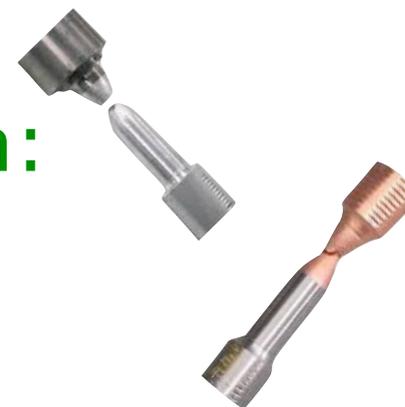




ESCOLA POLITÉCNICA DA UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO
Departamento de Engenharia Metalúrgica e de Materiais



Atividade Demonstrativa: Ensaio Mecânico



PMT 3110 - Introdução à Ciência dos Materiais para Engenharia
2º semestre de 2018

Técnicos Responsáveis
José Rubens Beserra de Carvalho
Antônio Lívio da Silva Nunes

Atividade Demonstrativa: Ensaios Mecânicos

- A parte presencial possui dois momentos
 - Apresentação teórica
 - Acompanhamento de demonstrações de ensaios mecânicos (ensaios de tração em metais e polímeros; ensaio de flexão em cerâmicas)

A presença do aluno(a) nessas atividades é obrigatória para ter direito à nota do Relatório.

- Elaborar um Relatório relativo à atividade em grupos de 5 ou 6 alunos.

Entrega do Relatório na aula de 01/11/2018



ATIVIDADE DEMONSTRATIVA DE ENSAIOS MECