

# Curvas Limite de Conformação

- Diagrama contendo o lugar geométrico das principais deformações críticas que ocorrem na superfície da chapa para as quais a estricção se torna visível, ou para a ocorrência de fratura
- Introduzidas por Keller e Goodwin
- O limite de conformação é o estado em que se inicia o afinamento localizado

# Curvas Limite de Conformação

- Podem ser feitas a partir de peças conformadas em uma operação industrial ou por ensaios que simulem o estado de tensões de um processo real
- É necessário reproduzir diversos modos de carregamento
- As condições devem ser suficientemente diferentes de um carregamento para outras, para que se possam usar poucas amostras para as deformações de interesse.

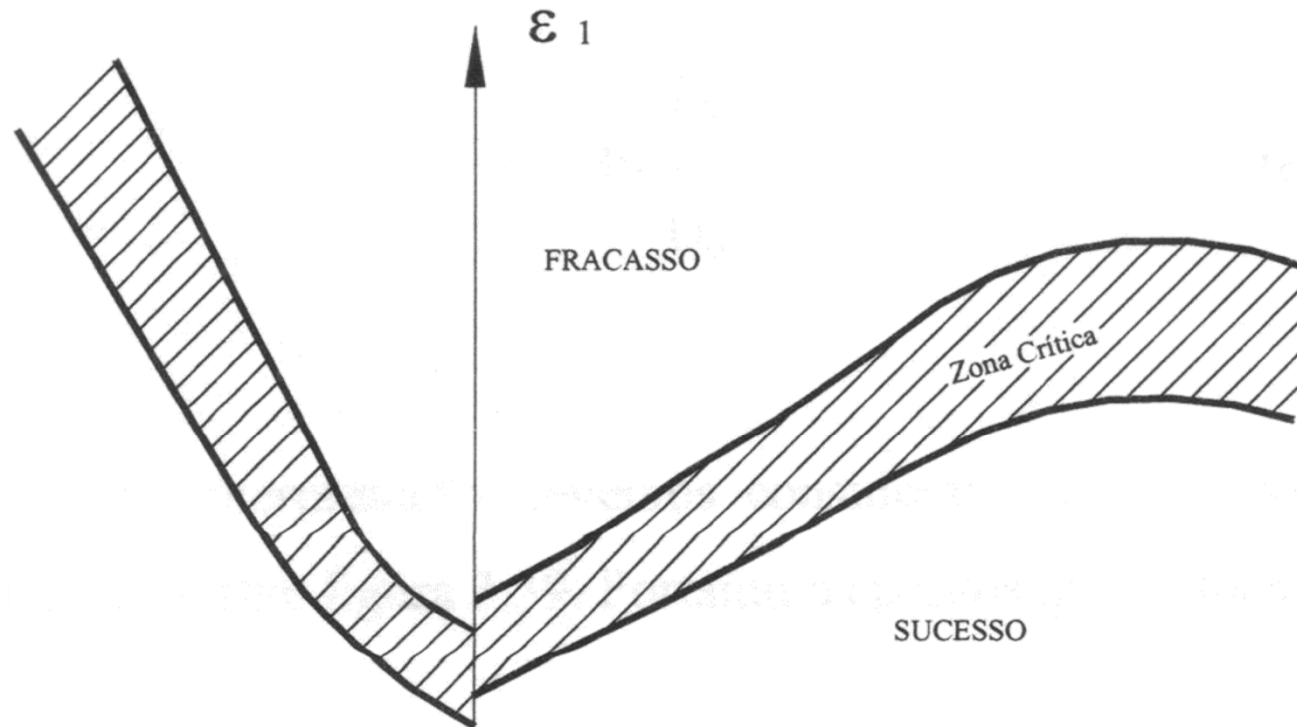
# Curva limite de conformação

- As tensões atuantes na chapa durante a conformação não são mensuráveis
- As deformações, porém, são capazes de indicar os valores relativos das tensões atuantes
- É determinada pelas deformações principais verdadeiras,  $\varepsilon_1$  e  $\varepsilon_2$ , medidas no plano da chapa

# Curva limite de conformação

- Uma rede de círculos deve ser impressa na chapa
- As amostras são ensaiadas até a fratura ou até a estrição
- Determinam-se, para cada elemento da rede de círculos, as deformações principais maiores ( $\epsilon_1$ ) e menores ( $\epsilon_2$ ).
- Os pares de deformações para os quais ocorre fratura são representados em uma curva

# Curva limite de conformação

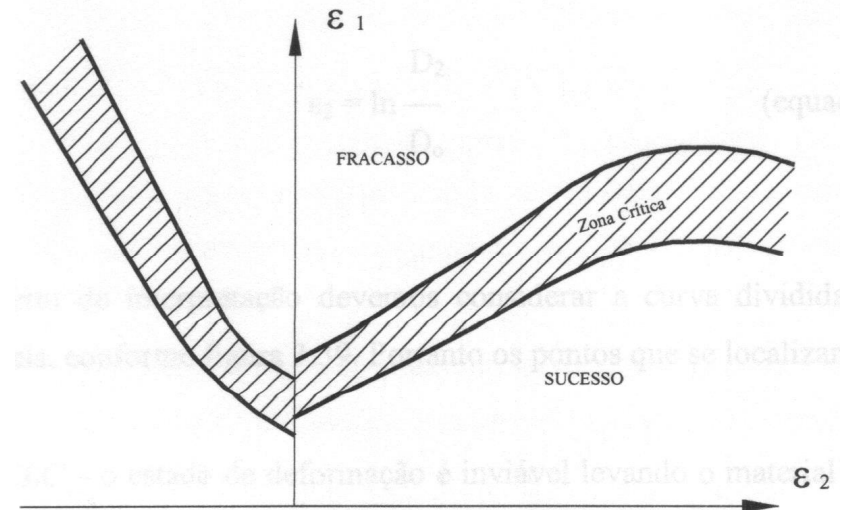


Fonte: Antenor Ferreira Filho - Doutorando

- Além da curva determinada pelas fraturas ou estricções, traça-se uma curva paralela, com os valores reduzidos em 10-20%. Essa segunda curva define uma zona crítica, onde flutuações de propriedades podem causar falha

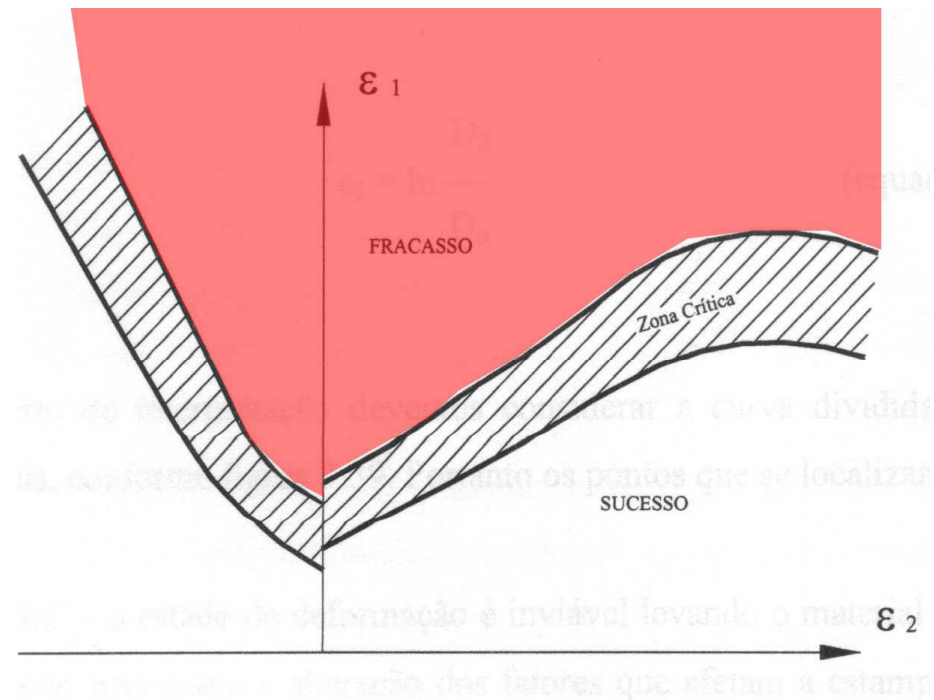
# Curva limite de conformação

- Dividida em três regiões:
  - Acima da CLC
  - Sobre a CLC
  - Abaixo da CLC



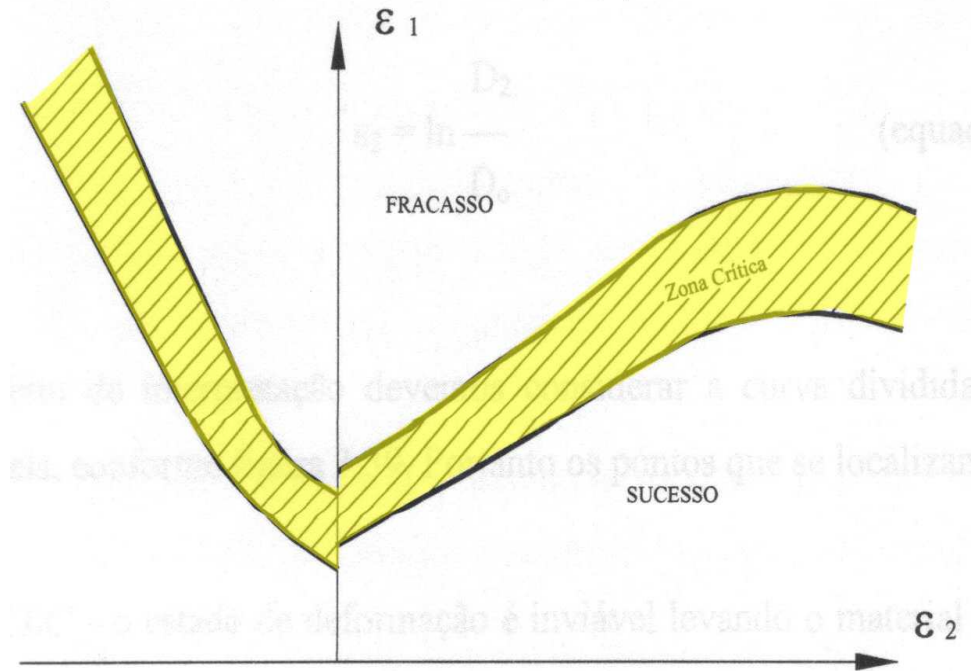
# Curva limite de conformação

- **Acima da CLC** – o estado de deformações é inviável, levando à ruptura ou estrição na peça. Para se trabalhar nessa região com sucesso, é necessário alterar propriedades do material a fim de se aumentar sua estampabilidade.



# Curva limite de conformação

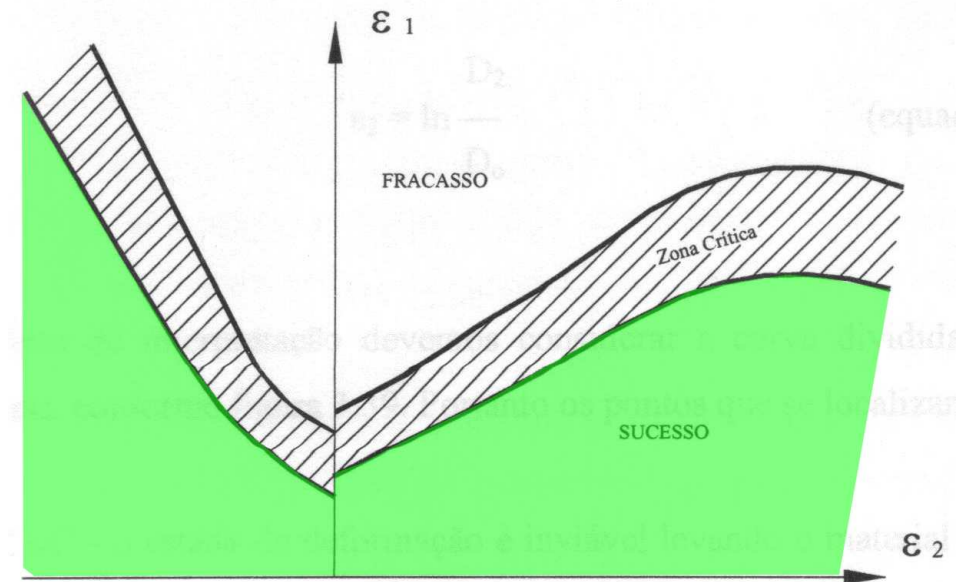
- **Sobre a CLC** – É um estado crítico para se trabalhar, uma vez que heterogeneidades nas propriedades do material podem causar ruptura da peça





# Curva limite de conformação

- **Abaixo da CLC** – É a região em que é seguro trabalhar, uma vez que os estados de deformação obtidos não levam à estricção ou ruptura da chapa



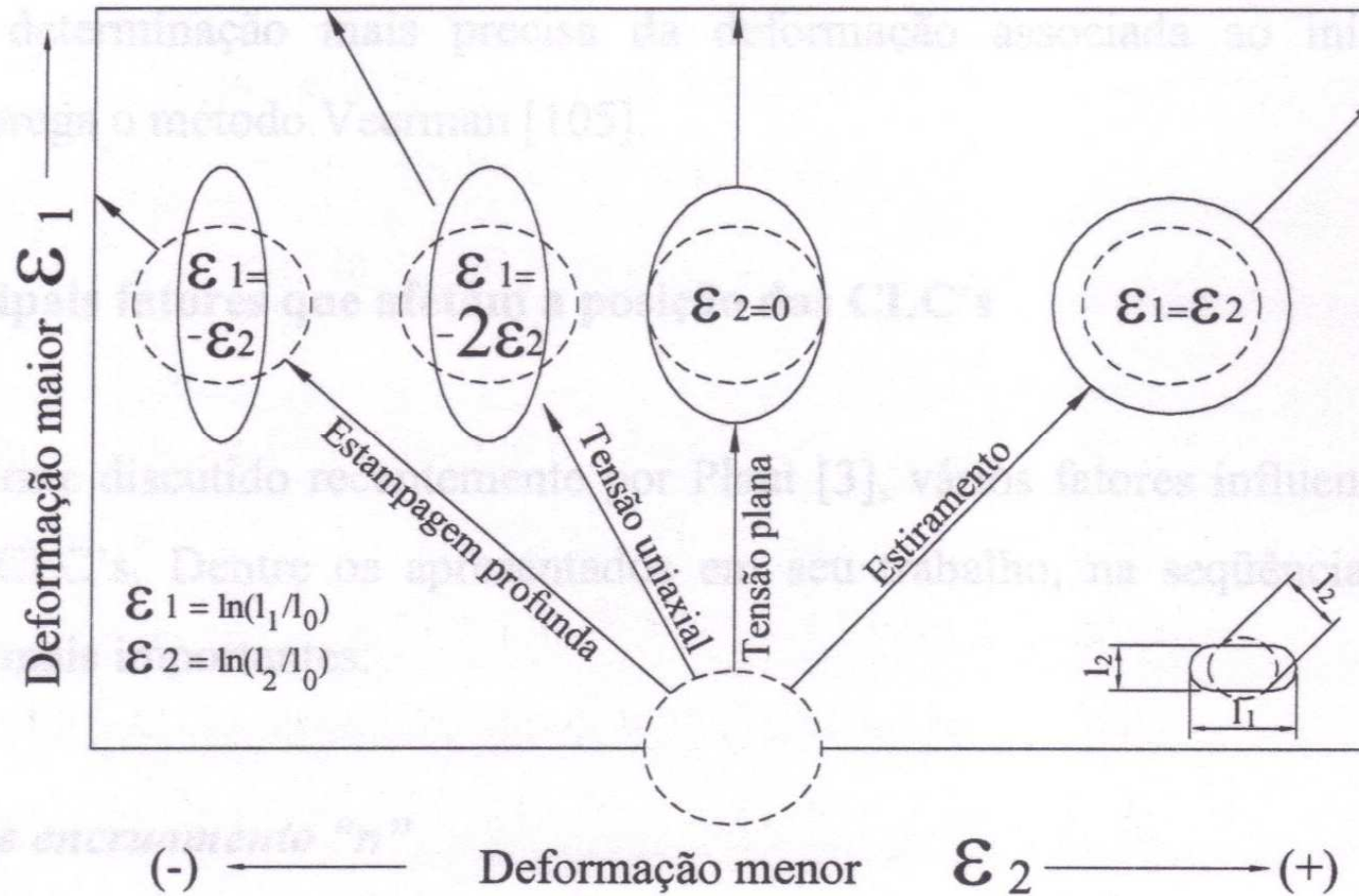
# Curvas limite de conformação

- Ambas as deformações positivas – tensões ao longo do material são maiores, e a estrição é mais difusa
- $e_1$  positiva e  $e_2$  negativa – Há a tendência de compensação, havendo baixa redução de espessura
- $e_2$  próxima de zero – Afinamento da chapa levando a estrição localizada

# Curva limite de conformação

- Após o levantamento da curva, comparam-se as deformações principais sofridas em pontos críticos da peça.
- Essas deformações são chamadas Frente Máxima de Deformação
- Pode-se determinar
  - Adequação do material
  - Possíveis excessos de pressão no prensa chapas
  - Efeitos da lubrificação e rugosidade

# Curva limite de conformação



# Curva limite de conformação

- Critérios para determinação de CLCs
- Fratura – medidas de deformação feitas nos corpos de prova após o surgimento de uma trinca.
- Estricção – Medidas após o surgimento de estricção no corpo de prova – critério mais conveniente, uma vez que a estricção já costuma ser um critério de rejeição de peças.

# Fatores que afetam as CLCs

- Coeficiente de encruamento  $n$  – redução no valor de  $n$  causa redução na posição da CLC
- Coeficiente de anisotropia normal ( $r$ )- A posição da CLC é insensível ao valor de  $r$ , mas este afeta o caminho tomado durante a deformação
- Expoente de taxa de deformação ( $m$ ) - O aumento de  $m$  está associado a uma maior uniformidade na distribuição de deformações e tende a retardar a diminuição da espessura.

# Fatores que afetam as CLCs

- Espessura do material – De maneira geral, quanto maior a espessura, maior a conformabilidade.
- Diâmetro da rede de círculos – Deve-se buscar o menor diâmetro possível, de modo a aumentar a precisão da medida.
- Efeitos geométricos -

# Fatores que afetam as CLCs

- Atrito – a melhora na lubrificação em geral eleva a CLC
- Inclusões, impurezas e composição química – a presença de inclusões (especialmente óxidos e sulfetos) aumenta a ocorrência de danos durante a conformação de chapas



# Obtenção

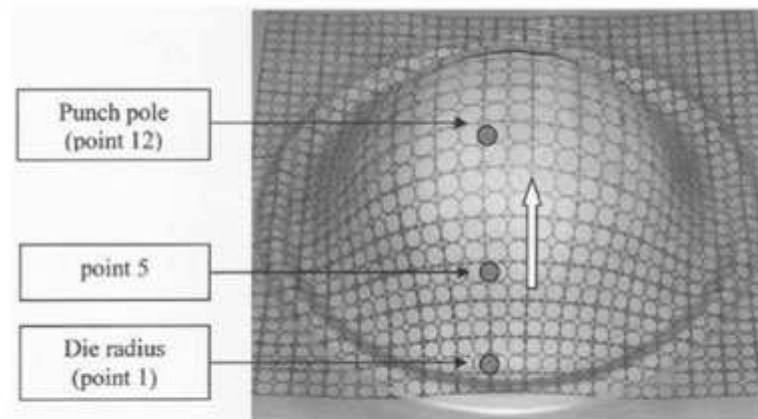


Figure 2. Test specimen illustrating the position of measured points, from the die radius to the punch pole.

# LAMINAÇÃO DE PRODUTOS PLANOS Parte 1

(Mais leve pela proximidade da prova)

# Definições

- Processo de conformação rotativo
- Consiste em passar um produto plano (placa ou tira) entre dois cilindros que giram em sentidos diferentes, com a finalidade
  - Reduzir sua espessuraou
  - Imprimir relevo

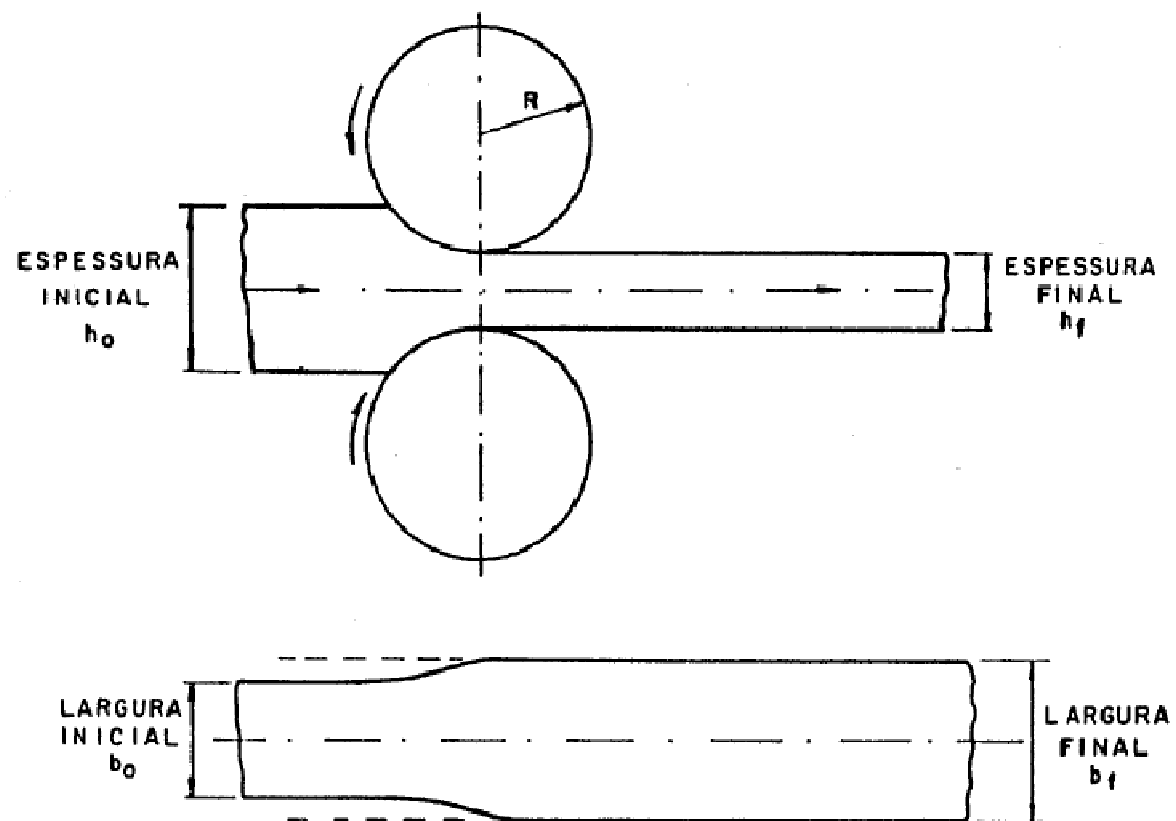
# Características

- Em geral, os cilindros giram com a mesma velocidade periférica
- O corpo inicial tem uma dimensão maior do que a distância entre as superfícies do cilindro, e sofre uma deformação plástica que reduz sua espessura e aumenta o comprimento e a largura
- Para se obter uma certa espessura, pode ser necessário submeter o corpo a vários passes

# Características

- Passagem da peça pelos cilindros ocorre pela ação da força de atrito, proporcional ao coeficiente de atrito e à força normal à superfície exercida pelo cilindro
- Força normal dividida pela área de contato equivale à pressão de laminação. Essa força resulta da resistência à deformação do material nas condições de trabalho (temperatura e velocidade de deformação)

# Características



# Características

- Pode ser conduzido a frio e a quente
- Características de processo serão diferentes
- Pode também ser classificado com base na complexidade do fluxo de metal

# Classificação por fluxo de metal

- Redução uniforme de espessura sem mudança de largura – deformação plana; largura da zona de deformação é no mínimo 20x maior do que seu comprimento
- Redução uniforme de espessura com aumento de largura



# Classificação por fluxo de metal

- Redução moderadamente não uniforme na seção transversal – material é alongado na direção de laminação, espalhado na largura e reduzido não uniformemente na espessura
- Redução altamente não uniforme na seção transversal – redução altamente não uniforme na espessura. Uma parte é reduzida enquanto outras podem ser extrudadas ou aumentadas na espessura. O fluxo de metal na largura pode até ser na direção do centro

# Laminação a quente

- Peça normalmente é um lingote fundido ou uma chapa grossa
- Temperatura de trabalho está acima da temperatura de recristalização
- Normalmente aplicada em operações iniciais (de desbaste), em que são necessárias grandes reduções

# Laminação a frio

- O produto inicial é um semi-acabado, podendo ser previamente laminado a quente
- Temperatura de trabalho é bem abaixo da temperatura de recristalização
- O material sofre encruamento durante o processamento
- Podem ser necessárias etapas intermediárias de recozimentos

- No que diz respeito à tolerância de espessura, que diferença se deve esperar entre a laminação a quente e a laminação a frio?
- Laminação a quente garante menor tolerância de espessura (mais aberta)
  - O retorno elástico do material quente é maior
  - Há a contração no resfriamento

- Um material sofreu 90% de redução a quente e posteriormente sofreu 50% de redução a frio.
  - Como deve estar a estrutura de grãos do material laminado a quente?
  - E como deve estar a estrutura de grãos do material laminado a frio?

# Laminação a quente

- Nos aços, a laminação de chapas grossas (desbaste inicial) é feita por passagens sucessivas do material no mesmo par de rolos.
- Posteriormente, a laminação é feita em uma sequência de pares de cilindros (trem de laminação).
- Para outros metais, como alumínio e cobre, normalmente não se faz a laminação em trem
- Há casos de metais em que o metal pode ir direto do lingotamento contínuo para a laminação a frio.

# Laminação frio

- A laminação a frio também pode ser feita em trens de laminação
- Na maior parte dos casos, a laminação a frio é feita pela passagem sucessiva pelo mesmo par de rolos, mas em sentidos inversos a cada passe.
- Neste caso, o metal é engatado em rolos nos dois lados, e uma pequena parcela do metal não sofre redução, caracterizando as “pontas grossas”

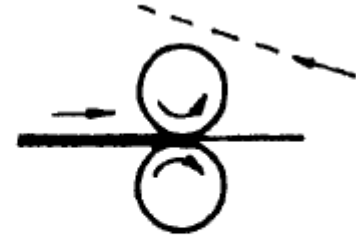
# Tipos de laminador

- Existem diversos tipos de laminador, que podem ser usados de acordo com as necessidades
- Os laminadores são costumeiramente classificados de acordo com o número de cilindros, sentidos de passagem de material.
- Em alguns casos podem ser também conhecidos pelo nome do fabricante, ainda que essa classificação seja limitada

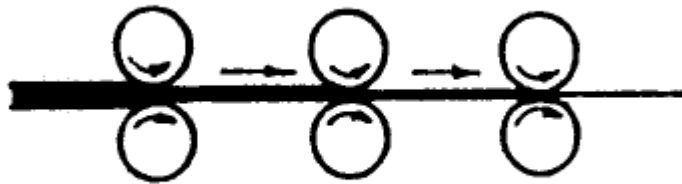


# Tipos de laminador

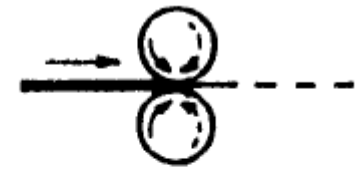
- Duo
  - 2 cilindros (2-high)
  - Cilindros de trabalho são motrize



