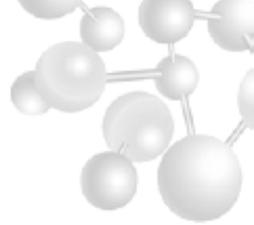


SMM 0342 - INTRODUÇÃO AO ENSAIO MECÂNICO DOS MATERIAIS

Prof. Dr. José Benedito Marcomini

Ensaio de compressão, torção e fluência

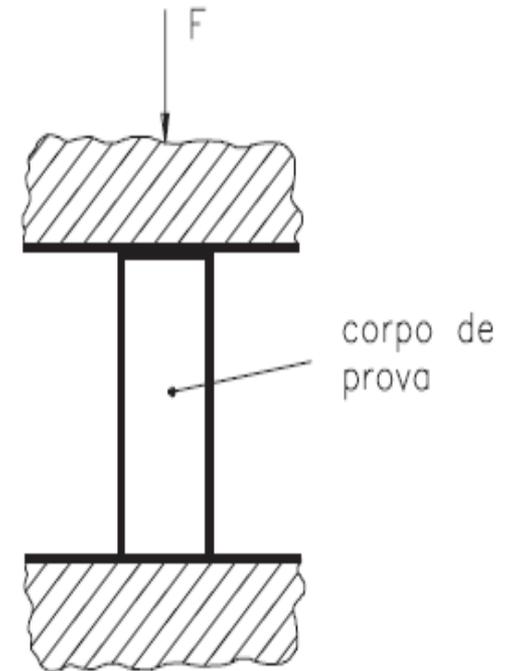
TRAÇÃO X COMPRESSÃO



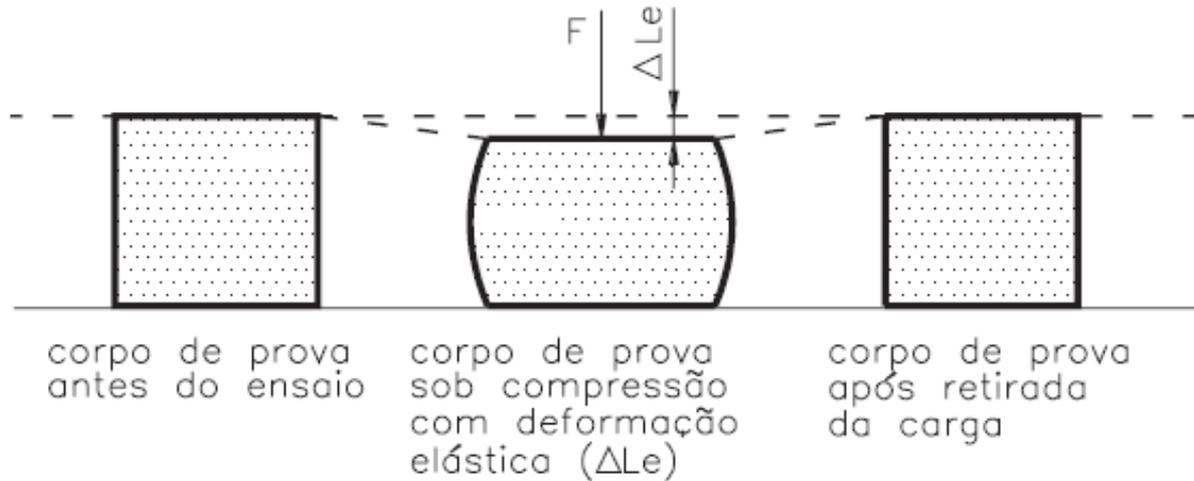
- Alguns materiais apresentam comportamento em **tração bem diferente** do comportamento em **compressão** (materiais **cerâmicos, FoFo, aços ferramenta, aço rápido**);
- Existem alguns **processos de conformação** onde a peça a ser trabalhada está sujeita a **forças compressivas**.
- O ensaio de **compressão é similar ao ensaio de tração** e como o ensaio de **tração** foi tratado em **detalhes**, faremos **somente algumas considerações** onde estes ensaios diferem entre si.

Ensaio de Compressão

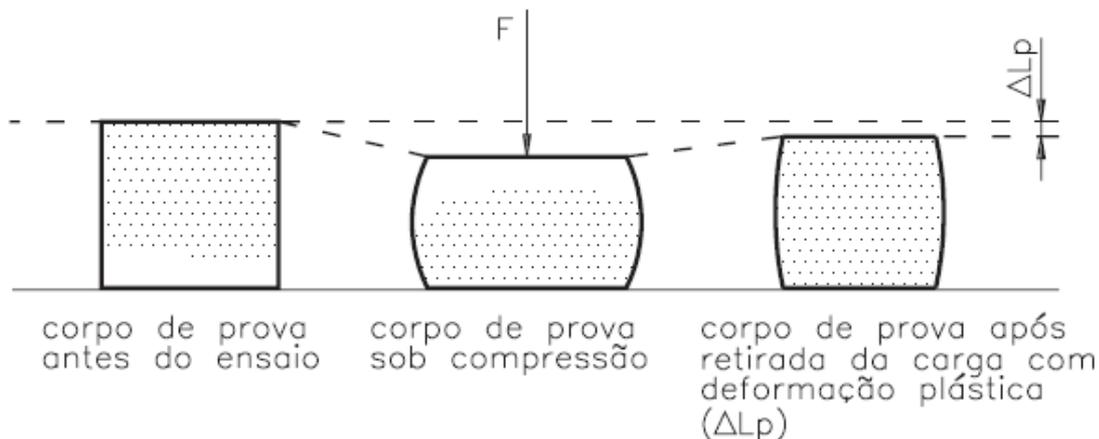
- O ensaio de compressão é a aplicação de carga compressiva uniaxial uniforme na seção transversal em um CP;
- A deformação linear obtida pela medida da distância entre as placas que comprimem o corpo versus a carga de compressão consiste no resultado do ensaio;
- As propriedades mecânicas obtidas são as mesmas do ensaio de tração.



Na fase de **deformação elástica**, o corpo volta ao tamanho original quando se retira a carga de compressão.



Na fase de **deformação plástica**, o corpo retém uma **deformação residual** depois de ser descarregado.



Ensaio Compressão

- Pode ser executado na **máquina universal** de ensaios, com a adaptação de duas placas lisas - uma fixa e outra móvel;
- As **relações que valem para a tração** valem também para a **compressão** (Sofre Deformação Elástica + Plástica);
- A **lei de Hooke** também vale para a **fase elástica** da deformação, e é possível determinar o módulo de elasticidade para diferentes materiais;
- As equações para cálculo da **tensão, da deformação e do módulo de elasticidade** são **semelhantes** às que já foram demonstradas em aulas anteriores para a tensão de tração;
- **Resultados** quantitativos: parâmetros de **processos de conformação**;
- Sofre influência: **defeitos superficiais**, microestrutura, geometria e ambiente;

- O ensaio de compressão **não** é normalmente usado **para metais**:
 - **existência de atrito entre a matriz (placa/base) e o corpo de prova.**
 - **dificuldade de medidas dos valores numéricos dos ensaios.**
 - **possibilidade de flambagem.**

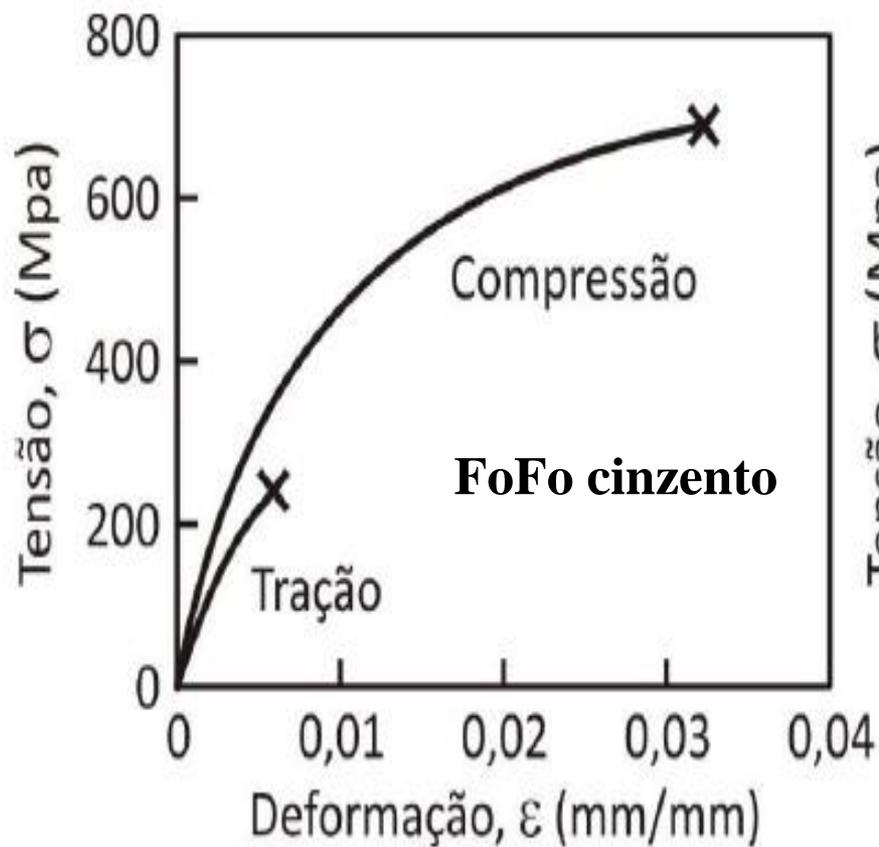
- Por outro lado, **materiais frágeis**, por possuírem **baixa ductilidade**, como por exemplo FoFo, **fraturam** em um plano de **45° com a direção de aplicação de carga**, ou seja, fratura nos planos de **máxima tensão de cisalhamento**;

- **ASTM E9-09** *Standard Test Methods of Compression Testing of Metallic Materials at Room Temperature* (**para metais**), a **ASTM D695-15** *Standard Test Method for Compressive Properties of Rigid Plastics* (**plásticos**) e a **ABNT NBR 5739:2018** **Concreto-Ensaio de compressão de corpos de prova cilíndricos**

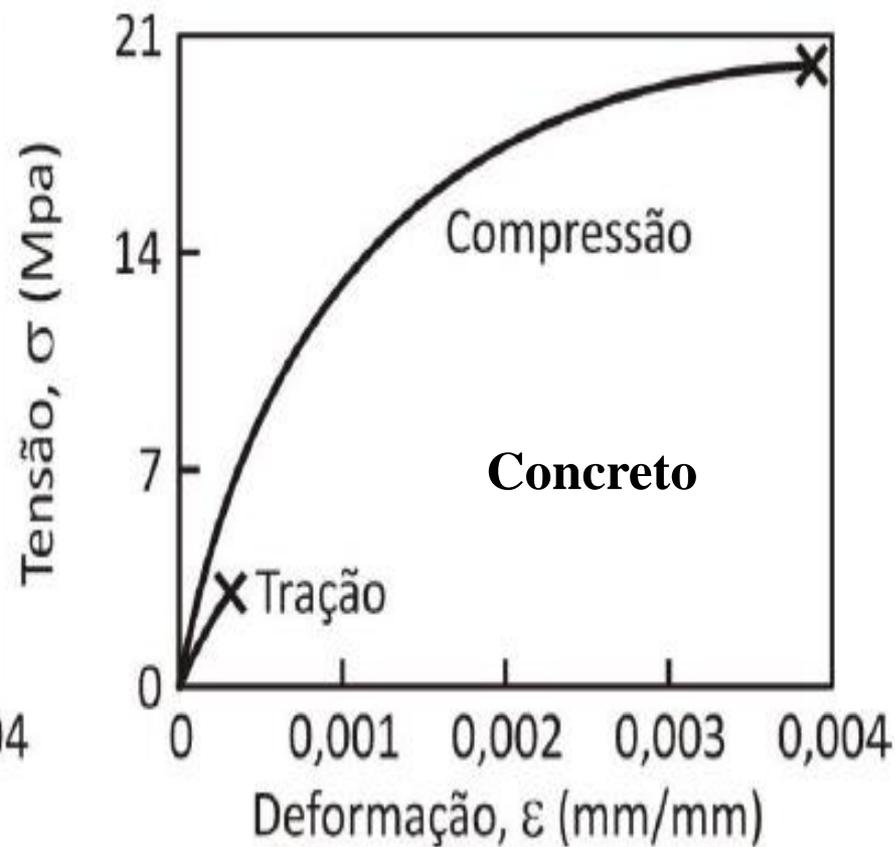
Parâmetros do ensaio de compressão

- **Limite de escoamento (σ_e)** : quando **não** apresentar o patamar **nítido**, é regido pelas normas (ex.: **0,2% deformação**);
- **Limite de resistência à compressão (σ_r)** : **máxima** tensão antes da ruptura;
- **Dilatação Transversal(ϕ)**: é o fenômeno **inverso da** **estricção** ou redução de área. Pode ser entendido como o **equivalente da estricção da tração** -

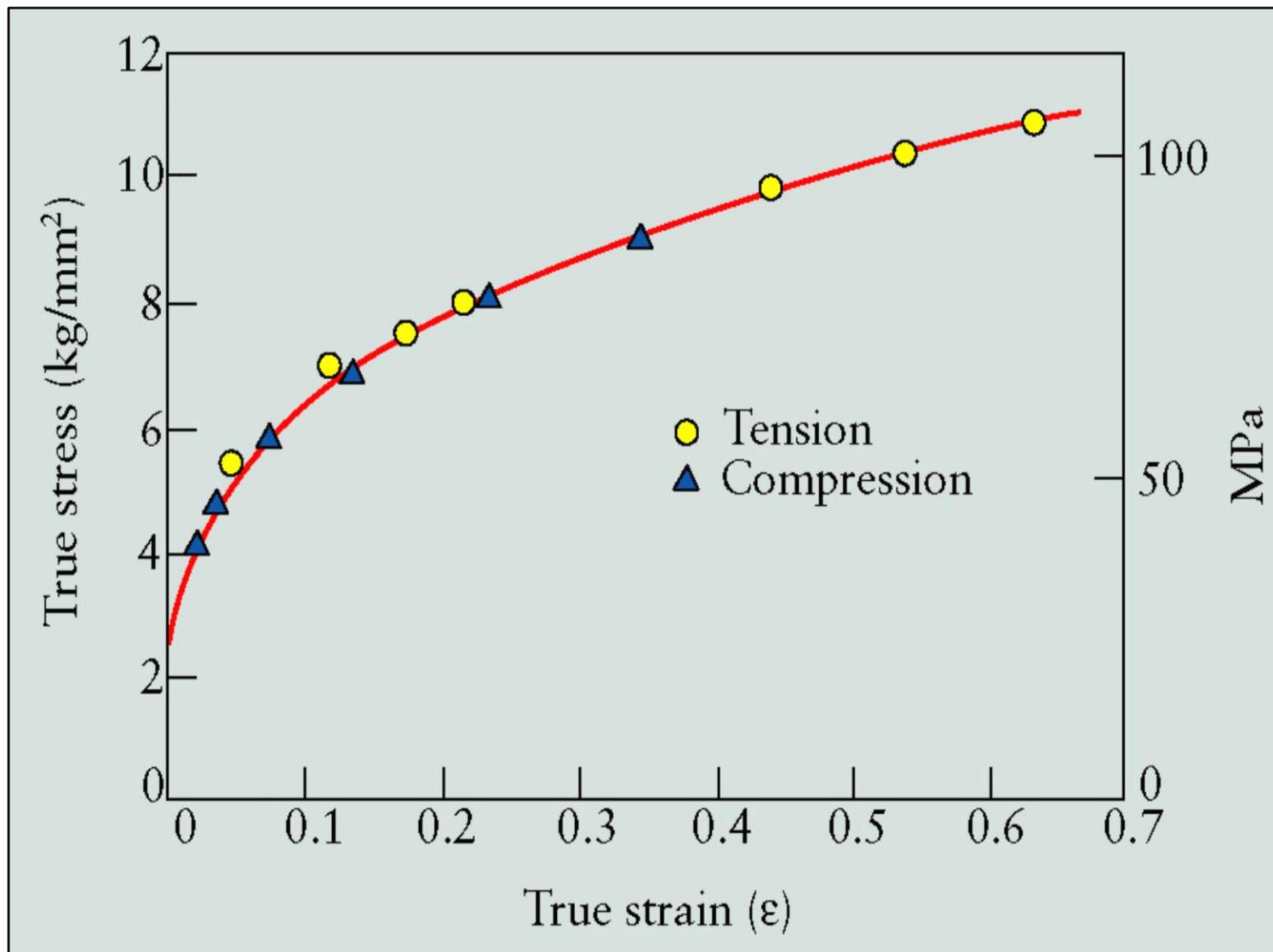
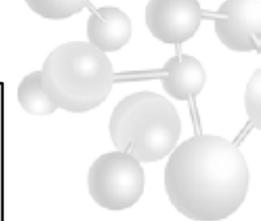
$$\phi = \frac{A_f - A_0}{A_0}$$



(a)

