

ESCOLA FEDERAL DE ENGENHARIA DE ITAJUBÁ

INSTITUTO DE ENGENHARIA MECÂNICA

GRUPO DE FABRICAÇÃO

EME-002 - TECNOLOGIA DE FABRICAÇÃO I

NOTAS DE AULA – 1ª PROVA

APRESENTAÇÃO

Neste material colocamos notas compiladas de diversos autores sobre o tema conformação mecânica. Trata-se apenas de um material de referência que visa facilitar o acesso a informação e com uso exclusivo para a disciplina de graduação “Processos de Fabricação I” do curso regular de Engenharia mecânica da Escola Federal de Engenharia Itajubá. Nenhum texto ou ilustração aqui apresentado, é original e não se faz citação de autoria específica de cada frase, por se tratar de notas compiladas e não uma publicação com intenções de divulgação.

A relação das obras consultadas encontra-se nas referências bibliográficas e sugerimos que sejam consultadas para um estudo mais aprofundado do tema.

SUMÁRIO

1. PROCESSOS DE CONFORMAÇÃO	4
1.1 TIPOS DE CONFORMAÇÃO:	4
1.2 MECÂNICA DA CONFORMAÇÃO METÁLICA.....	5
1.2.1 <i>A estrutura cristalina dos metais</i>	5
1.2.2 <i>Imperfeições ou defeitos cristalinos</i>	8
1.2.2.1 Imperfeições de ponto.....	8
1.2.2.2 Imperfeições de linha.....	9
1.2.3 <i>Mecanismo da deformação plástica</i>	11
1.2.3.1 Escorregamento mediante movimento de discordância	11
1.2.3.2 Deformação dos metais policristalinos	13
1.2.4 <i>Deformação a frio e deformação a quente</i>	13
1.2.4.1 Recristalização.....	16
1.2.4.2 Crescimento de grão	17
2. LAMINAÇÃO	21
2.1 FORÇA E RELAÇÕES GEOMÉTRICAS NA LAMINAÇÃO	21
2.1.1 <i>Força na Laminação</i>	23
2.2 TIPOS DE LAMINADORES	24
2.2.1 <i>Órgãos mecânicos de um laminador</i>	26
2.3 OPERAÇÕES DE LAMINAÇÃO	26
3. FORJAMENTO	29
3.1 FORJAMENTO LIVRE.....	29
3.1.1 <i>Força na deformação em forjamento livre</i>	31
3.2 FORJAMENTO EM MATRIZ	32
3.3 EQUIPAMENTOS PARA FORJA	34
3.3.1 <i>Prensas de fuso</i>	35
3.3.2 <i>Prensas excêntricas ou mecânicas</i>	36
3.3.3 <i>Prensas hidráulicas</i>	37
3.3.4 <i>Martelo</i>	37
3.4 MATRIZES PARA FORJAMENTO.....	40
3.4.1 <i>Materiais para matrizes - forjamento a frio</i>	40
3.4.2 <i>Materiais para matrizes - trabalho a quente</i>	41
3.4.3 <i>Projeto preliminar de uma matriz para forjamento</i>	42
3.4.3.1 Escolha da linha de aparte	42
3.4.3.2 Desenho da peça para forjamento	43
3.4.3.2.1 Sobre metal para usinagem	43
3.4.3.2.2 Ângulos de saída	43
3.4.3.2.3 Raios de concordância	44
3.4.3.3 Cálculo da contração.....	45
3.4.3.4 Dimensões da rebarba	45
3.4.3.5 Escolha das dimensões do bloco	46
3.4.3.6 Cálculo da matéria prima necessária.....	47
3.4.3.7 Estimativa da força de forjamento	48
3.4.4 <i>Recalcagem</i>	49
3.4.4.1 Pressão de recalcagem	50
3.4.5 <i>Forjamento rotativo</i>	51
3.4.6 <i>Lubrificação no forjamento</i>	53
4. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	54

1. PROCESSOS DE CONFORMAÇÃO

Processos de conformação são processos de fabricação que através da deformação plástica da matéria prima obtêm o produto acabado, conservando-se o volume e a massa do material em todas as fases do processo A conformação altera:

- * a geometria;
- * as propriedades mecânicas da matéria prima.

O controle das propriedades mecânicas dos materiais por processos de conformação mecânica possui importância idêntica à criação de formas úteis através destas técnicas. Por exemplo, bolhas e porosidades presentes em lingotes fundidos podem ser eliminadas através de forjamento ou laminação a quente, o que proporciona uma melhoria na ductilidade e na tenacidade à fratura. Em diversos produtos as propriedades mecânicas dependem do controle do encruamento durante o processamento, enquanto em outros casos é necessário manter controle preciso de deformação, temperatura e taxa de deformação durante a operação para desenvolver características ótimas de estrutura e propriedades.

1.1 Tipos de conformação:

Têm-se desenvolvido centenas de processos para as aplicações específicas da conformação mecânica. Tais processos, entretanto, podem ser classificados em apenas algumas categorias, que se baseiam nos tipos de forças aplicadas ao material à medida que este é trabalhado à forma desejada. Estas categorias são:

- * compressão direta;
- * compressão indireta;
- * tração;
- * dobramento;
- * cisalhamento.

Nos processos do tipo compressão direta a força é aplicada à superfície do material e este escoar perpendicularmente à direção de compressão. O forjamento e a laminação (figura 1) são os principais exemplos deste tipo de processo. A trefilação de fios e tubos, a extrusão e o embutimento profundo representam processos de compressão indireta. As forças primárias aplicadas são freqüentemente trativas, mas as forças compressivas indiretas, desenvolvidas pela reação do material com a matriz, atingem valores elevados. Assim, o metal escoar sob a ação de um estado de tensões combinado, que inclui elevadas forças compressivas em pelo menos uma das direções principais. O melhor exemplo de um processo de conformação do tipo trativo é o estiramento, onde a chapa metálica fina é dobrada, tomando os contornos da matriz sob a aplicação de forças trativas. O dobramento envolve a aplicação de momentos fletores à chapa, enquanto o cisalhamento envolve a aplicação de forças cisalhantes de magnitude suficiente para romper o metal no plano de cisalhamento. A figura 1 ilustra estes processos de uma forma muito simples.

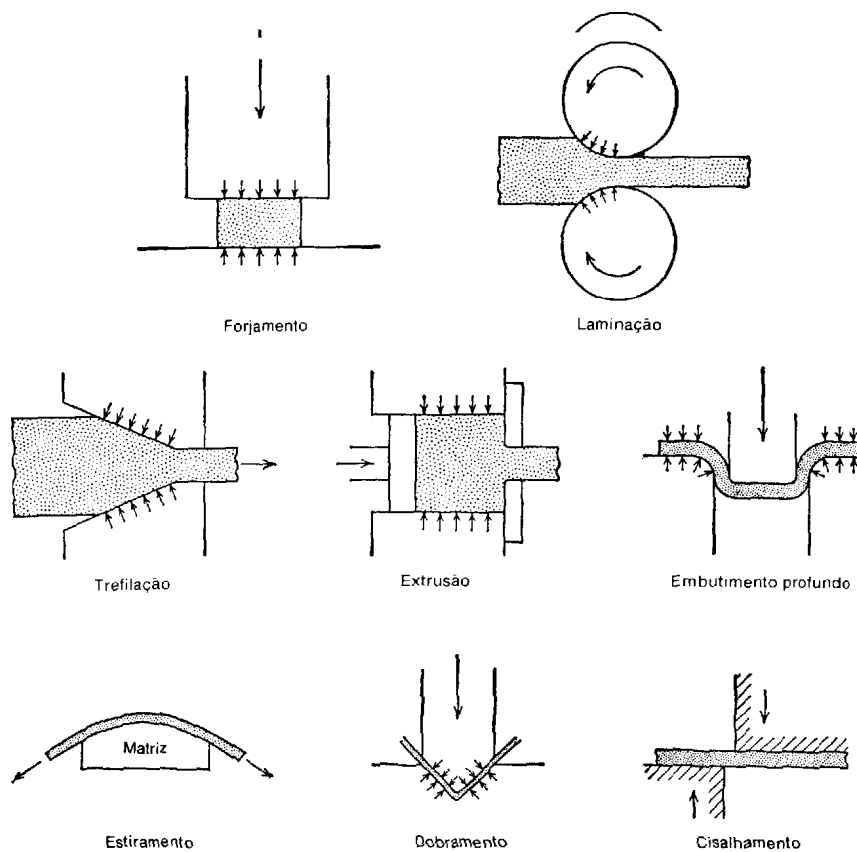


Figura 1 - Operações típicas de conformação

1.2 Mecânica da conformação metálica

1.2.1 A estrutura cristalina dos metais

Os metais, ao se solidificarem, "cristalizam", ou seja, os seus átomos que, no estado líquido, estavam se movimentando e distribuídos a esmo, localizam-se em posições relativamente definidas e ordenadas, que se repetem em três dimensões, formando uma figura geométrica regular que é o "cristal".

Existem sete sistemas cristalinos: triclinico, monoclinico, ortorrômbico, hexagonal, trigonal, tetragonal e cúbico.

De acordo com a disposição dos átomos, originam-se desses sistemas 14 possíveis distribuições dos referidos átomos, formando os chamados "reticulados" (retículos ou redes), designados com o nome de "reticulados Bravais".

Esses 14 reticulados estão representados na figura 2 Cada cristal constituído por apenas um determinado grupo de átomos é chamado célula unitária" ou "célula cristalina unitária".

O modelo de cristalização pode ser melhor compreendido ao verificar-se o que acontece quando um metal solidifica no interior de um recipiente(. As principais células unitárias que se formam, em pontos diferentes, crescem geralmente pela absorção de outras, até se encontrarem formando um contorno irregular que delimita uma área onde estão compreendidas milhares daquelas pequenas células.

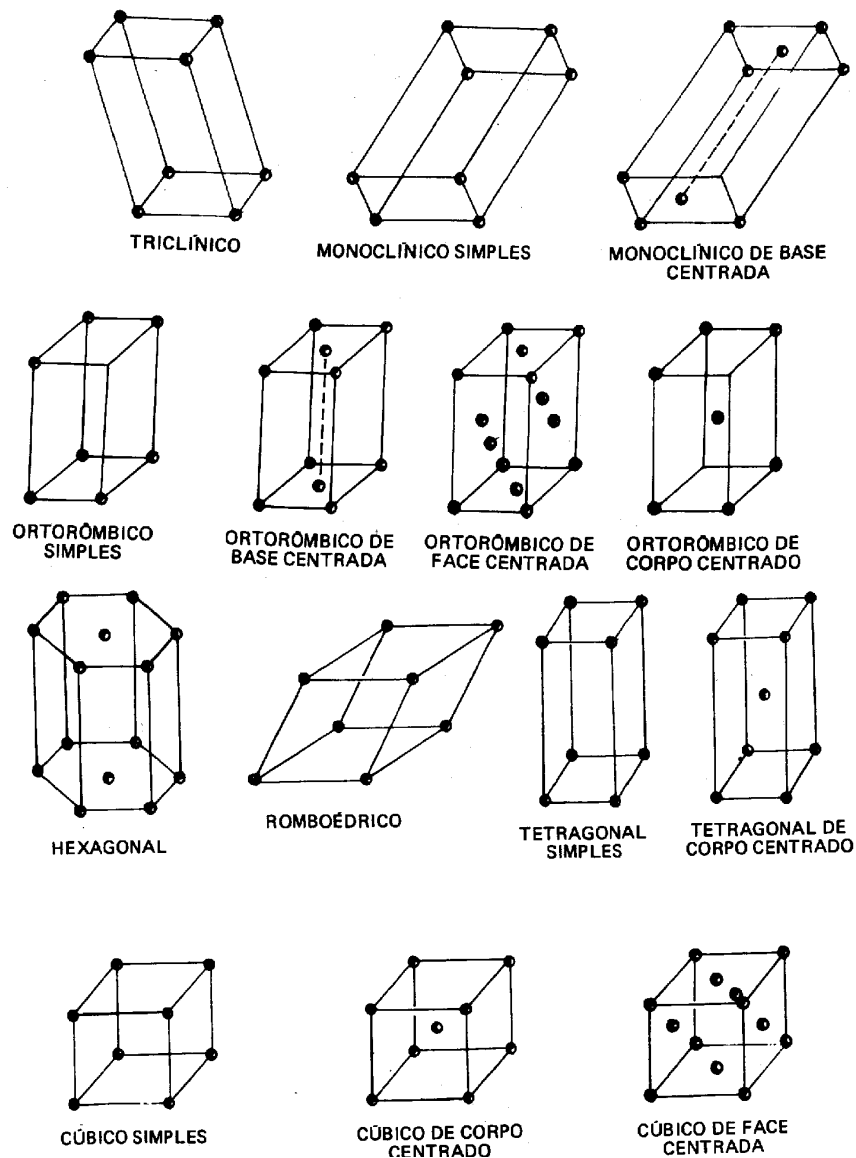


Figura 2 - Reticulados cristalinos Bravais

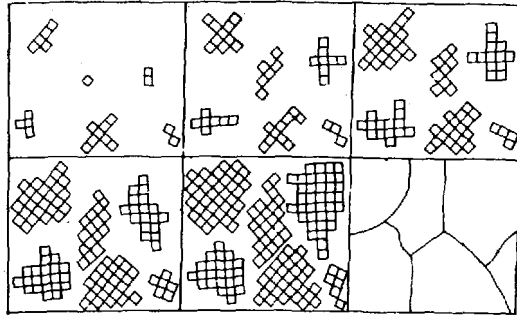


Figura 3 - Representação esquemática do processo de solidificação de um metal

Um conjunto de células unitárias forma o “cristal” com contornos geométricos, o qual ao adquirir os contornos irregulares pelo seu crescimento e devido aos pontos de contato de cada conjunto, passa a chamar-se “grão”. Esses grãos são ligados entre si por uma película que geralmente não se considera mais cristalina.

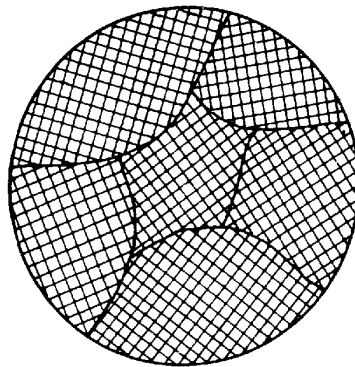


Figura 4 - Representação esquemática da estrutura cristalina dos metais

Em resumo, cada grão é constituído por milhares de células unitárias: estas por sua vez, consistem em grupos de átomos que se dispuseram em posições fixas, formando figuras geométricas típicas. Essas disposições fixas dão, pois, origem aos retículos.

Nos cristais há planos de maior densidade atômica, ou seja, que contém maior número de átomos. Veja-se, por exemplo, os reticulados cúbico de face centrada (CFC) e cúbico centrado (CC) (figura 2).

O cristal cúbico de face centrada possui planos contendo seis e cinco átomos, ao passo que o cúbico centrado possui planos, contendo cinco ou quatro átomos. Assim, o primeiro possui um maior número de planos de maior densidade atômica.

Essa é a primeira consideração.

A segunda consideração está relacionada com o fato de que a deformação dos cristais se dá segundo planos paralelos aos planos de maior densidade atômica; esses planos, ao longo dos quais ocorre a deformação cristalina, são chamados "planos de escorregamento".

Desse modo, os cristais que possuem um maior número de planos de maior densidade atômica são os que possuem um grande número de planos de escorregamento.

A terceira consideração diz respeito ao fato de que os planos de maior densidade atômica são igualmente os mais espaçados do reticulado.. Basta lembrar, no caso dos

reticulados CFC e CC, que os comprimentos das arestas são diferentes : a aresta do primeiro é maior (3,6 Å) que a do segundo (2,9 Å).

Esse maior espaçamento pode ser traduzido por uma menor resistência ao escorregamento desses planos em relação a quaisquer outros. Em consequência, os metais que possuem reticulados cúbicos de face centrada (CFC), como alumínio, cobre, chumbo, prata e ferro na forma alotrópica gama são mais fáceis de deformar que os metais com reticulado cúbico centrado (CC), como cromo, molibdênio, tungstênio, ferro à temperatura ambiente (forma alotrópica alfa) etc.

A deformabilidade ou plasticidade dos metais é ainda influenciada pelos chamados "defeitos" ou "imperfeições cristalinas".

1.2.2 Imperfeições ou defeitos cristalinos

As considerações até agora feitas foram baseadas na existência de um cristal perfeito; ou seja, numa célula unitária ou conjunto de células em que os átomos se dispõem regularmente de acordo com os modelos estudados.

Muitas propriedades como densidade, ponto de fusão etc. são estimadas ou previstas na base da definição de um "cristal ideal", sem defeitos ou imperfeições. Outras propriedades, contudo, sobretudo as que mais interessam sob o ponto de vista de aplicação dos metais, como as propriedades mecânicas, desviam-se apreciavelmente das que se poderiam prever na base de um cristal perfeito.

É comum, por exemplo, a presença de átomos que provocam impurezas, o que constitui, de certo modo, uma imperfeição cristalina, embora seja comum adicionar-se propositalmente átomos impuros para modificar as propriedades do metal.

As imperfeições cristalinas são, em princípio, de dois tipos: "imperfeições de ponto" e "imperfeições de linha".

1.2.2.1 Imperfeições de ponto

As imperfeições de ponto correspondem à falta de um ou mais átomos ou à presença de átomos extras ou ao deslocamento de átomos.

A mais simples é a "lacuna", a qual se origina quando falta um átomo no reticulado normal. Se faltarem dois átomos, o defeito chamar-se-á "bilacuna": Mais átomos podem estar ausentes. A origem dessas imperfeições pode ser atribuída quer a um empacotamento defeituoso durante o processo original de cristalização, quer a vibrações térmicas dos átomos a temperaturas elevadas. As lacunas podem mover-se, trocando de posição com os átomos vizinhos. Essa movimentação fornece um meio para Os átomos migrarem ou difundir-se no estado sólido a temperaturas elevadas, o que favorece o mecanismo de difusão, tão importante em determinados processos metalúrgicos.

Outro defeito de ponto é a "intersticialidade", que se caracteriza pela ocupação por um átomo de uma posição intersticial, dentro do reticulado cristalino. Se o átomo, por assim dizer intruso, for menor que os átomos restantes do reticulado, o efeito da imperfeição é pequeno; caso contrário, haverá uma distorção atômica.

A figura 5 representa os principais defeitos de ponto.

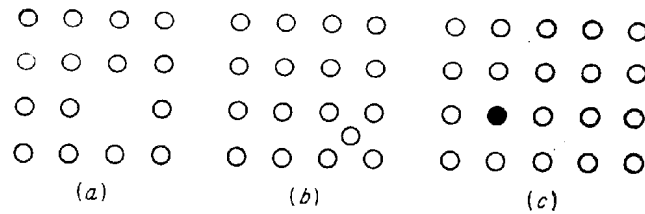


Figura 5 - Imperfeições de ponto: (a) lacuna; (b) intersticialidade; (c) átomo impuro

Quando os defeitos de ponto envolvem lacunas de pares de íons, eles são chamados "imperfeições Schottky", comuns em muitos cristais de natureza iônica. Outro defeito de ponto é a "imperfeição Frenkel" que envolve o deslocamento de um íon do reticulado para uma posição intersticial.

