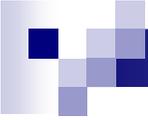




PROCESSO DE ESTAMPAGEM



ANISOTROPIA

- Os materiais sob a forma de chapas metálicas finas são em geral anisotrópicos, ou seja, possuem comportamento elasto-plásticos diferentes quando ensaiados em diferentes direções. Isso é decorrente do processo de fabricação da chapa. A redução de um metal desde o lingote até a chapa, cria vários tipos de direcionalidade ou anisotropia de propriedades, na maioria dos metais. Como consequência, os sistemas de escorregamento são orientados, permitindo deformações mais fáceis em certas direções.



Nos metais, a orientação preferencial dos grãos (textura) é a causa mais importante do comportamento anisotrópico das propriedades plásticas. Um índice mecânico (r) representa o grau da anisotropia plástica, que é a razão entre a deformação verdadeira na largura e a deformação verdadeira na espessura, ou seja:

$$r = \frac{d\varepsilon_w}{d\varepsilon_t} = \frac{\ln(w_f/w_0)}{\ln(t_f/t_0)}$$

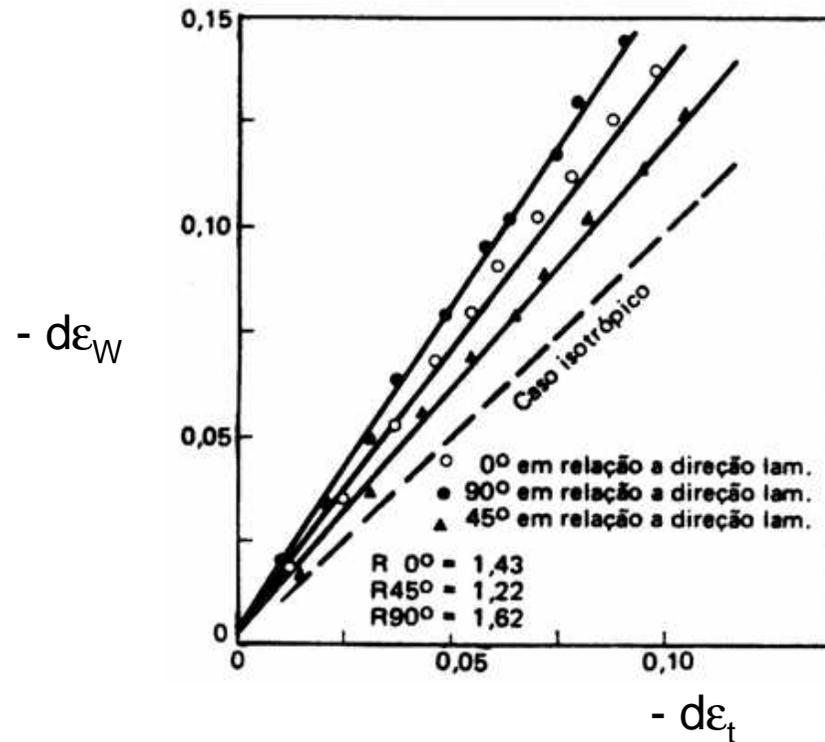
Volume constante:


$$r = \frac{\ln(w_0/w_f)}{\ln(l_f w_f / l_0 w_0)}$$

A anisotropia no plano da chapa é denominada anisotropia planar (Δr) e é responsável pela formação de orelhas no repuchamento de copos. Sendo assim, é desejável que (Δr) seja pequeno. A equação de anisotropia planar é:

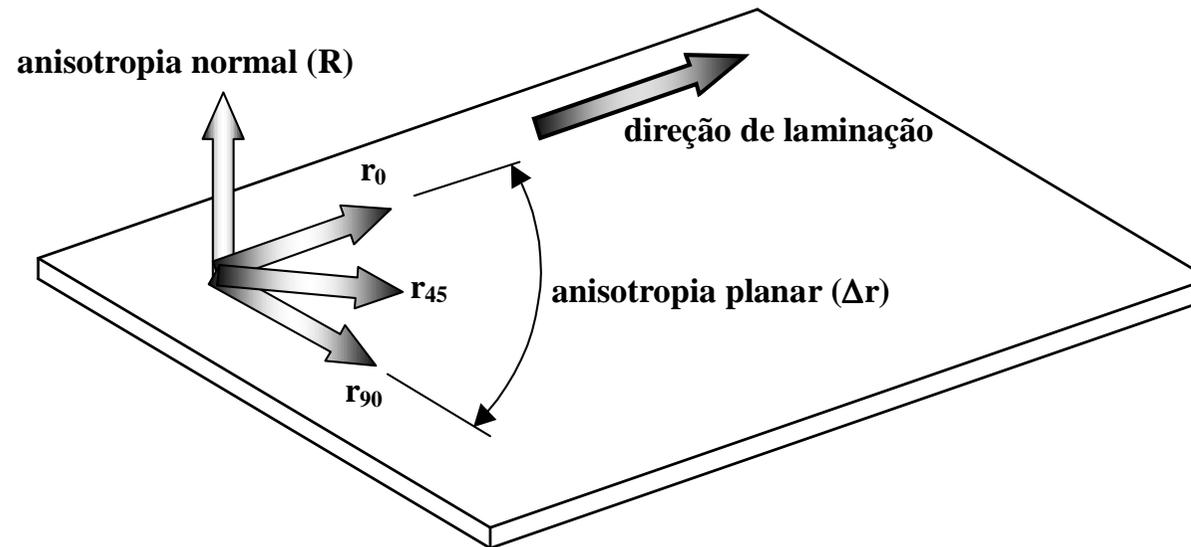
$$R = \frac{r_0 + 2r_{45} + r_{90}}{4}$$

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



Parâmetros de anisotropia (r), anisotropia normal R e anisotropia planar (Δr)

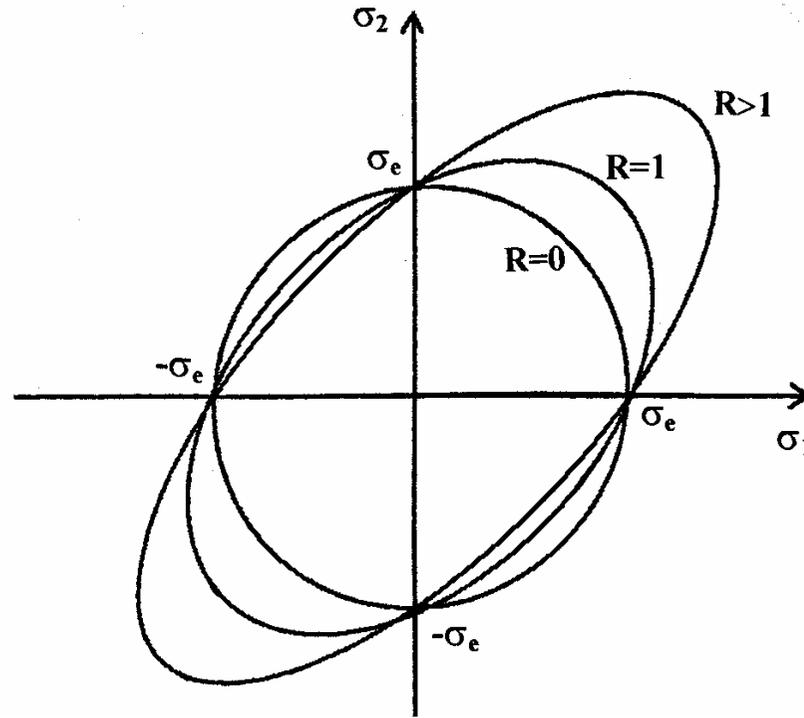
O valor de R (R de Lankford) representa fisicamente a capacidade do material de resistir ao afinamento.



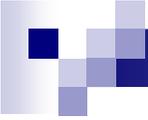
$r_0=r_{45}=r_{90}=1 \Rightarrow$ material isotrópico

$r_0=r_{45}=r_{90} \neq 1 \Rightarrow$ anisotropia normal pura e isotropia planar

$r_0 \neq r_{45} \neq r_{90} \neq 1 \Rightarrow$ anisotropia normal e anisotropia planar



Representação do critério de escoamento de von Mises levando-se em consideração a anisotropia normal e isotropia planar.



