



Labconf

Laboratório de Conformação Mecânica - UFPR



Propriedades Mecânicas Fundamentais

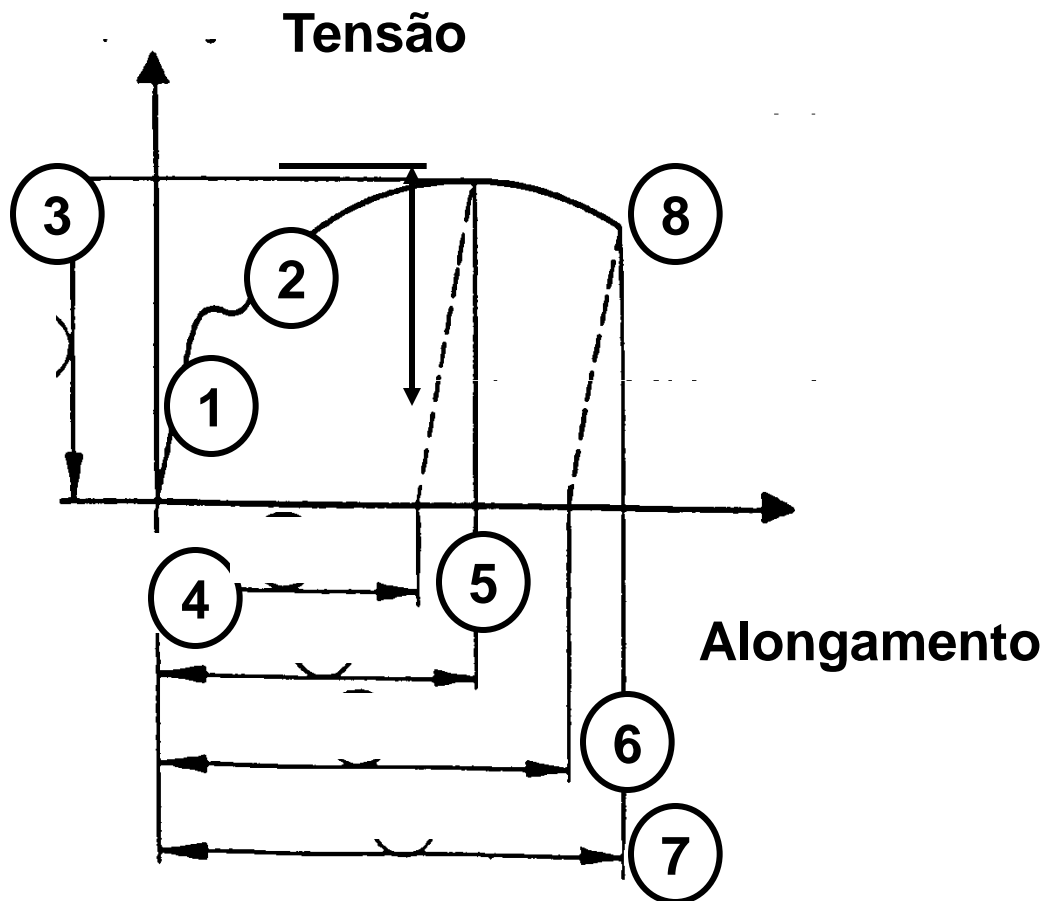
**Prof. Paulo Marcondes, PhD.
DEMEC / UFPR**

Deformação Plástica: Aspectos fenomenológicos

Curva $\sigma \times \epsilon$

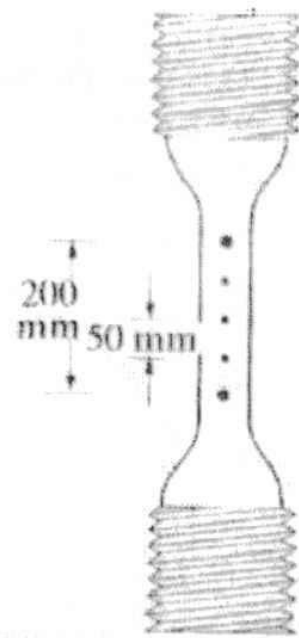
- Limite de escoamento;
 - Limite de resistência;
 - Ductilidade (alongamento) e
-
- Dureza
 - *Brinell*: NBR NM-187 e ISO 6506 (alguns casos a ASTM E-10);
 - *Rockwell*: NBR NM-146 e ISO 6508 (alguns casos a ASTM E-18);
 - *Vickers*: NBR NM-188 e ISO 6507 (alguns casos a ASTM E-92).

Curva de tração

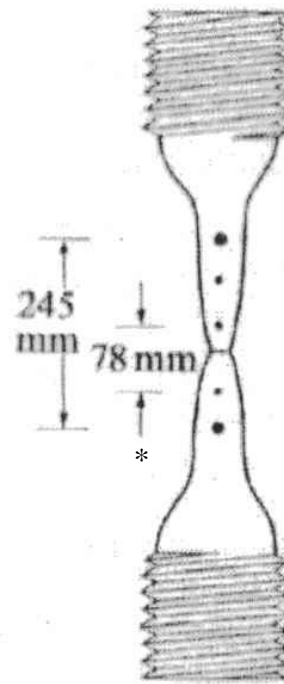


- ⌘ 1 Modulo de Young (Lei de Hooke)
- ⌘ 2 Tensão de Escoamento
- ⌘ 3 Limite de Resistência
- ⌘ 4 Alongamento na Força máxima (Along. uniforme)
- ⌘ 5 Alongamento total na Força máxima
- ⌘ 6 Alongamento de Ruptura
- ⌘ 7 Alongamento total de Ruptura
- ⌘ 8 Limite de Ruptura

Alongamento (base de medida)



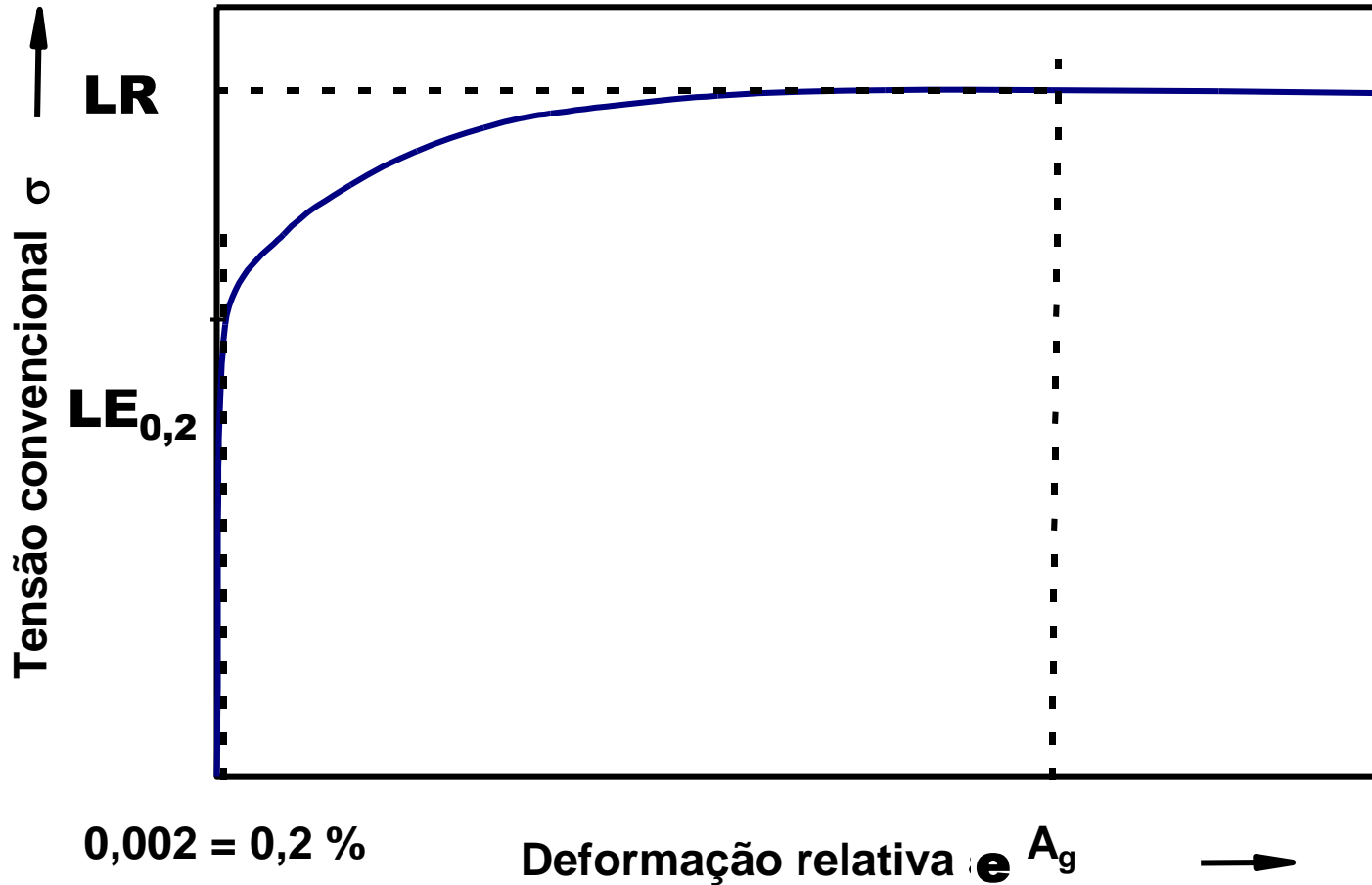
Comprimento
de medida
200 mm
50 mm



Alongamento
22,5%
56,0% *

$$\Delta L = L_f - L_i / L_i$$

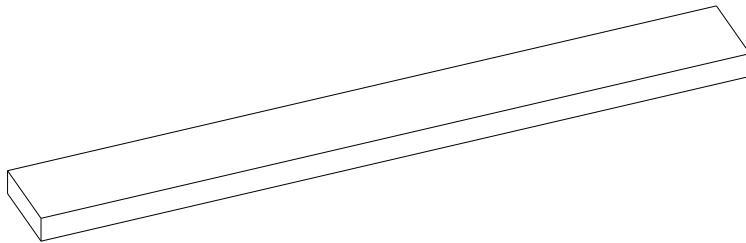
A curva tensão vs. deformação relativa ou curva convencional (material dúctil)



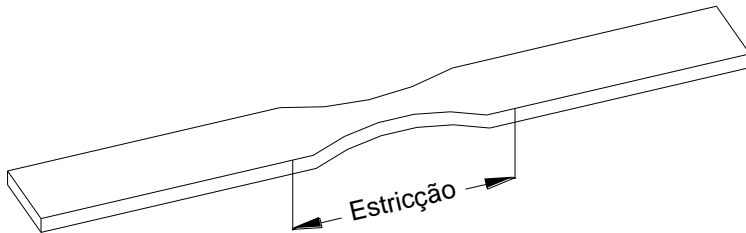
A curva tensão vs. deformação relativa ou curva convencional



Deformação Homogênea



Deformação Não-Homogênea



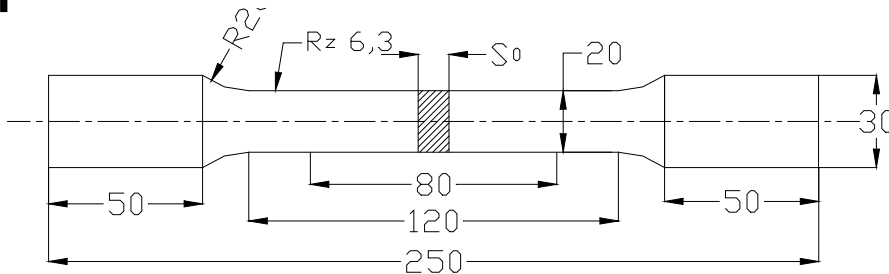
A deformação de metais ocorre em duas fases diferentes:

deformação homogênea até chegar a uma força máxima e

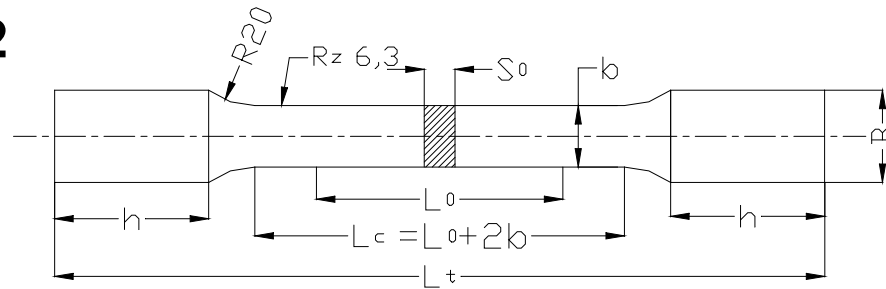
deformação não-homogênea depois. Nesta segunda fase a deformação é localizada no ponto de estricção.

Ensaio de tração / corpos de prova

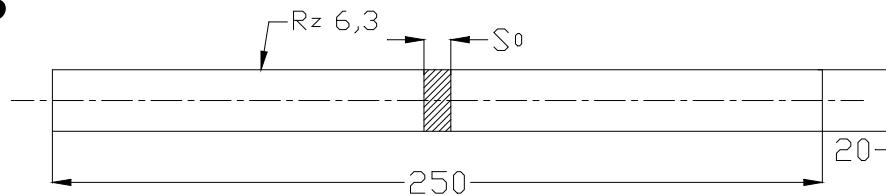
1



2



3



Corpos de prova para o ensaio de tração conforme DIN EN 10 002.

Os cantos cisalhados devem ser fresados para eliminar trincas que podem ocorrer durante o corte.

A curva tensão vs. deformação relativa ou curva convencional

Esta curva pode ser obtida em diferentes ensaios mecânicos. Para chapa geralmente é obtida no ensaio de tração.

Tensão convencional (ou tensão nominal):

A tensão no eixo Y desta curva é denominada tensão convencional. Ela é calculada através da seguinte expressão:

$$\sigma_{\text{verdad.}} = \frac{F}{S_0} \quad \text{ou}$$

σ : tensão,
 F : força e
 S_0 : seção inicial do corpo de prova.

$$\sigma_{\text{verdad.}} = \sigma_{\text{eng.}} \times (1 + e/100)$$

Nesta expressão não é considerada a alteração da seção do corpo de prova durante o ensaio!

A curva tensão vs. deformação relativa ou curva convencional



Deformação relativa:

A deformação no eixo X deste diagrama é a deformação relativa. Ela é o quociente do comprimento inicial do corpo de prova e do alongamento durante o ensaio:

$$e = \frac{l_1 - l_0}{l_0} = \frac{\Delta l}{l_0}$$

com:

e: deformação relativa,
 l_0 : comprimento inicial do corpo de prova,
 l_1 : comprimento atual do corpo de prova e
 Δl : alongamento do corpo de prova.

A curva tensão vs. deformação relativa ou curva convencional



A curva convencional permite obter facilmente o limite de escoamento (LE ou $LE_{0,2}$), o limite de resistência (LR), o alongamento uniforme (A_g) e o alongamento total (A).

Os valores retirados desta curva são usados no dimensionamento de componentes para máquinas etc.

Eles não podem ser usados em cálculos para a avaliação do comportamento destes materiais em processos de conformação mecânica usando os métodos conhecidos do cálculo de força ou a simulação.

A curva tensão vs. deformação relativa ou curva convencional e a deformação real



Para o planejamento de processos de conformação mecânica não é suficiente saber a tensão que é necessária para iniciar o escoamento do material

=> os materiais encruam durante os processos.

É necessário saber a tensão necessária para manter o escoamento em andamento em qualquer momento de processo.

=> Tensão de escoamento ou tensão real (k_f)

A tensão de escoamento ou tensão real é geralmente representada em um diagrama tensão de escoamento vs. deformação real.