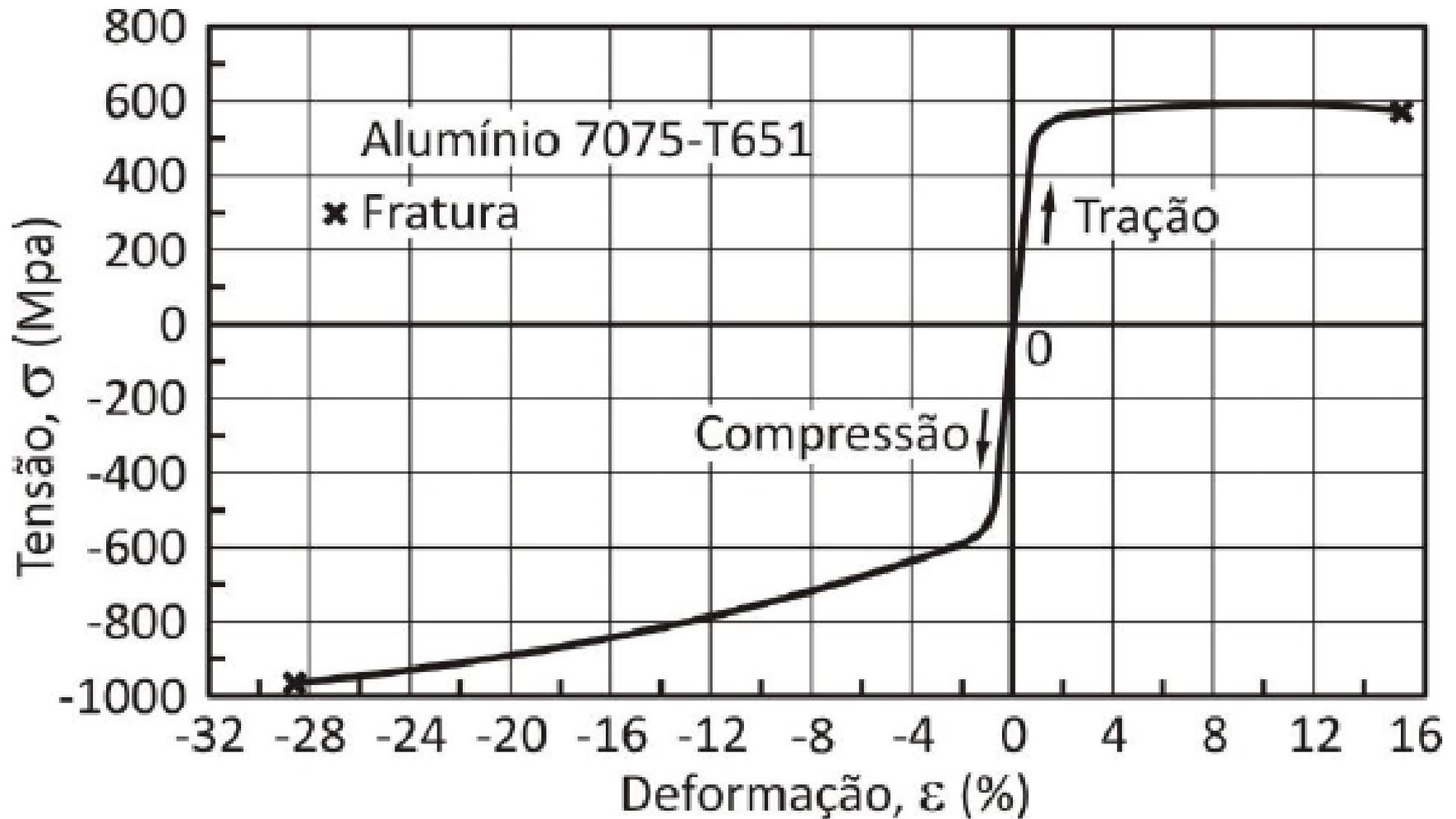


(b)

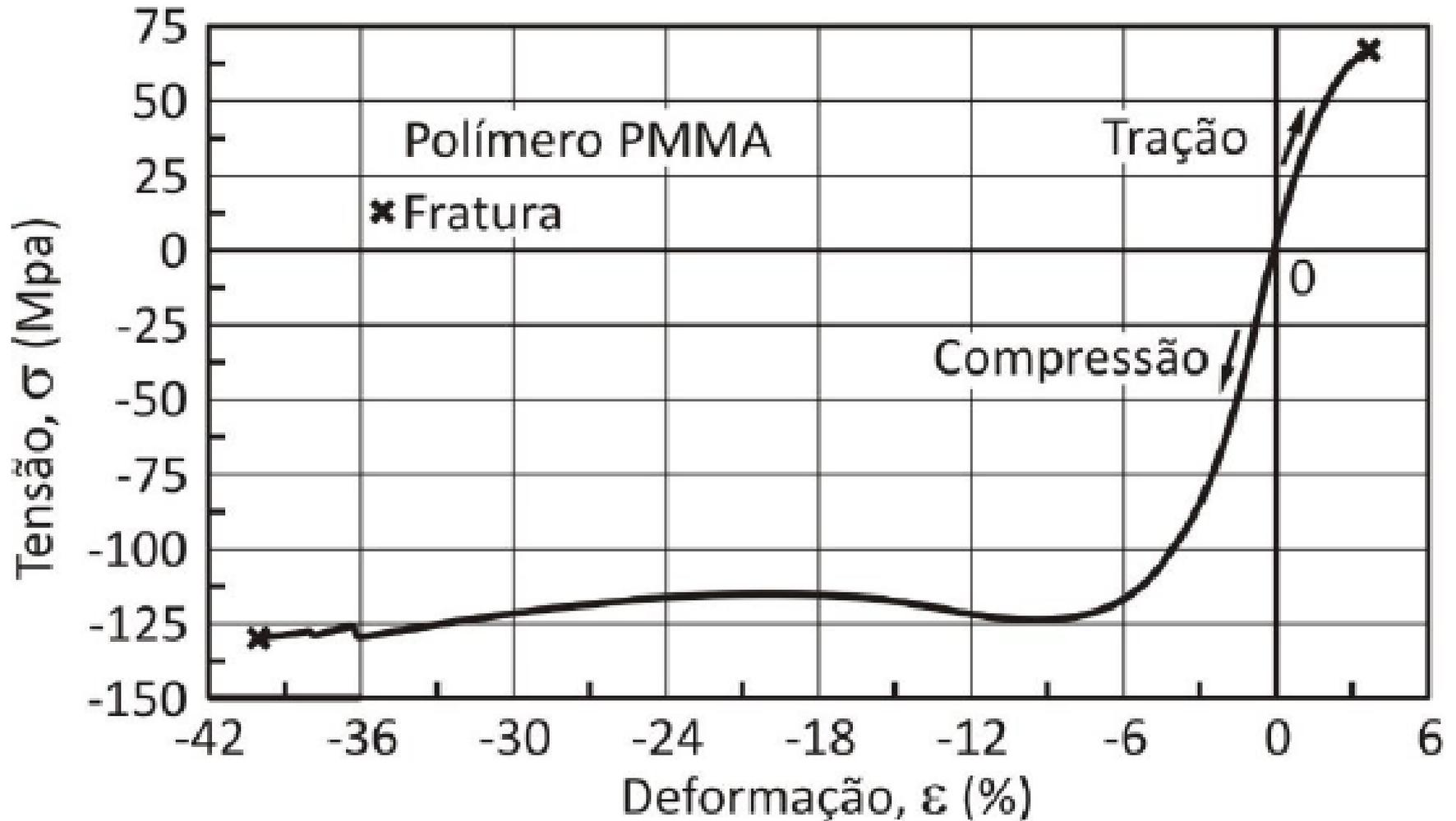


Curva tensão – deformação verdadeira em tração e compressão para o Al.

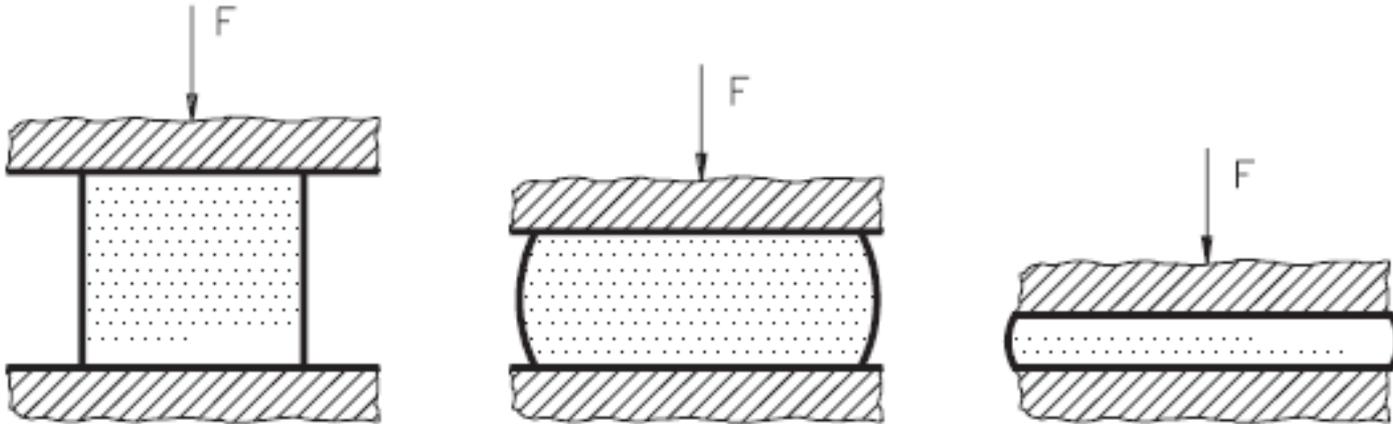
Liga de Al- Endurecida por precipitação (envelhecida)



Polimetilmetacrilato (acrílico)



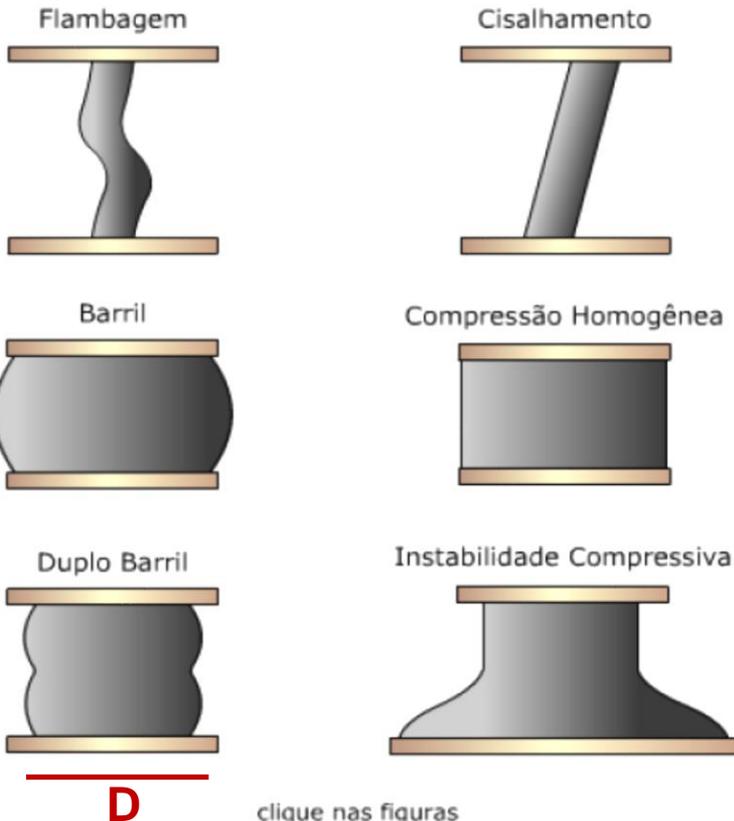
Ensaio de Compressão em Materiais Dúcteis



- Nos materiais dúcteis a compressão vai provocando uma deformação lateral apreciável até o CP se **transformar num disco, sem que ocorra a ruptura.**
- É por isso que o ensaio **de compressão de materiais dúcteis** fornece apenas as **propriedades** mecânicas referentes à **zona elástica.**
- As propriedades mecânicas mais avaliadas por meio do ensaio são: **limite de proporcionalidade, limite de escoamento e módulo de elasticidade.**

Modos de Deformação – Material Dúctil

Modos de Deformação



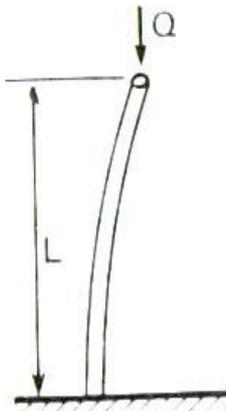
- (a) Flambagem, quando $L/D > 5$
- (b) Cisalhamento, quando $L/D > 2,5$
- (c) Barril duplo, quando $L/D > 2,0$
- (d) Barril , quando $L/D > 2,0$ e há fricção nas superfícies de contato
- (e) Compressão homogênea, quando $L/D < 2,0$ e não existe fricção nas superfícies de contato
- (f) Instabilidade compressiva devido ao amolecimento do material por efeito de carga.

A flambagem, o cisalhamento e a instabilidade devem ser evitados

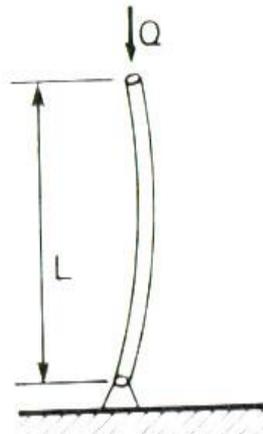
Flambagem

No **ensaio** de compressão, **evita-se** a **flambagem elástica** (instabilidade na compressão de um material dúctil) dimensionando-se o CP, de modo a se obter uma **tensão máxima menor** que a **tensão crítica** que provocaria a **flambagem**.

$$Q_c = \frac{\pi^2 EJ}{4L^2}$$



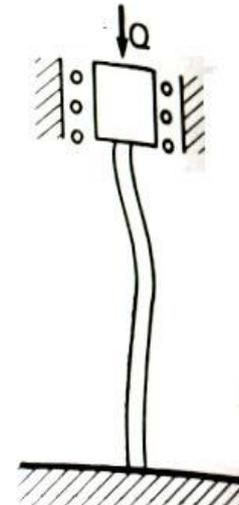
$$Q_c = \frac{\pi^2 EJ}{L^2}$$



$$Q_c = \frac{20,2 EJ}{L^2}$$



$$Q_c = \frac{4\pi^2 EJ}{L^2}$$



Na figura são mostradas as diversas **cargas críticas para flambagem (Q_c)**, para cada tipo de fixação

Dimensões do Corpo-de-Prova

Dimensões dos corpos-de-prova para ensaio em compressão segundo a Norma ASTM E9-89

Corpo de Prova	Diâmetro, mm	Comprimento, mm
-Pequeno	$30 \pm 0,2$	$25 \pm 1,0$
	$13 \pm 0,2$	$25 \pm 1,0$
-Médio	$13 \pm 0,2$	$38 \pm 1,0$
	$20 \pm 0,2$	$60 \pm 3,0$
	$25 \pm 0,2$	$75 \pm 3,0$
	$30 \pm 0,2$	$85 \pm 3,0$
-Longo	$20 \pm 0,2$	$160 \pm 3,0$
	$32 \pm 0,2$	320

Relação h_0/D_0
Dúcteis : 3 a 8
Frágeis : 2 a 3

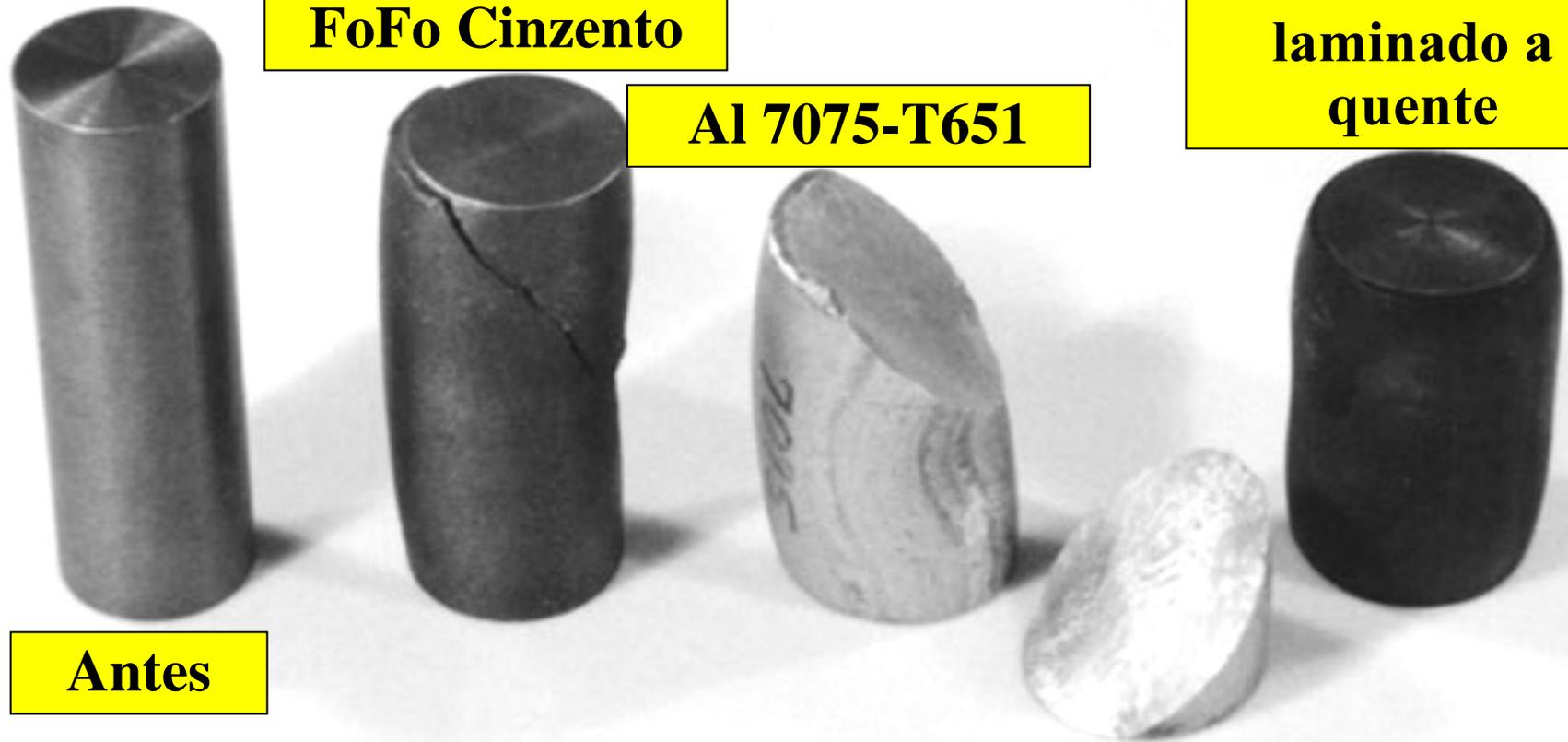
Corpos-de-prova de ensaios de compressão

FoFo Cinzento

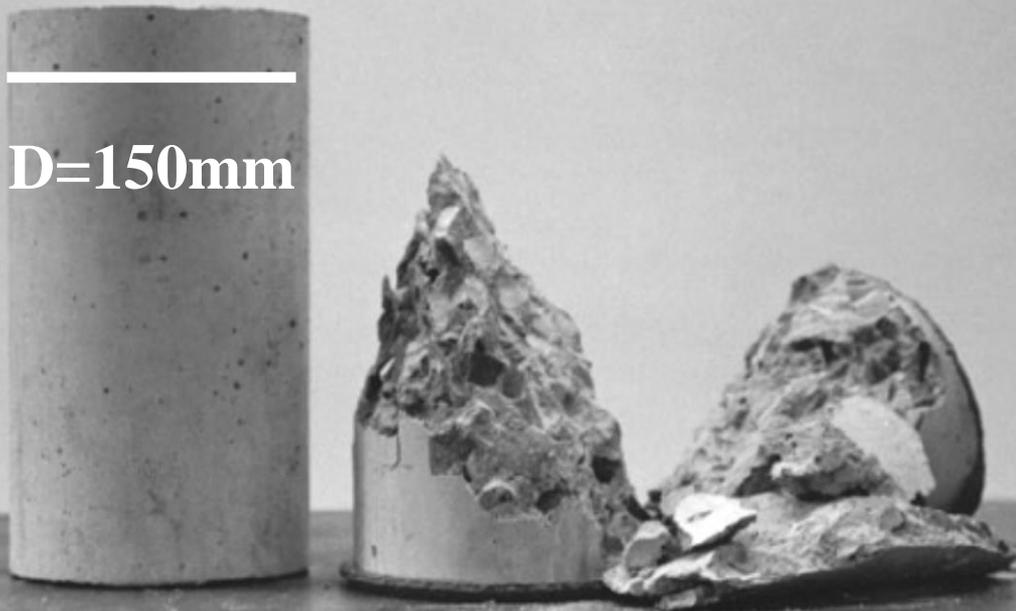
Al 7075-T651

**SAE 1020
laminado a
quente**

Antes



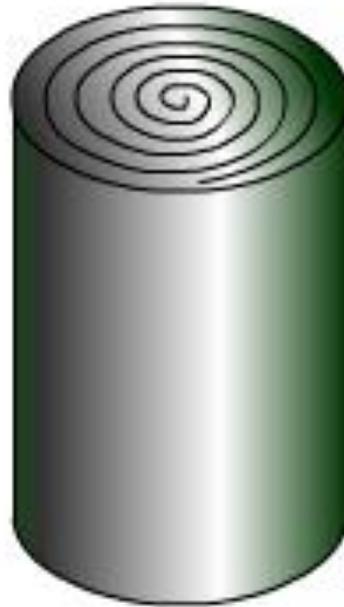
D=150mm



Concreto

Os fatores atrito e relação L/D atuam conjuntamente, tanto no modo como nos valores da deformação.

