

Escola Politécnica da Universidade de São Paulo
Dept. de Engenharia Mecatrônica e de Sistemas Mecânicos
PMR – 2202 Introdução Manufatura Mecânica
Prof. Dr. Gilmar Ferreira Batalha

2. Conformação Maciça (Volumétrica)

- 2.1 Revisão sobre conformação mecânica
- 2.2 Recalque
- 2.3 Forjamento
- 2.4 Extrusão, Trefilação
- 2.5 Laminação
- 2.6 Tendências Atuais
- 2.7 Questões de estudo dirigido

Bibliografia:

Bibliografia:

Kalpakjian, S. & Schmid, S. R. – Manufacturing Engineering and Technology – Ed. Prentice Hall 4 ed. EUA, 2001
Parte III – Processos e equipamentos de conformação e moldagem pg. 316 a 512.
Capítulos 13, 14, 15 e 16.

2.1 Revisão sobre conformação mecânica

Para processos de conformação volumétrica tais como laminação, forjamento, ou recalque são indicados especialmente materiais com grande ductilidade. Em função das forças necessárias para a conformação, estes materiais devem também possuir limites de escoamento a frio, e a quente, relativamente baixos. A rede cristalina é importante. Sistemas cristalinos típicos são: cúbico de face centrada (CFC), cúbico de corpo centrado (CCC) e hexagonal compacto (HC).

Estes sistemas cristalinos possuem múltiplos sistemas de escorregamento, os quais influenciam a capacidade de deformação do material.

Após o processo de conformação, para alguns materiais, a peça produzida pode resultar endurecida (encruada). Através de uma seqüência de processos de conformação - tratamentos térmicos peças feitas de aços sujeitas a grandes solicitações mecânicas são possíveis de serem produzidas economicamente em grandes séries.

A seleção do material deve auxiliar o desenvolvimento do produto. Para isto devem ser servem entre outros o critério:

- . Resistência
- . Preço do material
- . Usinabilidade
- . Soldabilidade
- . Conformabilidade

A seguir são apresentadas propriedades mecânicas de alguns materiais usados em peças forjadas.

Aços endurecíveis por têmpera e revenido para semi-acabados e peças forjadas.

Material	Resistência Estática		Custo relativo	Propriedades	Aplicação
	R _m / N.mm ⁻²	R _{p0,2} / N.mm ⁻²			
C45V	600 ...850	360 ...450	1,3	Difícil de soldar, este aço é usado em situações com têmpera de indução.	Peças forjadas com solicitação moderada
34Cr4V	900 ...1050	650	2,1	Não soldável	Aço para semi acabados de alta resistência
42CrMo4V	1200 .. 1400	1000	2,7	Usinabilidade relativamente boa, preço elevado, não indicado para soldagem	Para peças forjadas de alta resistência

Aços endurecíveis por tempera e revenido para semiacabados e peças forjadas.

Material	Resistência Estática		Custo relativo	Propriedades	Aplicação
	R _m / N.mm ⁻²	R _{p0,2} / N.mm ⁻²			
U St 37-2	370	240	1	Soldável para baixas solicitações	-Peças simples, peças forjadas e eixos
U St 37-3	370	240	1,15	Boa soldabilidade	-construções soldadas com elevada solicitação dinâmica
St 50-2	500	300	1,1	Boa usinabilidade, soldável condicional	Aço estirado para peça forjada
St60-2	600	340	1,1	Difícil de soldar, Usinabilidade boa, forjabilidade ruim como o aço St 50-2	Para peças forjadas de alta resistência

Aços para cementação para semiacabados e peças forjadas.

Material	Resistência Estática		Custo relativo	Propriedades	Aplicação
	R _m / N.mm ⁻²	R _{p0,2} / N.mm ⁻²			
C15 E	600 ... 800	360	1,1	Soldabilidade muito boa	Peças com endurecimento superficial. Com pouca solicitação: alavancas, elementos de fixação
16MnCr5E	9001050	650	1,7	soldabilidade condicional	Peças com solicitação moderada , como pequenas engrenagens e eixo de cambio
20MnCr5E	1000...1300	700	1,9	soldabilidade condicional	Aço para peça forjada de alta solicitação: eixos de transmissão.

Custo relativo do material relativo à barra de aço St37-w, dimensão média, comparando preços por unidade de volume. Material pré-estirado.

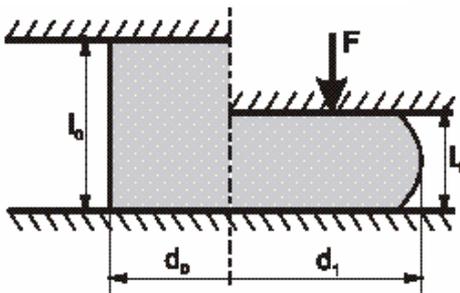
Ligas de alumínio para conformação mecânica

Material	Resistência Estática		Propriedades	Aplicação
	R _m / N.mm ⁻²	R _{p0,2} / N.mm ⁻²		
AlMgSi 1	210	110	Endurecível a frio e a quente, conformação limitada, usinabilidade razoável, soldabilidade muito boa, resistente a corrosão.	Automóveis, navios, sinalizações
AlMgMn	174	78	Boa resistência a temperaturas elevadas, não endurecível, usinabilidade regular, boa soldabilidade, boa resistência à corrosão.	Construção mecânica e automóvel
AlMg3	175	78	Boa conformação, usinabilidade regular, soldável boa, boa estabilidade química.	Construções mecânicas, aeronáuticas.
AlCuMg1	390	265	Endurecível a frio, conformabilidade de suficiente a boa, resistência a corrosão condicional.	Elementos de máquina, rebites, peças aeronáuticas.

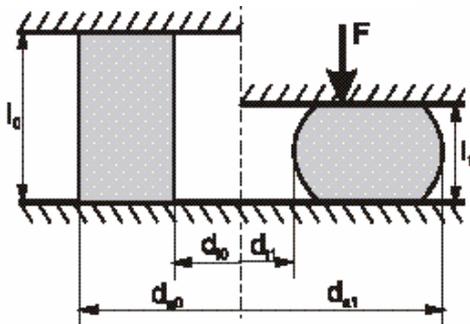
2.2 Recalque

Recalque é um processo de conformação livre, onde um recorte bruto do material, é reduzido por compressão entre duas interfaces paralelas, geralmente planas.

Recalque de Cilindro



Recalque de Anel



Exemplo de Fabricação: Recalque inicial e final da Cabeça de um parafuso

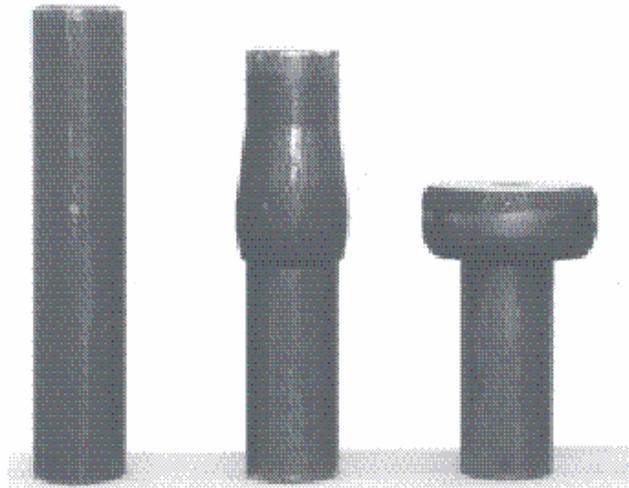


Figura 2.1: Recalque – Modelo experimental e exemplo de peça

Recalque é um processo fundamental da conformação a frio e forjamento, ex.: para a fabricação de elementos de fixação. Além disto bastante importante para o estudo teórico dos processos de conformação e para o ensaio de materiais.

Pode ser classificado em:

- . Recalque a frio: peças pequenas, força reduzida, alta precisão, bom acabamento
- . Recalque a quente: peças grandes e complexas, redução das forças através do aquecimento, acabamento superficial ruim, necessidade de retrabalho.

O coeficiente de atrito μ depende de:

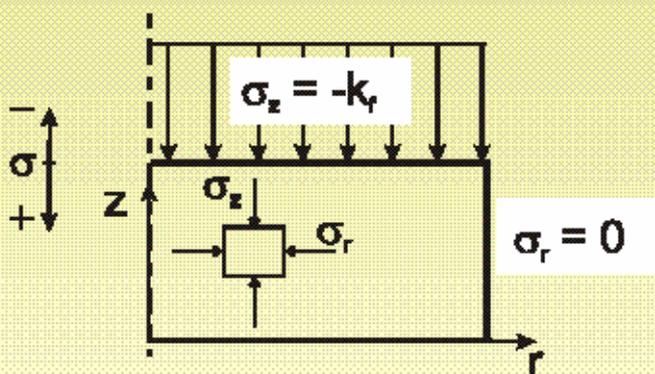
- . Lubrificante e da rugosidade e acabamento superficial
- . Par peça / ferramenta
- . Temperatura

$\mu = 0,05 \dots 0,15$ no recalque a frio

$\mu = 0,25 \dots 0,5$ no recalque a quente

Estado de Tensões

sem atrito



com atrito

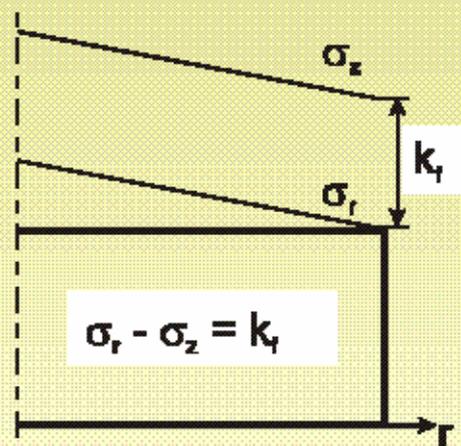


Figura 2.2: Estado de tensões no recalque

2.2.1 Grau de recalque (grau de conformação)

$$\varphi = \ln(l_1/l_0) = \ln(A_0/A_1)$$

o grau de deformação máximo indica o limite de conformabilidade do material da peça. Quando ele é ultrapassado surgem trincas na periferia da peça. Valendo:

$|\varphi_{\max}| = 1,6$ no recalque a frio de aços.

$|\varphi_{\max}| > 1,6$ no recalque a quente, (sem encruamento)

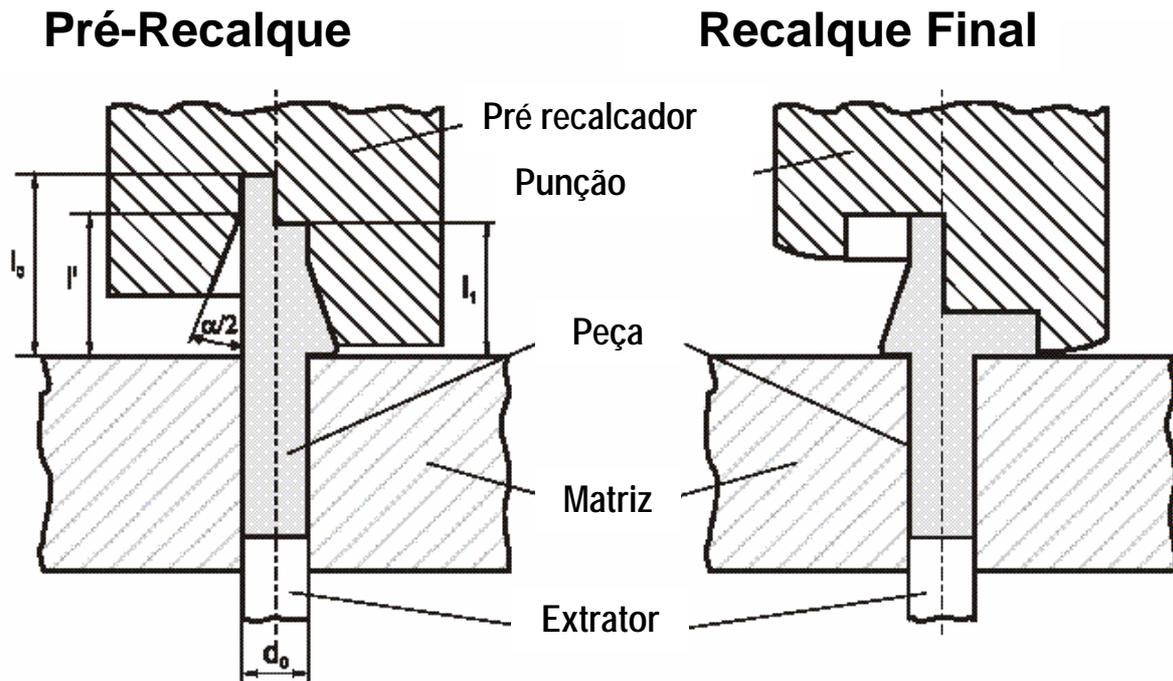


Figura 2.3: Processo de recalque duplo (pré-recalque e recalque final)

2.2.2 Razão de Recalque

$$s = l_0 / d_0$$

s: depende da geometria, da superfície e do paralelismo do prato de compressão, da peça, bem como do lubrificante. No recalque a frio vale:

- $s \leq 2,3$ processo de compressão simples (1 Etapa)
- $s \leq 4,5$ processo de compressão duplo (2 Etapas)
- $s > 4,5$ até 20 processo de compressão múltiplo.

Para uma razão de recalque muito alta, pode ocorrer flambagem da peça. Em processos de recalque duplo ou múltiplo a peça é guiada por um pré-recalgador onde é simultaneamente reduzida até o comprimento da peça recalçada.

2.3 Forjamento

Sob forjamento entende-se a fabricação através da conformação com pré-aquecimento, corte (e junção) de uma peça sem encruamento permanente. Vantagens do processo de forjamento são entre outras o elevado aproveitamento do material e a grande capacidade de produção, que possível através deste processo, assim como uma elevada segurança do processo e a boa reciclabilidade do produto.

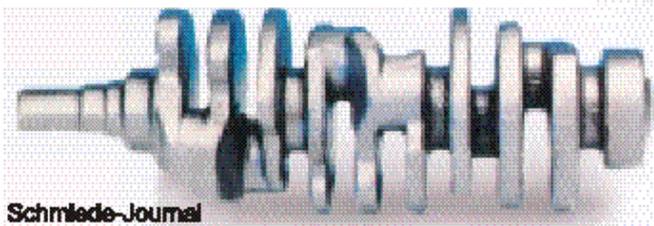
A resistência elevada das peças forjadas comparadas com a das peças fundidas tem como conseqüência as a possibilidade de redução das dimensões de um elemento de máquina. Ex.: em um eixo virabrequim forjado pode se chegar a uma redução de até 20% do peso, o resulta em uma redução do consumo de combustível.

Peças de alumínio forjadas oferecem igualmente vantagens semelhantes quanto a resistência e a economia de peso da peça. Além disto, possuem uma boa resistência a corrosão e a possibilidade de tratamento superficial de oxidação eletrolítica, gerando uma camada superficial que permite o recobrimento da superfície, que permite coloração e melhoria das propriedades tribológicas (anodização).

O processo de forjamento está incluído dentro dos grupos principais de fabricação:

- . Conformação
- . Corte
- . Junção

Virabrequim forjado 38 Mn S6 BY
para motor de veículos de passeio

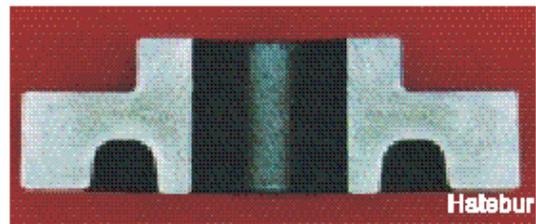


Divisão do processo em:
Forjamento a quente – Forjamento a frio
Forjamento livre – Forjamento em matriz

Figura 2.4: Forjamento

Vantagens do forjamento:

- Melhoria da microestrutura
- Resistência maior e melhor acabamento superficial que a fundição.
- Melhor distribuição das fibras



distribuição de fibras numa engrenagem
(revelada por ataque macroscópico)

É comumente dividido em forjamento a frio e forjamento a quente. Por volta de 1970 surgiu o chamado forjamento semi-aquecido (ou a morno). Ele combina as vantagens do forjamento a quente (alto grau de conformação) com as do forjamento a frio (bom acabamento superficial). A temperatura para os aços fica entre 650 a 900 °C.

Desvantagem: grande quantidade de refugo.

Forjamento a quente	Forjamento a frio
Produção de peças	Produção de peças
Grande importância técnico-econômica	Inclui os processos: - extrusão - recalque - cunhagem (troquelagem)
Tensões reduzidas Pouco ou nenhum encruamento Microestrutura mais homogênea	Tensões elevadas e encruamento → alta solicitação da ferramenta
Alta forjabilidade	Forjabilidade limitada
Retrabalho de peças grandes	Peças pequenas de aço ou metais não ferrosos
Tolerância de fabricação de ruim a média	Pouco retrabalho
Superfície com carepa	Boa qualidade superficial
Temperaturas de forjamento: Aço > 1000 C (até 1050 C) Ligas de alumínio 360 C ... 520 C Ligas de cobre 700 C ... 800 C	

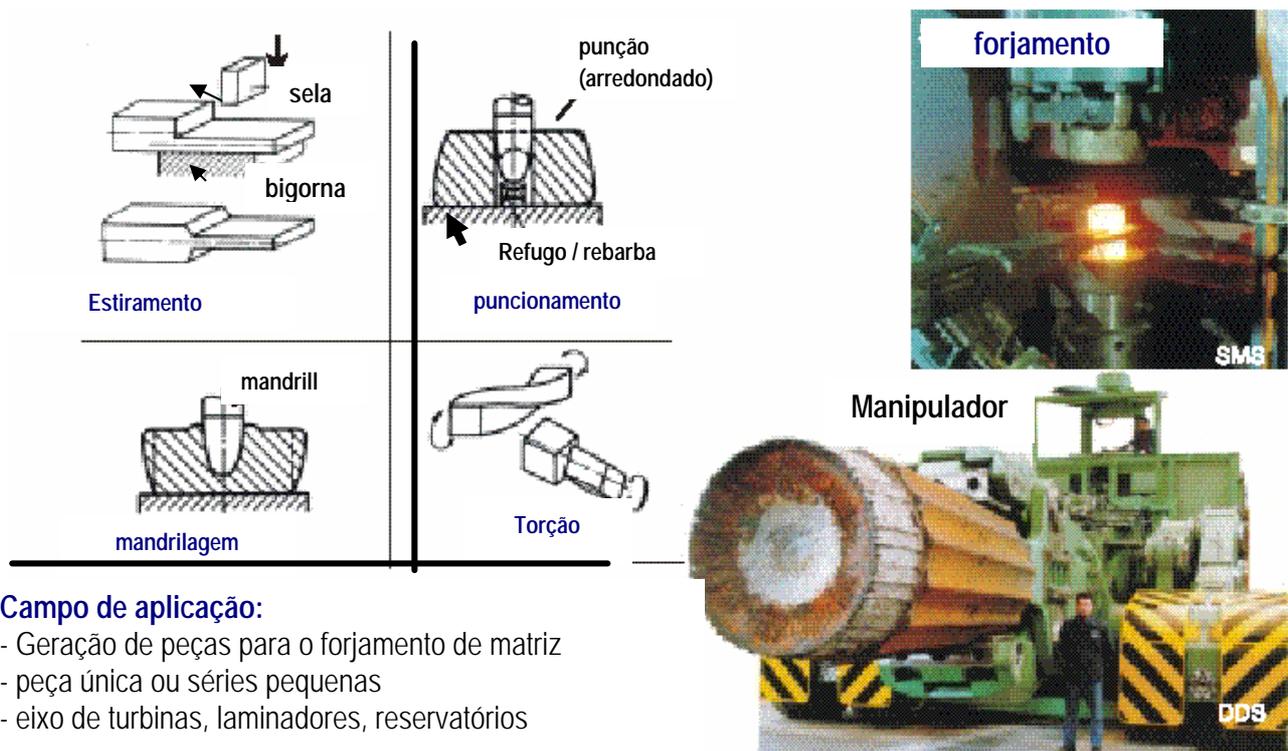
Podem ser feitas ainda as seguintes distinções:

Forjamento livre	Forjamento em matriz fechada
Simplex, sem relação entre a forma da peça e a da ferramenta	Matriz relacionada com a forma peça
<u>meta</u> : preparação de tarugos / formas tubulares para a fabricação final (forjamento parcial em matriz / usinagem)	<u>meta</u> : possibilita boa precisão de dimensional e de formas.