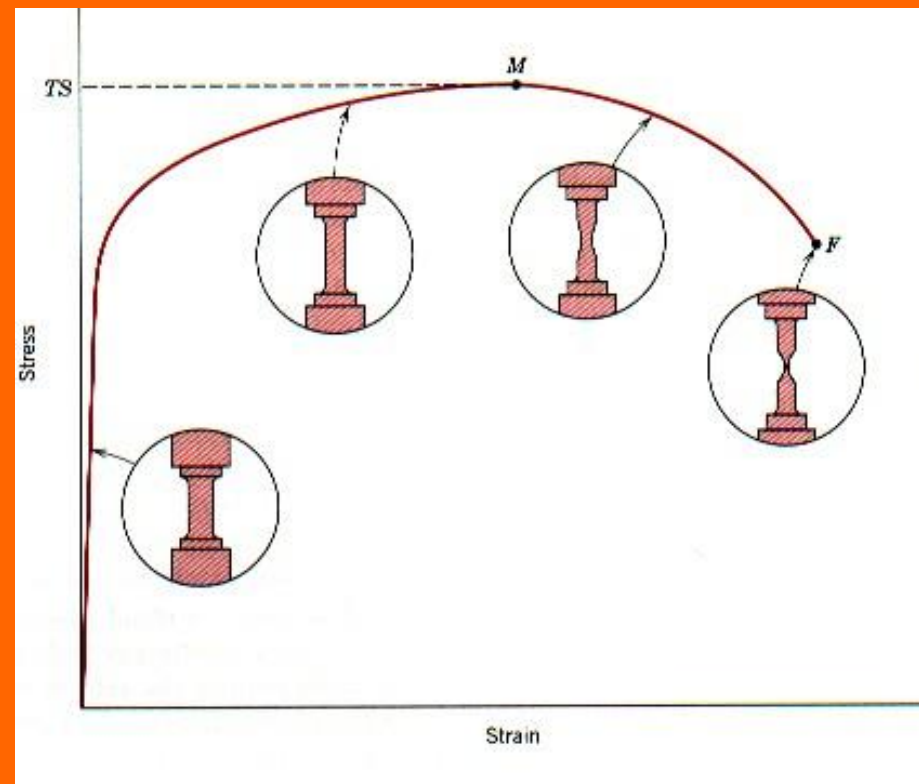
=> A curva neste diagrama é chamada a curva de escoamento.

Comportamento dos metais quando submetidos à tração

Resistência à tração

Dentro de certos limites,
a deformação é proporcional
à tensão (a lei de Hooke é
obedecida)

$$\text{Lei de Hooke: } \sigma = E \varepsilon$$



Curva σ x ϵ verdadeira e convencional

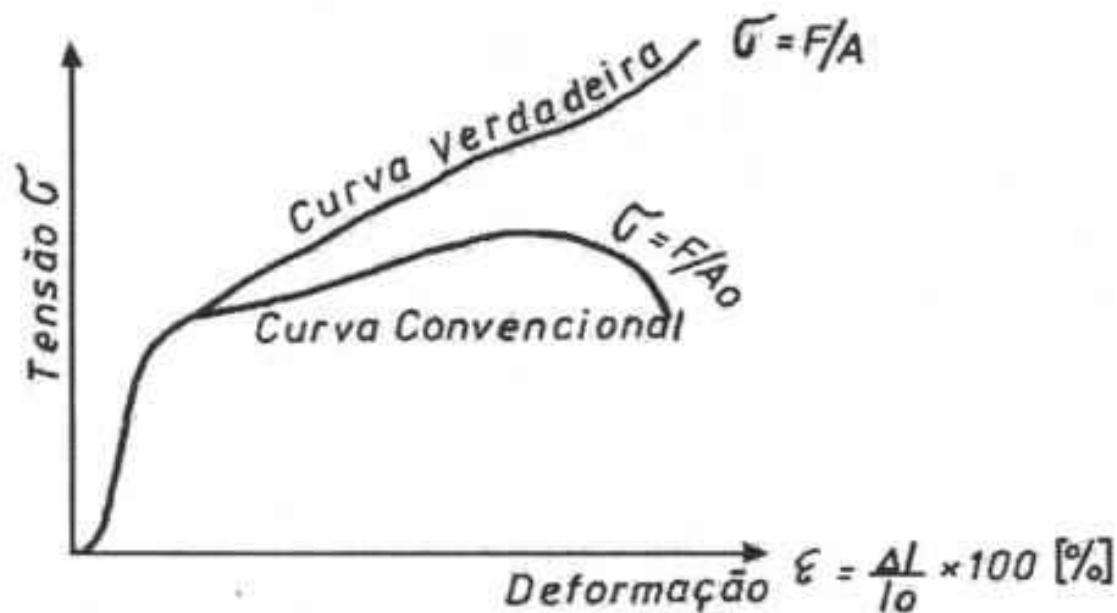


Figura 2.16 - Diagrama tensão-deformação com a curva verdadeira e a curva convencional.

Coefficiente de Encruamento



Conformabilidade dos Metais:

Coeficiente de resistência (K)

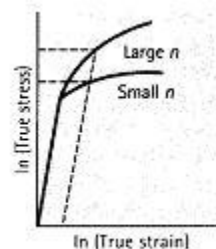
Coeficiente de encruamento (n)

$$\sigma = K \varepsilon^n \quad \text{ou} \quad \ln \sigma = \ln K + n \ln \varepsilon$$

onde:

K é igual a tensão quando a deformação é igual a 1 e

n é a inclinação da reta.

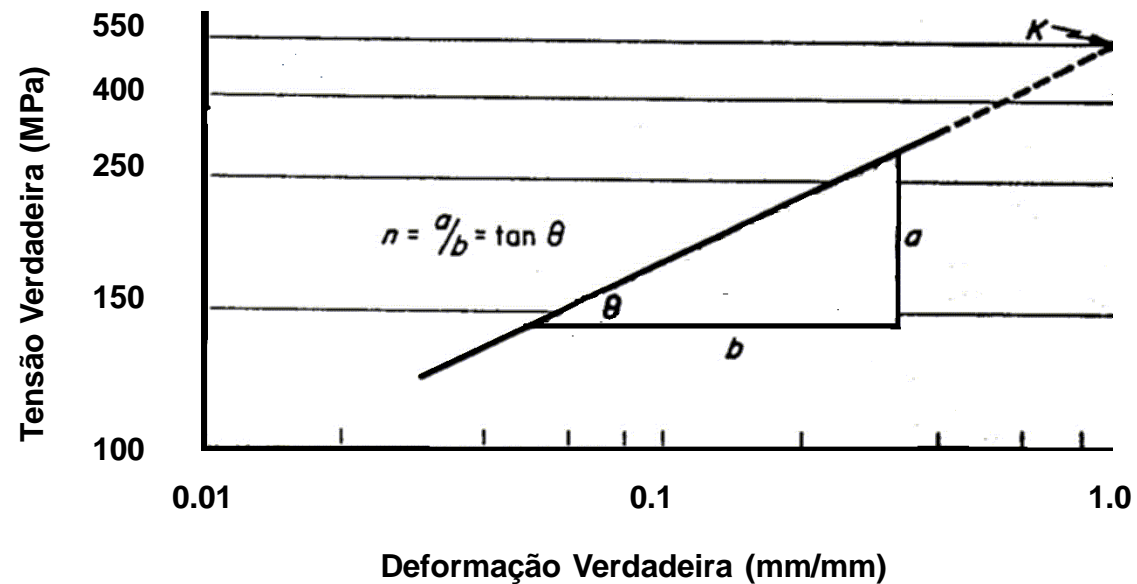


The true stress–true strain curves for metals with large and small strain-hardening coefficients. Larger degrees of strengthening are obtained for a given strain for the metal with the larger n .

COEFICIENTE DE ENCRUAMENTO

⌘ O coeficiente de encruamento n :

$$\log \sigma = \log K + n \log \varepsilon$$



A curva de escoamento ou curva real

Os dados para a construção da curva de escoamento também podem ser obtidos no ensaio de tração. **A diferença é a forma de avaliação dos dados gravados durante o ensaio.**

A tensão de escoamento é calculado usando-se as seguintes expressões:

$$k_f = \frac{F}{S_1}$$

$$S_1 = \frac{S_0}{1+e}$$

com:

**S_0 : seção inicial,
 S_1 : seção atual e
 e : deformação.**

A deformação real é calculado usando-se a seguinte expressão:

$$\varepsilon = \ln(1+e)$$

com:

ε : deformação real,

e : deformação relativa.

True Stress and Strain:

- ⌘ The true stress (σ) uses the instantaneous or actual area of the specimen at any given point, as opposed to the original area used in the engineering values.

$$\sigma = \frac{F}{A}$$

- ⌘ The true strain (ε) is defined as the instantaneous elongation per unit length of the specimen.

$$\varepsilon = \int_{L_0}^L \frac{dL}{L} = \ln \frac{L}{L_0}$$

- ⌘ The relationship between the true and engineering values is given by:

$$\sigma = \sigma_e (1 + e)$$

$$\varepsilon = \ln(1 + e)$$

A curva de escoamento ou curva real

Os diagramas das curvas de escoamento são representados em duas formas:

1. com eixos lineares,
2. com eixos logarítmicos.

Vantagem da segunda opção é que ela permite em certos casos a leitura fácil do índice de encruamento!

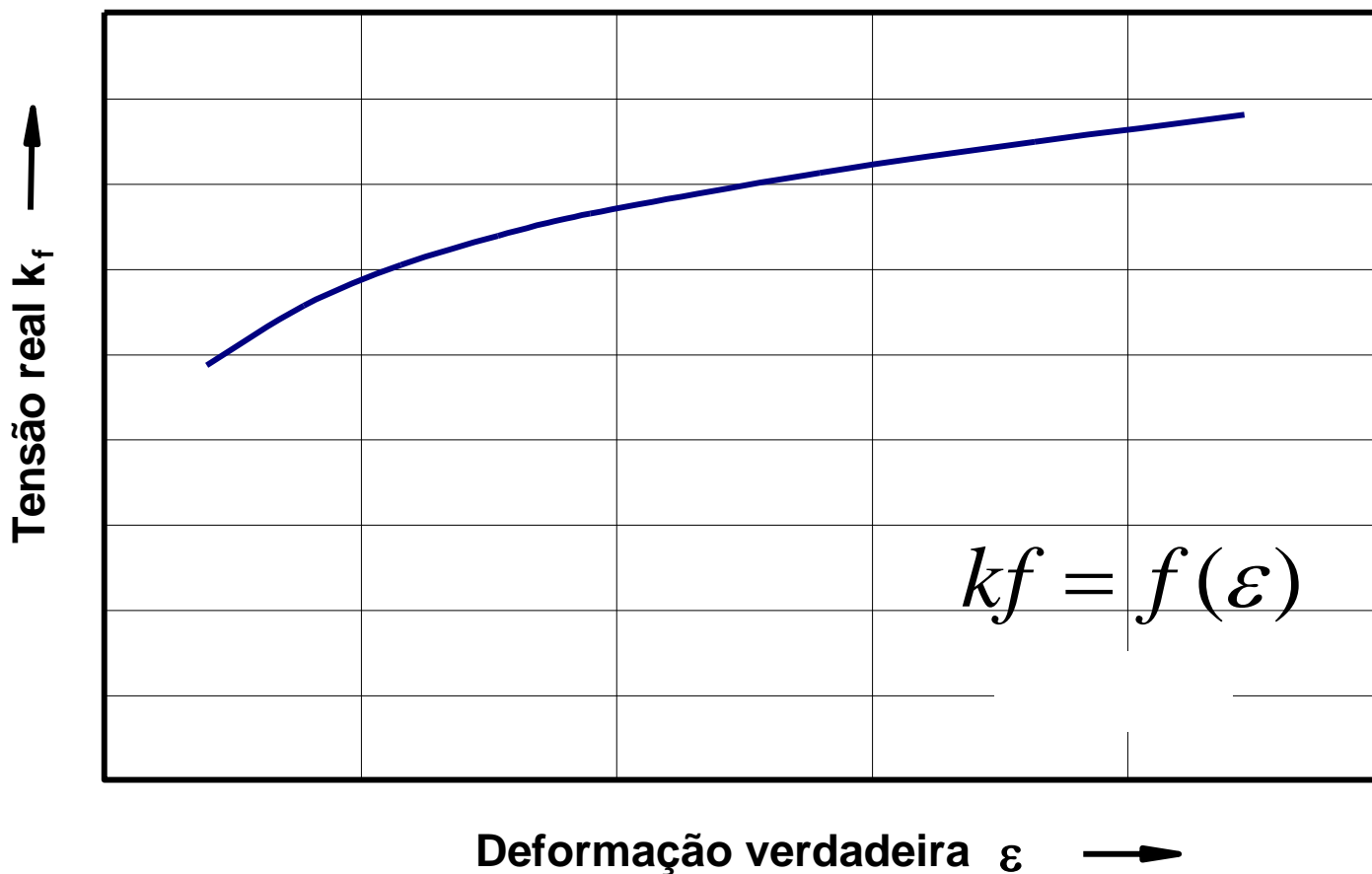
(p. ex. aços de baixo carbono: conforme ABNT 5915, DIN 1623, DIN EN 10130)

No caso destes materiais a curva de escoamento pode ser descrita usando-se a fórmula de HOLLOMON / LUDWIK:

$$k_f = K \varepsilon^n$$

$$\log k_f = \log K + n \log \varepsilon$$

A curva de escoamento ou curva real na representação com eixos lineares



Aspectos gerais da conformação



Taxa de Deformação:

$$\varepsilon = d\varepsilon / dt = 1/h \times dh / dt = v/h$$

Constante proporcional (C)

Coeficiente de sensibilidade à taxa de deformação (m)

$$\sigma = C \varepsilon^m \quad \text{ou} \quad \ln \sigma = \ln C + m \ln \varepsilon$$

onde:

C é igual à tensão quando a taxa de deformação é igual a 1 s^{-1} e

m é a inclinação da reta.

Valores típicos de m para aços para conformação:

Trabalho a frio	- $0,05 \subset m \subset 0,05$
Trabalho a quente	$0,05 \subset m \subset 0,3$
Superplasticidade	$0,3 \subset m \subset 0,7$
Fluído Newtoniano (vidro pastoso)	$m = 1$

Avaliação dos dados obtidos / cálculo da curva de escoamento



Os valores do diagrama tensão vs. deformação relativa que é gravado durante o ensaio podem ser convertidos em **tensão real e deformação real** seguindo o esquema abaixo:

<i>i</i>	<i>e</i>	ε	<i>F</i>		S_1	k_f
			mm	N	mm ²	Nmm ²
		$\varepsilon = \ln(1 + e)$			$S_1 = \frac{S_0}{1 + e}$	$k_f = \frac{F}{S_1}$
1	2 %					
2	5 %					
3	7,5 %					
4	10 %					

Cálculo do grau de encruamento conforme SEW 1125



A seguir encontram-se exemplos para as **curvas de escoamento** de duas chapas diferentes:

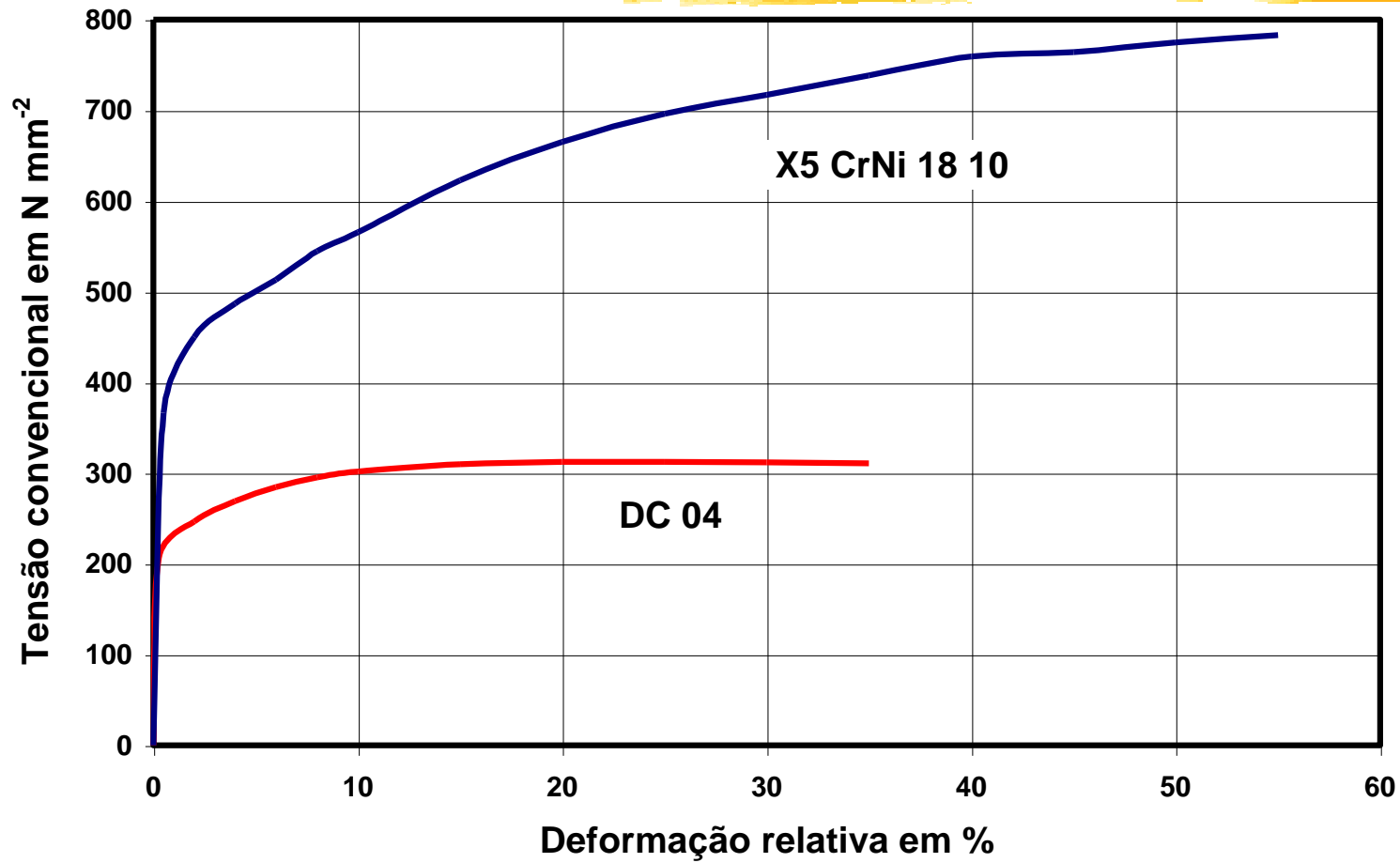
- aço de **baixo carbono EEP** conf. NBR 5915
(DC 04, W.-Nr. 1.0338 conforme DIN EN 10130)
- aço **inoxidável ASTM 304**
(X5 CrNi 18 10, W.-Nr. 1.1403 conforme 17460)

O grau de encruamento, n , pode ser obtido como $\tan \alpha$ da inclinação da curva de escoamento em um papel log-log.

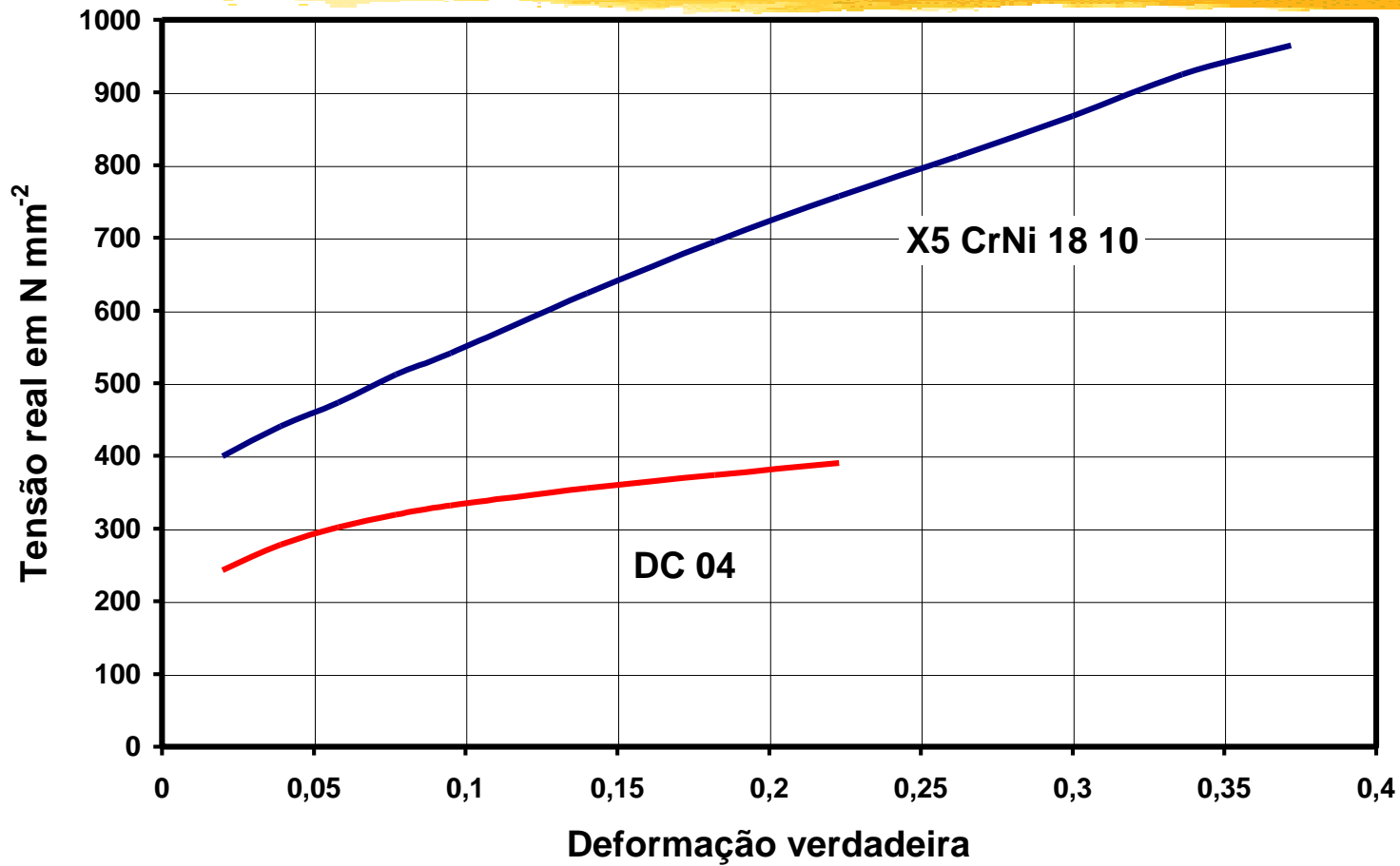
Pode também ser calculado usando-se a expressão da norma SEW 1125:

$$n = \frac{N \sum_{i=1}^N (\ln \varepsilon_{Li} \ln k_{fi}) - \left(\sum_{i=1}^N \ln \varepsilon_{Li} * \sum_{i=1}^N \ln k_{fi} \right)}{N \sum_{i=1}^N (\ln \varepsilon_{Li})^2 - \left(\sum_{i=1}^N \ln \varepsilon_{Li} \right)^2}$$