Corpo de prova mostrando os sulcos usinados para reter o material de lubrificação



Resultados do ensaio

Resistência à compressão convencional

$$\sigma_{cr} = \frac{4P_{max}}{\pi D^2}$$

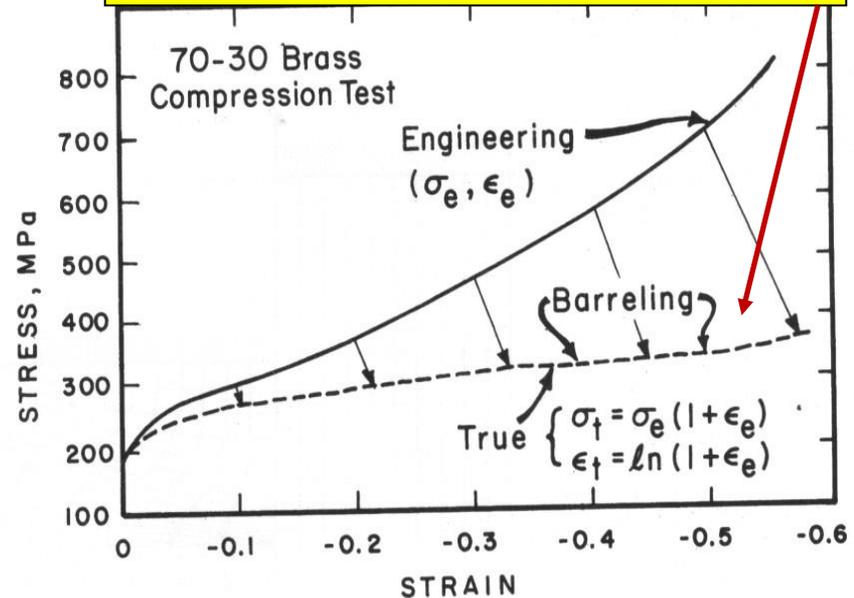
Resistência à compressão Verdadeira

$$\sigma_r = \frac{4.P.h}{\pi.D_0^2.h_0}$$

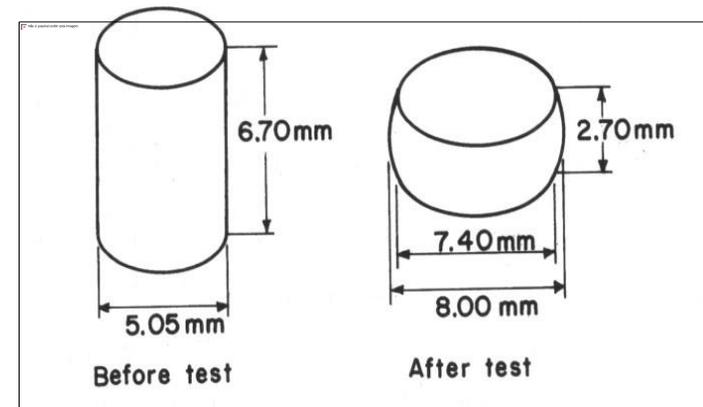
Deformação Verdadeira

$$\varepsilon_r = -\ln \frac{h_0}{h}$$

Efeito do Embarrilhamento



(a)

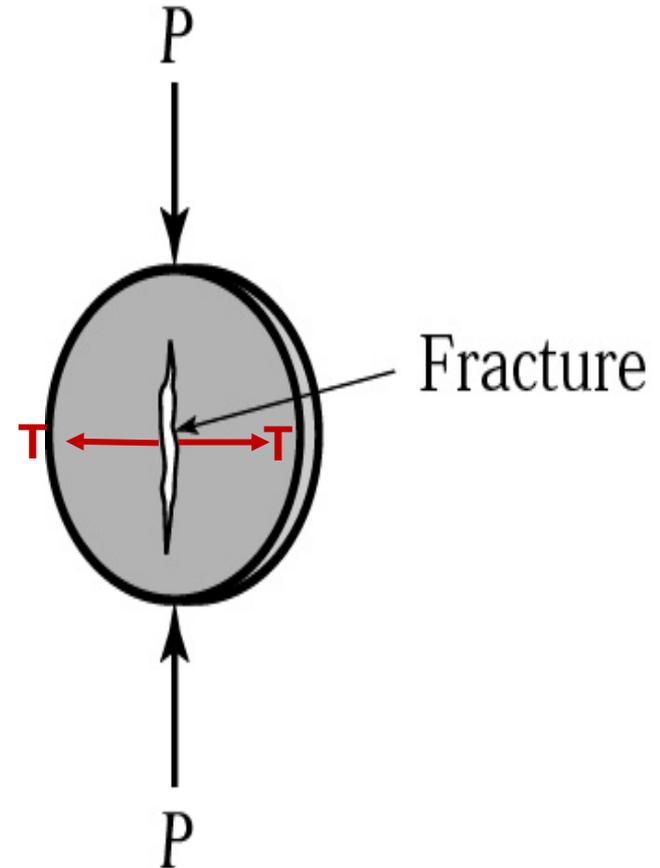


(b)

Figure 3.14 (a) Stress-strain (engineering and true) curves for 70-30 brass in compression. (b) Change of shape of specimen and barreling.

Teste de Compressão de Discos

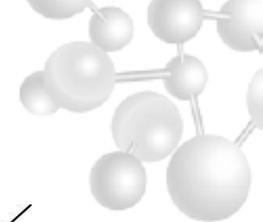
- Desenvolvido para materiais frágeis, tal como cerâmicas e vidros.
- O disco é submetido a compressão entre matrizes duras e planas.
- Quando o material é carregado, tensões trativas são desenvolvidas perpendicular a linha de centro ao longo do disco, a fratura começa e o disco é verticalmente dividido ao meio.



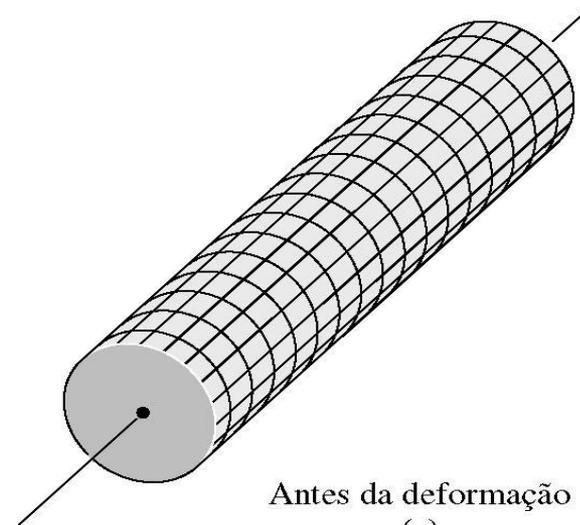
Ensaio de Torção

- Já lhe aconteceu de estar apertando um **parafuso** e, de repente, ficar com dois pedaços deste nas mãos. O **esforço de torção** é o responsável por estragos como esse.
- Peças submetidas à torção: **virabrequim de automóvel, dos eixos de máquinas, polias, molas helicoidais e brocas**;
- Na torção o esforço é aplicado no sentido de rotação, promovendo **cisalhamento puro (responsável pela deformação plástica)**.
- O ensaio de torção é de **execução relativamente simples**, porem para obter as propriedades do material ensaiado são necessários **cálculos matemáticos complexos**.
- Como na torção **uma parte do material está sendo tracionada e outra parte comprimida**, em casos de rotina **podemos usar os dados do ensaio de tração para prever** como o material ensaiado irá se comportar quando sujeito a torção.
- O **ensaio de torção** não é tão largamente empregado como o ensaio de tração mas muito útil para aplicações de engenharia, **especialmente no estudo de processos de conformação**.

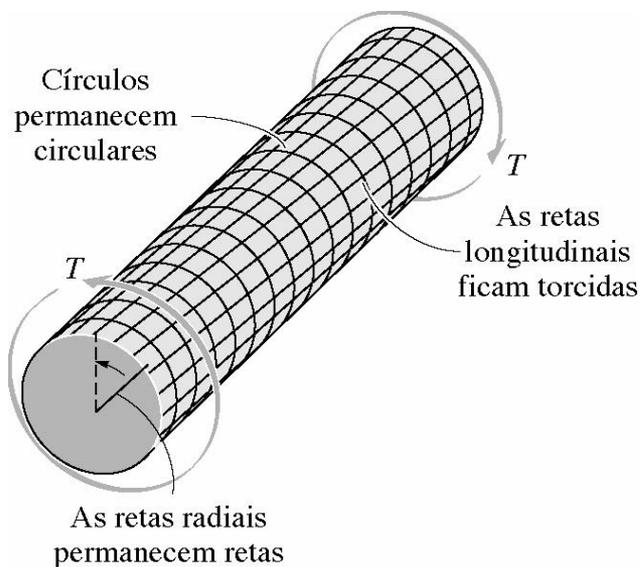
Torção em Eixos Circulares



Antes torção



Antes da deformação
(a)

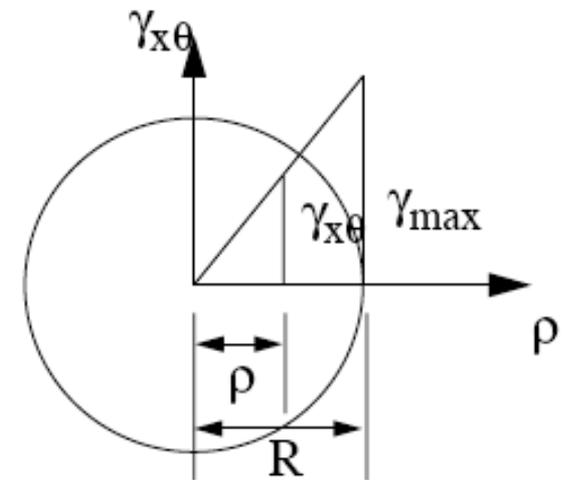
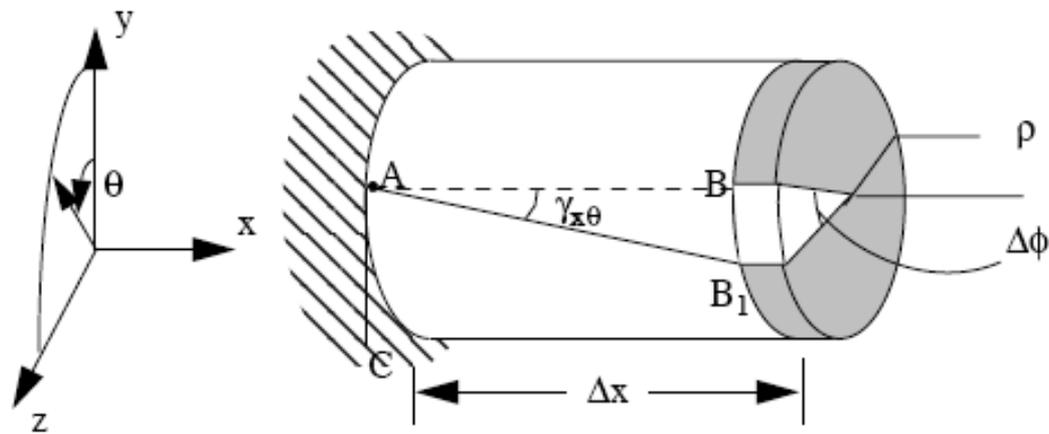
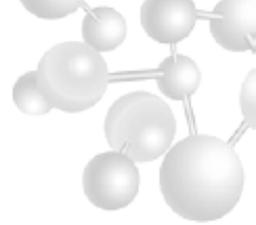


Após a deformação
(b)

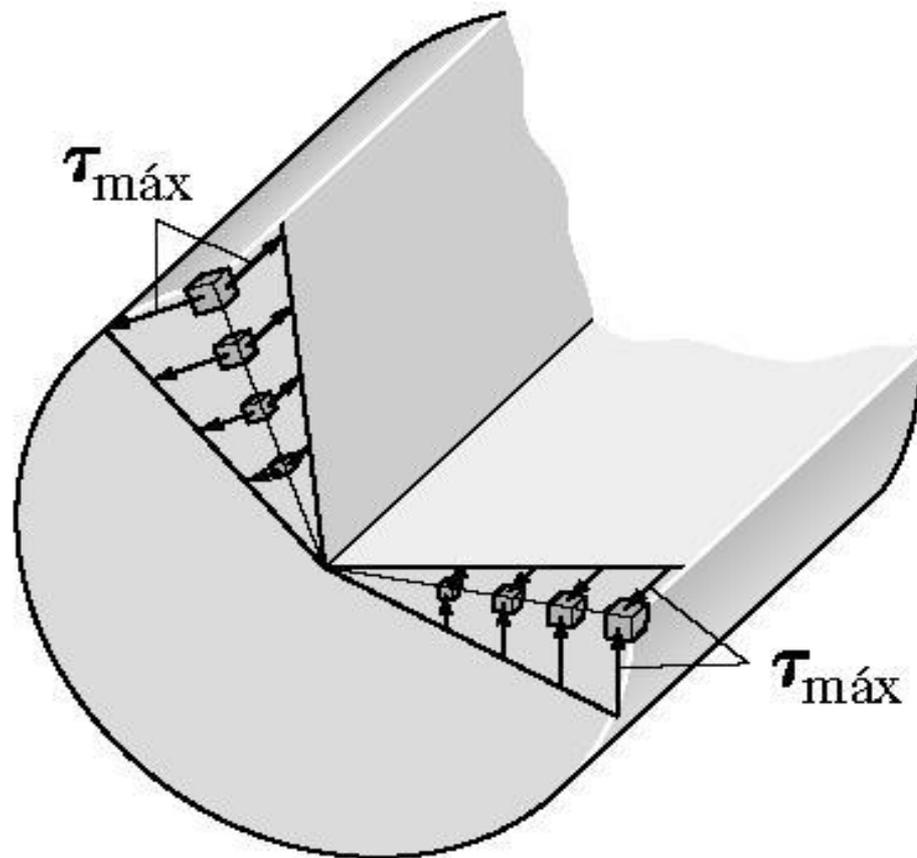
Depois torção



Deformação Angular



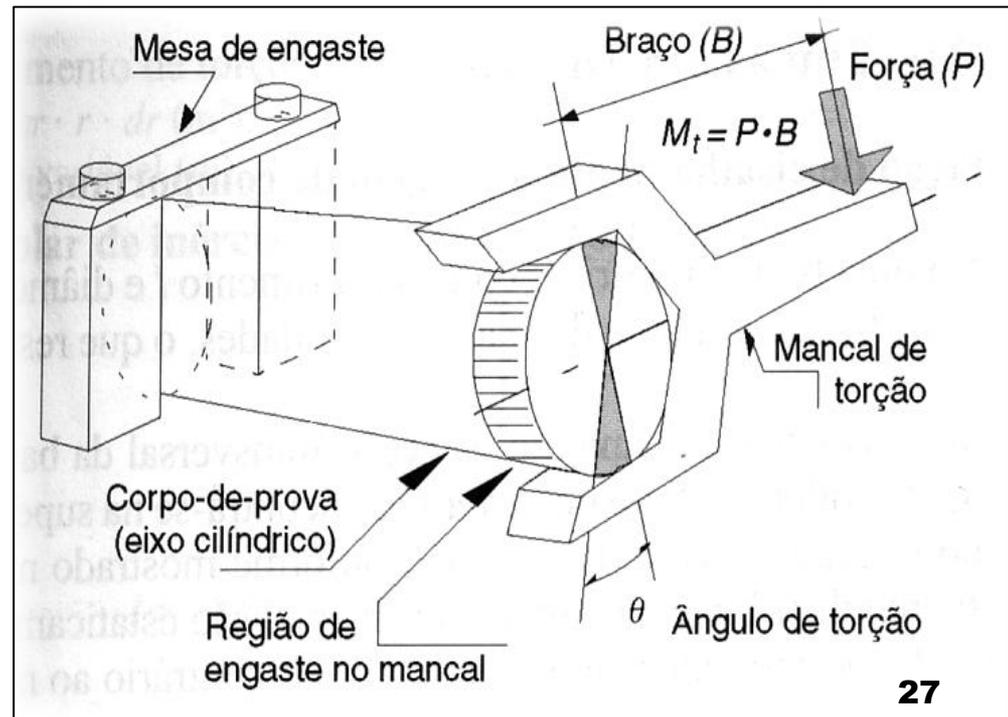
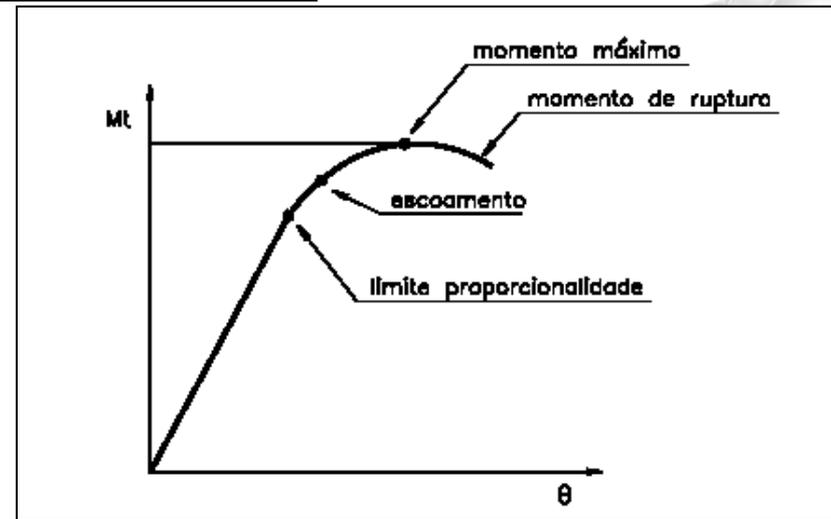
Perfil de Tensão Cisalhante



A tensão de cisalhamento varia linearmente ao longo de cada reta radial da seção transversal.