2.1 Revisão sobre conformação mecânica

2.3.1 Forjamento livre

A peça é conformada em uma ferramenta plana com um martelo em queda livre ou em prensa. Matéria prima são blocos fundidos ou laminados. A conformação é feita multi etapas ou golpes até chegar à forma final por meio da penetração no material do material (alargamento ou enquadramento) ou a consolidação do material (recalque). As peças precisam ser usinadas ou conformadas por outro processo para se chegar ao produto acabado.



Campo de aplicação:

- Geração de peças para o forjamento de matriz
- peça única ou séries pequenas
- eixo de turbinas, laminadores, reservatórios

Figura 2.5: Forjamento livre

2.3.2 Forjamento em matriz

A ferramental contém a forma da peça com uma gravura em forma total ou parcial.

→ Forjamento com penetração e escoamento guiado.

Os processos de forjamento em sentido restrito são:

- . Recalque em matriz
- . Forjamento em matriz fechada sem rebarba
- . Forjamento em matriz fechada com rebarba

O processo mais empregado na prática é o processo de forjamento em matriz fechada com rebarba. Neste caso:

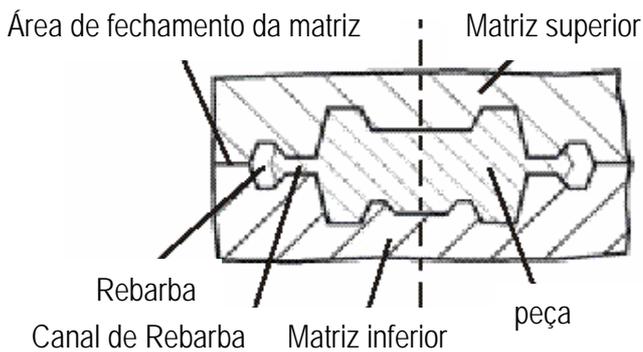
- é difícil prever a dimensão exata da geratriz a ser usada.
- o fluxo de material através da rebarba pode influenciar.

Seqüência de trabalho no forjamento em matriz

A seqüência neste caso será:

- corte do material
 - preparação da seção transversal (geralmente forjamento livre)
 - prensagem
- o número de operações intermediárias dependerá da complexidade da peça.

Forjamento em matriz fechada com rebarba



Forjamento em matriz fechada sem rebarba

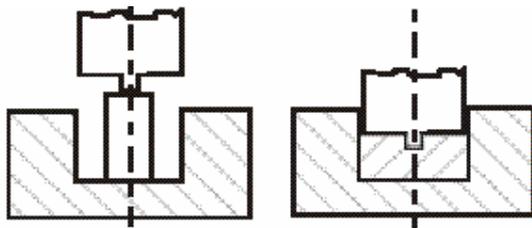
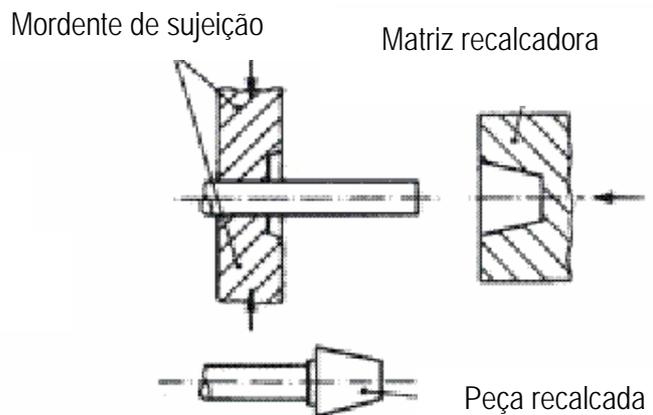


Figura 2.6: Forjamento em matriz fechada

Forjamento por recalque em matriz

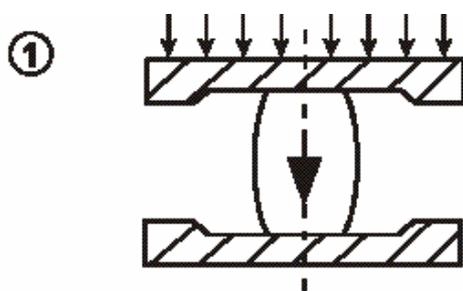


Quanto ao fluxo do material conformado, distinguem-se três processos principais:

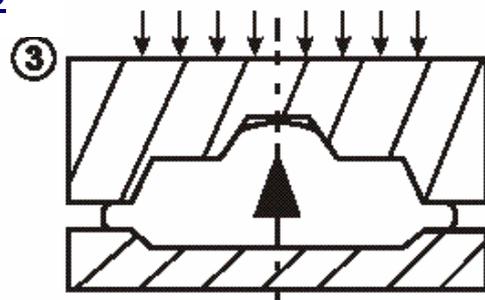
- Recalque	- Redução da altura inicial sem grande expansão lateral e sem grande deslizamento relativo entre peça e ferramenta.
- Expansão / Alargamento	- escoamento lateral do material com grande trecho de deslocamento peça-ferramenta. - Fluxo de material \perp ao movimento da ferramenta.
- Expansão com extrusão	- preenchimento de cavidades ocas da ferramenta pela ampliação local da altura inicial com deslocado relativamente longo escoamento lateral do material após o preenchimento do canal de rebarba. - Fluxo de material \perp e \parallel ao movimento da ferramenta.

Estes três processos fundamentais podem ainda aparecer em combinações.

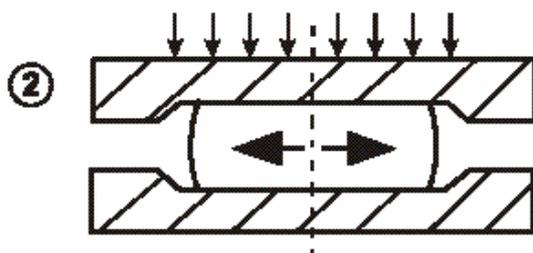
Modos básicos de fluxo do material forjado



Recalque



Expansão com extrusão



Expansão

Etapas subsequentes de fabricação

- calibração
- tratamento térmico
- retirada da carepa
- usinagem de acabamento

Figura 2.7: Forjamento em matriz fechada II

Recomendações de forma para peças forjadas

Prever raios suficientes

Prever ângulo de saída

Prever transição entre seções
as maiores possíveis

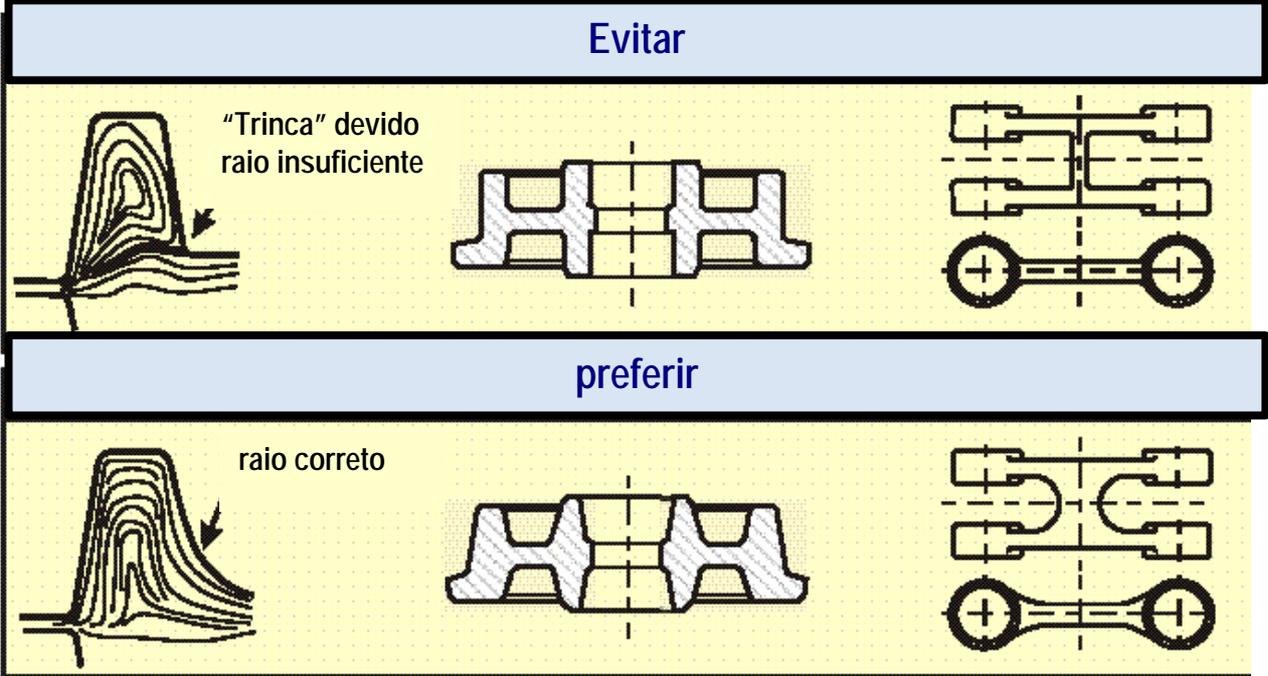


Figura 2.8: Recomendações de forma para peças forjadas em matriz fechada.

Ferramentas para forjamento em matriz

A seguir são apresentadas algumas especificidades das matrizes de forjamento:

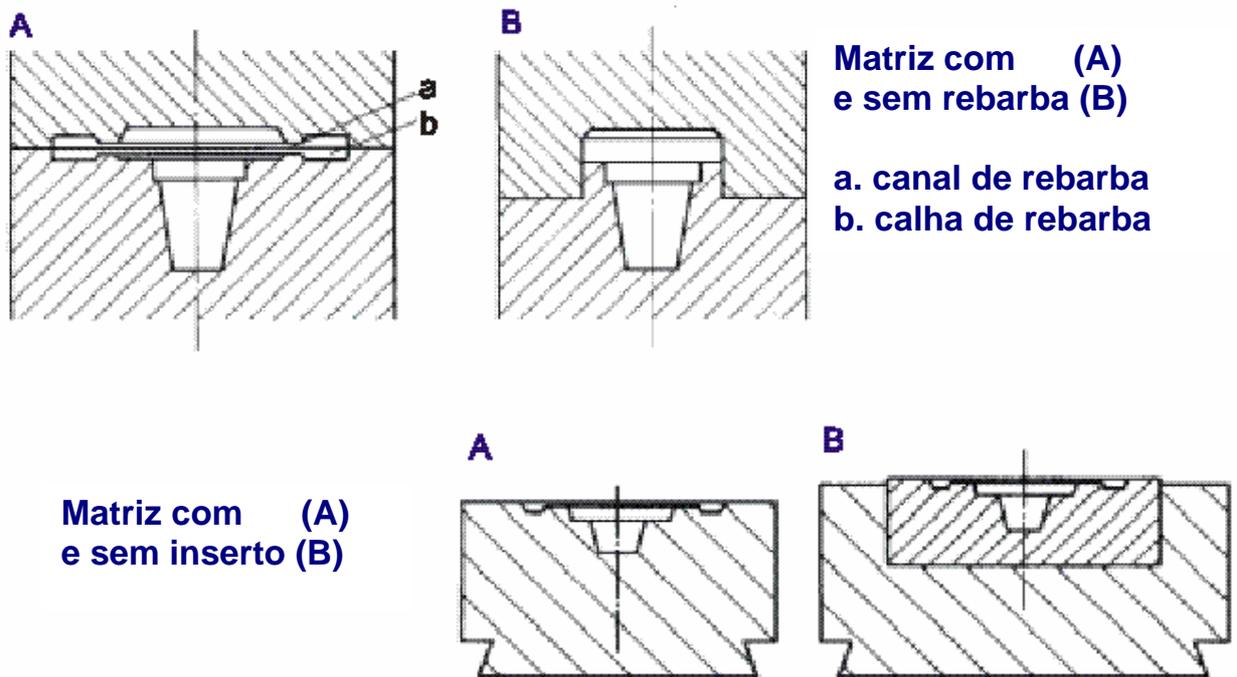


Figura 2.9: Ferramental de forjamento em matriz fechada

Ferramental de fabricação com separação posterior

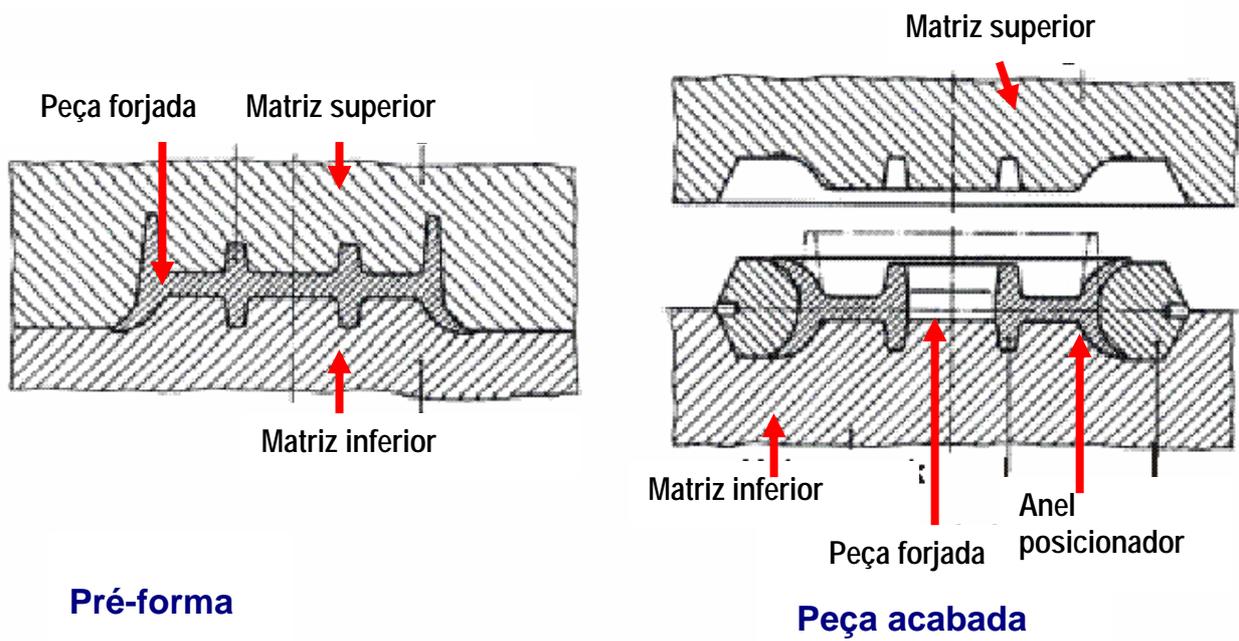
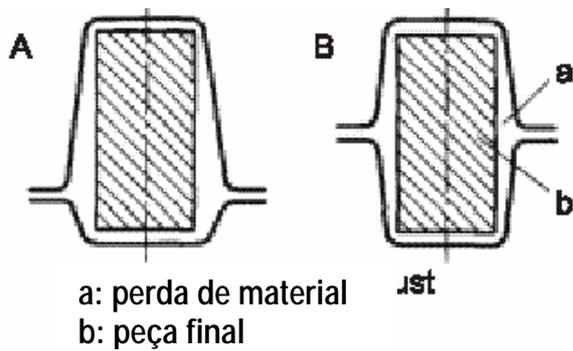
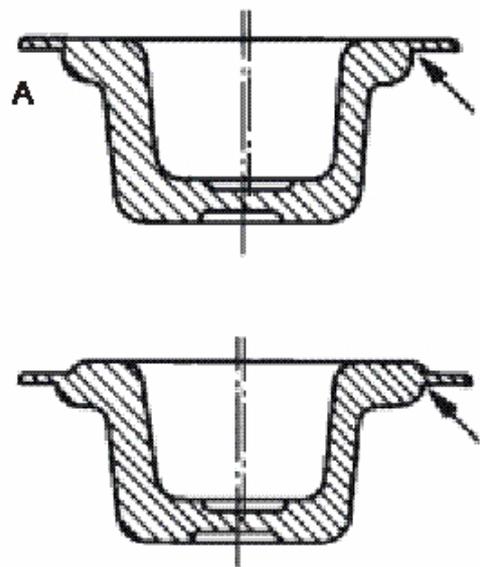


Figura 2.10: Ferramental de forjamento em matriz fechada para forjar uma polia.

