

INSTITUTO FEDERAL DE SANTA CATARINA -IFSC
GERÊNCIA EDUCACIONAL DE METAL MECÂNICA
CURSO TÉCNICO DE MECÂNICA INDUSTRIAL

PROCESSOS DE FABRICAÇÃO

CONFORMAÇÃO MECÂNICA I – Generalidades, Laminação e Forjamento

Prof. Eng. Mec. Norberto Moro
Téc. Mec. André Paegle Auras

www.norbertocefetsc.pro.br

FLORIANÓPOLIS - 2024

Sumário

Apresentação.....	3
1. GENERALIDADES DA CONFORMAÇÃO MECÂNICA.....	4
1.1 Introdução.....	4
1.2 Temperatura na Conformação.....	5
1.3 Trabalho a Quente.....	6
1.4 Trabalho a Frio.....	7
1.5 Trabalho a Morno.....	8
1.6 Tabela Comparativa.....	9
1.7 Processos de Recuperação e Recristalização.....	9
1.8 Partículas e Inclusões.....	11
1.9 Exercícios.....	12
2. LAMINAÇÃO.....	13
2.1 Introdução.....	13
2.2 Laminadores.....	14
2.3 Processos de Laminação.....	15
2.4 Laminação a Quente.....	20
2.5 Laminação a Frio.....	21
2.6 Processamento Termomecânico.....	22
2.7 Defeitos nos Produtos Laminados.....	22
2.7 Exercícios.....	23
3. FORJAMENTO.....	24
3.1 Introdução.....	24
3.2 Tipos, Equipamentos, Etapas e Materiais.....	24
3.3 Forjamento Livre (Matriz Aberta).....	26
3.4 Forjamento em Matriz Fechada.....	28
3.5 Defeitos nos Produtos Forjados.....	31
3.6 Exercícios.....	31
Respostas dos exercícios.....	32
Referências Bibliográficas.....	34

APRESENTAÇÃO

Panelas, fogões, geladeiras, fornos microondas, microcomputadores, automóveis, máquinas agrícolas, trens, navios, aviões, naves espaciais, satélites etc. Desde o produto mais simples até o mais sofisticado, todos dependem de vários processos de fabricação mecânica para existir.

Por mais simples que a peça seja, é sempre necessário usar máquinas e realizar mais de uma operação para produzi-la. Começando pela fundição, seguindo pelos processos de conformação mecânica e usinagem, as peças são fabricadas e reunidas para conjuntos mecânicos sem os quais a vida moderna seria impensável.

Em um ambiente industrial, a conformação mecânica é qualquer operação durante a qual se aplica esforço mecânico em diversos materiais, resultando em uma mudança permanente de formas e dimensões. Para a produção de peças, a conformação mecânica inclui um grande número de processos: laminação, forjamento, trefilação, extrusão e conformação de chapas. Esses processos têm em comum o fato de que, para a produção da peça, algum esforço do tipo compressão, tração, flexão e cisalhamento, têm de ser aplicado sobre o material.

Como é possível que materiais tão rígidos, como o aço, podem ser comprimidos, puxados ou dobrados para adquirirem os formatos que o produto necessita? As propriedades mecânicas dos materiais respondem: elasticidade e plasticidade. A elasticidade é a capacidade que o material tem de se deformar, se um esforço é aplicado sobre ele, e de voltar à forma anterior quando o esforço para de existir. A plasticidade, por sua vez, permite que o material se deforme e mantenha essa deformação, se for submetida a um esforço de intensidade maior e mais prolongada. Essas duas propriedades são as que permitem a existência dos processos de conformação mecânica.

Eles também são ajudados pela estrutura cristalina dos metais, porque permite que camadas “deslizem” umas sobre as outras, evitando rupturas internas e externas. É devido a este tipo de propriedade dos metais, que podemos obter até folhas de metal (p.ex. papel alumínio).

Nesta primeira apostila de conformação mecânica serão estudadas as generalidades da conformação, além dos processos de laminação e de forjamento. Às apostilas, livros e sites que proporcionaram conteúdo a esta apostila, obtenham nossa gratidão.

1. GENERALIDADES DA CONFORMAÇÃO MECÂNICA

1.1 Introdução

Os processos de conformação mecânica são aqueles que alteram a geometria do material (forma) por deformação plástica, através de forças aplicadas por ferramentas adequadas, que podem variar desde pequenas matrizes até grandes cilindros.

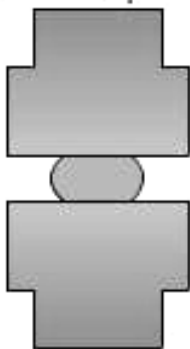
As vantagens com este processo são muitas: bom aproveitamento da matéria; rapidez na execução; possibilidade de controle das propriedades mecânicas; e possibilidade de grande precisão e tolerância dimensional. É importante observar, entretanto, que o ferramental e os equipamentos possuem um custo muito elevado, exigindo grandes produções para justificar o processo economicamente.

Existem algumas centenas de processos unitários de conformação mecânica, desenvolvidos para aplicações específicas. Mas é possível classificá-los num pequeno número de categorias, com base em critérios tais como: o tipo de esforço, deformação do material, variação relativa da espessura da peça, o regime da operação de conformação e o propósito da deformação. Basicamente, se dividem em:

- **LAMINAÇÃO:** conjunto de processos em que se faz o material passar através da abertura entre cilindros que giram (tipo massa de pastel), reduzindo a seção transversal; os produtos podem ser placas, chapas, barras de diferentes seções, trilhos, perfis diversos, anéis e tubos.



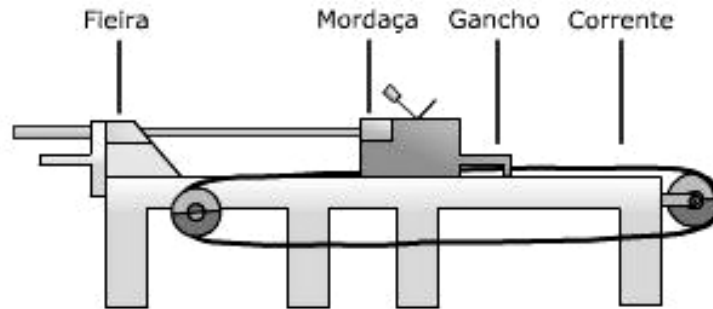
Matriz superior



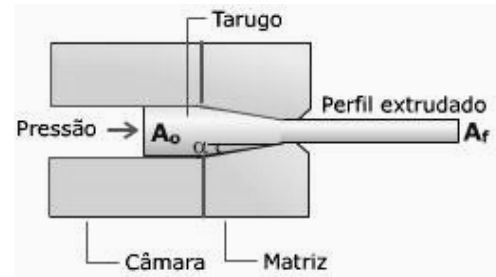
Matriz inferior

- **FORJAMENTO:** conformação por esforços compressivos fazendo o material assumir o contorno da ferramenta conformadora, chamada matriz ou estampo. Moedas, parafusos, âncoras e virabrequins estão entre os produtos do forjamento.

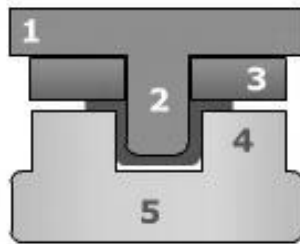
- **TREFILAÇÃO:** redução da seção transversal de uma barra, fio ou tubo, "puxando-se" a peça através de uma ferramenta (fieira ou trefila) em forma de "funil". É o processo comum para obtenção de fios de todo tipo.



- **EXTRUSÃO:** processo em que a peça é “empurrada” contra a matriz conformadora, com redução da sua seção transversal, como ocorre numa máquina de formar macarrão. O produto pode ser uma barra, perfil (esquadrias de alumínio, etc.) ou tubo.



- **CONFORMAÇÃO DE CHAPAS:** Compreende operações com chapas, como corte, dobramento e estampagem. Produtos são arruelas, painéis, enlatados, etc.



- 1- Suporte de punção
- 2- Punção ou penetrador
- 3- Prensa chapas ou sujeitador
- 4- Matriz
- 5- Suporte da matriz

1.2 Temperatura na Conformação

Em função da temperatura e do material utilizado, a conformação mecânica pode ser classificada como trabalho a frio, a morno e a quente. O trabalho a quente (TQ) é usado para reduzir os esforços de conformação e/ou permitir a recristalização¹. Geralmente, a temperatura mais elevada de trabalho a quente é limitada bem abaixo do ponto de fusão, devido à possibilidade de fragilização à quente (existência de compostos dentro do material com menor ponto de fusão). Basta uma pequena quantidade de constituinte com baixo ponto de fusão nos contornos de grão para fazer um material desagregar-se quando deformado.

De outra forma, o trabalho a frio (TF) é a deformação realizada sob condições em que não ocorre a recristalização do material. Já no trabalho a morno, ocorre uma recuperação² do material, sem recristalização.

¹ Recristalização: Em uma certa temperatura, os grãos (estrutura cristalina) amassados e distorcidos pela conformação formam novos grãos, reduzindo as tensões internas.

² Recuperação: Há um rearranjo das discordâncias, melhorando a ductilidade do material, mas não ocorre formação de novos grãos (recristalização).

É importante entender que a distinção básica entre TQ e TF não está na temperatura em si, mas na temperatura de recristalização do material. Porque, dependendo da liga, podemos ter TQ com conformações à temperatura ambiente, como no caso de Pb e Sn. Por outro lado, a conformação a 1100°C é TF para o tungstênio, cuja temperatura de recristalização é superior, embora tal temperatura seja TQ para o aço.

É importante lembrar do calor gerado na conformação. Tanto a deformação plástica quanto o atrito contribuem para a geração de calor. Da energia empregada na deformação plástica de um metal, apenas 5 a 10% ficam acumulados na rede cristalina, sob a forma de energia interna, sendo os restantes 90 a 95% convertidos em calor. Em algumas operações de conformação contínua, como extrusão e trefilação (efetuadas em altas velocidades), a temperatura pode aumentar em centenas de graus. Uma parte do calor gerado é dissipada (transmitido às ferramentas ou perdido para a atmosfera), mas o restante permanece na peça, elevando-lhe a temperatura.

1.3 Trabalho a Quente

O trabalho a quente é a etapa inicial na conformação mecânica da maioria dos metais e ligas. Este trabalho não só requer menos energia para deformar o metal, como proporciona o surgimento de menos discordâncias microestruturais e também ajuda a diminuir as heterogeneidades da estrutura dos lingotes fundidos devido às rápidas taxas de difusão³ presentes às temperaturas de trabalho a quente⁴. Além disso, as variações microestruturais proporcionam um aumento na ductilidade⁵ e na tenacidade⁶, comparado ao estado fundido.

Como desvantagem, geralmente, a estrutura e propriedades dos metais trabalhados a quente não são tão uniformes ao longo da seção reta como nos metais trabalhados a frio e recozidos, já que a deformação é sempre maior nas camadas superficiais. O metal possuirá grãos recristalizados de menor tamanho nesta região. Como o interior do produto estará submetido a temperaturas mais elevadas por um período de tempo maior durante o resfriamento do que as superfícies externas, pode ocorrer crescimento de grão no interior de peças de grandes dimensões, que resfriam vagarosamente a partir da temperatura de trabalho.