Ensaio de Torção

- O Ensaio de torção consiste na aplicação de carga rotativa em um corpo de prova geralmente de geometria cilíndrica;
- Mede-se o ângulo de torção como função do momento torsor aplicado;
- Muito utilizado na indústria de componentes mecânicos como motores de arranque, turbinas aeronáuticas, rotores de máquinas pesadas, barras de torção, molas etc...



Ensaio de Torção



As propriedades principais obtidas no ensaio de torção são:

- Limite de escoamento em torção

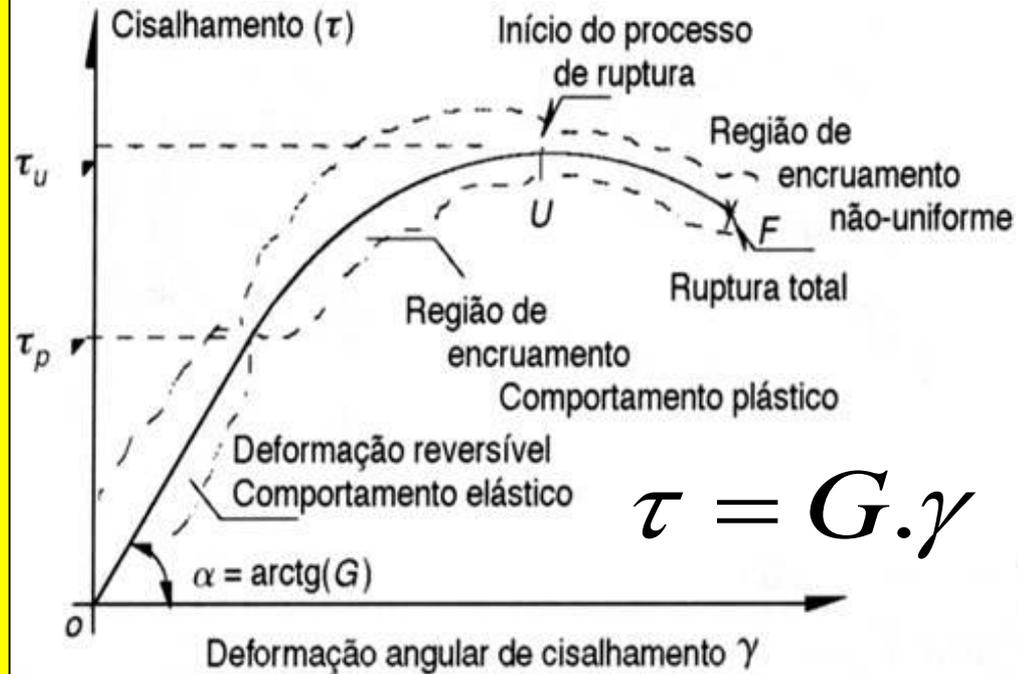
$$\tau_e$$

- Módulo de ruptura em torção

$$\tau_u$$

- Módulo de elasticidade transversal ou de cisalhamento

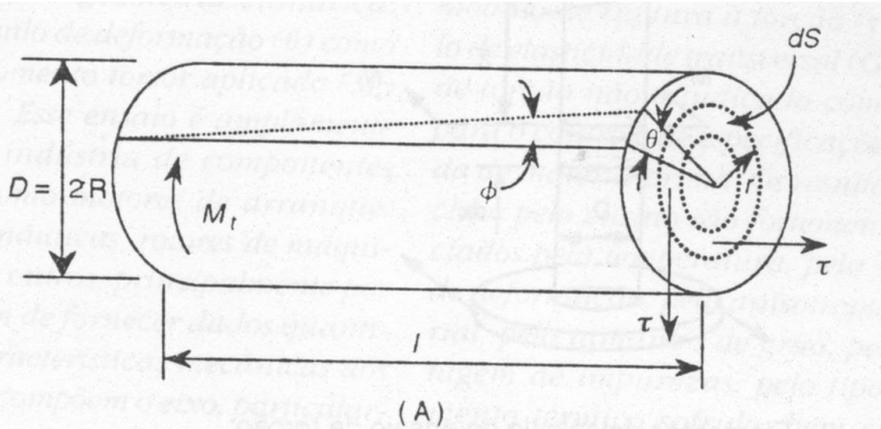
$$G$$



G = módulo de cisalhamento (ensaios de torção)

τ = Tensão de cisalhamento

γ = Deformação de cisalhamento



$$M_T = \int_{r=0}^{r=a} \tau r dA = \frac{\tau}{r} \int_0^a r^2 dA$$

Momento polar de inércia, J

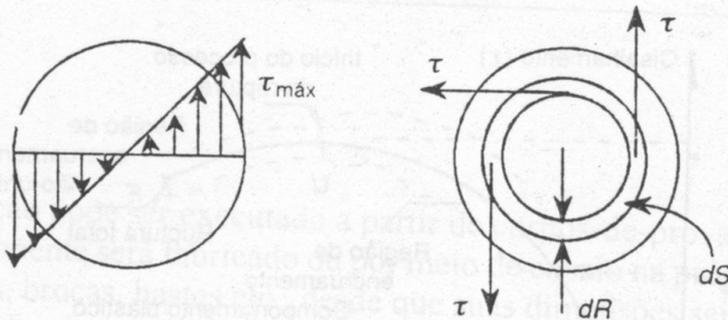
$$M_T = \frac{\tau J}{r} \quad \Rightarrow \quad \tau = \frac{M_T r}{J}$$

t = tensão de cisalhamento, MPa

M_T = momento torsor, N.m

r = dist. radial medida do centro da barra, m

J = momento polar de inércia, m^4



Como a tensão máxima de cisalhamento se verifica na superfície e o momento polar de inércia de uma seção circular e:

$$J = \frac{\pi}{32} \cdot D^4$$

Tem-se

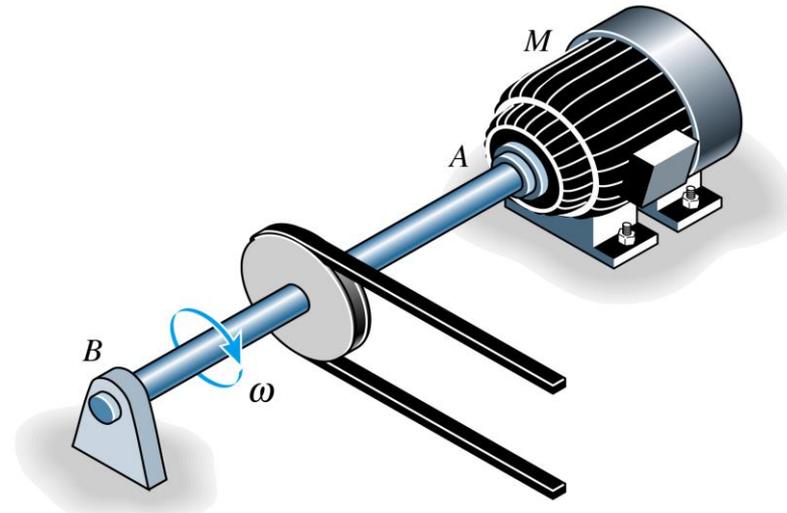
$$\tau_{\max} = \frac{16 M_T}{\pi D^3}$$

Para um corpo tubular tem-se:

$$\tau_{\max} = \frac{16 M_{T \max} D_1}{\pi (D_1^4 - D_2^4)}$$

Ensaio de Torção

O ensaio de torção pode ser executado a partir de **cps** feitos de material de que o componente será fabricado ou por meio de ensaio na **própria peça**, como por exemplo eixos, brocas, hastes, etc.



A máquina de ensaio possui um **motor**, responsável pela **aplicação do momento torçor**, em uma das extremidades do corpo de prova. O **momento é transmitido à outra extremidade** que fica engastado à máquina de ensaio. Durante o ensaio **registra-se o momento de torção (célula de carga de torção) contra o ângulo de torção** ou giro relativo da extremidade (encoder).

Máquina para Ensaio de torção

CP



Ensaio de Torção

ASTM E588-83

- Fixação das extremidades do CP na máquina: não ocorra danos ou destruição das mesmas, ocasionando pontos de nucleação de trincas e conseqüentemente fratura;**
- A distância entre as fixações será considerada o comprimento útil do corpo de prova (l);**
- A rotação ou giro do CP deverá ocorrer apenas ao longo do comprimento útil e não na região engastada;**
- O equipamento deverá ser dotado de um dispositivo de leitura de giro, diminuindo possíveis erros do operador nas medidas (ex. encoder);**
- Como a tensão máxima de cisalhamento ocorre na superfície, recomenda-se que esta seja sem defeitos ou marcas que podem mascarar o comportamento do componente como um todo;**
- A velocidade de giro deve ser pequena, e medida em rpm ou rps.**

Ensaio de Torção

M_t (N·m)

$M_{t\text{ esc}}$

LP

r =média dos diâmetros
 R =Raio

$$\tau_e = \frac{M_{Te}R}{J_p} \quad (\text{secção circular}),$$
$$\tau_e = \frac{M_{Te}}{2\pi r^2 e} \quad (\text{secção tubular}).$$

$(0,057 \text{ graus} = 0,001 \text{ rad})$ θ
(rad)

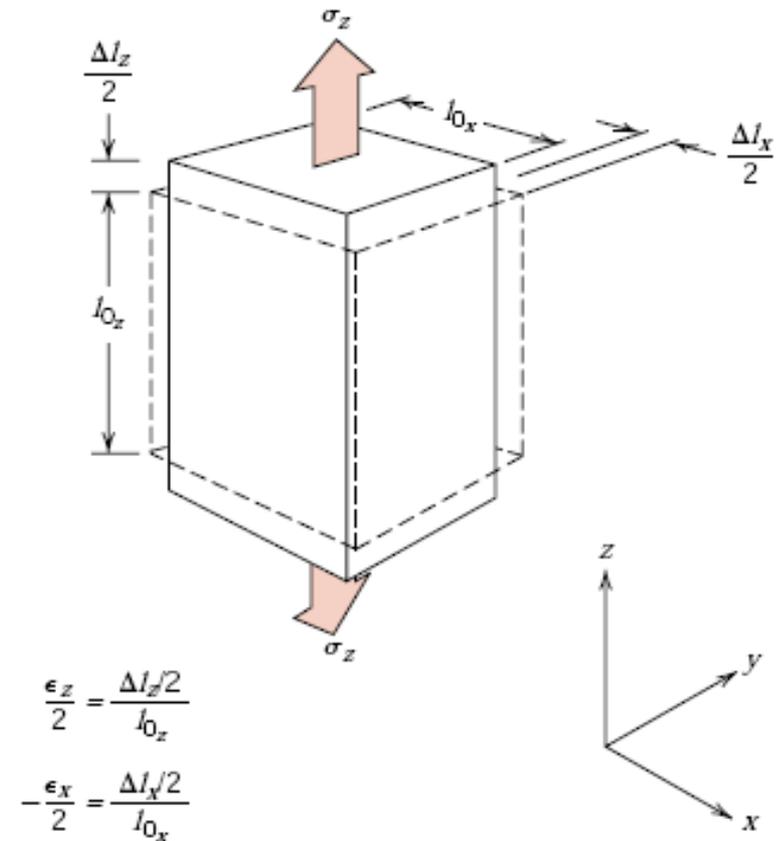
De modo similar ao ensaio de tração, o **limite de proporcionalidade (LP)** pode ser determinado pelo final da linearidade entre o momento torçor (M_t) e deformação e o **escoamento** pela **deformação angular X $M_{t\text{ esc}}$** .

Coeficiente de Poisson

➤ É o coeficiente que mede a rigidez do material na direção perpendicular à direção da carga de tração uniaxial aplicada. No ensaio de tração é o quociente entre a deformação lateral (ϵ_x) e a deformação na direção da tensão (ϵ_z) para materiais isotrópicos

$$\nu = -\frac{\epsilon_x}{\epsilon_z} = -\frac{\epsilon_y}{\epsilon_z}$$

➤ Para materiais isotrópicos, o módulo de elasticidade está relacionado com o coeficiente de Poisson



Relação entre G e E :

$$E = 2G(1 + \nu)$$

Valores de módulos de elasticidade e coeficiente de Poisson

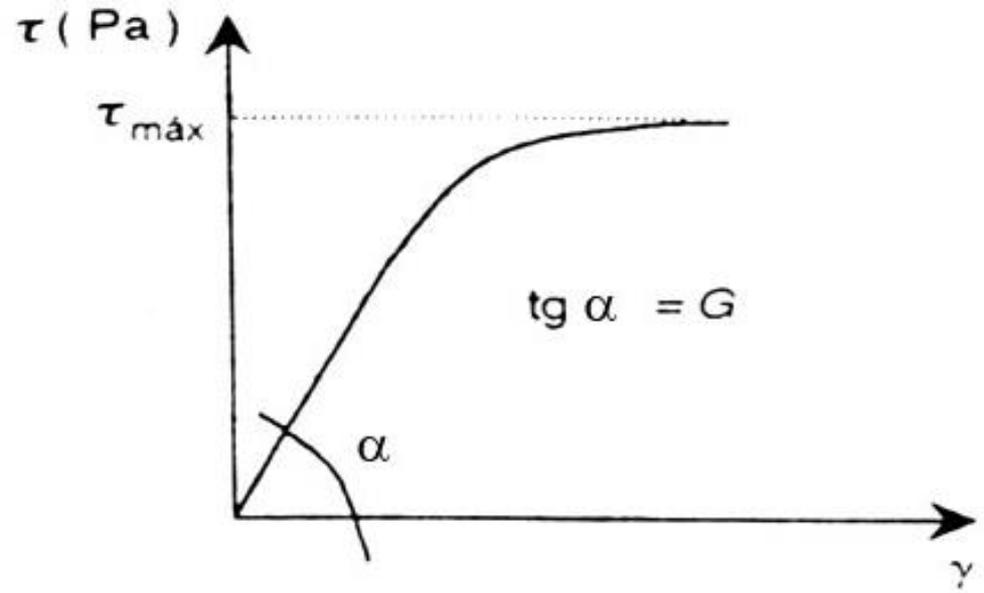


<i>Material</i>	<i>Modulus of Elasticity</i>		<i>Shear Modulus</i>		<i>Poisson's Ratio</i>
	<i>GPa</i>	<i>10⁶ psi</i>	<i>GPa</i>	<i>10⁶ psi</i>	
Metal Alloys					
Tungsten	407	59	160	23.2	0.28
Steel	207	30	83	12.0	0.30
Nickel	207	30	76	11.0	0.31
Titanium	107	15.5	45	6.5	0.34
Copper	110	16	46	6.7	0.34
Brass	97	14	37	5.4	0.34
Aluminum	69	10	25	3.6	0.33
Magnesium	45	6.5	17	2.5	0.35

Normalmente ν varia entre 0,25 a 0,35

O módulo de elasticidade transversal ou o módulo de cisalhamento, G , é definido no intervalo elástico como a razão entre a tensão e a deformação cisalhante:

$$G = \frac{\tau}{\gamma}$$



O módulo de elasticidade está relacionado ao módulo de cisalhamento por:

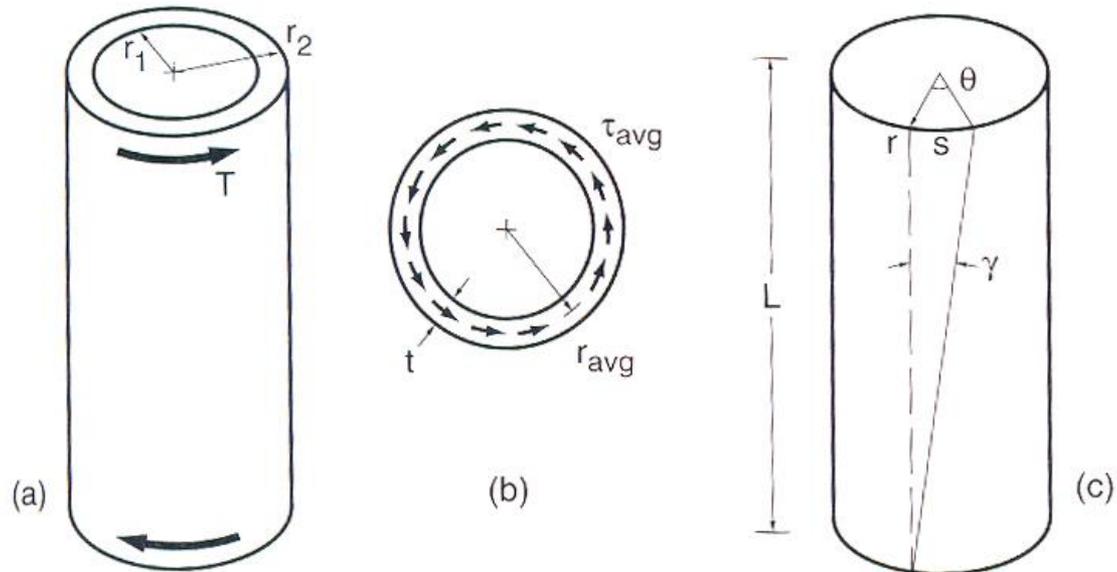
$$G = \frac{E}{2(1 + \nu)} \quad \nu \cong 0,33 \text{ (aços)}$$

Ensaio de Torção (TUBO PAREDE FINA)

Corpo de prova típico de ensaio de torção. É montado entre duas garras da máquina e é torcido. Note a tensão de cisalhamento média τ_{avg} e a deformação de cisalhamento média γ

$$G = \frac{M_T L}{2\pi(\phi_{avg})^3 e \theta}$$

$\theta = \text{radianos}$

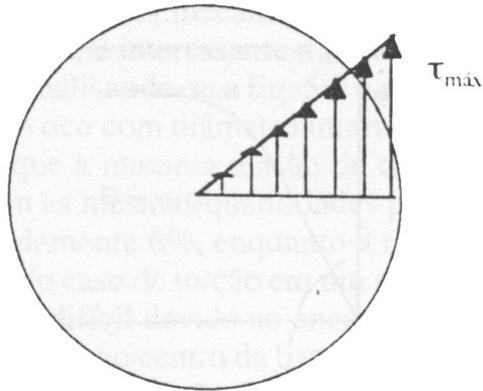


(a) tubo de parede fina ($e < d_{ext}/10$) em torção (b) tensão de cisalhamento τ_{avg} aproximadamente uniforme na seção e (c) ângulo θ e deformação angular de cisalhamento γ .