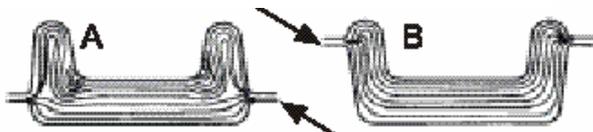
Influência da divisão sobre o suplemento de material



Evitar a divisão em regiões flangeadas da peça



Influência divisão nas seções transversais em peças em forma de U ou anel



A: adequado
B: inadequado

Figura 2.11: Esquematização dos tipos de ferramental de forjamento

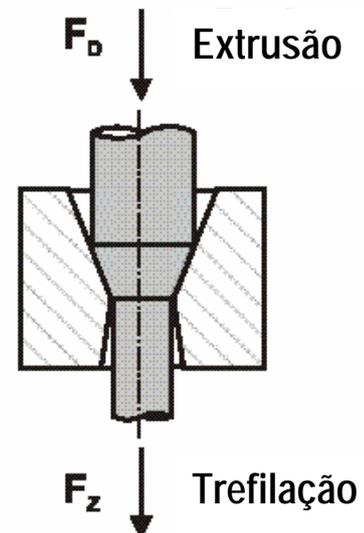
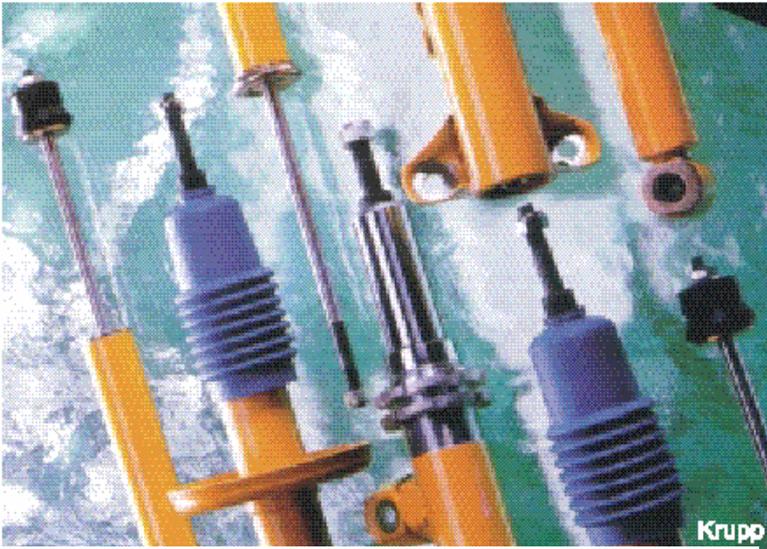
Para a fabricação do ferramental de forjamento em matriz fechada são empregados aços para trabalho a quente, aços altamente ligados, como o aço H13, uma vez que durante o processo de forjamento, o ferramental é submetido a vários tipos de solicitações:

1. solicitação mecânica,
Ex.: solicitações de amortecimento em martelo de forja.
2. solicitação térmica
3. Oxidação
4. Desgaste através do atrito entre peça e ferramenta.

2.4 Extrusão e Trefilação

2.4.1 Conceitos, Fundamentos e Exemplos

No processo de extrusão e de trefilação a ferramenta conformadora é matriz cônica convergente (fieira, no caso da trefilação), através da qual a peça bruta é empurrada ou puxada. As diferenciações dos processos de extrusão e trefilação seguem o tipo e a distribuição das forças, bem como as tensões surgidas no processo.



Hastes de amortecedores
(produzidas por extrusão indireta de copo)

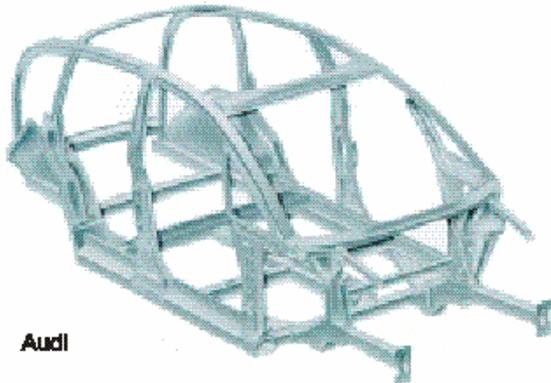
Figura 2.12: Princípio fundamental do processo de extrusão e trefilação.

Com ambos os processos podem tanto ser produzidas tarugos ou peças acabadas. O processo de extrusão serve para a fabricação de tarugos e perfis semi acabados.. Em geral as peças conformadas por este processo passam por uma melhora em sua resistência mecânica. Com base nisto, podem fabricadas peças com menor espessura de parede e conseqüentemente menor peso.

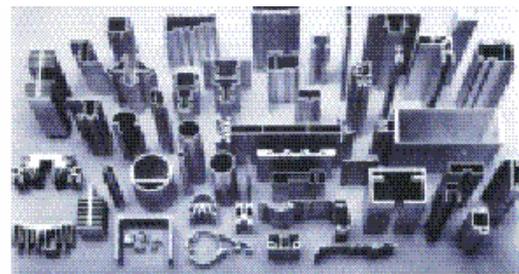
Além disto peças extrudadas apresentam uma qualidade superficial substancialmente melhor. O processo de extrusão é usado principalmente para a fabricação de perfis com diferentes seções transversais e próximas de um comprimento escolhido. (dependendo do volume extrudado). Perfis extrudados ou peças forma de perfilados.

Extrudados são especialmente ligas de alumínio e ligas de cobre, como também, aços ligados e não ligados. Através da extrusão podem ser fabricados perfis com geometrias de seção transversal bastante complexas que já alguns aspectos funcionais da peça. Neste sentido podem ser fabricados perfis semi-acabados já ajustados ao objetivo final de sua aplicação.

Estrutura espacial da carroceria (Audi A2)
perfis extrudados de Al e conexões de Al fundido



Exemplo de perfis extrudados



Materiais extrudados típicos:

- ligas de alumínio
- ligas de cobre
- ligas de magnésio

Campo de aplicação:

- automóveis
- indústria espacial e aeronáutica
- construção civil e moveis

Figura 2.13: Perfis extrudados

2.4.2 Parâmetros dos processos de extrusão e trefilação

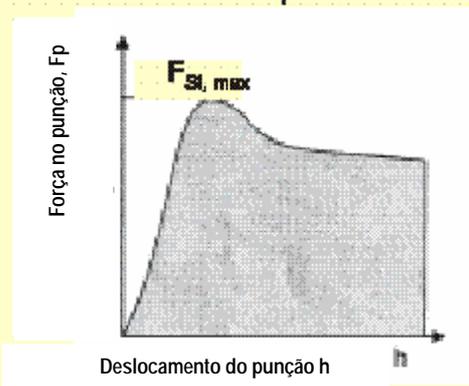
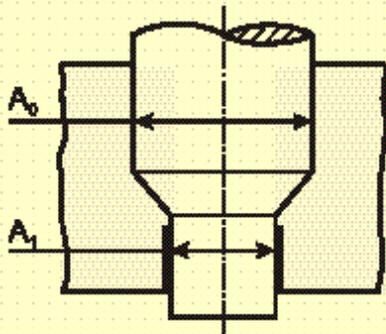
Comportamento Força versus Deslocamento

No início do processo a força no punção aumenta devido a forte resistência à deformação elástica na peça e na ferramenta, até que o material da peça começa a escoar preenche a toda a cavidade da matriz. Após vencer o atrito de aderência entre a peça e a ferramenta a resistência interna ao escorregamento a força de extrusão cai nitidamente. Continuando a crescer o deslocamento do punção a força necessária é reduzida, uma vez que a área sob atrito vai ficando cada vez menor.

O grau extrudabilidade depende do grau de redução e do processo escolhido.

Ex.:

Extrusão direta completa		Extrusão direta completa	Trefilação de barras e fios		Trefilação de corpos ociosos	
ϕ	η_F	η_F	ϕ	η_F	ϕ	η_F
0,4	0,45	0,30...0,60	0,15	0,45...0,55	0,15	0,40...0,60
1,0	0,75		0,5	0,65...0,75	0,50	0,70...0,85
1,5	0,80					



Grau de conformação / Deformação verdadeira j :

$$j = \ln \frac{A_0}{A_1}$$

Deformação relativa e :

$$e_A = \ln \frac{A_0}{A_1}$$

Força de conformação F :

$$j = \ln \frac{A^* \cdot k_m \cdot j}{h_f}$$

A^* = na extrusão A_0
na trefilação A_1

A_0 = seção transversal antes da conformação

A_1 = seção transversal após a conformação

k_m = tensão de escoamento média

h_f = rendimento da conformação

Figura 2.14: Parâmetros de extrusão e trefilação.

2.4.3 Extrusão

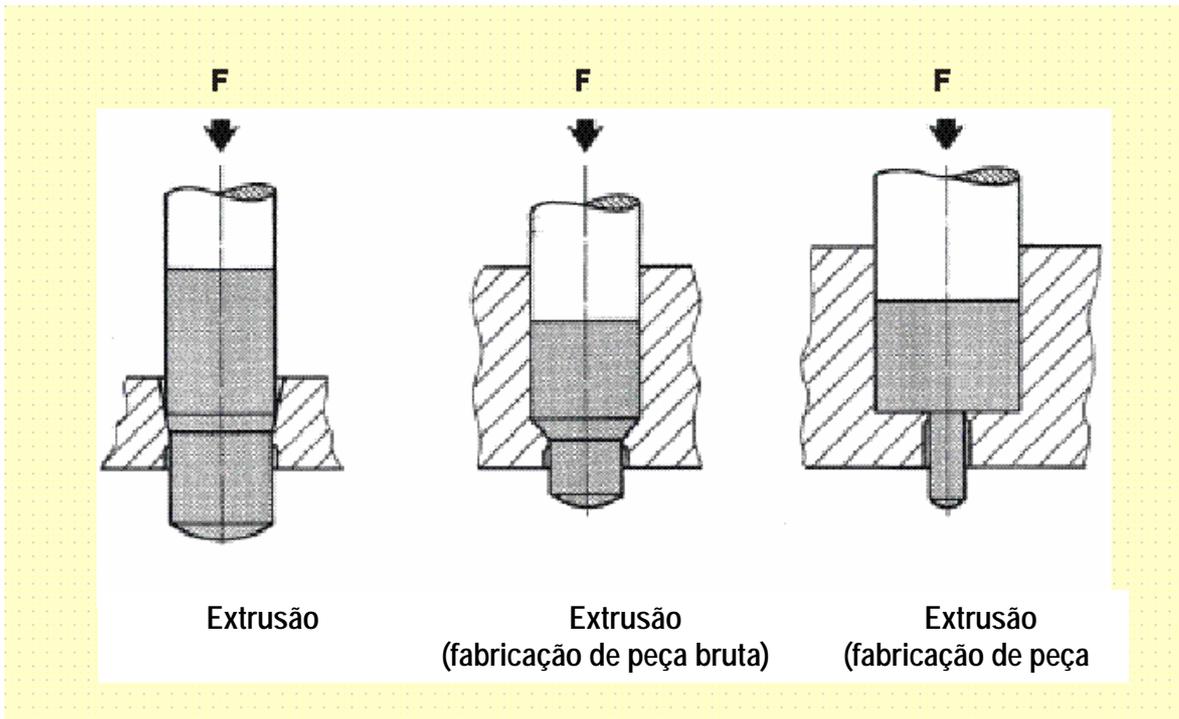


Figura 2.15: Divisão dos processos fundamentais de extrusão

Extrusão

Extrusão de um pedaço de material (tarugo ou recorte de chapa), a qual é comprimida através de uma matriz convergente. A passagem pela matriz convergente pode além do punção contar também com a ajuda de meio de transmissão da força de extrusão (fluido ou lubrificante), chamadas de extrusão hidrostática e extrusão de filme espesso.

Os processos básicos de extrusão são classificados a seguir como:

- geometria da peça (Extrusão completa, extrusão oca e extrusão em copo)
- direção do fluxo de material, bem como movimentação da ferramenta.
(Extrusão direta, extrusão indireta e extrusão transversal).

Na prática estes processos podem aparecer em combinação uns com os outros ou ainda em combinação com outros processos de conformação (recalque, mandrilagem, etc), resultando em processos tais como a extrusão direta completa, extrusão indireta em copo (extrusão-forjamento).

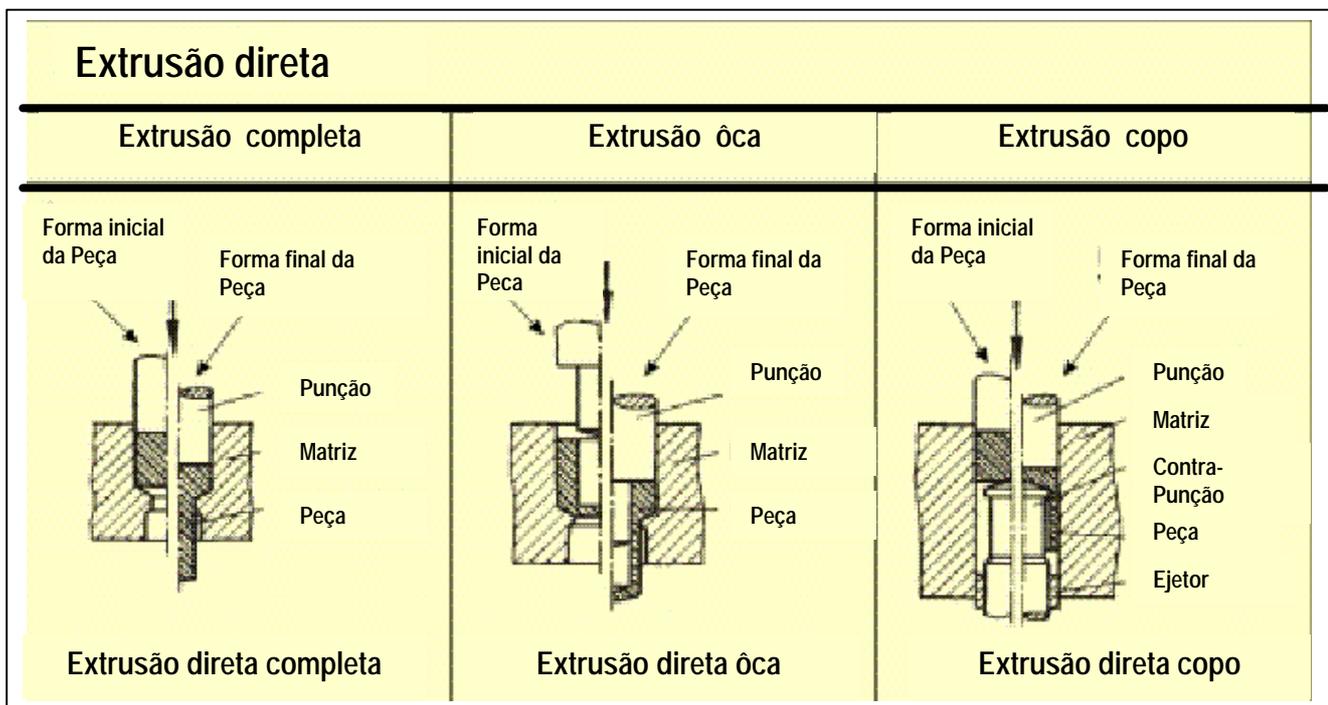


Figura 2.16: Processos fundamentais de extrusão direta

Extrusão Indireta

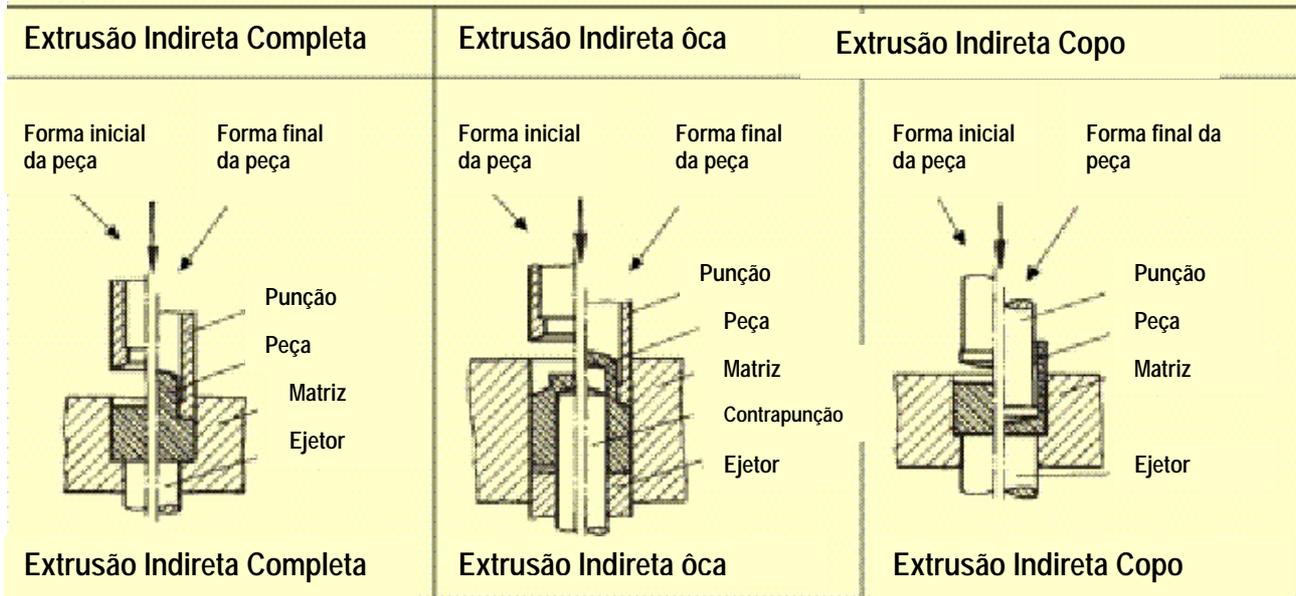


Figura 2.17: Processos fundamentais de extrusão indireta

Extrusão Transversal

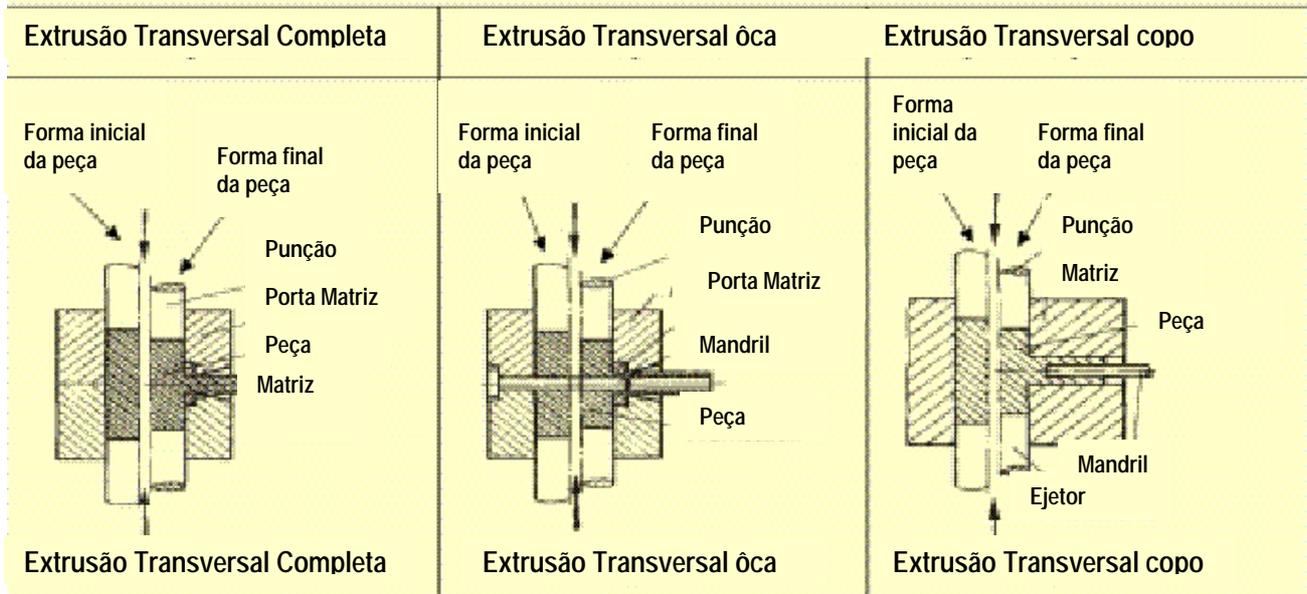


Figura 2.18: Processos fundamentais de extrusão transversal

Os processos de extrusão podem ainda ser dividido pela temperatura da peça:

Critério: Temperatura da peça		
Extrusão a frio	Extrusão semi-aquecida	Extrusão a quente
<ul style="list-style-type: none"> . elevada economia . combinação com outros processos . alta qualidade dimensional e superficial . Fabricação de peças complexas Melhores propriedades mecânicas 	Propriedades semelhantes a dos extrudados a frio. <ul style="list-style-type: none"> . Menor tensão de escoamento . Importância cada vez maior 	melhora da trabalhabilidade

A compreensão do fenômeno de atrito na extrusão a frio é de grande importância, devido a grande área de interface entre peça e ferramenta nestes processos.