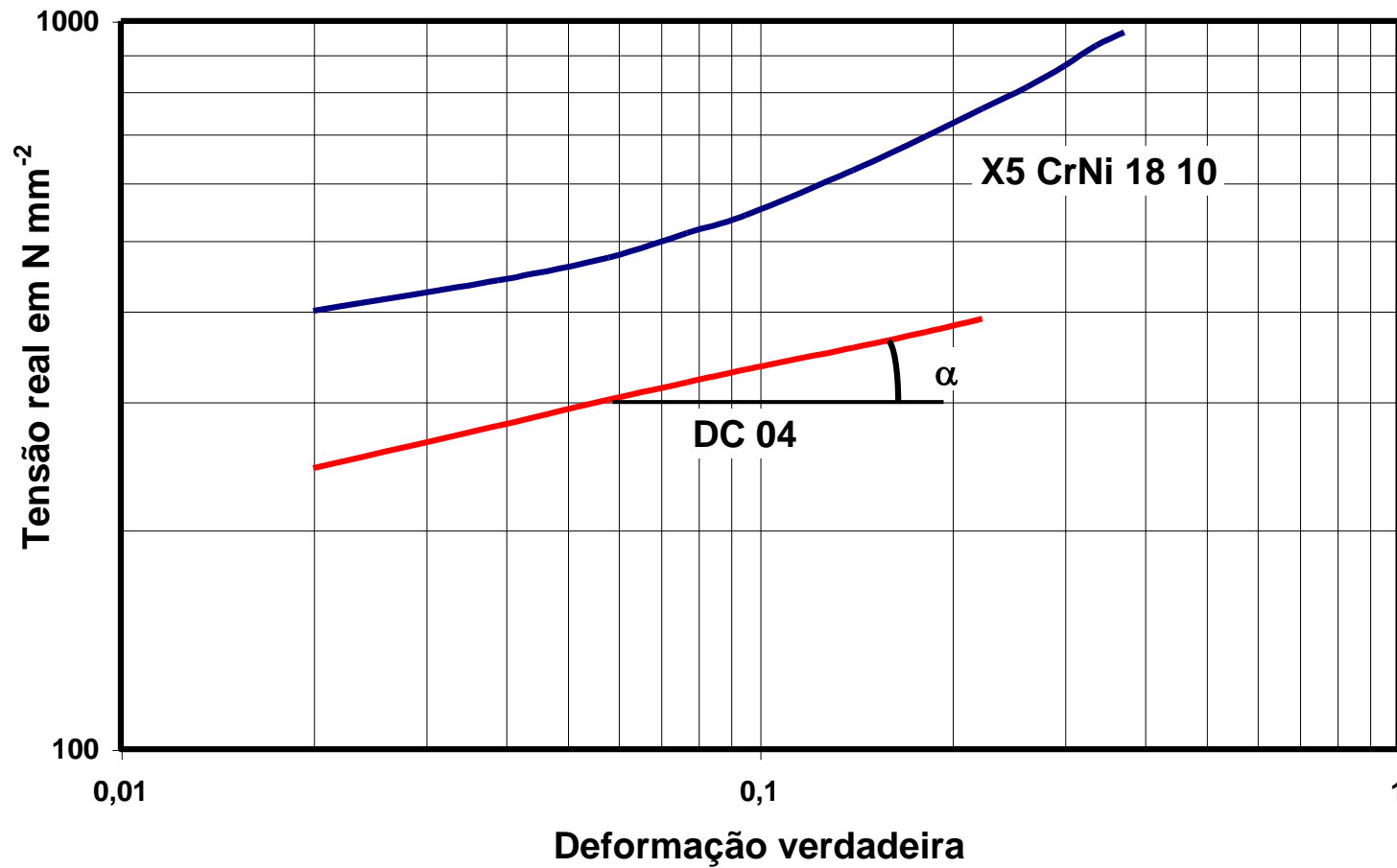
Resultados



Resultados



Resultados



Comparação dos ensaios tração / compressão



Ensaio	Carga	Atrito	Até ϵ
Tração	Tração uniaxial	não	0,4
Compressão	Compressão uniaxial	sim	1,0
Bulge teste	Estiramento biaxial	não	0,7

Textura e anisotropia

Textura: presença de **orientações preferenciais dos grãos cristalinos** causada pela deformação plástica ou pela recristalização e devida ao alongamento e rotação dos grãos

Fibragem Mecânica: **alongamento** dos grãos cristalinos e **alinhamento** de partículas de acordo com o modo de escoamento

Um material com **fibragem mecânica** não necessariamente apresenta **textura**

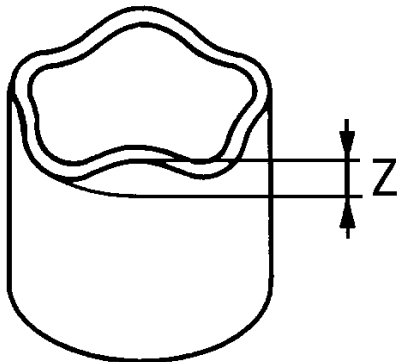
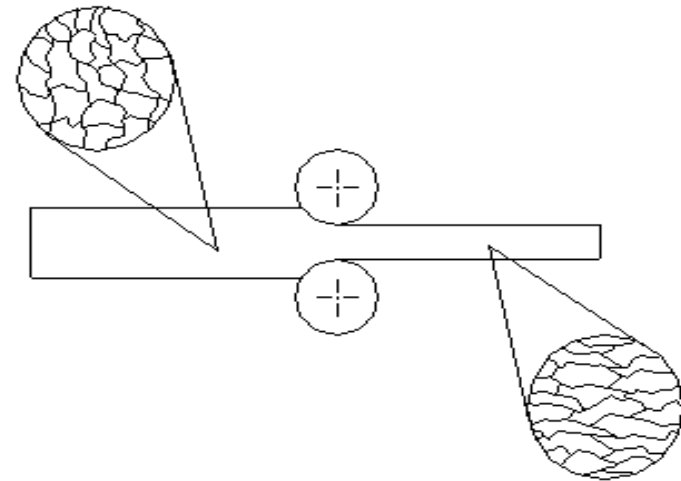
TEXTURAS PRODUZIDAS POR DEFORMAÇÃO A FRIO



Estrutura Cristalina	Processos	Texturas	
cfc	Trefilação e Extrusão	$\langle 111 \rangle$ $\langle 100 \rangle$	Paralelo ao eixo do fio
ccc	Trefilação e Extrusão	$\langle 110 \rangle$	Paralelo ao eixo do fio
hc	Trefilação e Extrusão	$\langle 1010 \rangle$	Paralelo ao eixo do fio
cfc	Laminação	$\{110\}$ $\langle 112 \rangle$	Paralela ao plano de laminação Paralela à direção de laminação
ccc	Laminação	$\{001\}$ $\langle 110 \rangle$	Paralela ao plano de laminação Paralela à direção de laminação
hc	Laminação	$\{0001\}$ $\langle 1120 \rangle$	Paralela ao plano de laminação Paralela à direção de laminação

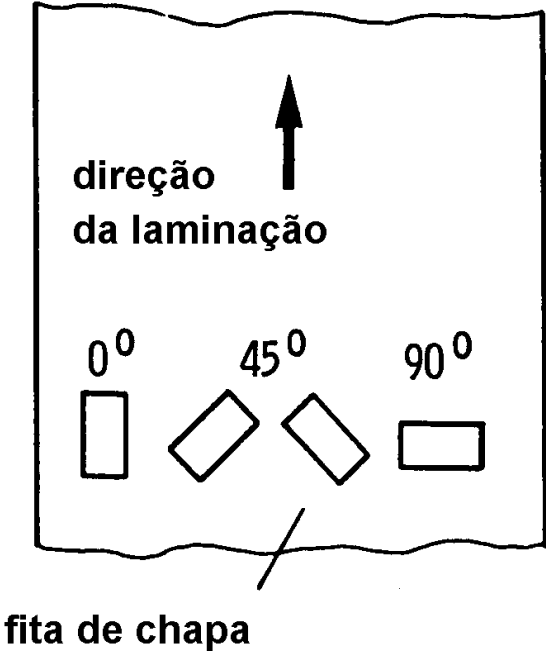
Textura e anisotropia

Uma parcela da anisotropia de chapas metálicas é causada **pelo alongamento dos grãos** durante o processo de laminação.

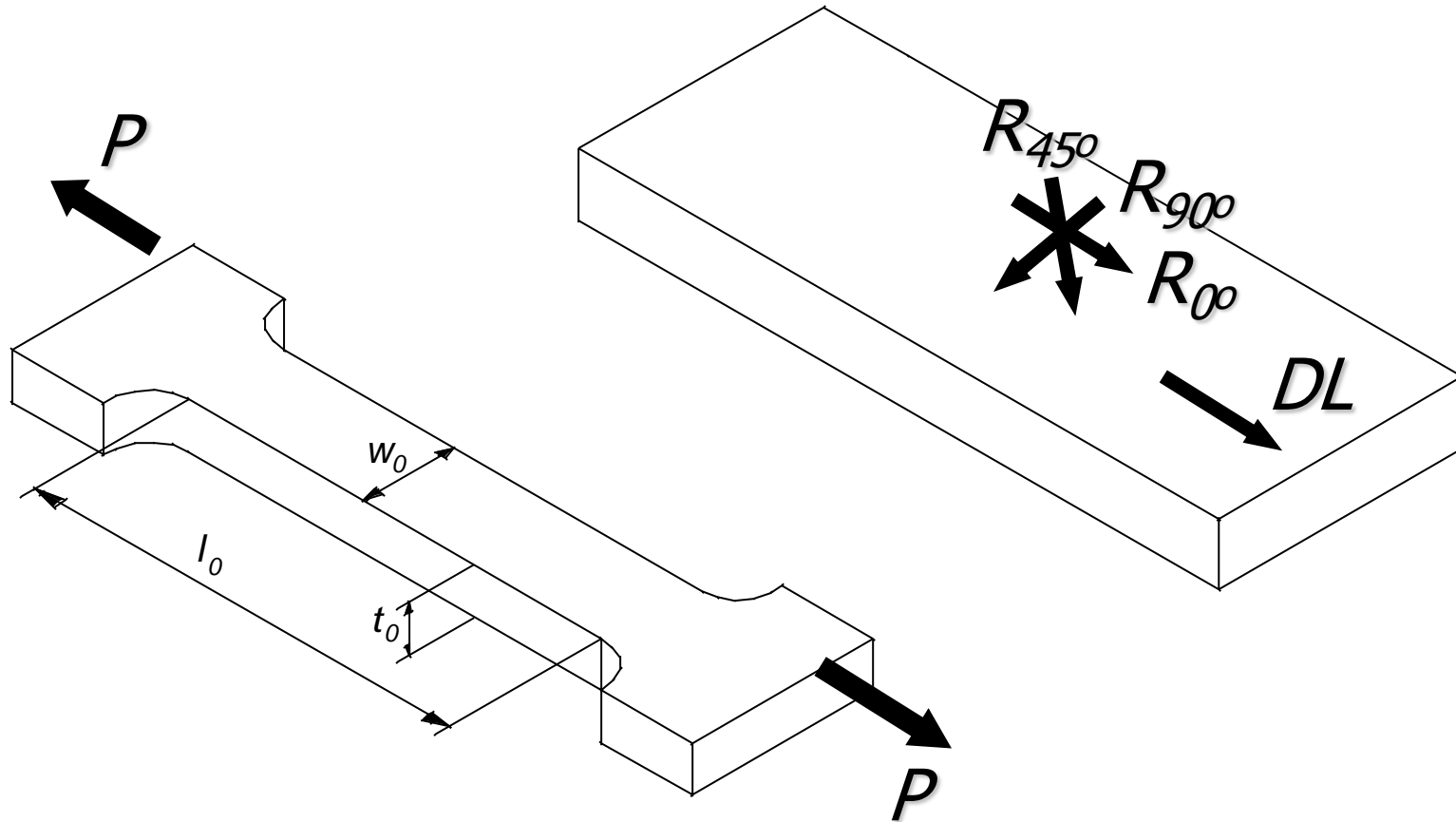


Este fenômeno é a causa para o **orelhamento** nos processos de embutimento profundo.

Textura e anisotropia



Retirada de corpos-de-prova para avaliar a anisotropia



Textura e anisotropia



DETERMINAÇÃO DA ANISOTROPIA EM CHAPAS METÁLICAS

- Extração de corpos-de-prova para ensaios de tração a partir de diversas direções no plano da chapa
- Realização dos ensaios de tração, mantendo a deformação do comprimento constante (alongamento)
- Medição das deformações na largura (ε_w) e na espessura (ε_t) dos corpos-de prova

$$\varepsilon_w = \ln\left(\frac{w}{w_0}\right)$$

$$\varepsilon_t = \ln\left(\frac{t}{t_0}\right)$$

t_0 - espessura inicial do corpo de prova

t - espessura final de ensaio

w_0 - largura inicial do corpo de prova

w - espessura final de ensaio

Textura e anisotropia



COEFICIENTES DE ANISOTROPIA

- Coeficiente de anisotropia normal (R)

$$R = \frac{\varepsilon_w}{\varepsilon_t}$$

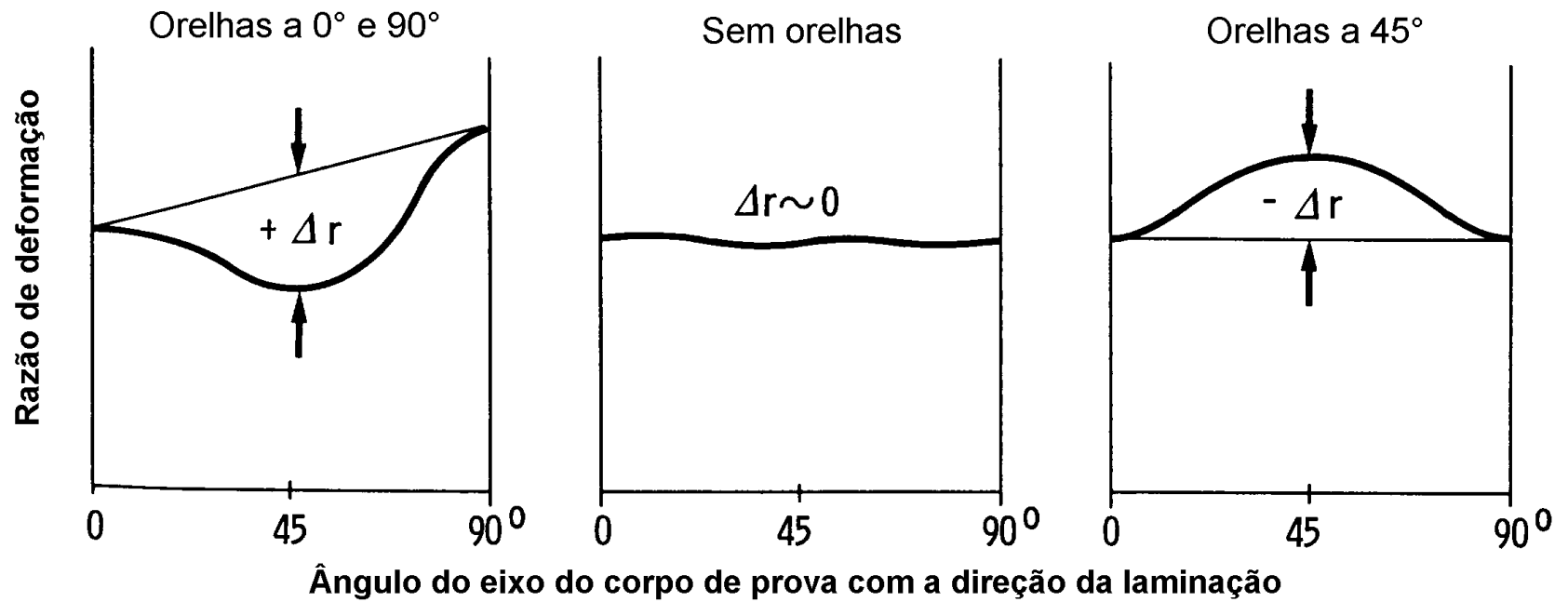
- Coeficiente de anisotropia planar (ΔR)

