.16 Fe, 0.01 Zn, 0.13 Cr, 0.002 Ti, Rem Al			0.40	43.6	-0.001	19.7	0.108		8.3	0.208			
			0.60	41.9	0.003	18.8	0.111		8.5	0.201			
			0.80	40.2	0.002	19.1	0.105		9.7	0.161			
5454	Annealed 3 h at 790 F		0.20	33.6	-0.005	16.8	0.093		10.8	0.182			
0.065 Cu, 0.81 Mn, 2.45 Mg, 0.12 Si, 0.18 Fe, -0.01 Zn, 0.002 Ti, Rem Al			0.40	36.0	-0.009	16.3	0.104		10.7	0.188			
			0.60	36.9	-0.009	16.0	0.102		10.0	0.191			
			0.80	37.0	-0.009	16.2	0.097		10.2	0.183			
Test temperature, F (C):													
750 (400)													
7075(a)	Solution treated 1 h at 870 F, water quenched, aged at 285 F for 16 h	0.4 311	0.115	10.0	0.090	6.0	0.135	840 (450)	930 (500)	1020 (550)			
89.6 Al, 1.31 Cu, 2.21 Mg, 0.21 Si, 0.30 Fe, 0.34 Mn, 5.75 Zn, 0.01 Pb			2.66	9.7	0.115	6.2	0.120		3.9	0.150	2.9	0.170	0.115

(a) Approximate composition

VALORES DE (C) E (m) PARA ALUMINIO E LIGAS (cont.).

Alloy	Material history	Strain rate range, 1/s	Strain	C	m	ϵ	C	m	C	m	C	m	C	m
Test temperature, F (C):														
4-40														
Copper	Cold drawn, annealed 2 h at 1110 F	0.105	0.16	570 (300)	840 (450)	1110 (600)	1380 (750)	1650 (900)						
0.018 P, 0.0010 Ni, 0.0003 Sn, 0.0002 Sb, 0.0005 Pb		0.223	0.18	20.2	17.0	12.7	7.6	0.096	4.7	0.134				
0.0010 Fe, 0.0020 Mn, < 0.0005 Mg, < 0.0005 As, < 0.0001 Bi, 0.0014 S, less than 0.003 O ₂ , Se + Te not detected		0.338	0.17	26.5	22.5	16.8	9.7	0.097	6.3	0.110				
		0.512	0.25	30.2	25.1	18.9	10.0	0.128	6.1	0.154				
		0.695	0.24	32.2	26.6	19.4	8.5	0.146	5.5	0.195				
				34.4	26.8	19.0	8.2	0.182	5.2	0.190				
Test temperature, F (C):														
800 (427)														
26.7 0.0413														
Test temperature, F (C):														
0.25-40														
Hot rolled, annealed		0.25	0.46	750 (400)	930 (500)	1110 (600)								
99.94 Cu, 0.0003 Sb, 0.0012 Pb, 0.0012 S, 0.0025 Fe, 0.001 Ni		0.50	0.49	23.0	12.9	6.6	0.160							
		0.70	0.57	27.4	13.7	6.9	0.168							
				28.8	13.3	6.8	0.176							
Test temperature, F (C):														
0.1-10														
Extruded, cold drawn 307, annealed 650 C, 90 min		0.25	0.17	390 (200)	750 (400)	1110 (600)	1470 (800)							
90.06 Cu, 0.003 Fe, 0.004 Pb, 0.003 Sn, Rem Zn		0.50	0.29	41.0	34.1	22.6	11.2	0.134						
		0.70	0.34	46.7	39.9	24.4	11.0	0.156						
				48.1	40.7	24.6	11.4	0.140						
Test temperature, F (C):														
3.5-30														
Hot rolled, annealed		0.25			34.9	16.0	7.1	0.114						
70.05 Cu, trace Fe + Sn, Rem Zn		0.50			42.3	14.8	7.0	0.148						
		0.70			42.4	14.3	6.3	0.151						
Test temperature, F (C):														
3.5-30														
Hot rolled, annealed		0.25	0.28	49.0	26.9	7.6	3.1	0.239						
60.44 Cu, 0.01 Pb, 0.02 Fe, trace Sn, Rem Zn		0.50	0.27	58.6	28.6	5.4	2.8	0.239						
		0.70	0.27	60.3	26.7	4.7	2.7	0.220						
Test temperature, F (C):														
3.5-30														
Hot rolled, annealed		0.25	0.38	45.8	28.6	9.8	2.4	0.165						
59.78 Cu, 0.90 Pb, 0.12 Fe, trace Sn, Rem Zn		0.50	0.32	57.2	28.9	8.5	2.1	0.197						
		0.70	0.35	59.1	26.6	8.4	1.8	0.222						

VALORES DE (C) E (m) PARA COBRE E LIGAS.

Alloy	Material history	Strain rate range, 1/s	Strain	C	m	C	m	C	m	C	m	C	m	C	m
Type 1															
0.04 Fe, 0.02 C, 0.005 H ₂ , 0.01 N ₂ , 0.04 O ₂ , Rem Ti															
Test temperature, F (C): 68 (20)															
Annealed 15 min at 1200 F in high vacuum															
		0.2	92.8	0.029	60.9	0.046	39.8	0.074	25.3	0.097	12.8	0.167	5.4	0.230	3.0
		0.4	113.7	0.029	73.3	0.056	48.8	0.061	29.6	0.115	14.6	0.181	5.5	0.248	3.6
		0.6	129.6	0.028	82.2	0.056	53.9	0.049	32.1	0.105	14.9	0.195	5.5	0.248	3.5
		0.8	142.5	0.027	90.7	0.058	56.3	0.042	32.7	0.099	15.4	0.180	5.9	0.186	3.2
		1.0	150.6	0.027	97.7	0.054	56.6	0.044	32.5	0.099	15.4	0.173	5.9	0.187	3.0
Type 2															
0.15 Fe, 0.02 C, 0.005 H ₂ , 0.02 N ₂ , 0.12 O ₂ , Rem Ti															
Test temperature, F (C): 68 (20)															
Annealed 15 min at 1200 F in high vacuum															
		0.2	143.3	0.021	92.7	0.043	54.5	0.051	33.6	0.092	17.5	0.167	5.9	0.195	4.2
		0.4	173.2	0.021	112.1	0.042	63.1	0.047	36.3	0.101	18.4	0.190	7.2	0.171	4.9
		0.6	193.8	0.024	125.3	0.045	65.6	0.047	36.9	0.104	18.4	0.190	7.8	0.184	4.5
		0.8	208.0	0.023	131.9	0.051	66.0	0.045	37.0	0.089	18.4	0.190	7.6	0.186	3.9
		1.0	216.8	0.023	134.8	0.056	65.3	0.045	36.9	0.092	18.6	0.190	6.8	0.097	3.7
Unalloyed															
0.03 Fe, 0.0084 N, 0.0025 H, Rem Ti															
Test temperature, F (C): 1110 (600)															
Hot rolled, annealed 800 C, 90 min															
		0.25	23.4	0.062	14.3	0.115	8.2	0.236	1.8	0.324					
		0.50	27.9	0.066	17.8	0.111	10.0	0.242	2.1	0.326					
		0.70	30.1	0.065	20.0	0.098	12.2	0.185	2.5	0.316					
Ti-5Al-2.5 Sn															
5.1 Al, 2.5 Sn, 0.06 Fe, 0.03 C, 0.01 H ₂ , 0.03 N ₂ , 0.1 O ₂ , Rem Ti															
Test temperature, F (C): 68 (20)															
Annealed 30 min at 1470 F in high vacuum															
		0.1	173.6	0.046	125.6	0.028	97.6	0.028	86.1	0.025	58.5	0.034	44.2	0.069	5.4
		0.2	197.9	0.048	138.8	0.022	107.4	0.026	92.8	0.020	58.7	0.040	44.8	0.062	5.1
		0.3	215.6	0.046	147.4	0.021	112.5	0.027	95.6	0.019	58.7	0.040	44.8	0.062	5.1
		0.4	230.6	0.039	151.4	0.022	116.0	0.022	96.7	0.021					
		0.5													
Ti-6Al-4V															
6.4 Al, 4.0 V, 0.14 Fe, 0.05 C, 0.01 H ₂ , 0.015 N ₂ , 0.1 O ₂ , Rem Ti															
Test temperature, F (C): 1550 (843)															
Annealed 120 min at 1200 F in high vacuum															
		0.1	203.3	0.017	143.8	0.026	119.4	0.025	94.6	0.064	51.3	0.146	23.3	0.143	9.5
		0.2	209.7	0.015	151.0	0.021	127.6	0.022	91.2	0.073	39.8	0.175	21.4	0.147	9.4
		0.3	206.0	0.015	152.0	0.017	126.2	0.017	84.6	0.079	39.8	0.175	21.4	0.147	9.4
		0.4					118.7	0.014	77.9	0.080					
		0.5													
		0.6													
		0.8													
		0.9													
		1.0													
Ti-6Al-4V															
Test temperature, F (C): 1550 (843)															
Annealed 30 min at 1200 F in high vacuum															
		0.1	173.1	0.041	123.0	0.024	94.0	0.029							
		0.2	188.2	0.037	150.5	0.030	136.5	0.035	118.4	0.040	65.4	0.097	44.6	0.147	32.4
		0.3	202.3	0.034	171.2	0.024	153.9	0.030	107.5	0.039	59.5	0.096	42.1	0.139	30.9
		0.4	215.2	0.029	181.1	0.023	147.9	0.046	92.8	0.045	56.7	0.088	40.9	0.127	29.2
		0.5	226.3	0.026	181.4	0.029	136.3	0.045	84.7	0.036	53.9	0.081	39.3	0.125	27.8
		0.6													
		0.7													
		0.8													
		0.9													
		1.0													

VALORES DE (C) E (m) PARA TITANIO E LIGAS.

APÊNDICE

B

BIBLIOGRAFIA

BIBLIOGRAFIA

- 1) ALTAN T. et alii
Metal Forming: fundamentals and applications
American Society for Metals - Metals Park (Ohio) - 1983
- 2) AVITZUR B.
Handbook of Metal-Forming Processes
Editora John Wiley & Sons - New York - 1976
- 3) BILLIGMANN J. e FELDMANN H. D.
Estampado e prensado à Máquina
Editora Reverté S.A. - Barcelona - 1979
- 4) BRESCIANE E. F. et alii
Conformação Plástica dos Metais VOLS. 1 e 2 (2ª edição)
Editora UNICAMP - Campinas - 1985
- 5) CHIAVERINI V.
Aços e Ferros Fundidos (5ª edição)
Associação Brasileira de Metais - São Paulo - 1987
- 6) CHIAVERINI V.
Tecnologia Mecânica (VOL. 1)
Editora McGraw-Hill do Brasil Ltda. - São Paulo - 1977
- 7) DIETER G. E.
Metalurgia Mecânica
Editora Guanabara Dois - Rio de Janeiro - 1981
- 8) DIETER G. E. (ED.)
Workability Testing Techniques
American Society for Metals - Metals Park (Ohio) - 1984
- 9) GRUNING K.
Técnica da Conformação
Editora Polígono - São Paulo - 1973
- 10) HONEYCOMBE R. W. K.
The Plastic Deformation of Metals (2ª edição)
Editora Edward Arnold - London - 1984

- 11) LANGE K. (ED.)
Handbook of Metal Forming
Editora McGraw-Hill - New York - 1985
- 12) MALE A. T. and COCKCROFT M. G.
A Method for the Determination of the Coefficient of Friction of Metals under Conditions of Bulk Plastic Deformation
Journal of the Institute of Metals, VOL. 93, 1964-65, pgs. 38-46
- 13) Metals Handbook VOL. 5 (8ª edição)
American Society for Metals - Metals Park (Ohio) - 1970
- 14) MEYERS M. A. e CHAWLA K. K.
Princípios de Metalurgia Mecânica
Editora Edgard Blücher Ltda. - São Paulo - 1982
- 15) NERY F. A. C.
Elaboração de Projeto de Ferramenta de Forjamento a Quente (notas de aula)
Departamento de Engenharia Mecânica E.P.U.S.P. - 1988
- 16) Normas Técnicas Brasileiras 8638/1984
ABNT
- 17) Normas Técnicas Brasileiras 8999/1985
ABNT
- 18) ROSSI M.
Estampado en Caliente de Los Metales
Editora Hoepli - Barcelona - 1971
- 19) SCHEY J. A. (ED.)
Tribology in Metalworking: friction, lubrication and wear
American Society for Metals - Metals Park (Ohio) - 1983
- 20) SOUSA S. A.
Ensaio Mecânicos de Materiais Metálicos (5ª edição)
Editora Edgard Blücher Ltda. - São Paulo - 1982

- 21) SUBRAMANIAN T. L. and ALTAN T.
A Practical Method for Estimating Forging Loads with the
Use of a Programmable Calculator
Journal of Applied Metal Working, VOL. 1, no 2, 1980,
pgs. 60-68