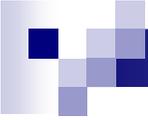


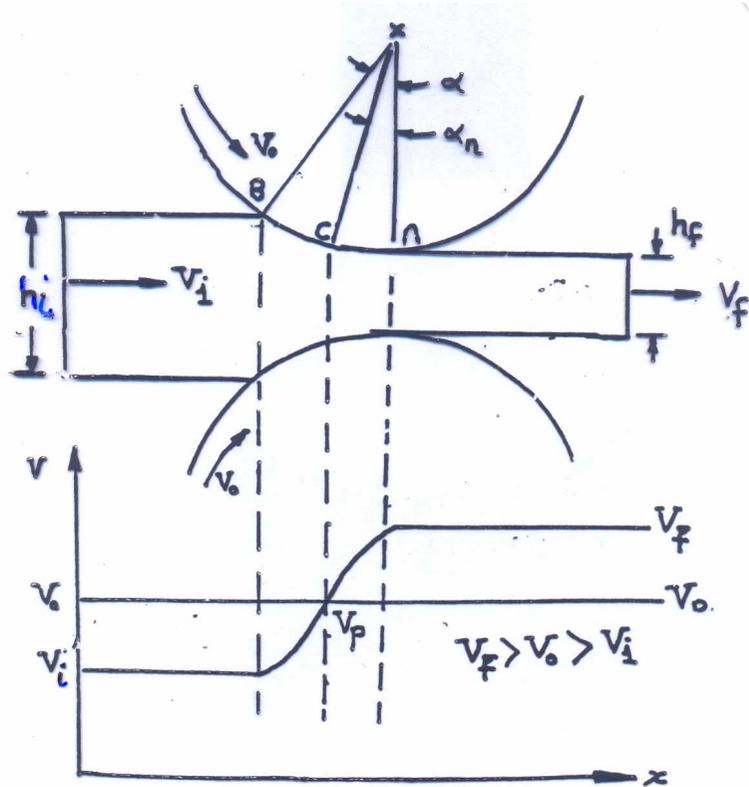
Processo de Laminação



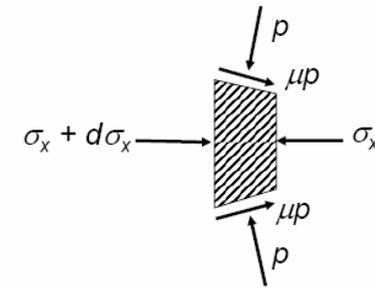
LAMINAÇÃO

- Processo no qual modifica-se a geometria/dimensões de um corpo metálico pela passagem entre dois cilindros laminadores.
- O metal sai com uma velocidade maior que a de entrada.
- Os cristais são alongados na direção da laminação.
- Na laminação a quente os cristais começam a se reconstituir após deixar a zona de tensão, mas na laminação a frio eles mantêm a forma alongada, obtida pela ação dos cilindros.
- O metal é submetido a altas tensões compressivas, e a tensões cisalhantes superficiais, resultantes do fricção entre os cilindros e o metal.
- As forças de fricção são também responsável pelo ato de puxar o metal.

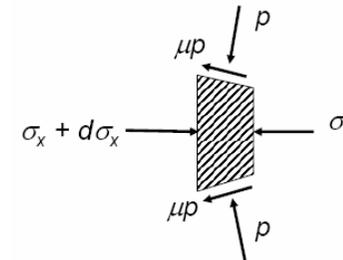
Velocidade do metal durante o processo



Stresses on Slab in Entry Zone

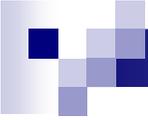


Stresses on Slab in Exit Zone



-O **Ponto Neutro C** é o ponto de contato onde as superfícies do material e do cilindro movem-se com a mesma velocidade.

-Devido a essas características de velocidades as forças de atrito convergem para o ponto C, tanto na região BC quanto AC.



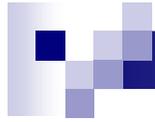
Laminação

Processo pode ser realizado:

- contínuo ou em etapas
- com uma ou mais ferramentas rotativas (cilindros de laminação)
- com ou sem ferramentas adicionais (p.ex.: mandris, calços ou hastes)

Permitindo:

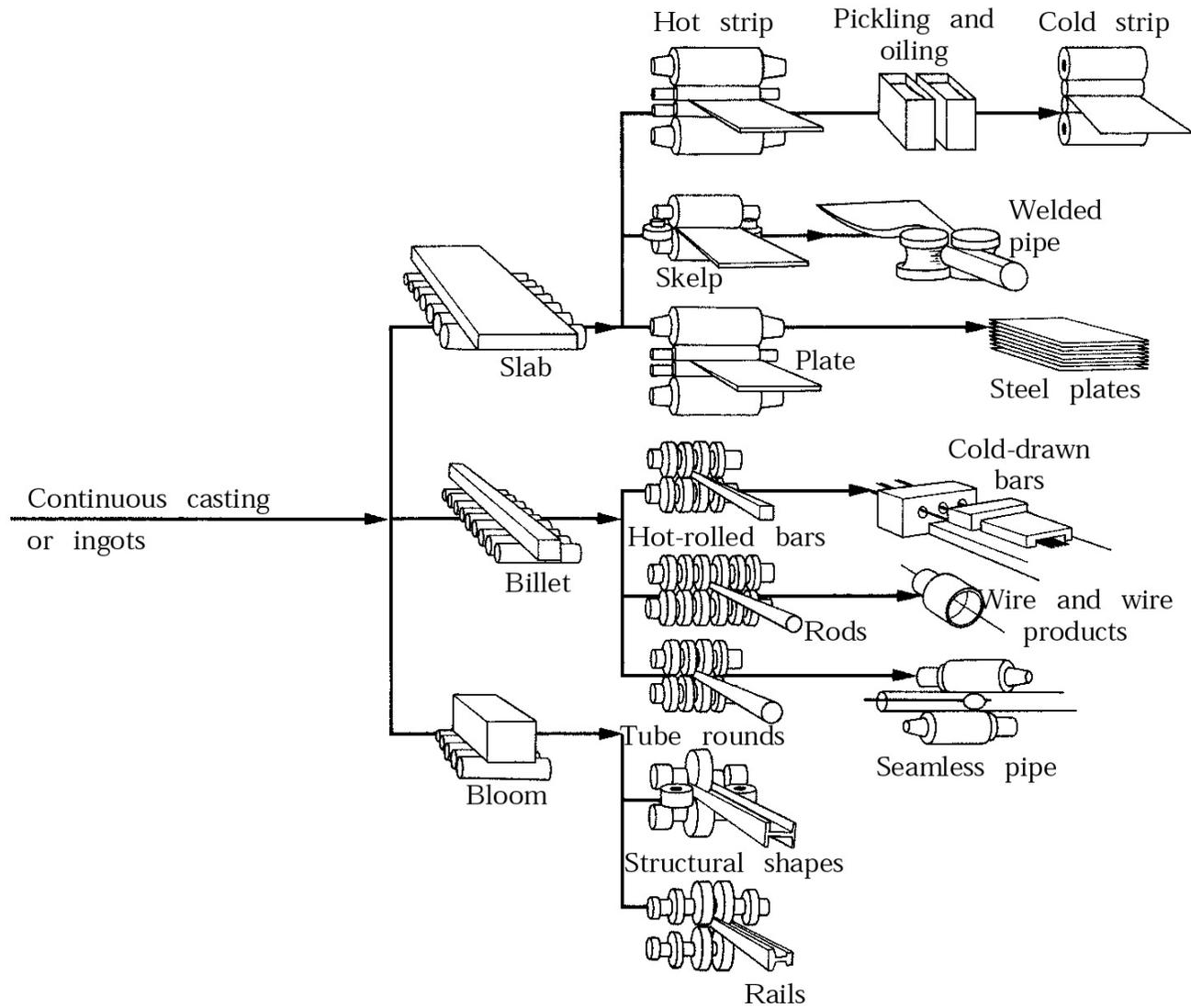
- alcançar as dimensões dos produtos semi-acabados ou da peça pronta.
- caldeamento de rechupes e poros provenientes do processo de lingotamento
- conformação da estrutura de solidificação do lingote.
- melhora das propriedades mecânicas.



Após fundição, os lingotes são laminados em três formas intermediárias chamadas blocos, tarugos, e placas

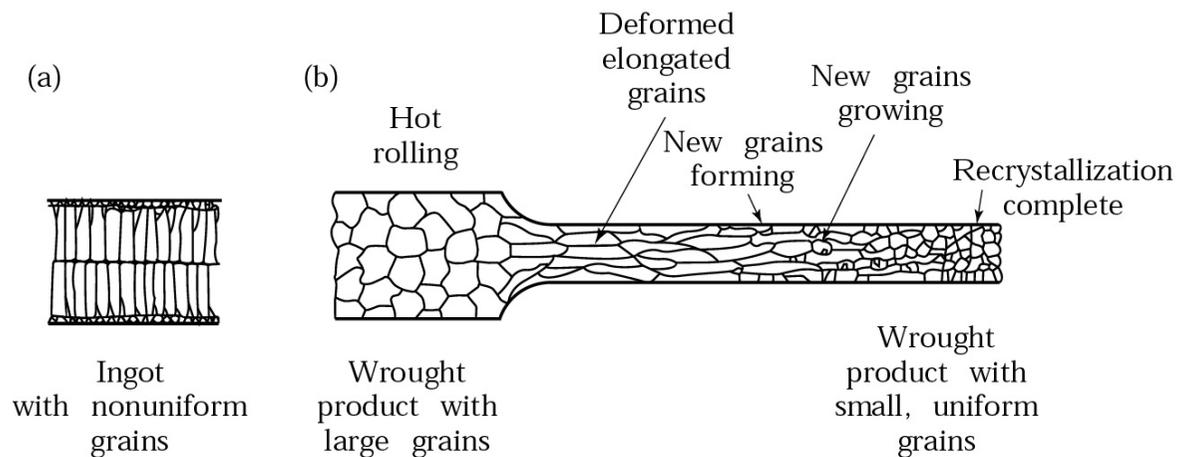
- Blocos (*Blooms*) tem seção transversal 6" x 6" ou mais larga. Geralmente, eles são laminados para obter perfis estruturais.
- Tarugos (*Billets*) tem seção retangular 1.5" x 1.5" ou mais larga. Eles são laminados para obter hastes, barras, vergalhões, etc.
- Placas (*Slabs*) tem seção transversal retangular 10" x 1.5" ou mais larga. Eles são laminados para obter placas grossas, chapas, chapas finas, tiras, fitas.