A maioria das operações de TQ é executada em múltiplos passes; em geral, nos passes intermediários a temperatura é mantida bem acima do limite inferior de recristalização do metal para se tirar vantagem da redução na tensão de escoamento, embora com o risco de um crescimento de grão. Como, porém, deseja-se usualmente um produto com tamanho de grão pequeno, a temperatura dos últimos passes (temperatura de acabamento) é bem próxima do limite inferior e a quantidade de deformação é relativamente grande. Pequenos tamanhos de grãos dão origem a peças com melhor resistência e

³ Movimentação interna de material.

⁴ As bolhas de gás e porosidades são eliminadas pelo caldeamento destas cavidades e a estrutura colunar dos grãos grosseiros da peça fundida é quebrada e refinada em grãos equiaxiais recristalizados de menor tamanho.

⁵ Propriedade do material de sofrer deformação permanente sem romper.

⁶ Capacidade que um material tem para absorver energia, nos campos plástico e elástico.

tenacidade. Veja abaixo figuras do comportamento dos grãos na conformação com TQ.

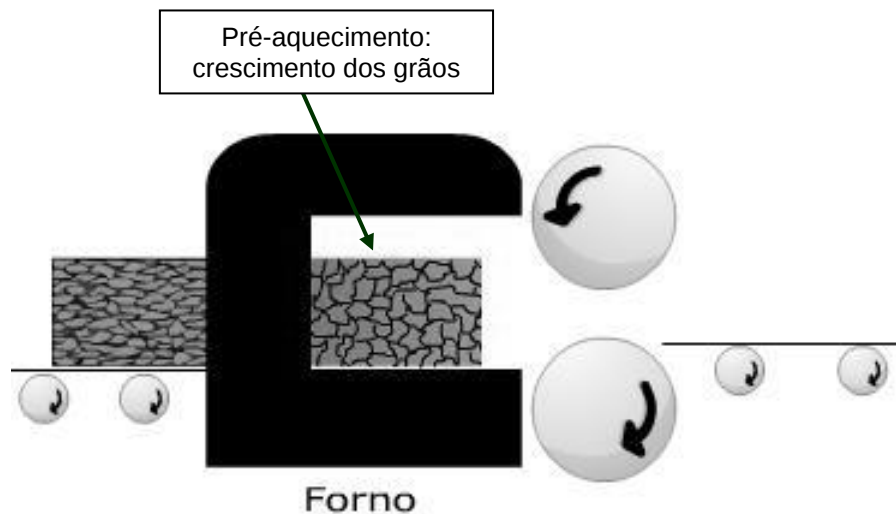


Figura: Pré-aquecimento na laminação (TQ)

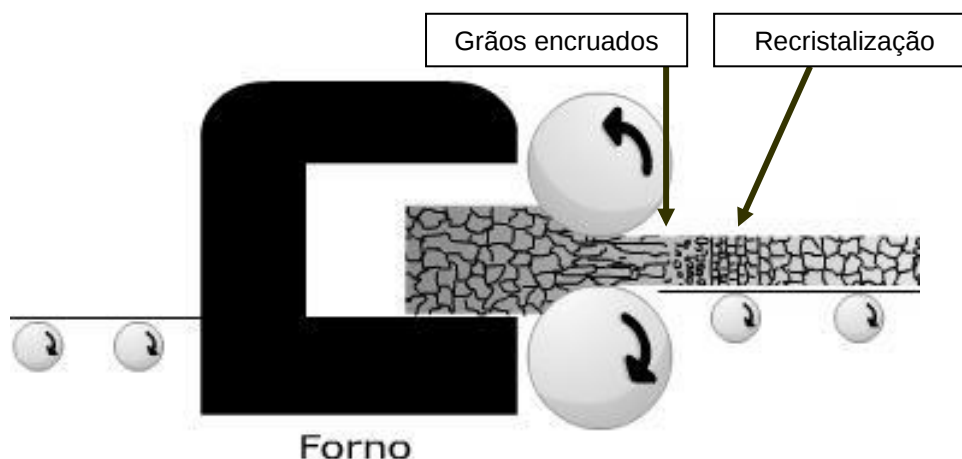


Figura: Recristalização no TQ (veja o crescimento dos grãos pós-recristalização)

1.4 Trabalho a Frio

O trabalho a frio é acompanhado do encruamento⁷ do metal, que é ocasionado pela interação das discordâncias entre si e com outras barreiras – tais como contornos de grão – que impedem o seu movimento através da rede cristalina. A deformação plástica produz também um aumento no número de discordâncias, as quais, em virtude de sua interação, resultam num elevado estado de tensão interna na rede cristalina. Um metal cristalino contém em média entre 1 e 100 milhões de cm de discordâncias por cm³, enquanto que um metal severamente encruado apresenta cerca de 100 bilhões de cm de discordâncias por cm³. A estrutura característica do estado encruado examinada ao microscópio eletrônico, apresenta dentro de cada grão, regiões

⁷ Deformação nos grãos do material em função da conformação sofrida, gerando aumento da dureza e queda da ductilidade.

pobres em discordâncias, cercadas por um emaranhado altamente denso de discordâncias nos planos de deslizamento.

Tudo isto resulta macroscopicamente num aumento de resistência e dureza e num decréscimo da ductilidade do material. Num ensaio de tração, isso se traduz no aumento da tensão de escoamento e do limite de resistência, bem como no decréscimo do alongamento total (alongamento na fratura).

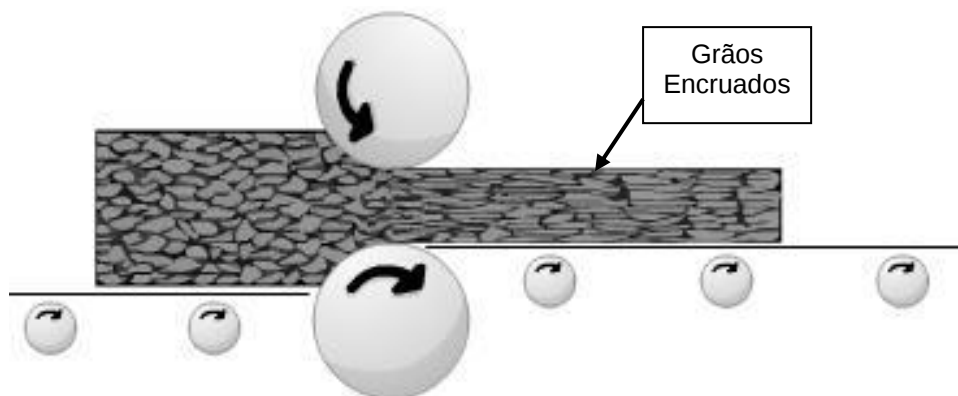


Figura: Encruamento de um material na laminação

1.5 Trabalho a Morno

Os processos de deformação a morno objetivam aliar as vantagens das conformações a quente e a frio. Dos processos de conformação a morno um dos mais difundidos e com maiores aplicações industriais é o forjamento. O trabalho a morno consiste na conformação de peças numa faixa de temperatura onde ocorre o processo de recuperação do material, não ocorrendo entretanto, a recristalização.

Com relação ao trabalho a quente, o processo morno apresenta melhor acabamento superficial e precisão dimensional devido à diminuição da oxidação e da dilatação. Assim, pode-se ter menores ângulos de saída e maior carga para a retirada da peça das matrizes sem deformar o produto. A maior desvantagem é o aumento do limite de escoamento, sendo necessário o emprego de prensas mais potentes e ferramentas mais resistentes.

Em relação ao trabalho a frio, o processo a morno apresenta redução dos esforços de deformação, o que permite a conformação mais fácil de peças com formas complexas, principalmente em materiais com alta resistência. A conformação a morno melhora ainda a ductilidade do material e elimina a necessidade de recozimentos intermediários que consomem muita energia e tempo.

Existe alguma controvérsia sobre a faixa de temperatura empregada na conformação a morno dos aços, mas, certamente se torna importante entre 500 e 800°C. A temperatura inferior de conformação é limitada em aproximadamente 500°C devido à possibilidade de ocorrência da "fragilidade azul" em temperaturas mais baixas⁸.

⁸ Esta fragilização aumenta a tensão de escoamento e diminui a ductilidade. Ela ocorre em temperaturas em torno de 200 a 400°C onde, átomos intersticiais difundem-se durante a deformação formando atmosferas em torno das discordâncias geradas, ancorando-as. O nome azul refere-se à coloração do óxido formado na superfície do aço nesta faixa de temperatura.

1.6 Tabela Comparativa

Não há um processo mais vantajoso em si do que outro, tudo depende do julgamento de vários fatores (tolerância, acabamento, material, ductilidade final, deformação, etc.). Muitas vezes o material passa tanto por TQ como por TF. Veja tabela de características dos processos abaixo:

	TQ	TF	TM
Força e energia	<	>	~
Elimino de defeitos da fundição	>	<	~
Tolerância e acabamento	<	>	~
Surgimento de discordâncias	<	>	~
Uniformidade da microestrutura	<	>	~
Recuperação	não	não	sim
Recristalização	sim	não	não

Legenda: > (maior); < (menor); ~ (intermediário).

1.7 Processos de Recuperação e Recristalização

Processo de recuperação: elevar a uma certa temperatura na qual as discordâncias são bastante móveis para formar arranjos regulares e mesmo se aniquilarem (somente as discordâncias de sinais opostos), formando uma estrutura celular (subgrãos) com uma pequena defasagem de orientação cristalográfica entre as células. É um processo que depende do tempo (figura b abaixo) e, embora não ocorra mudança na microestrutura, restaura parcialmente a maciez (menor resistência e maior ductilidade).

Processo de recristalização: a maciez original é inteiramente restaurada pelo aquecimento acima de certa temperatura, quando se formam novos grãos com baixa densidade de discordâncias. Os grãos crescem continuamente até que a estrutura toda esteja recristalizada. A microestrutura resultante é equiaxial, muito embora possa ser retida ou mesmo desenvolvida uma textura cristalográfica. É grandemente dependente da temperatura e do tempo (figura c).

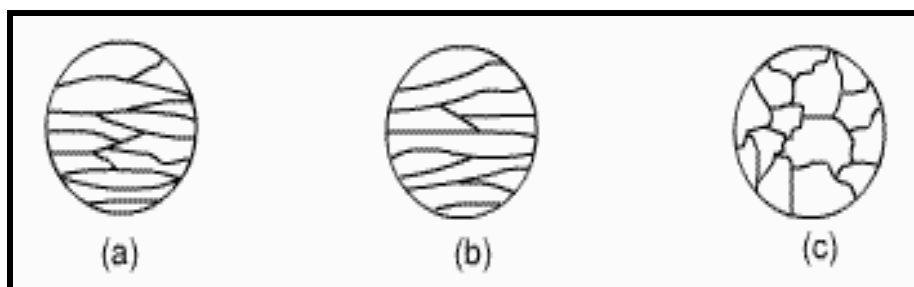
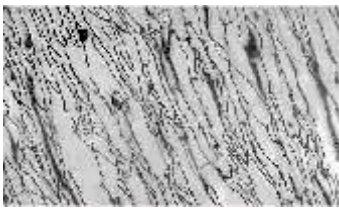
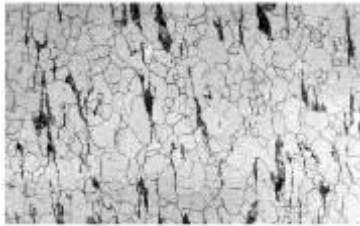


Figura: (a) TF; (b) T. Morno; (c) TQ.

A temperatura depende de cada material, e é apenas uma referência aproximada, pois mesmo pequenos teores de elemento de liga podem retardar substancialmente a formação de novos grãos, elevando a temperatura de recristalização.

	
Aço 1010 recozido a 550°C – sofreu apenas recuperação	Aço 1010 recozido a 600°C – sofreu recristalização

Na prática, a temperatura de recristalização é convencionalmente definida como aquela em que o metal severamente encruado recristaliza totalmente no espaço de uma hora. A tabela abaixo apresenta as temperaturas de recristalização para alguns metais e ligas de uso comum.

MATERIAL	Temperatura de Recristalização
Cobre Eletrolítico (99,999%)	121
Cu – 5% Zn	315
Cu – 5% Al	288
Cu – 2% Be	371
Alumínio Eletrolítico (99,999%)	279
Alumínio (99,0%)	288
Ligas de Alumínio	315
Níquel (99,99%)	571
Monel (Ni – Cu)	593
Ligas de Magnésio	252
Ferro Eletrolítico	398
Aço de Baixo Carbono	538
Zinco	10
Chumbo	-4
Estanho	-44

Em alguns metais, a recuperação aumenta a ductilidade mais do que diminui a resistência, sendo então possível controlar as propriedades finais do produto deformado por meio de um severo trabalho a frio, seguido de um recozimento de recuperação, que restaura grande parte da ductilidade sem reduzir muito a resistência.

A recristalização depende diretamente dos seguintes fatores:

1. Uma quantidade mínima de deformação prévia: se o trabalho a frio prévio é zero, não há recristalização e ficam mantidos os grãos originais;
2. Quanto maior a deformação prévia, menor será a temperatura de recristalização;
3. Quanto menor a temperatura, maior o tempo necessário à recristalização;
4. Quanto maior a deformação prévia, menor será o tamanho de grão resultante (pois será maior o número de núcleos a partir dos quais crescerão os novos grãos)⁹.

⁹ Uma estrutura de grãos grosseiros apresenta propriedades mecânicas pobres, ao passo que um tamanho de grão fino fornece ao material alta resistência sem diminuir muito a ductilidade.

5. Adições de elementos de liga tendem a aumentar a temperatura de recristalização (pois retardam a difusão).

Muitas vezes, recusa-se realizar TQ e utiliza-se o TF junto com posterior recozimento¹⁰. Apesar de aumentar o custo do processo (sobretudo com metais reativos, que têm de ser recozidos em atmosferas inertes ou em vácuo), fornecem também grande versatilidade, pois se ajustando adequadamente o ciclo TF + recozimento, pode-se obter qualquer grau desejado de encruamento no produto final.

1.8 Partículas e Inclusões

Como resultado do trabalho mecânico, as partículas de segunda fase (inclusões, vazios, segregações, etc.) tendem a distribuir-se e assumir um formato, de forma grosseira, análogo à deformação da peça como um todo.

Se as partículas e inclusões são dúcteis e mais moles do que a matriz, assumem forma alongada (1) (ex. MnS no aço); se forem frágeis, quebram-se em fragmentos que se orientam paralelamente à direção principal de trabalho (2) (ex. Al_2O_3 no aço); se forem mais duras e mais resistentes do que a matriz, não se deformam (3) (ex. SiO_2 no aço).

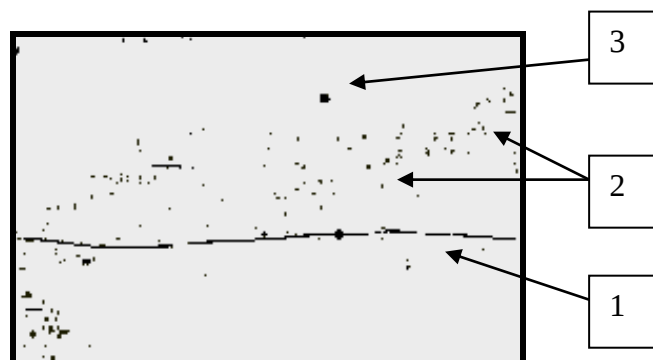


Figura: aço laminado a quente

A limpidez (nível de inclusões) é um parâmetro importante na seleção dos aços. Aços com a mesma composição química básica podem ter uma grande variação de propriedades mecânicas em função dos processos utilizados e das práticas de fabricação. Tratamentos de dessulfuração na panela, escória sintética e desgaseificação a vácuo podem produzir aços com alta limpidez (baixo nível de inclusões), necessários para algumas aplicações críticas, como na área nuclear. Entretanto, este nível de performance pode ser altamente conservativo e aumentar consideravelmente o custo de fabricação.

Aços com altos níveis de inclusões ao contrário, podem não ser seguros e ocasionar fraturas catastróficas. Então, para se ter estruturas com níveis aceitáveis de propriedades mecânicas, deve-se considerar a integridade estrutural e seu custo.

¹⁰ Termo genérico para tratamento térmico composto de aquecimento controlado até uma determinada temperatura, permanência nessa temperatura durante um certo intervalo de tempo e resfriamento regulado, alterando a microestrutura e propriedades do material.

1.9 Exercícios

1. O que define os trabalhos a quente, a morno e a frio?
2. Cite duas vantagens do trabalho a quente sobre os demais.
3. Cite duas vantagens do trabalho a frio sobre os demais.
4. Cite duas vantagens do trabalho a morno sobre os demais.
5. Defina os termos “recuperação” e “recristalização”.
6. Porque o nível de inclusões em um aço é importante para sua finalidade?

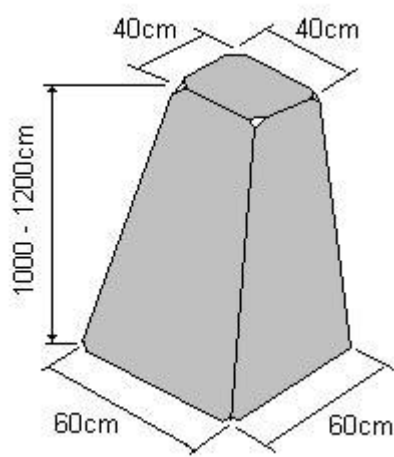
2. LAMINAÇÃO

2.1 Introdução

Laminação é o processo de conformação mecânica que consiste em modificar a seção transversal de um material passando-o entre dois cilindros que giram em sentido contrário. Os produtos podem ser planos (chapas) ou não planos (perfis mais ou menos complexos).

Na laminação o material é submetido a tensões compressivas elevadas, resultantes da ação de prensagem dos rolos e a tensões cisalhantes superficiais, resultantes do atrito entre os rolos e o material. As forças de atrito são também responsáveis pelo ato de "puxar" o metal para dentro dos cilindros.

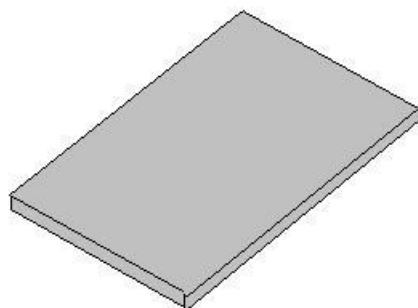
É o processo de transformação mecânica mais utilizado na fabricação de chapas e perfis, pois apresenta alta produtividade e um controle dimensional do produto acabado que pode ser bastante preciso, além de uma grande variedade de produtos.



A redução ou desbaste inicial dos lingotes (produtos padronizados da fundição, ver figura ao lado) em blocos, tarugos ou placas é realizada normalmente por laminação a quente. Depois dessa fase, segue-se uma nova etapa de laminação à quente para transformar o produto em chapas grossas, tiras a quente, vergalhões, barras, tubos, trilhos ou perfis estruturais.

Muitos ainda passam pela laminação a frio, que produz excelente acabamento superficial, com boas propriedades mecânicas e controle dimensional rigoroso do produto final.

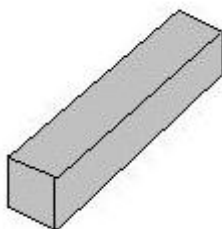
1. Placas



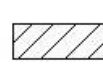
- Chapas

- Tiras

2. Tarugos



- Barras



- Perfis estruturais L, U, T, I, H

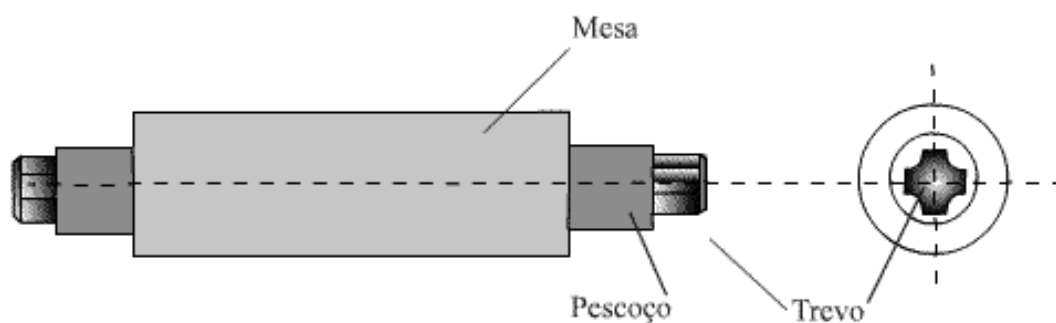
- Tubos sem costura



2.2 Laminadores

Um laminador consiste basicamente de cilindros (ou rolos), mancais, uma carcaça chamada de gaiola ou quadro para fixar estas partes, e um motor para fornecer potência aos cilindros e controlar a velocidade de rotação. As forças envolvidas na laminação podem facilmente atingir milhares de toneladas, portanto é necessária uma construção bastante rígida, além de motores muito potentes para fornecer a potência necessária. Dessa forma, o custo de uma moderna instalação de laminação é da ordem de milhões de dólares e são consumidas muitas horas de projetos, uma vez que esses requisitos são multiplicados para as sucessivas cadeiras de laminação contínua (chamado de “tandem mill”).

Os cilindros de laminação são de aço fundido ou forjado. Compoem-se de três partes (ver figura abaixo): a mesa, onde se realiza a laminação, e pode ser lisa ou com canais; os pescoços, onde se encaixam os mancais; e os trevos ou garfos de acionamento. Os cilindros são aquecidos pelo material laminado a quente e é de grande importância um resfriamento adequado deles, usualmente através de jatos de água.

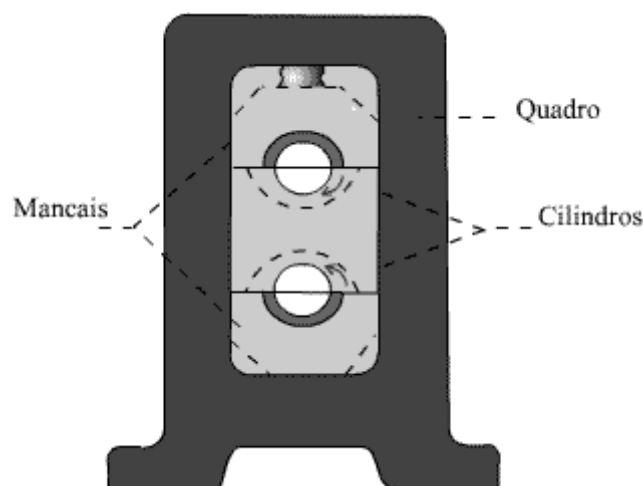


Componentes de um cilindro

Os mancais dos cilindros servem de apoio a estes cilindros; eventuais deformações destas peças provocariam variações dimensionais nos produtos, o que é altamente indesejável. Três tipos de mancais são usados em laminadores: mancais de fricção, onde o pescoço gira sobre casquilhos de bronze, madeira, etc., devidamente lubrificados; mancais de rolamento; e mancais a filme de óleo sob pressão.

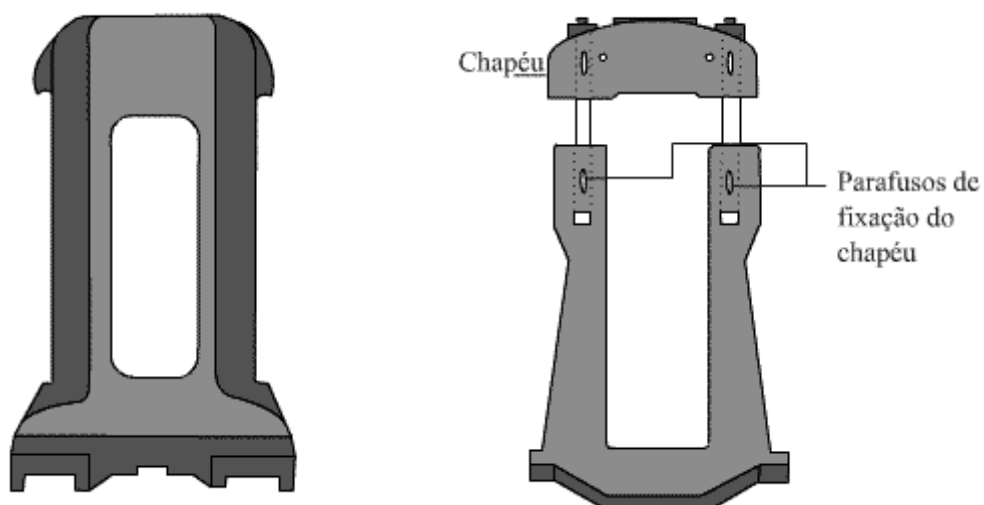
Utilizam-se variadas disposições de cilindros na laminação, o mais simples é constituído por dois cilindros de eixos horizontais, colocados verticalmente um sobre o outro, chamado duo.

A figura abaixo mostra uma vista esquemática de um laminador duo, constituído por um quadro, dois cilindros de trabalho, e os mancais nos quais giram os cilindros. Neste laminador, o cilindro inferior é fixo e o cilindro superior pode mover-se, durante a operação, através de um sistema de parafusos. Este movimento também pode ter acionamento hidráulico.



Laminador Duo

Os quadros são construídos de aço ou ferro fundido e podem ser do tipo aberto ou fechado. O quadro fechado é constituído por uma peça inteiriça, e os cilindros devem ser colocados ou retirados por um movimento paralelo ao seu eixo. A parte superior do quadro aberto é removível e denomina-se chapéu; neste caso, os cilindros são retirados por um movimento vertical, após a remoção do chapéu (ver figura abaixo). O quadro fechado é mais resistente que o aberto, mas apresenta maiores problemas para troca de cilindros.



Quadros fechado e aberto do laminador duo típico

2.3 Processos de Laminação

O processo mais simples é através do laminador duo, que pode ser reversível ou não. Nos duos não reversíveis, figura "A", o sentido de giro dos cilindros não pode ser invertido, e o material só pode ser laminado em um sentido. Nos reversíveis, figura "B", a inversão da rotação dos cilindros permite que a laminação ocorra nos dois sentidos de passagem entre os rolos. No laminador trio, figura "C", os cilindros sempre giram no mesmo sentido. Porém, o material pode ser laminado nos dois sentidos, passando-o alternadamente entre o cilindro superior e o intermediário e entre o intermediário e o inferior.

À medida que se laminam materiais cada vez mais finos, há interesse em utilizar cilindros de trabalho de pequeno diâmetro¹¹. Estes cilindros podem fletir, e devem ser apoiados em cilindros de encosto, figura “D”. Este tipo de laminador denomina-se quádruo, podendo ser reversível ou não.

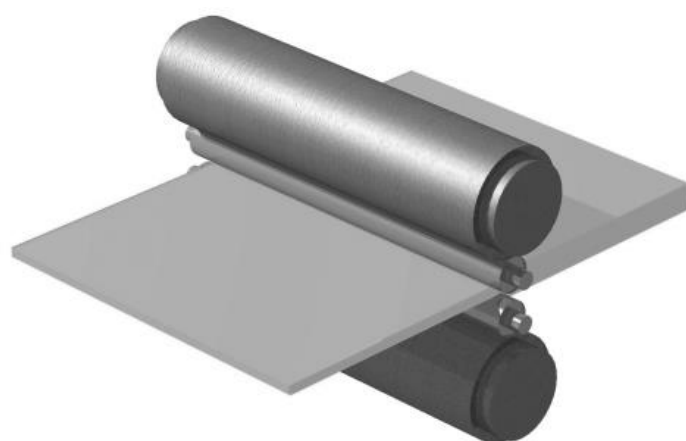
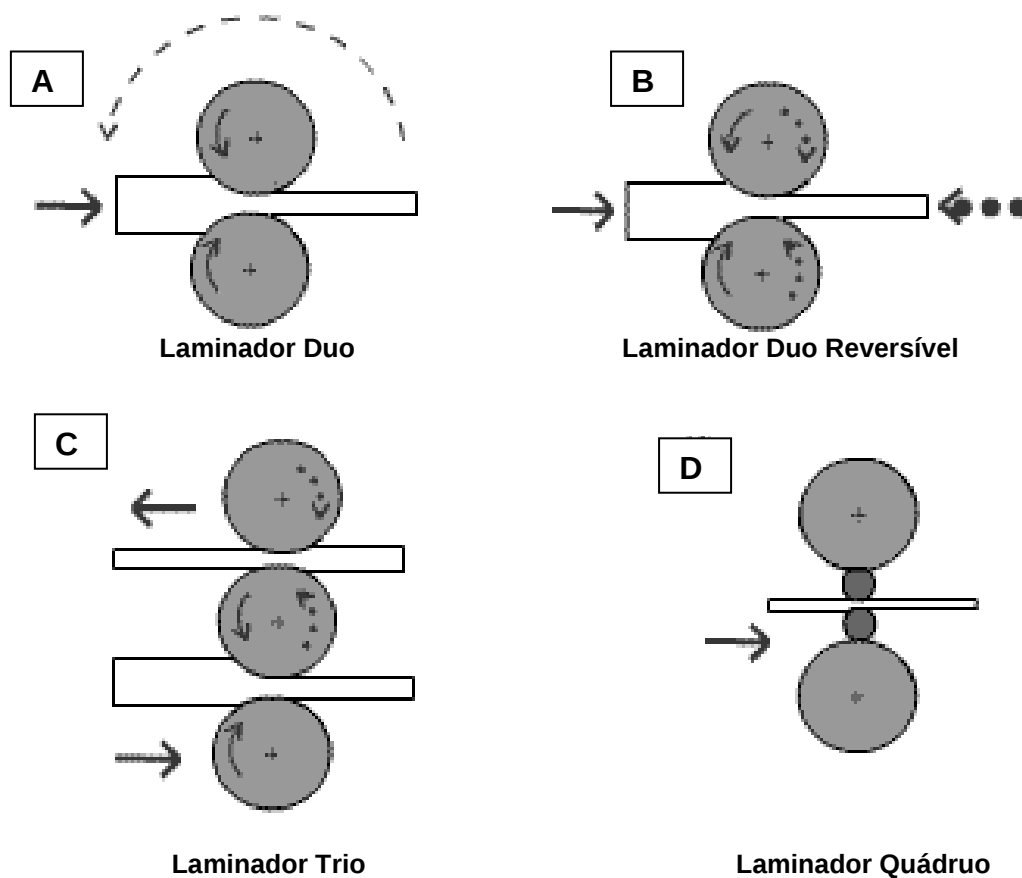
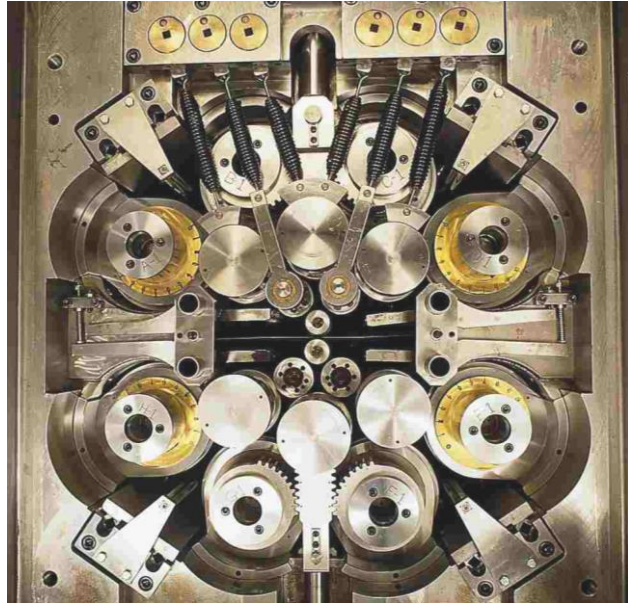
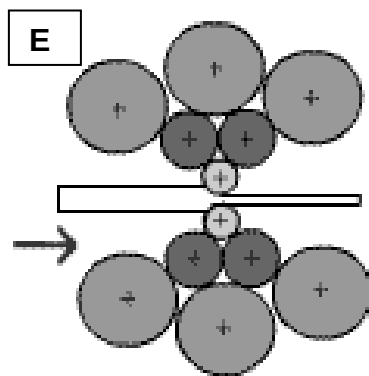


Figura: Esquema de um laminador quádruo

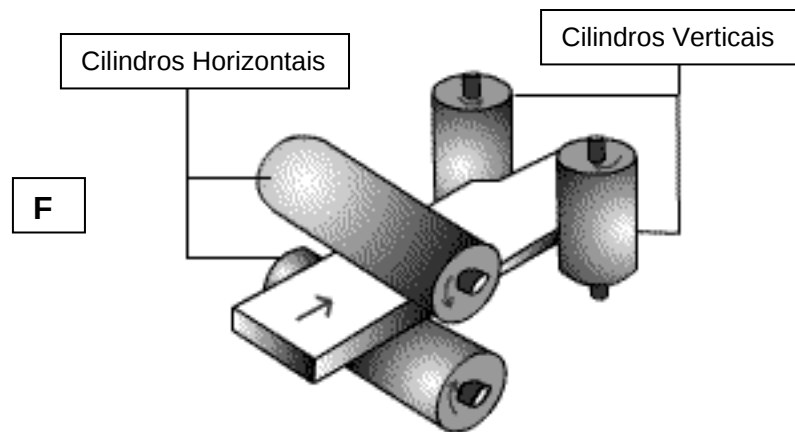
Quando os cilindros de trabalho são muito finos, podem fletir tanto na direção vertical quanto na horizontal e devem ser apoiados em ambas direções; um laminador que permite estes apoios é o Sendzimer, figura “E”.

Um outro laminador muito utilizado é o universal, que dispõe de dois pares de cilindros de trabalho, com eixos verticais e horizontais, figura “F”.

¹¹ Apesar do custo ser mais elevado, pode-se ter maior precisão dimensional.

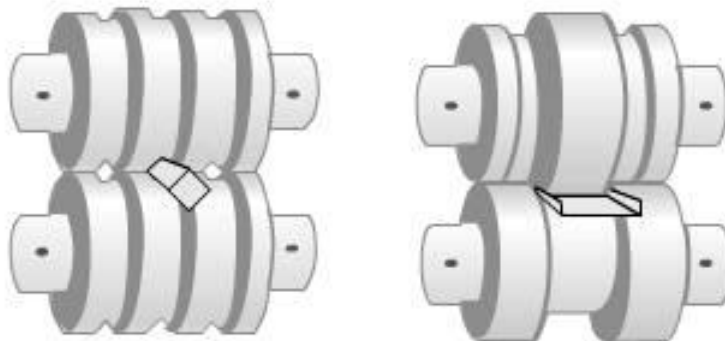


Esquema e foto do laminador Sendzimer



Laminador Universal

Barras de seção circular e hexagonal, e perfis estruturais (como vigas em I, calhas e trilhos) são produzidos em grande quantidade por laminação a quente com cilindros ranhurados, conforme mostrado abaixo.

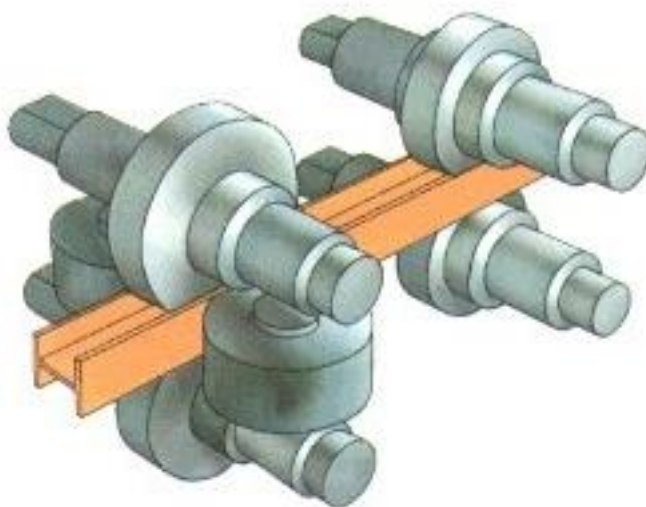


Laminadores ranhurados para perfis

A laminação de barras e perfis difere da laminação de planos, pois a seção transversal do metal é reduzida em duas direções. Entretanto, em cada

passo o metal é normalmente comprimido somente em uma direção. No passo subsequente o material é girado em 90°. Uma vez que o metal se expande muito mais na laminação a quente de barras do que na laminação a frio de folhas, o cálculo da tolerância necessária para a expansão é um problema importante no planejamento dos passes para barras e perfis. Um método típico para reduzir um tarugo quadrado numa barra é alternando-se passes através de ranhuras ovais e quadradas. O planejamento dos passes para perfis estruturais é muito mais complexo e requer bastante experiência.

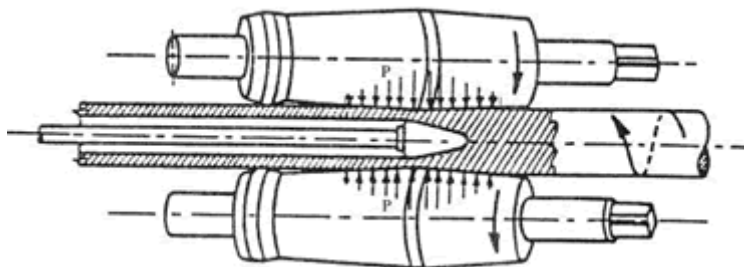
A maioria dos laminadores de barras é equipada com guias para conduzir o tarugo para as ranhuras e repetidores para inverter a direção da barra e conduzi-la para o próximo passo. Os laminadores desse tipo podem ser normalmente duos ou trios. A instalação comum para a produção de barras consiste em uma cadeira de desbaste, uma cadeira formadora e uma cadeira de acabamento.



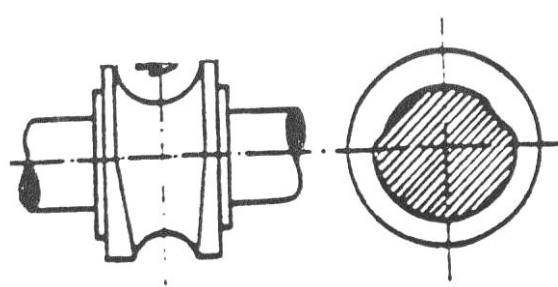
Laminador tipo Gray para perfis estruturais H

A laminação de tubos sem costura se dá comumente pelo processo Mannesmann. A partir de uma barra de seção circular obtém-se um tubo sem costura, utilizando os seguintes laminadores:

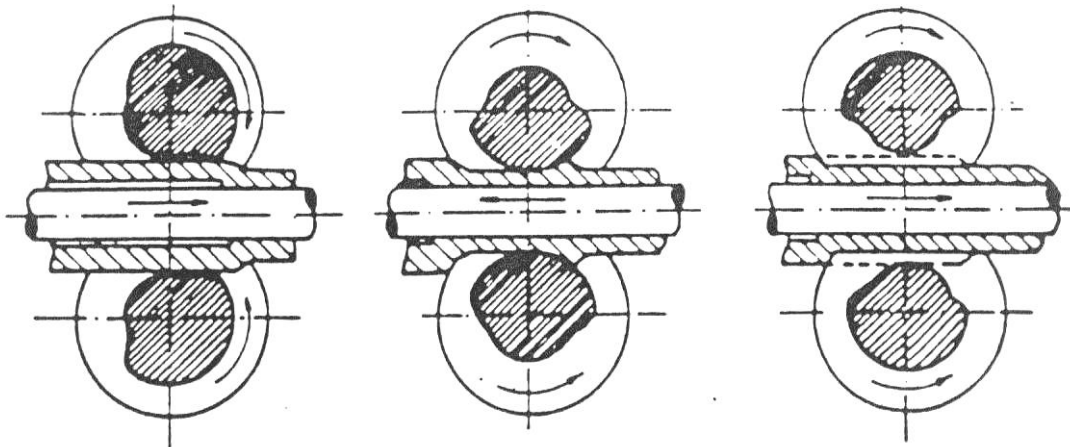
a) Puncionador: Realiza o puncionamento do tarugo, obtendo tubos curtos com paredes grossas.



b) Passo de peregrino: O tubo curto obtido na etapa anterior é submetido a este laminador com o objetivo de reduzir a espessura da parede e aumentar o comprimento. É necessário posterior acabamento, para desempenar e melhorar tolerância e acabamento superficial.



Forma excêntrica de um laminador passo de peregrino



Sequência da laminação com o passo de peregrino



Figura: Processo Mannesmann para tubos sem costura

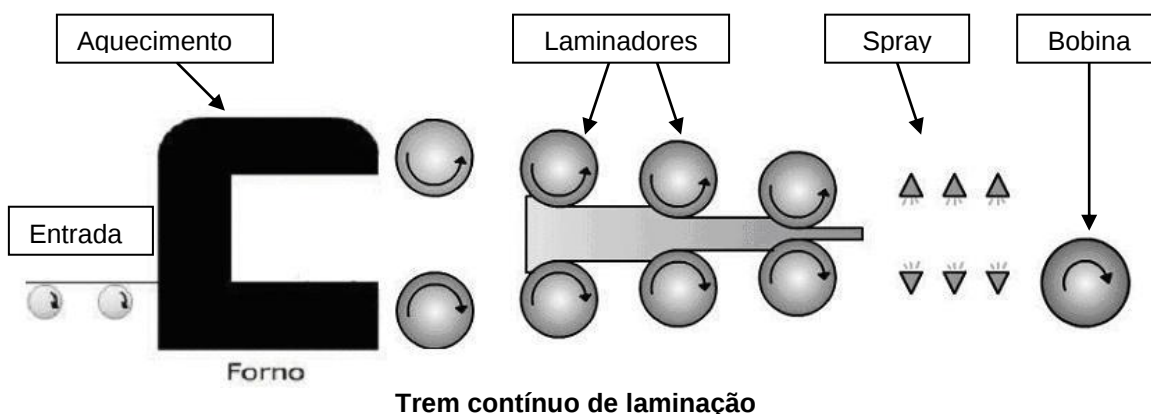
Existem ainda outros tipos de processos de laminação mais especializados, como o planetário, de bolas, etc.

2.4 Laminação a Quente

Quando a matéria prima é o lingote¹², a primeira operação de laminação ocorre em um laminador desbastador, que é usualmente um duo reversível cuja distância entre os rolos pode ser variada durante a operação. Na operação de desbaste utiliza-se também laminadores universais, o que permite um melhor esquadrinhamento do produto. Os produtos desta etapa são blocos¹³ (“blooms”, seção quadrada) ou placas¹⁴ (“slab”, seção retangular).

As placas são laminadas até chapas (espessura inferior a 4,775 mm) ou tiras a quente (espessura inferior a 0,3 mm). Na laminação de chapas, utilizam-se laminadores duos ou quádruplos reversíveis, sendo este último o mais utilizado. Na laminação de tiras, comumente utilizam laminadores duos ou quádruplos reversíveis numa etapa preparadora, e posteriormente um trem contínuo de laminadores quádruplos.

A figura abaixo mostra esquematicamente um trem contínuo de laminação. O material, após a laminação, é decapado¹⁵, recebe spray de óleo¹⁶, e é bobinado à quente, indo a seguir para o mercado ou para a laminação a frio.



Deve-se observar que, com o lingotamento contínuo¹⁷, produzem-se placas e tarugos diretamente da máquina de lingotar, evitando-se uma série de operações de laminação, em especial a laminação desbastadora.

¹² Lingote: Produto bruto resultante da fundição em molde metálico, geralmente destinado a posterior conformação plástica.

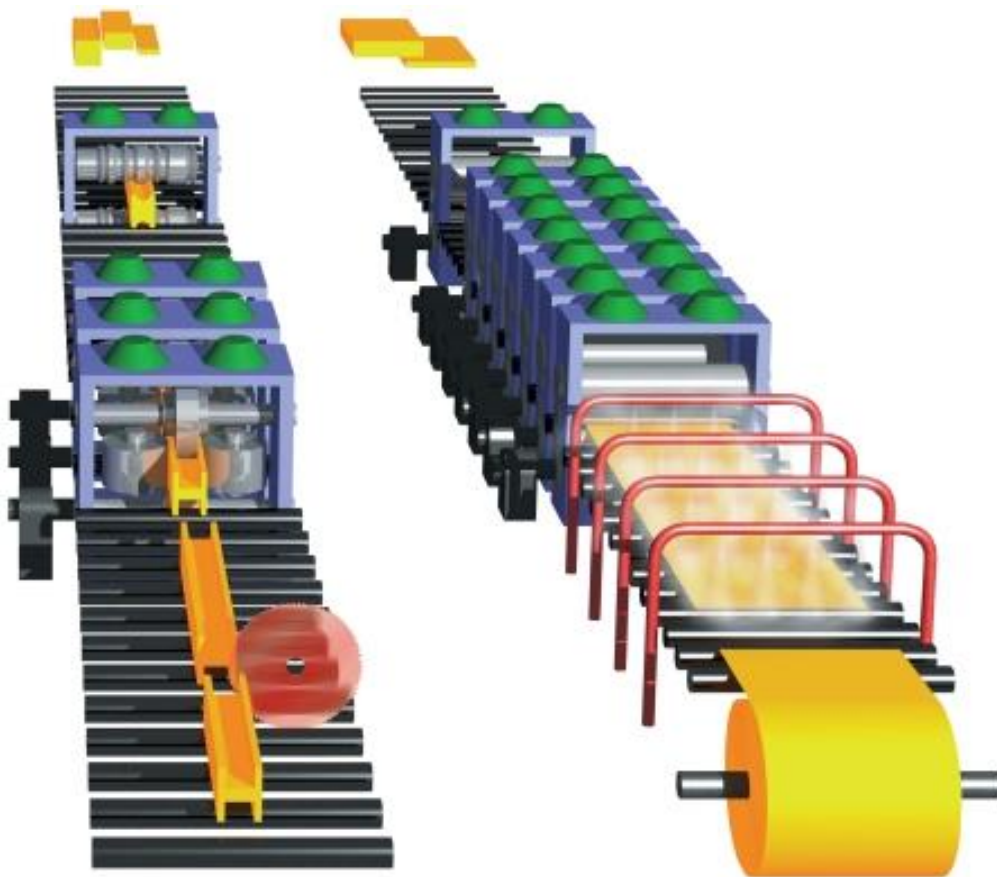
¹³ Bloco: Tarugo quadrado com seção geralmente superior a 6x6", normalmente usado para a fabricação de vigas.

¹⁴ Placa: material com mais de 4,775 mm de espessura e largura superior a 304,8 mm.

¹⁵ Carepa: Película de óxido de ferro que se forma na superfície do aço laminado a quente, é removida com sprays de água em alta pressão ou outros métodos.

¹⁶ Spray de óleo: forma um fino filme no material decapado, evitando nova formação de óxido.

¹⁷ Lingotamento contínuo: Ao invés de criar lingotes para posterior laminação, o aço líquido é vazado continuamente num molde que sai direto para o trem de laminação. Assim, o tarugo não precisa ser aquecido, e já substituiu em muitas usinas siderúrgicas o convencional.



Trem contínuo de laminação de perfis H (esquerda) e chapas (direita)

As indústrias de transformação de não ferrosos operam com uma diversidade muito grande de produtos, portanto, os equipamentos utilizados na laminação a quente desses materiais são muito menos especializados do que os empregados na laminação a quente de aços. Os lingotes de materiais não ferrosos são menores e as tensões de escoamento são normalmente mais baixas do que as dos materiais ferrosos, o que permite o uso de laminadores de pequeno porte. Laminadores duos ou trios são normalmente usados para a maioria dos metais não ferrosos na laminação a quente, entretanto, laminadores quádruplos contínuos são usados para as ligas de alumínio.

2.5 Laminação a Frio

A laminação a frio é empregada para produzir tiras e folhas (a tira difere da folha pelo melhor controle dimensional) com acabamento superficial e tolerâncias dimensionais superiores, quando comparadas com as tiras produzidas por laminação a quente. Além disso, o encruamento resultante da redução a frio pode ser aproveitado para dar maior resistência ao produto final. Os materiais de partida para a produção de tiras de aço laminadas a frio são as bobinas a quente decapadas, resultantes dos trens contínuos de laminação. A laminação a frio de metais não ferrosos pode ser realizada a partir de tiras a quente ou, como no caso de certas ligas de cobre, diretamente de peças fundidas.

Trens de laminadores quádruplos de alta velocidade com três a cinco cadeiras (laminadores) são utilizados para a laminação a frio do aço, alumínio e

ligas de cobre. A laminação contínua tem alta capacidade de produção, o que resulta num custo de produção baixo.

A redução total atingida por laminação a frio geralmente varia de 50 a 90%. Quando se estabelece o grau de redução em cada passe ou em cada cadeira de laminação, deseja-se uma distribuição tão uniforme quanto possível nos diversos passes sem haver uma queda acentuada em relação à redução máxima em cada passe. Normalmente, a porcentagem de redução menor é feita no último passe para permitir um melhor controle do aplainamento, bitola e acabamento superficial.

2.6 Processamento Termomecânico

Na indústria de fabricação do aço as dimensões externas de muitos produtos comerciais são resultados da conformação a quente, como na laminação, enquanto que, as propriedades mecânicas são obtidas pela adição de elementos de ligas e por tratamento térmico após laminação a quente.

A tendência atual, para produtos que necessitam propriedades específicas, é a união da laminação com processos de tratamento térmico, chamado de processamento termomecânico. Foi desenvolvida para melhorar as propriedades mecânicas dos materiais já na laminação, através do controle do processo de deformação à quente. Laminação controlada, resfriamento acelerado e têmpera direta, são exemplos típicos de processamentos termomecânicos. Dessa forma, minimiza-se ou até elimina-se o tratamento térmico após a laminação à quente.

Tal processo geralmente ocasiona uma mudança no projeto de composição química do aço e redução na produtividade da laminação à quente, mas tornam possíveis reduções na quantidade total de elementos de liga, melhoram a soldabilidade, aumentam a tenacidade e algumas vezes produzem novas e benéficas características no aço.

2.7 Defeitos nos Produtos Laminados

Os produtos laminados podem apresentar defeitos que geralmente são originados na fabricação do próprio lingote. Os defeitos mais comuns dos produtos laminados são:

- A) Vazios - Podem ter origem de rechupes ou gases retidos durante a solidificação do lingote. Eles causam tanto defeito na superfície quanto enfraquecimento da resistência mecânica do produto;
- B) Gotas frias - São respingos de metal que se solidificam nas paredes da lingoteiras durante o vazamento. Posteriormente, eles se agregam ao lingote e permanecem no material até o produto acabado na forma de defeitos na superfície;
- C) Trincas - Aparecem no próprio lingote ou durante as operações de redução que acontecem em temperaturas inadequadas;

- D) Dobras - São provenientes de reduções excessivas no qual um excesso de massa metálica ultrapassa os limites do canal e sofre recalque no passe seguinte;
- E) Inclusões - São partículas resultantes da combinação de elementos presentes na composição química do lingote, ou do desgaste de refratários e cuja presença pode tanto fragilizar o material durante a laminação quanto causar defeitos na superfície;
- F) Segregações - Acontecem pela concentração de alguns elementos nas partes mais quentes do lingote, as últimas a se solidificarem. Elas podem acarretar heterogeneidades nas propriedades, além de fragilização e enfraquecimento de seções dos produtos laminados.

Além disso, o produto pode ficar empenado, retorcido, ou fora de seção, em consequência de deficiências no equipamento, e nas condições de temperatura sem uniformidade ao longo do processo.

2.7 Exercícios

1. Porque a laminação é o processo mais usado para fabricar placas e tarugos, mesmo possuindo um custo bastante alto para sua instalação?
2. Diferencie o laminador quádruplo do Sendzimer.
3. Diferencie trem contínuo de laminação de lingotamento contínuo.
4. Cite duas vantagens da laminação à frio sobre a laminação à quente.
5. Porque o planejamento dos passes de perfis estruturais é complexo e requer experiência?
6. O que é processamento termomecânico?

3. FORJAMENTO

3.1 Introdução

Forjamento é o nome genérico de operações de conformação mecânica efetuadas com esforço de compressão sobre um material dúctil, de tal modo que ele tende a assumir o contorno ou perfil da ferramenta de trabalho. Na maioria das operações de forjamento emprega-se um ferramental constituído por um par de ferramentas de superfície plana ou côncava, denominado matriz ou estampo. A maioria das operações de forjamento é executada a quente; contudo, uma grande variedade de peças pequenas, tais como parafusos, pinos, porcas, engrenagens, pinhões, etc., são produzidas por forjamento a frio.

O forjamento é o mais antigo processo de conformar metais, tendo suas origens no trabalho dos ferreiros de muitos séculos antes de Cristo. A substituição do braço do ferreiro ocorreu nas primeiras etapas da Revolução Industrial. Atualmente existe um variado maquinário de forjamento, capaz de produzir peças das mais variadas formas e tamanhos, desde alfinetes, pregos, parafusos e porcas, até rotores de turbinas e asas de avião.

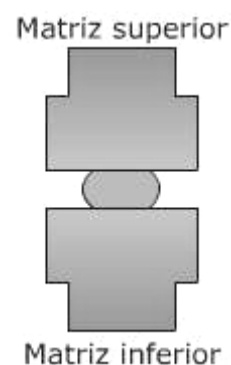
3.2 Tipos, Equipamentos, Etapas e Materiais

O forjamento pode ser dividido em dois grandes grupos de operações:

A) Forjamento em Matriz Aberta (Forjamento Livre)

O material é conformado entre matrizes planas ou de formato simples, que normalmente não se tocam (ver figura ao lado).

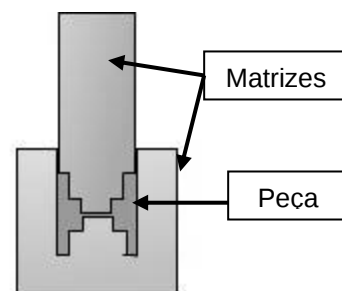
É usado geralmente para fabricar peças grandes, com forma relativamente simples (por exemplo, eixos de navios e de turbinas, ganchos, correntes, âncoras, alavancas, excêntricos, ferramentas agrícolas, etc.) e em pequeno número; e também para pré-conformar peças que serão submetidas posteriormente a operações de forjamento mais complexas.



Forjamento em matriz aberta

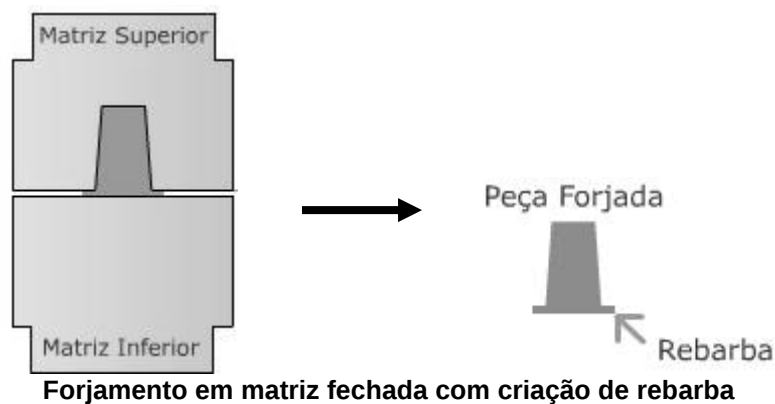
B) Forjamento em Matriz Fechada

O material é conformado entre duas metades de matriz que possuem, gravadas em baixo-relevo, impressões com o formato que se deseja fornecer à peça (ver figura ao lado). A deformação ocorre sob alta pressão em uma cavidade fechada ou semifechada, permitindo assim, obter-se peças com tolerâncias dimensionais melhores do que no forjamento livre.