1.2.2.2 Imperfeições de linha

A mais importante é a "discordância", porque se atribui a esse defeito a principal responsabilidade pelo fenômeno de escorregamento, segundo o qual a maioria dos metais se deforma plasticamente ou de modo permanente.

Cálculos teóricos indicam que para se deformar permanentemente um cristal perfeito, o esforço cortante ou de cisalhamento necessário é muito grande.

Como a prática demonstrou que o esforço necessário para produzir esse deslocamento de planos atômicos em relação a planos vizinhos é muito menor que o previsto pelos cálculos teóricos, deve-se admitir a presença de uma imperfeição. .

Essa imperfeição corresponde a um plano extra de átomos no interior da estrutura cristalina e é chamada "discordância de aresta" ou "plana" e está representada esquematicamente na figura 6, onde se nota a presença de uma aresta de um plano extra de átomos, donde a denominação "discordância de aresta".

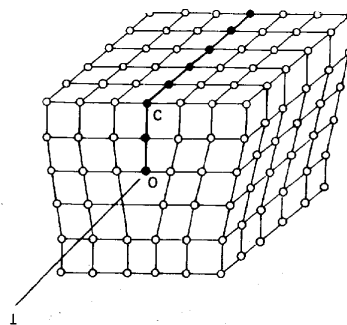


Figura 6 - Discordância de aresta ou plana

A discordância de aresta é acompanhada por zonas de compressão e de tensão, o que resulta em aumento de energia ao longo da discordância.

Submetendo-se o cristal da figura 6 a um esforço de cisalhamento suficientemente elevado e perpendicular à discordância, esta se move como mostra a figura 7, ocasionando uma deformação permanente.

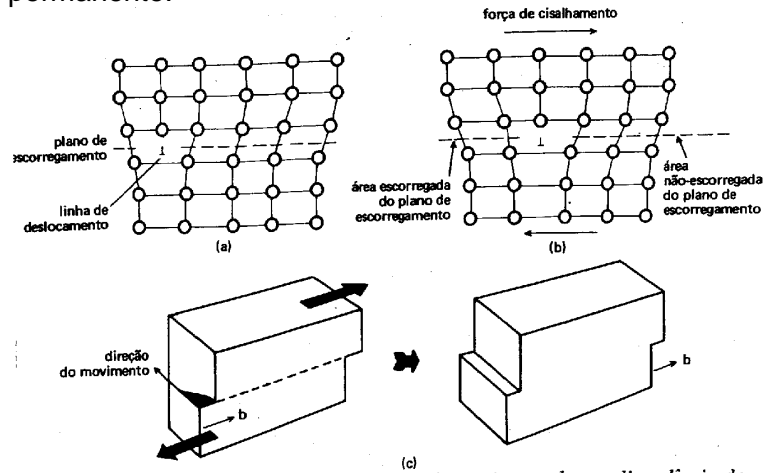


Figura 7 - Deformação permanente que resulta do movimento de uma discordância de aresta

Em (a) da figura, mostra-se o arranjo atômico nas vizinhanças da discordância de aresta, antes de se aplicar o esforço; em (b), indica-se o arranjo atômico, depois de aplicado o esforço que provocou o movimento da discordância de uma distância interatômica; em (c) está, indicado o aspecto do cristal, durante e após a aplicação do esforço de deformação.

Vê-se, pois, que a aplicação do esforço de cisalhamento ocasionou o movimento da discordância de aresta; a contínua aplicação do esforço provoca deslocamentos sucessivos, de modo que se a discordância se movimentar através de um cristal inteiro, a metade superior do cristal será deslocada de um espaçamento atômico, como mostra a parte (c) da figura 7

Costuma-se dizer nesse caso, que o deslocamento foi correspondente a um “vetor de escorregamento”, também chamado “vetor Burgers b ” o qual define a quantidade e a direção do deslocamento verificado.

Na discordância de aresta, a grandeza do vetor Burgers corresponde ao espaçamento atômico. O vetor Burgers, no deslocamento de aresta, é sempre perpendicular à linha de discordância.

Normalmente, os metais apresentam ambos os tipos de imperfeições: de ponto e de aresta, os quais interagem entre si.

Nas vizinhanças de uma discordância de aresta, os átomos ficam comprimidos acima da linha ou plano de deslocamento e, abaixo desse plano, ficam mais separados. Essas regiões do cristal se caracterizam, pois, por estarem sob compressão ou sob tensão, como já foi mencionado. Nessas condições, átomos intersticiais de maior diâmetro que os átomos de reticulado normal tendem a segregar-se na região sob tensão, onde há mais espaço para a sua localização. Do mesmo modo atuam os átomos substitucionais, porque os interstícios na região de tensão são maiores. Contudo, átomos substitucionais menores tendem a segregar na região sob compressão.

De qualquer modo, a interação dessa impureza resulta numa maior dificuldade de se movimentar uma discordância, o que significa que para deformar um metal impuro (ou liga metálica) são necessários maiores esforços de cisalhamento.

O segundo tipo básico de discordância é a “discordância em espiral” ou “em hélice”, representada esquematicamente na figura 8

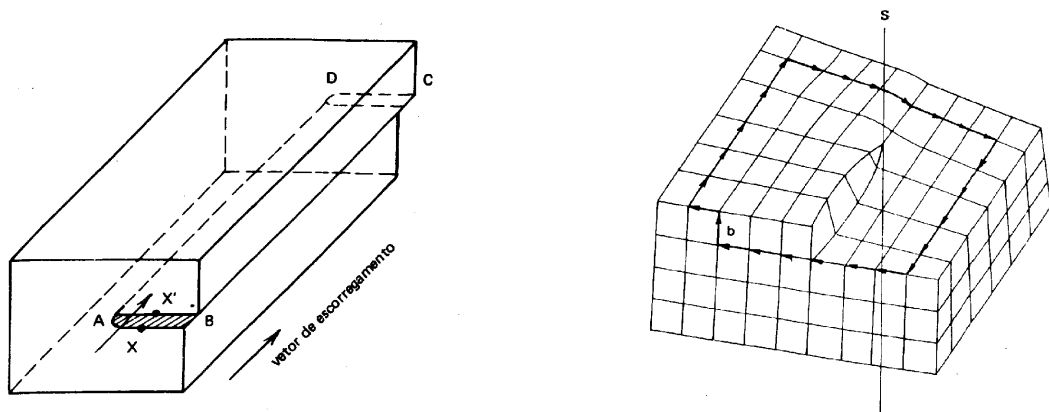


Figura 8 Representação esquemática da discordância em hélice produzida por escorregamento em um reticulado cúbico simples

Nota-se que a linha de discordância AD é paralela à direção de escorregamento, ao contrário do que ocorre na discordância de aresta.

Como resultado, a parte superior do cristal, à direita da linha AD, move-se em relação à parte inferior, na direção do vetor de escorregamento.

À esquerda da linha AD não ocorreu qualquer escorregamento.

Esse tipo de imperfeição é melhor compreendido, se, na figura 8, traçar-se um circuito ao redor da linha de discordância, na face frontal do cristal.

Partindo do ponto X e completando o circuito, chega-se ao ponto X' situado a um plano atômico atrás daquele que contém X. Ao completar esse circuito, traçou-se o curso de uma espiral.

Cada vez que se completa um circuito em redor da linha de discordância, um novo curso em espiral é traçado; desse modo, os planos atômicos ficam disposto em redor da discordância na forma de uma rampa em espiral ou de um parafuso.

1.2.3 Mecanismo da deformação plástica

1.2.3.1 Escorregamento mediante movimento de discordância

O mecanismo simples de cisalhamento que leva à deformação plástica dos metais faria supor que a resistência que esses materiais oferecem à deformação deveria ser muito maior do que o que se verifica na prática. Assim, ao procurar-se uma explicação para esse fato, conclui-se que um mecanismo mais complexo deve estar interferindo. A experiência levou à consideração de um mecanismo envolvendo o movimento de discordâncias.

De fato, como o deslizamento de planos internos de átomos significaria a ruptura simultânea de um enorme número de ligações atômicas, exigindo forças excessivamente grandes para a deformação, tornou-se mais lógico admitir que o escorregamento ocorre em

etapas ou degraus, de modo a envolver apenas pequenos segmentos de um plano atômico em cada degrau.

A presença ou o aparecimento de discordâncias no cristal permite esse escorregamento, como mostra a figura 9

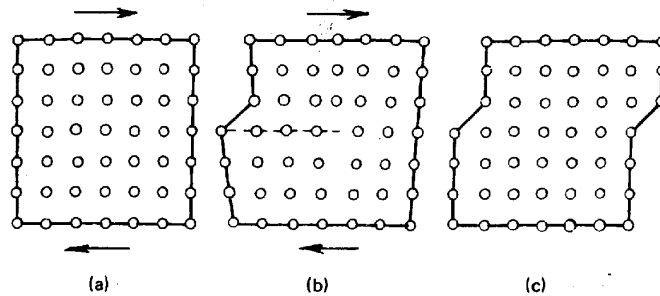


Figura 9 Movimento de uma discordância de aresta no escorregamento plástico

O escorregamento ocorre na parte inferior do cristal. Essa explicação torna-se mais clara acompanhando a figura 10

Para um reticulado perfeito, todos os átomos no plano inferior estão em posições em que há uma energia mínima. Assim, se os átomos do plano superior são deslocados para a direita, por exemplo, em relação aos do plano inferior, cada átomo encontra a mesma força que se opõe ao deslocamento. O reticulado imperfeito mostra uma discordância em aresta, traduzida por um plano extra de átomos, entre 4 e 5. Os átomos mais distanciados do centro da discordância, posições 1 e 9 ou 2 e 8, estão em posições correspondentes à energia mínima; os do centro, não. Se considerar, agora, pares de átomos, 4 e 5, 3 e 6, localizados simetricamente em lados opostos do centro da discordância, verifica-se que eles encontram forças que são iguais e opostas. Em consequência, se os átomos próximos do centro da discordância são forçados a deslocar-se de distâncias iguais, metade encontra forças que se opõe ao deslocamento e metade forças que ajudam esse deslocamento. Assim, a tensão exigida para deslocar a discordância de uma distância atômica é muito pequena.

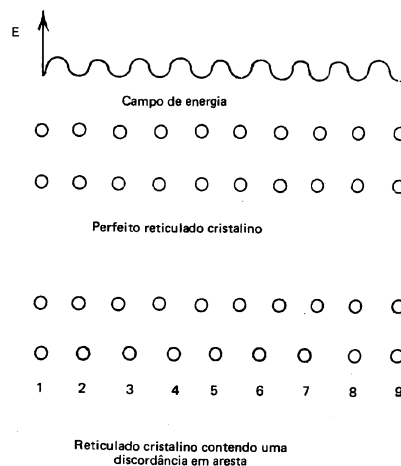


Figura 10 - Representação esquemática do movimento de uma discordância atravessando reticulado cristalino.

Além deste mecanismo de deformação existe ainda as deformações por maclação que não são objeto deste material.

1.2.3.2 Deformação dos metais policristalinos

A presença de contornos de grão interfere, como seria de prever, no comportamento dos metais, quando sujeitos à deformação. Assim sendo, nos metais policristalinos, como ocorre geralmente, o tamanho de grão é um dos fatores importantes a considerar na sua deformação plástica, assim como nas suas propriedades mecânicas.

Como já se mencionou, o contorno de grão pode ser considerado como uma região conturbada da estrutura cristalina dos metais. Sua espessura é de apenas alguns diâmetros atômicos.

A deformação, quando aplicada nos metais policristalinos, ocorre no interior dos grãos, de acordo com os princípios já estudados. Ao passar de um grão para outro, a orientação cristalográfica muda abruptamente. Os grãos mais favoravelmente orientados em relação à direção do esforço aplicado, deformam-se em primeiro lugar, o que causa um aumento da resistência para posterior deformação, devido a um fenômeno chamado “encruamento”, que será estudado mais adiante. Em seguida, deformam-se os grãos menos favoravelmente orientados. A deformação, em geral, não prossegue através dos contornos dos grãos. Numa primeira aproximação, pode-se dizer que esses contornos constituem uma região de maior resistência mecânica. Na realidade, pode-se explicar essa maior resistência à deformação pelo fato de tratar-se de uma região extremamente conturbada, devido ao quase embaralhamento dos átomos provenientes dos reticulados adjacentes ao contorno. A mudança de orientação de um grão para outro explica igualmente a maior resistência do contorno.

Do mesmo modo que a policristalinidade confere aumento de resistência à deformação, o tamanho de grão atua de modo idêntico, no sentido de que, à medida que diminui o tamanho de grão, aumenta a resistência à deformação mecânica figura 11.

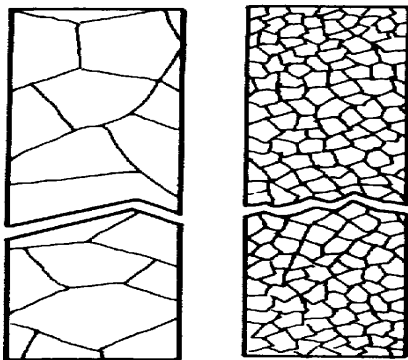


Figura 11 - Efeito do tamanho de grão na ruptura do metal

De fato, somente a componente da força paralela ao plano de escorregamento atuante em cada grão é eficiente e quanto menor o tamanho de grão mais freqüente é a mudança da direção de escorregamento, o que torna mais difícil a deformação.

Em outras palavras, sendo os contornos de grãos mais resistentes, quanto maior a quantidade de contornos, ou seja, quanto menor o tamanho de grão, maior a resistência do metal ao esforço de deformação.

Contudo, a ruptura dos contornos pode ocorrer em determinadas condições, como por exemplo por ação da corrosão.

1.2.4 Deformação a frio e deformação a quente

O esforço mecânico que leva à deformação e que se traduz pela realização de um trabalho mecânico, pode ser levado a efeito em condições diferentes de temperatura, desde a temperatura ambiente até altas temperaturas, inferiores, entretanto, às de fusão dos metais.

Costuma-se distinguir o "trabalho mecânico a frio" do "trabalho mecânico a quente", por uma temperatura indicada como "temperatura de recristalização", característica de cada metal e definida como "a menor temperatura na qual uma estrutura deformada de um metal trabalhado a frio é restaurada ou é substituída por uma estrutura nova livre de tensões, após a permanência nessa temperatura por um tempo determinado".

A deformação plástica resultante do trabalho mecânico a frio abaixo da temperatura de recristalização, ainda que superior à ambiente, provoca o chamado fenômeno de "encruamento" cujos efeitos são traduzidos por uma deformação da estrutura cristalina e modificação das propriedades mecânicas do material, efeitos esses tanto mais intensos, quanto maior a intensidade do esforço mecânico a frio.

O trabalho a frio produz, pois, uma deformação geral dos grãos, como está demonstrado na figura 12



Figura 12 - Representação esquemática do efeito do encruamento.

Os grãos alongam-se na direção do esforço mecânico aplicado, menos intensamente (laminado a frio) ou mais intensamente (severamente estirado).

Como resultado da deformação mecânica a frio intensa, ocorrem apreciáveis movimentos das imperfeições cristalinas, principalmente discordâncias, ao longo dos planos de deslizamento. Forma-se como que um rendilhado tridimensional de discordâncias que, juntamente com a distorção dos planos de escorregamento impedidos de avançar pelos contornos dos grãos adjacentes, provoca uma desordem no modelo cristalino normal, tornando mais difícil o escorregamento posterior e afetando assim as propriedades mecânicas. É esse o fenômeno de "encruamento".

A tabela a mostra o efeito do encruamento sobre algumas das características mecânicas de diversos metais e ligas metálicas.

Tabela A EFEITO DO ENCRUAMENTO SOBRE CARACTERÍSTICAS MECÂNICAS DE ALGUNS METAIS E LIGAS

Liga	Estado	Propriedades mecânicas			
		Resistência à tração		Alongamento %	Dureza Brinell
		kgf/mm ²	MPa		
Aço doce (AISI 1010)	Normal	33,6	336	38	doce 120
	Trabalhado a frio, 90%	91,0	910	2	265
Aço inoxidável (301)	Normal	77,0	770	60	165
	Severamente laminado a frio	129,5	1295	9	380
Alumínio puro	Normal	9,1	91	40	23
	Severamente trabalhado a frio	16,8	168	10	44
Latão para cartuchos	Normal	33,6	336	55	70
	Trabalhado a frio	77,0	770	14	155

Como se vê a resistência mecânica e a dureza aumentam, ao passo que o alongamento (uma das características representativas da ductilidade), diminui.

Do mesmo modo que as propriedades mecânicas, certas outras características físicas são alterados pelo encruamento. A condutibilidade elétrica, por exemplo, decresce.

No estado encruado, verifica-se aumento da energia interna do material, o que leva a uma diminuição geral da resistência à corrosão. Em certas ligas pode-se verificar um fenômeno de fissuração chamado "fissuração sob tensão por corrosão".

Finalmente, resulta no material encruado um estado de elevadas tensões internas, explicado pelo aumento do número de discordâncias e sua interação.

Admite-se, de fato, que um metal no estado normal (recozido) contém cerca de 10^6 a 10^8 discordâncias por centímetro quadrado, enquanto que um metal severamente encruado contém cerca de 10^{12} discordâncias por centímetro quadrado.

A figura 13 representa esquematicamente a variação das propriedades de resistência à tração e de ductilidade (alongamento e estrição), em função do encruamento.

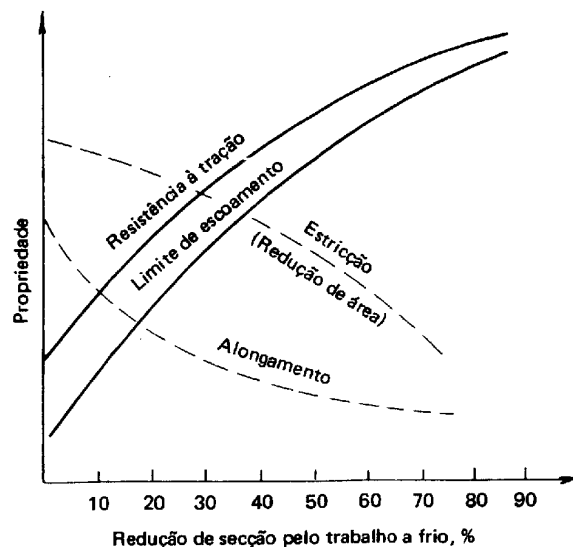


Figura 13 - Efeito do encruamento nas propriedades mecânicas dos metais.