Fabricação de produtos Planos e Não-Planos



LAMINAÇÃO A QUENTE:

- Utilizada para materiais que tenham baixa plasticidade a frio.
- Serve como etapa de preparação para laminação final, a frio.
- Permite grandes reduções de espessura.
- Forças de laminação menores que as da laminação a frio
- Produz acabamento superficial pobre.
- Resulta em tolerâncias dimensionais largas.



Laminação

LINGOTAMENTO CONTÍNUO PARA PRODUÇÃO DE CHAPAS POR
LAMINAÇÃO A QUENTE



Laminação

PRODUTOS OBTIDOS POR LAMINAÇÃO A QUENTE





LAMINAÇÃO A FRIO:

- Requer material com boa plasticidade a frio.
- É precedida por laminação a quente.
- As reduções de espessura são limitadas pelo encruamento.
- As forças de laminação são bem maiores que as da laminação a quente.
- Produz acabamento superficial bom ou ótimo.
- Resulta em tolerâncias dimensionais mais estreitas que a laminação a quente.

Laminação

LAMINAÇÃO A FRIO DE CHAPAS



Laminação

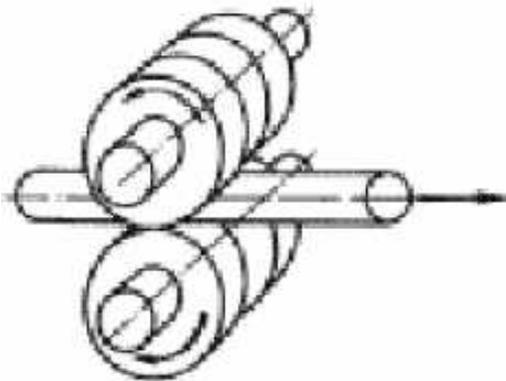
PRODUTOS OBTIDOS POR LAMINAÇÃO A FRIO



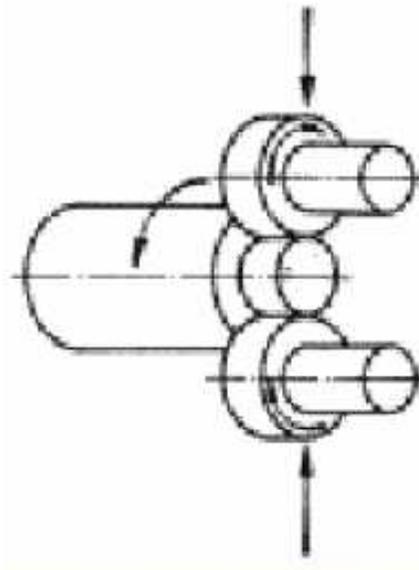
Laminação

CLASSIFICAÇÃO CONFORME A CINEMÁTICA

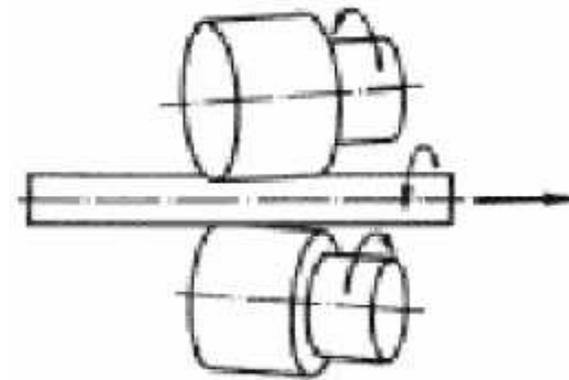
LONGITUDINAL



TRANSVERSAL

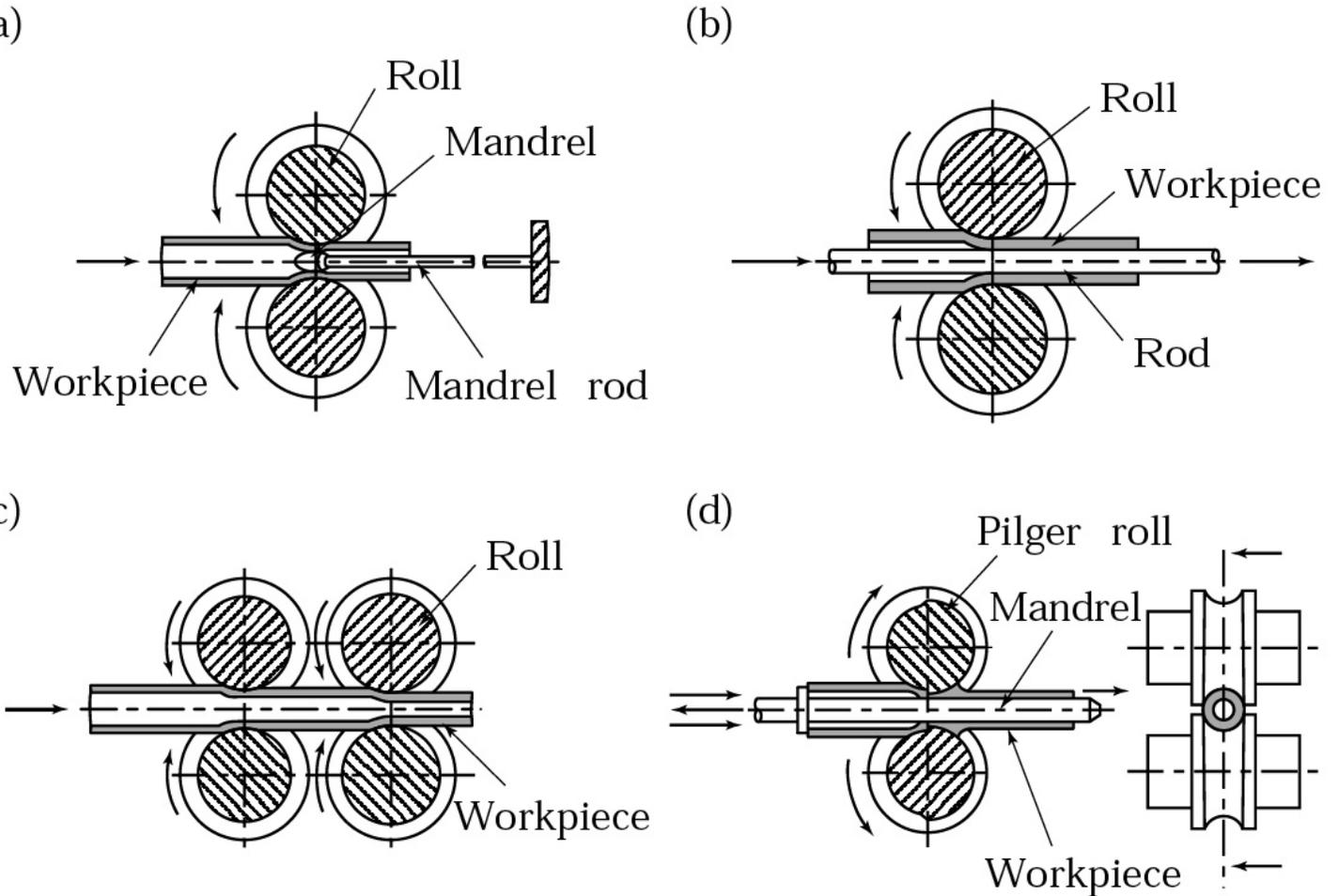


OBLIQUO



Laminação de Tubos

Schematic illustration of various tube-rolling processes: (a) with fixed mandrel; (b) with moving mandrel; (c) without mandrel; and (d) pilger rolling over a mandrel and a pair of shaped rolls. Tube diameters and thicknesses can also be changed by other processes, such as drawing, extrusion, and spinning.



Tubo Sem Costura Laminado

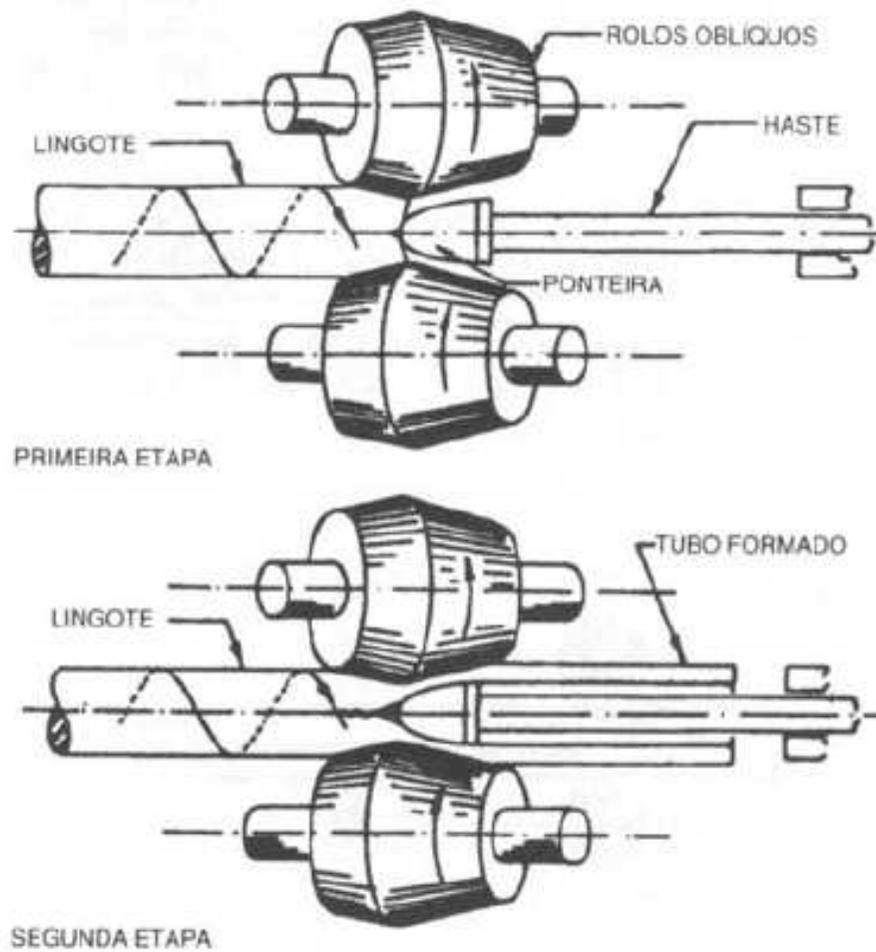


Fig. 2.1 Fabricação de tubos por laminação — Laminador oblíquo “Mannesmann”. (Cortesia da Cia. Siderúrgica Mannesmann.)