Limitações geométricas da extrusão:

- . impossibilidade de cantos vivos
- . impossibilidade de roscas
- . impossibilidade de separações na parte posterior
- . impossibilidade de furos transversais

Material : quase todos os materiais, também os frágeis (Ex.: Ferro Fundido) por meio de punção com contra-pressão.

Máquina: Prensa mecânica de manivela e excêntrica, bem como prensa hidráulica.

Extrusão com Redução livre

A redução é uma variante do processo de extrusão direta no qual a peça conformada dentro da matriz ou fieira sem estar apoiada. A extremidade livre sobre pressão não deve permitir recalque ou flambagem.

® ângulo de abertura da matriz (2α) e o grau de redução devem ser pequenos.

Na falha do processo de redução por extrusão ou do uso de um mandril, podem ser tentadas outras combinações possíveis. (p. Ex.: extrusão em combinação com recalque, na fabricação de parafusos).

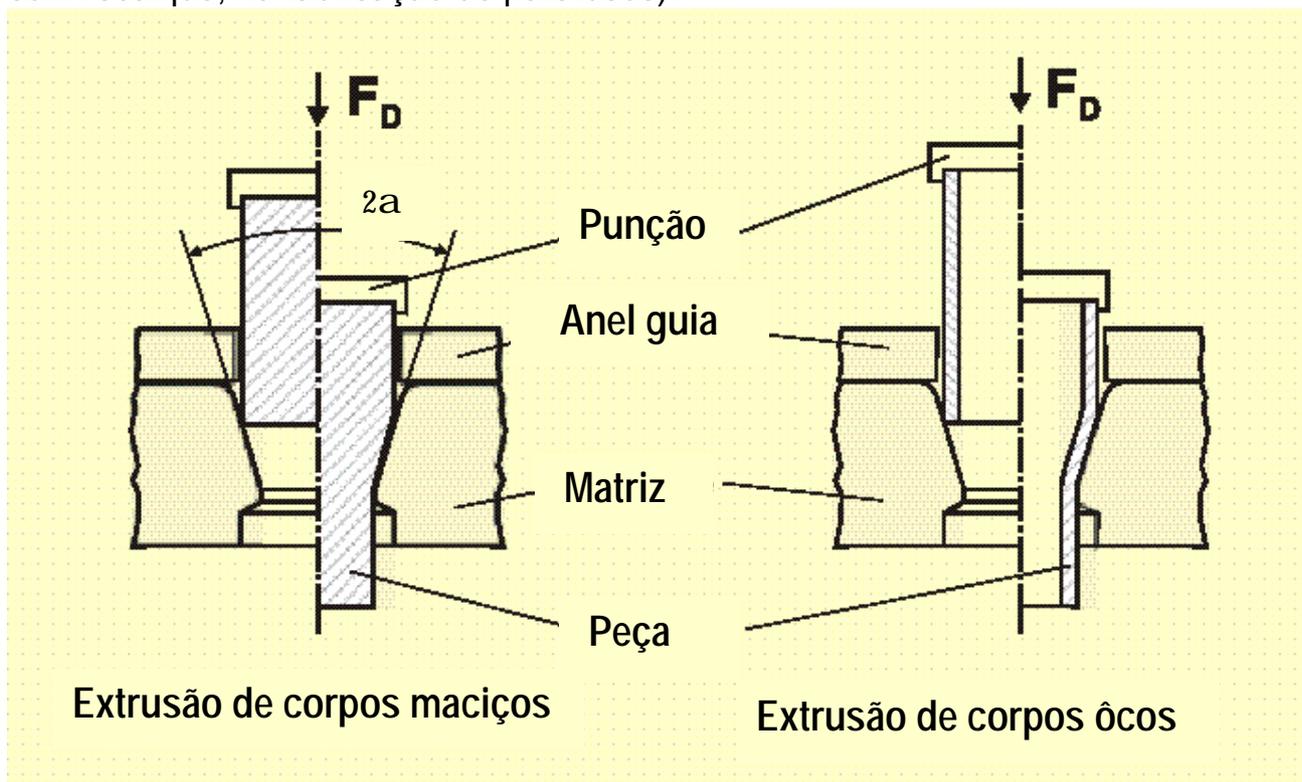


Figura 2.19: Redução sem mandril dentro do diâmetro interno.

Extrusão de produtos semi-acabados

O princípio do processo corresponde ao da extrusão contínua e é analogamente dividido. Diferentemente da extrusão de fabricação de peças, neste caso trata-se da produção de extrudados de produtos não planos semi-acabados (barras, tubos e perfis) em uma única etapa, processados a quente. Predomina neste caso o processo de extrusão direta.

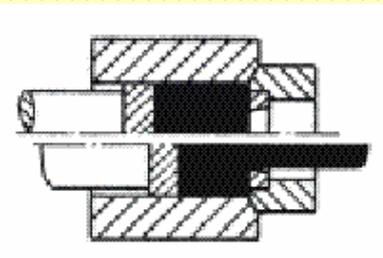
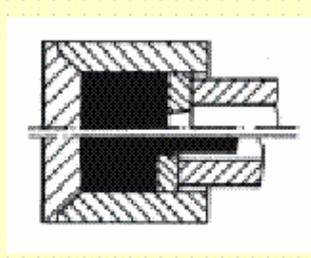
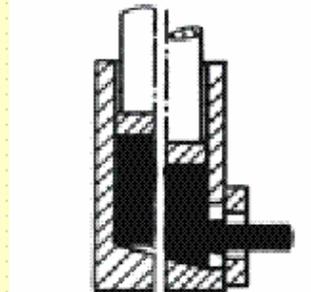
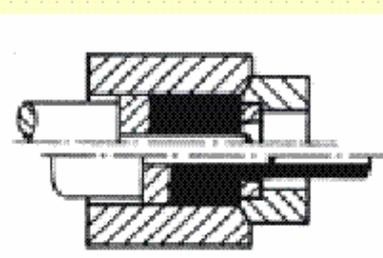
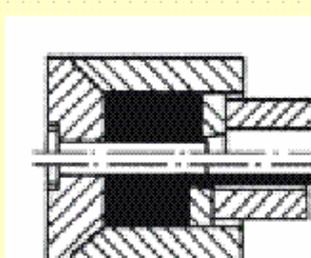
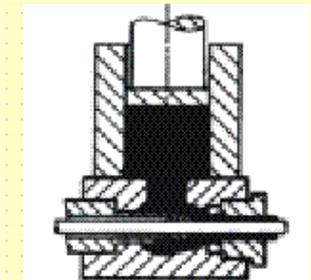
	Extrusão direta	Extrusão indireta	Extrusão Transversal
corpo maciço			
	Extrusão direta de corpo maciço	Extrusão indireta de corpo maciço	Extrusão transversal corpo maciço
corpo ôco			
	Extrusão direta de corpo ôco	Extrusão indireta de corpo ôco	Extrusão transversal corpo ôco

Figura 2.20: Divisão dos processos de extrusão com ferramental com espiga sólida

Característica de todos os processos de extrusão de semi acabados é a pressão hidrostática elevada. Esta contribui para o aumento da extrudabilidade quando comparada com outros estados de tensões. Neste sentido, nos processos de extrusão de semi-acabados podem ser atingidos deformações de até $\varphi = 7$.

Caso especial: extrusão hidrostática: compressão pura máxima $\varphi=9$

Vantagem ____: - produção de perfis seções transversais melhores
- menor custo de ferramenta

Material ____: - Quase todos os aços e metais não ferrosos, principalmente:
ligas de Al, Mg, Cu, Sn e Pb

Liga mais utilizada: Al 6063 (= AlMgSi0,5).

Máquinas ____: prensas hidráulicas com sistema direto ou acumulador.

2.4.4 Trefilação

Na trefilação podem ser distinguidos os seguintes processos fundamentais:

Trefilação em fieira: A trefilação por deslizamento é um processo de trefilação de perfil maciço ou vazado (trefilado tubular) confinado em uma ferramenta sólida e convergente (fieira). Ex: barra trefilada, perfil trefilado, tubo trefilado e estirados.

Trefilação por laminação: No lugar da fieira de trefilação se usa trefilação por laminação um par de cilindros rotativos apoiados em mancais. Comparada com a trefilação em fieira, a trefilação por laminação têm a vantagem de que a força no punção é de 10 a 30 % menor devido ao atrito reduzido.

Ao contrário da extrusão, na trefilação a peça é puxada e conduzida através da trefila (fieira de trefilação). → Na zona de deformação domina compressão e tração.

O processo de trefilação quando feito a temperatura ambiente, resultará em um encruamento do material. Isto ocorre antes de tudo com materiais como o alumínio e o cobre puro, resultando em um aumento de suas resistências mecânicas, que para estes materiais só pode ser obtido via conformação plástica.

Tipos de trefilação:

- **Trefilação de corpos maciços em fieira:** barras redondas ou perfilados bem como arames, trefilados planos de chapas.
- **Trefilação de corpos ocos em fieira:** diferenciação adicional em processos com e sem ferramentas interna (mandril).
- **Trefilação de corpos ocos em fieira sem mandril :** inclui trefilados comuns com espessura de parede irregular e superfície interna rugosa. Visa obter uma redução na seção transversal da peça, sem que isto implique em uma alteração na espessura de parede do trefilado.
- **Trefilação de corpos ocos em fieira com mandril :** neste processo é possível uma trefilação com diferentes espessuras de parede. Pelo que possibilita a fabricação de tubos com espessura precisa e superfícies lisas e regulares.

Tipos de trefilação de corpos oco com fieira e mandril:

– **fieira fixa (mandril)** O mandril é mantido dentro da fieira por uma haste. As limitações do processo são o máximo comprimento da haste do mandril. Quando a haste do mandril é muito grande, a velocidade de trefilação fica muito alta, podendo resultar em vibração, e implicam numa superfície defeituosa e marcada.

- **fieira livre flutuante** Um corpo oco é puxado através do orifício de fieira com um mandril interno solto. Neste caso o mandril é mantido centrado e posicionado em seu lugar através das forças de compressão e pelas forças de atrito atuando em sentido contrário. Isto possibilita a fabricação de um dado projeto de tubo com qualquer geometria teoricamente imaginada, uma vez que o comprimento de trefilação só está limitado pela haste do mandril.

- **com mandril acompanhante** neste processo um corpo oco junto com uma haste é trefilado através da fieira. Não ocorre nenhum atrito entre a peça e a ferramenta interna, uma vez que os dois estão à mesma velocidade. A desvantagem é que a haste está embutida na peça e após a trefilação terá de ser removida. Para obter-se uma superfície interna lisa, a haste (mandril) precisa estar completamente retificada e cromada. Além disto o comprimento de trefilação está limitado ao comprimento do mandril.

Um outro processo de trefilação em fieira é a trefilação por estiramento. Neste caso a peça, um corpo oco com flange, é puxada junto com um punção através da fieira de trefilação. A espessura da parede da peça passa por uma redução e comprimento é aumentado. Ao contrário dos outros processos de trefilação, este processo permite a fabricação de peças ou produto final.

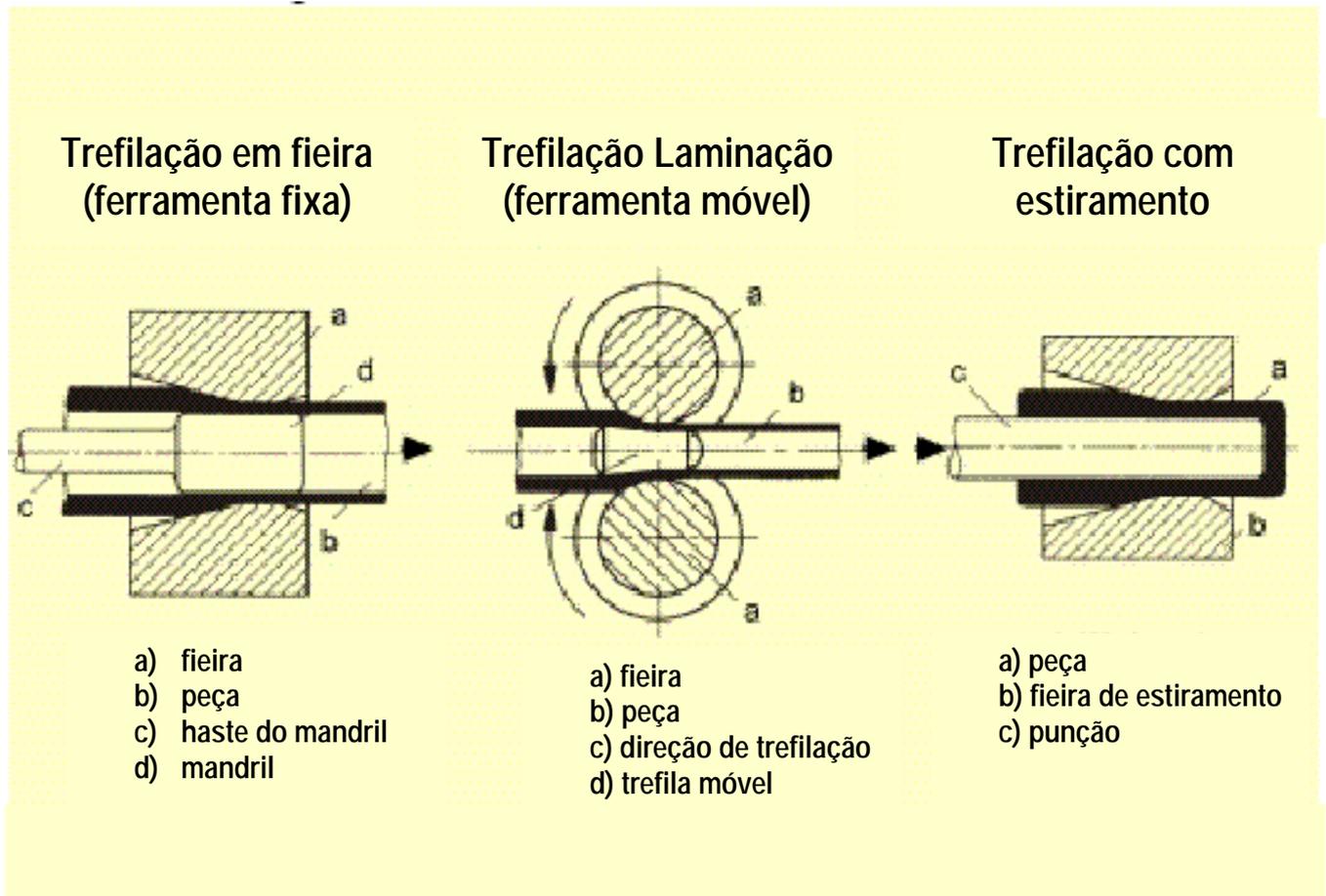


Figura 2.21: Trefilação – processos fundamentais.

2.5 Laminação

2.5.1 Conceito, fundamentos, exemplos

Laminação é um processo de conformação contínuo ou em etapas com uma ou mais ferramentas rotativas (cilindros de laminação) e com ou sem ferramentas adicionais (p.ex.: mandris, calços ou hastes)

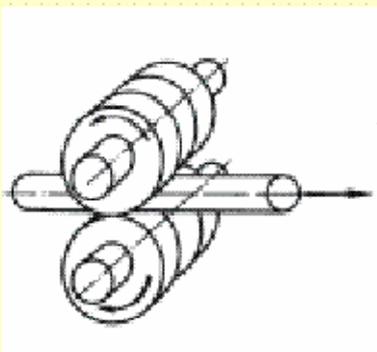
Cerca de 90% dos metais produzidos por metalurgia convencional de fusão são processados pelo processo de laminação. Permitindo:

- . alcançar as dimensões dos produtos semi acabados ou da peça pronta.
- . conformação da estrutura de solidificação do lingote.
- . caldeamento de rexupes e poros provenientes do processo de lingotamento e com isto melhora das propriedades mecânicas.

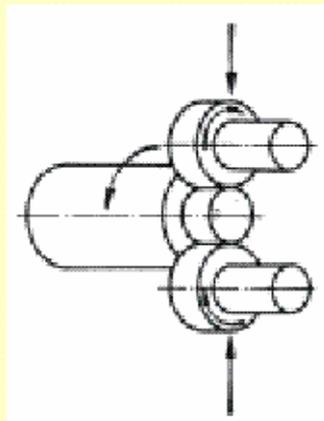
Característico do processo de laminação são as tensões de compressão. Os cilindros de laminação podem tanto ser motores ou então movidos pelo movimento do material que está sendo laminado.