$$\Delta R = \frac{R_{0^\circ} + R_{90^\circ} - 2R_{45^\circ}}{2}$$

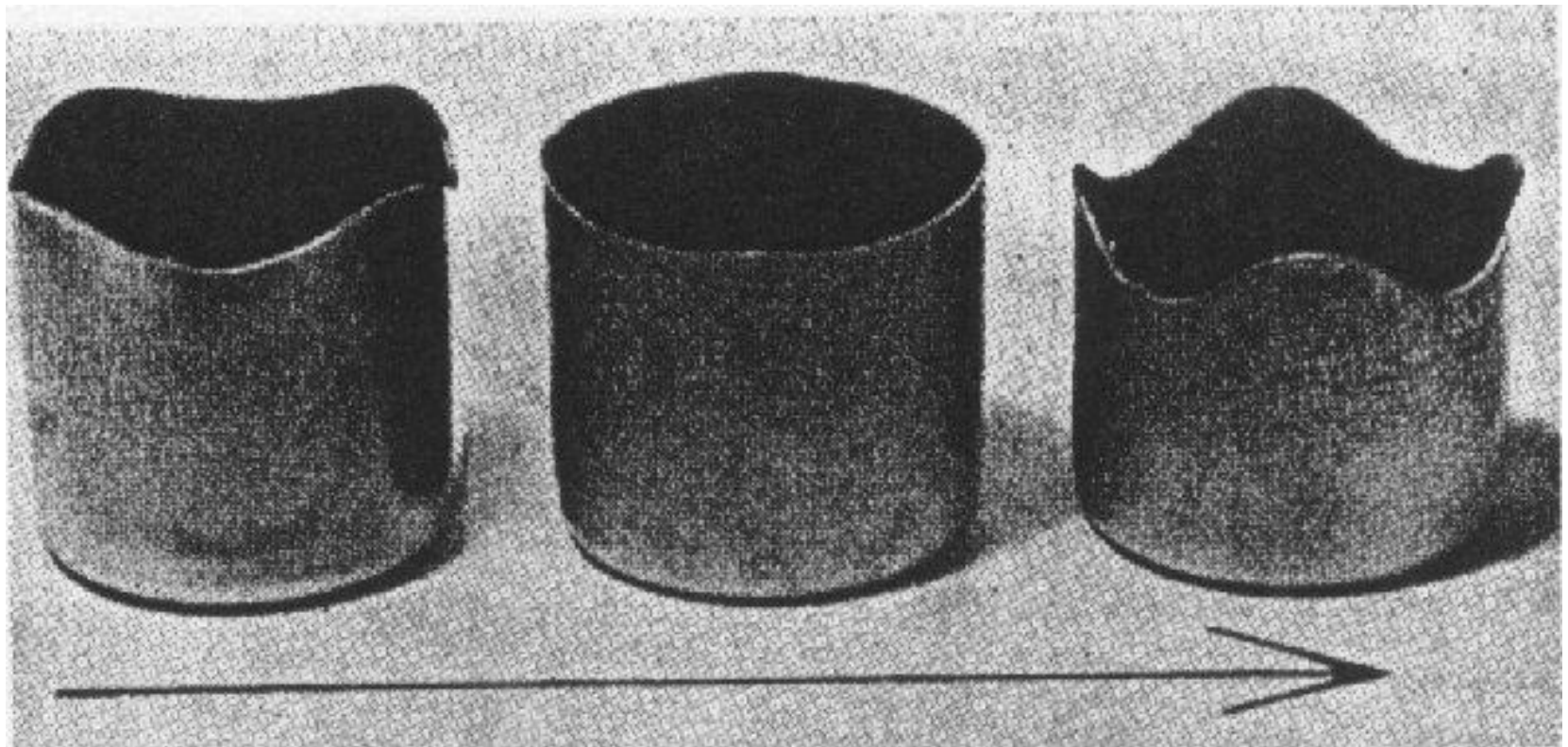
- Coeficiente de anisotropia médio (\bar{R})

$$\bar{R} = \frac{R_{0^\circ} + 2R_{45^\circ} + R_{90^\circ}}{4}$$

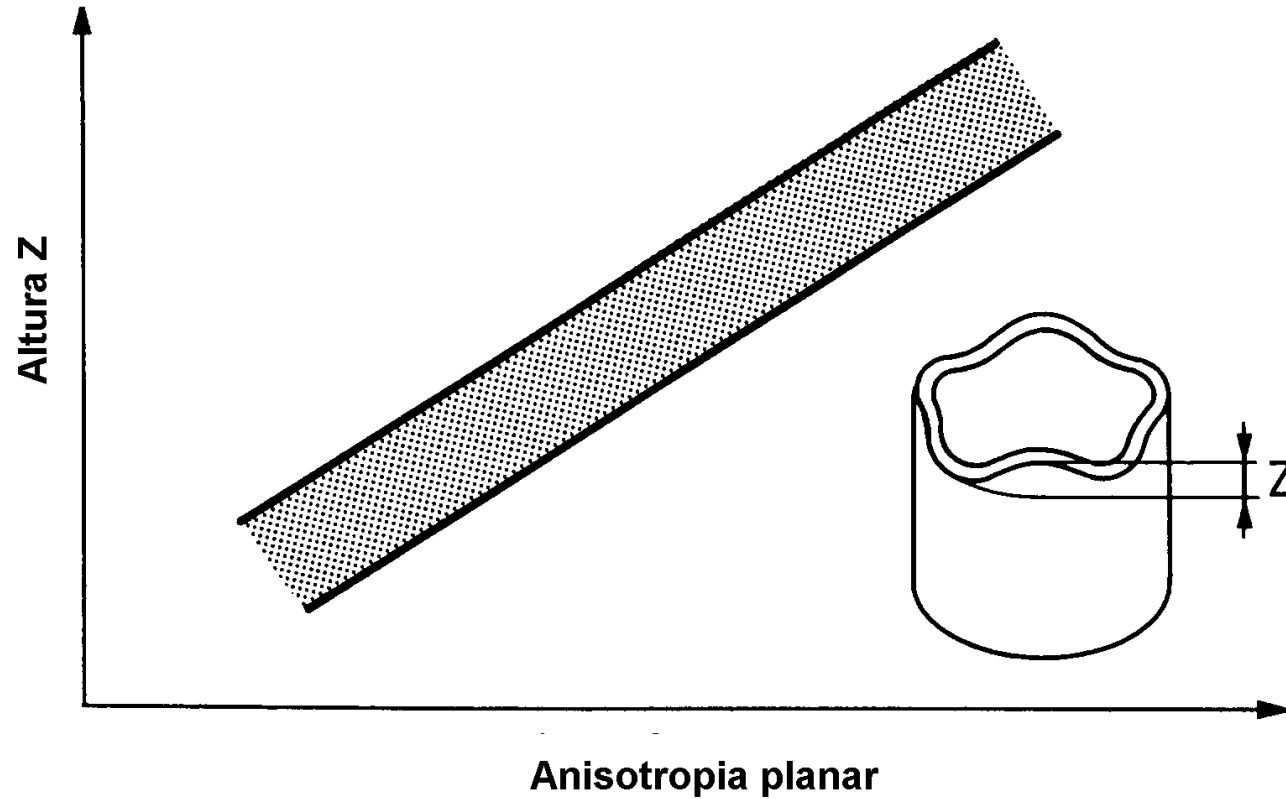
Textura e anisotropia



Anisotropy



Textura e anisotropia



Cálculo do índice de anisotropia



	0°	45°	90°
$\frac{R_{0^\circ,45^\circ,90^\circ}}{R}$	1,25	1,25	1,63
ΔR		+0,2	