1.2.4.1 Recristalização

As propriedades e a estrutura do metal alteradas pelo trabalho a frio podem ser recuperadas ou devolvidas ao estado anterior ao encruamento mediante um tratamento térmico de "recristalização" ou "recozimento".

De fato, à medida que se aumenta a temperatura, o estado encruado torna-se cada vez mais instável: a condição de elevada energia interna tende a desaparecer e o metal tende a voltar à condição livre de energia, resultando num amolecimento (queda de dureza) e isenção paulatina das tensões internas.

Na realidade, o processo de recozimento compreende três etapas:

- recuperação
- recristalização
- aumento do tamanho de grão.

Essas três etapas estão representadas esquematicamente na figura 14

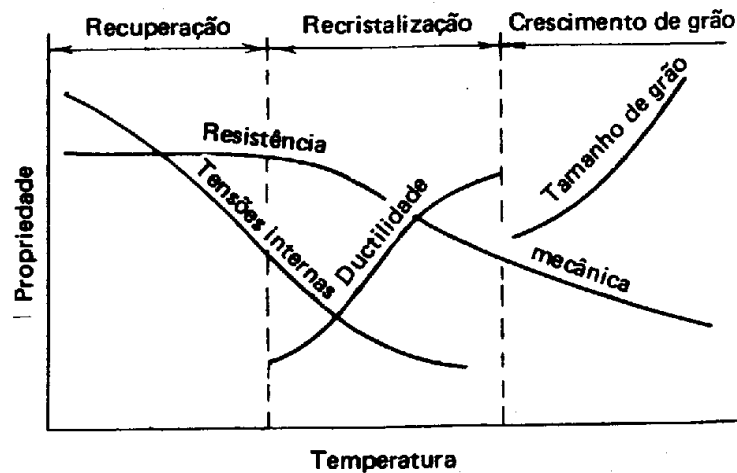


Figura 14 - Mudança das propriedades mecânicas com o aumento da temperatura

O principal efeito da recuperação é o alívio das tensões internas, restaurando-se ao mesmo tempo certas características físicas alteradas, sem que a microestrutura do metal sofra qualquer modificação; a condutibilidade elétrica aumenta rapidamente.

Embora não haja modificação estrutural sensível durante a recuperação, nota-se aparentemente um pequeno rearranjo das discordâncias à configurações mais estáveis, sem muita modificação no número total de discordâncias presentes.

O alívio de tensões mencionado corresponde principalmente às macro tensões, ou seja, às tensões elásticas que existem, em estado de equilíbrio, em grandes áreas do metal. Se esse equilíbrio é rompido, haverá uma redistribuição das tensões, representada, na prática, por um empenamento. Um tubo estirado a frio, se for cortado, abre no corte, aumentando de diâmetro.

Metais encruados e aquecidos na faixa de recuperação sofrem o tratamento térmico conhecido com o nome de "recozimento para alívio de tensões".

Na etapa da recristalização, decresce a densidade das discordâncias e as propriedades relacionadas com a resistência mecânica, inclusive a dureza, caem, rapidamente, a ductilidade melhora e todas as tensões são totalmente eliminadas. A estrutura é inteiramente reconstituída (recristalizada).

A

tabela b mostra a temperatura de recristalização de alguns metais, em comparação com sua temperatura de fusão.

1.2.4.2 Crescimento de grão

A temperatura continuando a aumentar, os grãos cristalinos, inteiramente livres de tensões, tendem a crescer. Esse crescimento de grão é também favorecido pela permanência a temperaturas acima da de recristalização. Um excessivo aumento de grão pode afetar as propriedades dos metais, pois, como se viu, grãos grandes são desfavoráveis.

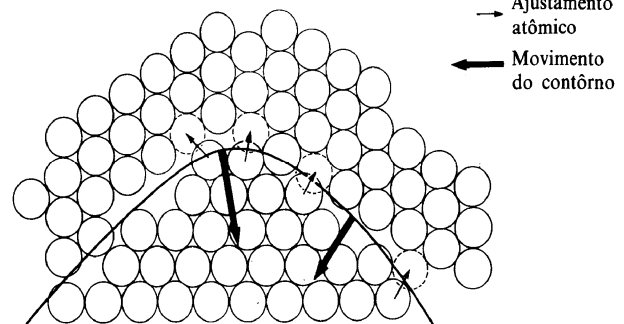
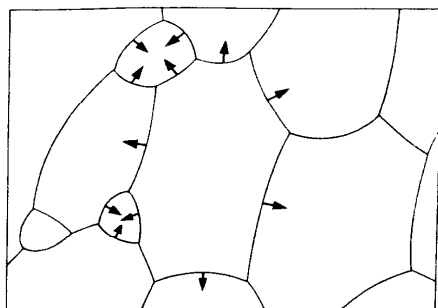
A força que leva ao crescimento de grão é a energia que é libertada à medida que os átomos se movimentam através dos contornos de grão.

Essa movimentação de átomos se dá em direção à superfície côncava onde eles são mais estáveis. Em consequência, há uma tendência do contorno de grão movimentar-se em direção ao centro de curvatura do grão, como a figura 15 mostra esquematicamente.

Tabela B - TEMPERATURA DE RECRISTALIZAÇÃO DE ALGUNS METAIS

Metal	Temperatura de recristalização °C	Temperatura de fusão °C
estanho	abaixo temperatura ambiente	232
cádmio	em torno temperatura ambiente	321
chumbo	abaixo temperatura ambiente	327
zinco	temperatura ambiente	420
alumínio	150	660
magnésio	200	650
prata	200	960
ouro	200	1063
cobre	200	1083
ferro	450	1536
platina	450	1769
níquel	600	1450
molibdênio	900	2610
tântalo	1000	3600
tungstênio	1200	3410

Como os grãos menores tendem a apresentar superfícies de convexidade mais aguda do que os grãos maiores, eles tendem a desaparecer, alimentando assim os grãos maiores.



→ Ajustamento atômico
← Movimento do contorno

Figura 15 - Crescimento de grão

O aumento da temperatura ou o aumento do tempo de permanência em uma temperatura acima da de recristalização favorece o crescimento de grão. Já um decréscimo na temperatura diminui a velocidade ou interrompe o processo, mas não o inverte.

A única maneira de diminuir ou refinar o tamanho de grão consiste em deformar plasticamente os grãos existentes e iniciar a formação de novos grãos.

A recristalização é afetada pelos seguintes fatores:

- quantidade de deformação (ou encruamento) inicial;
- temperatura ;
- tempo à temperatura
- tamanho de grão inicial ;
- composição química (do metal ou liga) ;
- quantidade de recuperação inicial.

Em relação a essas variáveis, pode-se estabelecer os seguintes fatos:

- para ocorrer recristalização, é suficiente uma quantidade mínima de encruamento; entretanto, quanto menor o encruamento inicial mais elevada deve ser a temperatura para promover a recristalização;
- aumentando o tempo, diminui a temperatura de recristalização; a temperatura, contudo, é fator mais importante do que o tempo;
- quanto maior o grau de encruamento e quanto menor a temperatura de aquecimento, menor o tamanho de grão resultante;
- a temperatura de recristalização diminui, à medida que o metal. é mais puro assim. ligas do tipo solução sólida apresentam maiores temperaturas de recristalização.

A grande importância do recozimento dos metais encruados reside no fato de que as operações de conformação mecânica podem ser levadas a extremos, interpondo-se operações de recozimento que restauram a ductilidade do material ou sua capacidade de deformação.

Sendo o trabalho a quente realizado a temperatura acima da de recristalização, os fenômenos de aumento de dureza devido à deformação e amolecimento, devido ao recozimento, ocorrem simultaneamente. A estrutura cristalina, em outras palavras, deforma-se e permanece deformada somente enquanto o metal está sendo submetido ao trabalho mecânico, ficando totalmente restaurada assim que este cessar. E o mesmo ocorre com as propriedades mecânicas.

A importância prática do "trabalho a quente" reside no fato de que ele constitui a primeira etapa do processo metalúrgico de conformação mecânica. As razões, muitas das quais óbvias, são as seguintes:

- a energia necessária para deformar é menor;
- o metal adquire maior capacidade de deformar-se sem fissuração;
- algumas heterogeneidades das peças (ou lingotes) como porosidade, bolhas etc., são praticamente eliminadas pelo trabalho a quente;
- a estrutura granular "dendrítica", ou seja, grosseira, colunar e pouco uniforme, típica de peças fundidas, é rompida e transformada em grãos menores;
- alguns metais dificilmente são deformados a frio sem fissurar; exemplos, tungstênio, molibdênio e outros.

O trabalho a quente, embora não exerça a mesma influência que o trabalho a frio sobre a estrutura e as propriedades mecânicas, produz uma estrutura superior à correspondente de peças fundidas. -

A temperatura para o trabalho a quente não deve situar-se muito acima da temperatura de recristalização da liga, principalmente no que diz respeito à temperatura de "fim de trabalho". Isso porque, durante o resfriamento posterior, pode-se verificar

crescimento de grão, enquanto o metal estiver a uma temperatura superior à de recristalização.

Do mesmo modo, a temperatura de "fim de trabalho" não pode cair abaixo da temperatura de recristalização, sob pena de, a partir desse instante, o material estar sendo submetido a trabalho mecânico a frio e, se sua plasticidade não for suficiente, ele poderá romper.

Resumindo, as vantagens e desvantagens do trabalho a quente e a frio são:

- o trabalho a quente permite o emprego de menor esforço mecânico e, para a mesma quantidade de deformação, as máquinas necessárias são de menor capacidade que no trabalho a frio;

- a estrutura do metal é refinada pelo trabalho a quente, de modo que sua tenacidade melhora; o trabalho mecânico a frio deforma a estrutura, em maior ou menor profundidade, conforme a extensão do trabalho e, em consequência, pode alterar sensivelmente as propriedades mecânicas: resistência e dureza aumentam; ductilidade diminui. Tais alterações podem ser úteis em certas aplicações ou devem ser eliminadas por recozimento;

- o trabalho a quente melhora a tenacidade, porque, além de refinar a estrutura, elimina a porosidade e segrega as impurezas; escória e outras inclusões são comprimidas na forma de fibras, com orientação definida, o que torna o metal mais resistente numa determinada direção ;

- o trabalho a quente deforma mais profundamente que o trabalho a frio, devido à continuada recristalização que ocorre durante o processo;

- o trabalho a quente, entretanto, exige ferramental (cilindros, matrizes, dispositivos de adaptação etc.) de material de boa resistência ao calor, o que pode afetar o custo da operação;

- outra desvantagem do trabalho a quente corresponde à oxidação e formação de casca de óxido, devido às elevadas temperaturas envolvidas no processo ;

- o trabalho a quente não permite, ainda, a obtenção de dimensões dentro de estreitas tolerâncias;

- o trabalho a frio não apresenta tais desvantagens; além disso, produz melhor acabamento superficial.

O trabalho mecânico, além do efeito do encruamento, quando realizado a frio, pode produzir certas anomalias, que se deve procurar evitar ou corrigir.

Dois exemplos dessas anomalias são a chamada casca de laranja e as linhas de Luder ou de distensão.

O defeito casca de laranja, resultante eventualmente da estampagem de chapas, é relacionado com o tamanho de grão do material. Esse defeito ocorre em chapas de metal cuja granulação é muito grande e é caracterizado por uma superfície extremamente rugosa, nas regiões que sofreram deformação apreciável. O defeito resulta do fato de que os grãos individuais tendem a deformar-se independentemente uns dos outros, de modo que eles ficam em relevo na superfície da chapa. Essa rugosidade permanece visível mesmo após recobrimento superficial protetor ou pintura.

Se a granulação do metal for fina, não ocorre a referida rugosidade, pois os grãos menores deformam-se como um todo e é difícil distinguir-se a olho nu grãos individuais.

O defeito linhas de distensão pode ocorrer em chapas de aço de baixo carbono, quando o material é deformado na faixa de escoamento. O defeito corresponde a depressões que aparecem, em primeiro lugar, ao longo dos planos de máxima tensão de cisalhamento que como se sabe são planos inclinados de 45° em relação à tensão principal; à medida que a deformação continua, as depressões se espalham e acabam se juntando, de modo a produzir uma superfície áspera.

A solução usual para evitar este defeito é submeter a chapa de aço em ligeira laminação a frio, correspondente a uma redução na espessura de 0,5 a 2,0%. O

encruamento resultante elimina o ponto de escoamento, não se verificando o aparecimento de linhas de distensão em deformação subsequente.

2. LAMINAÇÃO

A laminação é um processo de conformação onde o metal é obrigado a passar entre dois cilindros, girando em sentidos opostos, com a mesma velocidade tangencial e distanciados entre si de um valor menor que a espessura do material a ser deformado.

Ao passar entre os cilindros, o metal sofre de formação plástica; a espessura é reduzida e o comprimento e a largura são aumentados

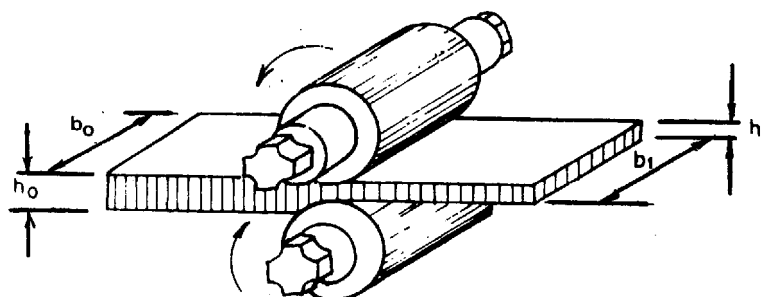


Figura 16 Representação esquemática do processo de laminação.

2.1 Força e relações geométricas na laminação

A figura 17 mostra, a zona de deformação e as forças atuantes no momento do contato do metal com os cilindros de laminação.

Cada cilindro entra em contato com o metal segundo o arco AB que se chama arco de contato. A esse arco corresponde o ângulo chamado ângulo de contato ou de ataque.

Chama-se zona de deformação a zona à qual corresponde o volume de metal limitado pelo arco AB, pelas bordas laterais da placa sendo laminada e pelos planos de entrada e saída do metal dos cilindros.

O ângulo de contato é dado pela fórmula

$$\cos \alpha = 1 - \frac{h_0 - h_1}{2R}$$

Como se vê, o ângulo de contato se relaciona com a redução $(h_0 - h_1)$ e o diâmetro $2R$ dos cilindros.

O metal, de espessura h_0 , entra em contato com os cilindros no plano AA à velocidade v_0 e deixa os cilindros, no plano BB, com a espessura reduzida para h_1 .

Admitindo que não haja alargamento da placa, a diminuição de altura ou espessura é compensada por um alongamento, na direção da laminação. Como devem passar, na unidade de tempo, por um determinado ponto, iguais volumes de metal, pode-se escrever:

$$b_0 h_0 v_0 = b h v = b_1 h_1 v_1$$

onde b é a largura da placa, v a velocidade e h a espessura.

Para que um elemento vertical da placa permaneça indeformado, a equação acima exige que a velocidade na saída v_1 seja maior que a velocidade de entrada v_0 . Portanto, a velocidade da placa cresce da entrada até a saída. Ao longo da superfície ou arco de contato, entre os cilindros e a placa, ou seja, na zona de deformação, há somente um ponto onde a velocidade periférica V dos cilindros é igual à velocidade da placa. Esse ponto é chamado ponto neutro ou ponto de não deslizamento e o ângulo central γ é chamado ângulo neutro.

A figura 17 mostra que duas forças principais atuam sobre o metal, quer na entrada, quer em qualquer ponto da superfície de contato. Essas forças são: uma força normal ou radial N e uma força tangencial T , também chamada força de atrito.

Entre o plano de entrada AA e o ponto neutro D , o movimento da placa é mais lento que o da superfície dos cilindros e a força de atrito atua no sentido de arrastar o metal entre os cilindros. Ao ultrapassar o ponto neutro D , o movimento da placa é mais rápido que o da superfície dos cilindros. Assim, a direção da força de atrito inverte-se, de modo que sua tendência é opor-se à saída da placa de entre os cilindros.

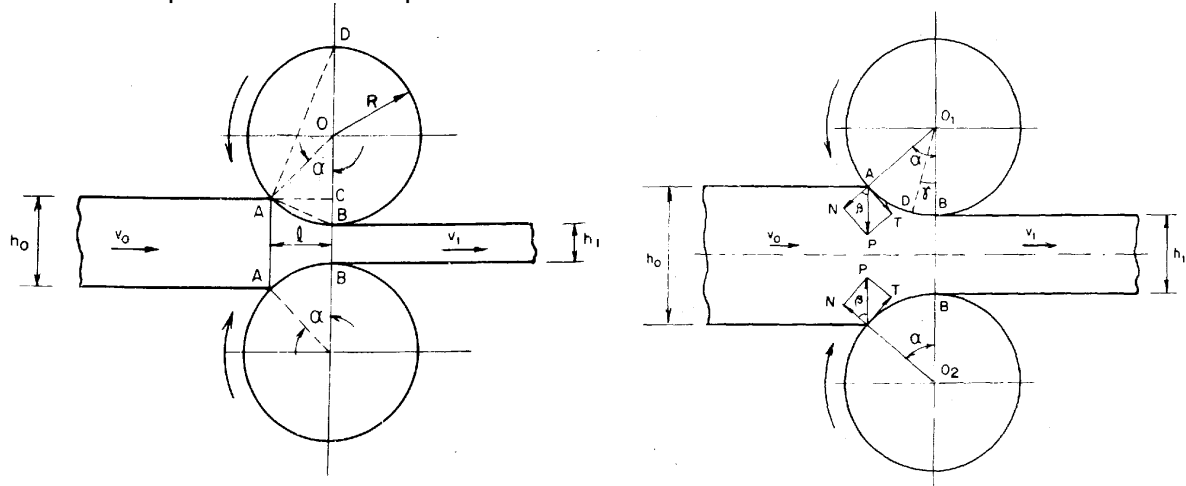


Figura 17 - Zona de deformação e esquemas de força durante a laminação

Para garantir que a placa se movimente em direção aos rolos é necessário que:

$$T \cos \alpha \geq N \sin \alpha$$

$$\frac{T}{N} \geq \frac{\sin \alpha}{\cos \alpha}$$

$$T = \mu N$$

$$\mu \geq \tan \alpha$$

Com base nesta relação e fazendo-se algumas simplificações chegamos a:

$$\Delta h_{\max} \approx \mu^2 R$$

Que define uma relação aproximada entre o coeficiente de atrito (μ), a máxima redução permitida no laminador e o diâmetro do rolo de laminação. O coeficiente de atrito na laminação a quente de aço, pode assumir valores de no mínimo 0.2, já na laminação a frio com lubrificante μ varia de 0.05 a 0.10.

2.1.1 Força na Laminação

A pressão dos rolos durante a laminação varia ao longo do arco de contato cilindro/peça a figura 18 mostra este fato.