(a) LAMINADOR DUO DE RETORNO POR CIMA



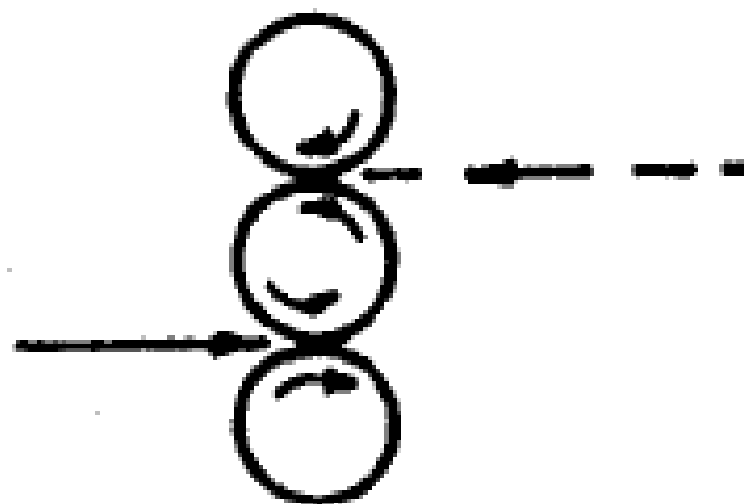
(b) LAMINADOR DUO CONTÍNUO



(c) LAMINADOR DUO REVERSÍVEL

# Tipos de laminador

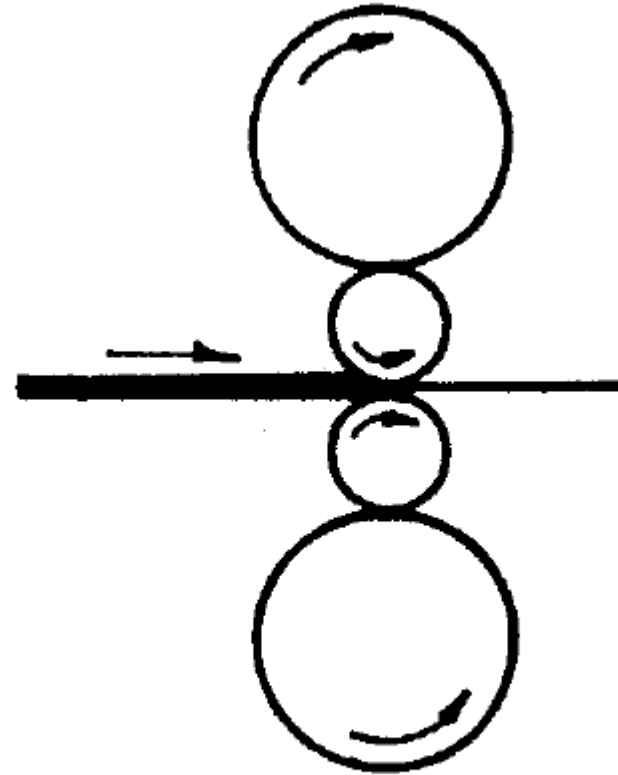
- Laminador trio
- 3 cilindros (3-high)
- Todos os cilindros são motrizes
- A rigor NÃO É REVERSÍVEL, apesar de o material passar nos dois sentidos



**(d) LAMINADOR TRIO**

# Tipos de laminador

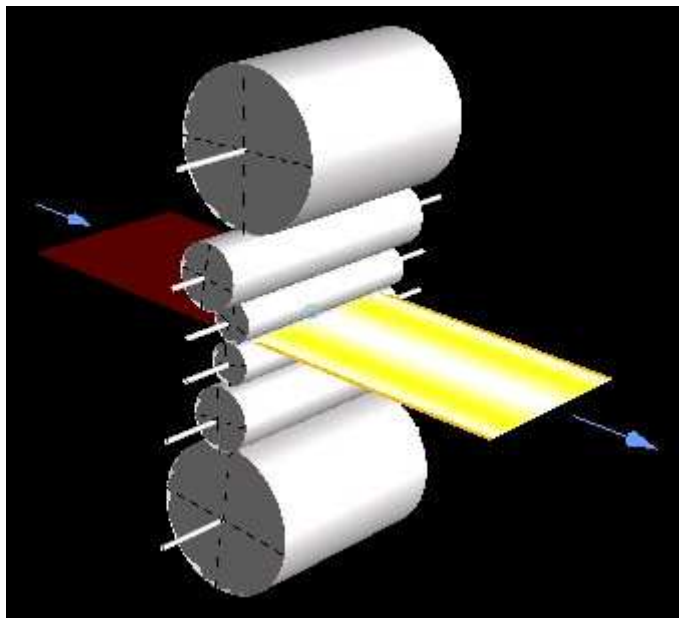
- Laminador quádruo (4-high)
- 4 cilindros
- Todos os cilindros podem ser motrizes



( f ) LAMINADOR QUADRUO

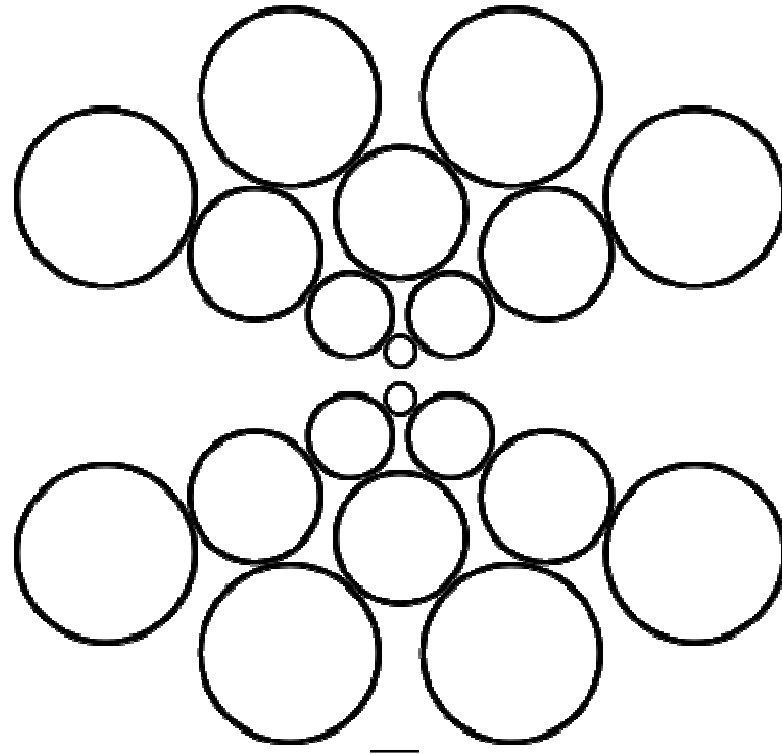
# Tipos de laminador

- 6-high



# Tipos de laminador

- 20-high
- 20 cilindros
- Cilindros de trabalho de diâmetro bastante reduzido
- Por conta de seu principal fabricante, pode ser conhecido como ***Sendzimir***



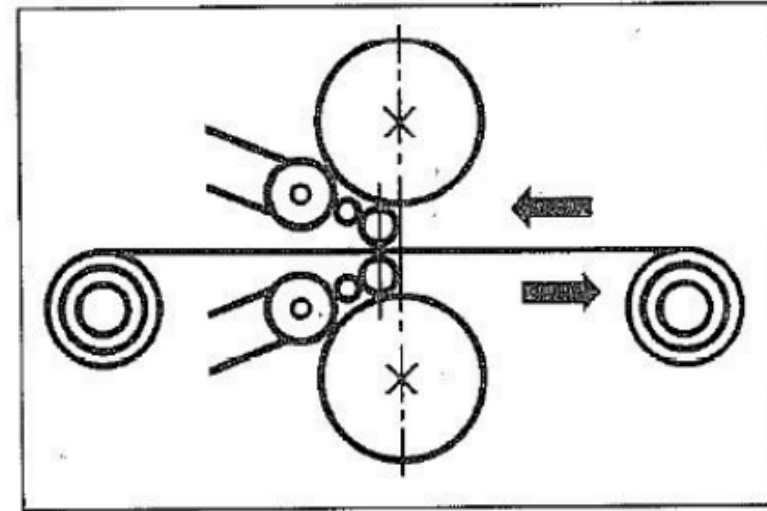
# Tipos de laminador

- 20-high



# Outros tipos de laminador

- MKW
- Laminador quádruplo com um conjunto de rolamentos que diminui a distorção dos cilindros durante a laminação