Análise considerando o critério de plasticidade de Hill para materiais com comportamento ortotrópico:

$$\sigma_e^2 = \frac{1}{1+R} \left[(\sigma_\theta - \sigma_z)^2 + (\sigma_r - \sigma_z)^2 + R(\sigma_r - \sigma_\theta)^2 \right]$$

Em condições de tensão plana ($\sigma_z = 0$)

$$\sigma_e^2 = \sigma_r^2 + \sigma_\theta^2 - \frac{2R}{R+1} \sigma_r \sigma_\theta$$

Tensão efetiva nessas condições:

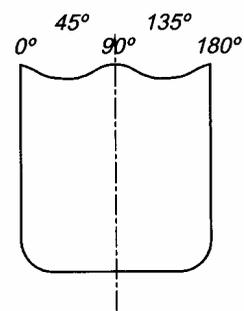
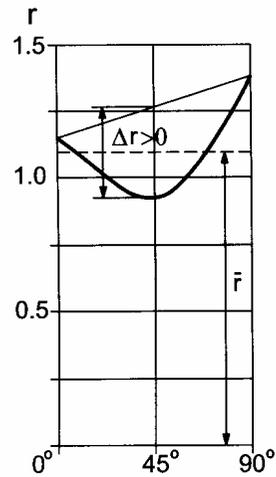
$$\bar{\sigma} = \left[\frac{1}{1+R} \left[(\sigma_\theta - \sigma_z)^2 + (\sigma_r - \sigma_z)^2 + R(\sigma_r - \sigma_\theta)^2 \right] \right]^{1/2}$$

Deformação efetiva:

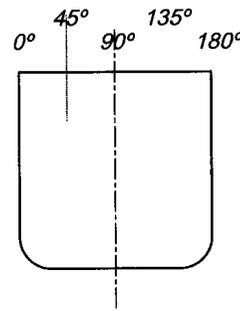
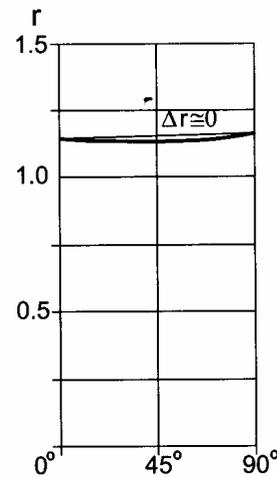
$$\bar{\varepsilon} = \left[\frac{(R+1)}{R} \right]^{1/2} \cdot \frac{1}{(2R+1)} \left[R(\varepsilon_y - R\varepsilon_z)^2 + R(R\varepsilon_z - \varepsilon_x)^2 + (R\varepsilon_x - R\varepsilon_y)^2 \right]^{1/2}$$

Defeitos em Estampagem

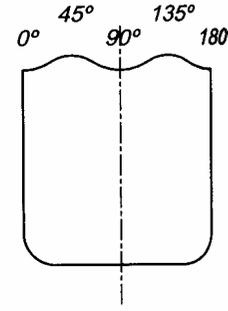
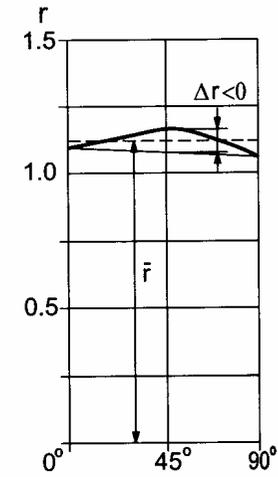
Formação de “orelhas”



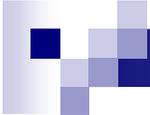
(a)



(b)



(c)



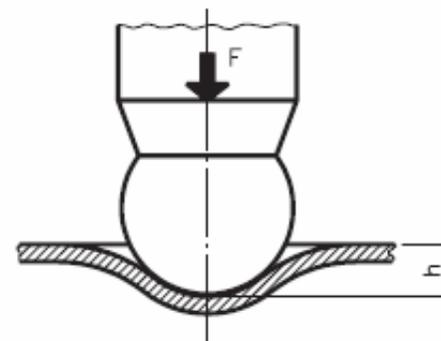
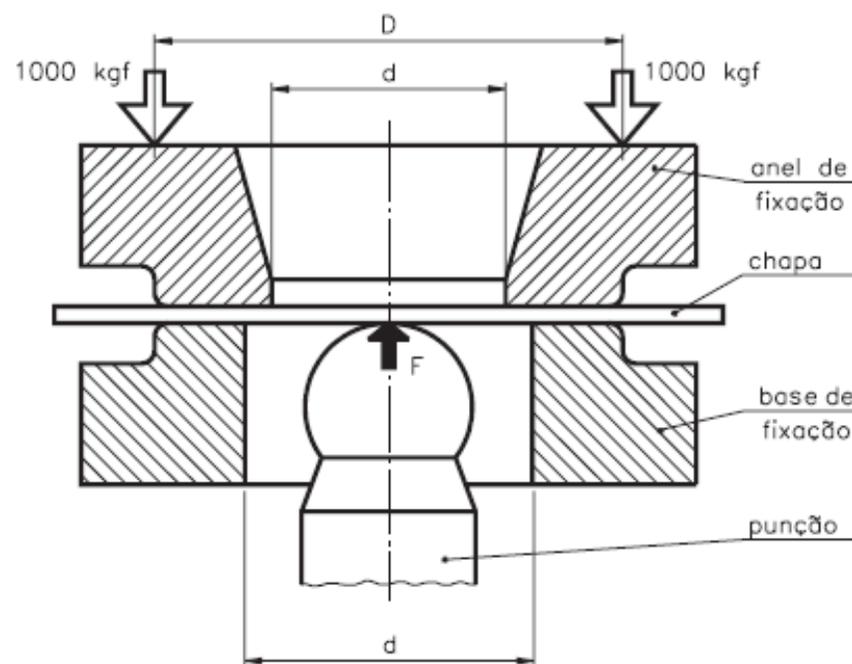
VALORES TÍPICOS DE ANISOTROPIA NORMAL (R) PARA VÁRIOS MATERIAIS DE CHAPAS METÁLICAS

Zinco	0.2
Aço laminado a quente	0.8-1.0
Aço laminado a frio	1.0-1.35
Ligas de Alumínio	0.6-0.8
Cobre e latão	0.8-1.0
Ligas de Titânio	4-6

ENSAIOS DE ESTAMPABILIDADE

Ensaio de Estiramento

Ensaio Erichsen: consiste na deformação de uma tira metálica, denominada blank ou corpo-de-prova, presa em uma matriz com um punção na forma esférica. Mede-se a máxima penetração do punção no momento da fratura. O momento em ocorre a ruptura pode se acompanhado a olho nu ou pelo estalo característico de ruptura. Se a máquina for dotada de um dinamômetro, pode-se determinar o final do ensaio pela queda brusca de carga no momento da fratura.





ensaios avaliam a profundidade do copo no momento da estricção ou no momento em que ocorra a ruptura do copo. O punção tem cabeça esférica, com 20mm de diâmetro, sendo que utiliza-se graxa grafitada no punção como lubrificante.

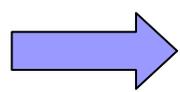
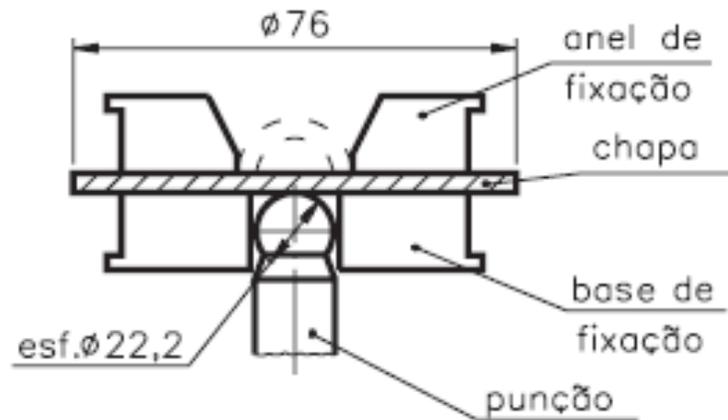


No ensaio Erichsen, o resultado final é a medida da altura do copo (em milímetros) no momento em que se dá a fratura no topo do copo. A altura do copo após o ensaio é o índice Erichsen de embutimento (IE).



o ensaio Erichsen apresenta como maior desvantagem uma má reprodutibilidade, como consequência do emprego de pressões diferentes para a fixação da chapa na matriz, a diferenças de rugosidades nas matrizes e nos punções das diversas máquinas existentes e, principalmente, devido à qualidade diversificada do lubrificante utilizado e à velocidade do ensaio.

ENSAIO OLSEN



semelhante ao ensaio Erichsen, com algumas alterações nas dimensões do equipamento;



Utiliza punção esférico de 22,2 mm de diâmetro e CDP na forma de discos com 76 mm de diâmetros

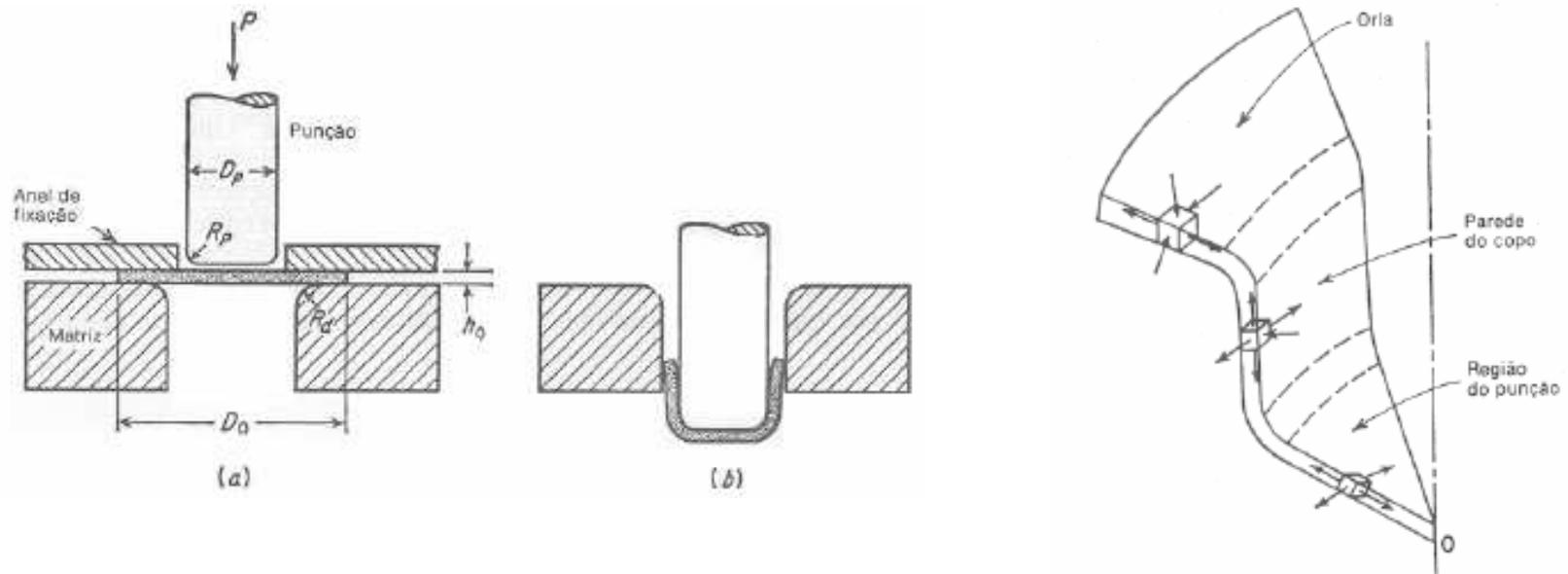


Necessidade de medir o valor de carga no início da trinca



Em estampagem deve-se dar preferência a chapa que se deforma sob a ação de uma menor carga.

Estampagem Profunda ou Embutimento



➡ Utilizado para modelar chapas planas e produtos na forma de copos

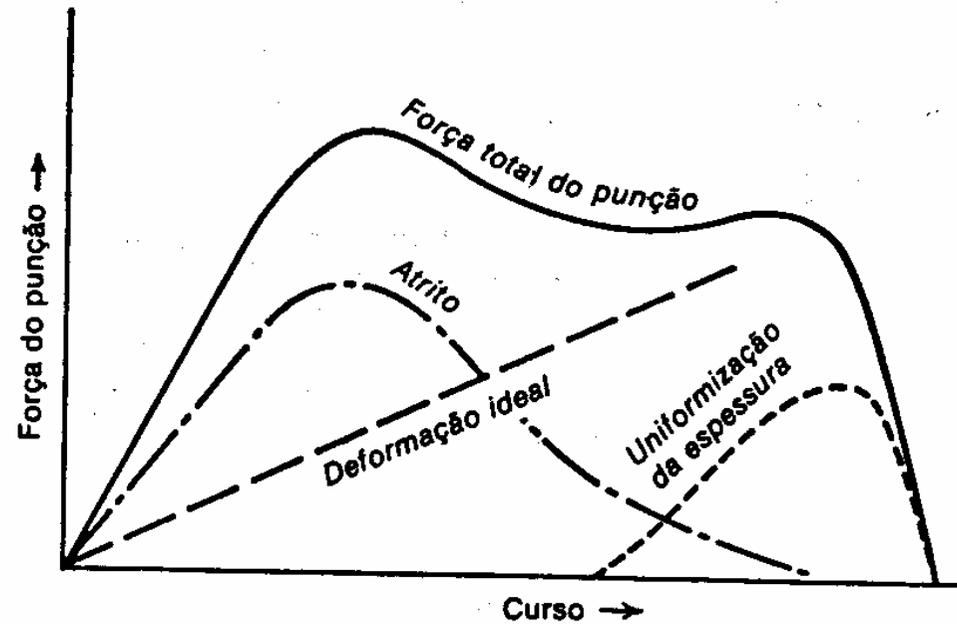
➡ O material é submetido a diferentes estados de tensões e deformações



Ensaio Swift

- ➔ O ensaio consiste na deformação de um disco metálico (blank) preso em uma matriz com um punção na forma cilíndrica. Nesse ensaio, o resultado é obtido por meio da relação entre o diâmetro máximo do disco e o diâmetro do punção que provoca a ruptura da peça.
- ➔ Para isso, esse método de ensaio exige a utilização de diversos corpos-de-prova, sendo muito utilizado para análise de casos de estampagem profunda (deep.drawing).
- ➔ A medida principal de interesse é a razão crítica dos diâmetros LDR (Limit Drawing Ratio) e consiste na razão entre o diâmetro máximo do CDP que estampou sem se romper pelo diâmetro do punção (D_0/d_p)

Força do Punção na Estampagem Profunda



Carga aproximada do punção

$$P = \left[\pi D_p h (1,1\sigma_0) \ln \frac{D_0}{D_p} + \mu \left(2H \frac{D_p}{D_0} \right) \right] e^{\left(\frac{\mu\pi}{2} \right)} + B$$

P = carga total do punção (N)

σ_0 = tensão de escoamento média (MPa)

h = espessura da parede (blank) em mm

D_p = diâmetro do punção (mm)

D_0 = diâmetro do blank (mm)

H = Força de fixação (N)

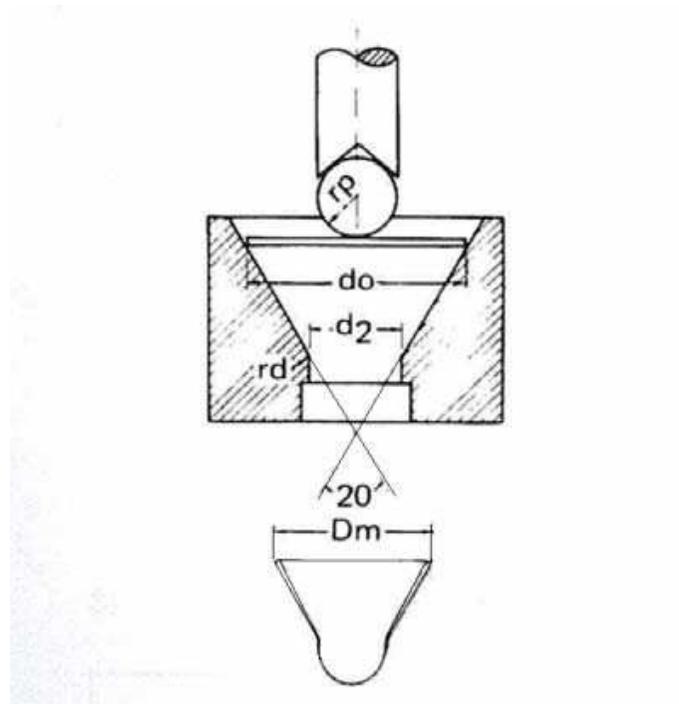
μ = coeficiente de atrito

B = força necessária para dobrar e endireitar o blank (N)

Testes Combinados

→ Usados para simular as condições de estiramento e estampagem simultaneamente.

ENSAIO FUKUI ou CCV (Conical Cup Value)





este tipo de ensaio consiste em conformar um disco metálico como um cone com vértice esférico.



Pela ação de um punção o o CDP é conformado na cavidade cilíndrica da matriz até o início da ruptura



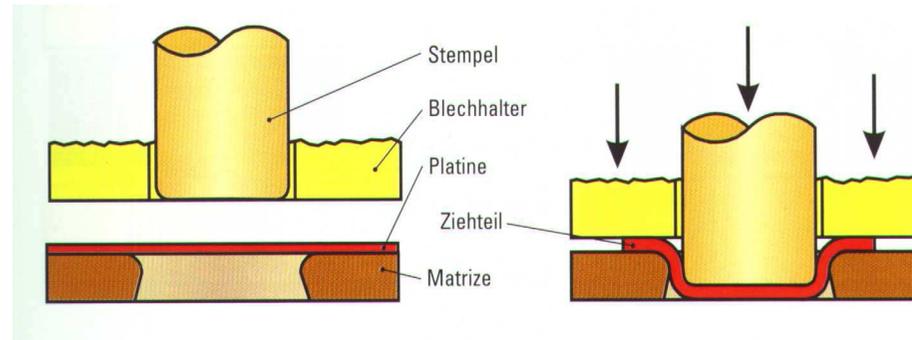
Exige a utilização de diversos corpos-de-prova, e é usado também para análise de estampagem profunda.

Devido a eventuais ΔR na chapa

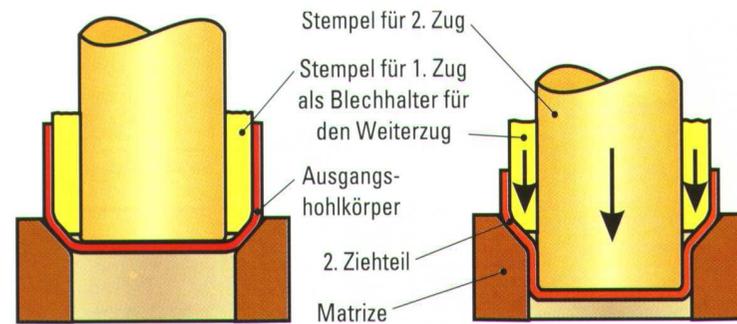
$$\text{Valor } CCV = D_m = \frac{D_{Max} + D_{Min}}{2}$$

Processos de Estampagem

- Estampagem profunda em um Passo

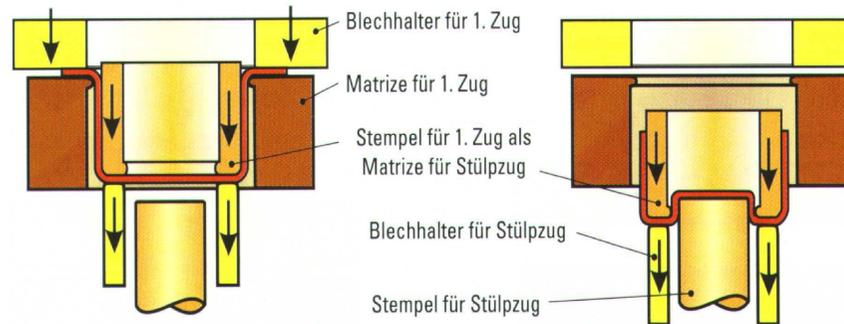


- Estampagem em dois ou mais Passos



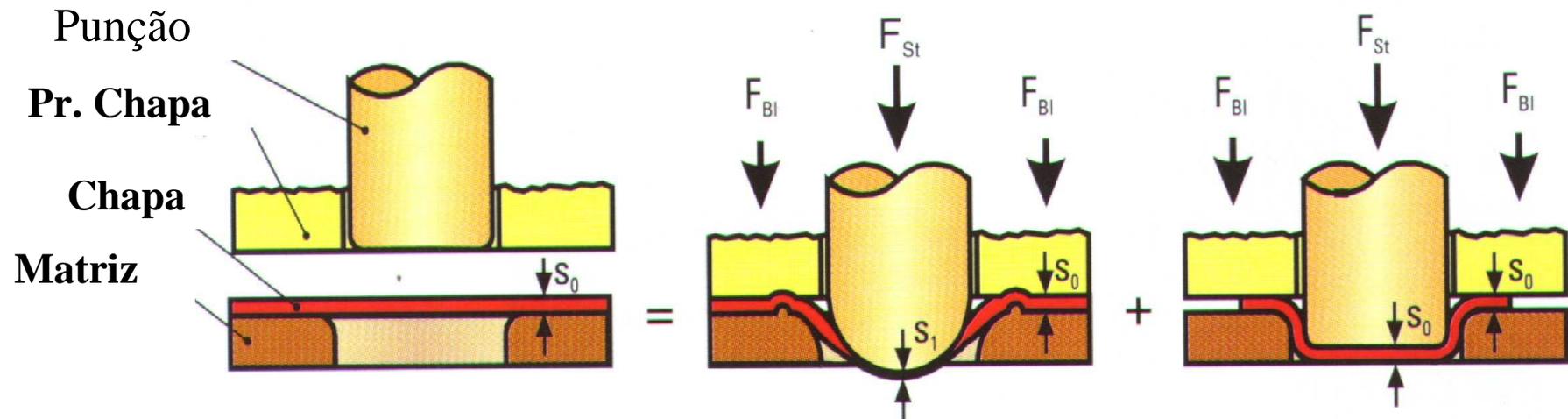
▲ Abb. 2.1.11 Tiefziehen im Weiterzug mit Teleskopstempel

- Repuxo



Processo de Estampagem

Estampagem = Estiramento + Estampagem Profunda



No processo de estampagem ocorre simultaneamente o estiramento e a estampagem profunda

Problemas:

**Rupturas
Ondulações**

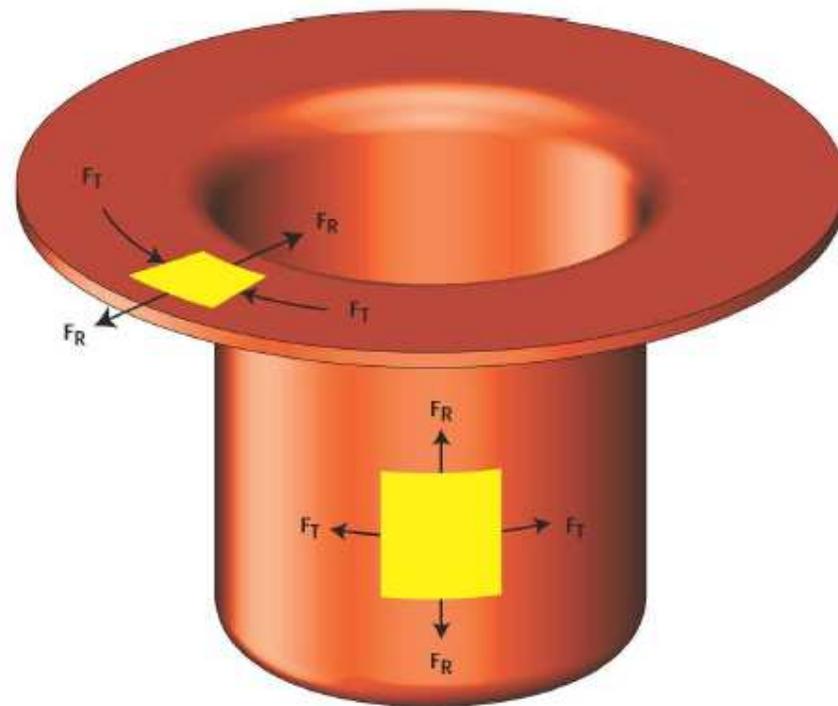
**Rugas
Retorno elástico**

Problemas na Estampagem

- **Transmissão de Força é indireta!**
 - Chapa deve haver Rigidez para Transmissão de Força
 - Deve haver Flexibilidade para Conformação de Flange
 - > Perigo de Rupturas!
 - > Compromisso para Escolha de Material!
- **Espessura é muito pequena em Comparação com as outras Dimensões!**
 - Instabilidade do Processo: Rugas e Retorno elástico
- **Grande Superfícies em Relação com o Volume**
 - Grande Influência de Atrito e Desgaste.

Deep Drawing Process

Problem: Formation of Wrinkles in the Flange



- By exceeding buckling instability of the sheet material, the tangential compressive stresses produce wrinkles in the flange

Deep Drawing Process

Failures in Deep Drawing



Earing

⇒ Plane anisotropy



Eccentric position of circular blank

⇒ Mistake of user



Cup base fracture

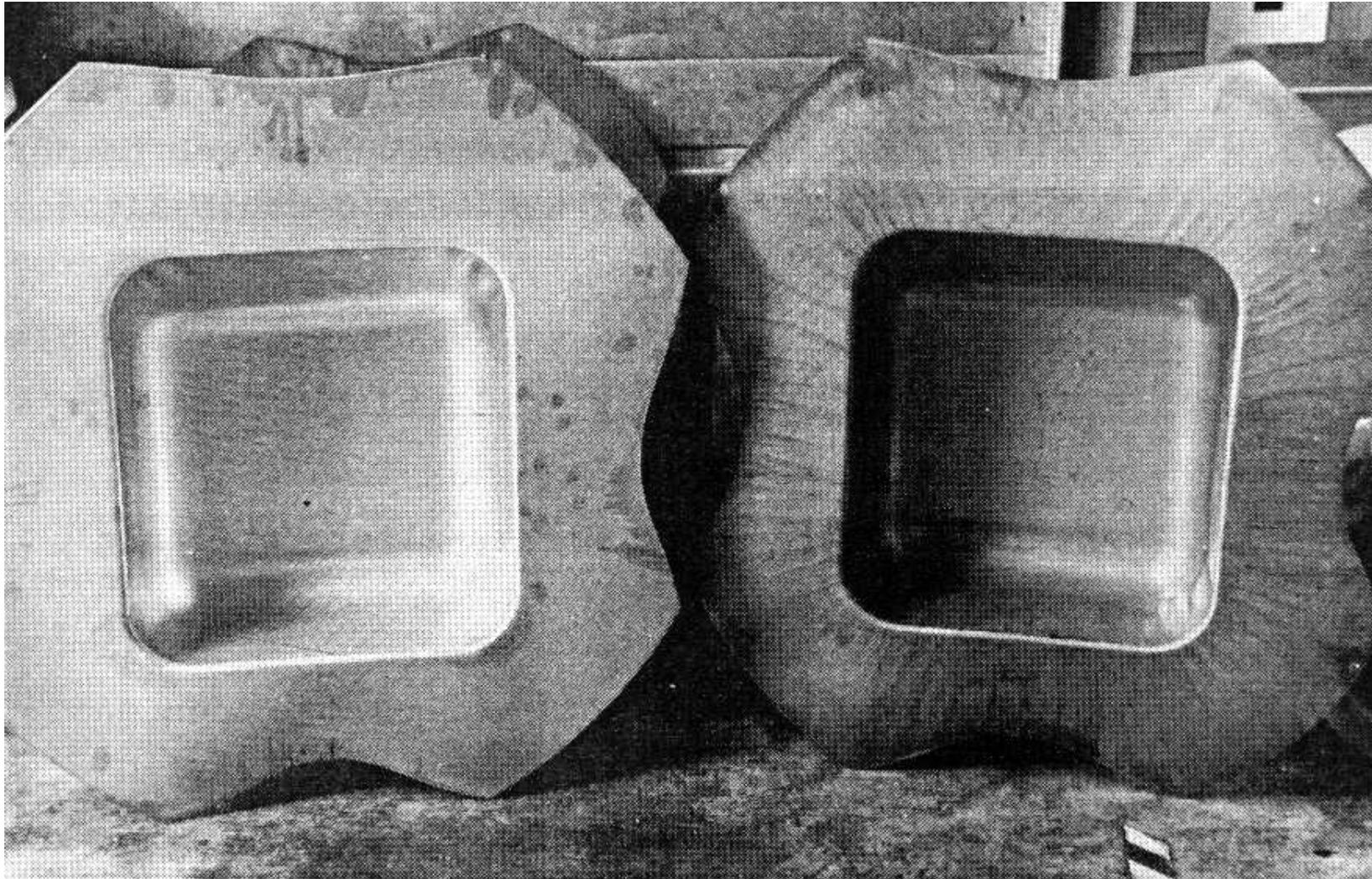
⇒ Exceeding of tensile
strength of the material



Lip formation

⇒ Increased strain
hardening of the
material in edge
region

Influência da Lubrificação



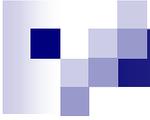


DIAGRAMA LIMITE DE CONFORMAÇÃO (DLC)

- A superfície de uma chapa metálica recoberta com uma malha de círculos é submetida a diferentes tipos de deformações no plano da chapa, oriundas de um processo de estampagem. Quando a chapa é deformada os círculos tornam-se distorcidos passando a forma elíptica.
- Os eixos máximos e mínimos de uma elipse representam a direções das duas deformações principais na estampagem.
- Através da variação percentual dos comprimentos dos eixos calcula-se as deformações principais
- O domínio das deformações no DLC englobam desde o embutimento profundo até a condição em que prevalece o estiramento puro

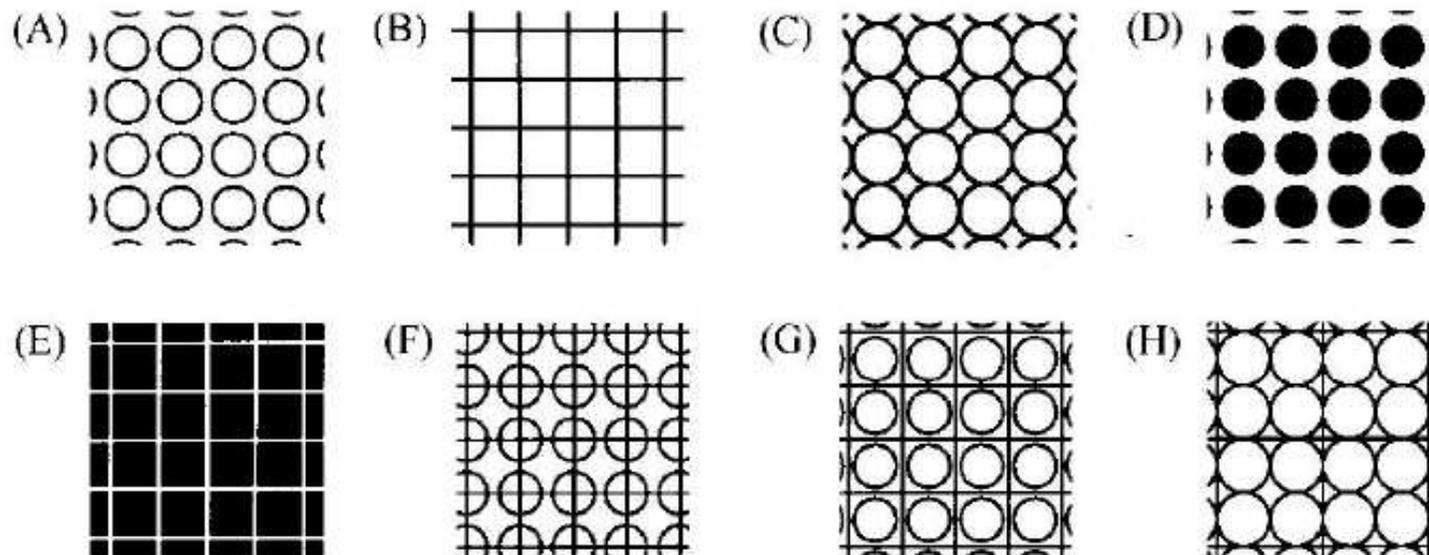
Técnicas Normalmente Usadas em Gravação de Redes de Círculos

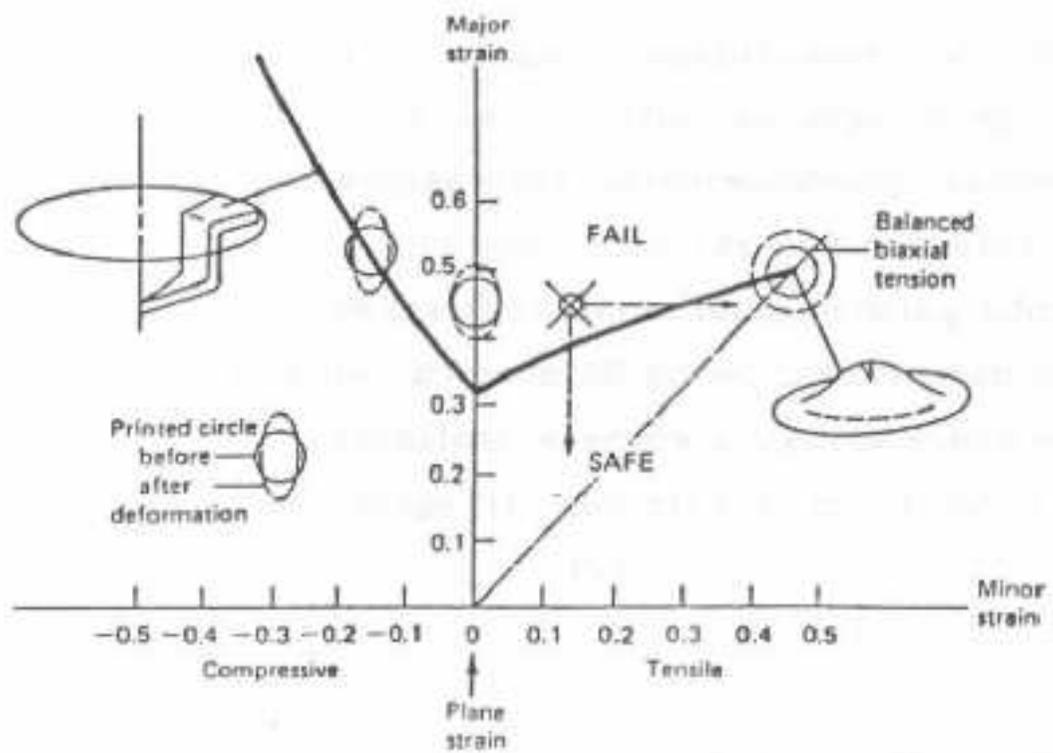
Corrosão Eletroquímica

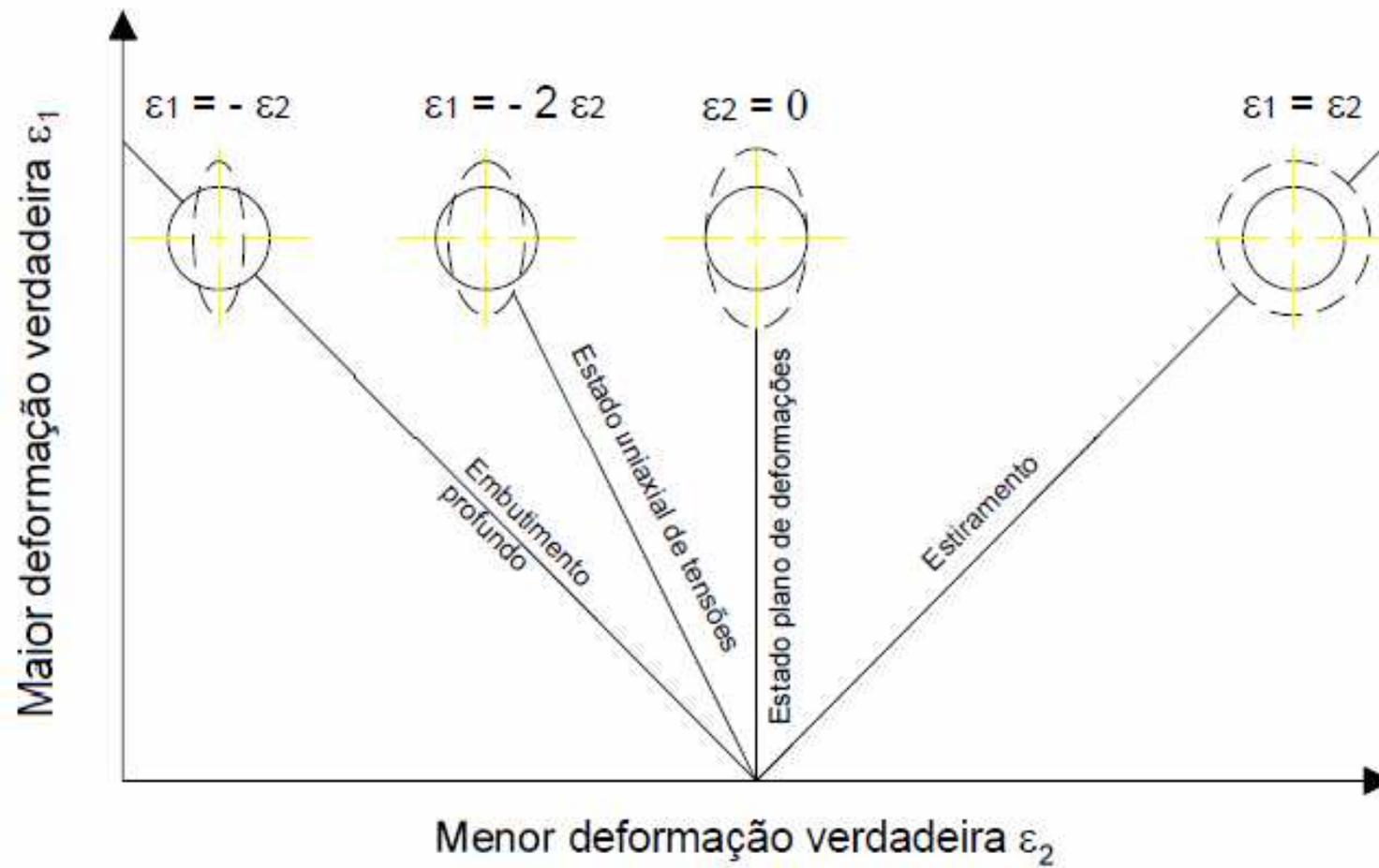
Serigrafia

Roto-gravura

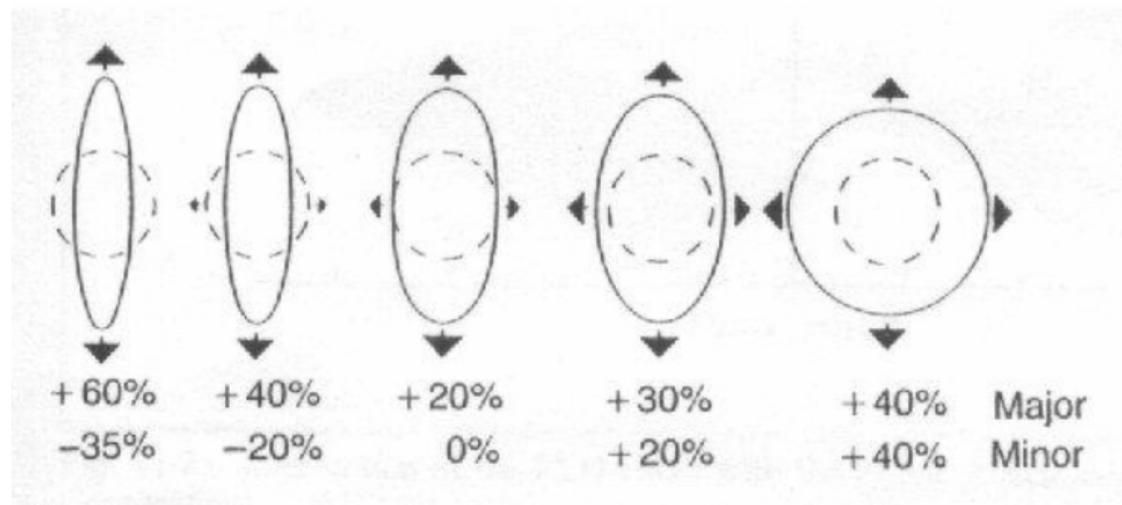
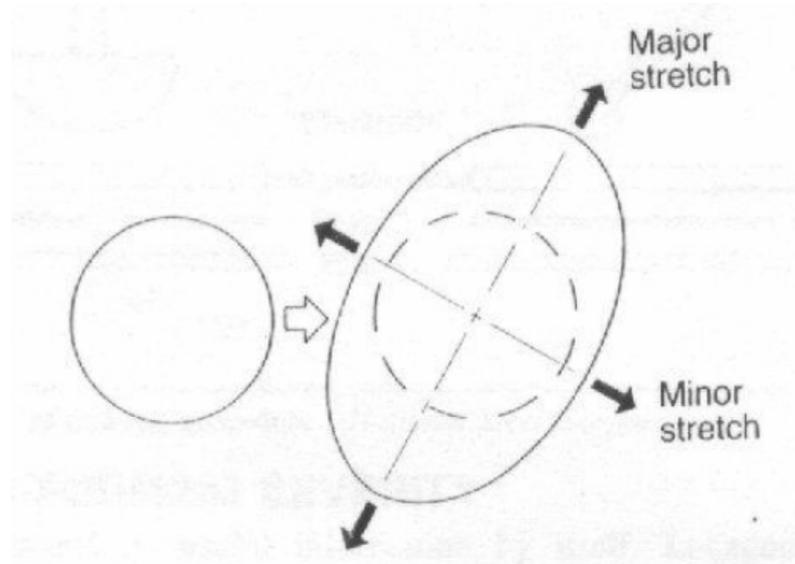
Tipos de malhas:







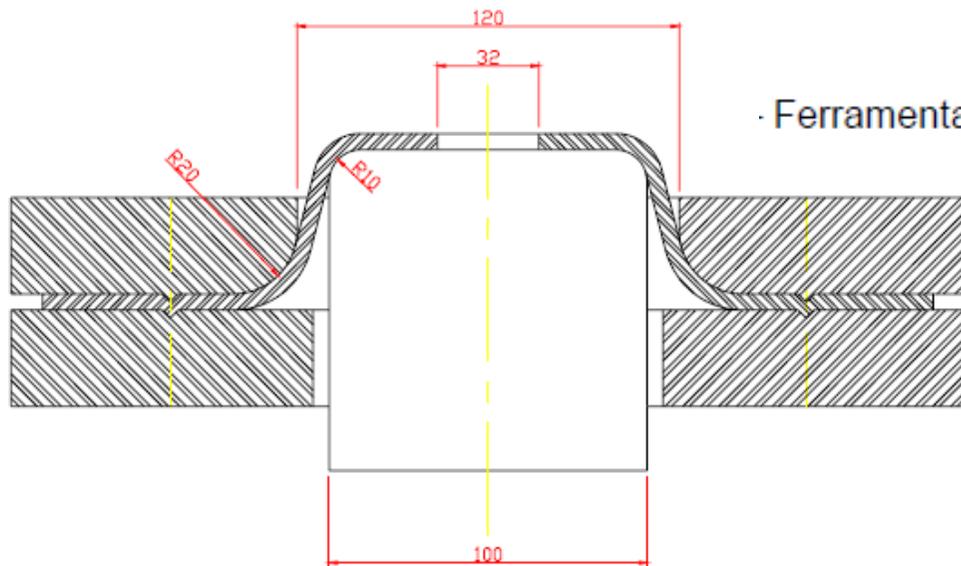
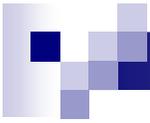
Medidas de deformações



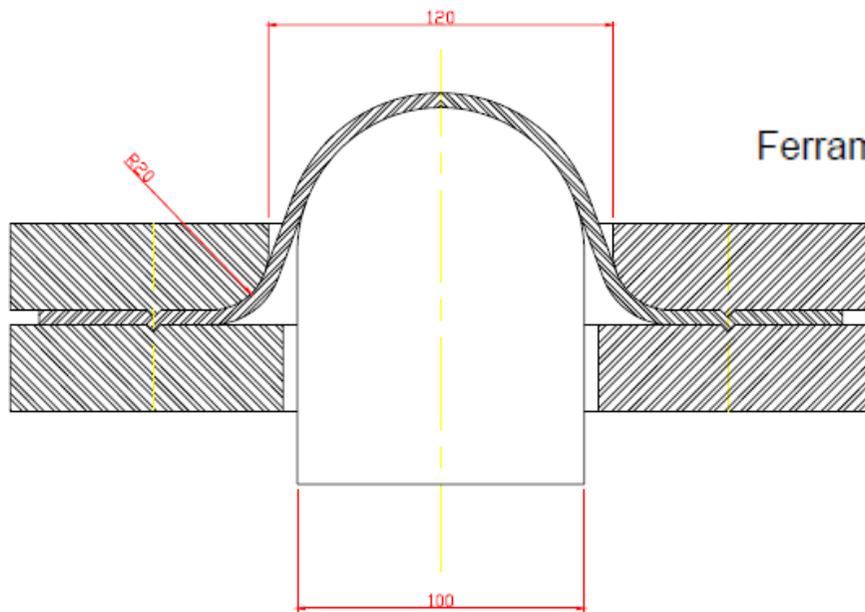


Existem na literatura diversos ensaios com a finalidade de determinar o DLC

- Testes de tração uniaxial, juntamente com os testes propostos por Erichsen, Fukui e Swift;
- Teste proposto por Marciniak (1967) que usa um punção de fundo plano;
- Atualmente, muito usado o teste proposto por Nakazima (1968) que usa um punção hemisférico e CDPs de diferentes geometrias.



- Ferramental utilizado para execução do teste Marciniak



Ferramental utilizado para execução do teste Nakazima

Porta Punção

Inserto

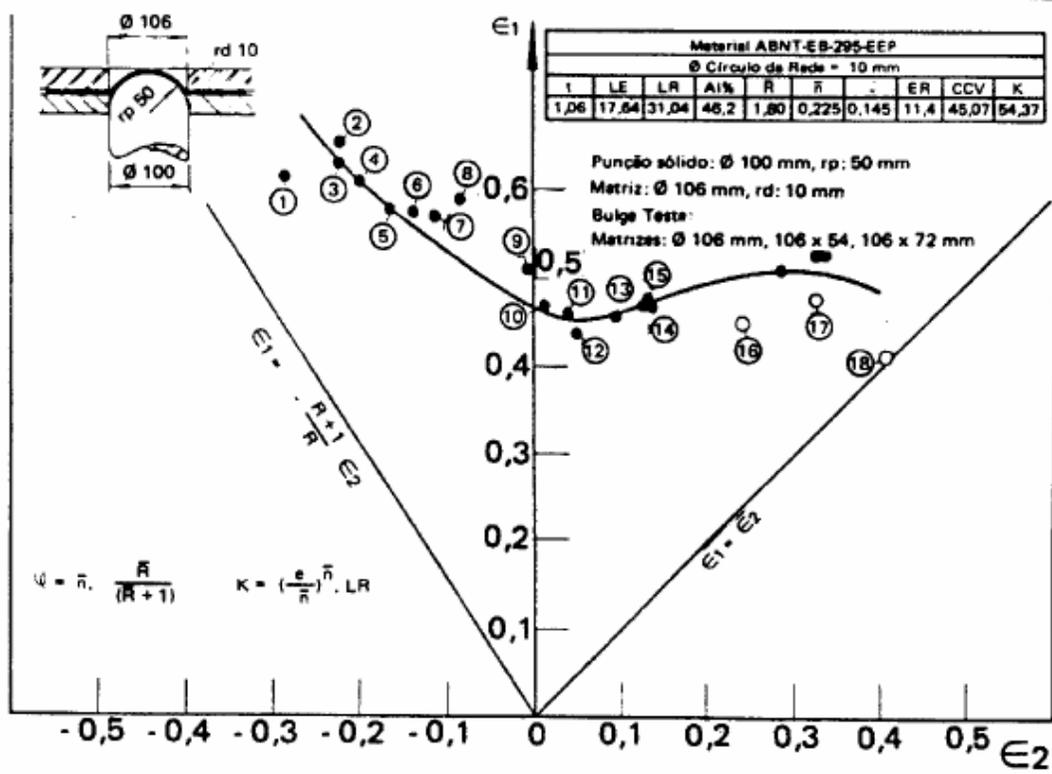
Prensa Chapa

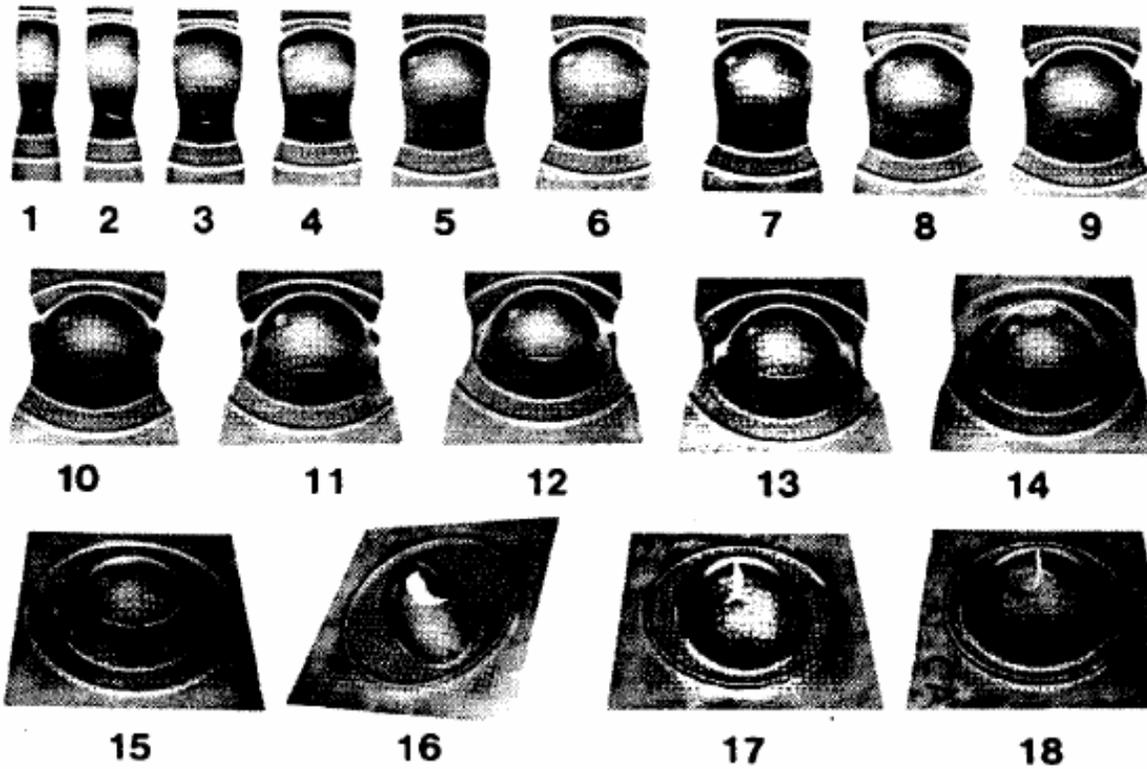
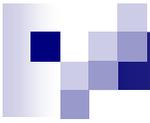
Punção

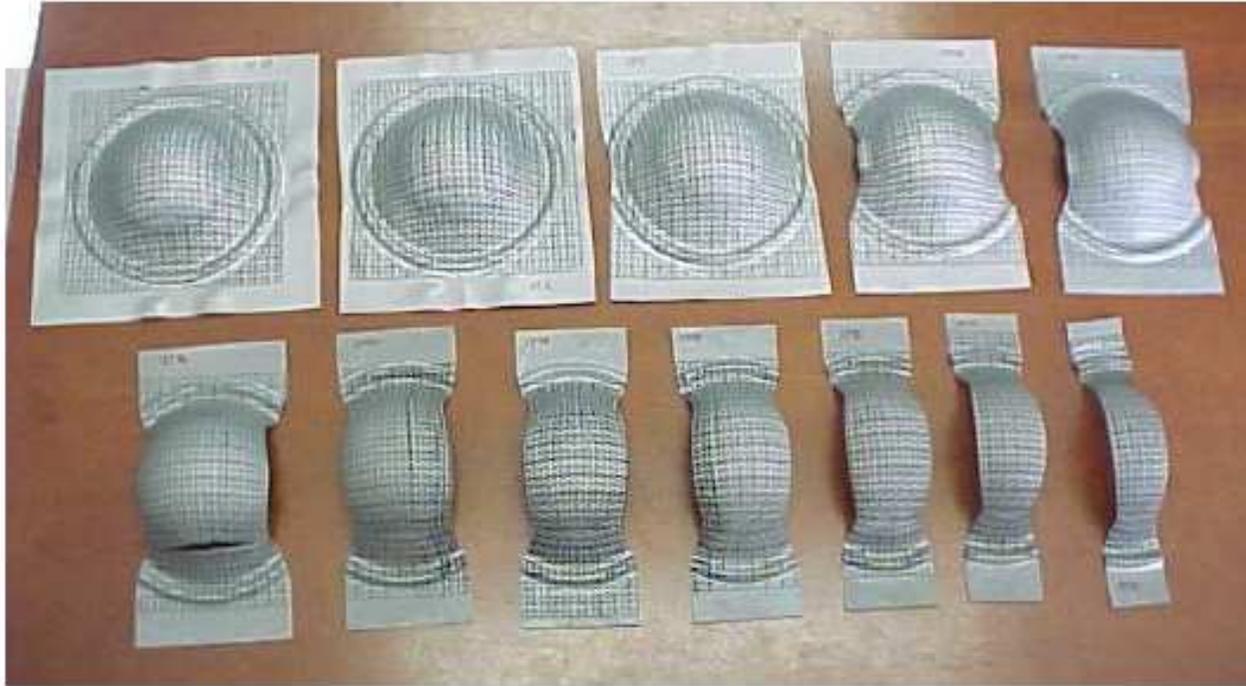
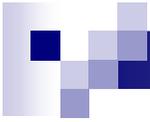
Matriz



Figura 4.2 – Ferramenta utilizada no ensaio de Nakajima.







Strains In Sheet-Metal Forming

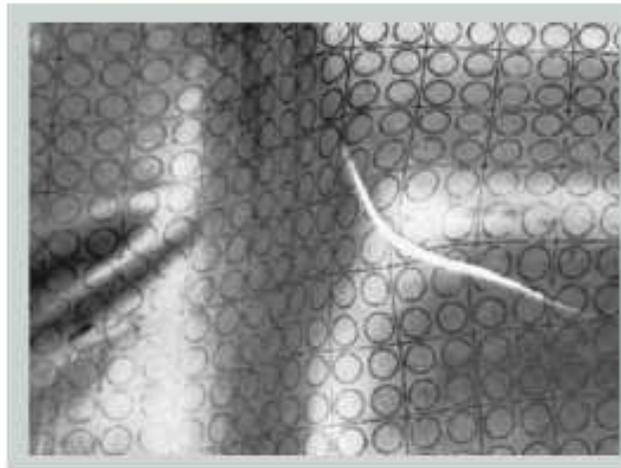


FIGURE 7.67 An example of the use of grid marks (circular and square) to determine the magnitude and direction of surface strains in sheet-metal forming. Note that the crack (tear) is generally perpendicular to the major (positive) strain.