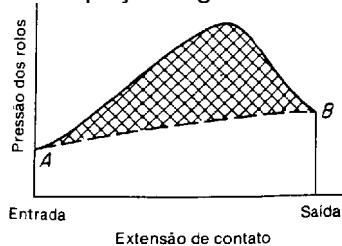


Figura 18 Distribuição da pressão dos rolos ao longo do arco de contato

O cálculo exato das forças de laminação é relativamente complexo, por isto são desenvolvidos alguns modelos simplificados para o cálculo da carga de laminação.

Um destes modelos apresentado por DIETER (1976), calcula a **carga média** de deformação e segundo este autor, o valor seria:

$$P = \frac{2}{\sqrt{3}} \bar{\sigma}_0 \left[\frac{1}{Q} (e^Q - 1) b \sqrt{R \Delta h} \right]$$

onde:

P = **carga média** de deformação [Kgf]

$\bar{\sigma}_0$ = tensão de escoamento média [Kgf/mm²]

$$Q = \frac{\mu \times l}{\bar{h}}$$

μ = coeficiente de atrito entre os rolos e a peça

l = comprimento do arco de contato projetado no eixo da peça [mm]

\bar{h} = espessura média entre entrada e saída dos rolos [mm]

b = largura da placa [mm]

R = raio dos rolos [mm]

Δh = redução de espessura da peça [mm]

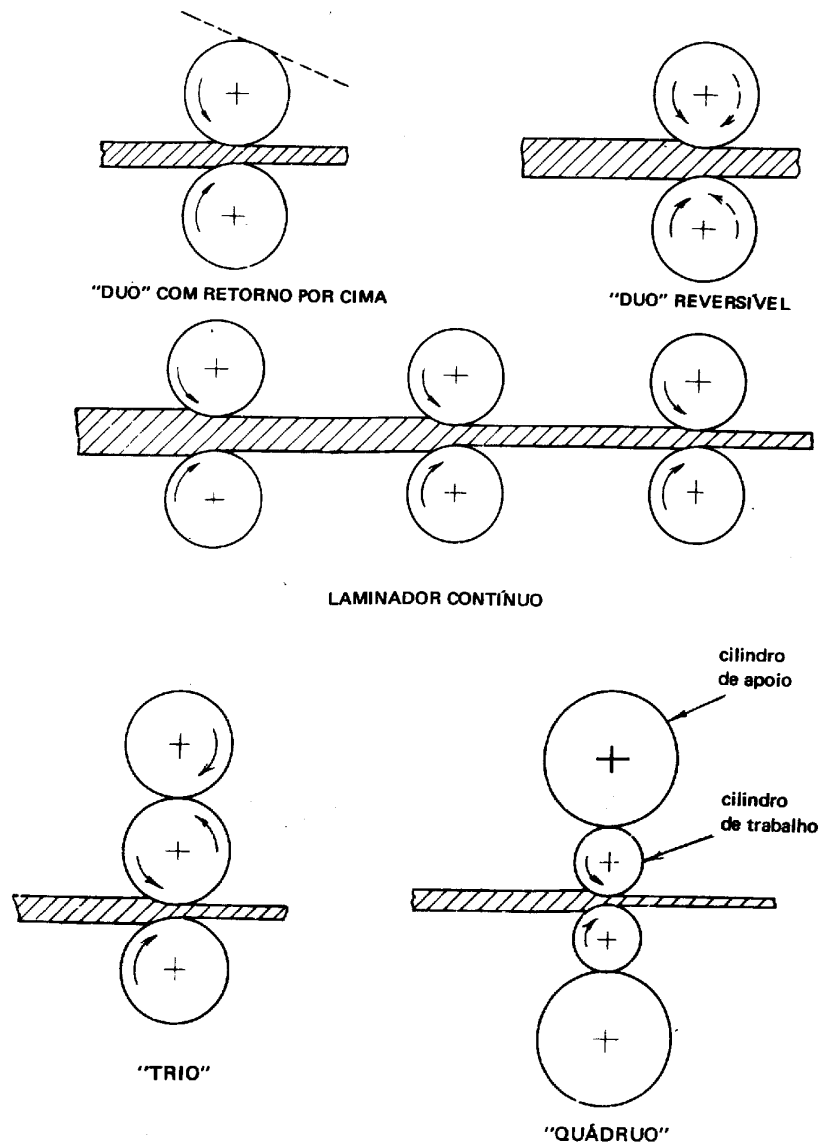
Da análise desta fórmula pode-se concluir duas coisas:

- a carga de laminação cresce com o diâmetro do rolo
- a carga de laminação cresce com a diminuição da chapa

Um outro fator que afeta a carga de laminação é a existência de tração a ré ou avante fornecida por um tracionador ou “empurrador” externo a cadeia de laminação. A existência desta força suplementar, diminui a carga de laminação.

2.2 Tipos de laminadores

Um laminador consiste basicamente em rolos laminadores, mancais, uma carcaça chamada de gaiola para fixar essas partes e um motor para fornecer potência aos rolos e controlar a velocidade de rotação. As forças envolvidas na laminação podem facilmente atingir milhares de toneladas, portanto é necessário uma construção bastante rígida, além de motores muito potentes para fornecer a potência requerida. Fica assim fácil de compreender por que numa moderna instalação de laminação gastam-se milhões de dólares de investimento e consomem-se muitas horas de projetos uma vez que esses requisitos são multiplicados para as sucessivas bancadas (ou cadeiras) de laminação contínua.



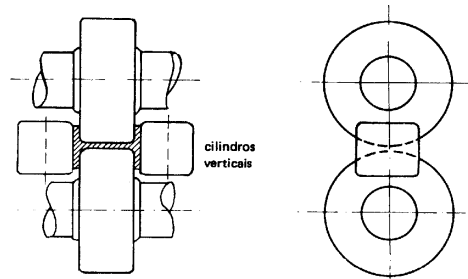
Tipos de laminadores.

Figura 19 Arranjo típicos de rolos para laminadores.

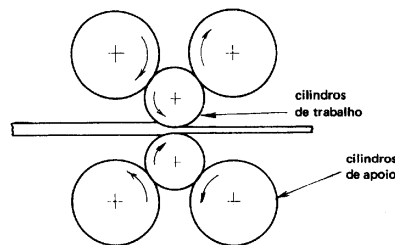
Os laminadores podem ser convenientemente classificados com respeito ao número e ao arranjo dos rolos. O tipo mais simples e mais comum de laminador é o laminador duo. Os rolos têm o mesmo diâmetro e giram somente num sentido. O material retorna para reduções posteriores por condução manual ou por meio de uma plataforma que pode ser elevada para transportar o material sobre os rolos. Uma melhora na velocidade do trabalho pode ser obtida através do uso do laminador duo reversível, na qual o material pode passar para a frente e para trás através dos rolos que invertem a sua direção de rotação. Uma outra solução é o uso do laminador trio, que consiste em um rolo condutor superior, um inferior e um rolo intermediário que gira por fricção.

Pode-se obter uma grande diminuição da potência necessária para os rolos condutores com o uso de rolos de pequeno diâmetro. Entretanto, uma vez que os rolos com pequenos diâmetros resistem menos, eles têm que ser suportados por rolos de encosto de diâmetros maiores. O laminador desse tipo mais simples é o quádruo. As folhas finas podem ser laminadas com tolerâncias muito estreitas num laminador desse tipo, que usa os rolos de trabalho com pequenos diâmetros. O laminador Sendzimir é uma modificação desses laminadores que se adapta muito bem à laminação de chapas finas de ligas de alta resistência.

Para produções em larga escala normalmente instalam-se uma série de laminadores um atrás do outro, formando assim um trem de laminação. Cada grupo de rolos é chamado de cadeira de laminação. Uma vez que em cada cadeira tem-se uma redução diferente, a tira movimenta-se com velocidades distintas em cada estágio da laminação. A velocidade de cada grupo de rolos está sincronizada de maneira que cada cadeira sucessiva pegue a tira com uma velocidade igual à velocidade de saída da cadeira precedente. A desenroladeira e a bobinadeira não cumprem apenas a função de fornecer o material para os rolos e recolher o produto final, mas também são usadas para fornecer uma tração a ré e uma tração avante na tira. Essas forças horizontais adicionais têm uma série de vantagens como a de diminuir a pressão de laminação como já comentado anteriormente.



LAMINADOR UNIVERSAL, TIPO GREY

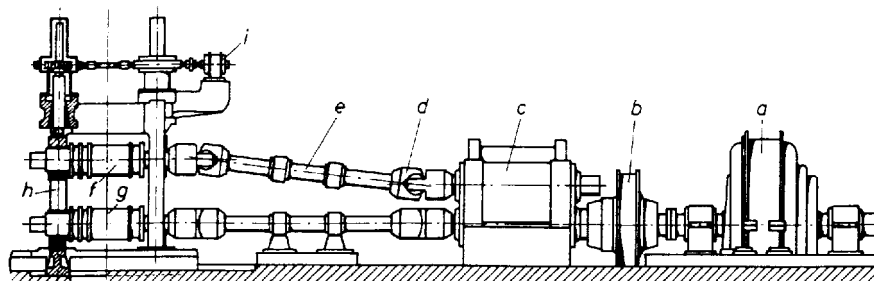


LAMINADOR TIPO SENDZIMIR

Figura 20 Laminador universal e Sendzim

2.2.1 Órgãos mecânicos de um laminador

As duas estruturas metálicas que constituem a cadeira de laminação são chamadas gaiolas, as quais, por meio de mancais, suportam os cilindros. Essas gaiolas são geralmente construídas em aço fundido e são ligadas entre si por peças fundidas ou forjadas.



Laminador. a) Motor de acionamento; b) embreagem; c) transmissão de engranagens (cilindros de pinhão); d) acoplamento; e) eixo intermediário; f) cilindro superior; g) cilindro inferior; h) colunas; i) motor de acionamento para ajuste do cilindro superior.

Figura 21 Exemplo típico de uma cadeira de laminação.

Os cilindros de laminação são peças inteiriças, fundidas ou forjadas que apresentam uma parte central chamada corpo, a qual executa o esforço direto de deformação. Essa parte pode ser lisa - para laminação de chapas - ou pode apresentar reentrâncias, de modo a permitir reduções ou conformações diferentes no mesmo cilindro. Essas reentrâncias, também chamadas caneluras, possibilitam, por exemplo, pelo emprego de passes sucessivos, a redução paulatina de seção de barras redondas, quadradas etc., por intermédio do mesmo par de cilindros ou no mesmo laminador.

Em cada extremidade do cilindro, ficam localizados os pescoços, que se apoiam nos mancais das gaiolas. Finalmente, para além dos pescoços, situa-se o trevo, que é a parte que recebe o acoplamento para rotação.

Nos laminadores modernos são utilizadas juntas universais, de modo que o trevo é substituído por uma seção adequada ao desenho do acoplamento.

No topo da gaiola situam-se parafusos que controlam a elevação do cilindro superior, de modo a modificar a distância entre os dois cilindros e permitir reduções diferentes, conforme as necessidades de trabalho. Essa ajustagem dos cilindros é, geralmente, motorizada. Esses parafusos suportam a pressão da laminação.

2.3 Operações de laminação

A obtenção de perfis é realizada por meio de diversas fases, cada uma sendo realizada em um canal diferente do cilindro de laminação a figura 22 mostra um exemplo.

Os produtos laminados planos incluem chapas em geral (pretas, estanhadas; galvanizadas), tiras, barras, chatas etc. São obtidos em laminadores com cilindros de corpo plano; além disso, nesses produtos a relação da largura para a espessura é geralmente maior que no caso de outros produtos laminados.

Um exemplo de laminação de chapa de aço é o seguinte: - o lingote, depois de aquecido à temperatura de laminação, em fornos especiais, chamados fornos poço, é levado ao laminador de desbaste até produzir as placas que constituem o ponto de partida para a produção de chapas e outros produtos planos figura 23.

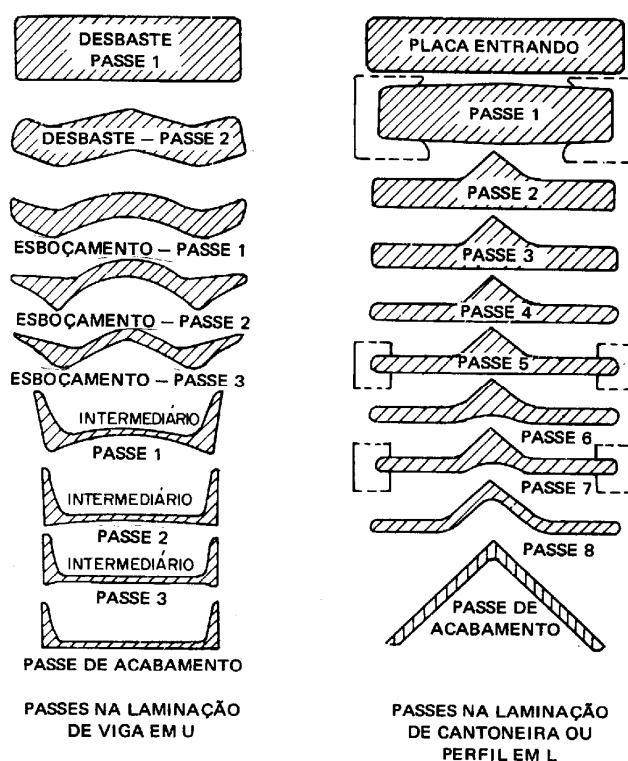


Figura 22 - Passes para a produção de perfis em "U" e em "L".

A placa, reaquecida em fornos de aquecimento de placas, passa inicialmente por um laminador tipo duo, cuja função é apenas quebrar a casca de óxido formada durante o seu aquecimento; nessa operação emprega-se um jato de água a alta pressão.

A seguir, por intermédio do transportador de roletes, a placa é encaminhada para o primeiro laminador de desbaste, tipo quádruo, de modo a sofrer uma redução em espessura e aumento de largura, se for necessária a produção de larguras maiores que da placa original. Antes e depois dessa primeira cadeira quádrua, existem mesas rotativas que giram a placa de 90°.para permitir o aumento de sua largura. Antes de entrar na segunda cadeira de desbaste, também tipo quádruo, a placa já reduzida na primeira laminação passa por um dispositivo de achatamento dos bordos.

A seguir, a placa passa por uma tesoura de corte a quente, antes de atingir a segunda gaiola de desbaste; esta consiste num laminador duo universal, possuindo, portanto, cilindros verticais para controle das extremidades, montados na entrada dessa segunda cadeira

Continuando sua trajetória, a placa passa por duas outras cadeiras desbastadoras, tipo quádruo universal.

Ao sair do último laminador desbastador, as placas percorrem uma mesa de roletes que as encaminha aos laminadores acabadores. Antes de entrar nestes, entretanto, passam por uma tesoura rotativa que corta as suas extremidades de modo a torná-las perfeitamente esquadradas. Sofrem ainda uma quebra de casca de óxido (que possa ter-se formado anteriormente), por intermédio de um laminador duo.

Finalmente, são encaminhadas ao conjunto acabador de cadeiras, constituído de, por exemplo, seis laminadores quádruos, onde se processam reduções sucessivas. Assim, admitindo que as placas saídas do desbaste apresentem uma espessura de 28 mm [1,10"], as reduções obtidas serão as seguintes: 50% na primeira cadeira acabadora, 40% na segunda, novamente 40% na terceira, 35% na quarta, 15% na quinta e 10% na sexta, saindo com uma espessura de 2,5 mm (0,10").

As chapas são, a partir da última cadeira acabadora, enroladas em bobinas, pelo emprego de dispositivos denominados bobinadeiras

Para obtenção de menores espessuras, a laminação é prosseguida a frio; consegue-se nesse processo, reduções de espessura de 25 a 99%, além de uma superfície mais densa e macia.

As bobinas são inicialmente submetidas ao processo de decapagem, que consiste na remoção química de casca de óxido da superfície do metal, mediante a ação de soluções aquosas de ácidos orgânicos

.No caso da decapagem de aço, utiliza-se uma solução diluída de ácido . sulfúrico. O produto resultante da reação dessa solução com o óxido de ferro é sulfato ferroso e

hidrogênio. A superfície do aço toma-se limpa, isenta de películas de óxido, as quais, se permanecessem durante a laminação a frio, dariam mau aspecto superficial e aumentariam a tendência à corrosão (enferrujamento).

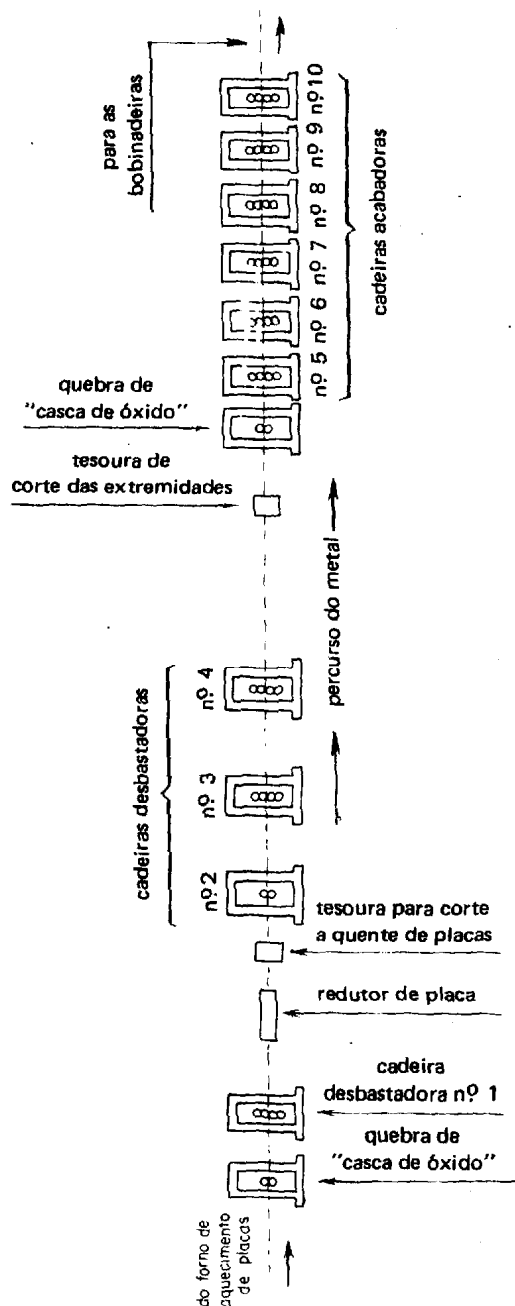


Figura 23 -Representação esquemática da disposição das cadeiras de laminação para a produção de bobinas de aço.

Após a laminação a frio e rebobinagem, as bobinas são geralmente recozidas, pelo processo *em caixa*, a temperaturas que promovam recristalização do material e anulem o efeito de encruamento ocorrido durante a deformação a frio.