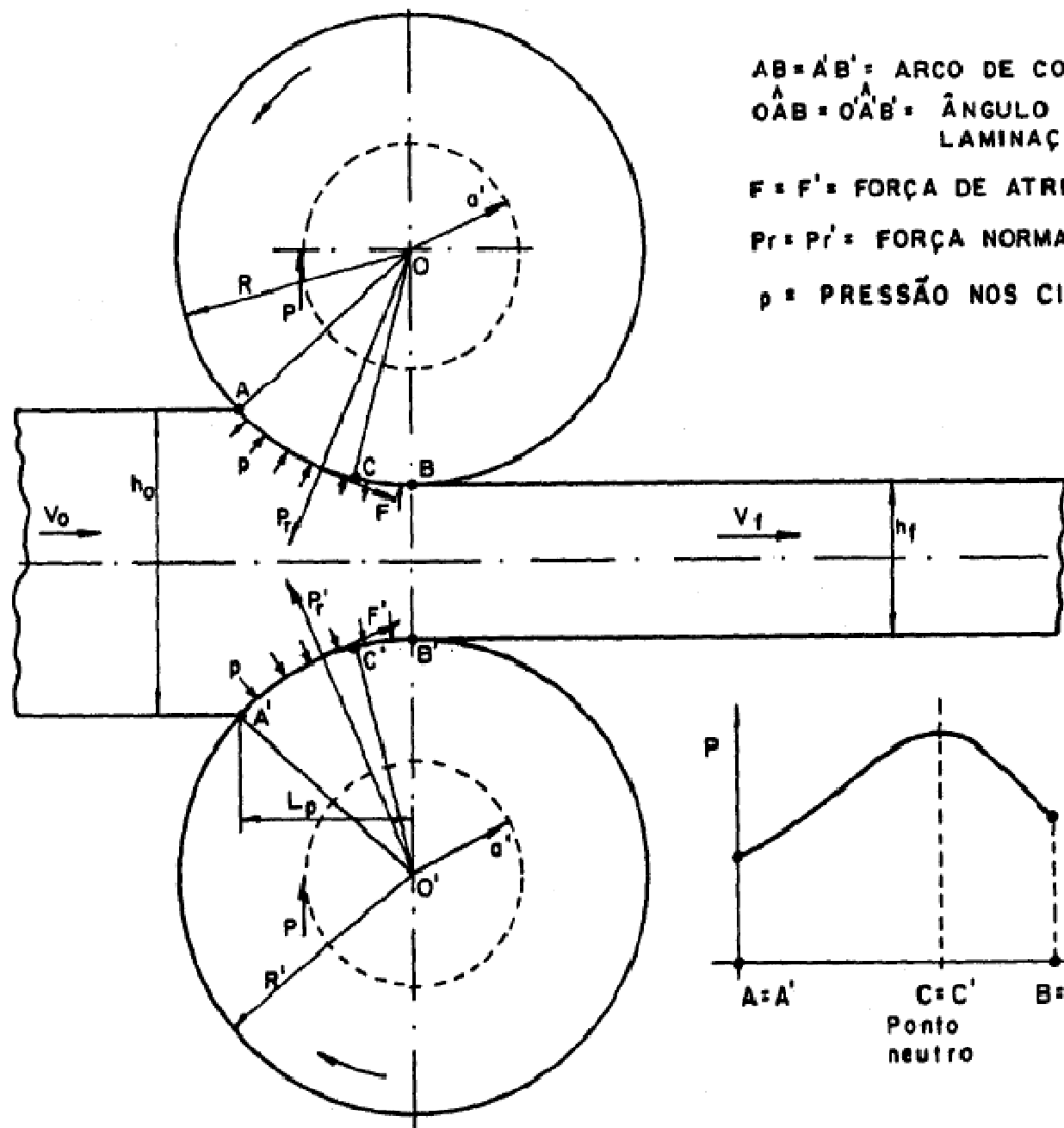


# Outros tipos de laminador

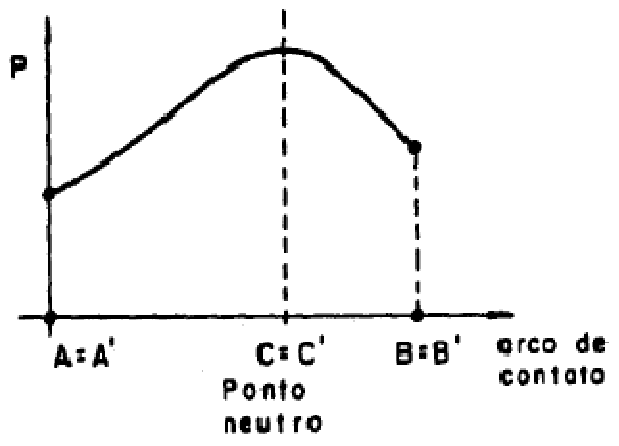
- Steckel
- Laminador quádruplo reversível com fornos de aquecimento sobre os enroladores
- Os enroladores em si são feitos em cobre e refrigerados
- Há apenas dois no Brasil
  - Um em Timóteo, na Aperam (antiga Acesita e Arcelor-Mittal Inox)
  - Um em Ouro Branco, na Gerdau Açominas





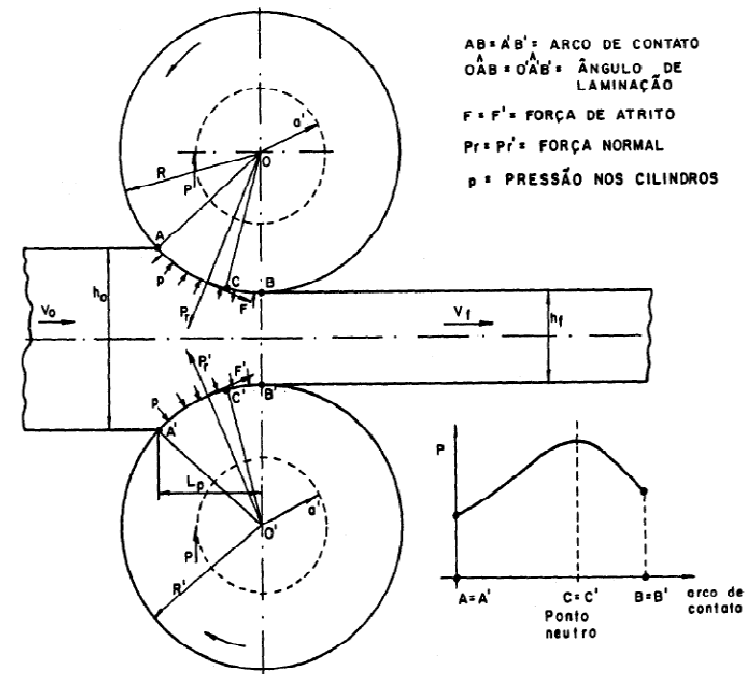


$AB = A'B'$  : ARCO DE CONTATO  
 $\hat{O}AB = \hat{O}'A'B'$  : ÂNGULO DE LAMINAÇÃO  
 $F = F'$  : FORÇA DE ATRITO  
 $Pr = Pr'$  : FORÇA NORMAL  
 $p$  : PRESSÃO NOS CILINDROS



