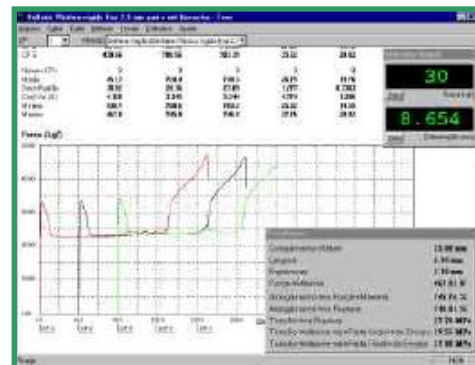


3 – ENSAIO DE TRAÇÃO



Informações Sobre:

- Resistência Mecânica
- Ductilidade

Emprego do Ensaio:

- Informações para Projetos
- Seleção de Materiais
- Controle de Qualidade
- Comparação e Desenvolvimento de Materiais

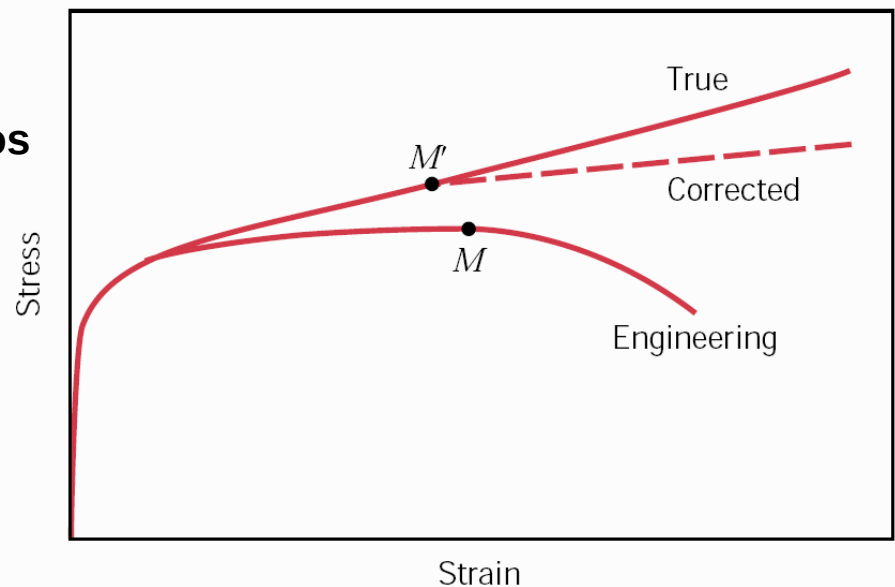
Fatores para Escolha do Ensaio:

- Facilidade de Execução
- Reprodutividade dos Resultados



NORMAS (alguns exemplos)

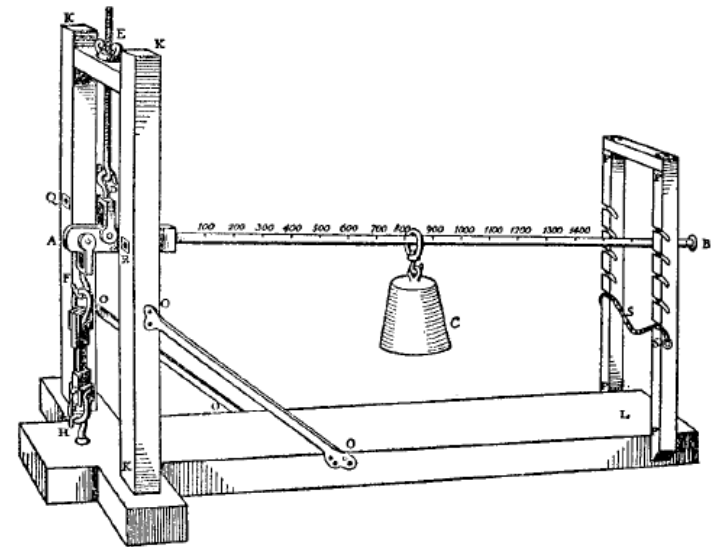
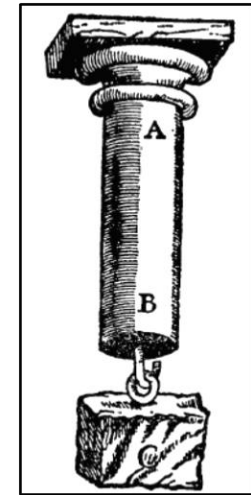
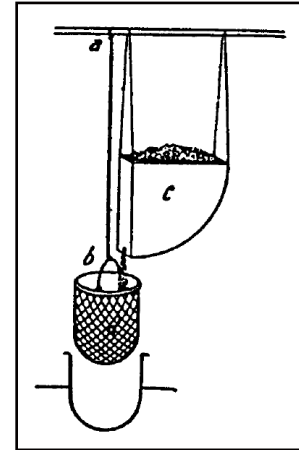
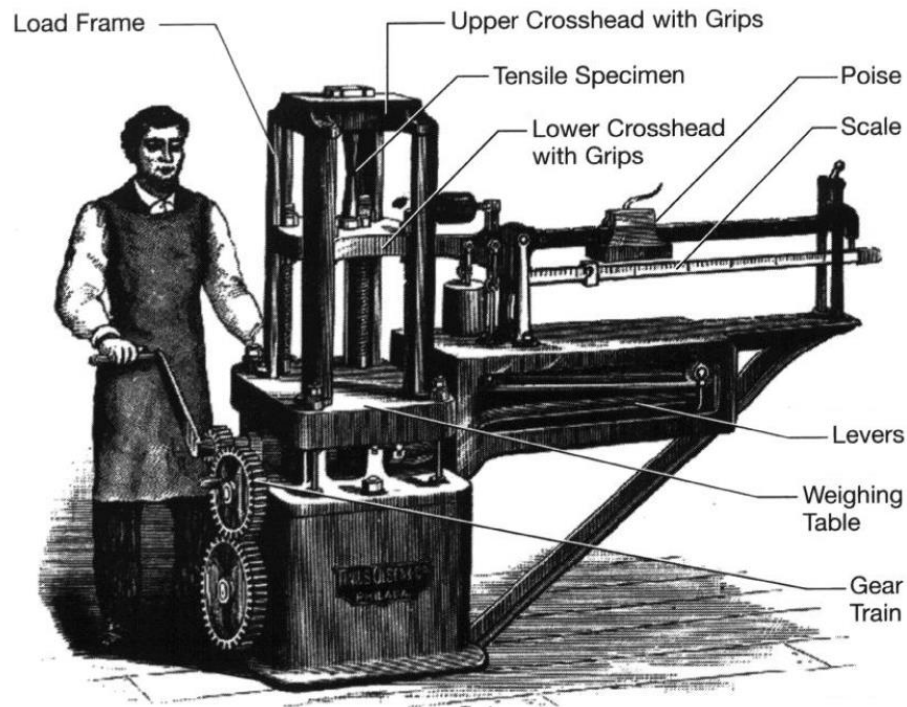
- ASTM E8m (metais)
- ASTM D638 (plásticos)
- ASTM C1293 (cerâmicas avançadas)
- ABNT NBR 6152 (cancelada)
- ABNT NBR ISO 6892-1



Curvas tensão-deformação obtidas por meio do ensaio de tração

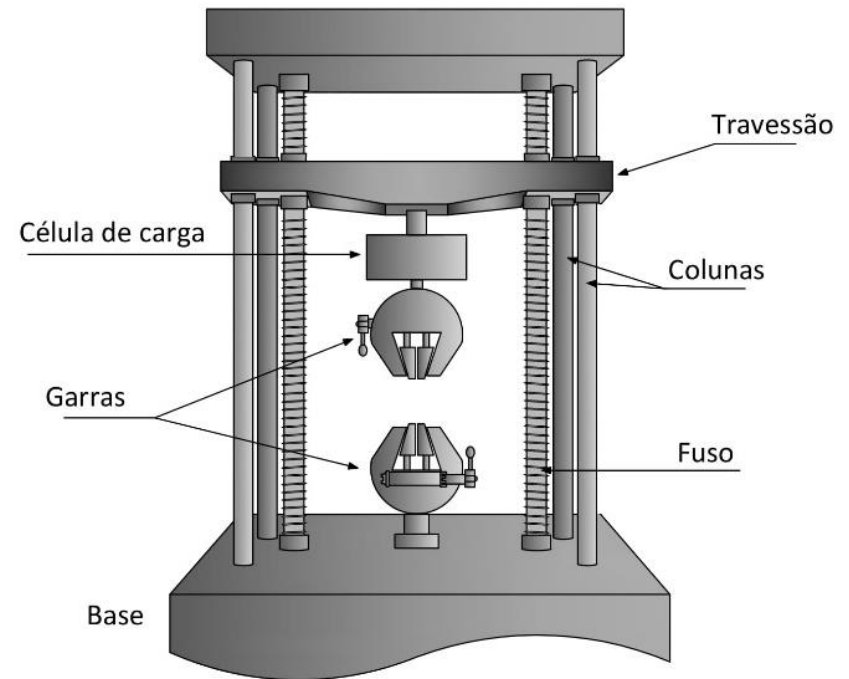
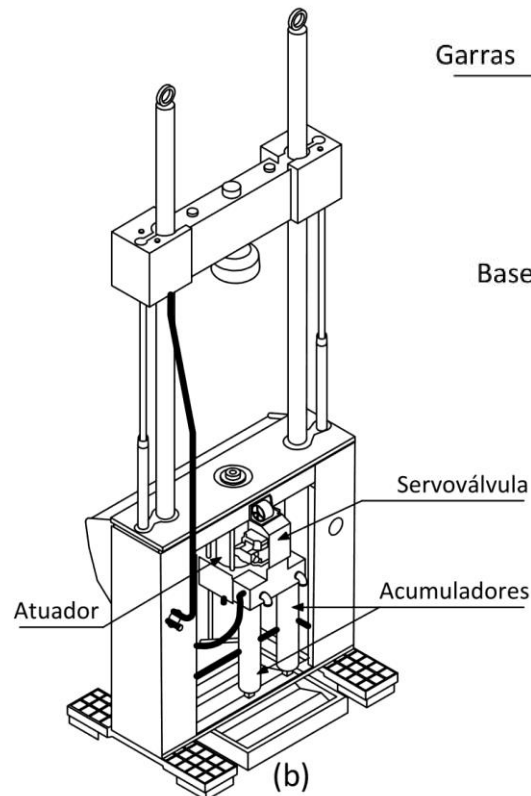
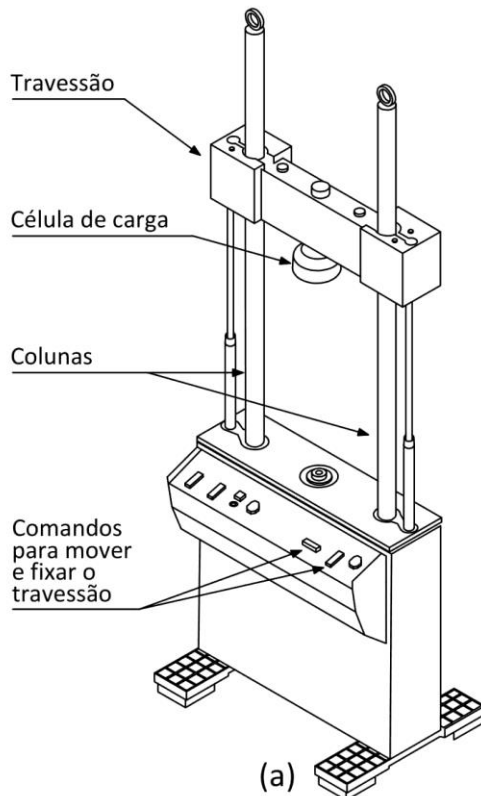
Histórico:

- Mais antigo ensaio mecânico
- Leonardo da Vinci (arames)
- Galileu (1638)
- Robert Hooke (1678)
- Musschenbroek (1729)
- Kirkaldy (lab. ensaios, 1865)
- Tinius Olsen (1879)



Máquinas de Ensaio:

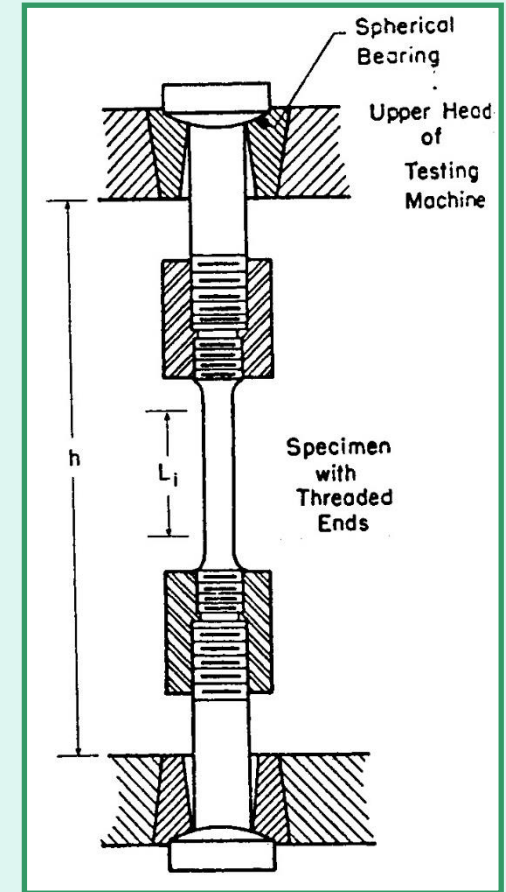
- Eletromecânicas
- Servo-hidráulicas



Tipo de Máquina	Cap. carga (kN)	Desloc. máx. (mm)
Eletromecânica	0,5 a 500	1.000
Servo-hidráulica	10 a 1.000	150

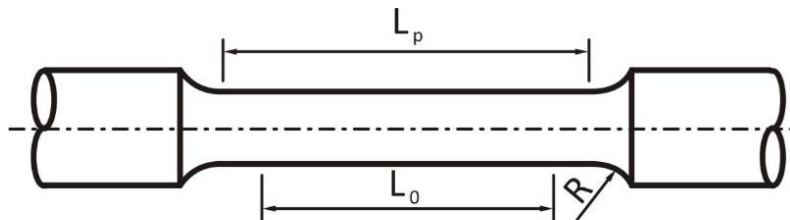
Corpos de Prova:

- Formas e Dimensões Padronizadas
- Adequar à Origem do Material e à Máquina
- Localização e Comprimento
 - ✓ Placas, Chapas, Lâminas → Seção Retangular
 - ✓ Forjados, Fundidos, Grandes Espessuras, Forma Irregular → Seção Circular
 - ✓ Arame, Fio, Tubo → Segmento do Próprio Material
 - ✓ Barras Nervuradas → Deve-se Pesar a Barra



Garras para fixação de corpo-de-prova com extremidades rosqueadas

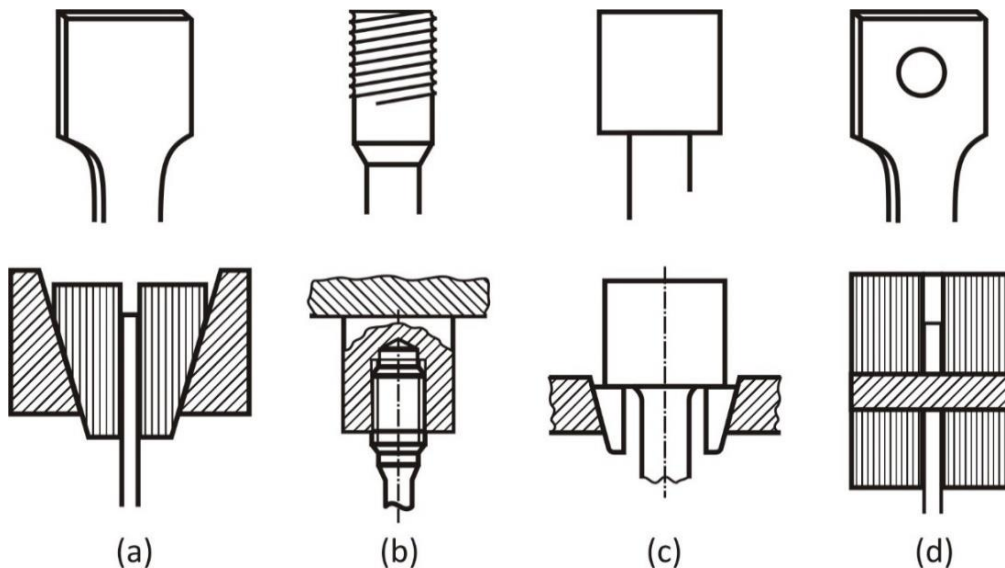
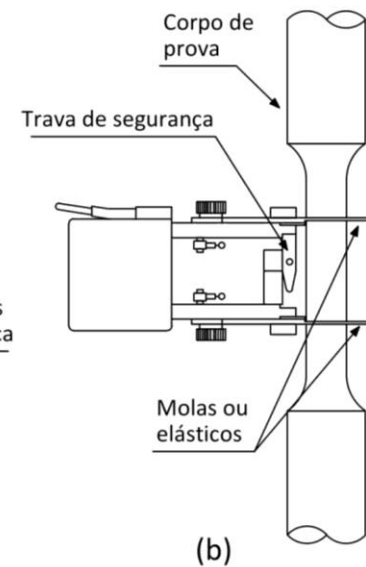
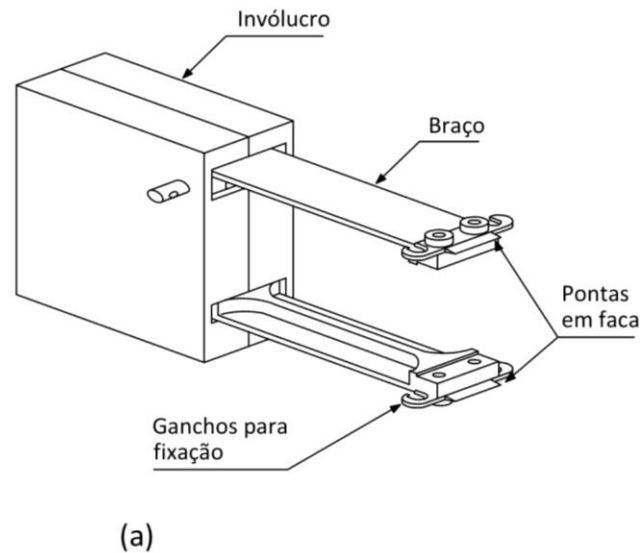
Corpos de Prova:



L_p - Comprimento paralelo

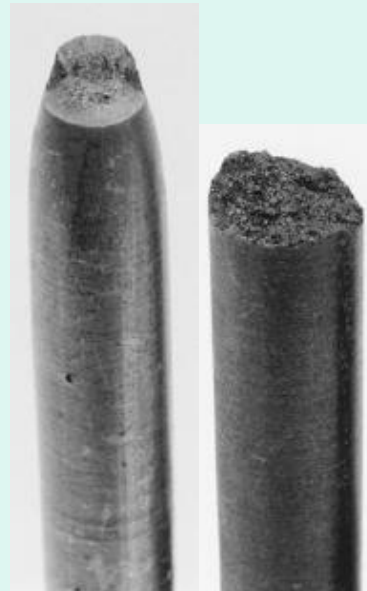
L_0 - Comprimento de medida inicial

R - Raio de transição



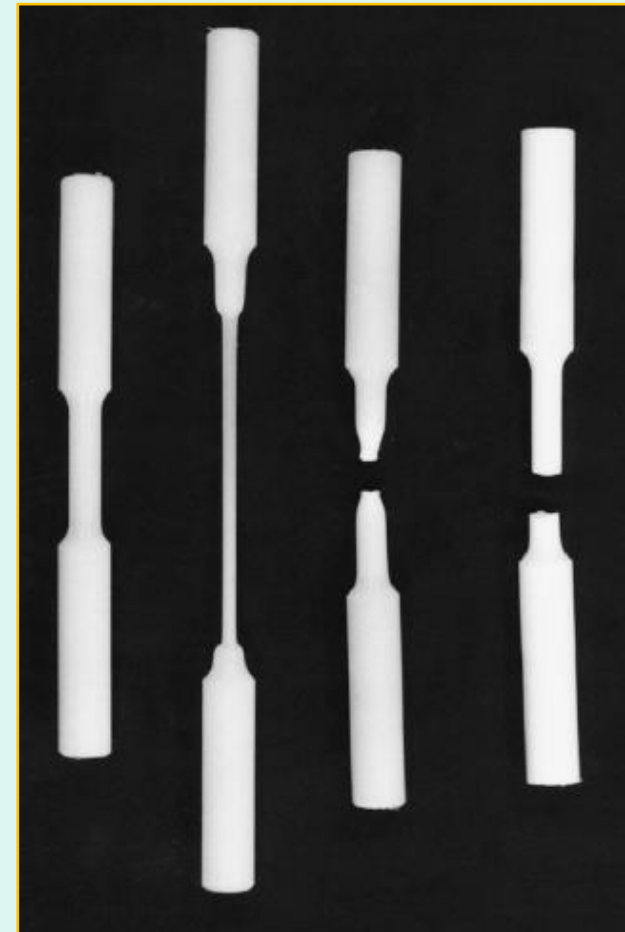
Alguns tipos de garras

Corpos de Prova após Ensaio:



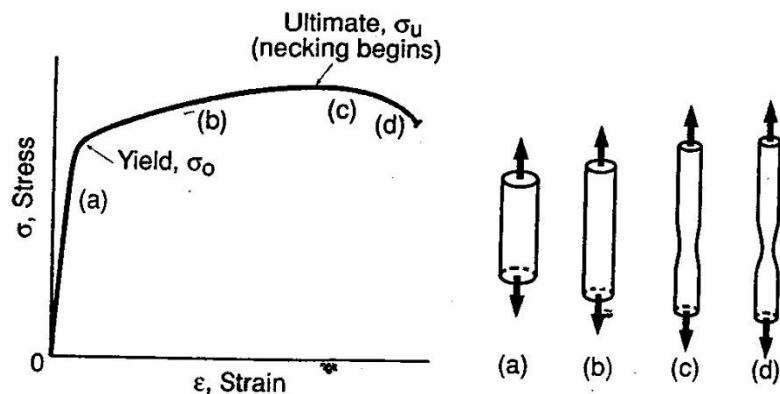
Dúctil e Frágil

Ferro fundido cinzento, liga Al 7075, Aço 1020

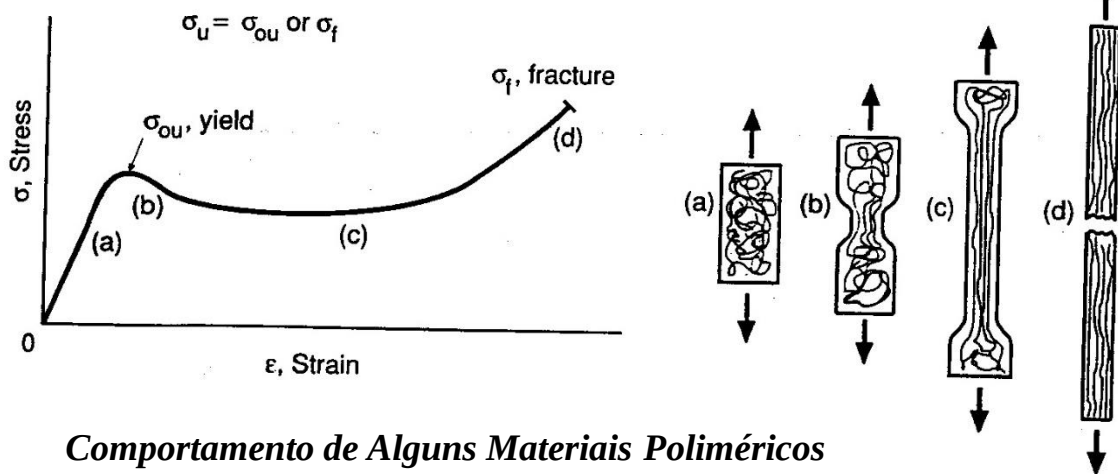


Polietileno (HDPE), Nylon, Teflon (PTFE)

Curvas Tensão-Deformação Típicas:

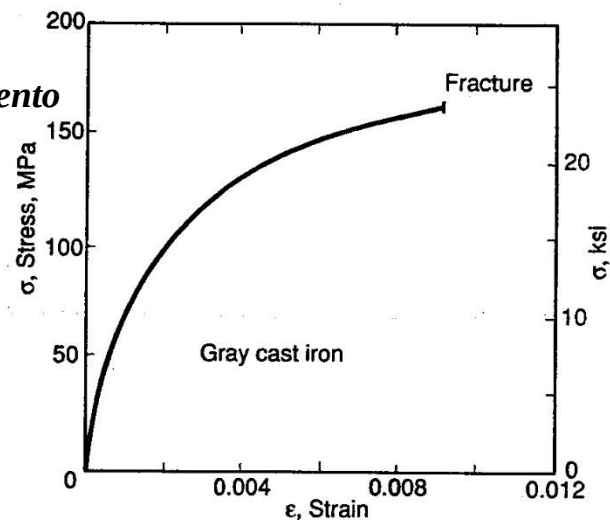


Metal Dúctil



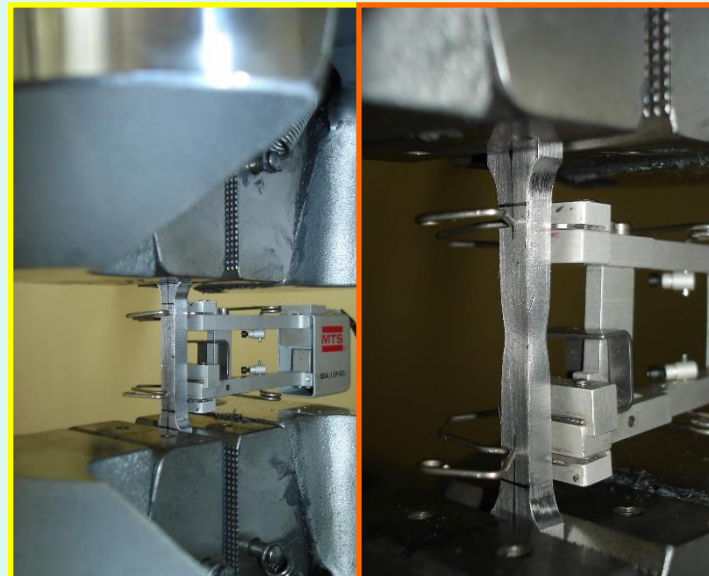
Comportamento de Alguns Materiais Poliméricos

Ferro Fundido Cinzento



Algumas Propriedades Calculadas:

Categoria	Engenharia	Verdadeira
Constantes Elásticas	<i>Módulo de Young, Módulo Tangente, Relação de Poisson</i>	
Resistência	<i>Limite de Escoamento, Limite de Resistência, Tensão de Fratura</i>	<i>Tensão Real de Fratura, Coeficiente de Resistência</i>
Ductilidade	<i>Alongamento, Redução de Área</i>	<i>Deformação Real de Fratura</i>
Energia	<i>Resiliência, Tenacidade</i>	
Encruamento	<i>Razão de Encruamento</i>	<i>Expoente de Encruamento</i>



Procedimentos:

- Preparação e Medição dos Corpos-de-Prova
- Capacidade e Precisão dos Sensores
- Alinhamento da Máquina e das Amostras

✓ Velocidade do Ensaio:

- Taxa de Deformação do Corpo-de-Prova
- Taxa de Tensionamento do Corpo-de-Prova
- Velocidade de Deslocamento do Atuador

Regras Gerais (ASTM E8):

- Escoamento: $1,15 \leq v \leq 11,5$ MPa/seg
- Resistência: $0,05 \leq v \leq 0,5$ (mm/mm)/min

Obs.: Risco ao executar o ensaio com controle de carga e tentar manter a taxa de tensionamento após o início do escoamento.

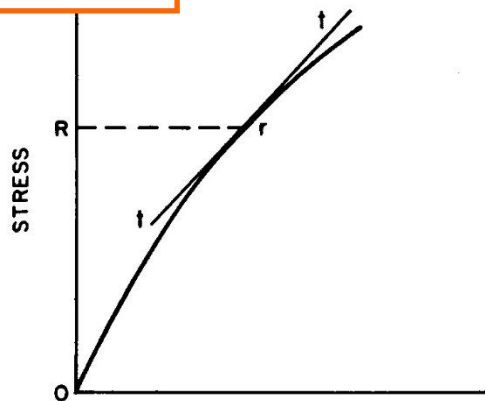
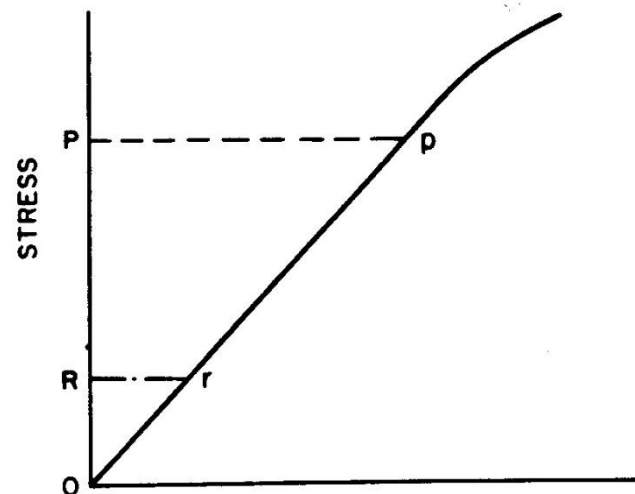
Rigidez Elástica do Material (ASTM E111):

- Módulo de Young E
- Métodos da Tangente e da Corda
- Erros: Folgas, Alinhamento, Curvatura
- Adotar Área Média (mínimo 3 pontos)

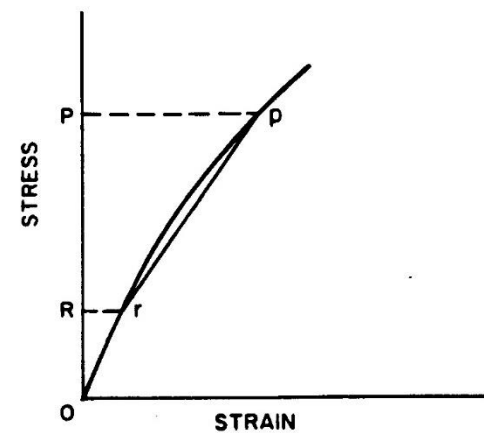
Módulo de Young:

- Coeficiente de Correlação $R^2 \approx 1$
- Coeficiente de Variação $C_v \leq 2\%$

Obs.: $C_v = 100 \sqrt{\frac{(1/R^2) - 1}{k - 2}}$ onde k é o número de pontos



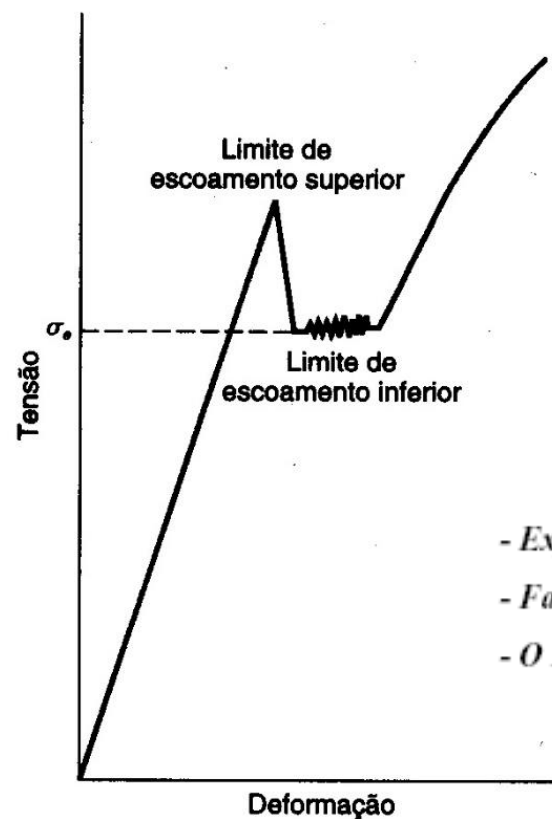
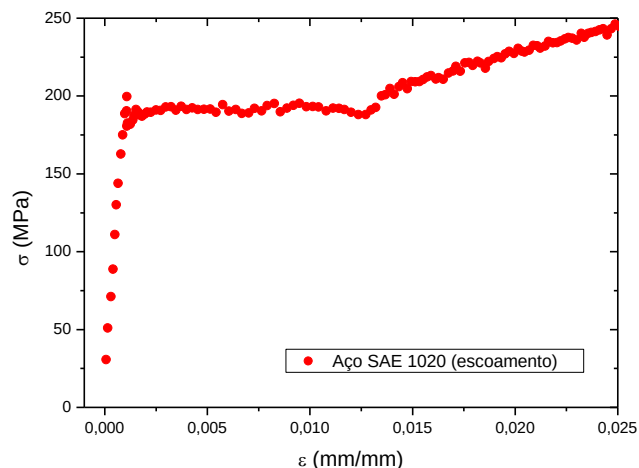
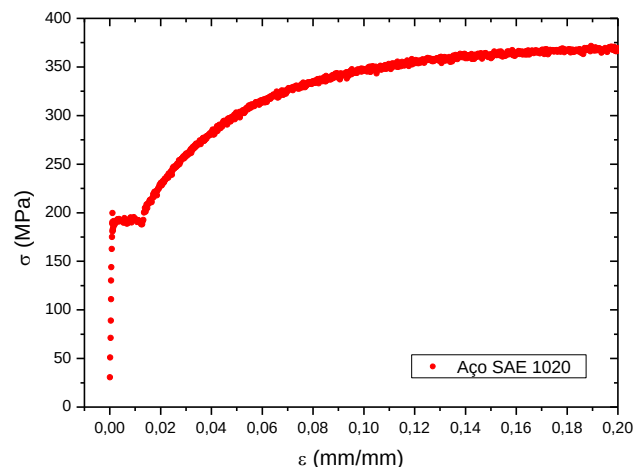
Tangent Modulus at Any Stress R



Chord Modulus Between Any Two Stresses P and R

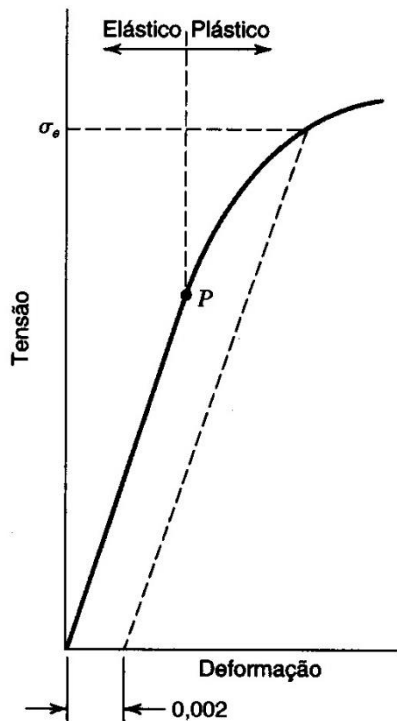
Determinação do Limite de Escoamento:

- Ocorrência do Patamar de Escoamento
- Limite de Desvio (Offset)



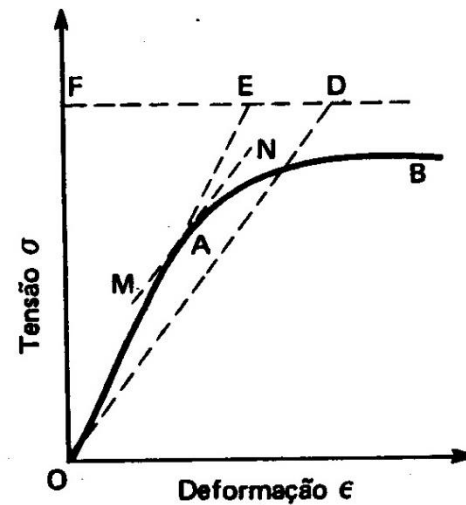
- Explicações para este Fenômeno
- Fatores que afetam a Observação
- O Limite Inferior é Adotado

Método do Deslocamento

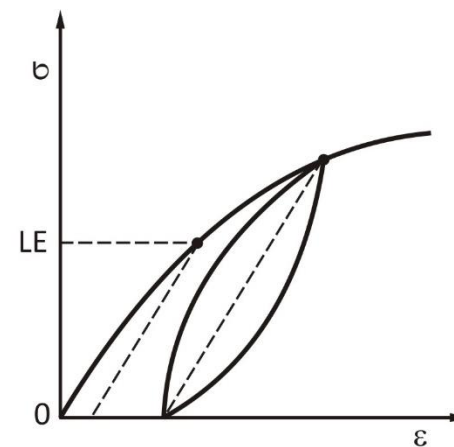
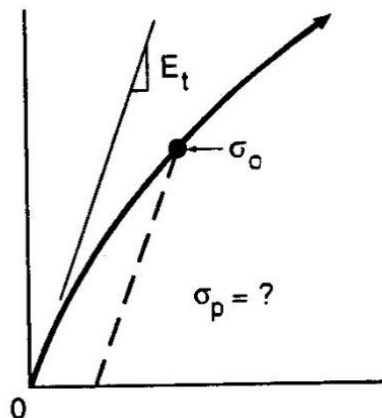


- Deve-se Especificar o Offset
- Geralmente Adota-se 0,2%
- Pode-se usar: 0,01%; 0,1%; 0,5%
- Procedimento Cálculo Numérico

Materials com Comportamento Não-Linear

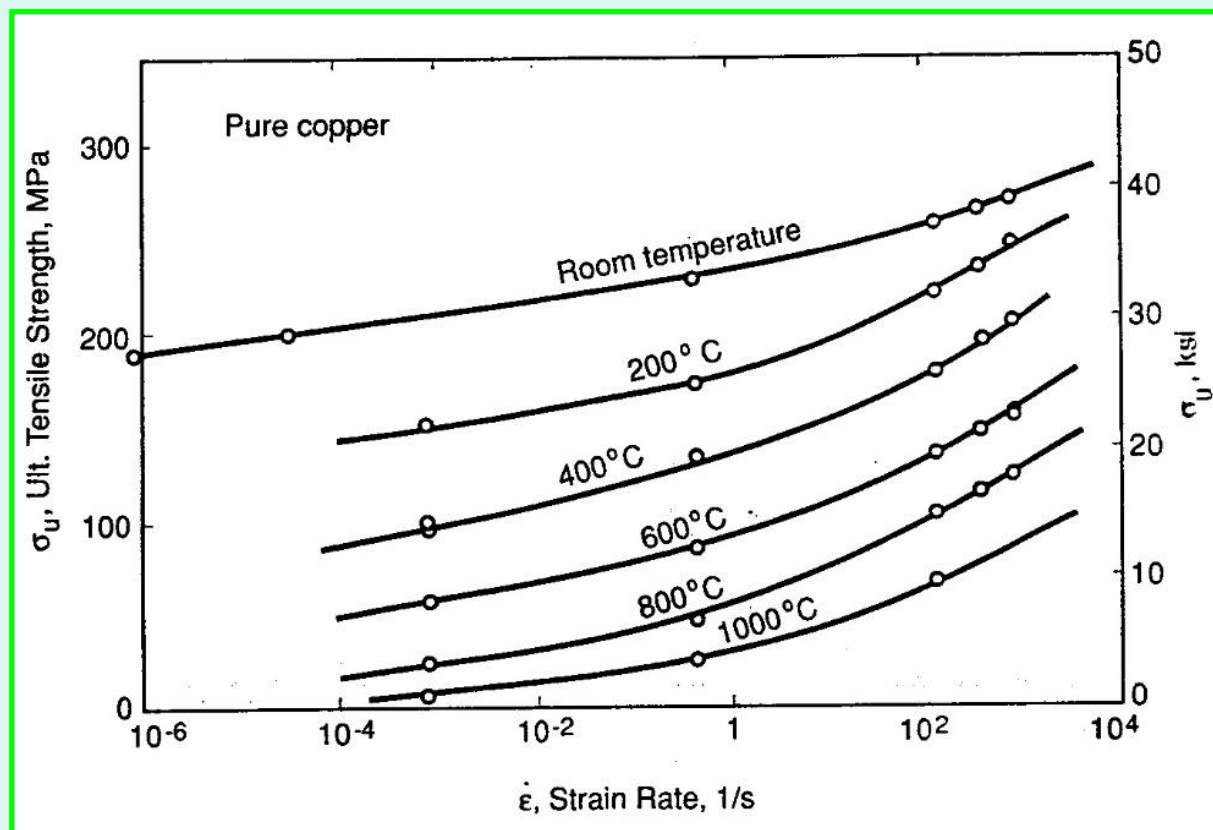


Limite Elástico Aparente (Johnson)



Fatores que afetam a Resistência à Tração:

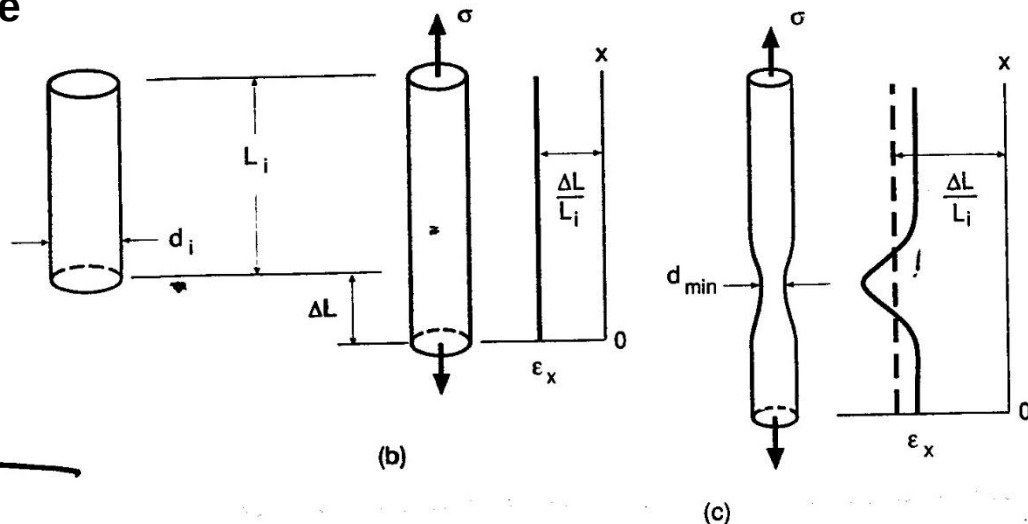
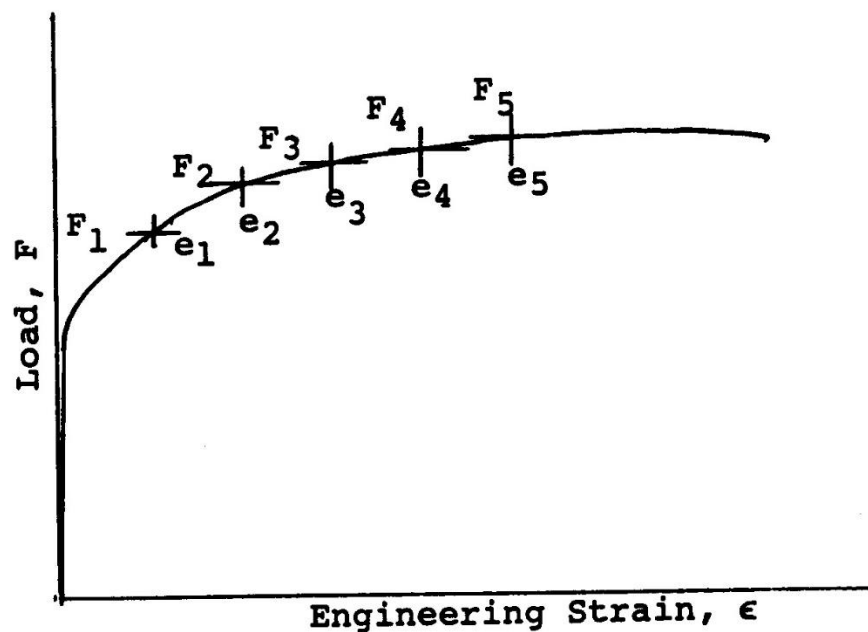
- Taxa de deformação
- Temperatura



Curva Tensão-Deformação Verdadeira (ASTM E646):

- Definições de Tensão Real e Deformação Real
- Hipótese do Volume Constante
- Limitações das Equações

Obtenção dos pontos a serem utilizados

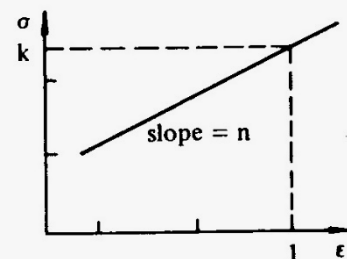
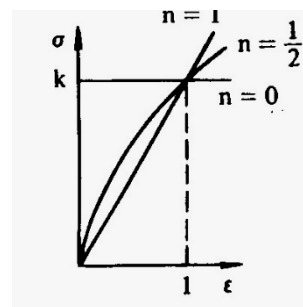


Deformação não-uniforme após a formação do pescoço

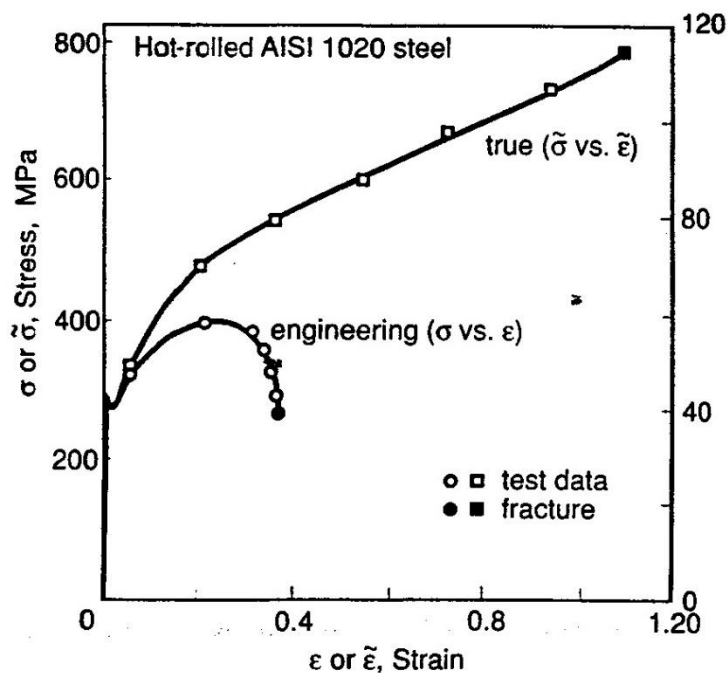


Curva Tensão-Deformação Verdadeira (continuação):

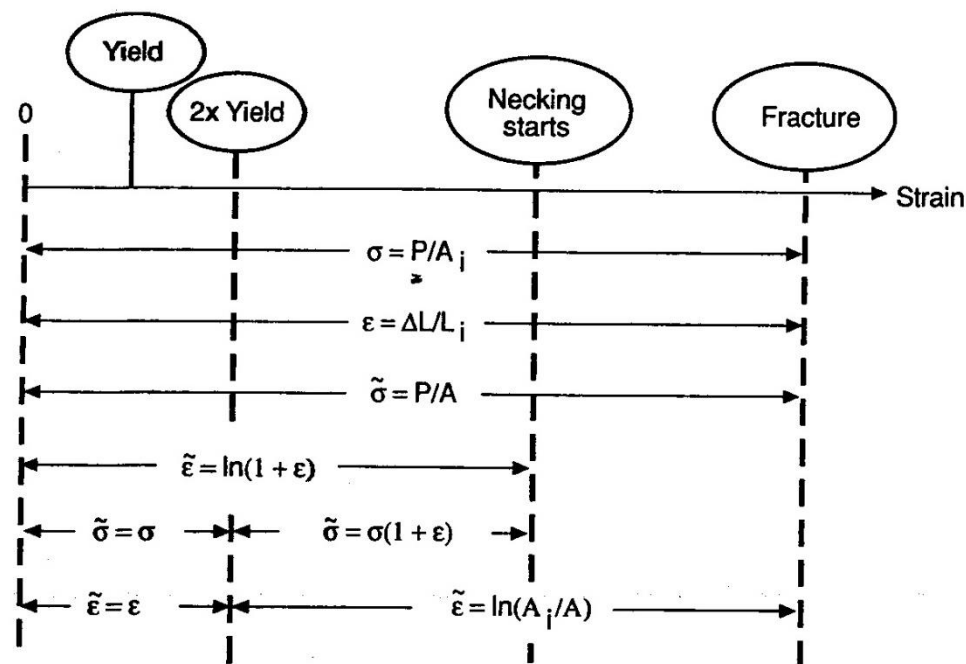
$$\tilde{\sigma} = k\tilde{\epsilon}^n \rightarrow \log \tilde{\sigma} = \log k + n \log \tilde{\epsilon}$$



Curvas de tração para o aço 1020



Validade e Limitações das Equações de cálculo de Tensão e Deformação



Instabilidade no pescoço e Correção para grandes deformações:

$$\tilde{\sigma} = k\tilde{\varepsilon}^n$$

- No início da estricção temos $\varepsilon = n$

Início da Estricção:

$$dP = \tilde{\sigma}dA + Ad\tilde{\sigma} = 0 \rightarrow \frac{d\tilde{\sigma}}{\tilde{\sigma}} = \frac{-dA}{A}$$

Conservação do Volume:

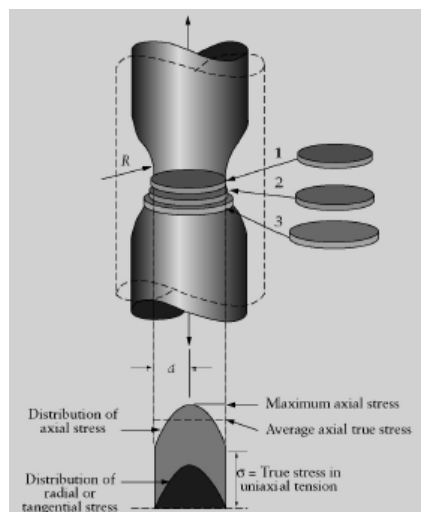
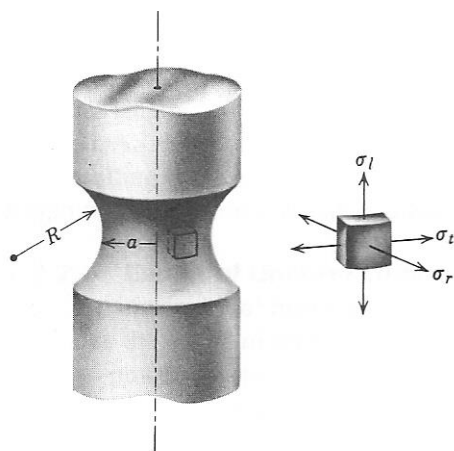
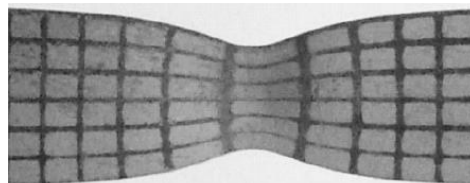
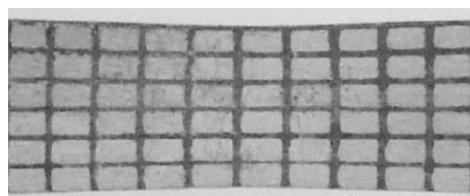
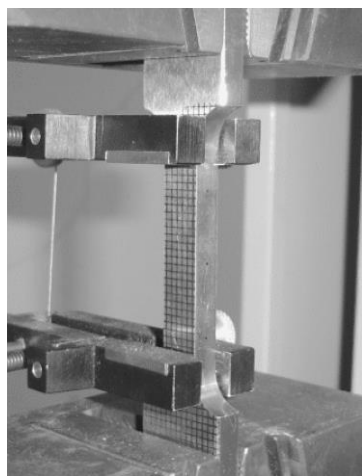
$$dV = AdL + LdA = 0 \rightarrow \frac{-dA}{A} = \frac{dL}{L} = d\tilde{\varepsilon}$$

Juntando os dois resultados, vem:

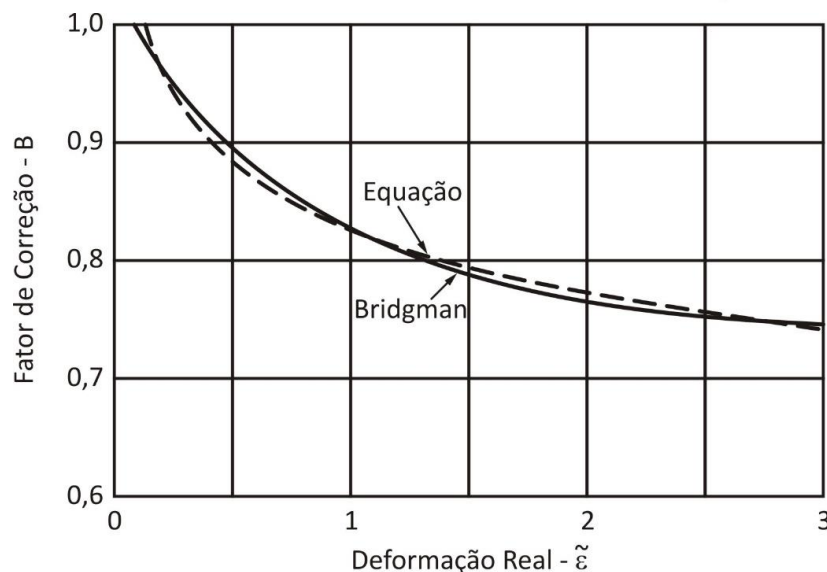
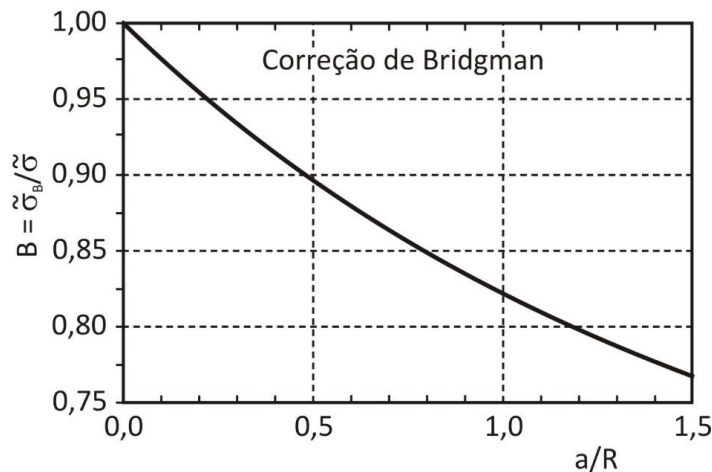
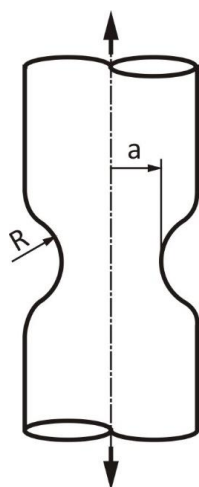
$$dP = 0 \rightarrow \frac{d\tilde{\sigma}}{d\tilde{\varepsilon}} = \tilde{\sigma}$$

Aplicando na equação de Hollomon:

$$dP = 0 \rightarrow Kn\tilde{\varepsilon}^{n-1} = K\tilde{\varepsilon}^n \rightarrow n = \tilde{\varepsilon}$$



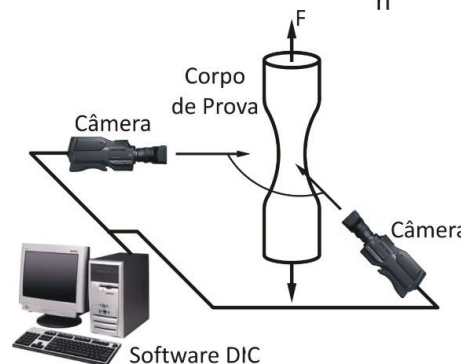
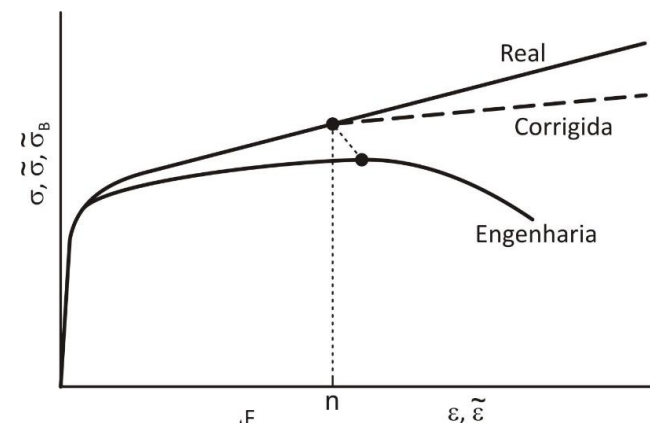
Instabilidade no pescoço e Correção para grandes deformações:



- A Correção de Bridgman:

$$\tilde{\sigma}_B = \tilde{\sigma} \cdot \left[\left(1 + \frac{2R}{a} \right) \ln \left(1 + \frac{2R}{a} \right) \right]^{-1} = \tilde{\sigma} \cdot B$$

$$\tilde{\sigma}_B = (0,83 - 0,186 \log \tilde{\epsilon}) \tilde{\sigma}$$



Atualmente existem novas propostas, obtidas usando-se o Método dos Elementos Finitos. Ex.: Y Ling (2004); J.M. Choung (2008).

Representações da Curva Tensão-Deformação Verdadeira:

Ludwik-Hollomon:

$$\tilde{\sigma} = \sigma_e + k\tilde{\varepsilon}^n$$

Ramberg-Osgood:

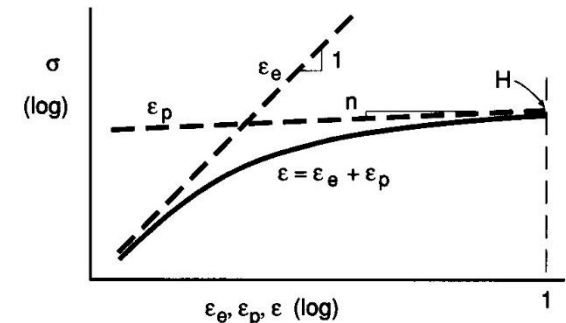
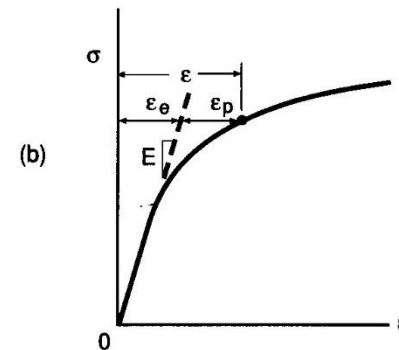
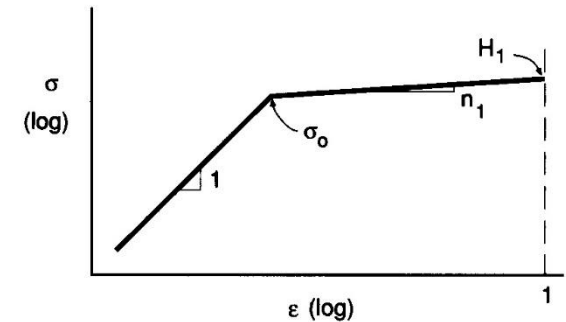
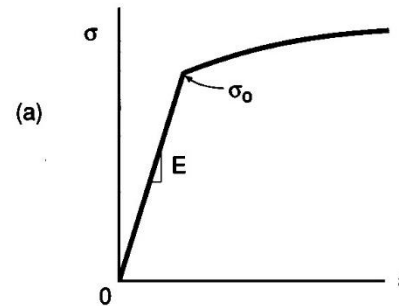
$$\tilde{\sigma} = k\tilde{\varepsilon}_p^n$$

$$\tilde{\varepsilon} = \tilde{\varepsilon}_e + \tilde{\varepsilon}_p = \frac{\tilde{\sigma}}{E} + \tilde{\varepsilon}_p$$

Ludwigson*:

$$\tilde{\sigma} = K_1 \varepsilon^{n_1} + \Delta$$

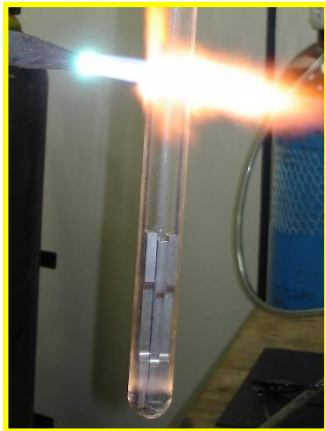
$$\Delta = \exp(K_2 + n_2 \varepsilon)$$



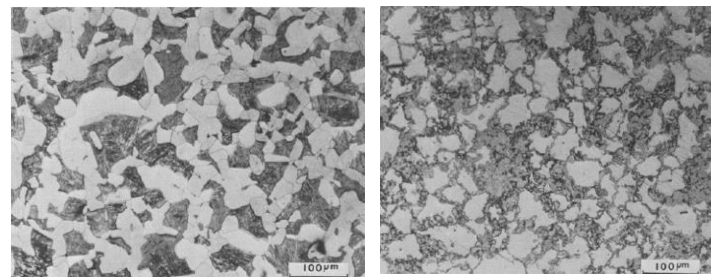
* Met. Trans. 2, p.2825, 1971.

O fato de algumas equações representarem razoavelmente o comportamento tensão-deformação não implica que estas sejam capazes de uma descrição física das curvas, visto que a deformação plástica é um fenômeno complexo, ou seja, a deformação acumulada não está relacionada unicamente com a estrutura de discordâncias do material.

Efeitos da Microestrutura no Comportamento de Aços:

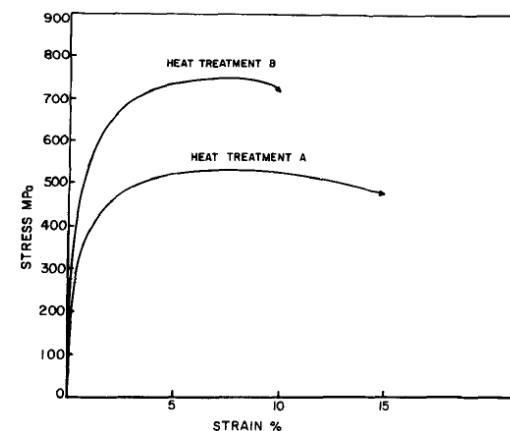
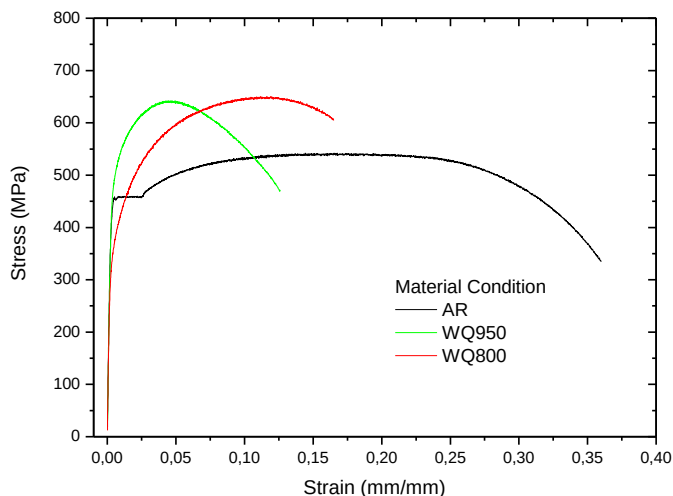
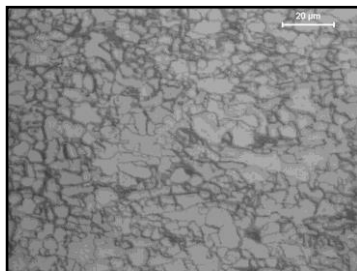


Ex.: Aço SAE 1018, tratamentos térmicos intercríticos (Suzuki & McEvily, 1979)



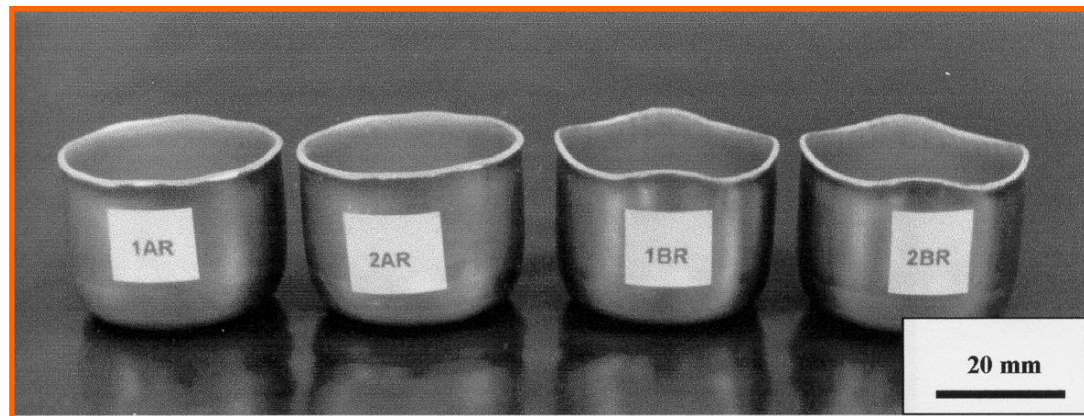
	Heat Treatment A	Heat Treatment B
Ferrite grain size, μm	3	40
Vol fraction of martensite, pct	36.4	39.2
Ave. size of martensitic structure, μm	149	Not applicable
Connectivity of martensitic structure, pct	34.7	95.4
Microhardness (Vickers) of martensite	565	546
Microhardness (Vickers) of ferrite	148	149

Ex.: Aço microligado submetido a têmpera intercrítica

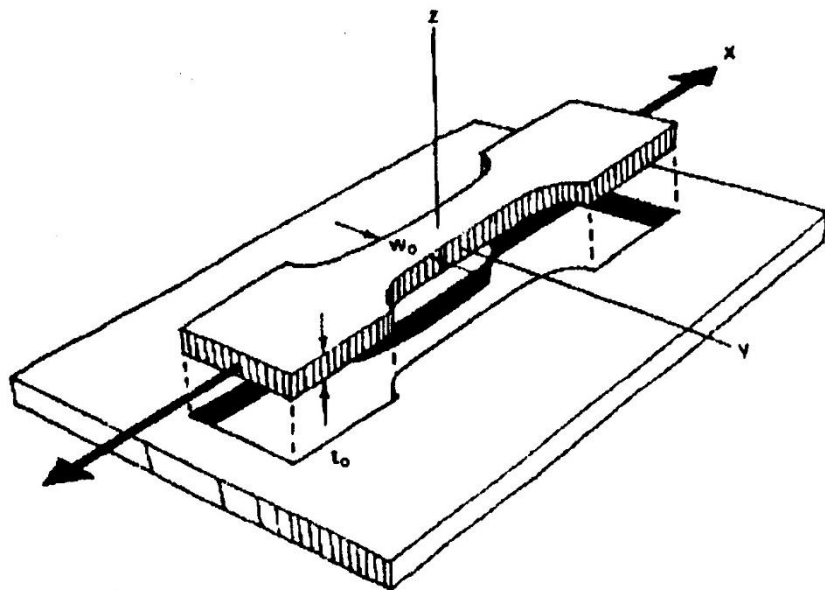


Anisotropia das Propriedades de Tração:

- Anisotropia Cristalográfica
- Fibramento Mecânico



✓ Coeficiente de Lankford (R)



$$\tilde{\epsilon}_L = \ln\left(\frac{L}{L_0}\right)$$

$$\tilde{\epsilon}_W = \ln\left(\frac{W}{W_0}\right)$$

$$\tilde{\epsilon}_t = \ln\left(\frac{t}{t_0}\right)$$

Ensaio de Embutimento

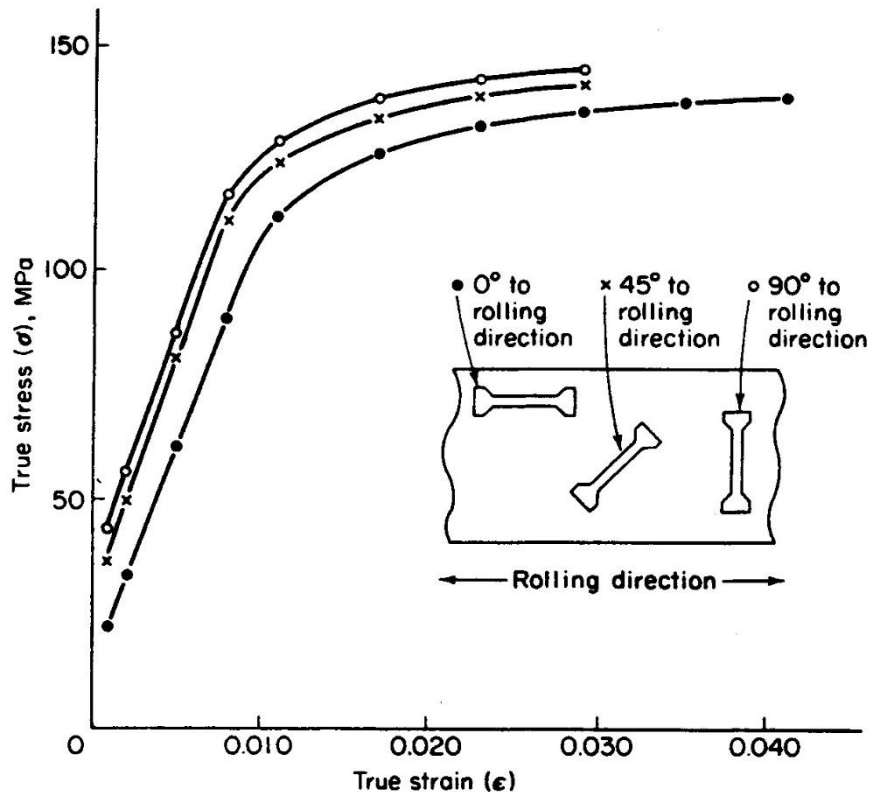
Volume Constante: $\tilde{\epsilon}_L + \tilde{\epsilon}_W + \tilde{\epsilon}_t = 0$

Material Isotrópico: $\tilde{\epsilon}_W = \tilde{\epsilon}_t$

Chapas Anisotrópicas: $R = \tilde{\epsilon}_W / \tilde{\epsilon}_t$

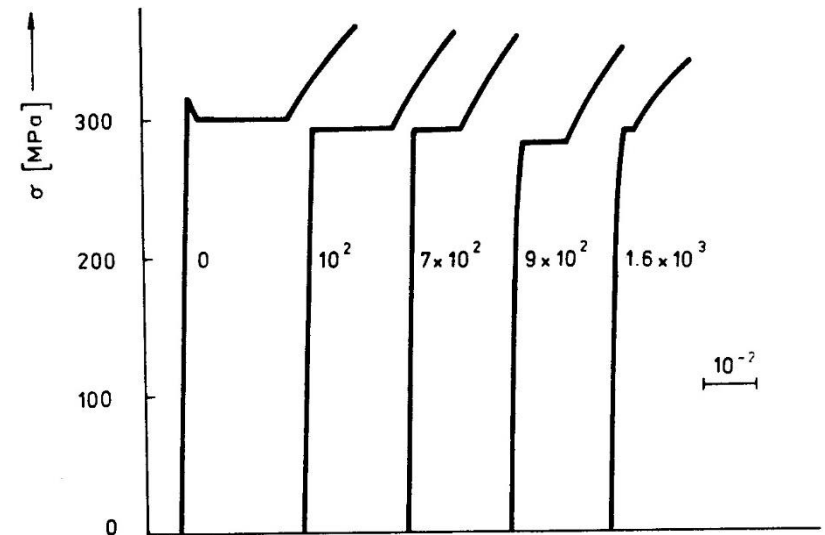
✓ Índice de Anisotropia Normal $\bar{R}$

$$\bar{R} = \frac{R_0 + 2R_{45} + R_{90}}{4}$$



Curvas de tração do alumínio de pureza comercial

Curvas de Tração após Aplicação de Tensões Cíclicas:



Eliminação gradual do patamar com tensão cíclica no regime elástico