Nos casos em que a deformação ocorre dentro de uma cavidade totalmente fechada, sem zona de escape, é fundamental a precisão na quantidade fornecida de material: uma quantidade insuficiente implica falta de enchimento da cavidade e falha no volume da peça; um excesso de material causa sobrecarga no ferramental, com probabilidade de danos ao mesmo e ao maquinário.

Dada a dificuldade de dimensionar a quantidade exata fornecida de material, é mais comum empregar um pequeno excesso. As matrizes são providas de uma zona oca especial para recolher o material excedente ao término do preenchimento da cavidade principal. O material excedente forma uma faixa estreita (rebarba) em torno da peça forjada. A rebarba exige uma operação posterior de corte (rebarbação) para remoção.



Os equipamentos mais empregados incluem duas classes principais:

(a) Martelos de forja, que deformam o metal através de rápidos golpes de impacto na superfície do mesmo. Geram deformação irregular nas fibras superficiais, dando grande resistência mecânica a pontas de eixo, virabrequins, etc.

(b) Prensas, que deformam o metal submetendo-o a uma compressão contínua com velocidade relativamente baixa. Todas as camadas da estrutura são atingidas, dando maior homogeneidade à estrutura da peça.

Os processos convencionais de forjamento são executados tipicamente nas seguintes etapas consecutivas:

1. Corte do material;
2. Aquecimento (para forjamento a quente);
3. Pré-conformação mediante operações de forjamento livre, também conhecida como conformação intermediária;
4. Forjamento em matriz (em uma ou mais etapas);
5. Rebarbação;
6. Tratamento térmico (remoção de tensões, homogeneização da estrutura, melhoria da usinabilidade e propriedades mecânicas).

De um modo geral, todos os materiais conformáveis podem ser forjados. Os mais utilizados para a produção de peças forjadas são os aços (comuns e ligados, aços estruturais, aços para cementação e para beneficiamento, aços inoxidáveis ferríticos e austeníticos, aços ferramenta), ligas de alumínio, de cobre (especialmente os latões), de magnésio, de níquel (inclusive as chamadas superligas, como Waspaloy, Astraloy, Inconel, Udimet 700, etc., empregadas principalmente na indústria aeroespacial) e de titânio.

O material de partida é geralmente fundido ou, mais comumente, laminado - condição esta que é preferível, por apresentar uma microestrutura mais homogênea. Peças forjadas em matriz, com peso não superior a 2 ou 3 kg, são normalmente produzidas a partir de barras laminadas; as de maior peso são forjadas a partir de tarugos, quase sempre também laminados, e cortados previamente no tamanho adequado. Peças delgadas, como chaves de boca, alicates, tesouras, tenazes, facas, instrumentos cirúrgicos, etc., podem ser forjadas a partir de recortes de chapas laminadas.

3.3 Forjamento Livre (Matriz Aberta)

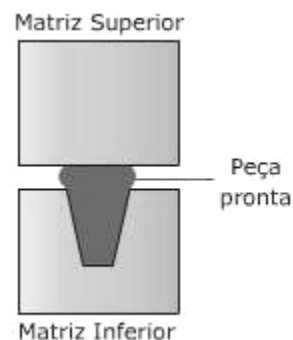
O forjamento em matriz aberta consiste de operações relativamente simples de conformação por forjamento, empregando matrizes abertas ou ferramentas especiais, podendo ter as finalidades de:

- Produzir peças acabadas de feitio simples;
- Redistribuir a massa de uma peça bruta para facilitar a obtenção de uma peça de geometria complexa por posterior forjamento em matriz fechada.

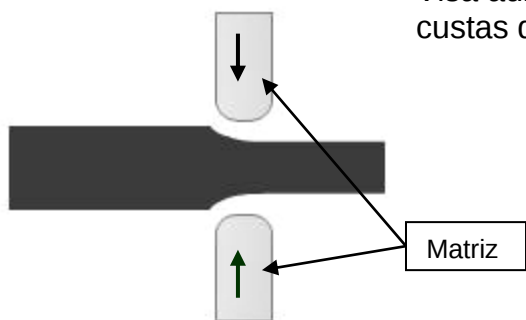
Veja algumas operações de forjamento livre:

Recalque

Compressão direta do material entre um par de ferramentas de face plana ou côncava, visando primariamente reduzir a altura da peça e aumentar a sua secção transversal.



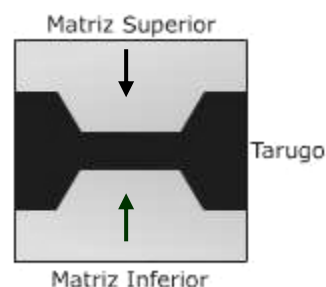
Estiramento



Visa aumentar o comprimento de uma peça às custas da sua espessura.

Encalcamento

Variedade de estiramento em que se reduz a secção de uma porção intermediária da peça, por meio de uma ferramenta ou impressão adequada.



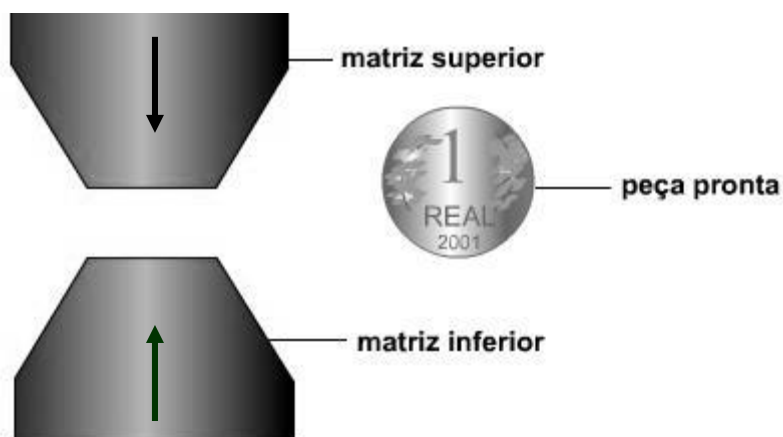
Caldeamento

Visa produzir a soldagem de duas superfícies metálicas limpas e aquecidas, postas em contato e submetidas à compressão. Abaixo exemplo de aplicação na fabricação de correntes de elo de aço, onde as pontas aquecidas serão submetidas à compressão.



Cunhagem

Geralmente realizada a frio, empregando matriz fechada ou aberta, visa produzir uma impressão bem definida na superfície de uma peça, sendo usada para fabricar moedas, medalhas, talheres e outras peças pequenas, bem como para gravar detalhes de diversos tipos em peças maiores.



3.4 Forjamento em Matriz Fechada

Peças de formas complexas ou de precisão não podem ser obtidas por técnicas de forjamento livre, exigindo matrizes especialmente preparadas que contenham o negativo (ou contorno) da peça a ser produzida. Tais matrizes são caras, exigindo na maioria das vezes, alta produção para justificar seu custo.

A obtenção de um formato complexo normalmente não é possível com uma única etapa de trabalho, exigindo uma ou mais etapas de pré-forjamento. As etapas de pré-forjamento são efetuadas em matrizes mais simples, ou geralmente em matriz aberta.

O objetivo do pré-forjamento é redistribuir o metal para posições mais adequadas ao forjamento subsequente. A pré-forma assim obtida pode ser conformada para uma configuração mais próxima da final em uma matriz de esboço, que assegura uma distribuição adequada de metal, mas ainda não na forma final.

Diante da dificuldade para se distribuir precisamente o material nas etapas de forjamento livre, utiliza-se na maioria dos casos um certo excesso de material, que já na etapa de esboço se permite escapar por entre as duas matrizes, formando uma rebarba que por vezes é removida (cortada) antes do forjamento final nas matrizes de acabamento.

Na etapa de acabamento o excesso de material também forma rebarba, que tem de ser fina para assegurar o preenchimento total da matriz e tolerâncias rigorosas. Isto porque uma rebarba fina, em presença de atrito, gera alta pressão de conformação. Veja o caso de distribuição de pressão nas cavidades das matrizes, no caso de forjamento de uma pá de turbina:

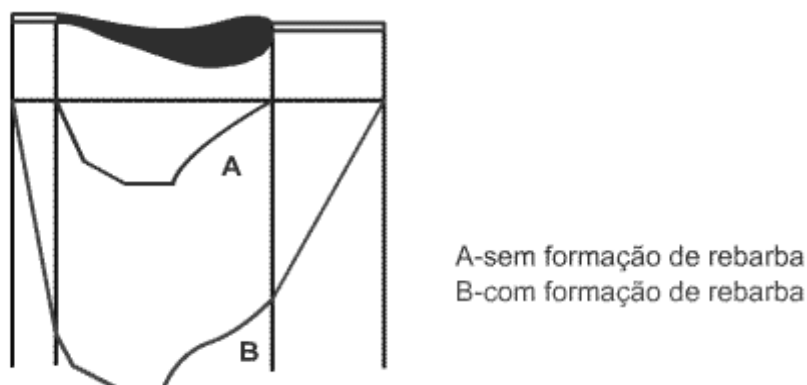
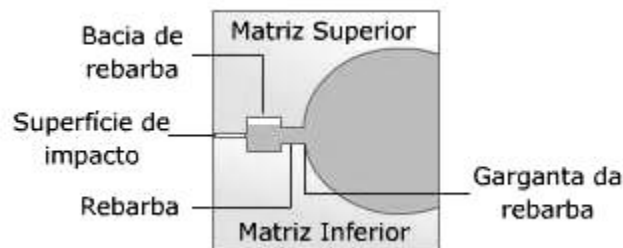


Gráfico: Pressão na cavidade das matrizes no forjamento de pá de turbina

Para evitar um aumento excessivo desta pressão, as matrizes são usualmente projetadas de tal modo que a rebarba fica reduzida à sua espessura mínima somente em uma largura pequena (garganta ou costura) sendo permitido ao restante escoar livremente dentro da calha ou bacia. Ver figura abaixo.



A decomposição da conformação de uma peça complexa entre diversas etapas de trabalho e ferramentas permite em muitos casos economizar energia e material, reduzir o desgaste das ferramentas e aumentar a precisão do produto forjado.