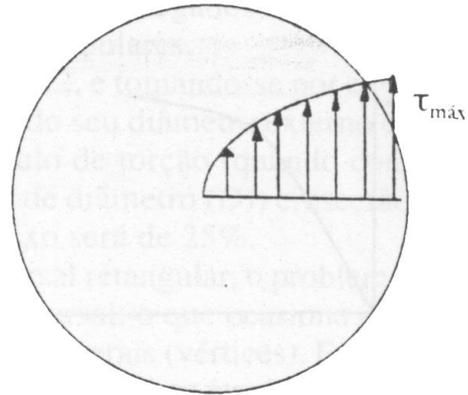
$$\tau_{avg} = \frac{M_T}{2\pi\phi_{avg}^2 e}$$

$$\gamma_{avg} = \frac{r_{avg} \theta}{L}$$

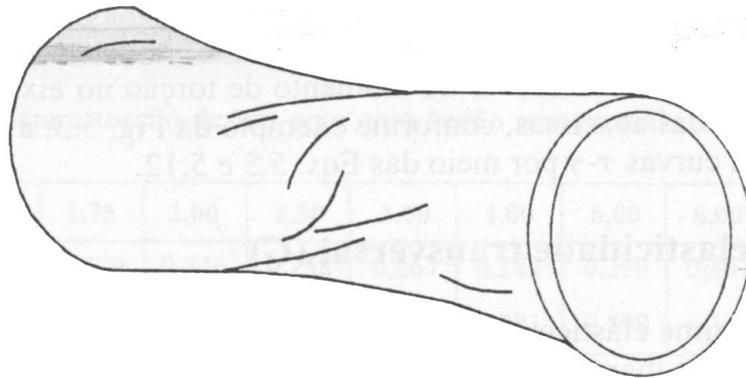
$$r_{avg} = \frac{r_2 + r_1}{2}$$



(A) Zona elástica (linear)



(B) Zona plástica (não-linear)



(C) Cambagem - Fenômeno observado na torção de tubos

O limite de escoamento é difícil de ser determinado principalmente para os mais dúcteis devido ao fenômeno de cambagem (C).

Uma boa **aproximação** é feita entre os resultados obtidos pelo ensaio de torção e o **ensaio de tração**.

$$\tau_e = 0,6 \sigma_e$$

ou

$$\tau_R = 0,8 \sigma_R$$

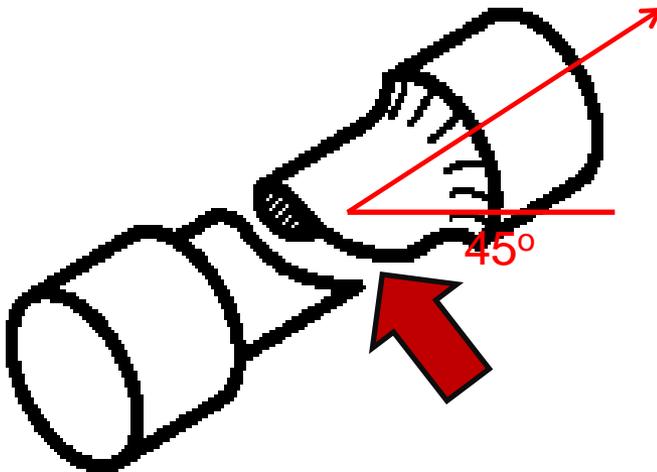
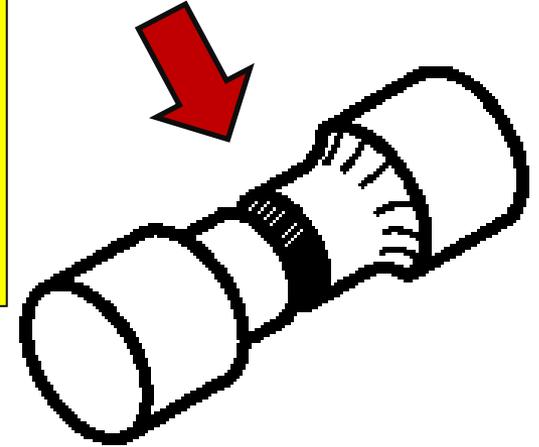
Materiais Dúcteis

$$\tau_R = 1,0 a 1,3 \sigma_R$$

Materiais Frágeis

As fraturas observadas no ensaio de torção são diferentes das obtidas no ensaio de tração.

Os materiais **dúcteis** rompem-se por cisalhamento ao longo do **plano de máxima tensão** de cisalhamento (geralmente um **plano normal**) ou **plano transversal**.



Os materiais frágeis rompem-se em função das **tensões de tração** decorrentes (plano fratura é perpendicular a tensão trativa máxima) sendo dada pela bissetriz do ângulo entre dois planos de máxima tensão fazendo **um ângulo de 45°** com as direções longitudinais e transversais.

TESTE HIDROSTÁTICO ASTM A530





Caso 005: Acidente com Teste Pneumático em Planta de GNL (2009).

O acidente ocorreu em 24/02/2009, na ilha Ximentang, Shanghai/China, no Terminal de GNL (gás natural liquefeito) operado pela Shanghai LNG Co Ltd., durante a execução de teste pneumático de equipamentos.



Aplicação de materiais em média/alta temperatura

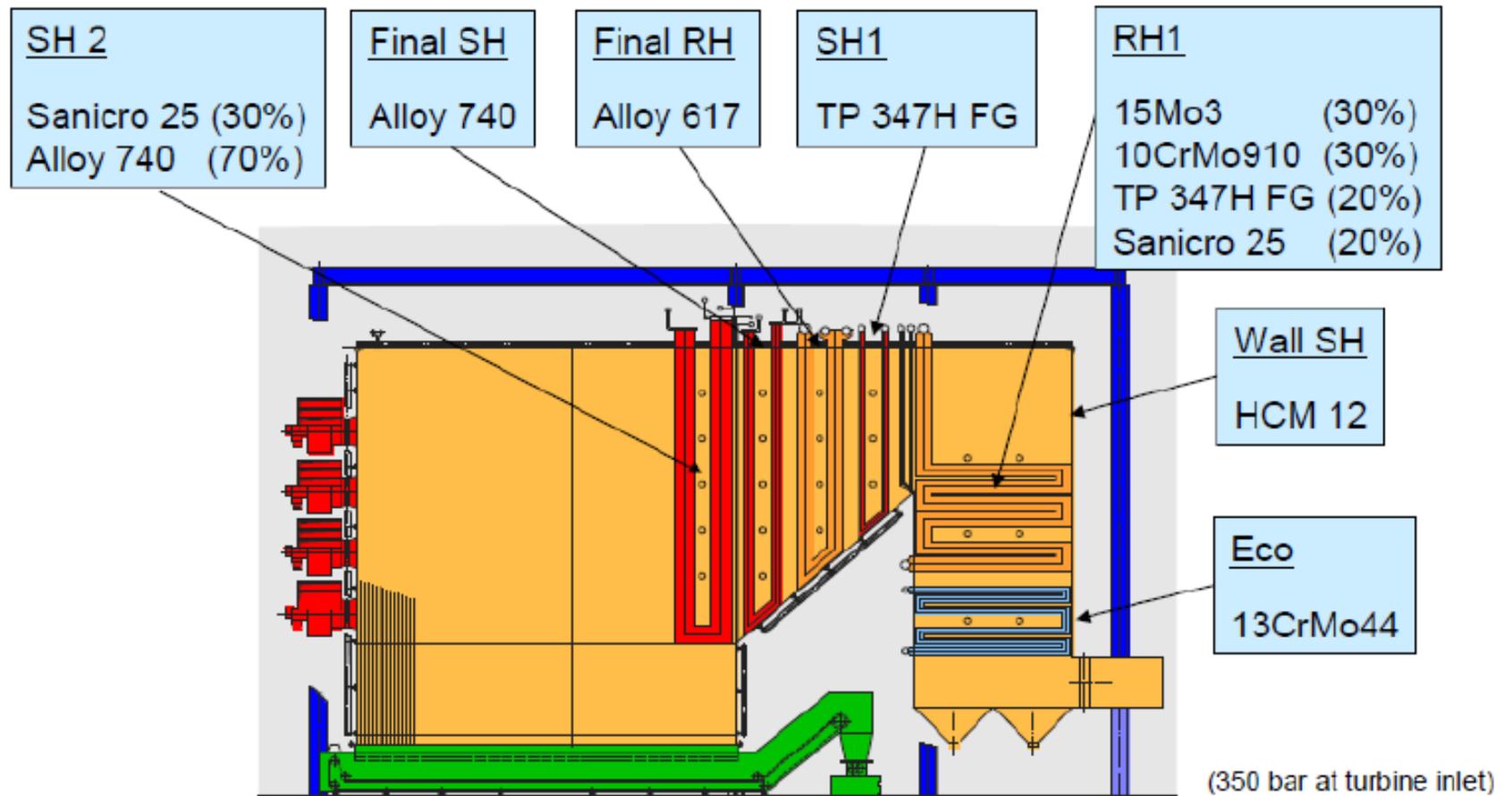
CALDEIRA HORIZONTAL AD700

Termoelétrica



https://projectweb.elsam-eng.com/AD700/Milan_Conference/Forms/AllItems.aspx

CALDEIRA HORIZONTAL – CONCEITO DE MATERIAIS ECONOMIZADOR, SUPERAQUECEDOR E REAQUECEDOR



Algumas ligas para média/alta temperatura

FERRÍTICA/MARTENSÍTICA (F/M), AUSTENÍTICA (AUST.), AÇOS HP CENTRIFUGADOS (HPC), SUPERLIGAS (SL)

	COMPOSIÇÃO, % m/m	Fe	Cr	Ni	Mo	Mn	Nb	OUTROS	CUSTO DAS LIGAS[1]
	15 Mo3	BAL.	0.10	0.10	0.30	0.70	-	C 0.16, Si 0.23	C
F/M	P92	BAL.	9.0	0.4	0.5	0.5	0.07	C 0.1, Si < 0.5, P < 0.02, S < 0.01, Al < 0.04, V 0.20	2 C
AUSTENITIC	SUPER 304	BAL.	18.0	9.0	-	0.8	0.45	C 0.02, Cu 3.0	4-5 C
	TP 347 HFG	BAL.	18.5	11.4	-	1.5	0.90	C 0.04, Si 0.42	
	TP 310	BAL.	25.0	21.0	< 0.01	1.2	0.45	C 0.06, Si 0.04, P < 0.03, S < 0.03	
HPC	E 2030 Nb	BAL.	19.0	31.0	< 0.50	0.30	0.50	C 0.08/0.16, Si 0.50/1.50, P < 0.03, S < 0.03, Al < 0.05	8.5 C
		BAL.	21.0	34.0	< 0.50	0.25	1.60	S < 0.03, Al < 0.05	
	E 2535 Nb	BAL.	24.0	34.0	< 0.50	< 1.5	0.80	C 0.37/0.50, Si 1.25/2.0, P < 0.03, S < 0.025, Al < 0.05, Ti 0.05, V < 0.05	
		BAL.	27.0	37.0	< 0.23	1.02	0.87	C 0.41/0.44, Si 1.3/1.76, P < 0.025, S < 0.03, Ti 0.05/0.09, Y 0.035/0.085	
E 2535 Nb Y	BAL.	25.0	35.3	< 0.23	1.02	0.87	C 0.41/0.44, Si 1.3/1.76, P < 0.025, S < 0.03, Ti 0.05/0.09, Y 0.035/0.085		
	BAL.	26.2	36.6	< 0.50	1.14	1.25	Ti 0.05/0.09, Y 0.035/0.085		
E 3545 Nb	BAL.	30.0	40.0	< 0.50	0.30	0.50	C 0.04/0.60, Si 1.2/1.8, P < 0.03, Al < 0.05		
	BAL.	37.0	47.0	< 0.50	1.50	1.50	C 0.04/0.60, Si 1.2/1.8, P < 0.03, Al < 0.05		
SUPER AUST.	AC 66	BAL.	27.3	31.7	-	0.05	0.8	C 0.06, Si 0.20, Cu 0.87, Ce 0.06	10 C
SL	Alloy 718	18.5	18.6	53.1	3.10	0.20	5.0	C 0.04, Si 0.3, Ti 0.9, Al 0.40	15-20 C
	Alloy 617 B	< 2.0	21.5	64.5	9.0	< 0.70	Co 11.5	C 0.07, Si < 0.7, P < 0.012, S 0.008, Ti 0.35, Al 1.0	
	Alloy 625	3.0	22.0	64.0	9.0	0.15	4.0	C < 0.05, Si 0.3, Ti 0.2, Al 0.2	
	Alloy 740	< 0.7	23.5	49.1	0.50	0.30	2.0	C 0.03, Si < 0.5, P < 0.007, S < 0.007, Ti 1.8, Al 0.90, Co 20.0, Cu < 0.7	

[1] HANDERSON, P. AND HJÖRNHED, A. COMBATING CORROSION IN BIOMASS AND WASTE FIRED PLANT. IN: PROC. OF 9TH LIEGE CONFERENCE: MATERIALS FOR ADVANCED POWER ENGINEERING, LECONTE-BACKERS, J., CONTREPOIS, C., BECK, T. AND KUHN, B. (ED), LIEGE, 2010

MATERIAIS UTILIZADOS EM MÉDIA/ALTA TEMPERATURA ESTÃO SUJEITOS À FLUÊNCIA.

OUTROS EFEITOS:

- REDUÇÃO DA RESISTÊNCIA MECÂNICA COM O AUMENTO DA TEMPERATURA;
- ALTERAÇÕES MICROESTRUTURAIS COM O TEMPO E TEMPERATURA;
- OCORRÊNCIA DE TENSÕES TÉRMICAS;
- OXIDAÇÃO;
- CORROSÃO;

FLUÊNCIA

MATERIAIS UTILIZADOS EM ALTA TEMPERATURA DEVEM APRESENTAR RESISTÊNCIA À FLUÊNCIA

FLUÊNCIA: Acúmulo lento e progressivo de deformação ao longo do tempo, sob carga constante em altas temperaturas (para metais: acima de $0,4 t_f$).

Ex: Para o Alumínio, $T_f = 660^\circ\text{C} + 273\text{K} = 933\text{K}$

$933\text{K} \times 0,4 = 373,2\text{K} - 273\text{K} = 100,2^\circ\text{C}$

Ou seja, a faixa de temperatura a partir da qual o alumínio estará sujeito a fluência inicia em $100,2^\circ\text{C}$

ENSAIO DE FLUÊNCIA

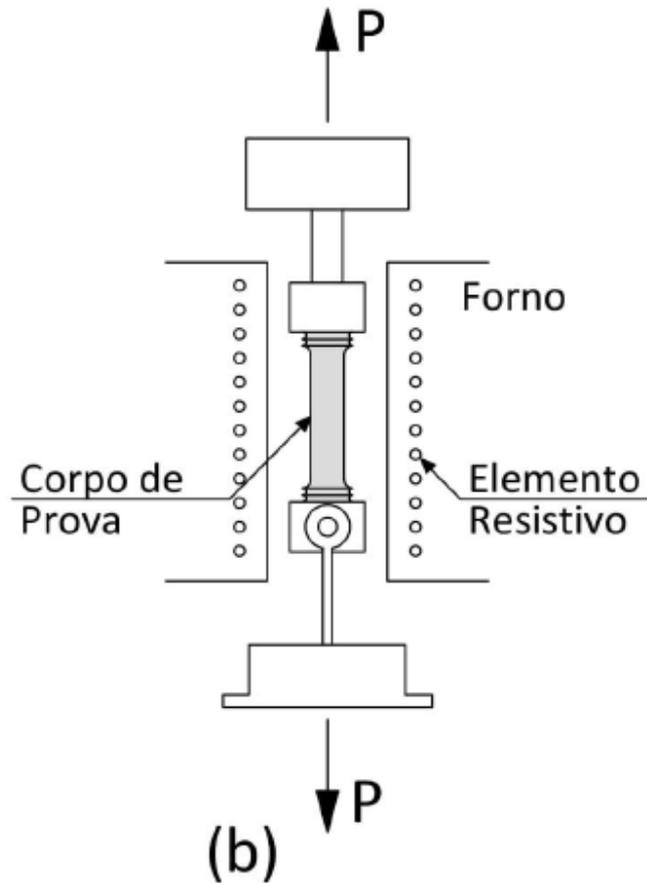
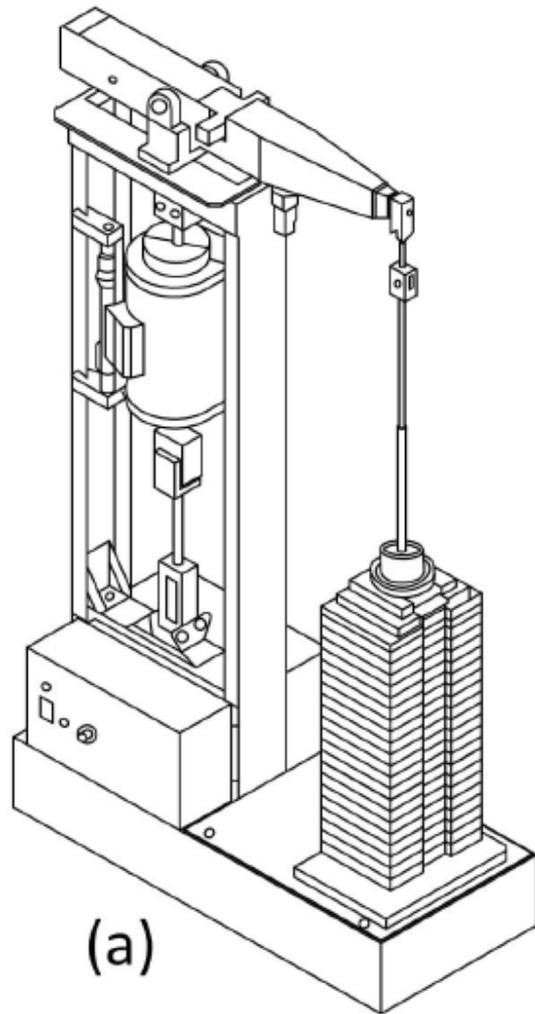


Figura 9.1 Ensaio de fluência: (a) aparência de uma máquina convencional; (b) detalhe do corpo de prova no interior do forno.