Laminação é um processo de conformação contínuo ou em etapas com uma ou mais ferramentas rotativas (cilindros de laminação), com ou sem ferramentas adicionais

Laminação longitudinal



Laminação transversal



Laminação cisalhante

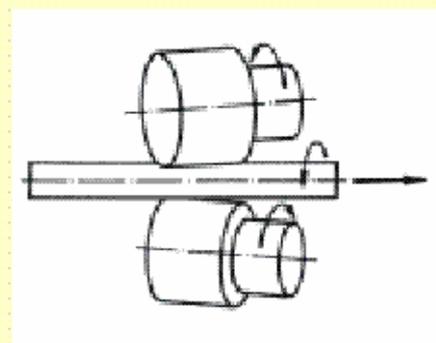


Figura 2.22: Laminação – processos fundamentais

Divisão dos processos de laminação

- conforme a cinemática (longitudinal, transversal e cisalhante)
- conforme a geometria da ferramenta (laminação plana e de perfis)
- conforme a geometria da peça (corpo ôco ou maciço)
- conforme a temperatura da peça – laminação a frio ou a quente
- laminado contínuo e laminados de em lotes.

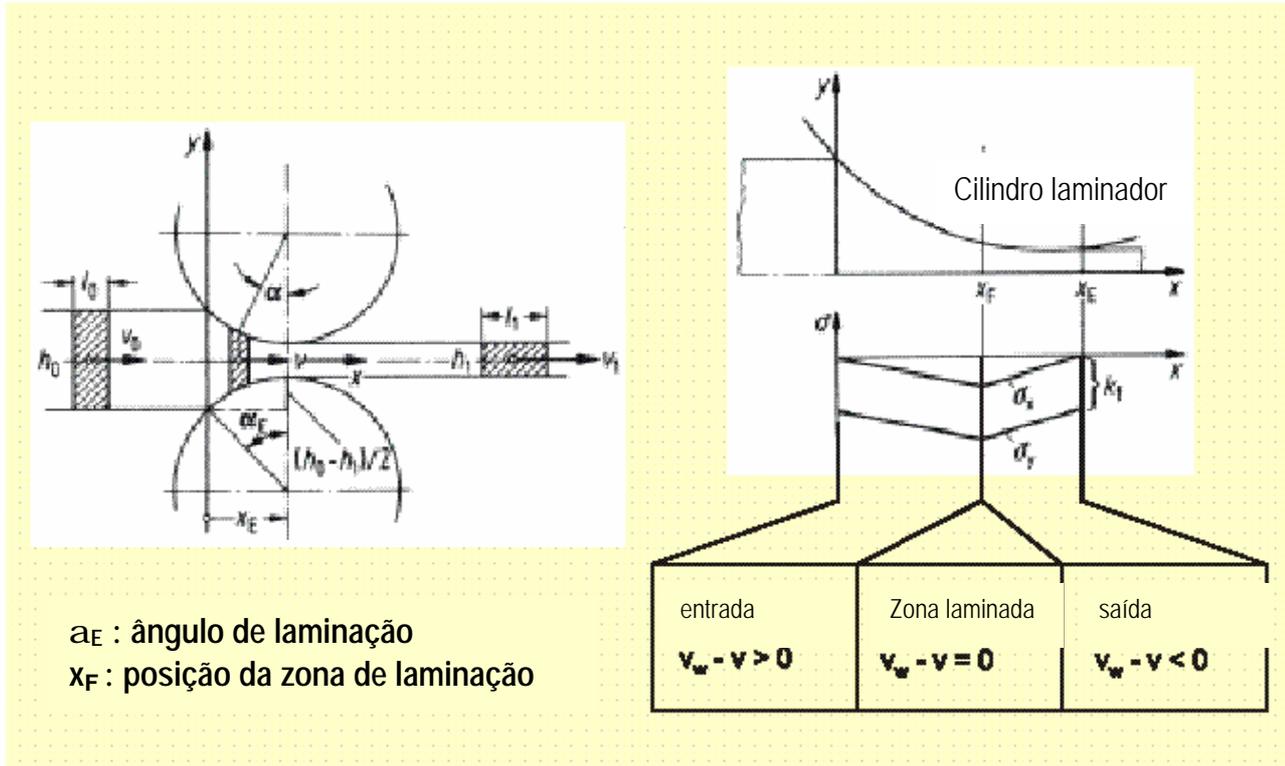


Figura 2.23: O processo de laminação – exemplo de laminação longitudinal plana.

2.5.2 Parâmetros e fundamentos do processo de laminação

Na laminação ocorre uma redução de espessura do laminado Δh , a qual corresponderá também uma redução no esforço de laminação, valendo:

$$\Delta h = h_0 - h_1$$

Devido ao volume do laminado ser constante e a mudança de largura da chapa ser desprezível (válido se $b/x_E > 20$), a redução da espessura vai implicar em um aumento do comprimento laminado. Isto implica que o laminado adquire uma outra velocidade v diferente da velocidade inicial do cilindro de v_w . Singularmente na zona de laminação estas velocidades são iguais.

As tensões σ_x e σ_y são tensões de compressão. Elas crescem até a região de laminação e depois voltam a cair.

Pelo critério de Tresca a diferença entre as tensões é igual a tensão de escoamento k_f .

2.5.3 Revisão do processo de laminação

laminação a quente

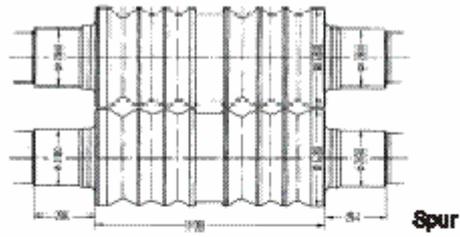
O processo de laminação é realizado em uma das muitas etapas do processo do processo de fabricação. A laminação, como primeira etapa está ligada diretamente com a usina siderúrgica. Lá se realiza o processo de laminação a quente, aproveitando ainda a temperatura do lingote diretamente, ou após manutenção em um forno poço. Como produtos desta primeira etapa têm-se p. ex.: tiras, chapas, tubos e perfis. Na laminação a quente é empregada a laminação longitudinal e a oblíqua.

Laminação de perfis a quente

A laminação de perfis é realizada através do chamado laminador de calibração. Este processo compreende a laminação com cilindros, no qual contornos concêntricos são usinados no cilindro de laminação. O contorno concêntrico no cilindro de laminação é chamado de calibre. Durante a laminação o laminado preenche o espaço do calibre, em maior ou menor magnitude dependendo das condições de laminação.

Flanges paralelos ou mais largos podem ser laminados adicionalmente no material conformado.

Laminador Calibrador



Laminação de perfilados em um laminador universal

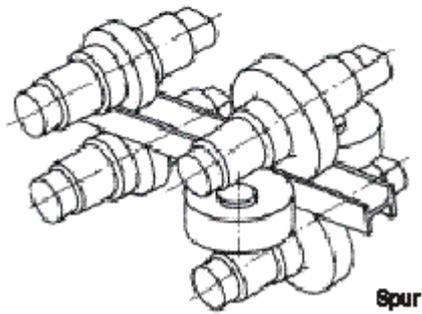


Figura 2.24: Laminação de perfilados

Laminação de tubos

Os diferentes processos de laminação de tubos podem agrupados em um conceito fundamental comum. Destacando-se os tubos sem costura.

Identificam-se três etapas de conformação:

1. Fabricação de um bloco oco espesso através do puncionamento de um bloco fundido ou laminado maciço.
2. Laminação longitudinal do bloco oco com um mandril cilíndrico interno. formação do lingote
3. Redução do lingote, também com laminação longitudinal sem mandril; surgimento do tubo com o diâmetro interno desejado.

Alta capacidade de fabricação:

. laminação de tubos com diâmetro externo entre 180 e 400 mm.

. laminador de passo peregrino para tubos com ϕ interno entre 400 e 650 mm.

A laminador contém os cilindros de trabalho e o laminador guiado. A ferramenta interna, tem um mandril mantido com uma haste. Ele forma junto com os cilindros de trabalho, incluindo o calibrador, um espaço anular. Um suporte pneumático guia o bloco oco dentro da região de laminação.

O tubo laminado é puxado de volta, e girado 90° e com um mandril de 1 a 3 mm maior novamente laminado. Finalmente o tubo pronto é retirado da máquina. Este processo permite fabricar tubos de até 18 m de comprimento.

Etapas de conformação

1. produção de bloco oco
2. laminação longitudinal do bloco oco com mandril
3. laminação de redução

- a) cilindro motor
- b) mandril
- c) retorno
- d) haste do mandril
- e) mancal de encosto
- f) bloco oco

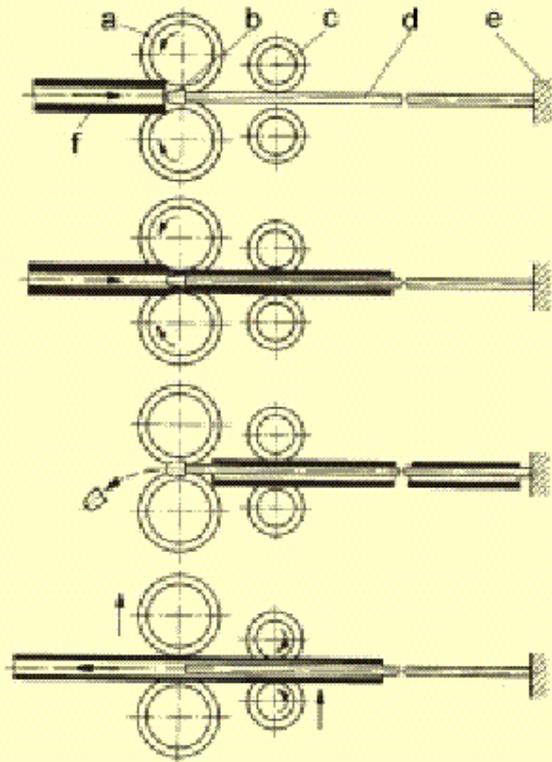
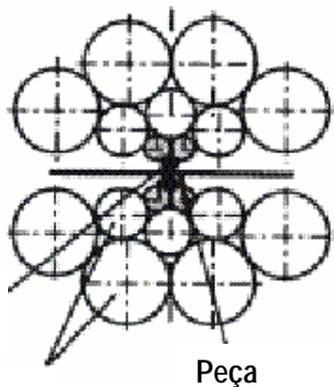
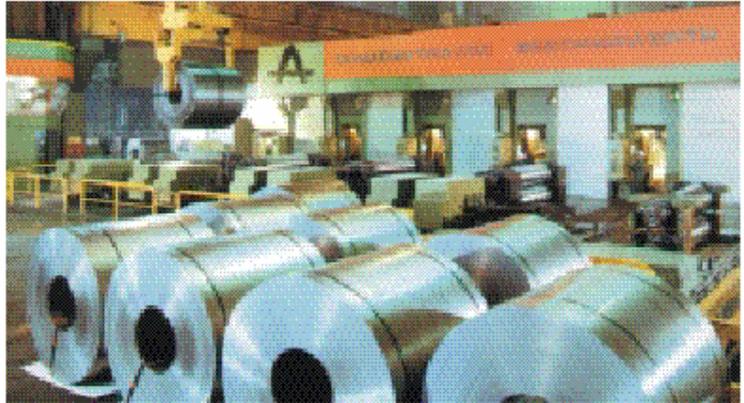


Figura 2.25: Laminação de tubos

Etapas de fabricação:

- Preparação do laminado a frio
- Laminação a frio
- Pos tratamento (recozimento, acabamento)
- Eventuais revestimentos (Sn, Zn, etc.)



Propriedades dos laminados a frio :

- Superfície isenta de trincas e poros
- Rugosidade e textura superficial definida
- Estreita tolerância de espessura da chapa
- Planaridade

Figura 2.26: Laminação a frio de produtos planos.

Laminação a frio de chapas

Geralmente são produzidas tiras e chapas espessas na laminação a quente e chapas finas na laminação a frio.

Preparações

Afastamento de defeitos

- . antes da laminação a quente por fresa ou retífica (Al, Titânio)
- . depois da laminação a quente por ataque químico (aço)
- . antes da laminação a frio por fresa ou plaina (Cobre e ligas de cobre).

Laminação a frio

As tiras e chapas laminadas a frio têm em contraste com as laminadas a quente as seguintes propriedades:

- . em alguns casos, resistência mecânica nitidamente mais elevada.
- . uma superfície isenta de trincas e porosidades.
- . uma rugosidade definida
- . tolerâncias de espessuras mais estreitas

Pos tratamentos

Devido a laminação a frio estar condicionada a um forte encruamento torna-se necessário um tratamento de recozimento acima da temperatura de recristalização. Inclui-se também um tratamento de laminação posterior para:

- melhorar a planaridade da chapa.
- imprimir um padrão de rugosidade sobre a chapa.
- corrigir o patamar de escoamento das chapas de aço, e eliminar defeitos de conformação.

Impressão de rugosidade na laminação de acabamento

O comportamento do atrito nos processos de conformação depende dos parâmetros de processo, principalmente da topografia superficial peça e ferramenta. Nas chapas finas surgem as possibilidades de impressão de um padrão de rugosidade definidas e reproduzíveis. Esta impressão é feita na etapa de laminação de acabamento

Atualmente existem 5 processos a disposição (SBT, EDT, Pretex LT e EBT) com os quais podem ser produzidos padrões de rugosidade estocásticos, determinísticos e pseudo-estocásticos.

Funções da microestrutura superficial:

- . bolsões de reservatório de lubrificante
- . Transporte de uma quantidade suficiente de lubrificante até a zona de conformação.
- . Transporte de partículas de desgaste para fora da zona de conformação.

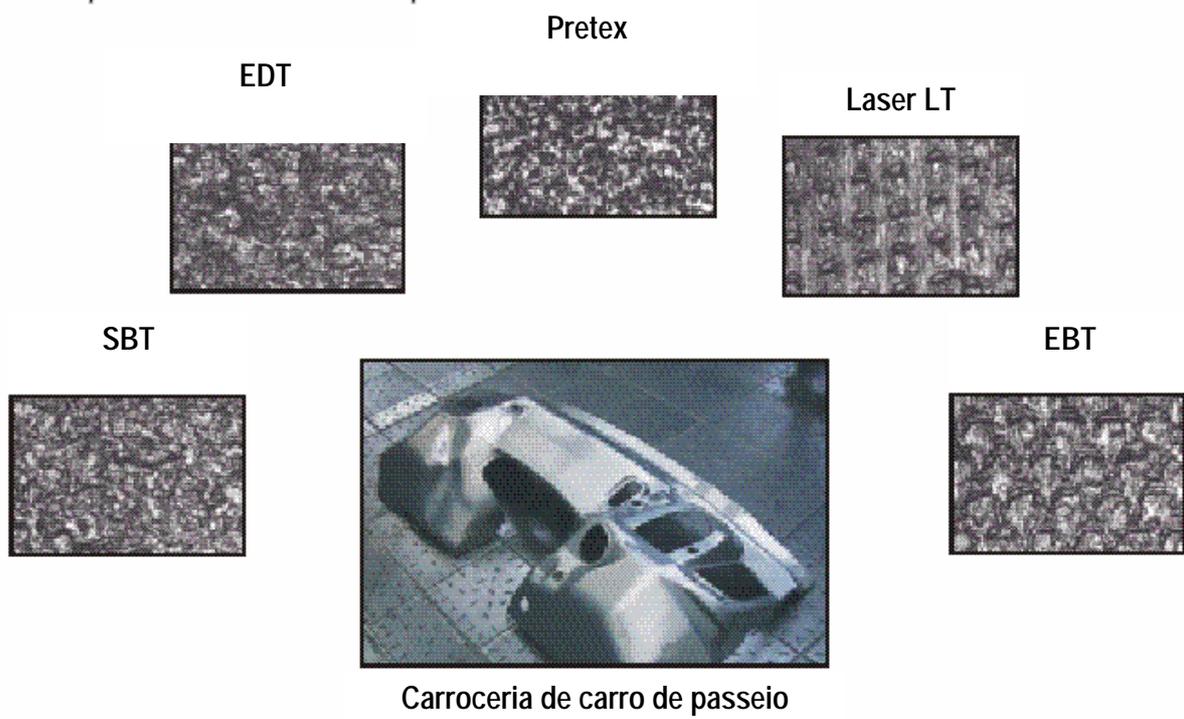


Figura 2.27: Padrões de impressão de rugosidade em chapas finas

Revestimentos

Para evitar a corrosão as chapas metálicas podem passar por um processo de pós-tratamento com revestimentos metálicos e /ou recobrimentos orgânicos / inorgânicos.

Revestimentos metálicos

- . imersão em banho fundido , ex.: chapas revestidas com zinco ou alumínio
- . revestimento eletrolítico Ex.: estanho, níquel, cobre ou cromo
- . CVD deposição química de vapor sob vácuo, ex.: ouro ou cromo
- . Revestimento por laminação, ex.: com alumínio, níquel ou cobre

Revestimentos não metálicos:

- . Esmaltagem
- . Pintura

2.5.4 Outros processos de laminação

Laminação de roscas

Na fabricação de elementos de fixação o processo de roscamento desempenha um papel muito importante .

Exemplos: todos os tipos de roscas (métrica, withworth, trapezoidal , etc) podem ser fabricados pelo processo de laminação.

Vantagens da laminação de roscas em comparação com a usinagem:

- . alta precisão e produtividade (ex.: 90 000 peças /h para roscas M5)
- . superfície lisa e uniforme da rosca laminada
- . aumento da resistência do flanco da rosca
- . aumento da resistência a fadiga
- . redução da sensibilidade ao entalhe
- . economia de material, uma vez que as dimensões iniciais são menores que as dimensões desejadas para o diâmetro externo da rosca.

Pré-condição para um aumento nítido da resistência mecânica é contudo um tratamento térmico adequado de beneficiamento (tempera + revenido) antes do processo de laminação.

- Para a fabricação de roscas podem ser usadas ferramentas planas ou curves.

laminação com ferramenta de encosto

Neste caso são empregados dois encostos (cossinetes ou tarrachas), um dos quais fixo enquanto o outro tem um movimento linear paralelo.

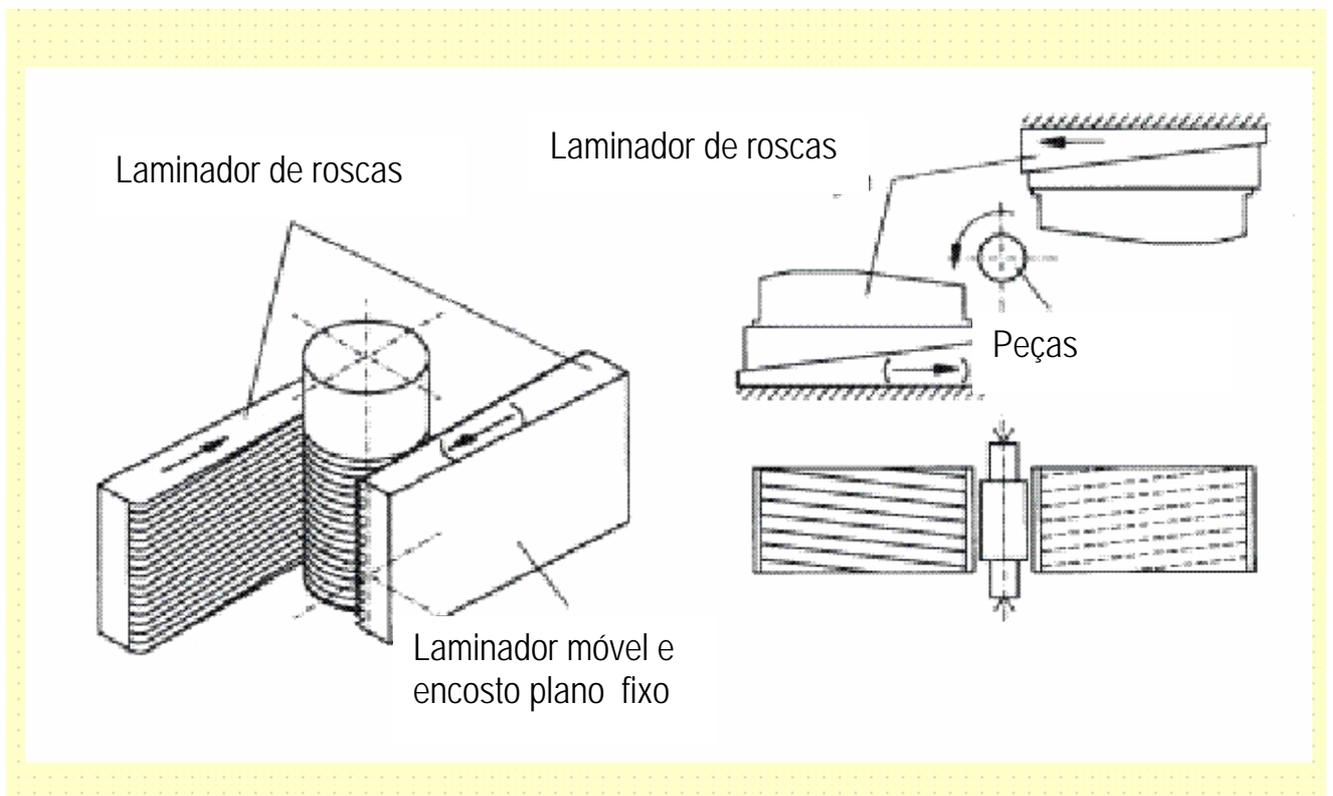


Figura 2.28: Laminação de roscas com encosto plano.

Laminação em gravação única

Neste processo a peça é posicionada entre dois cilindros com a gravação dos filetes da rosca, os quais giram em mesma velocidade e direção de rotação. Um dos cilindros de laminação está fixo em um mancal, enquanto o outro pode se mover radialmente contra o primeiro. A peça apóia se em uma régua ou está posicionada sobre duas pontas.

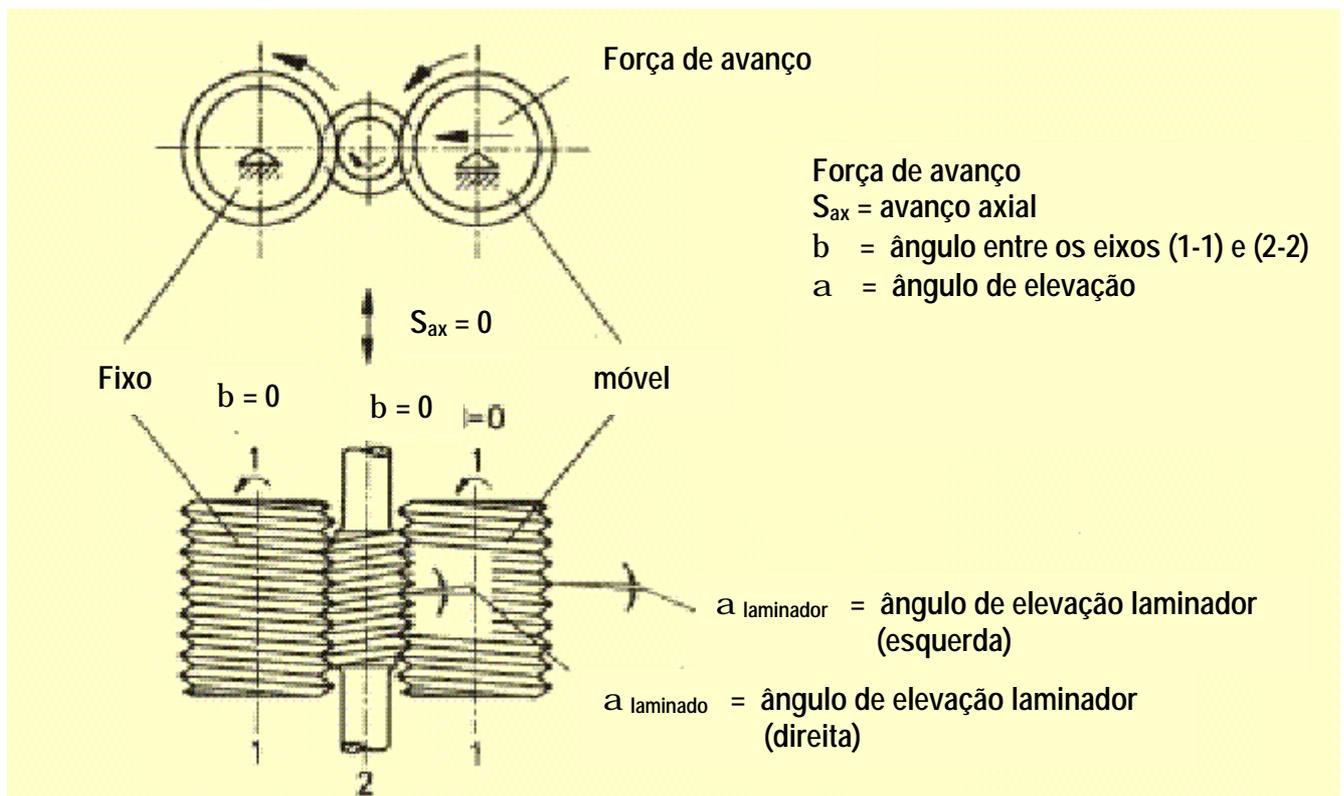


Figura 2.29: Princípio do processo de laminação de rosca em gravação única.

Laminação de roscas com cilindro e segmento de roscamento

Neste processo se comprime entre até três elementos de roscamento, fixos e reguláveis com uma zona de saída com raio de curvatura determinando um segmento de roscamento o qual gira e guia a peça contra o cilindro de laminação de rosca.

Devido a alta produtividade deste processo ele é indicado para a fabricação de grandes lotes de peças.

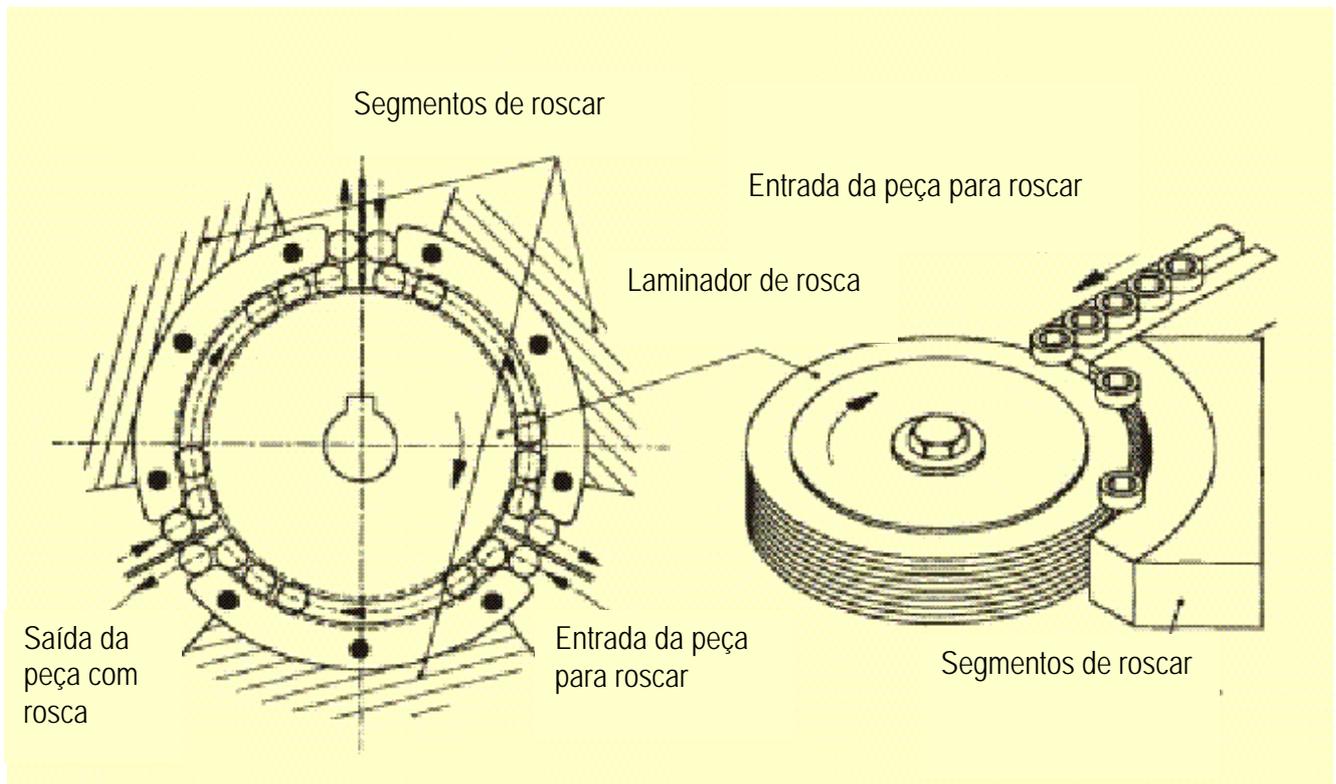


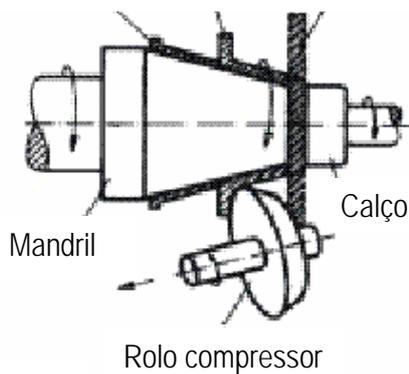
Figura 2.30: Princípio do processo de laminação de roscas com um cilindro de roscamento e um segmento de apoio.

Laminação sobre compressão (Rolagem)

O processo de rolagem é especialmente interessante para a fabricação de pinhões de aço. Neste caso, a peça é comprimida contra um rolo compressor. Característico é redução da espessura da peça. Com este processo podem ser fabricadas peças cilíndricas ou esféricas.

Rolagem

Forma final Forma intermediária Forma inicial



Laminação de engrenamentos

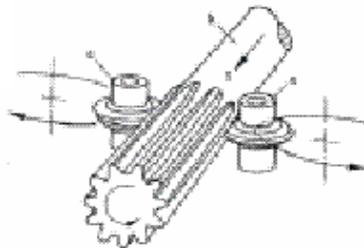


Figura 2.31: Processo de laminação sobre compressão (rolagem)

Vantagem :

- boa uniformidade e circularidade da peça
- forte encruamento
- pouco refugo de material

a desvantagem é a grande geração de calor pelo atrito elevado, sendo necessário um sistema de lubrificação adequado.

Laminação a frio de engrenamentos

Com este processo podem ser fabricados eixos endentados (engrenamentos).

Vantagens:

- alta precisão dimensional
- bom acabamento superficial
- boas propriedades mecânicas (distribuição das fibras e dureza)

2.6 Tendências atuais

2.6.1 Tixioconformação

Na tixioconformação procede-se à conformação de uma peça na faixa de temperatura entre sólido e líquido. A temperatura é escolhida em geral para uma proporção de ~ 60 % de fase sólida e ~ 40 % de fase líquida.

A conformação é conseguida em uma única etapa ou pela prensagem em um molde fechado ou entre duas metades separáveis de um molde.

Vantagem :

- curto tempo de processo
- geometrias de peças complexas
- Near-Net-Shaping (fabricação próxima da forma final)
- boas propriedades do material

Desvantagem:

- até o momento apenas Al, ligas de alumínio e algumas ligas de cobre
- janela de processo estreita
- elevada sollicitação térmica da ferramenta

2.6.2 Forjamento de metais não ferrosos leves (Al, Mg, Li, etc.)

A tendência pela economia de energia comanda a tecnologia aeronáutica e espacial, indústria automobilística, bem como na engenharia mecânica e de processos químicos. Para isto materiais com alta resistência e baixa densidade são especialmente indicados.

Junto com as ligas de alumínio para conformação, aparecem ligas super leves com as ligas de Mg-Li (Densidade 1,3 g/cm³ até 1,5 g/cm³). O forjamento de ligas de magnésio encontra-se atualmente em desenvolvimento. Importante neste caso é o controle da temperatura: em temperaturas muito baixas, a conformabilidade é muito reduzida, enquanto que para temperaturas muito altas, surgem trincas a quente, que em outras ligas de baixo ponto de fusão costumam desaparecer.

2.6.3 Forjamento de precisão

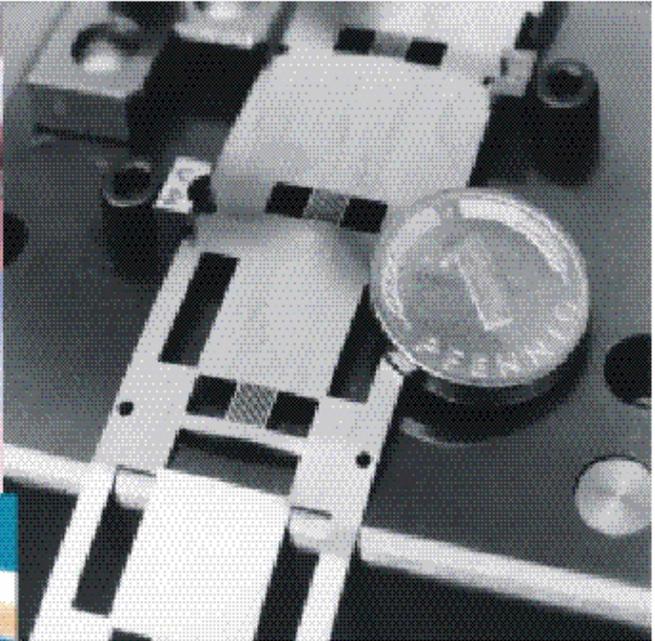
Forjamento com tolerâncias mais estreitas, de tal modo que não seja necessária nenhuma operação posterior de acabamento.

Outros temas importantes no desenvolvimento da conformação volumétrica

- **Fabricação de peças de precisão.**
- **Fabricação por conformação de micro peças (técnica de micro conformação)**



Micro peça extrudada



Micro peça produzida por corte fino

Figura 2.32: Fabricação de micro peças.

2.7 Questões para estudo dirigido

- . Esquematize as tensões em um processo de recalque com e sem atrito.
- . Como são definidos os grau de recalque e a razão de recalque ?
- . Por que na prática industrial, o forjamento com rebarba é preferido, não obstante a remoção da rebarba ser bastante trabalhosa?
- . Indique os três processos fundamentais do forjamento.
- . Quais os tipos de sollicitação que se têm em uma ferramenta de forjamento ?
- . Esquematize o diagrama Força – deformação em um processo de extrusão direta de um corpo maciço e explique-o.
- . Como pode se diferenciar a extrusão direta de corpo maciço da trefilação de chapas.
- . Cite três processos de trefilação em feira para corpos ocos.
- . Quais as vantagens da laminação de roscas sobre a usinagem de roscas?
- . Quais as etapas de fabricação são necessárias na laminação a frio de produtos planos ?

3. Conformação de chapas metálicas

3.1 Introdução

3.2 Materiais para conformação de chapas

3.3 Propriedades mecânicas das chapas

BIBLIOGRAFIA

Kalpakjian, S. & Schmid, S. R. – Manufacturing Engineering and Technology – Ed. Prentice Hall 4 ed. EUA, 2001

Parte III – Processos e equipamentos de conformação e moldagem pg. 316 a 512.

Capítulos 16.

3.1 Introdução

Conformação de chapas é definida como a transição de uma dada forma de um semi acabado plano em uma outra forma. Os processos de conformação de chapas têm uma importância especial na fabricação de carrocerias automotivas e componentes da indústria eletro-eletrônica.

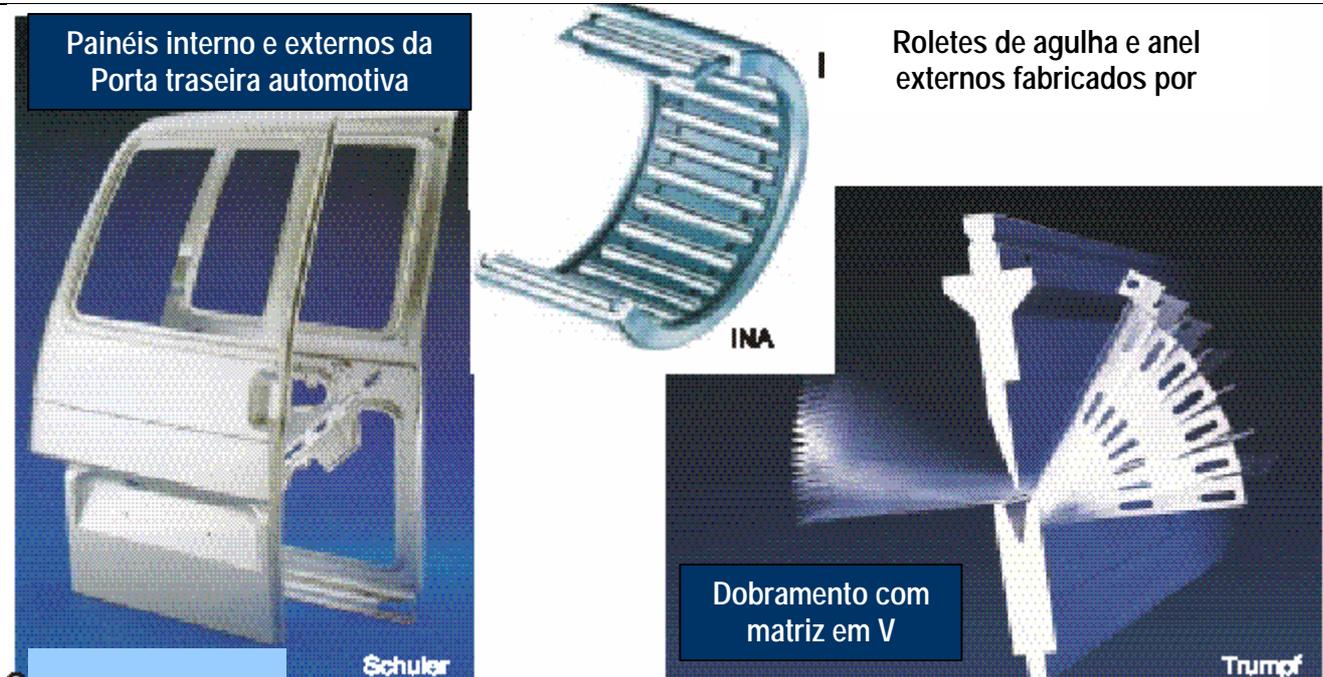


Figura 3.1: Conformação de chapas

Requisitos :

- . Tolerância dimensional
- . Qualidade superficial
- . Resistência a corrosão
- . peça rígida
- . otimização do uso do ferramental

3.2 Materiais para a conformação de chapas (Revisão dos materiais típicos)

Aços

– **chapas e tiras laminadas a frio**: boa conformabilidade a frio coloca o aço em posição de destaque, possibilitando a conformação de peças complexas de espessura reduzida. Para isto é necessária uma boa estampabilidade (embutimento e estiramento). Em parte, pode se obter um bom acabamento superficial através da zincagem eletrolítico ou a fogo para obter resistência a corrosão. A estampabilidade dependerá de propriedades mecânica. Esta avaliação necessita ensaios específicos de estampagem. Uso: carrocerias automotivas. – exemplos: aços IF

– **chapas de aço de alta resistência**:

A resistência mecânica destes aços é obtida de elementos de liga que provocam o endurecimento por solução sólida, precipitação e o refino de grão. Ex.: Nióbio e Titânio. O teor de carbono é mantido baixo visando facilitar a conformabilidade e a soldabilidade.

Propriedades especiais: alta resistência e limite de escoamento.

Exemplos atuais: Aços bake-hardening

Empregos: partes externas na indústria aeronáutica e elementos de segurança.

Aços inoxidáveis: São aços resistentes à influência do meio ambiente, mantendo uma boa qualidade superficial.

Propriedades: aços ferríticos possuem muito boas propriedades de conformabilidade mantendo valores de resistência mecânica elevados. A conformabilidade dos aços inoxidáveis austeníticos é fortemente dependente do encruamento prévio.

Emprego: peças resistentes à corrosão em uma carroceria.

Alumínio:

Ligas de AlMg não endurecíveis: Estas ligas de alumínio sujeitas apenas a endurecimento natural ou não tratável termicamente. Com o aumento do teor de Mg aumenta a resistência a tração, limite de escoamento e a dureza. Devido a possibilidade de defeitos superficiais na conformação, este material não é usado em peças de segurança.

Liga de AlMgSi endurecíveis:

Ligas de AlMgSi são endurecíveis a quente quanto a frio, exibindo entretanto valores relativamente baixos de resistência mecânica. No estado solubilizado, exibe uma conformabilidade muito boa (Estampagem profunda, embutilibilidade e estirabilidade) sem a formação de defeitos superficiais na peça conformada.

Emprego: chapas externas em carrocerias automobilísticas.

Cobre e Ligas de cobre:

Cobre e as ligas de cobre desempenham um papel essencial na indústria eletro-eletrônica.

Emprego: componentes eletrônicos automobilísticos, conexões, leadframes.

É importante nas chapas metálicas para uma boa conformabilidade uma boa ductilidade, elevada resistência a tração e baixo limite de escoamento.

Chapas de alumínio para a conformação mecânica

Material	Resistência estática		Custo relativo	Propriedades	Aplicação
	$R_m / \text{N.mm}^{-2}$	$R_{p0,2} / \text{N.mm}^{-2}$			
Al99 F8	80	<70	2,3	Boa resistência a intemperies	Estampagem profunda
AlMg2/3/5	150...240	60 ... 110	-	Liga de alumínio não endurecível, alta resistência a corrosão	Peças com solicitação mecânica moderada
AlMgSi1	210	110	-	Liga de alumínio de endurecimento por precipitação	Peças externas da carroceria
AlCuMg1	380	240	2,9	Endurecível, liga de alta resistência.	Elementos de máquina
AlZnMgCu1,5	470	370	4,5	Máxima resistência e boa usinabilidade	Construção de máquinas e automóveis

Chapas de cobre para a conformação mecânica

Material	Resistência estática		Custo relativo	Propriedades	Aplicação
	$R_m / \text{N.mm}^{-2}$	$R_{p0,2} / \text{N.mm}^{-2}$			
E-Cu F 20	200... 250	100	10	Boa condutibilidade	Trocadores de calor
CuZn37 F38	> 370	200	8,1	Principal liga de conformação	

Chapas finas de aço laminado a frio

Material	Resistência estática		Custo relativo	Propriedades	Aplicação
	$R_m / N.mm^{-2}$	$R_{p0,2} / N.mm^{-2}$			
St 1405	280 ... 400	240	1,2	Bom acabamento superficial	Peças com Estampagem profunda extrema
X8 Cr17	450...600	270	-	Aço ferrítico com boa estampabilidade, resistência através de solução sólida e precipitação de carboneto de cromo	Alta resistência mecânica e resistência a corrosão
St 50-2	500... 600	300	1,45	Chapa fina de aço comum	pouca conformabilidade
X5CrNi 18 9	500 ... 700	185	-	Endurecível, liga de alta resistência.	Alta resistência mecânica e resistência a corrosão
X40MnCr1 8	700 ... 900	320	8,6	Paramagnético, alta tenacidade , boa conformabilidade a quente, resistência a corrosão ruim	

Custos relativos ao aço St37, preço por unidade de volume.

3.3 Propriedades mecânicas das chapas

Para a avaliação da curva de conformabilidade são realizados ensaios de tração com corpos de prova retirados da chapa. Para aços não ligados e de baixa liga, bem como chapas de metais não ferrosos podem ser usadas à aproximação da equação de Ludwik. Como na conformação de chapas a uniformidade da espessura da peça é importante, o valor do coeficiente de anisotropia r , deve na medida do possível ser o mais elevado possível.

<p>Especificidade do ensaio de tração de chapas</p> <ul style="list-style-type: none"> - avaliação da anisotropia - realização do ensaio a temperatura ambiente - avaliação do ensaio até antes da estricção. 	<p>Equação de Ludwik</p> $K_f = C \cdot j^n$ <p>K_f : tensão de escoamento j : deformação verdadeira (grau de deformação) n : expoente de encruamento C : fator de resistência (específico do material)</p>
-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------	---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------

Anisotropia

Anisotropia vertical $r = \frac{j_b}{j_s} = \frac{\ln \frac{b}{b_0}}{\ln \frac{s}{s_0}}$

anisotropia vertical média
 $\bar{r} = \frac{r_0 + 2r_{45} + r_{90}}{4}$

anisotropia planar média
 $\Delta r = \frac{r_0 + r_{90}}{2} - r_{45}$

Conseqüências da Anisotropia

orelhamento

Figura 3.2: Propriedades das chapas, importantes para a conformabilidade

3.4 Dobramento

O processo de dobramento corresponde a um processo de flexão em estado plástico.

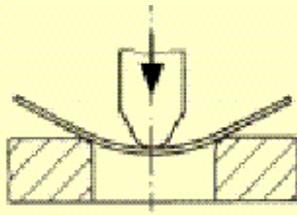
As peças podem ser divididas em:

- . fios e arames
- . barras (perfilados maciços ou vasados, tubos)
- . chapas (tiras, painéis , chapas planas e curvas)
- . peças maciças

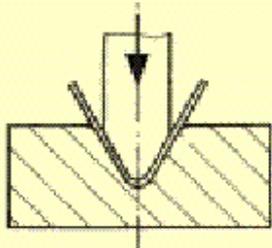
Divisão dos processos de dobramento:

- . dobramento com ferramentas de movimentação linear.
(dobramento livre, dobramento em trefila, dobramento em matriz)
- . dobramento em matriz de movimento rotativo.
(dobradeira oscilante, laminador perfilhador)

**dobramento com ferramenta
de movimentação linear**

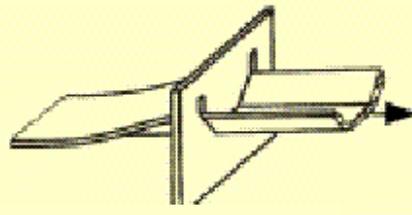


dobramento livre

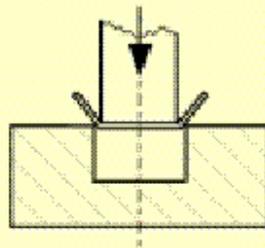


**dobramento com
matriz em V**

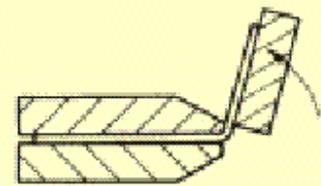
**dobramento com ferramenta
de movimentação rotativo**



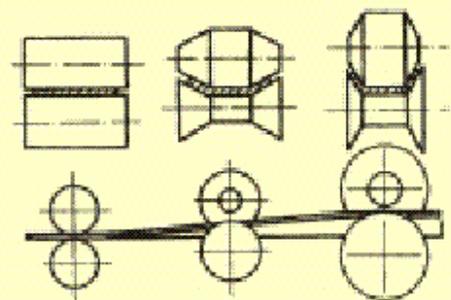
dobramento em trefila



**dobramento com
matriz em U**



dobramento por rotação



Laminação de perfis

Figura 3.3: Revisão dos processos de dobramento

3.4.1 Dobramento livre

Por este processo podem ser produzidos ângulos de dobramento com a profundidade da movimentação do punção, pelo que uma ferramenta pode fabricar diferentes ângulos de dobramento, o que o torna um processo bastante flexível. A desvantagem é que o ângulo de dobramento é bastante impreciso.

3.4.2 Dobramento em matriz

Conforme a forma da ferramenta distingue-se o dobramento em V e o dobramento em U.

3.4.3 Dobramento em trefila

Neste caso uma tira é puxada através de uma trefila. Este processo pode ser contínuo possibilitando a fabricação de perfis.

3.4.4 Dobramento com encosto rotativo

No dobramento por rotação, um extremo da peça dobrada é fortemente fixado enquanto o outro é girado através de um braço articulado girante. A vantagem deste processo é que peças de pequeno comprimento podem também ser dobrada.

3.4.5 laminação de perfis

as chapas metálicas podem ser através da laminação em perfilhadores passar por um processo de dobramento. O processo possibilita a fabricação de quase todas as formas de perfis desejadas. A velocidade de avanço fica entre 8 e 30 m/min e pode processar chapas de aço com espessuras entre 0,5 e 12 mm. A largura inicial fica entre 10 e 600 mm.

3.4.6 Máquinas e ferramentas de dobramento

peças muito pequenas para serem dobradas e com geometrias complicadas podem ser fabricadas com máquinas especiais de dobramento. Neste caso, a passagem uma bobina de chapa metálica é alimentada e processada em um processo de conformação multiestação onde é gerada a geometria desejada. As máquinas automáticas de dobramento possuem diferentes estações de dobramento com dispositivos de corte por cisalhamento, rosqueamento, junção (solda a laser) e facas combinadas.

3.4.7 Teoria elementar do dobramento e etapas do processo de dobramento

Condições da teoria elementar do dobramento:

- . Dobramento apenas através de um momento (dobramento sem forças transversais) . pelo que se estabelece um raio de dobramento unitário sob toda a zona deformada
- . largura infinita da chapa
- . seção transversal plana permanece plana
- . a chapa constitui-se de diversas camadas finas.
- . Diagrama tensão-deformação simétrico, isto é: tensões iguais no campo de tração e no de deformação para um mesmo nível de deformação.
- . fibra neutra (sem tensões) coincide com a linha de simetria
- . a espessura da chapa permanece constante
- . material homogêneo e isotrópico.

Com estas simplificações podem ser calculados as tensões e os momentos do processo de dobramento. Conforme a teoria elementar do dobramento origina-se uma chapa dobrada a chamada fibra neutra na linha de simetria. A linha da fibra neutra durante o dobramento não é deformada e tem tensão nula ao longo da sua trajetória.

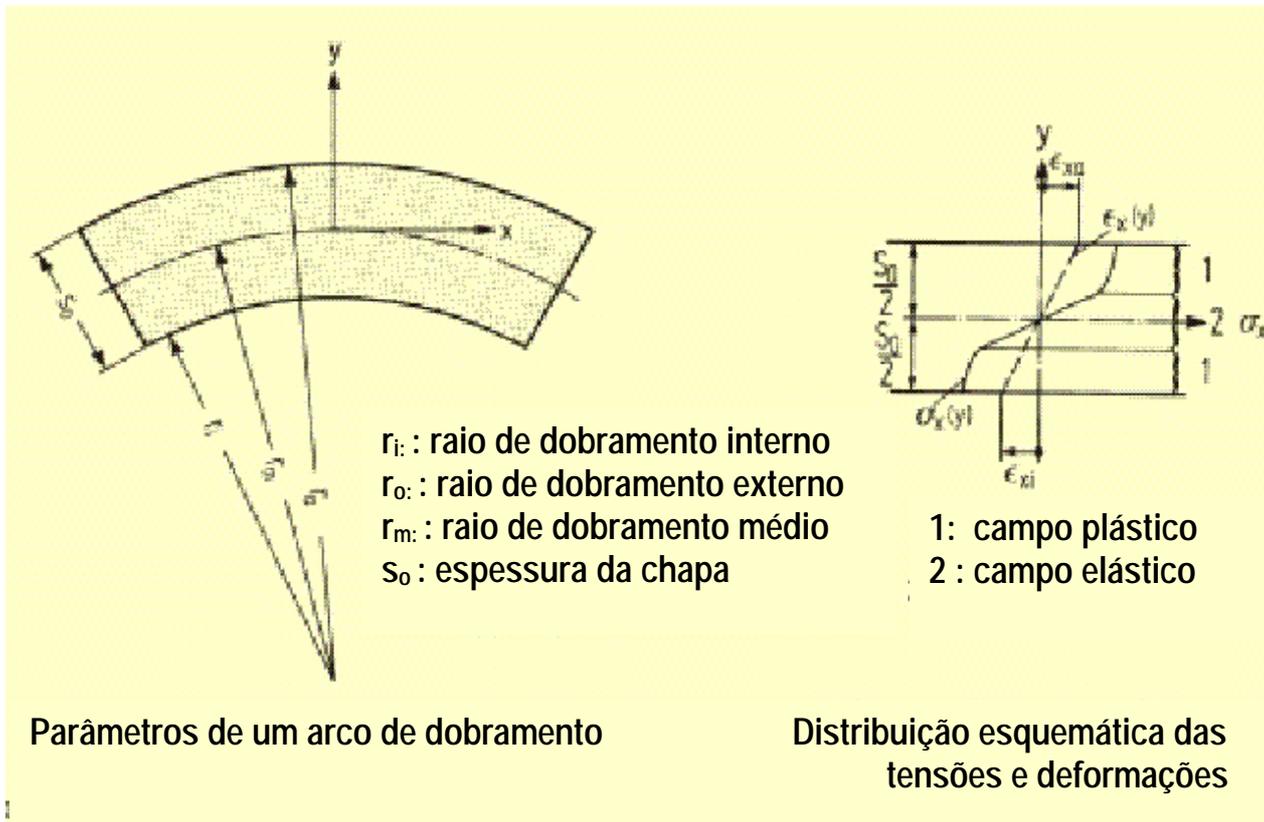
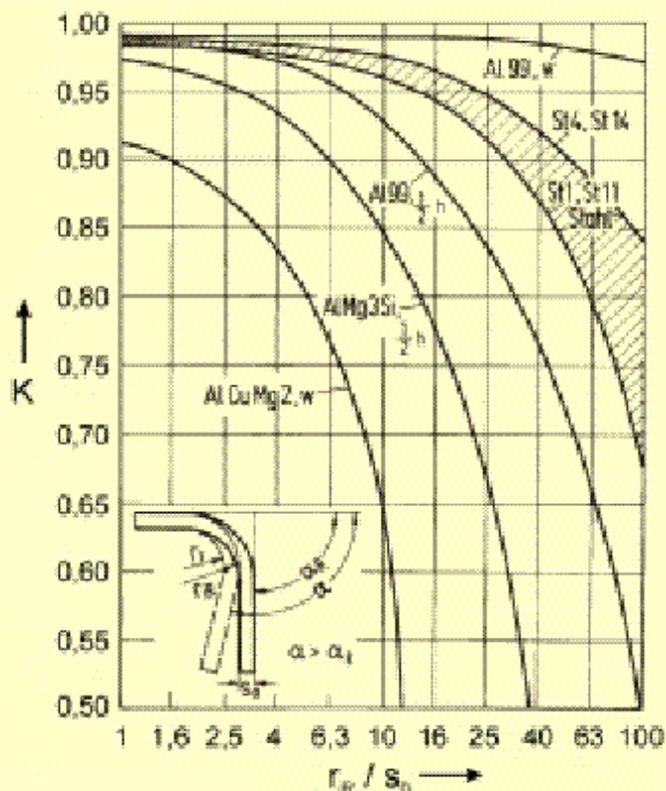


Figura 3.4: Teoria elementar do dobramento



Constante de Retorno Elástico

$$K = \frac{a_r}{a}$$

a_r : ângulo de dobramento após o retorno elástico

a : ângulo de dobramento antes do retorno elástico

Figura 3.5: Retorno elástico

Se o momento de flexão aplicado é liberado ao final do dobramento, ocorre a liberação da deformação elástica residual (efeito mola, retorno elástico).

Fatores de influência:

- . Geometria s_0/r_m
- . propriedades do material

O retorno elástico pode ser compensado através:

- . Dobramento a mais no dobramento livre, isto é: deslocamento maior do punção
- . Prensagem com maior intensidade na dobramento em matriz.