# Mecânica da laminação

- Comprimento do arco de contato:  $OAB.r$  (ângulo interno do arco)
- O ponto C é chamado de ponto neutro.
  - Neste ponto o sentido da força de atrito se inverte e a velocidade da tira torna-se igual à velocidade tangencial do cilindro
- A força de laminação é máxima neste ponto



# Mecânica da laminação

- O ângulo  $O\hat{A}B$ , formado pelo arco de contato, é chamado de “ângulo de laminação” ou “ângulo de ataque”
- Esse ângulo tem um valor mínimo, chamado “ângulo de mordida”. Abaixo deste valor, o cilindro não consegue puxar o material para dentro da abertura
- A tangente desse ângulo deve ser menor ou igual ao coeficiente de atrito entre a tira e o cilindro

# Mecânica da laminação

- Força de laminação

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

$$q = \frac{\mu L_p}{\bar{h}}$$

$$L_p \cong \sqrt{R\Delta h}$$

Pressão de laminação: Força/Área de contato

# Mecânica da laminação

- Se for considerado o comprimento do arco de contato em vez de sua projeção

$$L = \frac{2\bar{\sigma}}{\sqrt{3}} \left( 1 + \frac{m\ell}{4h} \right) \ell$$

$h$  = média das espessuras final e inicial

$l = R \cdot \hat{OAB}$ , sendo que  $\cos(\hat{OAB}) = 1 - (H_0 - H_1) / 2R$

# Mecânica da laminação

- A reação às forças atuantes no metal é chamada de força de separação dos cilindros, e são aplicadas pela tira nos cilindros de laminação
- Para uma mesma pressão de laminação, o cilindro de raio menor resulta em menor força de laminação
- Assim, a mesma redução requer forças menores em cilindros de trabalho de diâmetro menor
- Cilindros menores têm também áreas de contato menores, reduzindo as perdas por atrito

# Principais defeitos encontrados na laminação

- CUNHA (grão de arroz)
  - Diferença de espessura entre as bordas e o meio
  - Causada pela flexão dos cilindros durante a laminação (aplicação dos esforços é feita pelos mancais laterais)
  - Tende a ser mais grave em tiras mais largas.
  - Pode ser extremamente prejudicial em alguns processos produtivos posteriores



# Principais defeitos encontrados na laminação

- CUNHA
  - Prevenção
    - Sistemas de contra-flexão do cilindro
    - Projeto da cadeira de laminação (utilização de mais cilindros de apoio)
    - Ajuste da curvatura da superfície do cilindro (abaulamento/coroamento)

# Principais defeitos encontrados na laminação

- CUNHA

- Nas indústrias relaminadoras, é necessário cortar a bobina em tiras menores para processamento
- Aplicações sensíveis a cunha devem ser produzidas a partir das tiras extraídas do meio da bobina
- É prática comum cobrar mais caro quando se exige miolo de bobina
- Bordas são destinadas a aplicações menos nobres.

# Principais defeitos encontrados na laminação

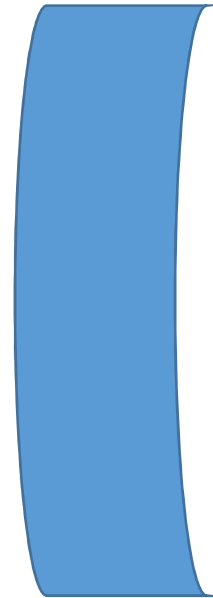
- Desvios de espessura
  - Espessura maior ou menor – resultado de ajuste errado da abertura dos cilindros
- Espessura variável
  - Pode ser causada por
    - problemas no sistema de ajuste automático da abertura dos cilindros
    - Excentricidade dos cilindros de trabalho ou de apoio

# Principais defeitos encontrados na laminação

- Flechamento ou empeno lateral
  - Desvio do eixo central da tira em direção a um dos lados



Tira boa



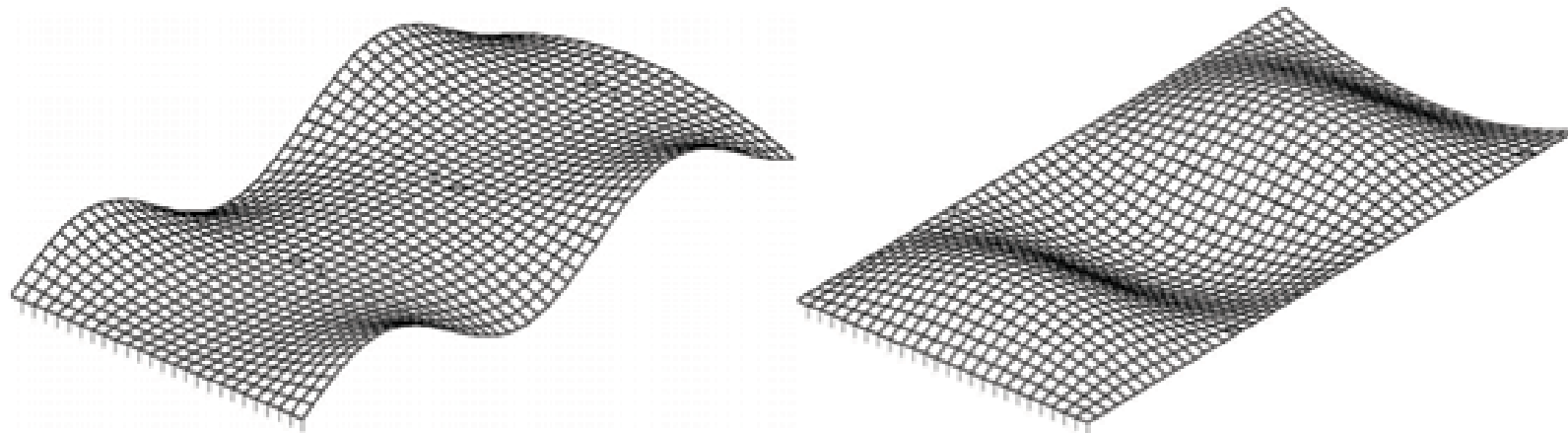
Tira com empeno lateral

# Principais defeitos encontrados na laminação

- Empeno lateral
  - Esse defeito causa problemas no processamento posterior
  - Pode resultar em amassamento do material em guias de entrada de máquinas
  - É costumeiramente medido em mm de deslocamento do eixo por distância do material (1, 1,5 ou 2 m)
  - Mede-se com uma régua com pontos de apoio e folgas para medida