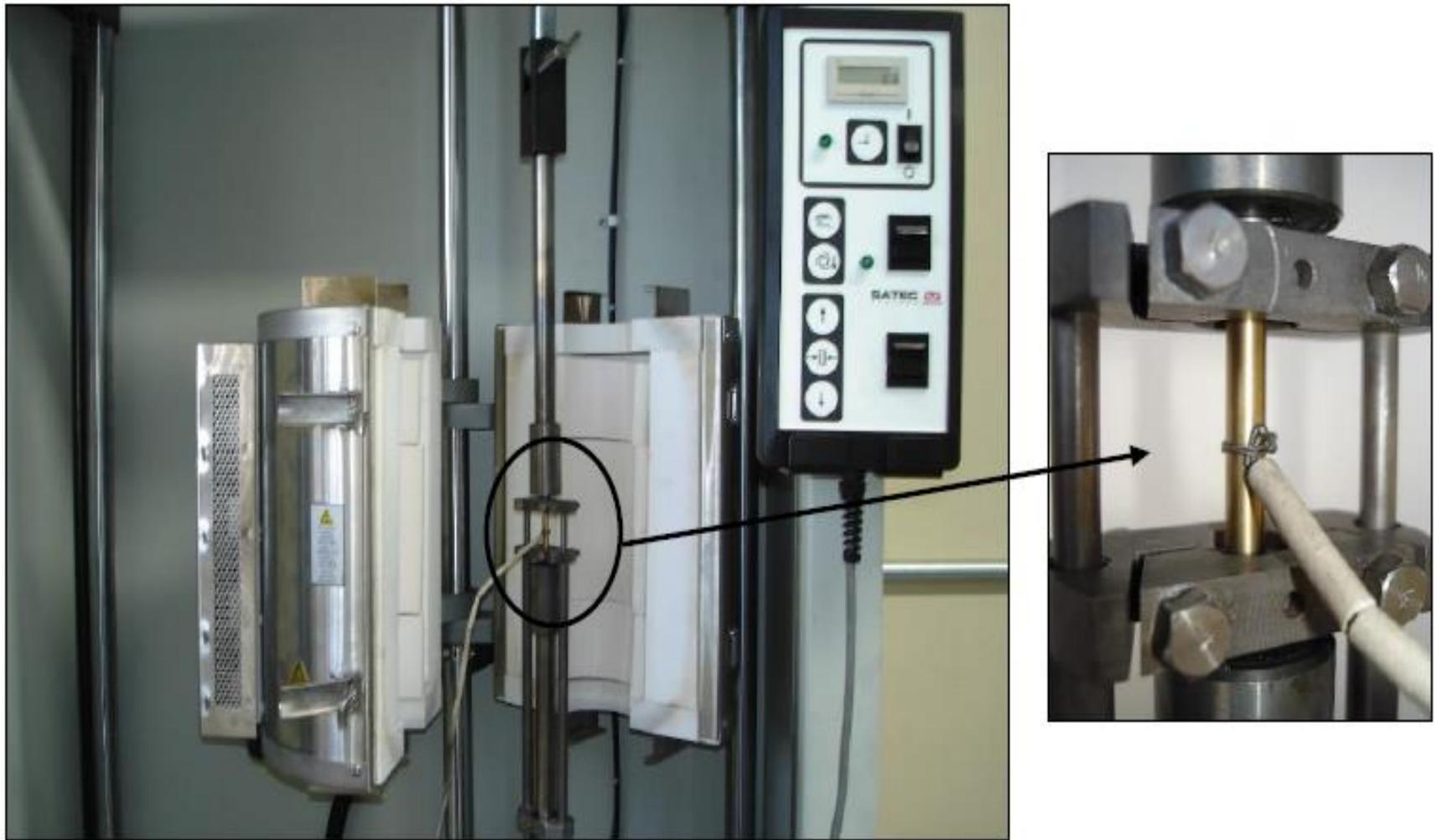
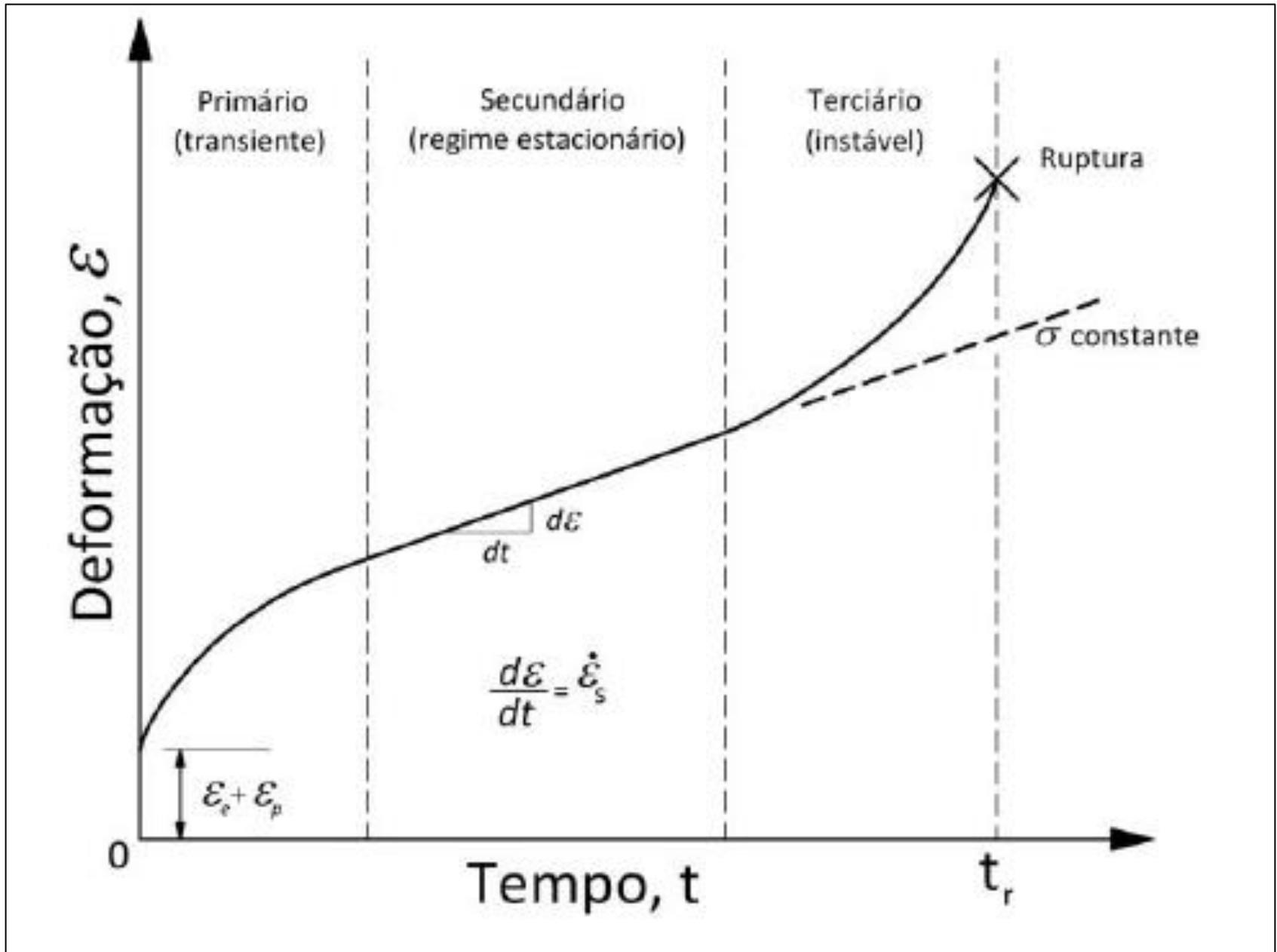
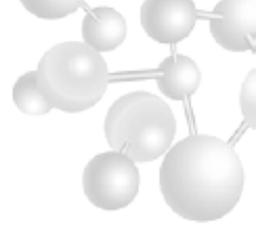


Figura 9.3 Corpo de prova com extensômetro no interior do forno bipartido, mostrando no detalhe a fixação do termopar. (Fotos: Laboratório de Ensaios Mecânicos da EEL-USP).



Ensaio de Fluência



O ensaio de fluência pode ser dividido em três estágios:

- **Primário:** decréscimo contínuo da taxa de fluência (de/dt) em função do aumento de resistência devido ao **encruamento**
- **Secundário:** taxa de **fluência constante**, função do **equilíbrio entre encruamento e recuperação** (devido temp.). O parâmetro mais importante (**taxa mínima de fluência**) consiste na inclinação da curva nesse estágio
- **Terciário:** **aceleração** da taxa de fluência devido a **estricção do CP** culminando na ruptura devido à formação e propagação de trincas



EQUAÇÃO GERAL DO FENÔMENO DE FLUÊNCIA

$$\dot{\varepsilon} = \frac{A \cdot \sigma^m}{T \cdot d^q} e^{\frac{-Q}{RT}}$$

- $\dot{\varepsilon}$ é a taxa de deformação;
- σ é a tensão aplicada;
- d é o tamanho de grão médio;
- Q é energia de ativação;
- R é a constante universal dos gases: 1,987 cal/(mol.K) se Q for dada em cal/mol ou 8,314 J/(mol.K), se Q for dada em J/mol;
- T é temperatura absoluta,
- A , q e m dependem do material, e do mecanismo de deformação que está efetivamente atuando.

$$\dot{\epsilon} = \frac{A \cdot \sigma^m}{T \cdot d^q} e^{\frac{-Q}{RT}}$$

Tabela 9.1- Expoentes da equação 9.10 para os diversos mecanismos de fluência

Mecanismo	m	q	Descrição
Fluência por difusão			Difusão de vacâncias
mecanismo de Nabarro-Herring	1	2	pela rede cristalina
Fluência por difusão			Difusão de vacâncias
mecanismo de Coble	1	3	pelos contornos de grão
Deslizamento de contornos de grão	2	2 ou 3	Deslizamento combinado com difusão de vacâncias pela rede (q=2) ou com difusão pelos contornos (q=3)
Movimentação de discordâncias	3 a 8	0	Movimentação de discordâncias. Escalagem.

Fonte: [Dowling, 2018]

Fluência de Nabarro-Herring

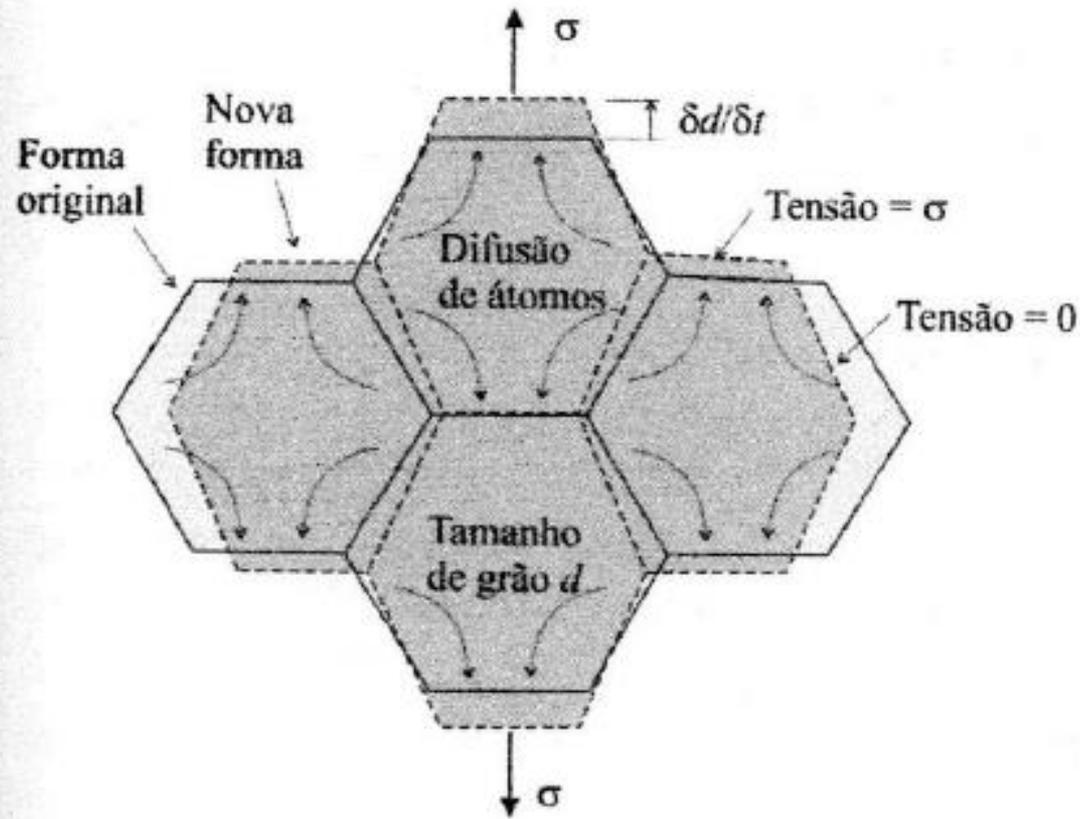


Figura 9.13 Fluência de Nabarro-Herring [Silva, 2012].

DESLIZAMENTO DE CONTORNOS DE GRÃO

Alguns autores postulam que seria um mecanismo específico mas o consenso é que **ocorre combinado a outros mecanismos de fluência.**

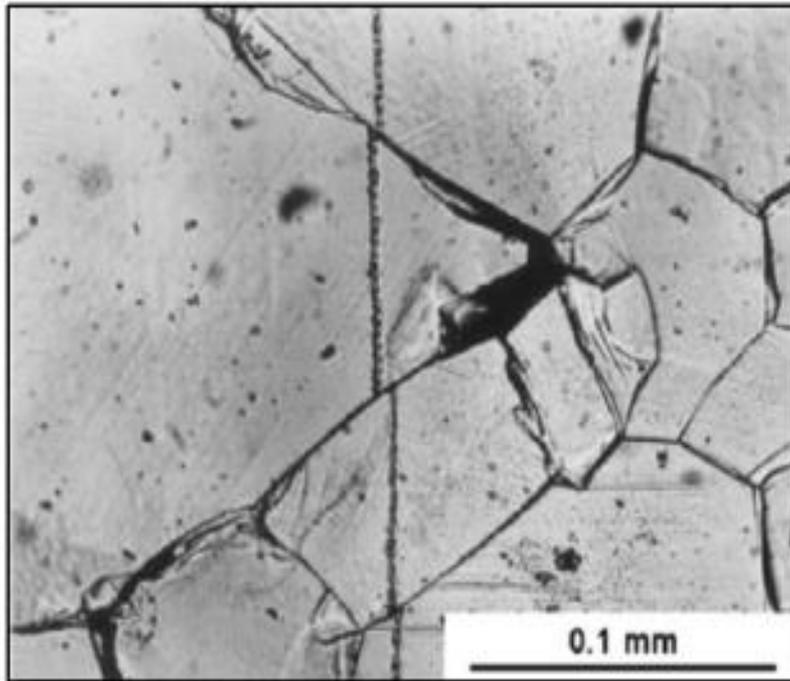
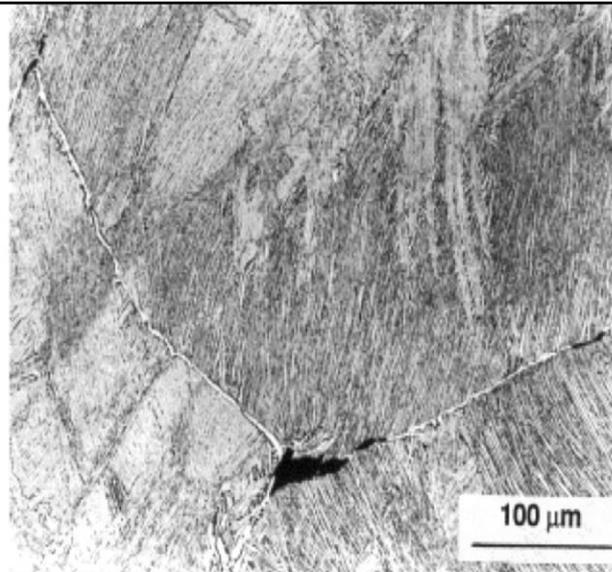
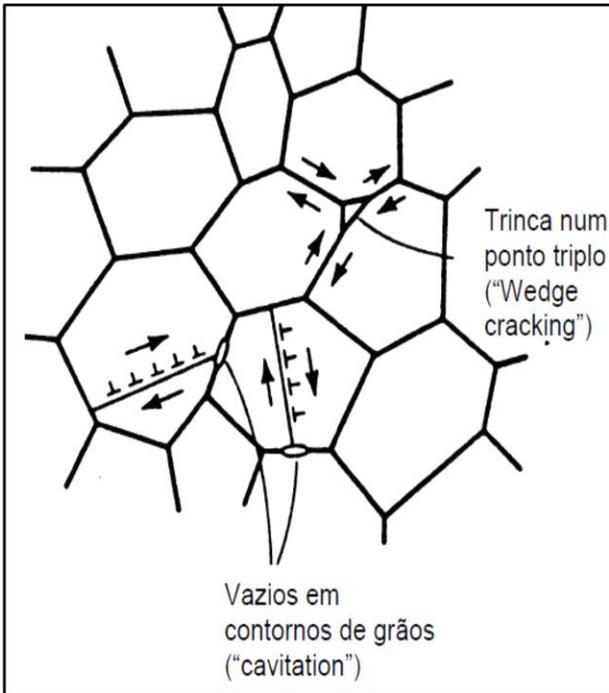


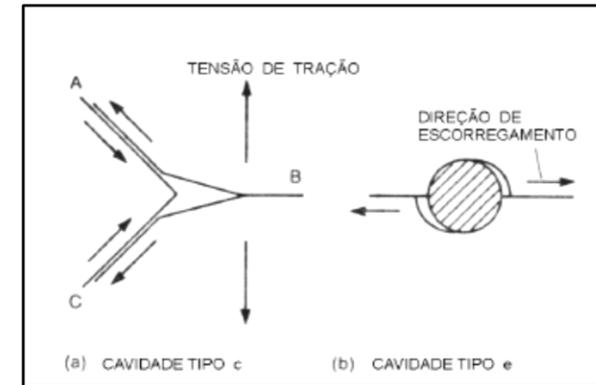
Imagem apresentando o fenômeno de deslizamento de grãos [Langdon, 2006].