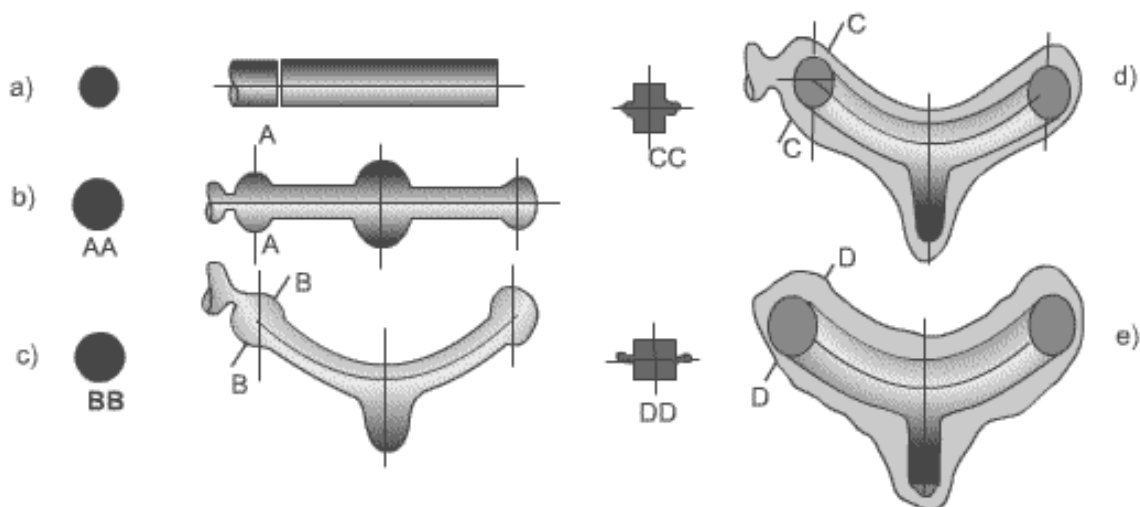
As operações de obtenção das formas intermediárias de uma peça constituem a conformação intermediária, que se compõe normalmente de três etapas:

- (i) distribuição de massas;
- (ii) dobramento (se for o caso);
- (iii) formação da seção transversal (fase de esboço).

Na etapa de distribuição de massas ocorre a retirada de material das porções nas quais a seção transversal deva ser reduzida, e o acúmulo do material nas posições onde a seção deva ser aumentada (ver fase “b” na figura abaixo).

As operações de forjamento livre mais empregadas para esta etapa são o estiramento, o encalcamento, o alargamento e o rolamento, sendo o recalque usado para aumentar a secção transversal.

O dobramento (segunda etapa), pode ser executado durante o forjamento, sem um estágio especial, quando for paralelo ao movimento da ferramenta. Em caso contrário, é efetuado numa etapa específica durante (ver fase “c” na figura abaixo) ou mesmo após o forjamento da peça. Pode envolver ou não uma redução da seção transversal da peça e uma defasagem do eixo da mesma, como o caso do forjamento de virabrequins.



Etapas no Forjamento: (a) tarugo original; (b) distribuição de massas; (c) dobramento; (d) formação da seção transversal; (e) peça pronta para sofrer rebarbação.

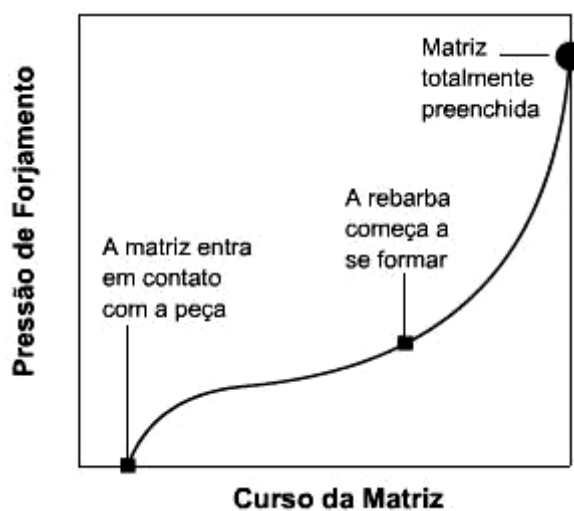
A formação da seção transversal, ou fase de esboço, é a última etapa da conformação intermediária, na qual as seções transversais são aproximadas das seções definitivas da peça, de modo que as ferramentas acabadoras imprimam a forma e dimensões exatas da peça, com um consumo mínimo de energia. Esta etapa envolve uma distribuição de massa perpendicularmente ao eixo longitudinal da peça (ver fase “d” na figura acima).

É preciso observar que, às vezes, é necessário mais de um estágio de esboço, quando uma única ferramenta não é capaz de estabelecer o fluxo adequado de metal ou exige um consumo de energia além da capacidade do equipamento disponível.

Na etapa de conformação final, ao iniciar-se a formação da rebarba, em virtude da presença do estrangulamento ou garganta da rebarba entre as duas matrizes, as tensões compressivas na cavidade das matrizes elevam-se consideravelmente e causam o preenchimento de todos os recessos dessa cavidade.

As funções da rebarba, portanto, são duas:

- Atuar como "válvula de segurança" para o excesso de metal na cavidade das matrizes;
- Regular o escoamento do metal, aumentando a resistência ao escoamento do sistema de modo que a pressão cresça até valores elevados, assegurando que o metal preencherá todos os recessos da cavidade. A figura abaixo é uma curva típica da variação da pressão ou carga de forjamento em função do avanço das matrizes.



Curva típica de pressão de forjamento com formação de rebarba

Procura-se dimensionar a rebarba de modo que a extrusão do metal através da garganta seja mais difícil do que o preenchimento do mais intrincado detalhe das matrizes; mas isto não deve ser feito em excesso de modo a criar cargas de forjamento intensas demais, com os conseqüentes problemas de desgaste ou quebra das matrizes. O ideal é projetar a relação de rebarba mínima necessária para o total preenchimento das matrizes.

A rebarba da forma final é removida em uma operação posterior de rebarbação, representando uma perda inevitável de material no processo.

3.5 Defeitos nos Produtos Forjados

Os produtos forjados podem apresentar os seguintes defeitos típicos:

- A) Falta de redução: caracteriza-se pela penetração incompleta do metal na cavidade da ferramenta. Isso altera o formato da peça e acontece quando são usados golpes rápidos e leves do martelo.
- B) Trincas superficiais: causadas por trabalho excessivo na periferia da peça em temperatura baixa, ou por alguma fragilidade a quente.
- C) Trincas nas rebarbas: causadas pela presença de impurezas nos metais ou porque as rebarbas são pequenas. Elas se iniciam nas rebarbas e podem penetrar na peça durante a operação de rebarbação.
- D) Trincas internas: originam-se no interior da peça, como consequência de tensões originadas por grandes deformações.
- E) Gotas frias: são descontinuidades originadas pela dobra de superfícies, sem a ocorrência de soldagem. Elas são causadas por fluxos anormais de material quente dentro das matrizes, incrustações de rebarbas, colocação inadequada do material na matriz.
- F) Incrustações de óxidos: causadas pela camada de óxidos que se formam durante o aquecimento. Essas incrustações normalmente se desprendem mas, ocasionalmente, podem ficar presas nas peças.
- G) Descarbonetação: caracteriza-se pela perda de carbono na superfície do aço, causada pelo aquecimento do metal.
- H) Queima: gases oxidantes penetram nos limites dos contornos dos grãos formando películas de óxidos. Ela é causada pelo aquecimento próximo do ponto de fusão.

3.6 Exercícios

1. Diferencie as características dos produtos da laminação e do forjamento.
2. Explique a diferença entre forjamento em matriz aberta e em matriz fechada.
3. Cite duas características de peças produzidas por forjamento livre.
4. O que é rebarba e qual sua importância para o forjamento em matriz fechada?
5. Porque o forjamento se dá em várias etapas?

RESPOSTAS DOS EXERCÍCIOS

Generalidades da Conformação Mecânica

1. O que define os trabalhos a quente, a morno e a frio?
É o encruamento (frio), recuperação (morno) e recristalização (quente).
2. Cite duas vantagens do trabalho a quente sobre os demais.
Requer menos força e energia, e ajuda a homogenizar as discordâncias internas adquiridas na fundição.
3. Cite duas vantagens do trabalho a frio sobre os demais.
Aumento de resistência e dureza, e melhor tolerância e acabamento superficial.
4. Cite duas vantagens do trabalho a morno sobre os demais.
Permite menores esforços que o trabalho a frio, e melhor precisão dimensional e acabamento que o trabalho a quente.
5. Defina os termos “recuperação” e “recristalização”.
Recuperação é o rearranjo das discordâncias internas, restaurando parcialmente a utilidade. Recristalização é a reestruturação interna, com formação de novos grãos, restaurando completamente a utilidade original.
6. Porque o nível de inclusões em um aço é importante para sua finalidade?
Porque as inclusões atuam na confiabilidade do comportamento dos aços. Isso quer dizer que um aço com baixo nível de inclusões se comportará praticamente como foi projetado, ao contrário de um com alto nível de inclusões.

Laminação

1. Porque a laminação é o processo mais usado para fabricar placas e tarugos, mesmo possuindo um custo bastante alto para sua instalação?
Porque possui grande versatilidade (resultando em vários produtos) e a alta produtividade compensa o custo gasto na instalação.
2. Diferencie o laminador quádruplo do Sendzimer.
O laminador quádruplo possui apenas um rolo de apoio para cada rolo laminador. O Sendzimer, por possuir um rolo laminador bem menor, possui vários por necessitar de apoio tanto na vertical quanto na horizontal, para evitar sua flexão.
3. Diferencie trem contínuo de laminação de lingotamento contínuo.
No trem contínuo de laminação, o lingote é aquecido para iniciar os processos de laminação. Já no lingotamento contínuo, o lingote já vem aquecido por ter sido recém fundido.

4. Cite duas vantagens da laminação à frio sobre a laminação à quente.
Proporciona melhor acabamento superficial e tolerâncias dimensionais.
5. Porque o planejamento dos passes de perfis estruturais é complexo e requer experiência?
Porque existem mais superfícies de laminação, dificultando o cálculo da expansão térmica e redução de seção.
6. O que é processamento termomecânico?
É a união de processos de laminação com tratamento térmico, aproveitando o que é comum nos processos (aquecimento) para racionalizar a produção e diminuir custos.

Forjamento

1. Diferencie as características dos produtos da laminação e do forjamento.
Os produtos laminados possuem seção contínua (retângulos, círculos, quadrados, etc.), enquanto os produtos forjados possuem formatos complexos com grande números de seções.
2. Explique a diferença entre forjamento em matriz aberta e em matriz fechada.
O forjamento em matriz aberta não possui limitações para o material, e os produtos possuem formas simples. No forjamento em matriz fechada, a própria matriz limita o material, e os produtos são mais complexos.
3. Cite duas características de peças produzidas por forjamento livre.
Formatos simples e geralmente grandes.
4. O que é rebarba e qual sua importância para o forjamento em matriz fechada?
A rebarba é o excesso de material resultante do forjamento em matriz fechada. É importante por garantir o completo preenchimento das cavidades das matrizes.
5. Porque o forjamento se dá em várias etapas?
Porque uma única etapa necessitaria de forças muito elevadas, matrizes com materiais muito especiais, e além disso, não seria possível por causar ruptura do material.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

CETLIN, P. R.; HELMAN, H. **Fundamentos da Conformação**. São Paulo: Artliber Editora, 2005.

Handbook: Glossário. www.infomet.com.br, acessado em 21/01/2007.

Processos de Conformação. Em www.cimm.com.br, acessado em 26/10/2006.

Processos de Fabricação. Volume I. Apostila do Curso Técnico em Mecânica. Telecurso 2000.

MARTINS, Conceição G. **Aspectos Gerais da Conformação Mecânica e Forjamento**. Florianópolis: Apostila de Processos de Fabricação da Escola Técnica Federal de Santa Catarina, 1993.