# Principais defeitos encontrados na laminação

- Ondulações
  - Ondulações nas laterais ou no centro das tiras



# Principais defeitos encontrados na laminação

- Ondulações centrais
  - Podem até causar “saltos” do material na saída dos cilindros ou no desenrolamento
  - Devido ao som característico desses saltos, é comum na indústria dizer que o material está com “PLOC”
  - Outra denominação, por conta dos saltos, é que o material “está batendo”. No caso de ondulações de borda, diz-se que está “batendo borda”

# Principais defeitos encontrados na laminação





# Exercício

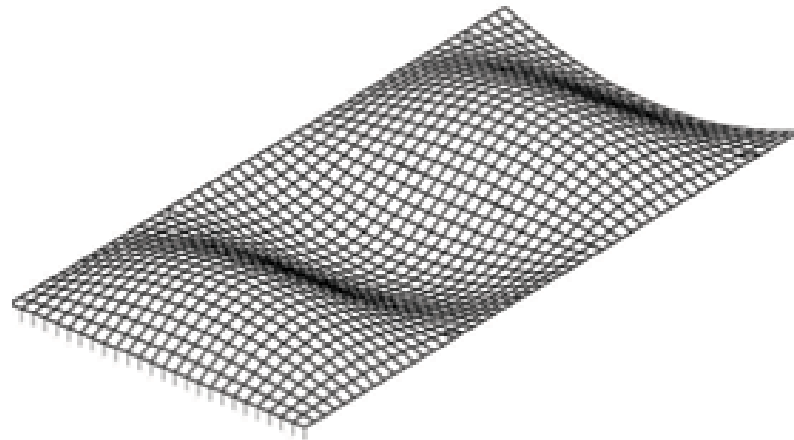
- Mostre que os defeitos de flechamento (empeno lateral) e ondulação de borda têm a mesma causa raiz.
  - Dica: o que precisa acontecer no material para que:
    1. Surja uma curvatura para um dos lados
    2. A borda fique ondulada
- Que situações dão origem a cada um?

# Principais defeitos encontrados na laminação

- Tanto a ondulação de borda quanto o empeno lateral aparecem quando um dos lados está mais comprido que o outro
  - Cilindros tortos
  - Flexão dos cilindros (neste caso, ocorre a tendência a ondulação nas duas bordas)
  - Material com empeno que é tracionado para sua eliminação pode ficar com a borda mais comprida ondulada.
  - Podem ser diminuídas por meio de abaulamento dos cilindros ou sistemas de contra-flexão

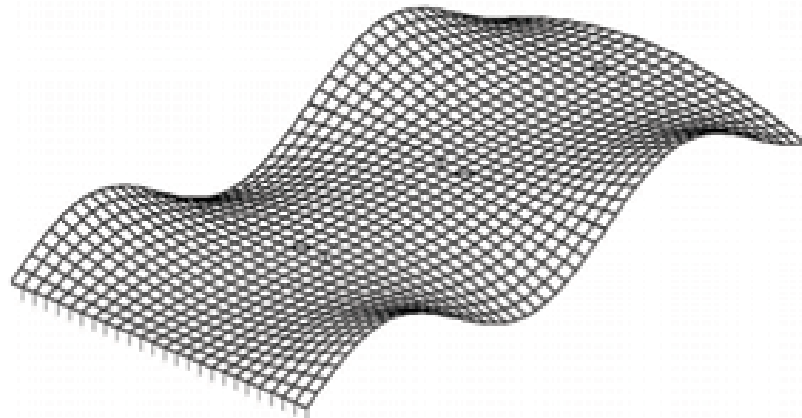
# Principais defeitos encontrados na laminação

- Ondulação central:
  - O meio da tira está mais longo que as bordas
  - Causas prováveis:
    - Abaulamento excessivo do cilindro
    - Erro no ajuste de contra-flexão



# Principais defeitos encontrados na laminação

- Ondulação de borda
  - Medida em termos de altura da ondulação por comprimento do material, em amostras de 1, 1,5 ou 2 metros
  - Mede-se com a haste traseira do paquímetro em uma mesa plana



# Principais defeitos encontrados na laminação

- Marcas de cilindros e roletes
  - Pequenas marcas impressas na superfície do material
  - A principal característica que permite a identificação é a repetição em distâncias fixas
  - Para identificar qual é o cilindro ou rolete que a causa, as empresas têm um registro dos diâmetros de **todos** os cilindros e roletes das máquinas.

# Principais defeitos encontrados na laminação

- Marcas no cilindro de apoio são mais complexas
- As marcas são impressas no cilindro de trabalho, que as “repassa” para o material
- A periodicidade fixa das marcas não ocorre.
- Em qualquer caso, resolve-se por retífica e ajuste da superfície do cilindro/rolete

# Principais defeitos encontrados na laminação

- Marcas de deslizamento
  - Marcas causadas por atrito entre voltas do rolo
  - O atrito é possibilitado por afrouxamento do rolo (em uma parada de máquina) ou bobinamento frouxo
  - Têm uma forma típica, triangular
  - Podem ser evitadas por controle da tração de bobinamento ou dispositivos que evitam o afrouxamento do rolo durante paradas

# Principais defeitos encontrados na laminação

- Abaulamento ou acanoamento
  - Desvio de planicidade do material, assumindo a forma de uma “calha”
  - É crítico para produção de peças estampadas, serras, molas, etc.
  - Resultado de heterogeneidades do estado de tensões (a parte interna do acanoamento fica sujeita a tensões de compressão, e a externa a tensões de tração)
  - Pode-se tentar corrigir por meio de uso de cilindro abaulado em par com um cilindro sem abaulamento
  - Mede-se com uma “régua de luz” e calibre de folga





# Principais defeitos encontrados na laminação

- Bordas trincadas
  - Pode ser resultado de corte deficiente no processo de corte circular
  - Podem também ocorrer quando o material já está próximo da maior redução de espessura possível antes de um ciclo de recozimento

# Sistemas de controle de espessura

- O controle de espessura das tiras laminadas é feito em tempo real, permitindo a correção da abertura dos cilindros
- Os tipos de sistema de controle mais usuais são:
  - Medidor de contato (mais conhecido: Vollmer)
  - Medidor por raio X

# Sistemas de controle de espessura

- Medidor de contato
  - Uma pinça com roletes acompanha o material
  - A abertura da pinça é detectada por um sensor piezoelétrico e processado para se obter a espessura da chapa
- Muito sensível a defeitos superficiais na chapa, podendo ser danificado



# Sistemas de controle de espessura

- Medida por raios X
  - Uma fonte de raios X é posicionada a uma certa distância da tira, e o sensor a distância equivalente abaixo
  - A diferença entre a intensidade do raio X emitido e o raio X captado é indicativa da espessura
  - Requer calibração de várias espessuras para cada tipo de aço



# Sistemas de controle de espessura

- Medida por raio X
  - Medida feita no centro da tira
  - Sistemas modernos podem medir a espessura ao longo da largura
  - Operadores devem ser dosimetrados e recebem adicional ao salário
- Transmite a medida ao sistema de acionamento dos cilindros que faz a correção
- Exige altas velocidades de laminação. Laminação em baixa velocidade faz o sistema tentar corrigir a abertura excessivamente, e causa variação de espessura

# Sistemas de controle de espessura