MECANISMOS- DEFORMAÇÃO/FRATURA POR FLUÊNCIA

DESLIZAMENTO DE CONTORNOS DE GRÃO: CAVITAÇÃO



Trinca em ponto triplo na liga Ti6Al2Sn4Zr2Mo0,1Si forjada a quente



Relação do tipo Arrhenius

$$D = D_0 \exp(-Q_d / RT)$$

D_0 = constante (m^2/s)

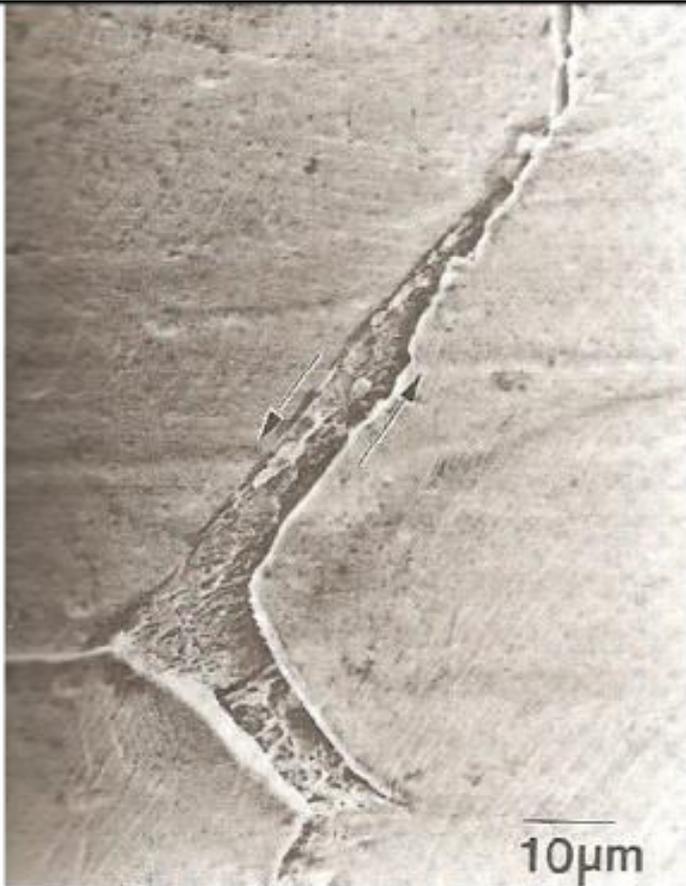
Q_d = energia de ativação para difusão ($eV/\text{átomo}$)

R = Cons. do gás = $8,62 \times 10^{-5} eV/\text{átomo}$

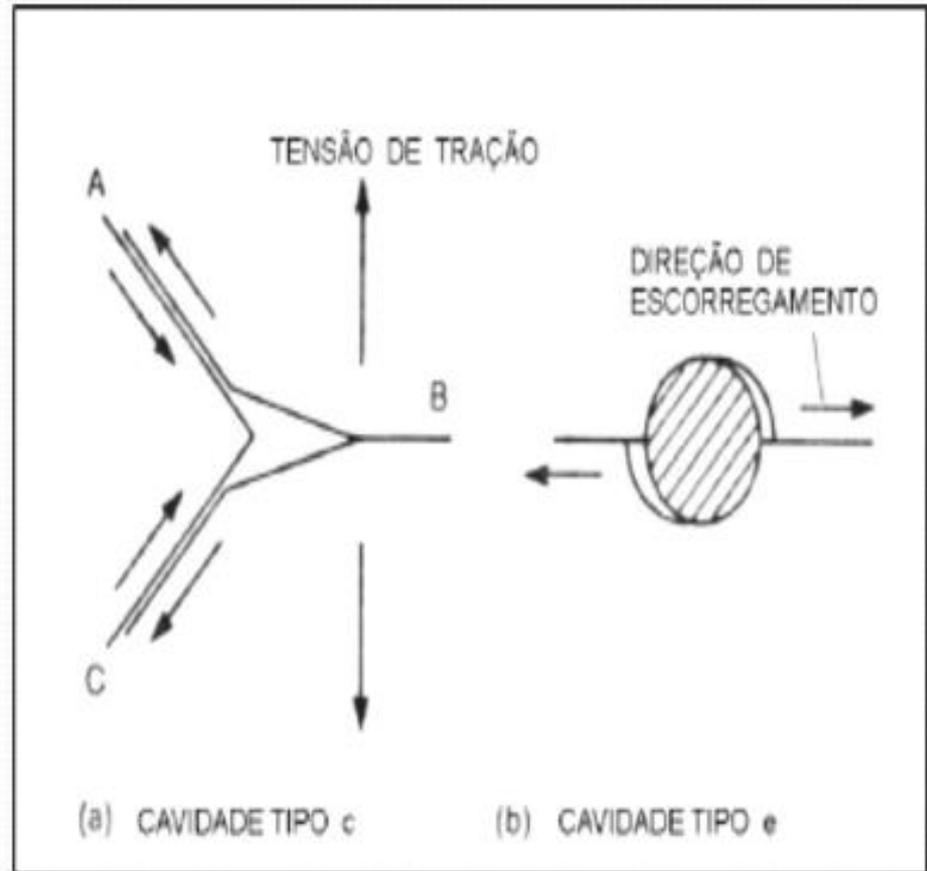
T = temperatura absoluta (K)

2ª LEI DE FICK

$$\frac{dC}{dt} = D \frac{d^2C}{dX^2}$$

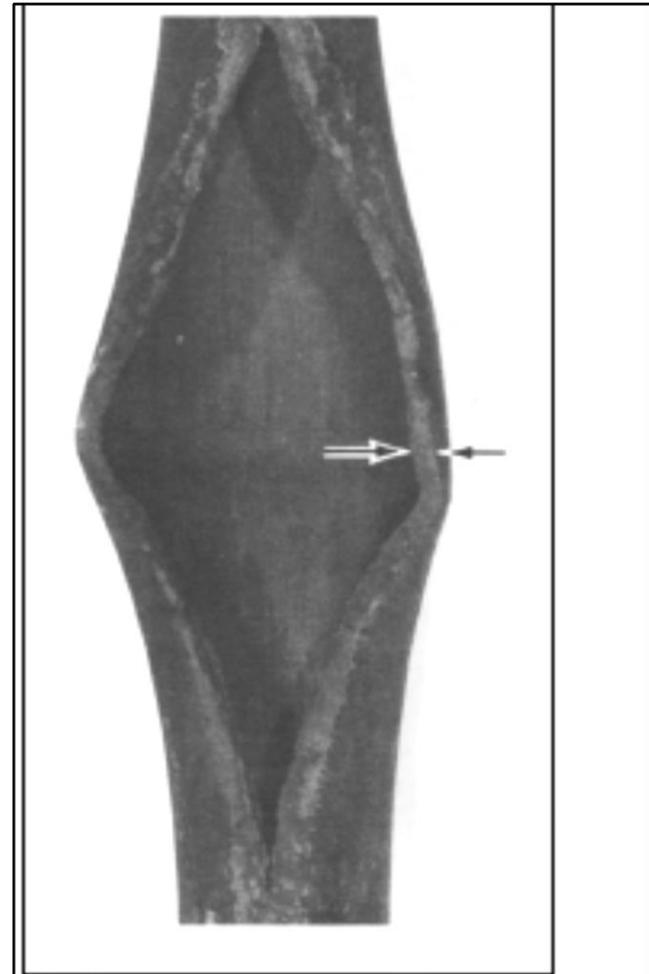


Trinca em ponto triplice provocada por deslizamento de contorno de grão em uma liga UHP Ni-16Cr-9Fe, a 360°(MEV).



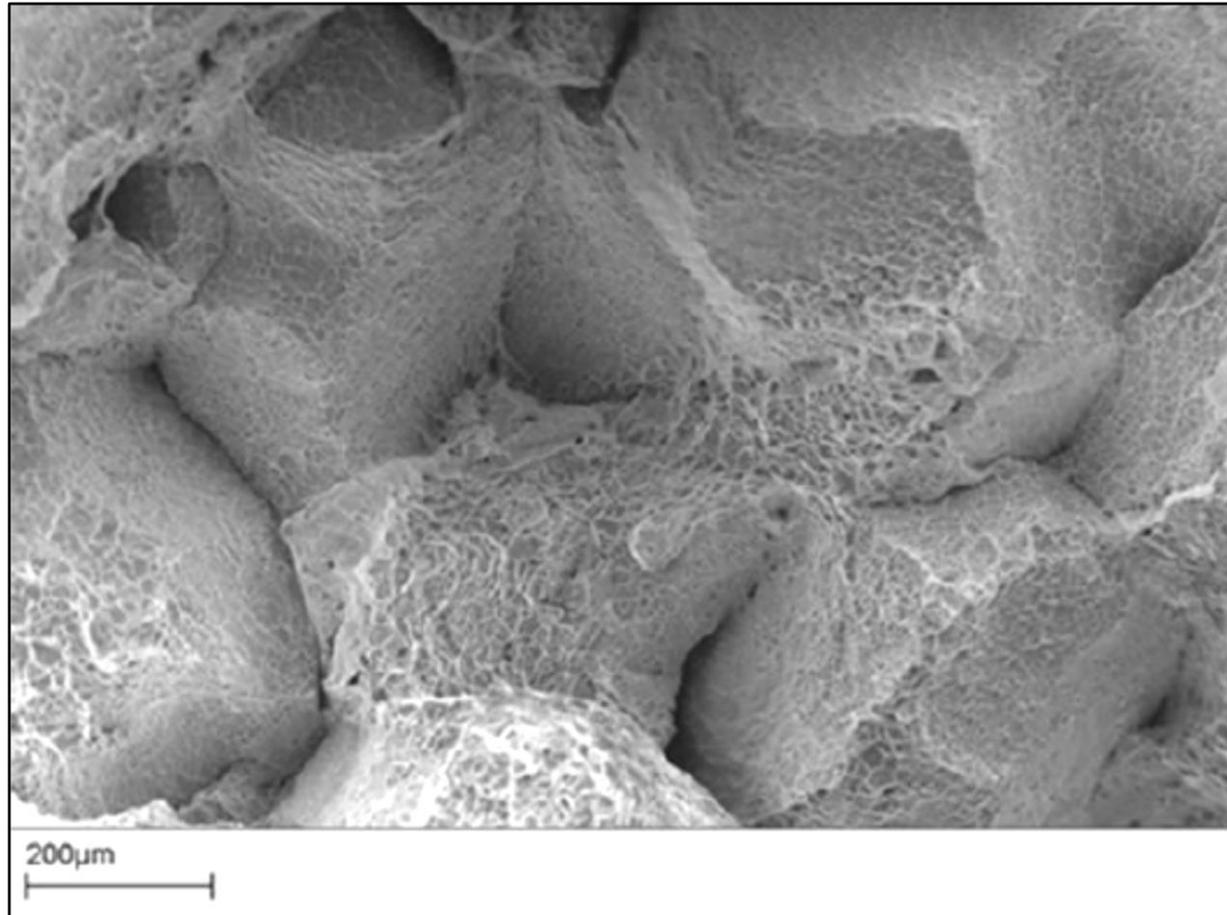
DESLIZAMENTO DE CONTORNOS DE GRÃO PODE LEVAR À TRINCA EM PONTO TRÍPLICE: CAVITAÇÃO. ESTÁ RELACIONADO AO MICROMECHANISMO INTERGRANULAR DE FRATURA.

**FRATURA
INTERGRANULAR, QUE
OCORREU
LENTAMENTE,
AO LONGO DO TEMPO,
SOB TENSÕES E
TEMPERATURAS
MODERADAS**



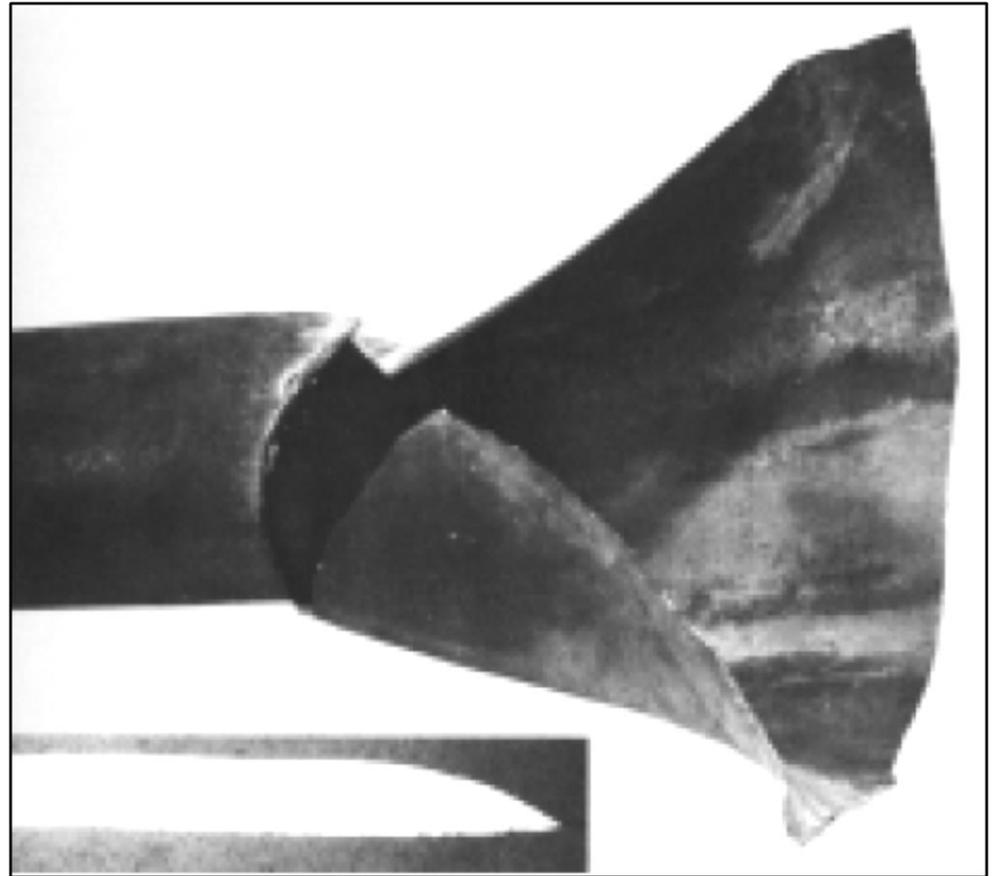
Fratura tipo "lábio grosso"

**SUPERFÍCIE DE FRATURA DE UM MATERIAL EXPOSTO
À FLUÊNCIA (CARGA EM ALTA TEMPERATURA)**



**ASPECTO GERAL DA SUPERFÍCIE DE FRATURA
INTERGRANULAR a 500°C e 350 MPa**

**FRATURA DUTIL-
AUMENTO ACENTUADO
DA
TEMPERATURA DE
TRABALHO, POR
EXEMPLO, POR CORTE
ACIDENTAL DA ÁGUA
CIRCULANTE**



Fratura tipo “lábio fino”

EXTRAPOLAÇÃO PARA VIDAS LONGAS

Ensaio de fluência podem durar até mais de um ano mas os componentes e equipamentos que trabalham a alta temperatura em usinas térmicas ou nucleares, refinarias, indústrias petroquímicas, etc, são normalmente projetados para vidas sob fluência de cerca de 200.000 horas (22 anos e 10 meses). São necessárias, portanto, técnicas para a extrapolação confiável de dados obtidos em ensaios de laboratório: Parâmetro de Larson-Miller (LM), Sherby-Dorn.

$$P_{LM} = T \cdot (C + \log t_r)$$

parâmetro de Larson-Miller (P_{LM})

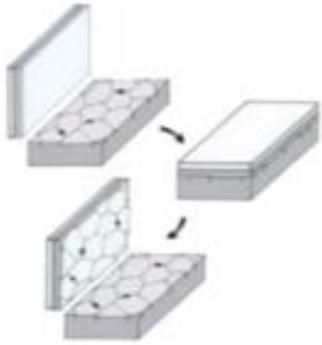
tempo de ruptura (t_r)

temperatura absoluta (T)

constante do material (C)

Método de Neubauer e Wedel

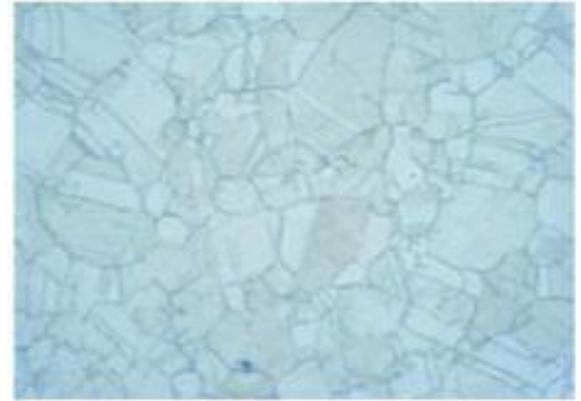
Método metalográfico feito por meio de **réplicas** que pode ser usado em **inspeções**. Esse método segue o **conceito da evolução** do fenômeno **da cavitação**. A **indicação do dano** por fluência é relacionada com a **formação e crescimento de cavidades nos contornos de grão**.