Medição de deformações

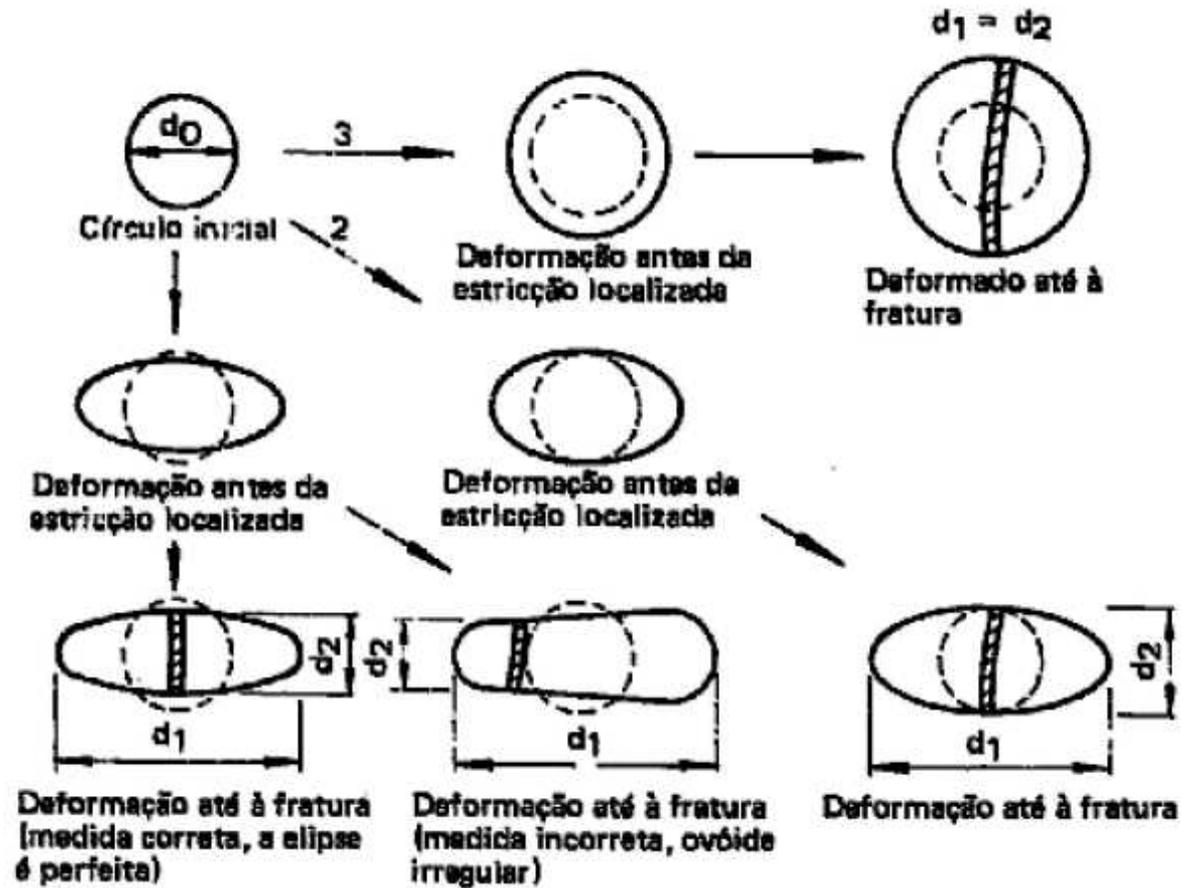
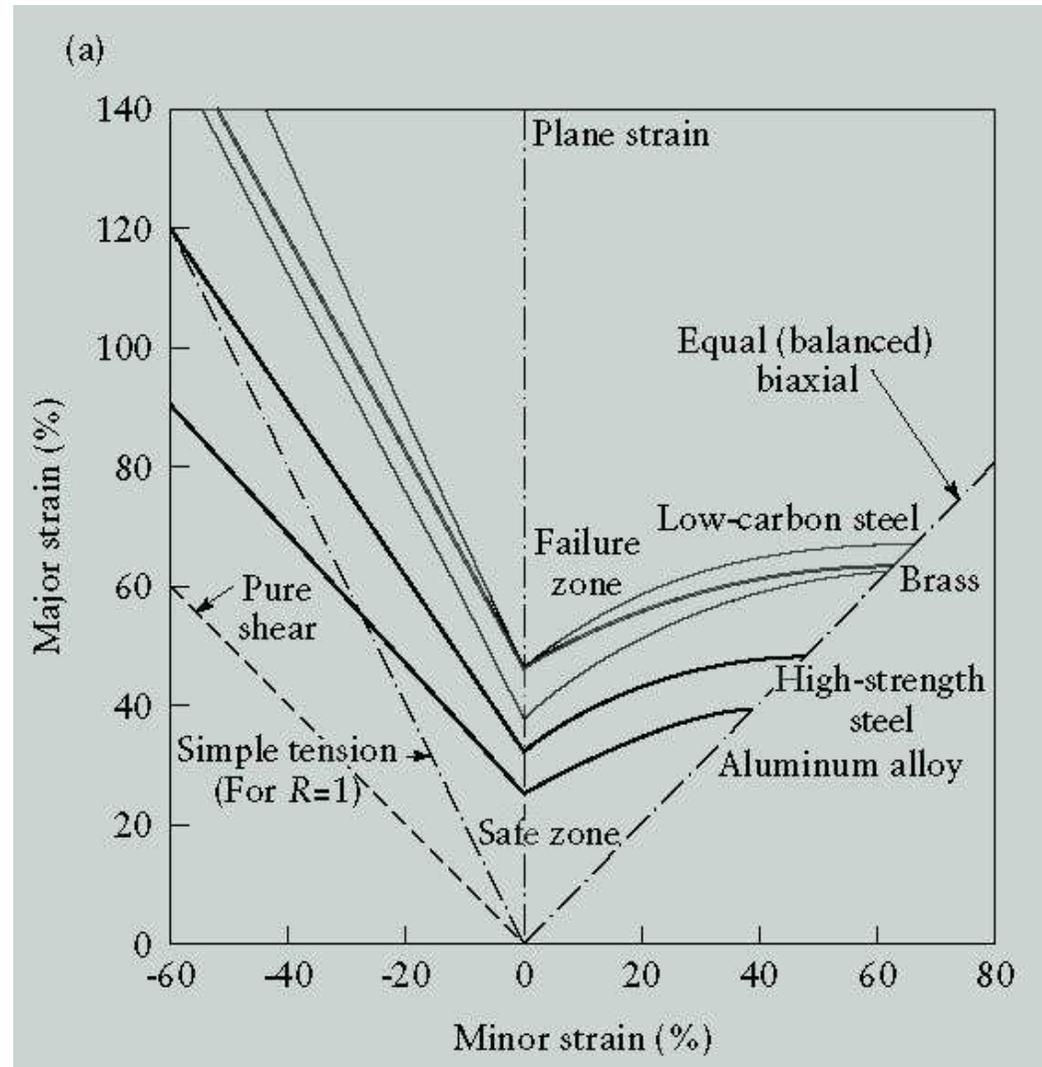


Diagrama DLC de vários materiais

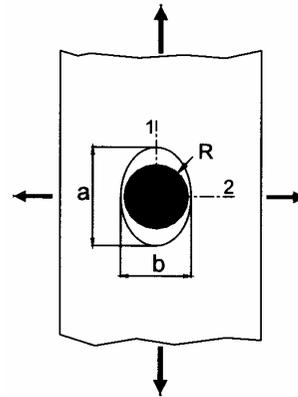


Exemplo 1

Considere uma operação de estampagem onde se marcaram grelhas de círculos com um diâmetro inicial igual a 3 mm, numa estampa com 2 mm de espessura de um aço de estampagem. Numa determinada zona da peça as medições experimentais efetuadas indicaram que um dado círculo transformou-se numa elipse com o eixo maior e o eixo menor medindo respectivamente 3,4 e 3,2 mm.

Dado: $\bar{\sigma} = 420\bar{\varepsilon}^{0,28}$ MPa. Nessas condições e desprezando quaisquer fenômenos de anisotropia, determine para esse ponto:

- O valor da espessura da chapa após deformação;
- O valor da deformação efetiva e da tensão efetiva;
- O valor do quociente σ_2/σ_1 e as tensões principais. Admita que o estado de tensão é plano e que o carregamento é proporcional $\sigma_2/\sigma_1 = \text{cte}$.





Referências Adicionais

- Dieter, G.E. Mechanical metallurgy, 1988, SI metric edition, McGraw-Hill, ISBN 0-07-100406-8.
- Rodrigues, J. e Martins, P. Tecnologia Mecânica – Tecnologia da Deformação Plástica, Vol. 1 e 2 . Escolar Editora, 2ª Edição, 2010.
- Ravilson Antonio Chemin Filho. Avaliação das deformações de chapas finas e curvas CLC para diferentes geometrias de punções. Dissertação de Mestrado, UFPR, julho 2004.
- Lange, K. Forming Handbook. New York: McGraw Hill and SME, 1993.
- Marcondes, P. Curvas Limite de Conformação. Laboratório de Conformação Mecânica (Labconf), DEMEC-UFPR.
- Richiter, A. Comparação dos resultados de diferentes testes para determinação da curva limite de conformação. VI Conferência Nacional de Conformação de Chapas.
- Simulation Techniques in Manufacturing Technology – Sheet Metal Forming I – Lecture 3. WZL/Fraunhofer IPT.