Processo de Laminação de Roscas

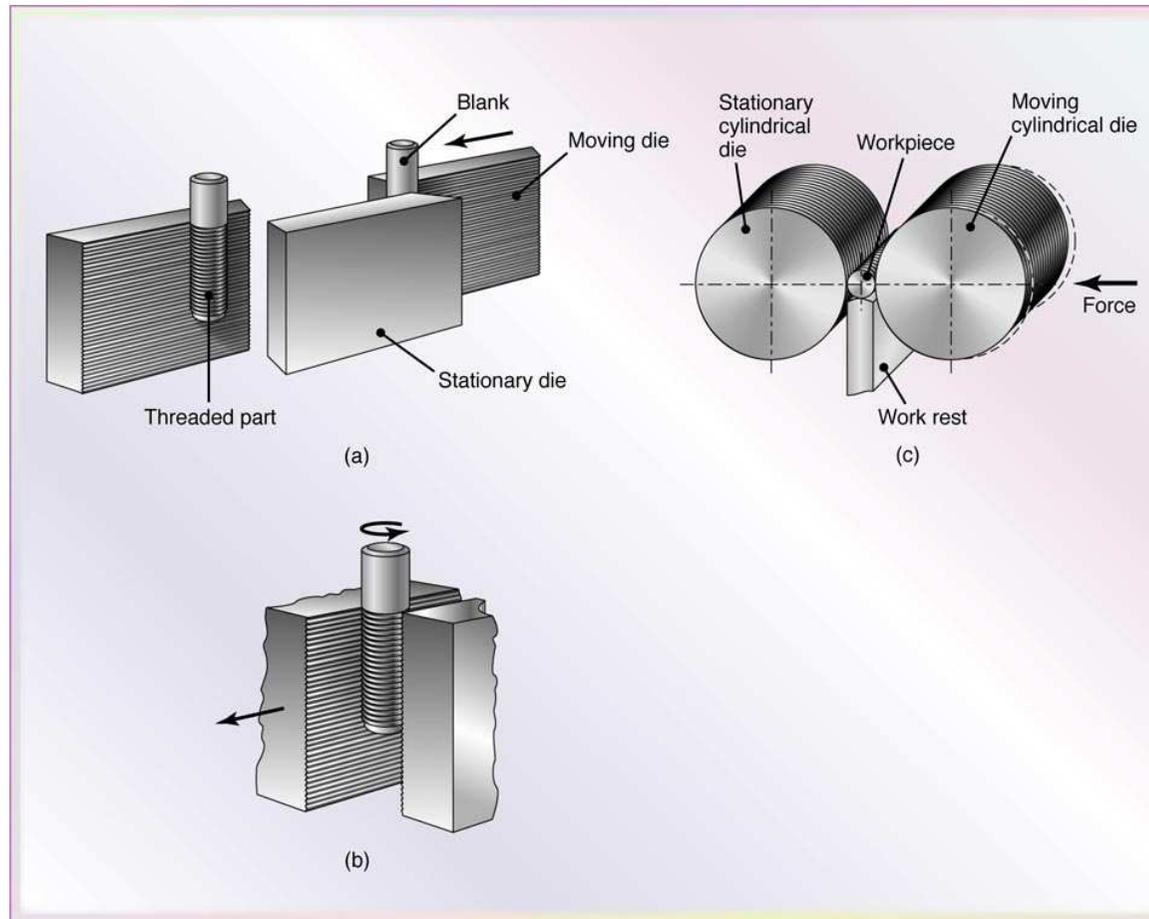
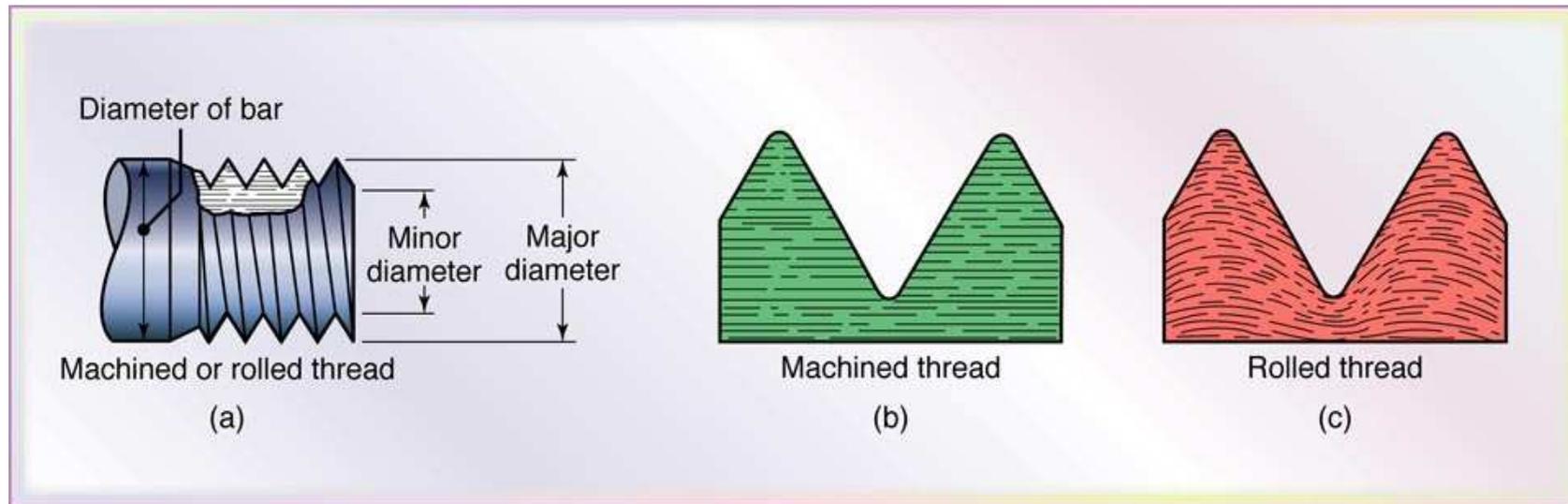


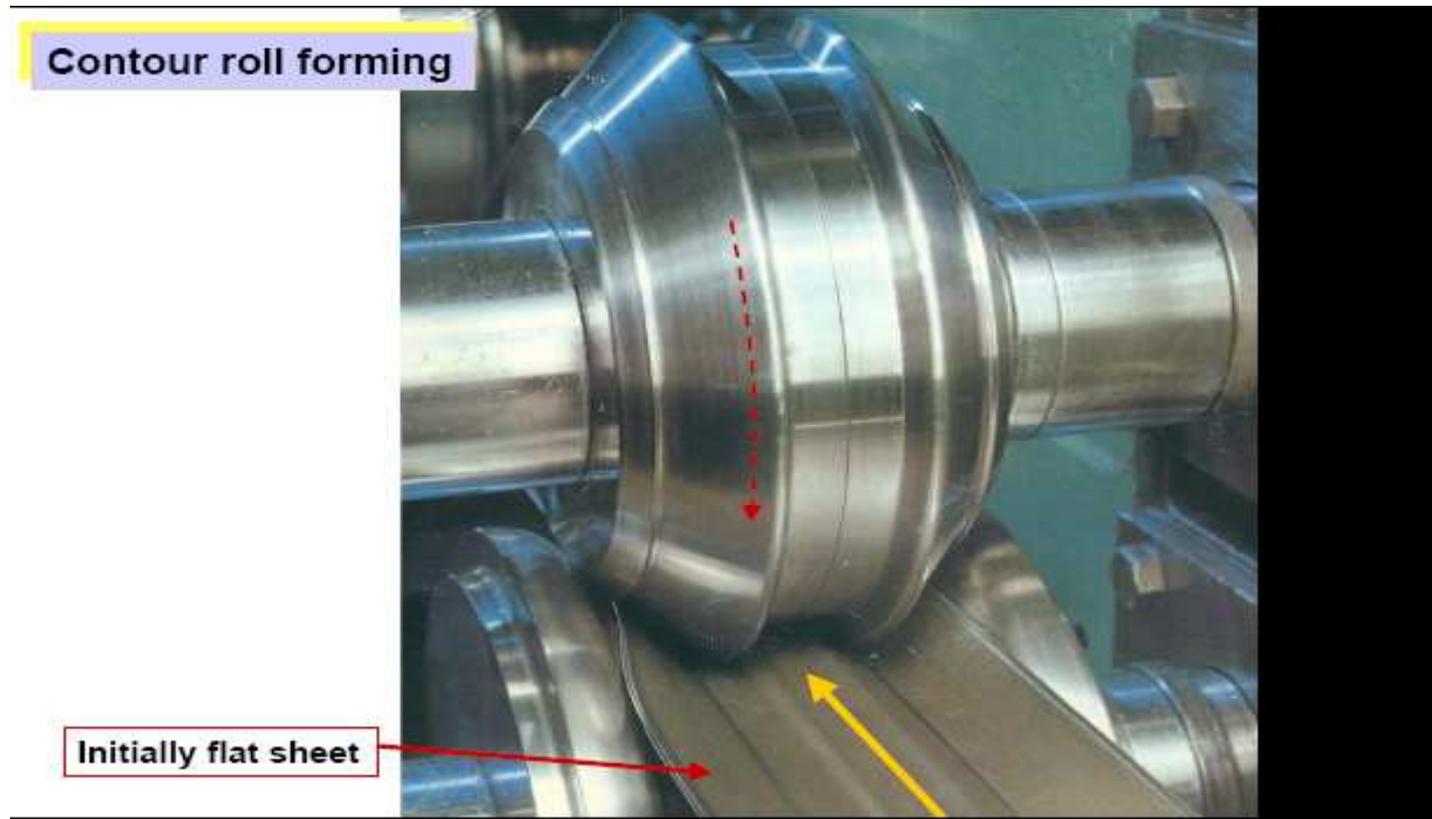
Figure 13.16 Thread-rolling processes: (a) and (c) reciprocating flat dies; (b) two-roller dies. (d) Threaded fasteners, such as bolts, are made economically by these processes at high rates of production.