. Divisão dos processos de dobramento

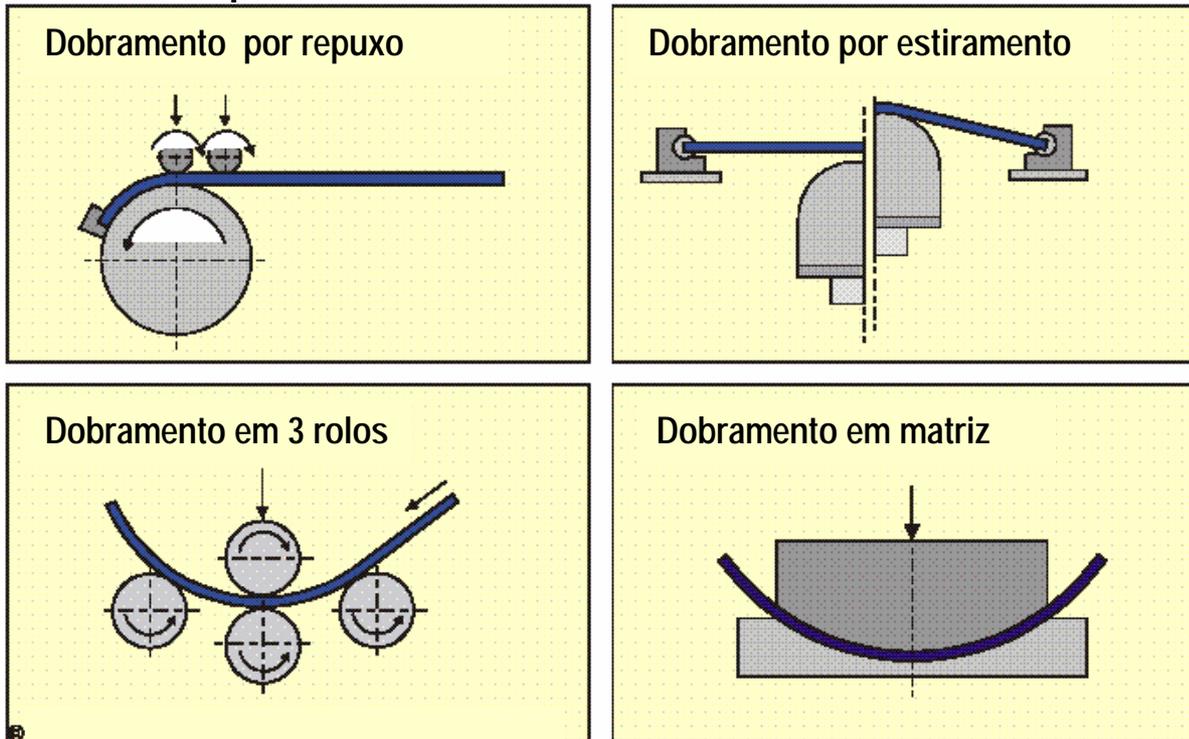


Figura 3.6: Revisão dos processos de dobramento de perfis

3.4.8 Dobramento de perfis

Em alguns setores industriais, os perfilados são raramente utilizados em formas predominantemente retas, por isto na maioria das vezes devem passar por um processo de dobramento após a extrusão.

No dobramento de perfis ocorre problema semelhante ao dobramento de chapas, ex. o retorno elástico

– Geração cinemática da forma perfilada , ex. : dobramento com 3 / 4 rolos.

O contorno da peça é produzido não apenas pela forma da ferramenta mas sim pelo movimento relativo entre os elementos do ferramental de dobramento e a peça. A conformação do dobramento pode ser feita em uma ou mais etapas.

. geração de forma por conformação (dobramento por repuxo, dobramento por estiramento e dobramento em matriz)

Os elementos de forma da matriz contêm o contorno efetivo da peça sob carga, no qual deve estar considerado o efeito de retorno elástico da peça.

Vantagem: alta reprodutibilidade e precisão e pouco tempo de processamento

Desvantagem: freqüente retrabalho múltiplo na ferramenta durante a operação

3.5 Estampagem profunda

Estampagem profunda é definida como conformação por tração e compressão de um recorte de chapa para chegar a um corpo oco (primeira estampagem) ou vários (estampagem múltiplas posteriores) com diâmetros internos menores.

3.5.1 Descrição do processo

A ferramenta compreende um punção de estampagem, um anel da matriz em alguns casos um prensa chapas. A peça é introduzida na matriz através do movimento do punção, surgindo um corpo oco ou copo.

A força de estampagem no fundo deste corpo oco e sobre suas laterais do flange, representam a zona de deformação. Nesta região predominam forças de tração na direção axial. A função do prensa chapas constitui evitar a formação de rugas no flange da peça. As rugas podem surgir devido ao fato do diâmetro do recorte (blank) reduzir continuamente e daí surgirem tensões de compressão tangenciais. Além disto podem surgir trincas na região do fundo do copo da estampagem profunda. O atrito entre a peça e a matriz faz com que seja necessário o emprego de lubrificantes.

3.5.2 Parâmetros

razão de estampagem profunda : $b = d_0 / d_1$

limite de estampagem profunda b_{max} :

→ quando ultrapassado surgem trincas no fundo da peça .

limite de estampagem profunda:

A máxima razão de estampagem b_{max} depende de:

. espessura da chapa s_0

. material

. geometria da ferramenta

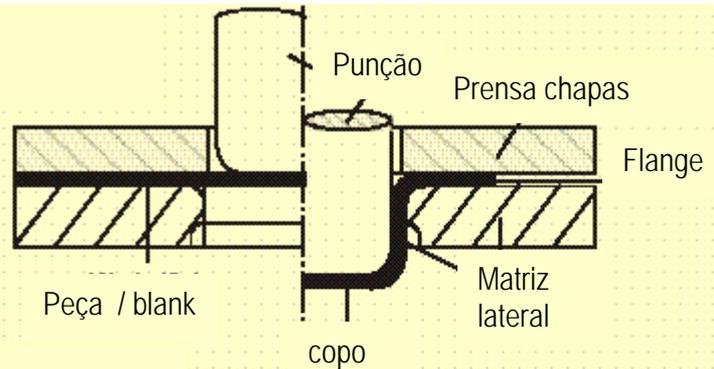
para a primeira estampagem a razão de estampagem fica em torno de 1,7 a 2,2. Se a geometria desejada requer uma proporção maior que b_{max} a serão necessárias etapas múltiplas de trabalho.

Razão total de estampagem profunda : $\beta_{total} = \beta_1 \cdot \beta_2 \cdot \dots \cdot \beta_n$; $\beta_{total} < 6,5$

Para razões de estampagem ainda maiores a peça deve passar por recozimentos intermediários, após o que passa a se considerar o processo com o limite de estampagem inicial.

É importante além disto que além da razão d_0/s , determinará a necessidade ou não de um prensa chapas. Numa primeira estimativa grosseira é normal se empregar um prensa chapas para uma razão entre $d_0/s > 25 \dots 30$.

Estampagem inicial



Estampagens posteriores

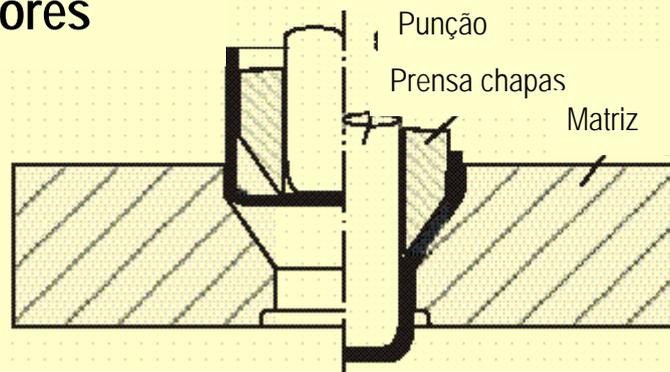


Figura 3.7: Estampagem profunda: primeira operação de estampagem e posteriores

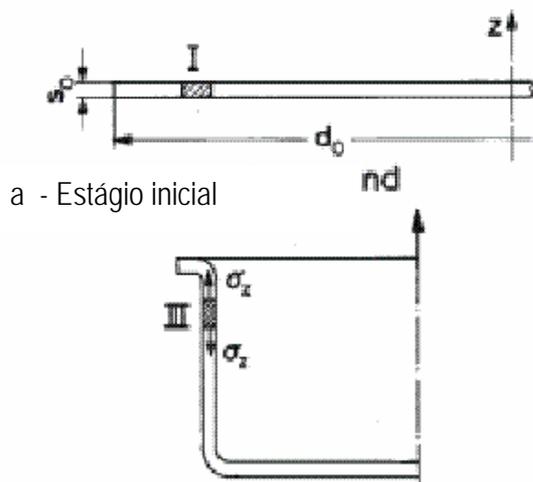


Formação de dobras



Trincas no fundo da peça estampada

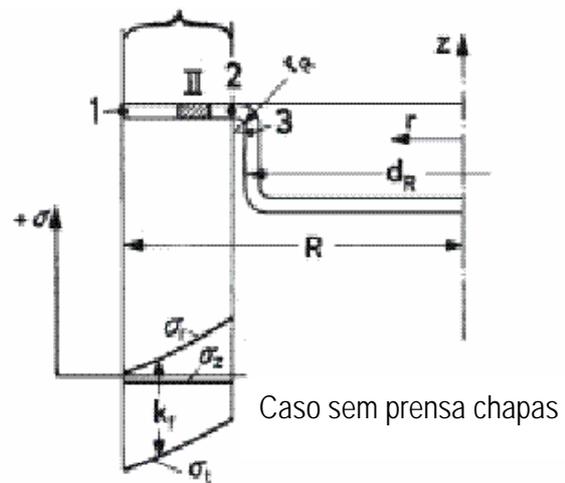
Figura 3.9: Tipos de falha na estampagem profunda



a - Estágio inicial

c - Estágio quase final da estampagem

Zona de conformação



b - Estágio intermediário

Figura 3.10: Estampagem profunda

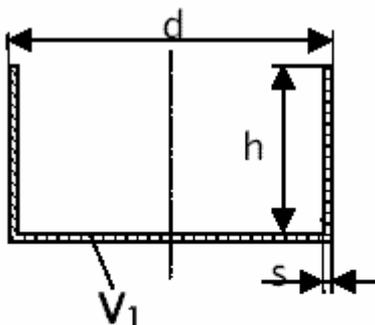
3.5.3 Avaliação do recorte (blank)

Uma avaliação precisa do recorte do blank das chapas é muito importante, no sentido de minimizar a razão de estampagem mas também para evitar as trincas no fundo da peça estampada

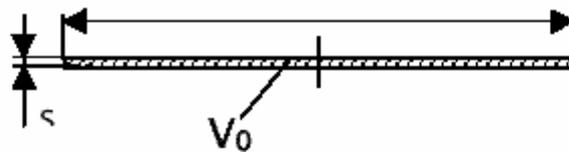
Exemplo:

Cálculo do diâmetro de recorte (blank) para peça com geometria fornecida.

Geometria desejada



blank (recorte) procurado



$$V_1 = V_0$$

$$d_0 = \sqrt{d^2 + 4d \cdot h - 4s \cdot h}$$

3.5.4 estampagem por estiramento

A estampagem / embutimento é um processo de conformação por tração, no qual ocorre a formação de uma região de aprofundamento em uma peça plana. O processo mais importante deste grupo é o estiramento

Estiramento

Podem ser identificadas duas variantes :

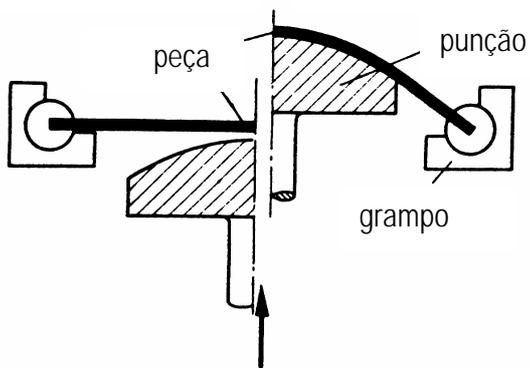
No estiramento simples a chapa fixada em um apoio girante. Um punção tencionado sobre a chapa. O punção opera contra a chapa. O uso de ferramental adicional possibilita a fabricação de formas mais complexas.

No estiramento tangencial a peça é solicitada até o seu limite de escoamento e só então colocada tangencialmente sobre a ferramenta de estiramento

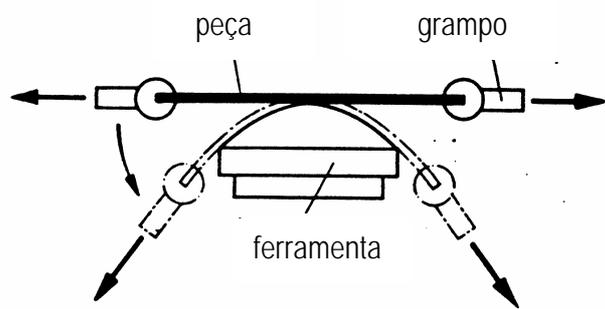
O estiramento ocorre já no início do processo, de modo a atingir uma deformação uniforme no material como um todo.

As vantagens do estiramento são a simplicidade e o custo baixo bem como o reduzido efeito de retorno elástico devido às altas tensões de tração.

Forma inicial da peça Forma final da peça



Estiramento simples



Estiramento tangencial

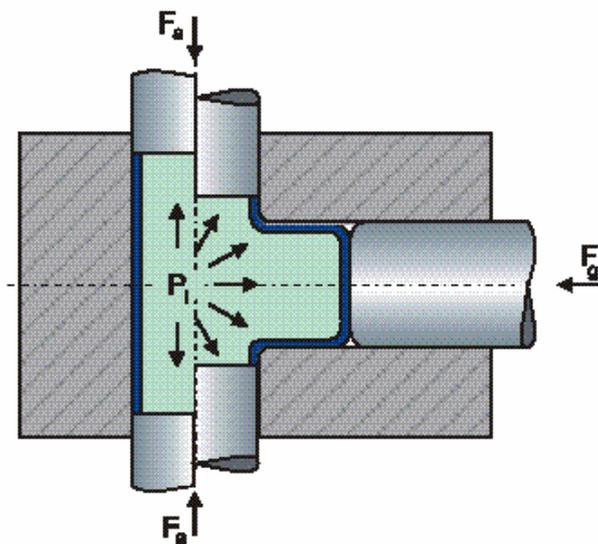
Figura 3.11: Estiramento

3.6 Conformação hidrostática

O processo de conformação hidrostática se aplica na fabricação de componentes da indústria mecânica. Tem uma cadeia de processo mais curta que seus processos concorrentes, possibilitando um menor número de ferramentas

Deste modo podem ser produzidos por exemplo:

- . elementos de ramificações tubulares
- . eixos de transmissão automotivos
- . tanques de combustível
- . peças do motor e câmbio



- Integração de peças
- Redução de peso
- Alta precisão
- Elevada rigidez



Figura 3.12: Conformação hidrostática por pressurização interna de peças tubulares.

3.7 Tendências atuais

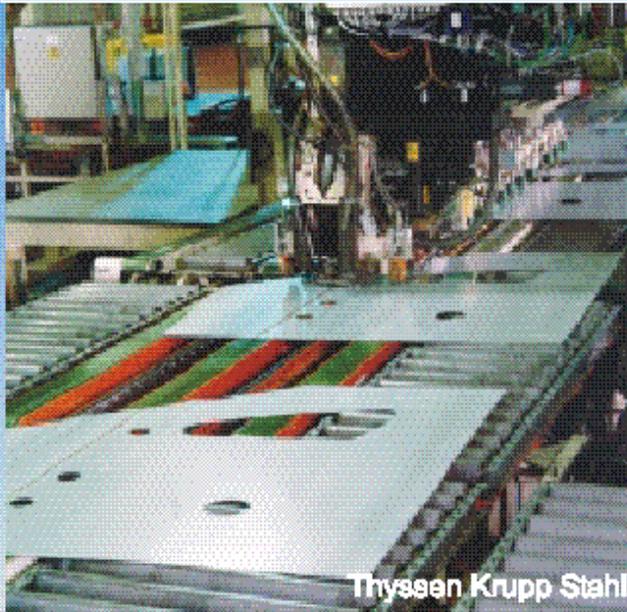
3.7.1 Tailored Blanks, recortes de chapas soldados sob medida

Característico deste caso é que o tailored blank (blank soldado) possui sempre pelo menos dois tipos diferentes de chapas sendo combinadas e soldadas em único recorte. P.Ex.: diferentes espessuras, diferentes revestimentos, acabamentos superficiais ou tipos de aços.

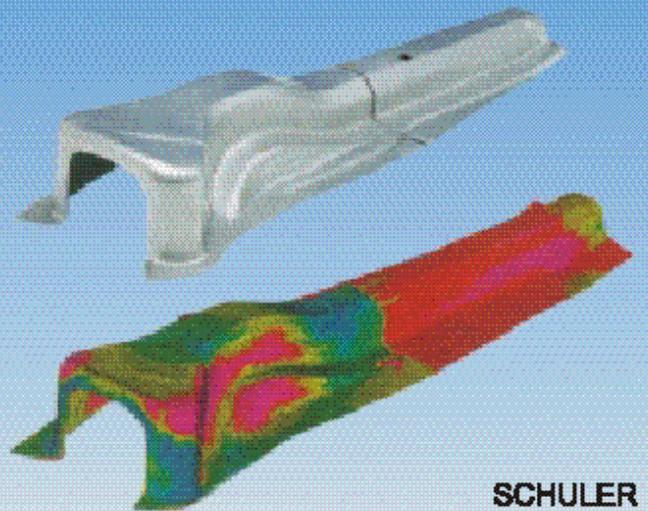
- Os blanks soldados (tailored Blanks) vem tendo uma aplicação crescente na indústria automobilística, tendo sua aplicação as seguintes vantagens:

- . aumento da segurança veicular através de insertos de material com tipo, espessura e resistência mais adequados.
- . redução do peso através de peças otimizadas.
- . redução do número de peças e com isto redução dos custos de fabricação.
- . Otimização das tolerâncias das peças.

- União de chapas diferentes mediante solda a laser
- otimização local das propriedades das chapas conformadas
- otimização do aproveitamento das chapas



Instalações para a soldagem a laser



túnel longitudinal de automóvel

Figura 3.13: Tailored Blanks

3.7.2 Sanduíches com espuma de alumínio (AFS - Aluminium Foam Sandwich)

O semi acabado em forma de sanduíches o revestimento de chapa alumínio com um material poroso formado de alumínio. A conformação é feita através de processos convencionais de conformação. Exemplo: estampagem profunda.

Através da introdução de energia térmica e de um meio auxiliar é fabricada a espuma metálica de alumínio.

Vantagens:

- alta rigidez
- peso reduzido
- bom amortecimento térmico e sonoro
- boa conformabilidade

3.8 Perguntas para estudo dirigido

- . O que você entende por anisotropia?
- . Porque deseja-se um valor elevado de r e de n para a estampagem de uma chapa?
- . Cite pelo menos três simplificações que podem ser encontradas na teoria elementar de dobramento.
 - . O que entende por orelhamento? Qual a sua origem ?
- . Por que é importante diferenciar as ligas de alumínio em endurecíveis e não endurecíveis para sua conformação plástica?
 - . O que se entende por “Tailored Blank” ?