No processo de decapagem contínua, a concentração do ácido varia de 12 a 25% e a temperatura do banho de decapagem de 90° a 105°C. Nesse processo, as bobinas produzidas na laminação a quente são inicialmente levadas a um dispositivo constituído de roletes que, sob pressão, quebram a casca de óxido superficial em pedaços finos, aumentando a área de óxido para o ataque posterior pela solução ácida. Simultaneamente, a bobina é endireitada e aplainada, verificando-se, também, um pequeno efeito de encruamento.

Uma tesoura corta as extremidades da bobina para torná-la em ângulo reto e permitir a soldagem do topo posterior.

Realizada a soldagem das extremidades, a bobina é levada aos diversos tanques de decapagem, em número de três a cinco geralmente. Segue-se lavagem em água fria e quente, secagem com ar quente, corte e recobrimento superficial com pequena camada de óleo, como proteção e para servir de lubrificação durante a laminação a frio e rebobinagem.

As bobinas decapadas são levadas aos laminadores para laminação a frio, os quais podem ser de vários tipos: quádruplo reversível, em que as bobinas desenroladas são laminadas num sentido e no outro entre os dois cilindros de trabalho, cuja distância vai

diminuindo até atingir-se a espessura final, ou pelo emprego de laminação contínua, em que são utilizadas três a cinco cadeiras quádruplas, sobretudo quando se deseja reduções a frio de 80 a 90%, como é o caso de folhas estanhadas, que apresentam uma espessura variável de 0,20 mm a 0,35 mm.

3. FORJAMENTO

O forjamento é o processo de transformação dos metais em uma forma útil, através da deformação plástica realizada por prensagem ou martelagem. Esta é a mais antiga arte de transformação de metais, sendo a sua origem ligada aos primitivos ferreiros dos tempos bíblicos. O desenvolvimento de maquinarias para substituir os braços do ferreiro ocorreu primeiro durante a revolução industrial. Hoje em dia, existe uma variedade muito grande de máquinas de forja, capazes de fazer peças que variam em tamanho desde um parafuso de um rotor de turbina até uma asa inteira de avião.

Comparadas com as peças fundidas, as peças forjadas podem receber dimensões menores devido a sua maior resistência mecânica. Nas peças forjadas as fibras são orientadas, os grãos se apresentam com uma estrutura mais fina, as porosidades inexistem, desta forma estas peças apresentam uma resistência mecânica superior às peças fundidas ou mesmo usinadas.

A maioria das operações de forja são realizadas a quente. Entretanto certos metais podem ser forjados a frio. Usam-se duas classes básicas de equipamentos para a operação de forja: o martelo de forjar que aplica golpes de impacto rápidos sobre a superfície do metal; e as prensas de forjar que submetem o metal a uma força compressiva aplicada relativamente de uma forma lenta.

De uma forma genérica pode-se dividir o forjamento em:

Forjamento Livre { Manual
Maquina

Forjamento em matriz { Com rebarba
Sem rebarba (Recalcagem)

Forjamento rotativo

3.1 Forjamento livre

Segundo a DIN 8583 Forjamento livre é conformar por pressão com ferramentas que se movimentam umas contra as outras e que não contêm a forma da peça ou somente a contêm em parte.

A moldagem livre é apropriada para a confecção de peças de tamanhos diversos, que devem receber formas simples e lisas com superfícies planas ou uniformemente redondas. Para o forjamento de peças pesadas de um tamanho da ordem de 100 toneladas a moldagem livre é a única possibilidade de fabricação.

O forjamento livre pode ser realizado com o auxílio da força muscular, quando então é denominado forjamento livre manual, ou com o auxílio das prensas ou máquinas de forjar, neste caso recebe a denominação de forjamento livre a máquina. Tanto numa

situação quanto outra, o formato da peça, assim como suas dimensões são obtidas pela habilidade do forjador em manipular as máquinas e as ferramentas, sendo portanto uma operação a ser realizada por profissional especializado.

No forjamento livre manual é comum o uso da bigorna (figura 24) como elemento de apoio. A bigorna é assentada sobre um bloco de concreto, ferro fundido ou ainda madeira e também se faz uso de diversas ferramentas como pode ser visto nas figuras a seguir.

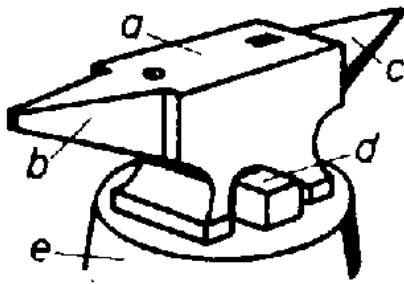


Figura 24 - Bigorna a)Mesa;
b)bigorna quadrada; c)bigorna redonda;
d)bloco de recalcar; e)base

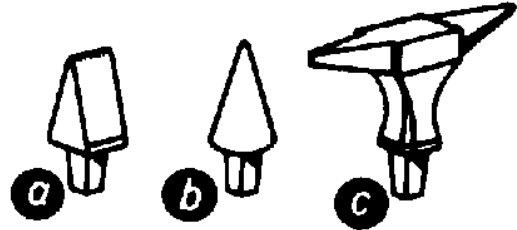


Figura 25 - Acessórios da bigorna
a)Cinzel para cortar; b)cone para arredondar;
c)bigorneta para trabalhos de forja pequenos. .
Estes acessórios são montados nos furos da bigorna

Para a sujeição da peça utilizam-se os alicates de forja também chamados de tenazes, que possuem bocas de vários formatos.

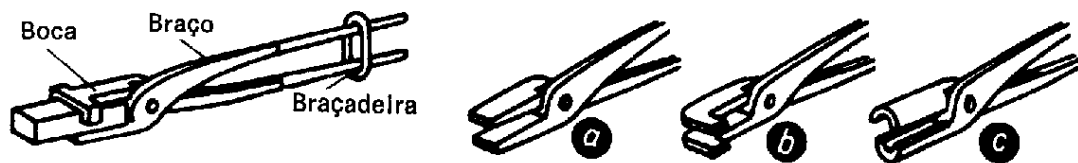


Figura 26 - Alicates a)Alicate de bico chato; b)Alicate de bico angular; c)Alicate de bico redondo. Para aliviar a mão muitas vezes é colocado um anel sobre os braços do martelo.

Diversos martelos podem ser utilizados para execução das operações de forjamento

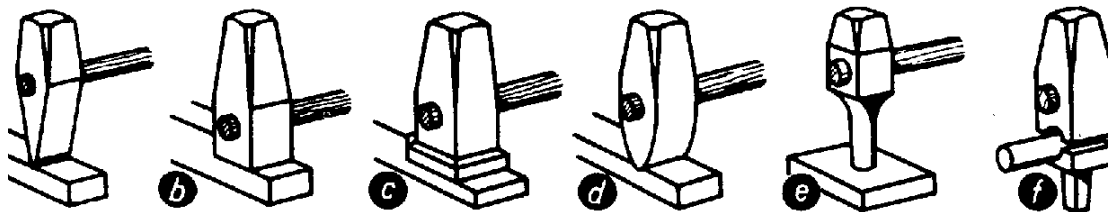


Figura 27 - Martelos de forjamento a)Cinzel; b)assentador; c)aplanador;
d)acanalador; e)puncionador; f)estampa superior e inferior

Desta forma, com o uso de ferramentas como exemplificada anteriormente e muita habilidade ;e possível a construção de peças forjadas.

Nas situações em que as peças já não são tão pequenas, ou ainda que se deseje maior produção o forjamento livre pode ser realizado com máquinas, neste caso a única mudança é que a força para a deformação não é mais muscular, ela é produzida por uma máquina, mas todo o controle da forma, dimensão e deformação é levado a cabo pelo forjador baseado na sua habilidade e conhecimento. As figuras a seguir mostram alguns exemplos de forjamento livre executados com máquinas.

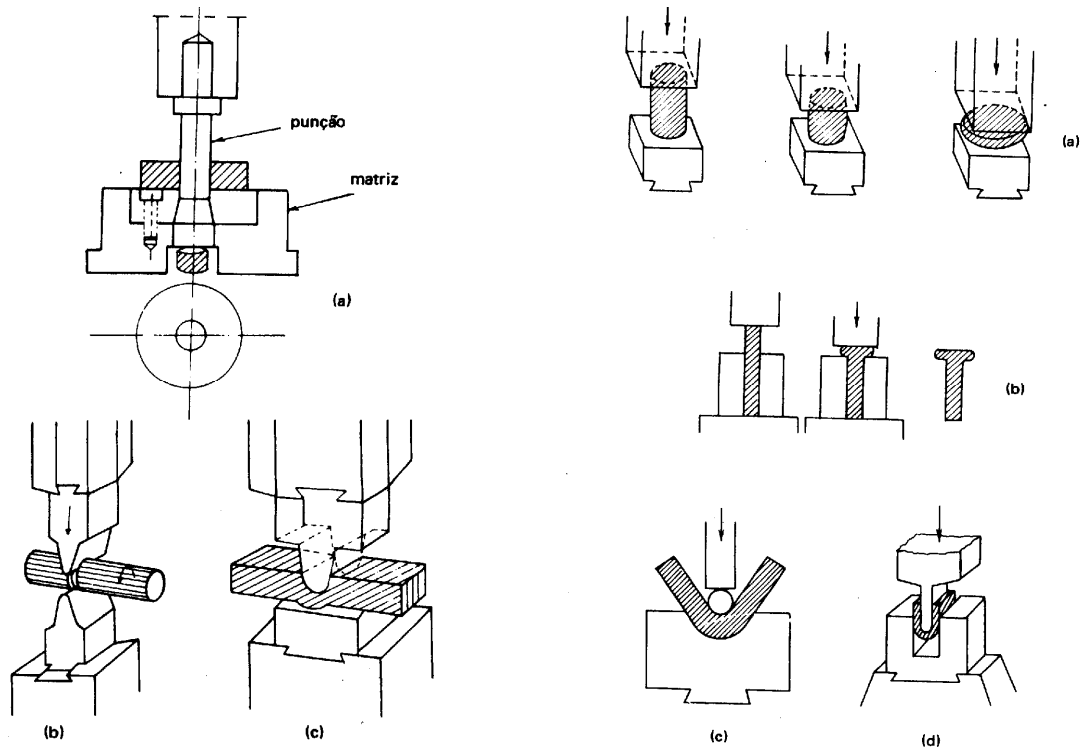


Figura 28 - a) furação a quente; b) corte; c) estrangulamento

Figura 29 - a) esmagamento; b) conformação de uma flange; c) e d) dobramento

3.1.1 Força na deformação em forjamento livre

O cálculo das forças atuantes na conformação não é simples pois a mecânica da deformação envolve muitas variáveis como já foi visto.

Para o caso particular da deformação livre onde não existe resistência lateral ao escoamento do material e desprezando-se o efeito do encruamento , (uma vez que se admite que a deformação ocorrerá a quente), pode-se elaborar um modelo matemático para a previsão da força de forjamento. Mas mesmo com estas simplificações a análise não se torna trivial DIETER (1981) apresenta alguns estudos a respeito, mas foge ao objetivo deste trabalho traçar uma análise profunda das forças de forjamento, com o objetivo de propiciar uma noção da ordem de grandeza das forças envolvidas é suficiente a análise apresentada por CHIAVERINI (1986), segundo esta análise a força necessária para a deformação livre de um corpo de seção uniforme pode ser dada por:

$$P = \frac{V \cdot R \left(\ln \frac{h_0}{h_1} \right)}{\Delta h}$$

onde:

P = Força de forjamento em Kgf

V = Volume do corpo em mm³

R = Resistência real à deformação em Kgf/mm²

h₀ = Altura inicial do corpo em mm

h₁ = Altura final do corpo em mm

Δh = h₀ - h₁

O valor de “R” é empírico e para o caso particular da deformação de aços de baixo carbono realizado a quente (1000° a 1200°C) a tabela c fornece valores aproximados, tanto para ação de prensas, como para martelos de queda

Tabela C- Resistência a deformação a quente por ação de martelo e prensa, de aços de baixo carbono

ε= ln(h ₀ /h ₁)	R (Kgf/mm ²)	R (Kgf/mm ²)
	Por ação do martelo	Por ação da prensa
0 a 0.1	10 - 15	4 - 6
0.1 a 0.2	15 - 20	6 - 12
0.2 a 0.4	20 - 30	12 - 22
0.4 a 0.6	30 - 36	22 - 28
acima de 0.6	36 - 50	28 - 38

3.2 Forjamento em matriz

O forjamento em matriz usa blocos de matriz cuidadosamente usinados para produzir peças forjadas com tolerâncias dimensionais bastante precisas. Normalmente, para justificar a utilização dessas matrizes relativamente dispendiosas, esse processo é usado para taxas de produção altas. Em geral, na forja em matriz o tarugo é primeiro desbastado e esquadrihado para ajustar o metal nas posições corretas na matriz para o forjamento subsequente. O tarugo pré-moldado é então colocado na cavidade da matriz de forja em bruto para atingir uma forma próxima à desejada. A maior parte da mudança da forma ocorre quase sempre nessa etapa. Em seguida a peça é transferida para uma matriz de acabamento, onde é forjada para a forma e dimensões finais .

Normalmente a cavidade de forja em bruto e a cavidade de acabamento são usinadas no mesmo bloco de matriz. Com freqüência, são feitos o desbaste e a expansão do metal nos extremos do bloco da matriz.

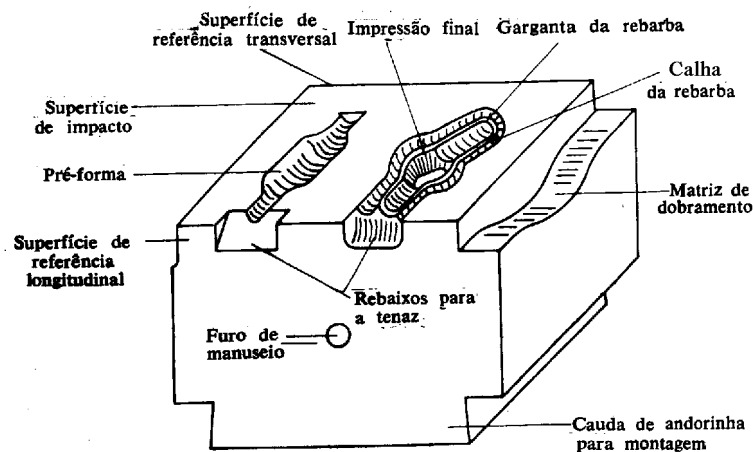


Figura 30 - Matriz múltipla para forjamento

É importante usar sempre uma quantidade de metal suficiente para encher toda a cavidade da matriz. Como é difícil colocar a quantidade exata de metal nos lugares corretos durante o desbaste e a expansão é comum usar-se uma quantidade ligeiramente acima do necessário. Quando a matriz executa a etapa final de acabamento, o excesso de metal escoava para fora da cavidade como uma fita de metal chamada de *rebarba de forjamento em matriz fechada*. A fim de evitar a formação de uma rebarba muito grande, em geral projeta-se um ressalto conhecido como uma calha de rebarba (figura 31). A etapa final no forjamento de uma peça em matriz fechada é remoção da rebarba com uma matriz para aparar ou matriz de rebarbação.

A rebarba tem duas funções. Como descrito acima, ela atua como uma "válvula de segurança" para o excesso de metal na cavidade da matriz. De maior importância é que a rebarba regula o escape do metal, portanto uma rebarba muito fina aumenta muito a resistência de escoamento do sistema de maneira que a pressão sobe para valores bem altos, assegurando que o metal preencha todos os espaços da cavidade da matriz. A figura 32 mostra uma curva típica da carga de forja com o avanço ou curso da matriz para o processo de forja em matriz fechada. O segredo do projeto da rebarba é ajustar de tal forma as suas dimensões de maneira que a extrusão do metal através da abertura estreita para a rebarba seja mais difícil do que preencher os detalhes mais intrincados da matriz. Porém, isso não deve ser feito em excesso para não só criar altas cargas de forjamento, como também evitar problemas com a deformação ou quebra da matriz. O ideal é projetar a rebarba ao mínimo necessário à realização do trabalho.

Em forja com matrizes fechadas é extremamente difícil produzir componentes com filetes muito agudos, almas finas e frisos ou arestas muito altas. Além disso, as matrizes de forja devem ser afuniladas para facilitar a remoção das peças acabadas. Este ângulo de saída varia 5° a 7° para superfícies internas e de 7° a 8° para superfícies externas.

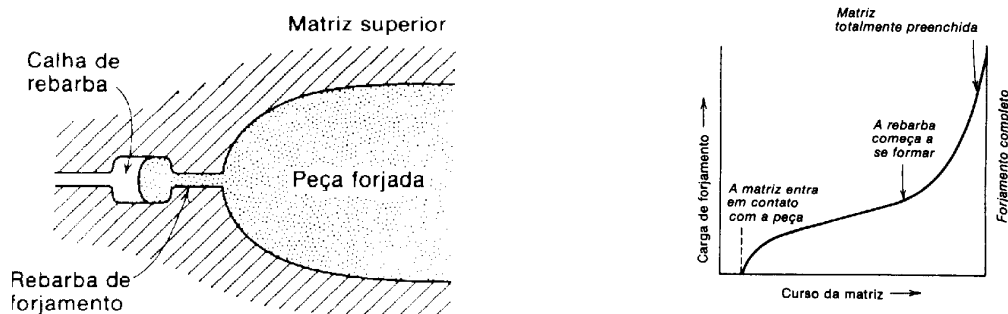


Figura 31 - Vista em corte de uma matriz, mostrando a calha de rebarba

Figura 32 - Curva típica da carga de forja com o curso da matriz, no forjamento em matriz

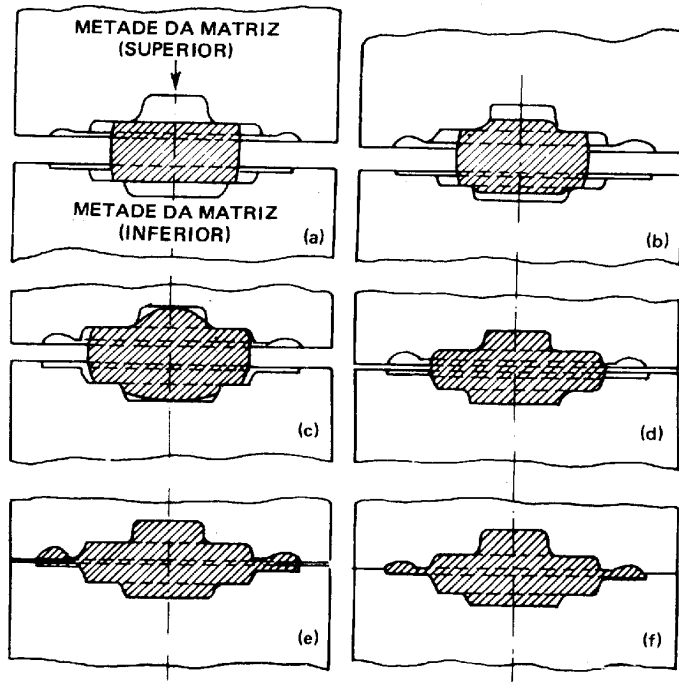


Figura 33 - Diversas fases do forjamento em matriz

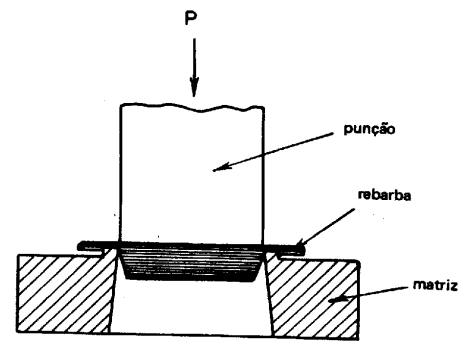


Figura 34 - Matriz esquemática para corte de rebarba

A fase final da operação de forjamento em matriz é o corte da rebarba, pelo emprego de matrizes especiais de corte ou quebra de rebarbas.

3.3 Equipamentos para forja

Basicamente existem duas grandes famílias de equipamentos para forja, as prensas e os martelos e cada um deles se subdividem de forma genérica em alguns tipos peculiares como mostra a figura 35

- Martelo {
 - De queda livre
 - De duplo efeito
 - De contra golpe

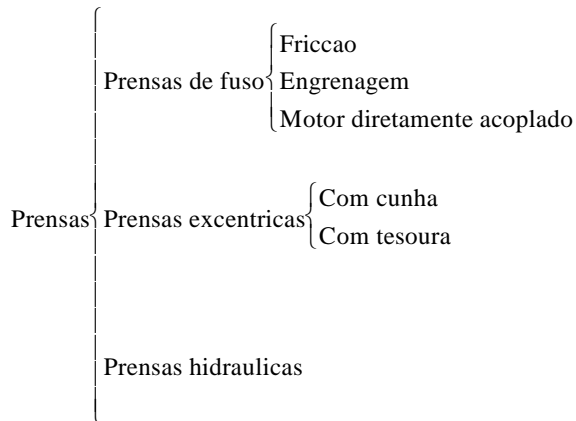


Figura 35 - diagrama esquemático dos tipos de equipamentos para forja.

3.3.1 Prensas de fuso

São constituídas de um par porca/parafuso, com a rotação do fuso, a massa superior se desloca, podendo estar fixada no próprio fuso ou então fixada à porca que neste caso deve ser móvel, dando origem a dois sub-tipos de prensas; as de fuso móvel; e as de porca móvel conforme mostra a figura 36.

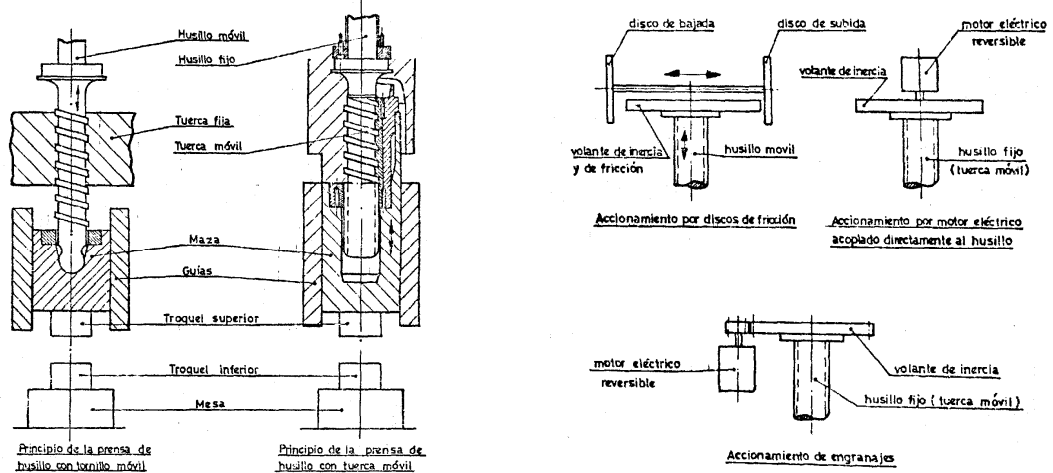


Figura 36 - Princípio de funcionamento das prensas de fuso e esquema dos principais tipos de acionamentos.

Ligado ao fuso a um disco de grande dimensão que funciona como disco de inércia, acumulando energia que é dissipada na descida. O acionamento das prensas de fuso podem ser de três tipos:

- através de discos de fricção;
- por acoplamento direto de motor elétrico;
- acionado por engrenagens

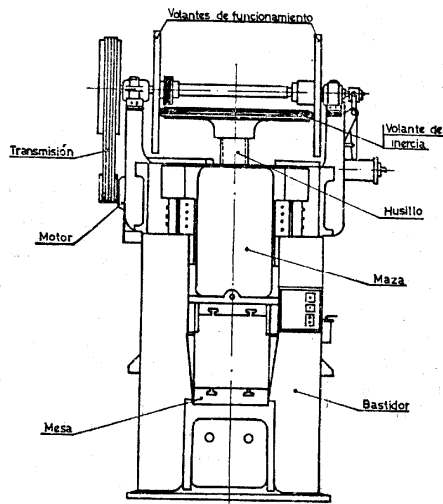


Figura 37 - Prensa de fuso.

O movimento de subida da prensa é realizado pela inversão de rotação do fuso.

Este tipo de prensa é muito comum na Europa e se constitui no tipo de prensa mais antigos.

Comparada com as prensas hidráulicas se caracterizam por serem mais rápidas, ocuparem um espaço menor, e possuírem uma manutenção mais simples. Comparada com os martelos se caracterizam por serem mais silenciosas, desgastarem menos as matrizes, necessitarem de fundações menos robustas e serem mais eficiente, aproveitando melhor a energia disponível.

3.3.2 Prensas excêntricas ou mecânicas

Depois do martelo de forja, a prensa mecânica é o equipamento mais comumente utilizado. Pode ser constituído de um par biela/manivela, para transformar um movimento de rotação, em um movimento linear recíproco da massa superior da prensa.

Para melhorar a rigidez deste tipo de prensa algumas variações do modelo biela/manivela foram propostos assim nasceram as prensas excêntricas com cunha e as prensas excêntricas com tesoura conforme mostra a figura

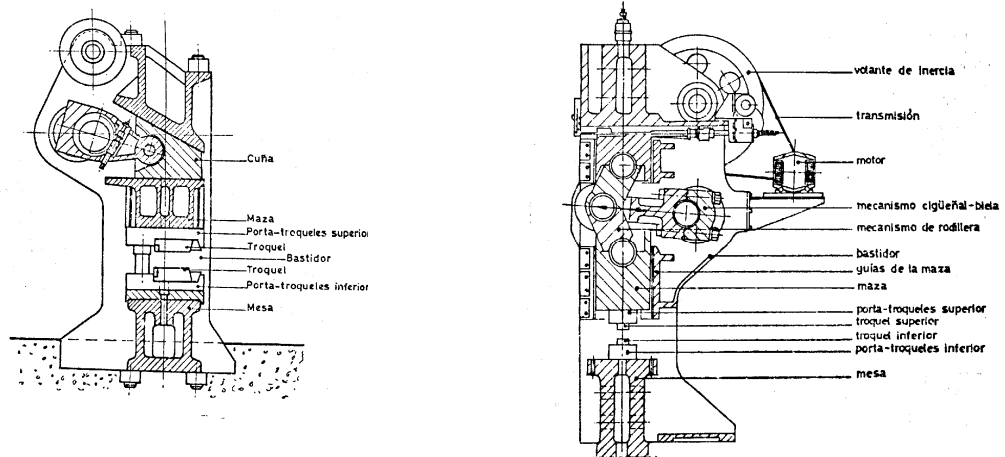


Figura 38 - Prensas excêntricas com cunha e com tesoura que tem a finalidade de serem mais rígidas que uma prensa excêntrica convencional.

O curso do martelo neste tipo de prensa é menor que nos martelos de forjamento e nas prensas hidráulicas. O máximo de carga é obtido quando a massa superior está a aproximadamente 3 mm acima da posição neutra central. São encontradas prensas mecânicas de 300 a 12.000 toneladas. A pancada de uma prensa é mais uma aplicação de carga crescente do que realmente um impacto. Por isto as matrizes sofrem menos e podem

ser menos maciças. Porém o custo inicial de uma prensa mecânica é maior que de um martelo.

3.3.3 Prensas hidráulicas

As prensas hidráulicas são máquinas limitadas na carga, na qual a prensa hidráulica move um pistão num cilindro. A principal característica é que a carga total de pressão é transmitida em qualquer ponto do curso do pistão. Essa característica faz com que as prensas hidráulicas sejam particularmente adequadas para operações de forja do tipo de extrusão. A velocidade do pistão pode ser controlada e mesmo variada durante o seu curso. A prensa hidráulica é uma máquina de velocidade baixa, o que resulta em tempos longos de contato com a peça que pode levar a problemas com a perda de calor da peça a ser trabalhada e com a deterioração da matriz. Por outro lado, a prensagem lenta de uma prensa hidráulica resulta em forjamento de pequenas tolerâncias dimensionais. As prensas hidráulicas são disponíveis numa faixa de 500 a 18.000 toneladas, já tendo sido construídas, também, prensas hidráulicas de 50.000 toneladas. O custo inicial de uma prensa hidráulica é maior do que o de uma prensa mecânica da mesma capacidade. São disponíveis na literatura técnica fatores para conversão entre a capacidade das prensas e dos martelos de forja.

3.3.4 Martelo

A peça mais comumente usada dos equipamentos de forja é o martelo de forja. Os dois tipos básicos de martelo são: martelo de queda livre com prancha (figura 39) e o martelo de duplo efeito (figura 40). No martelo de queda com prancha, a matriz superior e a massa cadente são elevadas por rolos de atrito engrenados à prancha, correntes ou outros mecanismos. Quando a prancha é liberada, a massa cadente cai sob a influência da gravidade para produzir a energia da pancada. A prancha é imediatamente elevada para nova pancada. O forjamento com um martelo é normalmente feito com pancadas repetidas. Os martelos podem atingir entre 60 e 150 pancadas por minuto dependendo do tamanho e capacidade. A energia suprida pelas pancadas é igual à energia potencial devido ao peso da massa cadente e da altura de queda. Os martelos de queda são classificados pelo peso da massa cadente. Entretanto, uma vez que o martelo é uma máquina limitada energeticamente, no qual a deformação se processa até que a energia cinética é dissipada pela deformação plástica da peça de trabalho ou pela deformação elástica das matrizes e da máquina, é mais correto classificar essas máquinas em termos da energia transmitida.

Uma capacidade maior de forja é atingida com um martelo de duplo efeito no qual o martelo é acelerado no seu curso descendente por pressão de vapor ou ar comprimido em adição à gravidade. O vapor ou ar comprimido podem também serem usados para elevar o martelo no seu curso ascendente.

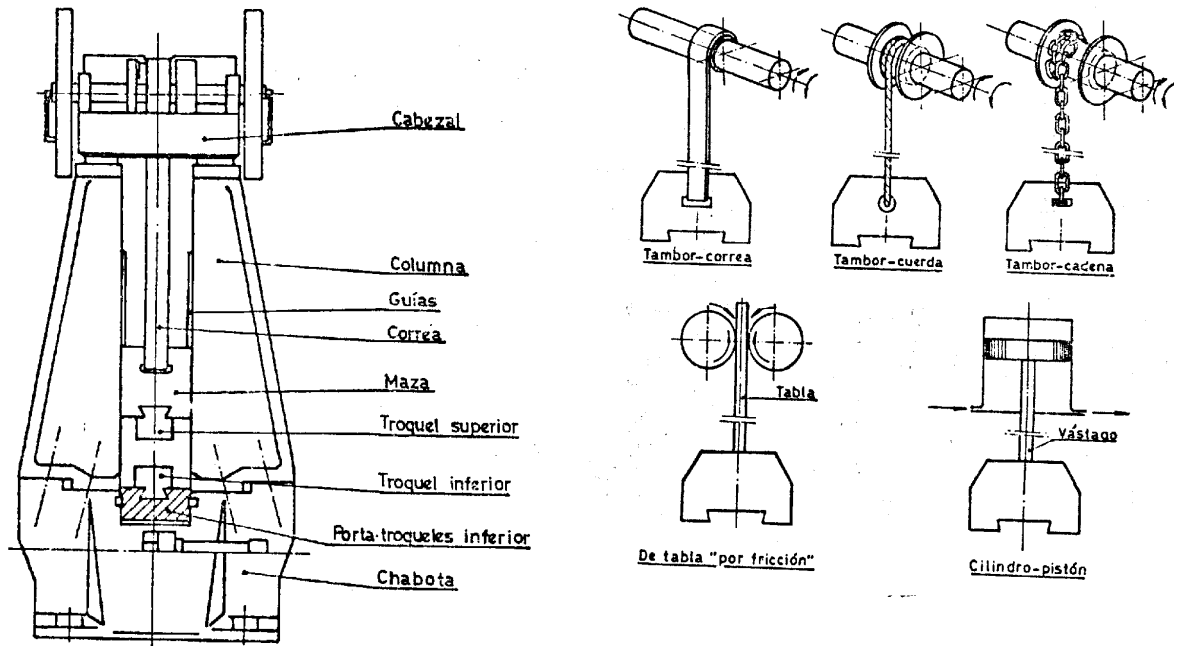


Figura 39 martelo de queda e alguns mecanismos de elevação da massa.

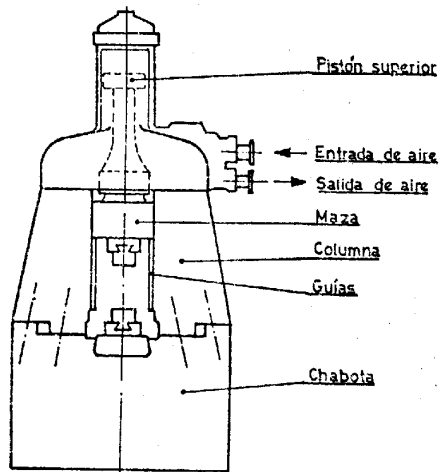


Figura 40 - martelo de duplo efeito

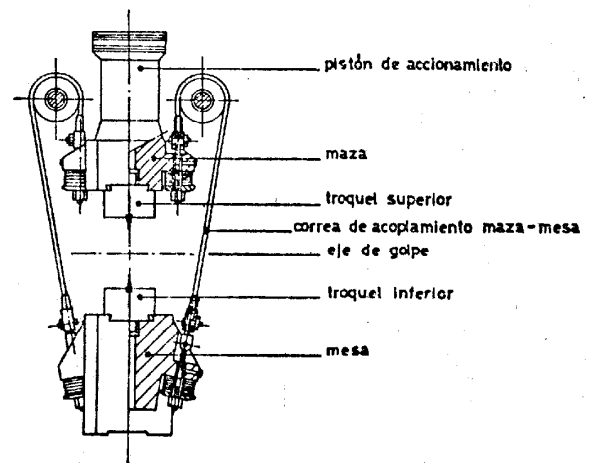


Figura 41 Martelo de contragolpe

Nos martelos de queda o choque produzido pela queda da massa é transmitido para toda a estrutura da máquina, bem como para as fundações. O que é um grande transtorno.

Para amenizar este fato foram desenvolvidos os martelos de contragolpe (figura 41), em que a chabota se movimenta ao mesmo tempo que a massa superior encontrando-se ambas no meio do percurso. Desta forma a reação do choque praticamente inexistente e não é transmitida para a estrutura da máquina e fundações.

Mas dada a configuração deste tipo de martelo temos como desvantagens:

- maior desalinhamento entre as partes superior e inferior da matriz;
- a força de forjamento deve estar localizada no meio da matriz para evitar grandes atritos entre as massas e as guias;

- não é possível manipular a peça durante o movimento do martelo
- maiores despesas de manutenção

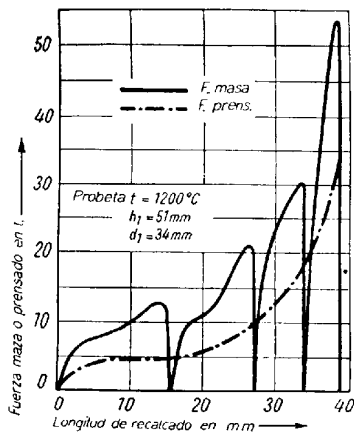


Figura 42 Gráfico das forças na conformação de uma peça prensada, comparando-se á realização da operação em um martelo e uma prensa.

Uma característica comum aos martelos é que em função do forjamento ser feito por meio de golpes, o martelo adquire grande flexibilidade, pois enquanto as prensas são limitadas em termos de força (só podem ser aplicadas se a força requerida for menor que a disponível), nos martelos esta limitação não existe uma vez que o martelo aplicará golpes sucessivos até que a conformação desejada se processe. Desta forma os martelos são mais indicados para o uso com matrizes de múltiplas cavidades em que em um único bloco existem as cavidades para pré-conformação e conformação final.

Um outro aspecto relativo aos martelos é que estes requerem em média 400% mais energia, que as prensas, para executar a mesma deformação a figura 42 mostra este fato.

RESUMINDO :

Tabela D velocidades típicas e faixa de força para diferentes equipamentos de forja

TIPO DE MÁQUINA	FAIXA DE VELOCIDADE (m/s)	FAIXA DE FORÇA (ton.)
Martelo de queda livre	3.6 - 4.8	-
Martelo mecânico	3.0 - 9.0	0.5 - 22
Prensas mecânicas	0.06 - 1.5	300 - 12000
Prensas hidráulicas	0.06 - 0.30	500 - 50000

MARTELOS DE QUEDA CARACTERÍSTICAS:

- permite altas velocidades de forjamento podendo chegar a 150 pancadas/min;
- é a fonte mais barata de uma elevada carga de forjamento (duplo efeito);
- possui o menor tempo de contato sob pressão (1 a 10 ms);
- não fornecem precisão acurada ;
- necessitam de 400% mais de energia que uma prensa para realizar a mesma deformação;
- impactos no solo (pode ser minimizado pelo uso de martelos de contragolpe);
- solicita sobremaneira as ferramentas.

PRENSAS CARACTERÍSTICAS:

- aplicação gradual e /ou constante de força o que é benéfico para as matrizes;
- permite pequenas tolerâncias dimensionais;
- mais silenciosa que os martelos;
- facilidade de regulagem da força, velocidade e curso;
- causa menos problemas as fundações;
- alto tempo de contato sob pressão entre o forjado e a matriz;
- não é adequada para operações de pré conformação e acabamento sendo realizadas no mesmo bloco
- são mais caras e exigem mais manutenção que os martelos

3.4 Matrizes para forjamento

As matrizes para forjamento estão sujeitas a grandes solicitações mecânicas, podendo chegar a tensões da ordem de 200 Kgf/mm² bem como a solicitações térmicas, uma vez que o material forjado se encontra a temperaturas apreciáveis

Devido a essas solicitações, as matrizes devem ser construídas de materiais que apresentem as seguintes características:

- alta dureza;
- elevada tenacidade;
- resistência à fadiga;
- alto limite de escoamento;
- alta resistência mecânica a quente;
- tolerância contra oscilações térmicas.

3.4.1 Materiais para matrizes - forjamento a frio

Para forjamento a frio são considerados os chamados aços “indeformáveis”, que são materiais, que apresentam pouca ou nenhuma alteração de forma e/ou dimensão durante o tratamento térmico.

Nas classificações AISI e SAE tais aços são designados pelas letras:

- “O” - quando de baixa liga e temperáveis em óleo;
- “D” - quando de alta liga e temperáveis em óleo ou ar.

Tabela E- Alguns exemplos de materiais para trabalho a frio.

APLICAÇÃO	AÇO	COMPOSIÇÃO		
Matrizes para conformação a frio para pequenas séries	VND (Villares) ≈ AISI O1	C=0,95% Cr=0,50% V=0,12%	Mn=1,25% W=0,50%	
Matrizes de forjamento para martelo de queda com gravuras rasas	VETD (Villares) ≈ AISI W2	C=1,00%	V=0,25%	
Matrizes para grandes séries	VC130 (Villares) ≈ AISI D3	C=2,0%	Cr=11,5%	V=0,2%

3.4.2 Materiais para matrizes - trabalho a quente

Esses aços são designados pela AISI e SAE com as letras H e dividem-se em quatro grupos:

- ao Cr-Mo - tipos H11, H12, H13 e H15
- ao Cr-W - tipos H14 e H16
- ao W - tipos H20, H21, H22, H24 e H26
- ao Mo - tipos H41, H42 e H 43

Tabela F - Exemplos de aço para trabalho a quente

APLICAÇÃO	AÇO	COMPOSIÇÃO		
Matrizes para forjamento em prensa de grande série de peças de aço que requerem altas taxas de deformação e elevado tempo de contato peça/matriz	VPCW (Villares) ≈ AISI H12	C=0,35% Mo=1,5% V=0,25%	Si=1,0% Cr=5,0% W=1,35%	
Matrizes para forjamento, em prensa de ligas de cobre, ligas de alumínio e de magnésio	VPC (Villares) ≈ AISI H11	C=0,38% Mo= 1,35%	Si=1,0% Cr=5,0% V= 0,4%	

O tratamento térmico para matrizes deve ser especificado com base nas solicitações mecânicas, como valores orientativos temos que:

- para forjamento a frio, durezas da ordem de 50 a 65 HRC
- para forjamento a quente, durezas da ordem de 30 a 45 HRC

3.4.3 Projeto preliminar de uma matriz para forjamento

Para o esboço de uma matriz de forjamento podemos seguir os seguintes passos:

1. Escolha da linha de aparte;
2. Desenho da peça para forjamento;
3. Cálculo da contração;
4. Obtenção das dimensões da rebarba;
5. Escolha do bloco;
6. Obtenção da matéria prima necessária;
7. Estimativa da carga de forjamento;

3.4.3.1 Escolha da linha de aparte

Para seleção da linha de aparte alguns critérios podem ser utilizados:

- a linha de aparte deve estar posicionada de tal maneira que permita a fácil saída da peça de qualquer uma das duas metades da matriz;
- preferencialmente a linha de aparte deve ser plana;
- para peças simétricas a linha de aparte deve dividir a peça em duas partes iguais (figura 45) ;
- idealmente a linha de aparte deve se localizar em um ponto que deve ser o último a ser preenchido (figura 44) ;
- em peças que serão usinadas posteriormente deve-se localizar a linha de aparte de modo que não dificulte a posterior fixação da peça na máquina ferramenta (figura 45).

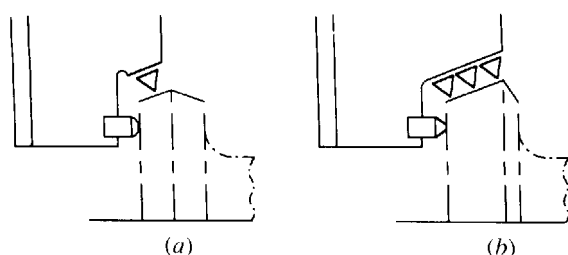


Figura 43 No caso (a) a localização da linha de aparte dificulta a fixação da peça no torno, afastando-se um pouco a linha de aparte (caso(b)), sobra mais espaço para a aplicação da fixação.

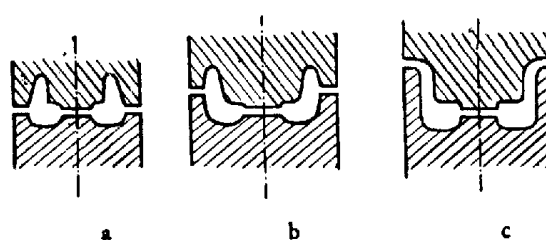


Figura 44 A linha de aparte em (a) fará com que a rebarba se forme antes que a parte superior esteja preenchida, no caso (c) isto é evitado, mas em contrapartida a construção da matriz ficará mais onerosa, o caso (b) é um caso intermediário.

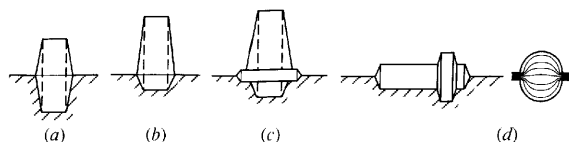


Figura 45- Quando a peça possui simetria é aconselhável que a linha de aparte divida a peça em duas partes iguais como em (a) e (d) e não como em (b) e (c).

Os critérios acima são apenas para orientação alguns deles em casos específicos são até contraditórios e por isto recebem a qualificação de “preferenciais”, ou “ideais”, o único critério que deve imperiosamente ser obedecido é o primeiro, a aplicação dos demais será sempre regida pelo bom senso.

3.4.3.2 Desenho da peça para forjamento

Definida a linha de aparte já é possível saber a posição da peça na matriz de forjamento.

Assim sendo, partindo-se do desenho da peça usinada deve-se incorporar algumas alterações para que seja possível o seu forjamento.

Estas alterações são:

- previsão de sobremetal para usinagem;
- previsão de ângulos de saída para as superfícies que forem paralela a direção de forjamento;
- previsão de raios de concordância para os cantos;

3.4.3.2.1 Sobre metal para usinagem

O sobremetal para usinagem normalmente é definido por norma (por exemplo a DIN 7523), para o nosso caso lançaremos mão de uma tabela simplificada que nos traz o **mínimo** sobremetal relacionado com as dimensões.

Tabela G - Sobremetal para usinagem.

COTA	<30	de 31 a 60	de 61 a 120	de 121 a 250	de 251 a 500	> 500
sobremetal	1	1,5	2	2,5	3,5	5 a 8

3.4.3.2.2 Ângulos de saída

Para facilitar a retirada da peça da cavidade da matriz todas as paredes paralelas a direção de forjamento devem possuir uma ligeira inclinação. O valor desta inclinação varia de 5° a 7° para as superfícies internas e de 7° a 8° para superfícies externas, isto para a

retirada da peça sem o uso de extratores. Caso os extratores possam ser utilizados os valores dos ângulos podem ser reduzidos de 40 % dos acima citados.

3.4.3.2.3 Raios de concordância

Devido a possibilidade de ocorrerem falhas em função da contração que se verifica a partir da temperatura de forjamento até a temperatura ambiente, deve-se evitar o uso de cantos vivos nas peças forjadas. Além deste fato, o uso de quinas “vivas” nas matrizes, seria um ponto de concentração de tensões além de ser uma região susceptível a rápido desgaste. Some-se a isto o fato de que a execução de cantos vivos necessita de uma carga de forjamento maior que a execução de cantos raiados. Em função de todos estes fatos, deve-se sempre arredondar os cantos das peças forjadas.

O valor dos raios de arredondamento são dependentes da localização da aresta, (se a aresta é de superfície interna ou externa, a distância da aresta da linha de aparte e outros), por isto é recomendável a consulta a manuais de forjamento, que trazem diversos exemplos e valores para os raios.

Como uma primeira aproximação para as concordâncias das arestas utilizaremos a tabela simplificada a seguir, que deve ser utilizada tomando como correspondência os raios mostrados na figura 46.

Tabela H - Raios de concordância em peças para forjamento em matriz.

Medidas h , h_1 , h_2 ou d	Raio de concordância em mm		
	r	r_1	r_2
até 25	5	1,2	2,0
26 até 40	8	2,0	4,0
41 até 63	12	3,0	5,0
64 até 100	20	4,0	6,0
101 até 160	30	6,0	6,0
161 até 250	50	7,0	7,0

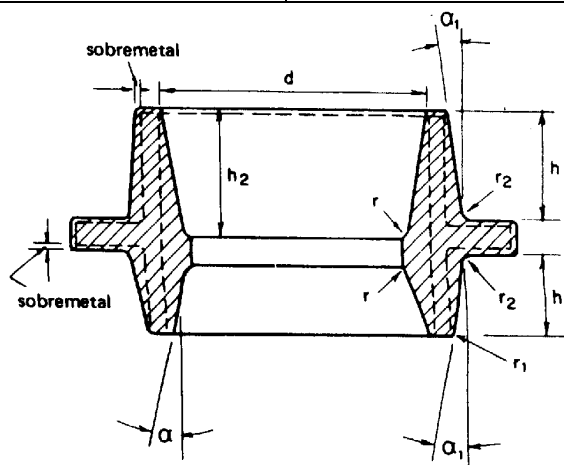


Figura 46 Representação esquemática da localização dos raios de concordâncias.

Uma questão importante no que diz respeito a peças forjadas, refere-se a tolerância das dimensões. Devido as peculiaridades do forjamento as tolerâncias para forjados são tratadas de modo especial. No Brasil existe uma norma, a NBR 8999 de agosto de 1985 que dispõe sobre este tema. Assim sendo para que o projeto e/ou desenho de peças forjadas seja considerado completo é necessário a consulta a norma de forma a incorporar as devidas tolerâncias.

3.4.3.3 Cálculo da contração

Como as peças são forjadas a quente é importante levar em conta a contração que irá ocorrer quando do seu resfriamento. Desta forma a cavidade na matriz será construída ligeiramente maior que as dimensões da peça a ser forjada.

Para se obter as dimensões na cavidade multiplica-se as dimensões correspondentes da peça pelo fator de contração, cujo valor é dado por:

$$FC = 1 + \Delta t \times \alpha$$

onde :

FC = fator de contração

Δt = temperatura do forjado - temperatura da matriz [°C]

α = coeficiente de dilatação linear

Como valores práticos pode-se adotar:

Tabela I - Valores de contração para algumas ligas

MATERIAL	FATOR DE CONTRAÇÃO
AÇO	1.01
BRONZE	1.008
LATÃO	1.009
COBRE	1.009
LIGAS LEVES	1.009

3.4.3.4 Dimensões da rebarba

Como já foi dito a rebarba é responsável pela elevação da carga de forjamento, de forma a aumentar a pressão sobre o material no final da operação, garantindo assim o completo preenchimento de todos os detalhes da matriz.

Desta forma o cálculo exato da rebarba deveria ser feito levando em consideração este fato e portanto, deveria calcular o valor da pressão necessária e por conseguinte a as dimensões da rebarba que possibilitasse atingir esta pressão. Mas estes cálculos não são simples e diversos fatores o influenciam, para facilitar esta tarefa diversos modelos matemáticos têm sido desenvolvidos, MIELNIK (1991) e Rio (1980) descrevem alguns destes modelos. Para o nosso objetivo de projeto preliminar da matriz, será utilizada uma aproximação um pouco mais grosseira.

Existem um número considerável de possíveis perfis para a rebarba, a escolha destes perfis se baseia na facilidade de fabricação, no efeito de aumento de pressão que se

deseja induzir no forjamento e na forma de rebarba que é mais conveniente para o processo. Para exemplificar adotaremos um tipo de perfil para a rebarba e obteremos os valores de suas dimensões básicas da tabela j em conjunto com a figura 47 - perfil típico de rebarba.

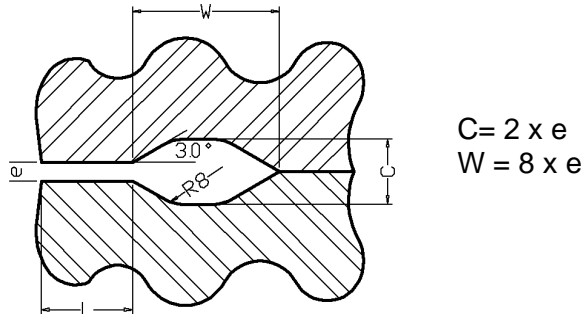


Figura 47 - Perfil típico de rebarba.

Tabela J Dimensões da rebarba para forjamento de aço.

Peso do forjado [Kg]	Forjamento a frio		Forjamento a quente	
	e [mm]	L [mm]	e [mm]	L [mm]
até 0,5	1,6	20	3	20
0,6 a 2,5	1,6	26	3	26
2,6 a 4,5	2,5	32	4	32
4,6 a 7,0	3,5	35	5	35
7,1 a 12,0	4,0	38	6	38
12,1 a 28	5,0	45	7	45
28,1 a 46,0	6,5	50	8	50
46,1 a 90,0	-	-	10	64

3.4.3.5 Escolha das dimensões do bloco

As dimensões do bloco devem ser calculadas em função dos esforços a que a matriz estará sujeita, mas como uma primeira aproximação utilizam-se como valores mínimos os constantes na

tabela k.

Os valores constantes da coluna 2 são para espessura mínima de parede em matrizes com apenas uma impressão, no caso de matrizes com mais de uma impressão a espessura mínima de parede é dada pela coluna 3 e o valor de "h" deve ser o menor, dentre as impressões, para altura mínima do bloco a coluna 4 apresenta valores e neste caso se o bloco possuir múltiplas impressões deve ser utilizado o "h" da maior impressão.

Tabela K Dimensões mínimas das matrizes de forjamento

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

3.4.3.6 Cálculo da matéria prima necessária

Para obtenção da matéria prima inicialmente calculamos o peso do forjado como se segue:

$$P_F = P_{LF} + P_{OX} + P_R \text{ onde:}$$

P_F = Peso bruto do forjado [Kg]

P_{LF} = Peso da peça forjada [Kg]

P_{OX} = Peso do óxido que se forma durante o aquecimento e forjamento a quente e que para o aço pode ser estimado como sendo;

6 % do P_{LF} se o $P_{LF} < 4,6$ Kg

5 % do P_{LF} se o $4,7\text{Kg} < P_{LF} < 11,5$ Kg

4 % do P_{LF} se o $P_{LF} > 11,5$ Kg

P_R = Peso da rebarba

Obtido o peso do forjado passamos a procurar a matéria prima em dimensões comerciais que melhor se adapte as condições de forjamento, tendo o cuidado de garantir que o comprimento do material jamais seja maior que 3 vezes a menor dimensão da base, isto para evitar a flambagem, quando da aplicação da carga de forjamento.

Em função da matéria prima escolhida, analisa-se a possibilidade de colocação do material na cavidade inferior da matriz. Se a colocação é possível e o material tem estabilidade suficiente para resistir os esforços de forjamento, a escolha esta terminada, caso contrário, por tentativas tenta-se encontrar um formato comercial que seja adequado as condições, se não for possível encontrar uma solução com as dimensões comerciais, isto implica que será necessário forjamentos intermediários de tal forma que seja possível colocar a matéria prima com estabilidade dentro das matrizes.

3.4.3.7 Estimativa da força de forjamento

O cálculo exato da força necessária para deformação no forjamento é extremamente difícil, pois além da complexidade própria da deformação plástica já discutida, existe ainda o problema dos atritos da peça com a matriz, os problemas de resfriamento da peça em contato com a matriz etc... .

Em função disto realizasse uma simplificação até certo ponto grosseira que permite a estimativa da ordem de grandeza das forças envolvidas.

Para forjamento em prensa:

$$f = \bar{\sigma} k S_p$$

onde :

f = força de forjamento em ton

S_p = Área projetada do forjado + rebarba na linha de aparte [mm²]

k = coeficiente de complexidade do forjado

σ = tensão média de escoamento do material na temperatura de forjamento [ton/mm²] (valor obtido em ensaios ou tabelas)

Tabela L - Valores de "k" para cálculo da força em forjamento com prensa

MODO DE DEFORMAÇÃO	K
Compressão de um cilindro entre duas placas planas	1,2 - 2,5
Forjamento de peças simples sem a formação de rebarba	3- 5
Forjamento de peças simples com a formação de rebarba	5-8
Forjamento de peças complexas com a formação de rebarba	8-12

Para forjamento em martelo

$$8 \text{ [Kgf/mm}^2\text{]} \leq \frac{f}{S} \leq 18 \text{ [Kgf/mm}^2\text{]}$$

onde:

f = força do martelo em [Kgf]

S = Seção do forjado na linha de aparte (sem a rebarba) [mm²]

OBS: o valor de 8 [Kgf/mm²] deve ser usado para matrizes que possuem seções esboçadoras, já o valor de 18 [Kgf/mm²] deve ser usado para matrizes que possuem uma única impressão.

3.4.4 Recalcagem

Trata-se essencialmente de um processo de conformação a quente em que uma barra, tubo ou outro produto de secção uniforme, geralmente circular, tem uma parte de sua secção transversal alongada ou reconformada.

Em princípio, o processo é levado a efeito mantendo-se a peça original aquecida entre matrizes e aplicando-se pressão numa sua extremidade, na direção do eixo, com o emprego de uma ferramenta de recalcar, que alarga (recalca) a extremidade, mediante deslocamento do metal.

A figura 48 ilustra esquematicamente o processo. A barra *a'*, aquecida, é inserida na máquina, entre as duas matrizes abertas *A* e *A'*. Uma alavanca *b* determina a posição exata da barra na extremidade das matrizes.

A máquina é acionada: as matrizes fecham e bloqueiam a barra, ao mesmo tempo que a alavanca *b* se eleva, deixando livre a extremidade para a entrada do punção *B* da ferramenta de recalcar; o punção entra na câmara para recalcar a extremidade da barra - fases (b) e (c). A matriz abre-se e a máquina interrompe sua ação automaticamente.

A figura 49 mostra como obter, por recalagem, a partir de uma barra, uma peça com um alargamento na extremidade, uma flange e um orifício profundo.

A operação, como se vê, consiste em várias passagens, de modo que a matriz correspondente é múltipla e vários punções são empregados.