Roscas usinadas e laminadas



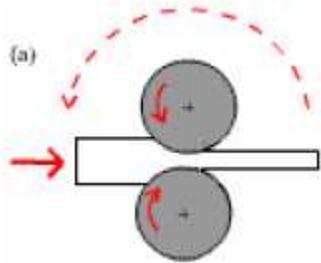
(a) Features of a machined or rolled thread. Grain flow in (b) machined and (c) rolled threads. Unlike machining, which cuts through the grains of the metal, the rolling of threads imparts improved strength because of cold working and favorable grain flow.

Laminação de perfil

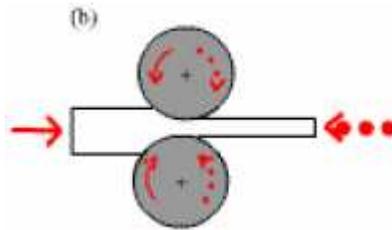


Laminação

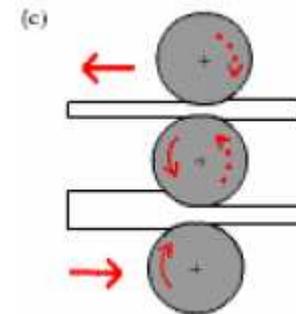
TIPOS DE LAMINADOR PARA LAMINAÇÃO CONVENCIONAL



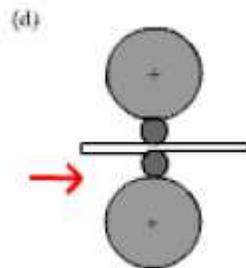
DUO



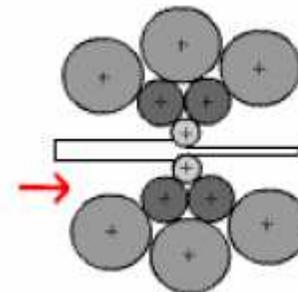
DUO REVERSÍVEL



TRIO

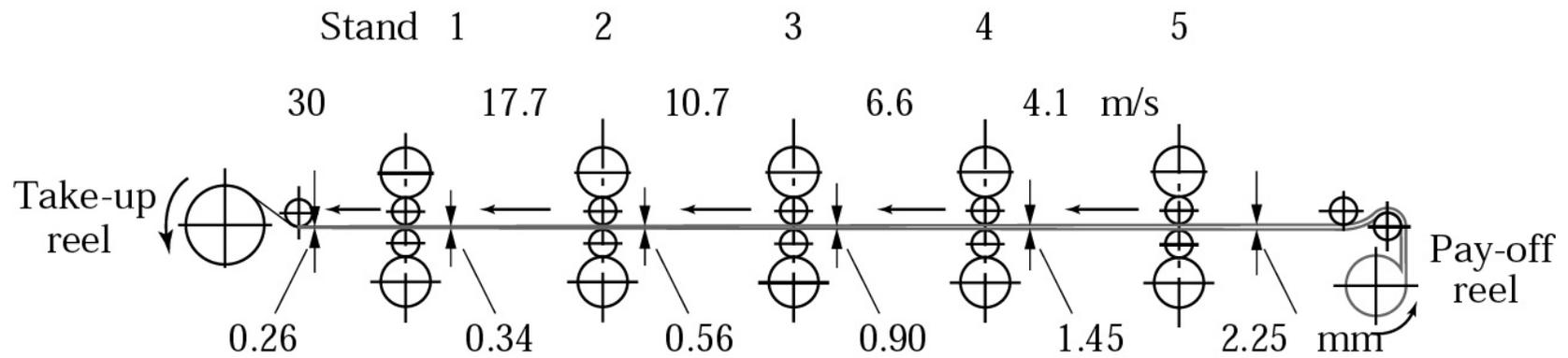


QUADRO

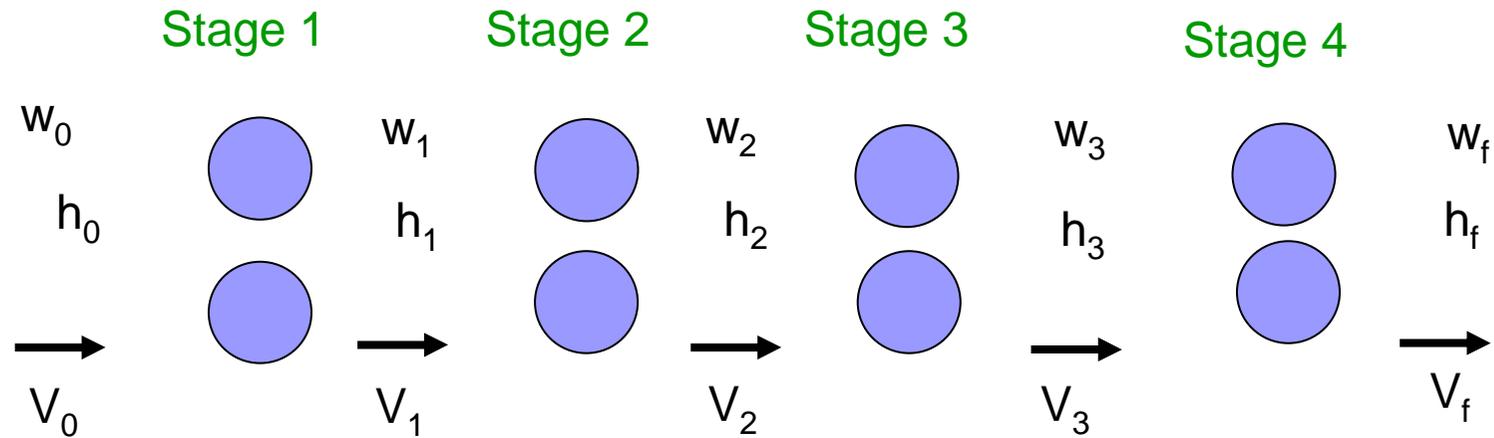


SENDZIMIR

Laminação Tandem



Laminação Tandem



Volume conservado

$$h_0 V_0 w_0 = h_1 V_1 w_1 = h_2 V_2 w_2 = h_3 V_3 w_3 = h_f V_f w_f$$

Esquema de Laminação

Passes
iguais

$$h_0 - h_1 = h_1 - h_2 = h_2 - h_3 = h_3 - h_f$$

Deformações
iguais

$$\ln \frac{h_0}{h_1} = \ln \frac{h_1}{h_2} = \ln \frac{h_2}{h_3} = \ln \frac{h_3}{h_f}$$

Relações geométricas na laminação

Comprimento do arco de contato

$$L = \sqrt{R^2 - \left(R - \frac{\Delta h}{2}\right)^2}$$

$$L = \sqrt{R\Delta h - \frac{\Delta h^2}{4}} \quad R\Delta h \gg \frac{\Delta h^2}{4}$$

log o

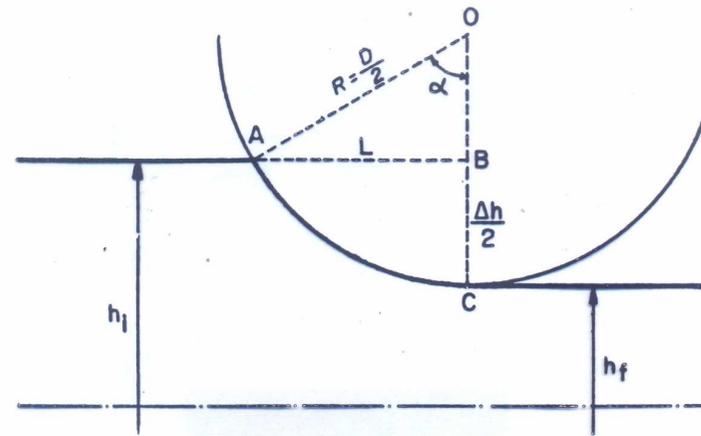
$$L = \sqrt{R\Delta h}$$

Ângulo de contato

$$\text{sen } \alpha = \frac{L}{R} = \frac{\sqrt{R\Delta h}}{R} = \sqrt{\frac{\Delta h}{R}}$$