Método Tradicional



Amostra



Réplica



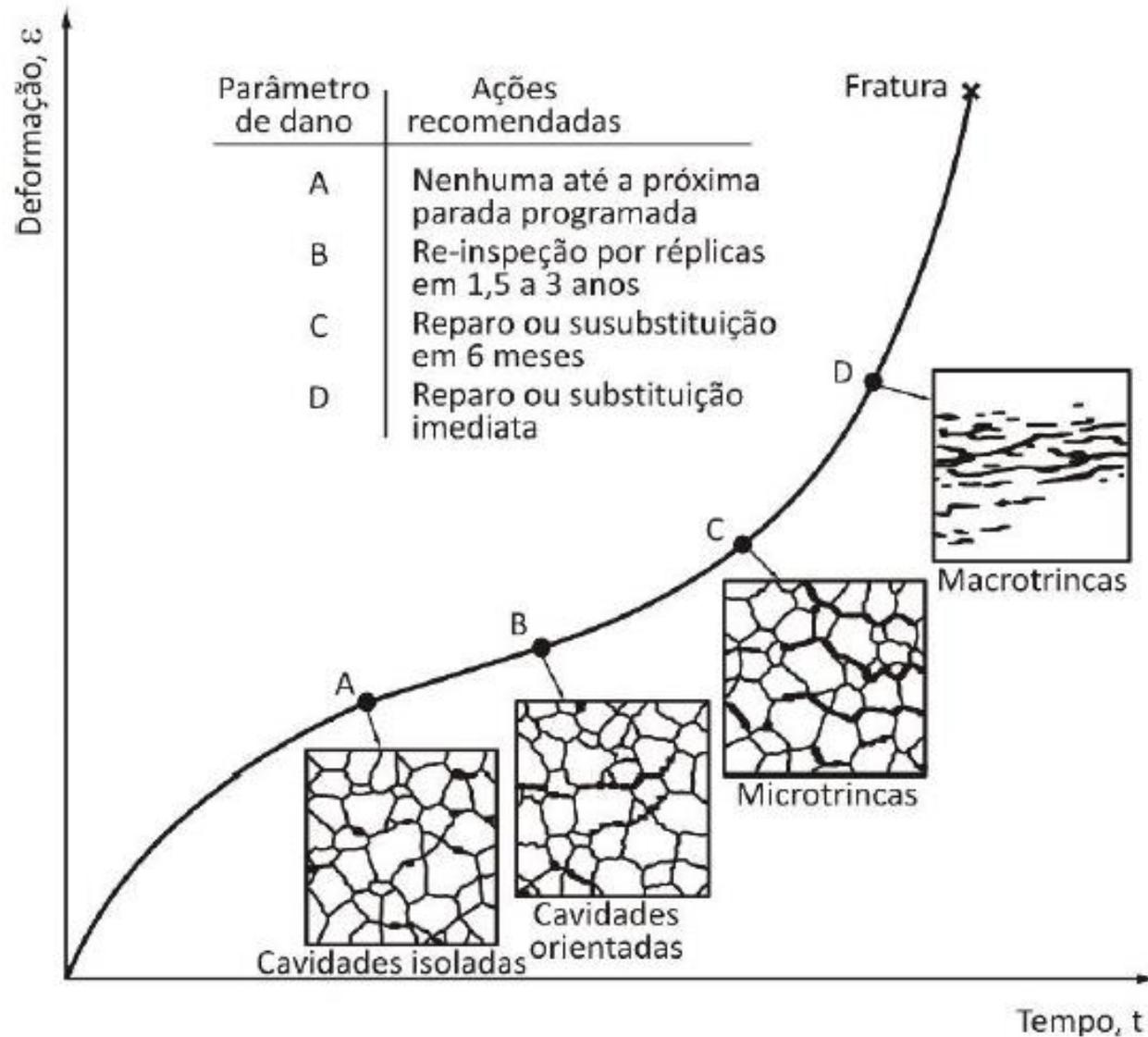
Replicating Set



Amostras copiadas.

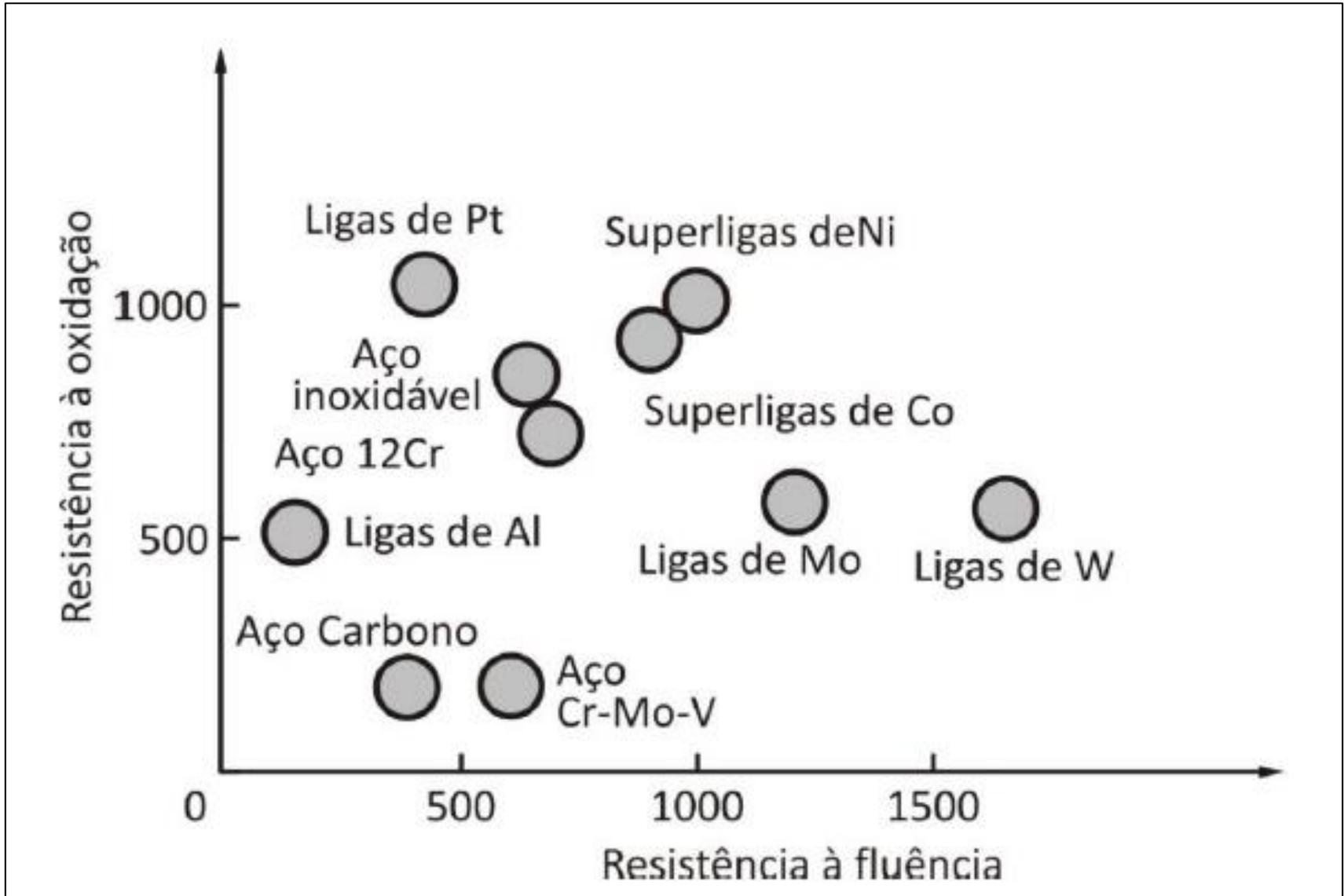
BUEHLER

Método de Neubauer e Wedel



Método de Neubauer e Wedel relacionado à curva de fluência [Furtado, 2001].

MATERIAIS RESISTENTES À FLUÊNCIA E OXIDAÇÃO



NORMAS PARA O ENSAIO DE FLUÊNCIA

- **ASTM E139-11** Standard Test Methods for Conducting Creep, Creep-Rupture and Stress-Rupture Tests of Metallic Materials;
- **ASTM C1291-18** Standard Test Method for Elevated Temperature Tensile Creep Strain, Creep Strain Rate and Creep Time to Failure for Monolithic Advanced Ceramics;
- **ASTM D2990-17** Standard Test Methods for Tensile, Compressive and Flexural Creep and Creep-Rupture of Plastics.



Exercícios resolvidos

1. Uma barra de aço de 25,4 mm de diâmetro foi ensaiada em torção e os dados ao lado foram obtidos. Se o comprimento do corpo de prova é de 457,2 mm determine:

1. A curva $\tau \times \gamma$.
2. O módulo de ruptura.
3. Se o torque de giro no escoamento foi de 508,5 N.m. e o ângulo de giro de $2,6^\circ$, determine a tensão de escoamento em torção e o módulo de elasticidade.

no de 1/4 voltas	ângulo graus	ângulo radianos	Torque, N.m
1	90	1,570796	757
2	180	3,141592	836
3	270	4,712388	926,5
4	360	6,283184	983
5	450	7,85398	1028,2
7	630	10,995572	1096
9	810	14,137164	1152,5
12	1080	18,849552	1197,7
15	1350	23,56194	1243
18	1620	28,274328	1288,1
24	2160	37,699104	1333,3
32	2880	50,265472	1401,1
38	3420	59,690248	1423,7
39	3510	61,261044	1446,3



Para a curva $\tau \times \gamma$, fazemos:

$$\gamma = \frac{r\theta}{L}$$

$$\tau_{\max} = \frac{16M_T}{\pi D^3}$$

Onde

R: raio do corpo de prova

θ : ângulo em radianos

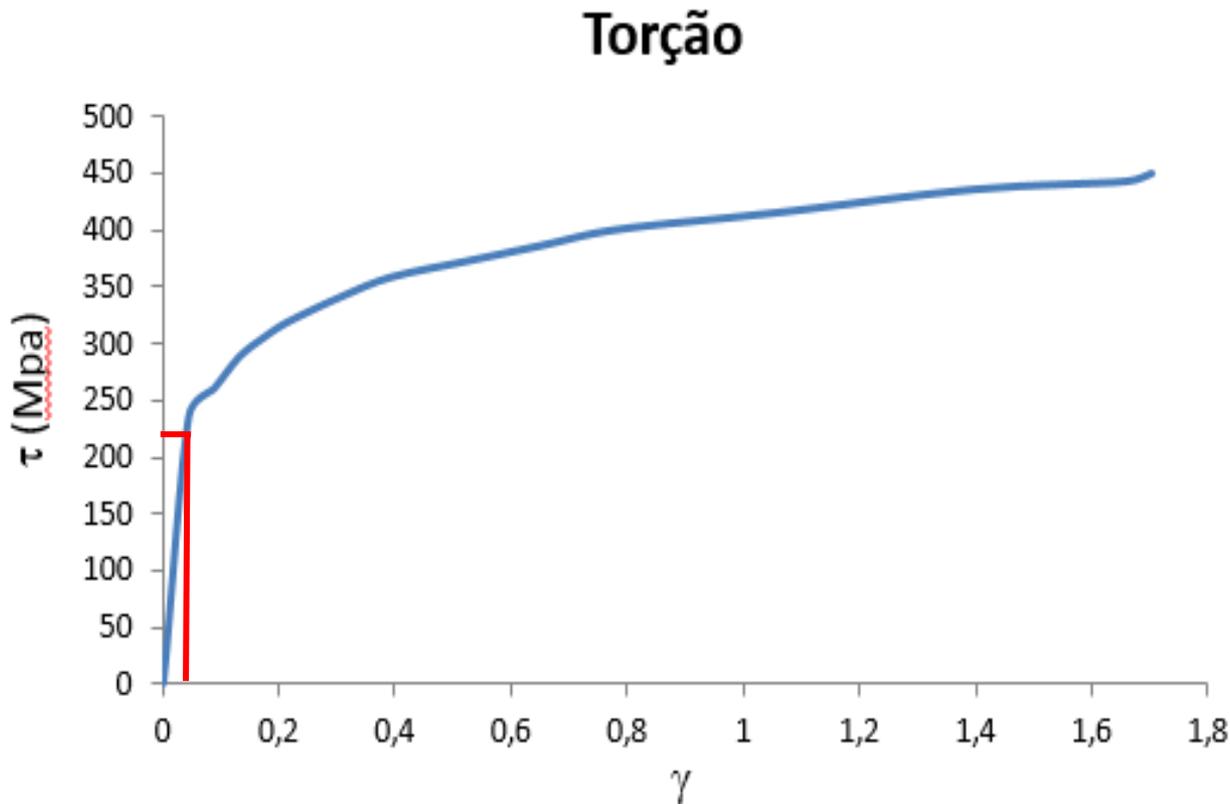
L: comprimento do corpo de prova

M_T : Torque

D: diametro do corpo de prova

γ	τ (MPa)
0,044	235,4
0,087	260,0
0,131	288,1
0,175	305,7
0,218	319,7
0,305	340,8
0,393	358,4
0,524	372,4
0,654	386,5
0,785	400,5
1,047	414,6
1,396	435,7
1,658	442,7
1,702	449,7

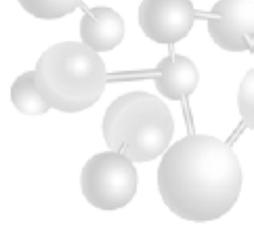
a) A partir dos dados calculados da tabela é possível plotar a curva $\tau \times \gamma$:



γ	τ (MPa)
0,044	235,4
0,087	260,0
0,131	288,1
0,175	305,7
0,218	319,7
0,305	340,8
0,393	358,4
0,524	372,4
0,654	386,5
0,785	400,5
1,047	414,6
1,396	435,7
1,658	442,7
1,702	449,7

τ_u

Repare que no ensaio o primeiro ponto calculado de tensão de cisalhamento (235,4 MPa) já encontra-se visualmente observando o gráfico na região plástica, portanto não tem-se pontos da região elástica, logo não é possível o cálculo do módulo transversal G com precisão graficamente.



b) Para o cálculo do módulo de ruptura a torção τ_u pode ser observado graficamente ou a partir dos valores tabelados. Nota-se que o τ_u é o valor de tensão máxima do ensaio e não o de ruptura!!!!!!.. Neste ensaio coincidentemente a tensão máxima é igual ao de ruptura, logo:

$$\tau_u = 449,7 \text{ MPa}$$

Observar dados do slide anterior.

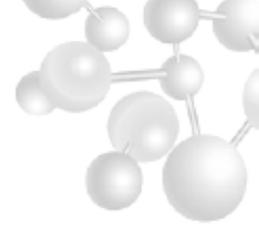
$$\gamma = 1,702$$

c) Se o torque de giro no escoamento foi de 508,5 N.m. e o ângulo de giro de 2,6°, determine a tensão de escoamento em torção e o módulo de elasticidade

$$M_t = 508,5 \text{ MPa e } \theta = 2,6 \text{ graus}$$

Repare que o ensaio forneceu com precisão o torque no escoamento (anterior ao primeiro dado de 757 N.m da tabela), logo será possível além de determinar a tensão de escoamento em torção calcular o módulo de elasticidade transversal G com precisão.

$$\tau_{esc} = \frac{16.M_t}{\pi.D^3} = \frac{16.508,5}{\pi(0,0254)^3} = 159,5 \text{ MPa}$$



$$\gamma_{esc} = \frac{r\theta}{L} = \frac{12,7 \cdot 0,0453}{457,2} = 0,00126$$

Logo $\tau_{esc} = 159,5 \text{ MPa}$ e $\gamma_{esc} = 0,00126$

Como possuímos o par de pontos do escoamento portanto teremos com certa precisão no cálculo do G:

$$G = \frac{\Delta\tau}{\Delta\gamma} = \frac{159,5 \text{ E}6 - 0,0}{0,00126 - 0,0} = 126,58 \text{ GPa}$$

Portanto o G para o aço em questão é de 126,58 GPa.

Como sabemos que teoricamente G se correlaciona com E segundo a equação abaixo notamos o erro desta correlação para este material e ensaio.

$$G = \frac{E}{2(1+\nu)} = \frac{210 \text{ GPa}}{2(1+0,33)} = 78,95 \text{ GPa}$$

$$\nu \cong 0,33 \text{ (aços)}$$

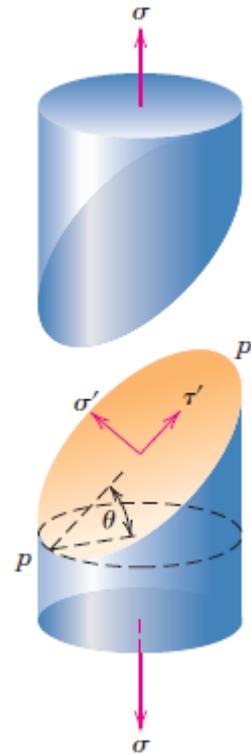
$$E = 210 \text{ GPa (aços)}$$

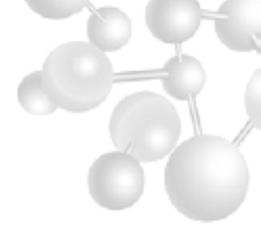
2. Um corpo de prova de ferro fundido cinzento com 18 mm de diâmetro e 50 mm de comprimento foi comprimido através de uma carga axial. A fratura ocorreu com a carga de 23500 kgf por cisalhamento em um plano inclinado de 37° do eixo longitudinal do corpo de prova. Calcular a tensão máxima de cisalhamento no plano da fratura, desprezando qualquer alteração no diâmetro do corpo de prova.



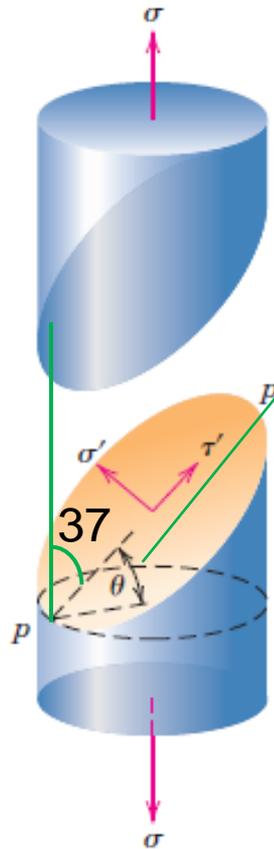
$$\begin{aligned} \text{Área} &= \pi r^2 \\ \text{Area} &= \pi 9^2 \\ \text{Area} &= 254,47 \text{ mm}^2 \end{aligned}$$

$$\sigma \approx 92,35 \text{ kgf/mm}^2$$





$$\sigma = 92,34 \text{ kgf/mm}^2$$



$$\theta = 90 - 37 = 53 \text{ graus}$$

$$\sigma' = \sigma \cos^2 \theta = \sigma \left(\frac{1 + \cos 2\theta}{2} \right)$$

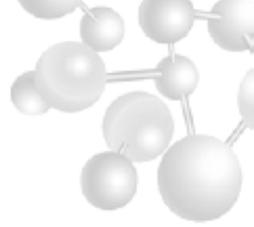
$$\tau' = S \sin \theta \cos \theta = S \frac{\sin 2\theta}{2}$$

$$\tau' = 92,35 \left(\frac{\sin 2 * 53^\circ}{2} \right)$$



$$\tau' \approx 44,39 \text{ kgf/mm}^2$$

Bibliografia



❑ Ciência e Engenharia de Materiais – uma Introdução, Willian D. *Callister*, Jr. LTC 5. edição.

❑ The Science and Engineering of Materials, 4th ed Donald R. *Askeland* – Pradeep P. Phulé.

❑ *Dieter*, G.E. Metalurgia Mecânica 2.ed. Rio de Janeiro: Guanabara Dois, 1981.

❑ Ensaio Mecânicos de Materiais Metálicos, Fundamentos teóricos e práticos. 5^o. Edição. Sérgio Augusto de *Souza*

❑ AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. *ASTM E588-89 (1989)*. Standard test methods of tension testing of metallic materials. Metric. Philadelphia.

❑ AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. *ASTM E9-89a00 (2000)*. Standard Test Methods of Compression Testing of Metallic Materials at Room Temperature



OBRIGADO PELA

ATENÇÃO !!!