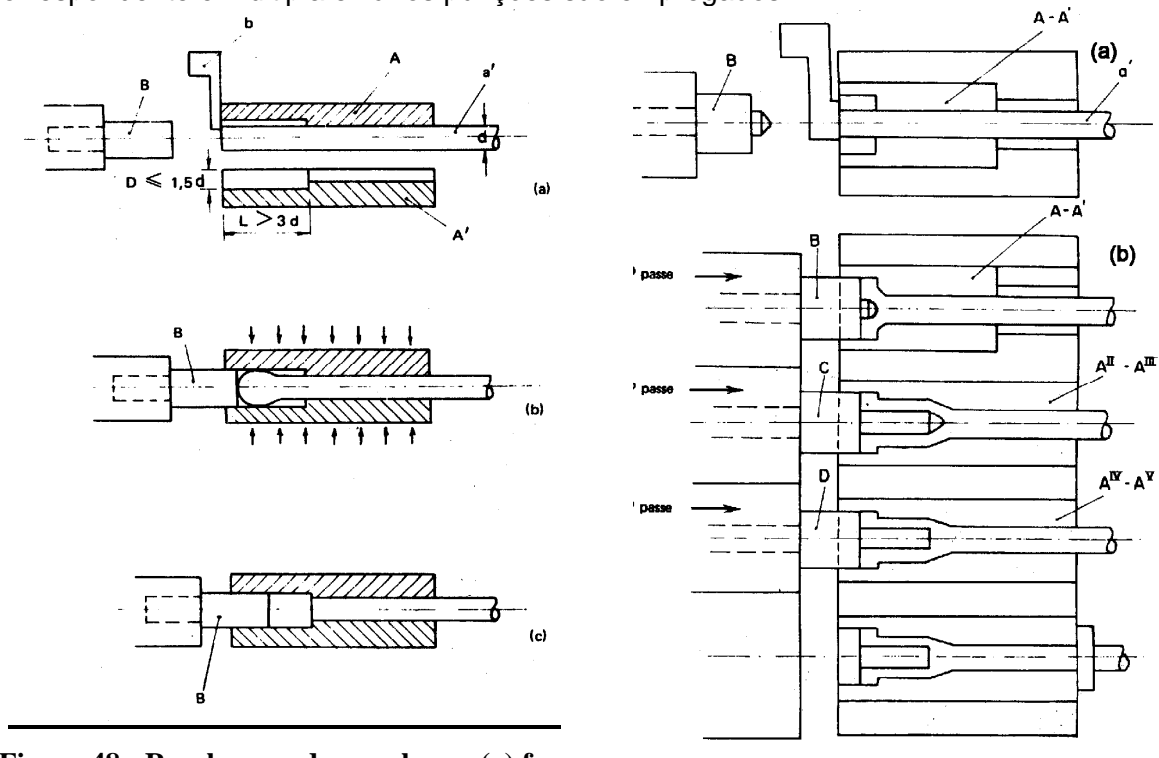


Figura 48 - Recalcagem de uma barra (a) fase

inicial 9 (c) fase final

Figura 49 - Operação de recalçagem em três etapas

A figura 50 mostra o ferramental para recalçagem dupla, ou seja, nas duas extremidades de uma barra. A operação consiste em cinco passes, os dois primeiros numa matriz dupla com duas ferramentas de recalçagem e os três últimos numa matriz tríplice com três ferramentas de recalçagem.

A operação de recalçagem nas duas extremidades é realizada em muitas peças, devendo-se ter cuidado com problemas de manuseio e aquecimento, problemas esses não encontrados em recalçagem de uma extremidade apenas.

Se os diâmetros das extremidades forem diferentes, recomenda-se forjar o diâmetro menor em primeiro lugar, o que facilita o manuseio no segundo aquecimento.

As máquinas de recalçagem são horizontais, operadas mecanicamente por intermédio de um eixo principal com uma transmissão excêntrica, que propulsiona o cursor da ferramenta de recalçagem horizontalmente. Cames e excêntricos propulsionam o cursor da matriz que se movimenta horizontalmente em ângulo reto em relação ao cursor da ferramenta de recalçar

Os componentes mecânicos fundamentais na recalçagem são as duas matrizes de aperto.

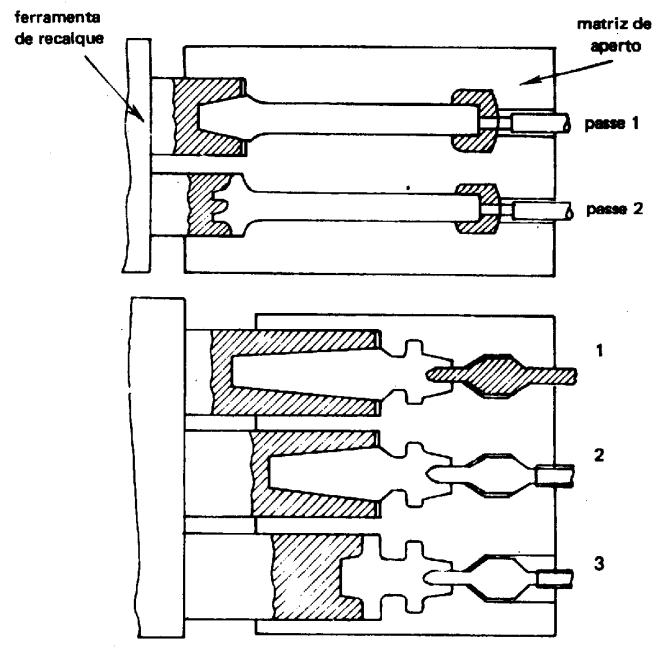


Figura 50 - Recalçagem em duas extremidades com cinco passes.

3.4.4.1 Pressão de recalçagem

Pode-se empregar, com razoável precisão, a fórmula abaixo, para determinar a pressão de recalçagem e escolher a máquina de recalçar adequada para uma determinada operação de recalçagem.

$$P = S.R_d .k$$

onde:

P = pressão máxima, em kgf/mm^2 , que ocorre na recalçagem

S = área, em mm^2 , da secção transversal da peça. Se esta for desecção circular, com diâmetro D na extremidade maior, a área a considerar é:

$$S = \pi D^2/4$$

R_d = resistência à deformação, em kgf/mm^2 , do material a recalçar, à temperatura de deformação.

Tem-se, aproximadamente,

$R_d = 10$ a 15 para aços

$R_d = 6$ para cobre

$R_d = 0,4$ a $0,5$ para ligas leves

$R_d = 4$ para latão

k = coeficiente que varia de acordo com as várias dimensões da peça. O valor de k pode ser extraído dos dados apresentados na figura 51.

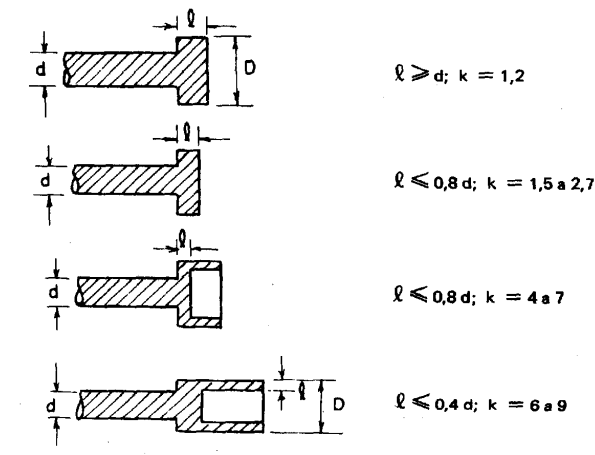


Figura 51 - Valores recomendados para o coeficiente k relativo à fórmula de pressão de recalçagem.

3.4.5 Forjamento rotativo

É um processo de redução da área da seção transversal de barras, tubos ou fios, mediante a aplicação de golpes radiais repetidos, com o emprego de um ou mais pares de matrizes opostas.

A peça a ser forjada, geralmente, é de forma quadrada, circular ou apresenta qualquer forma simétrica em seção transversal. Outras formas, como as retangulares, podem também ser forjadas rotativamente.

Pelo processo, consegue-se reduzir, por exemplo, tubos a partir de 35cm de diâmetro e barras a partir de 10 cm de diâmetro aproximadamente.

Normalmente, o processo é aplicado a frio em aços-carbono com 0,2% ou menos de carbono. À medida que aumenta o teor desse elemento e ocorre a presença de elementos de liga, a forjabilidade rotativa decresce.

Mesmo em aço-carbono, a ser deformado por forjamento rotativo à temperatura ambiente, a sua microestrutura deve ser adequada, para máxima deformabilidade, o que exige um tratamento térmico prévio de coalescimento. Nessas condições, a redução de seção pode atingir 70%, enquanto com estrutura normal - de perlita fina, por exemplo - a redução só pode atingir 30% a 40%

Alguns metais e ligas, menos ou pouco dúcteis, como aços-liga de dureza Rockwell superior a 90B, tungstênio; molibdênio etc., devem ser deformados a quente.

A figura 52 (a) representa o método em que as matrizes são cônicas; elas são abertas e fechadas rapidamente, enquanto a peça gira e é introduzida no sentido longitudinal.

Outro método está representado na figura 52 (b): as matrizes giram num fuso, ao mesmo tempo que roletes ao redor da periferia as abrem e fecham golpeando a peça, centenas de vezes por minuto. É este o método mais comum.

A figura 52 (c), finalmente, indica o método para forjamento rotativo de tubos; a bucha gira e o tubo é introduzido; ou o tubo gira, à medida que penetra no interior da bucha. A operação pode ser levada a efeito num torno mecânico: a bucha é colocada na placa de castanhas da árvore do torno, onde adquire movimento de rotação, e o tubo é empurrado para o seu interior a partir do cabeçote móvel, ou vice-versa.

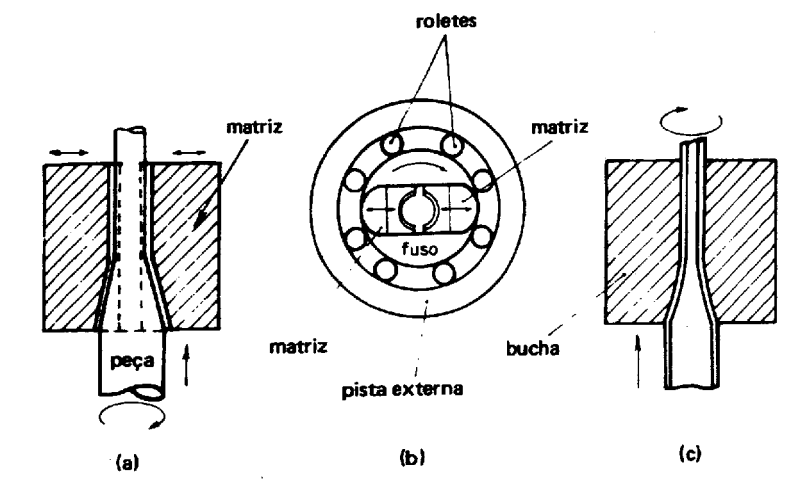


Figura 52 - Método de forjamento rotativo.

O forjamento rotativo de tubos é feito com os objetivos seguintes: redução dos diâmetros interno e externo, confecção de conicidade numa extremidade, melhora da resistência, obtenção de tolerâncias mais estreitas etc. Para reduzir apenas a espessura das paredes dos tubos, o forjamento rotativo é levado a efeito com o emprego de um mandril, ou seja, uma barra de precisão com diâmetro correspondente ao diâmetro interno do tubo. Esse mandril é colocado no interior do tubo, de modo que quando este recebe os golpes repetidos na superfície externa, a superfície interna não é afetada.

O mandril pode ser usado para modificar a forma da superfície interna do tubo, assim são feitas por exemplo as raia em cano de armamento.

3.4.6 Lubrificação no forjamento

Em diversas situações práticas o principal efeito do atrito é influenciar o acabamento da superfície do produto ou afetar o desgaste das matrizes e ferramentas.

Quando uma superfície sólida em um par que desliza em contato for muito mais dura que a outra (como é típico na combinação ferramenta-peça) as asperezas da superfície mais dura penetrarão na superfície mais mole, deslocando um volume de metal proporcional ao percurso total de deslizamento e à área da seção reta das asperezas, fato que é conhecido como aragem. A resistência ao atrito devido à aragem é aditiva àquela resultante do cisalhamento de asperezas unidas por aderência. A força de aragem está relacionada com as propriedades de escoamento da peça e com o tamanho e forma das asperezas. Assim, matrizes lisas são importantes para reduzir a contribuição da aragem ao atrito total.

O problema mais sério que se origina de uma lubrificação inadequada é a transferência de material da peça para as ferramentas, que é denominado pickup. A transferência de metal ocorre de duas maneiras. Se o filme de lubrificante é desfeito na interface de uma superfície áspera de uma ferramenta, a peça é forçada a penetrar em rebaixos na superfície da ferramenta. Um movimento tangencial subsequente cisalha o metal mole que se projeta para o interior dos vazios superficiais da ferramenta, resultando em absorção de material pela ferramenta (tool pickup) e num acabamento ruim da superfície da peça. Se o filme de lubrificante se desfaz sob a ação de pressões elevadas, ocorre uma soldagem a frio localizada entre a ferramenta e a peça. Quando um pedaço de metal se desprende da superfície da peça, este deixa exposto uma porção limpa de metal que é ainda mais suscetível à colagem a frio. Assim, quando se inicia a absorção de material desprendido (pickup), ela geralmente se torna progressivamente pior, levando ao colamento (galling e seizure).

Já que as superfícies das ferramentas estão sujeitas a vários ciclos de deslizamento, elas sofrem um desgaste contínuo durante a utilização. O principal mecanismo de desgaste é a abrasão devida à presença de partículas duras de óxido na superfície. Uma outra fonte de desgaste é a fadiga superficial proveniente de ciclos de aumentos e decréscimos na pressão interfacial. As tensões térmicas devido ao aquecimento e resfriamento das ferramentas podem também originar o surgimento de fissuras em suas superfícies. Ao se selecionar um lubrificante, a peça, a matriz e o lubrificante devem ser considerados como um único sistema. São várias as funções de um lubrificante em processos de conformação:

1. Reduzir a carga de deformação;
2. Aumentar o limite de deformação que antecede a fratura;
3. Controlar o acabamento da superfície;
4. Minimizar a absorção de metal da peça pelas ferramentas;
5. Minimizar o desgaste da ferramenta;
6. Proporcionar um isolamento térmico para a peça e as ferramentas;
7. Esfriar a peça e/ou as ferramentas.

Existem diversos requisitos, às vezes contraditórios, para um bom lubrificante adequado para o uso em conformação. Este deve ser capaz de funcionar para um variado espectro de pressões, temperaturas e velocidades de deslizamento. Como uma das características da maioria dos processos de trabalho mecânico é a geração de uma grande quantidade de áreas superficiais novas, o lubrificante deve possuir propriedades de espalhamento e molhabilidade favoráveis. Deve também ser compatível tanto com a matriz quanto com o material da peça com relação à molhabilidade e ao ataque químico, devendo possuir boa estabilidade térmica e resistência a ataque bacteriológico e outros contaminantes de menor importância. Um bom lubrificante produz resíduos que não causam manchas após soldagem ou tratamentos térmicos subsequentes, sendo facilmente removíveis. Finalmente, um lubrificante não deve ser tóxico, inflamável e caro.

Existem duas categorias gerais de lubrificação: parcial e hidrodinâmica. Na lubrificação parcial as superfícies não estão totalmente separadas por um filme de

lubrificantes. Esta é a situação mais comum para a lubrificação na conformação mecânica. Na lubrificação hidrodinâmica as duas superfícies se encontram totalmente separadas por um filme lubrificante. Esta situação existe em mancais, mas não é comum na conformação. Ela ocorre, por exemplo, na extrusão hidrostática e no estiramento de arames com lubrificação pressurizada. A utilização de um filme lubrificante espesso tal como na extrusão de aço com vidro viscoso como lubrificante, pode ser considerada uma lubrificação quase hidrodinâmica. Os lubrificantes reduzem o atrito ao introduzirem uma interface que seja facilmente cisalhada. Materiais orgânicos com cadeias moleculares longa são exemplo. típicos de lubrificantes parciais, Estas moléculas polares prendem uma de suas extremidades à superfície do metal; como exemplos típicos podemos citar os ácidos graxos, tal como o ácido oléico, que forma um sabão metálico quando misturado com água ou óleo. Os lubrificantes orgânicos possuem baixa estabilidade térmica, não podendo ser utilizados acima de 200 a 300°C. Os aditivos de extrema pressão ("aditivos EP") reagem localmente quando o filme da lubrificação parcial é quebrado sob a ação de calor e pressão. Quando uma superfície nova é formada devido à quebra do filme de lubrificação parcial, os aditivos EP reagem quimicamente para formar um composto com baixa resistência interfacial ao cisalhamento. Compostos halogênicos e enxofre coloidal são exemplos de aditivos EP. Frequentemente aplicam-se revestimentos de conversão (óxidos, fosfatos ou cromatos) à peça para servirem como uma base para a retenção de lubrificante, sendo que alguns destes revestimentos já possuem propriedades lubrificantes.

Uma lubrificação quase hidrodinâmica pode ser obtida através de filmes lubrificante contínuos, que podem ser constituídos de sólidos dúcteis moles (tais como chumbo, cobre, teflon), polietileno ou sólidos com uma estrutura lamelar (tais como MoS_2 , grafite, nitrato de boro e certos óxidos). Uma lubrificação com filmes contínuos pode também ser obtida com fluidos como vidro fundido ou com dispersão de grafite. Em condições de lubrificação completa por filme fluido a resistência interfacial ao cisalhamento é um produto da viscosidade do filme e da taxa de deformação cisalhante .

O acabamento superficial de um produto trabalhado depende das condições de atrito. No trabalho a frio as asperezas superficiais são aplanadas por uma ferramenta lisa e polida, produzindo uma superfície brilhosa ou polida. Uma ferramenta áspera nunca produzirá um acabamento superficial melhor que o seu próprio. Um acabamento sem brilho é produzido com lubrificação de filme espesso e ferramentas lisas. Quando a peça não é conformada em contato direto com as ferramentas. como em certas operações de conformação de chapas, o acabamento superficial é controlado pelas propriedades da peça; daí resultam defeitos tais como casca de laranja e restrições ao estiramento.

4. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

BILLIGMANN, J. Estampado y prensado a máquina. sl, Editora Reverté, sd

- CHIAVERINI, V. **Tecnologia mecânica:** Estrutura e Propriedades das Ligas Metálicas. Vol I 2º ed. McGraw-Hill, São Paulo 1986
- CHIAVERINI, V. **Tecnologia mecânica:** Processos de Fabricação e Tratamento. Vol II 2º ed. McGraw-Hill, São Paulo 1986
- del RÍO, J. **Deformación plástica de los materiales:** La forja y la laminación en caliente. Barcelona, Editoria Gustavo Gill, 1980.
- DIETER, G. E. **Metalurgia mecânica.** 2º ed. Rio de janeiro, Editora Guanabara Koogan S.A. , 1981
- GRÜNING, K. **Técnica da conformação.** trad. Prof. Arno Blass. São Paulo, Polígono, 1973.
- GERLING, H. **Moldagem e conformação:** Manual de consulta sobre processos de fabricação. Trad. de Jürgen B. Neermann. Rio de Janeiro, Editora Reverté, 1982.
- MIELNIK, E. M. **Metalworking science and engineering.** EUA, McGraw-Hill, 1991.