Para ângulos pequenos $\text{sen } \alpha = \alpha$

$$\alpha = \sqrt{\frac{\Delta h}{R}}$$



Condição de Laminação

$F_x > 0$ \longrightarrow O material entra nos cilindros
(arrastamento da chapa)

$$T \cos \alpha - N \sin \alpha \geq 0$$

Admitindo o atrito Coulombiano

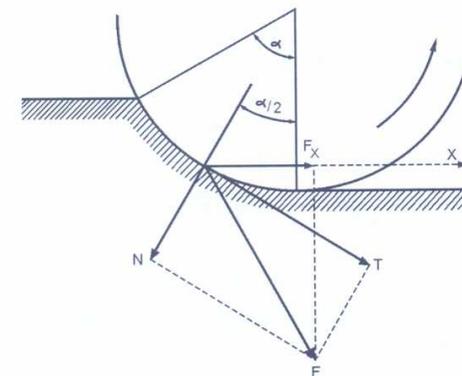
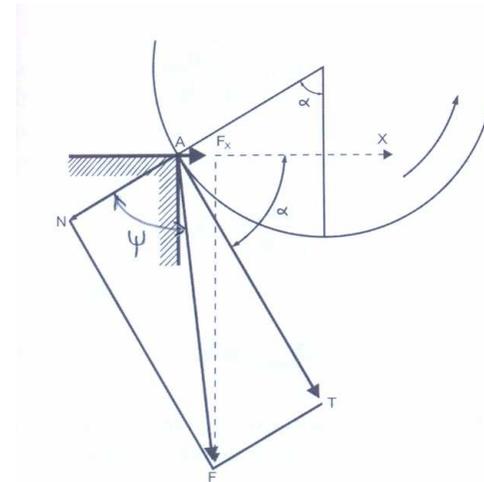
$$T = \mu N$$

μ = coeficiente de atrito

$$N(\mu \cos \alpha - \sin \alpha) \geq 0$$

$$\mu \cos \alpha - \sin \alpha \geq 0$$

$\mu \geq \tan \alpha$ \longrightarrow Condição de Laminação



$$\operatorname{tg} \psi = \frac{T}{N} = \mu$$

$$\operatorname{tg} \psi \geq \operatorname{tg} \alpha$$

$$\psi \geq \alpha$$

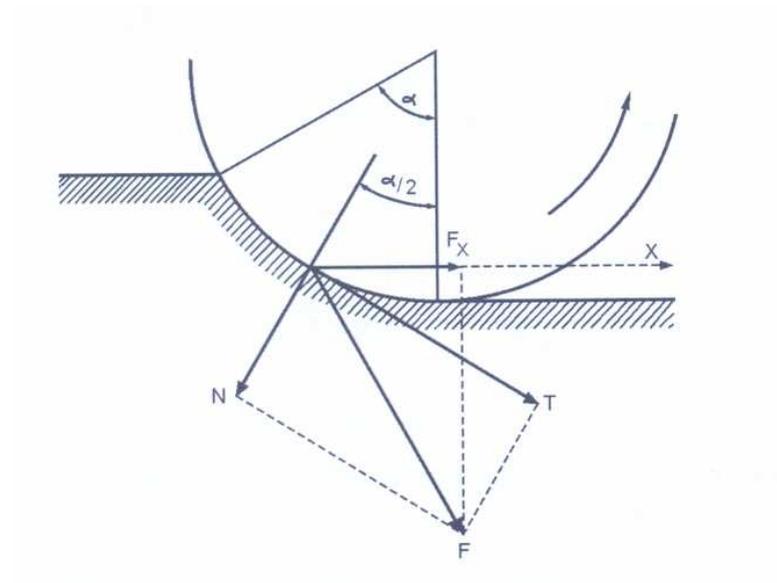
Cálculo da redução máxima possível

Caso limite quando $\psi = \alpha$

$$\operatorname{sen} \alpha \approx \operatorname{tg} \alpha = \sqrt{\frac{\Delta h_{\max}}{R}}$$

$$\mu = \sqrt{\frac{\Delta h_{\max}}{R}}$$

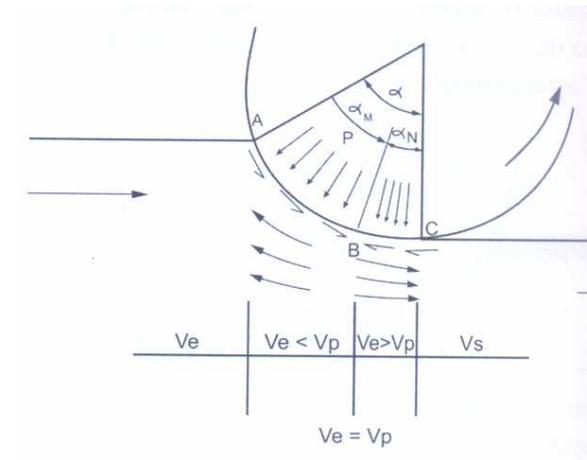
$$\Delta h_{\max} = \mu^2 R$$



Angulo neutro (α_N)

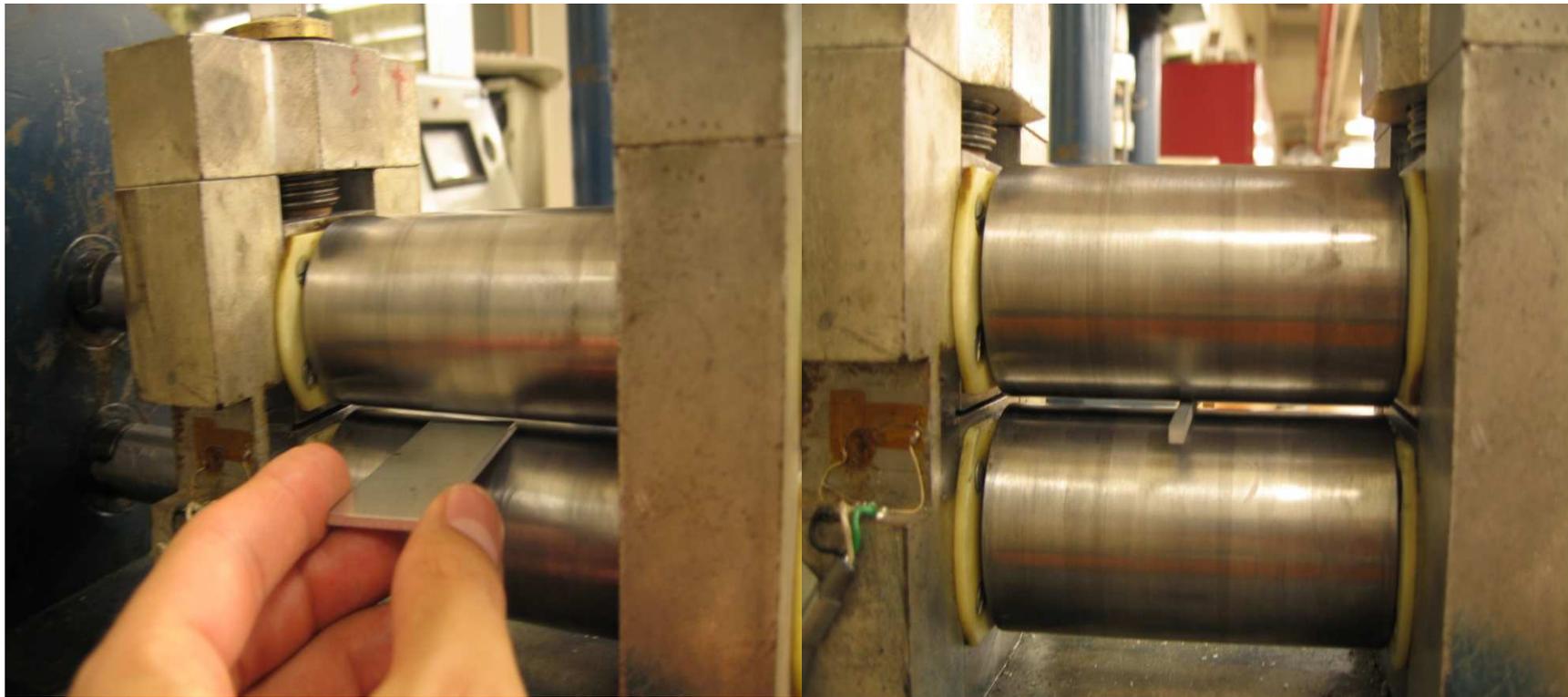
As forças de atrito são convergentes para o ponto neutro

$$\alpha_N = \frac{\alpha}{2} - \frac{1}{\mu} \left(\frac{\alpha}{2} \right)^2$$



Figuras

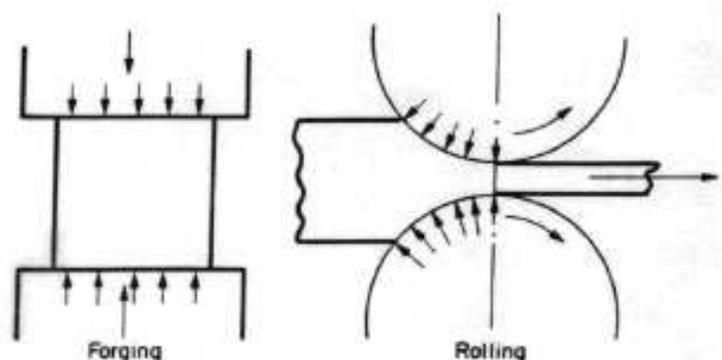
Figuras mostrando o processo de laminação de chapa:



Prevalecendo deformação plana

Possível expansão lateral

Similaridade de Laminação com Forjamento



$$\bar{p} = \frac{2}{\sqrt{3}} \sigma_e \left(1 + \frac{\mu b}{2h} \right)$$



Forjamento

$$\bar{p} = \frac{2}{\sqrt{3}} Y \left(1 + \frac{\mu L}{2h} \right)$$



Laminação

$$h = \frac{h_0 + h_f}{2}$$

$$Y = \frac{Y_i + Y_f}{2}$$

Presença de Tração avante e/ou a ré no plano da chapa

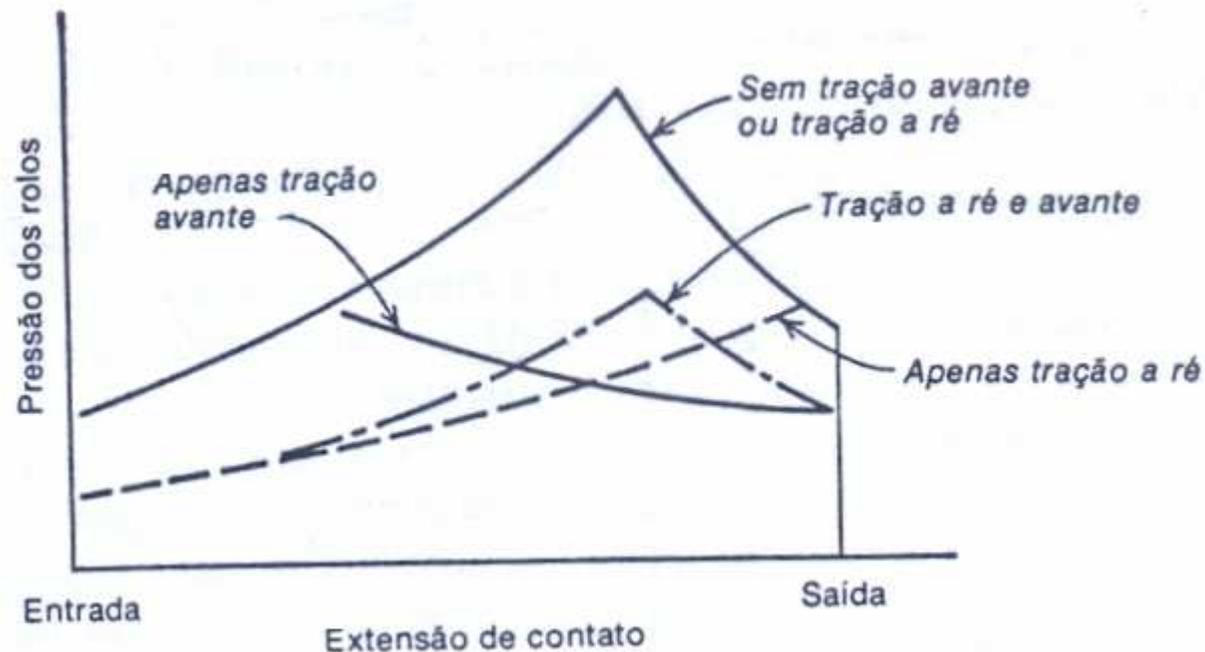
$$\sigma_1 - \sigma_3 = \frac{2}{\sqrt{3}} \sigma_e$$

$$p - (-\sigma_h) = \frac{2}{\sqrt{3}} \sigma_e$$

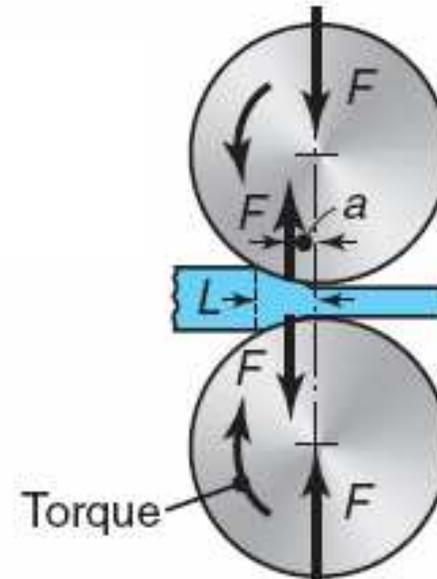
$$p = \frac{2}{\sqrt{3}} \sigma_e - \sigma_h$$

$$\bar{p} = \left(1 + \frac{\mu L}{2h}\right) \left[\frac{2}{\sqrt{3}} Y - \frac{\sigma_{ft} + \sigma_{bt}}{2} \right]$$

σ_h = Tensão horizontal



Cálculo da Força de Laminação (F)



$$F = \bar{S} \cdot A_{\text{Contato}}$$

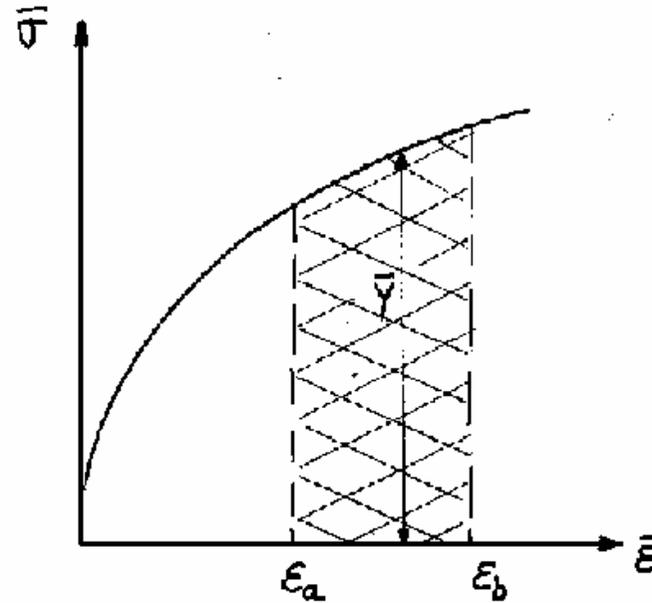
\bar{S} = Tensão de escoamento média no estado plano de deformação

$$\bar{S} = \frac{2}{\sqrt{3}} \bar{Y}$$

$$F = 1,2 \bar{S} W \sqrt{R \Delta h}$$

1,2 é para compensar perdas por atrito

Tensão de Escoamento Média



$$\bar{Y} = \frac{1}{(\epsilon_b - \epsilon_a)} \int_{\epsilon_a}^{\epsilon_b} \bar{\sigma} d\bar{\epsilon}$$

$$\epsilon_a = 0 \Rightarrow \bar{Y} = \frac{1}{\epsilon_b} \int_0^{\epsilon_b} \bar{\sigma} d\bar{\epsilon}$$

Torque

$$T_{(Motor)} = 2.F.a$$

$$T_{(Motor)} = F.L$$

Potência do motor para o laminador

$$N = \frac{2\pi FLn}{33000} \quad [\text{HP}]$$

$$L \rightarrow ft$$

$$n \rightarrow rpm$$

$$F \rightarrow lbf$$

$$N = \frac{FLn}{716,2} \quad [\text{CV}]$$

$$L \rightarrow m$$

$$n \rightarrow rpm$$

$$F \rightarrow kgf$$

$$N = \frac{2\pi FLn}{60000} \quad [\text{KW}]$$

$$L \rightarrow m$$

$$n \rightarrow rpm$$

$$F \rightarrow N$$

Flexão do Cilindro

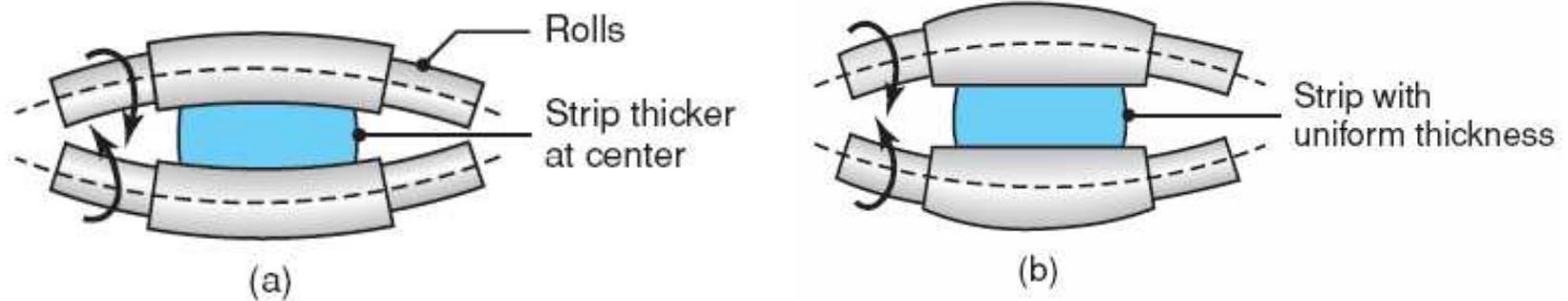
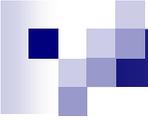
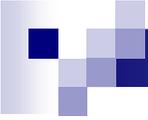


Figure 13.4 (a) Bending of straight cylindrical rolls, caused by the roll force. (b) Bending of rolls ground with camber, producing a strip with uniform thickness.



Reduzindo a Força de Laminação

- Forças de laminação podem causar deflecção e achatamento nos rolos.
- As colunas de apoio dos rolos podem defletir sob altas forças de laminação.
- Forças de laminação podem ser reduzidas por:
 1. Reduzindo o atrito na interface rolo-peça.
 2. Usando rolos de diâmetro menor.
 3. Reduzindo a área de contato.
 4. Laminação a altas temperaturas.
 5. Aplicando tensões a frente e/ou a ré na chapa.

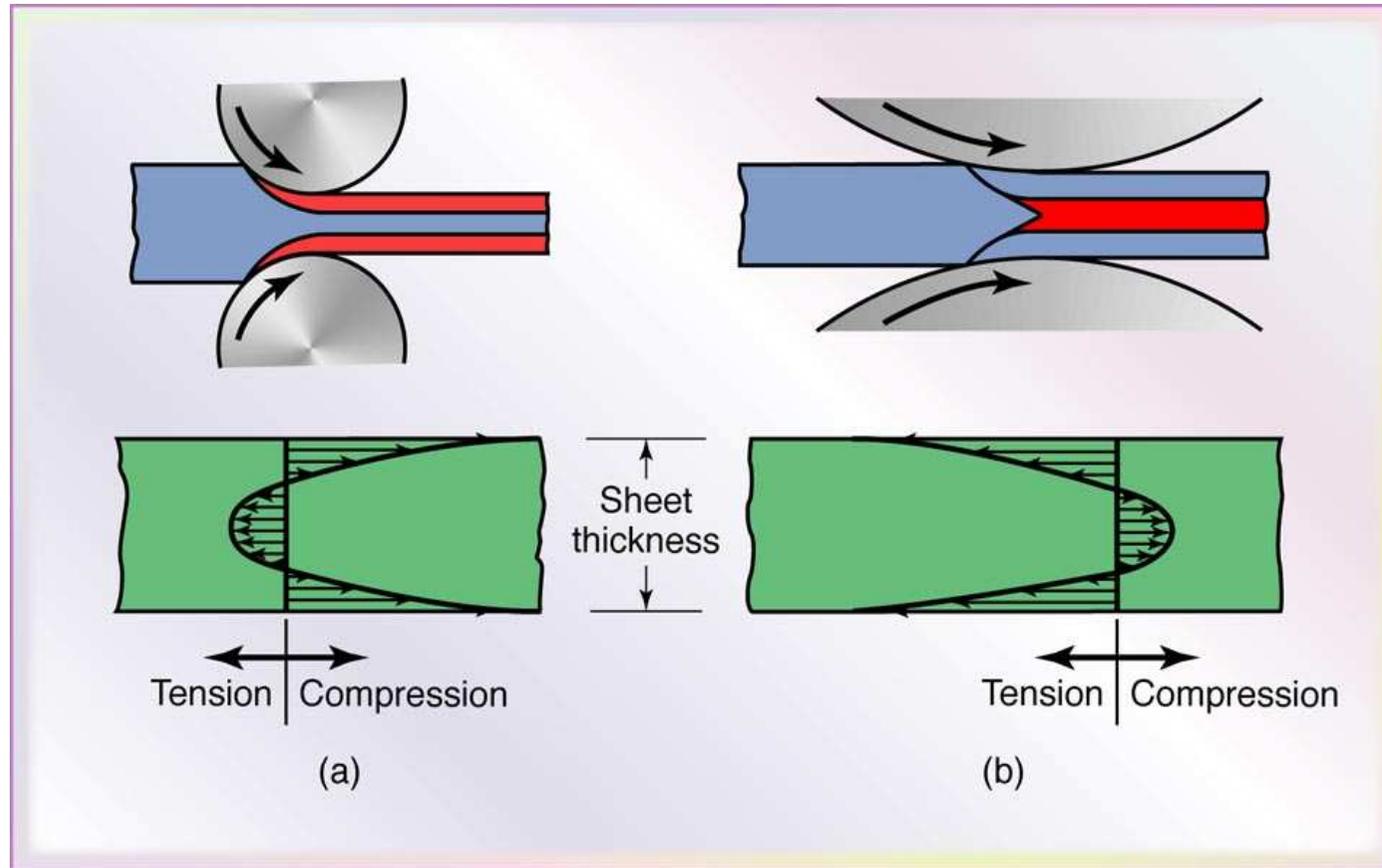


Defeitos de Laminação

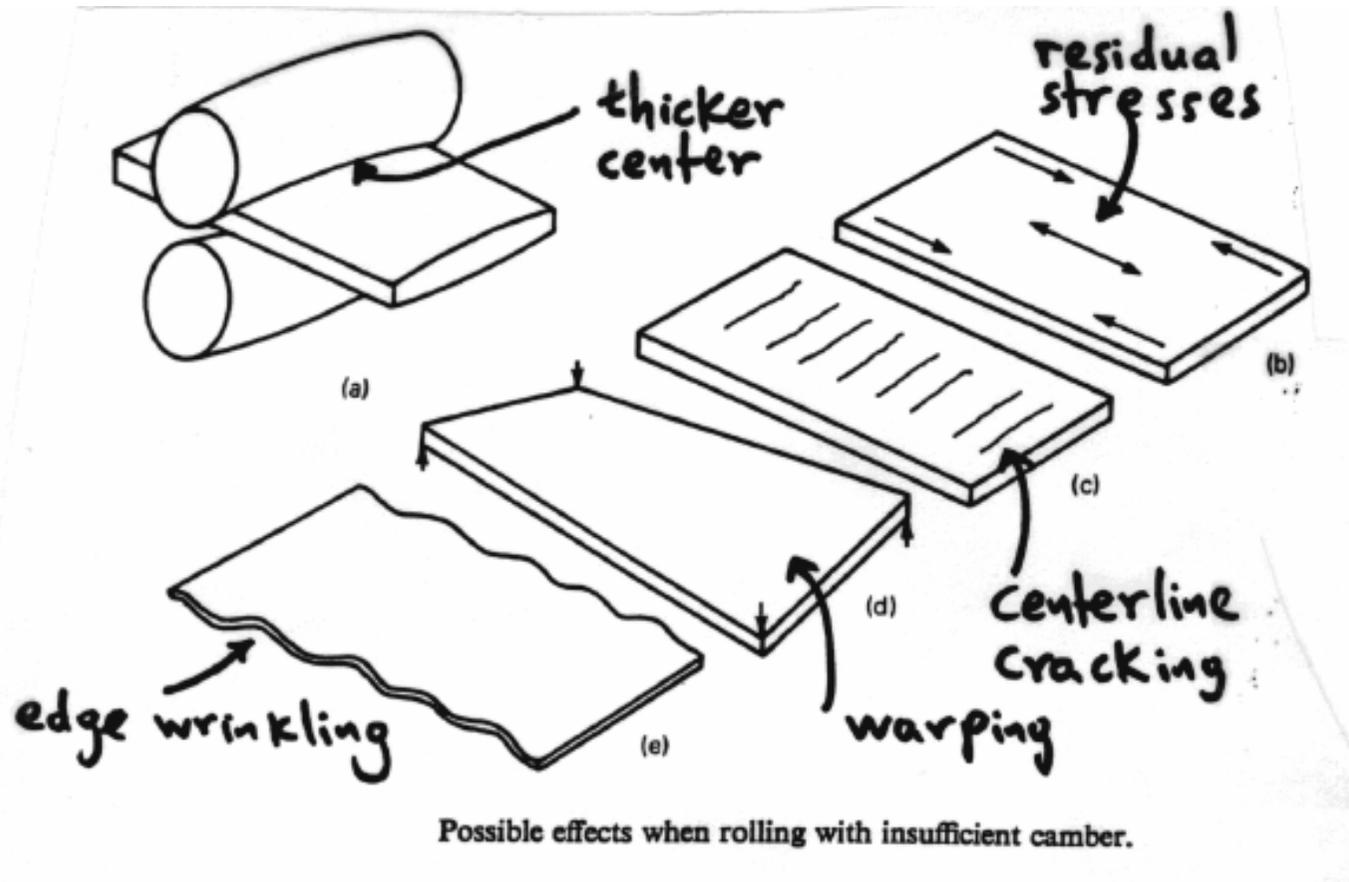
Defeitos em laminação podem ser tanto superficial quanto estrutural:

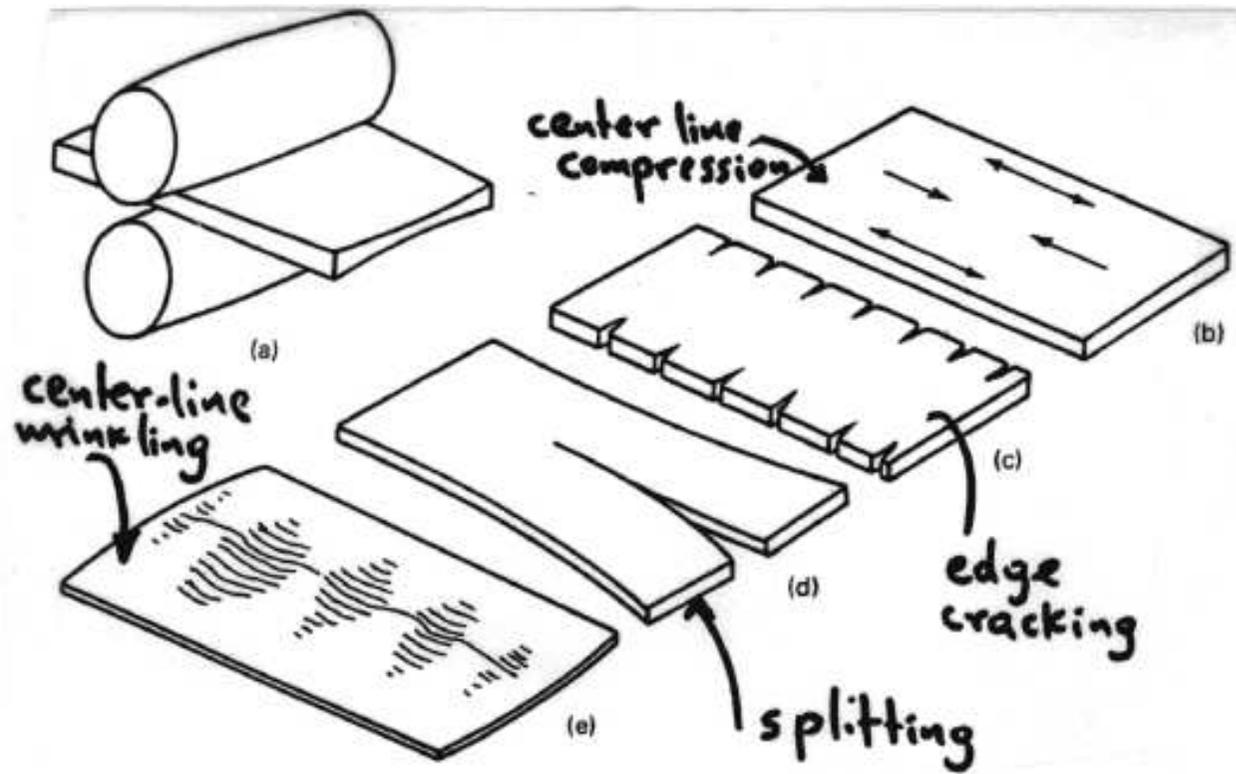
- Defeitos superficiais incluem marcas de rolo e de escala.
- Defeitos estruturais (ver figuras) incluem:
 1. Ondas laterais: flexão dos rolos causam afinamento nas laterais, a qual tendem a alongar mais. Desde que os cantos estão restritos pelo material do centro, eles tendem a empenar e formar ondas laterais.
 2. Trincas centrais e de canto:
 3. Fendilhamento: resultados de deformação não homogênea ou defeitos no lingote fundido.
- Outros defeitos incluem: tensão residual (em alguns casos tensões residuais são desejáveis).

Tensões Residuais Desenvolvidas na Laminação



(a) Residual stresses developed in rolling with small-diameter rolls or at small reductions in thickness per pass. (b) Residual stresses developed in rolling with large-diameter rolls or at high reductions per pass. Note the reversal of the residual stress patterns.





Possible effects when rolls are over-cambered.



Deformação Elástica dos Cilindros de Laminação

Equação de Hitchcock

A análise mais frequentemente utilizada para definir a deformação elástica dos cilindros é aquela desenvolvida por **Hitchcock**. De acordo com essa análise o raio de curvatura aumenta de R para R' .

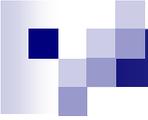
$$R' = R \left[1 + \frac{c}{\Delta h} \frac{P}{W} \right]$$

$$C \approx 2,2 \cdot 10^{-4} \text{ mm}^2/\text{kg}$$

Em que: P = Carga (Força) de Laminação

W = largura da chapa

$$\Delta h = h_i - h_f$$



Limite da espessura

Quando se lamina uma chapa fina , conclui-se experimentalmente que não é possível reduzir sua espessura abaixo de um certo valor. Tal tentativa resultará numa deformação maior dos rolos e nenhuma deformação plástica da chapa.

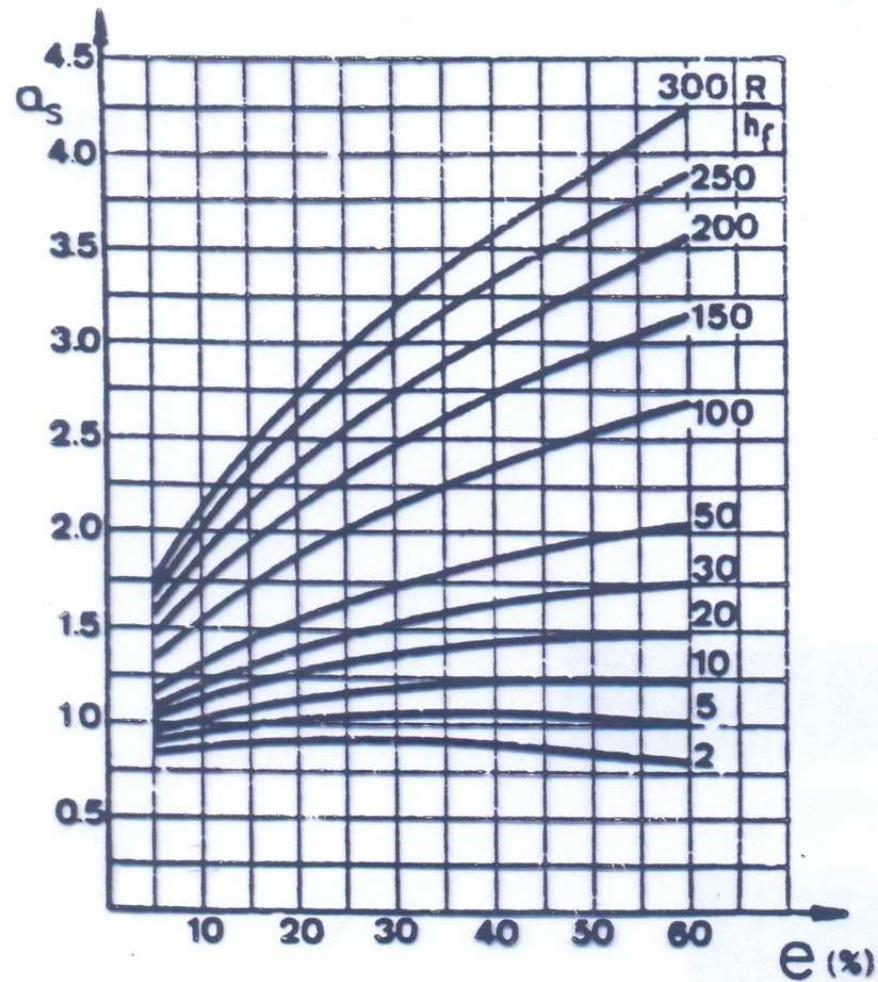
$$h_{\min} = \frac{\mu R \bar{S}}{2920} \quad (\text{mm})$$

$$\begin{array}{l} R \text{ [mm]} \\ \bar{S} \text{ [kg/mm}^2\text{]} \end{array}$$

Laminação a Quente

Equação de Sims

$$F = \bar{S}W \sqrt{R\Delta h} \cdot Q_s$$



$$e = \frac{h_i - h_f}{h_i}$$

Equação de Ekelund

$$F = \bar{S}W \sqrt{R\Delta h} \cdot Q_e$$

$$Q_e = 1 + \frac{1,6\mu\sqrt{R\Delta h} - 1,2\Delta h}{h_i + h_f}$$

$$\mu = 0,8(1,05 - 0,0005T)$$

T= temperatura de Laminação °C

Equação de Orowan-Pascoe

$$F = \bar{S}W \sqrt{R\Delta h} \cdot Q_p$$

$$Q_p = \frac{1}{4} \left[\pi \sqrt{\frac{R}{h_f} \left(\frac{\Delta h}{h_f} \right)} \right]$$

EXAMPLE 1

Cálculo da Força e do Torque de laminação

Uma tira de cobre recozido com largura de 228 mm e 25 mm de espessura é laminado para uma espessura de 20 mm em um único passe. O raio do laminador é 300 mm, e o rolo gira a 100 rpm. Calcule a força e potência requerida na operação. Dado que a tensão de escoamento média em EPD nessa etapa é 180 MPa.

$$L = \sqrt{R(h_o - h_f)} = \sqrt{300(25 - 20)} = 38.7 \text{ mm}$$

$$F = 1,2\bar{S}WL = 1,2 \times 180 \times 228 \times 38.7 = 1,906 \text{ MN}$$

$$N = \frac{2\pi FLn}{60000} = \frac{2\pi \times 1.906 \times 10^6 \times 0,0387 \times 100}{60000} = 772 \text{ KW}$$



Exemplo 2

Determine a máxima redução possível par uma laminação a frio de uma placa de 300 mm de espessura quando $\mu = 0,08$ e o diâmetro do rolo é 600 mm. Qual é a máxima redução desse mesmo material na laminação a quente quando $\mu = 0,5$?



Exemplo 3

As dimensões finais de uma placa de cobre, após um processo de laminação de 30% de redução em área, são 500 x 2,50. Pretende-se obter, com mais um passe, uma chapa com a espessura final 2,40 mm utilizando rolos de diâmetro 375 mm. qual é a carga de laminação requerida nessa última etapa. É dado que para a condição de EPD a seguinte relação é válida para o cobre:

$$\bar{\sigma} = 610\bar{\varepsilon}^{0,55} \text{ [N/mm}^2\text{]}.$$



Exemplo 4

Uma chapa de uma liga de alumínio de 300 mm de largura é laminada a quente de 20 até 15 mm. Os rolos são de 1 m de diâmetro e opera a 100 rpm. A tensão de fluxo uniaxial para essa liga pode ser expressa por $\bar{\sigma} = 140\bar{\epsilon}^{0,2}$ MPa. Determine a carga de laminação e a potência requerida para essa redução a quente. Usar a teoria de **Sims**.



Exemplo 5

- Sugira uma sequência de passes de laminação para uma placa de aço de 400 x 3,00 mm para 400 x 2,40 mm com rolos de 150 mm de diâmetro, se a carga de laminação não pode exceder 1000 kN. É dado que para a condição de EPD a seguinte relação é válida para o aço: $\bar{\sigma} = 890\bar{\epsilon}^{0,3}$ [N/mm²]



Exemplo 6

Uma chapa de cobre, com uma espessura inicial de 5 mm e uma largura de 250 mm, é laminada a frio num laminador de dois rolos. O diâmetro dos rolos é de 400 mm. Considerando que a chapa sofre uma redução de 20% com uma velocidade periférica dos rolos igual a 30 m/min, determine a espessura da chapa após laminação, a força de separação dos rolos e a potência da laminação. Admitir que para o cobre no EPD $\bar{\sigma} = 450\bar{\epsilon}^{0,33}$.



Laminação

QUESTIONÁRIO

- 1 – Defina Laminação.
- 2 – Qual a tensão que predomina sobre o material no processo de laminação ?
- 3 – Como podem ser classificados os diferentes tipos de laminação ?
- 4 – Cite os principais tipos de laminadores de rolos.
- 5 – Quais as principais vantagens da laminação a quente em relação à laminação a frio ?
- 6 – Quais as principais vantagens da laminação a frio em relação à laminação a quente ?
- 7 – Cite algumas utilizações dadas aos produtos laminados a quente.
- 8 – Cite algumas utilizações dadas aos produtos laminados a frio.



Bibliografia

- DIETER, G.E. **Metalurgia Mecânica**. Rio de Janeiro: Guanabara Dois, 1981.
- HELMAN, H. e CETLIN, P. R., **Fundamentos da Conformação Mecânica dos Metais**, Ed. Artliber, 2005.
- BRESCIANI FILHO, E. **Conformação Plástica dos Metais**. Volumes 1 e 2. Campinas: UNICAMP.
- ROWE, G.W. **Elements of Metalworking Theory**. Edward Arnold Publishers, 1979
- HONEYCOMBE, R.W.K. **The Plastic Deformation of Metals**. Edward Arnold Publishers, 1968.
- **Serope Kalpakjian and Steven R. Schmid. Manufacturing, Engineering & Technology, Fifth Edition, by. ISBN 0-13-148965-8. © 2006 Pearson Education, Inc.**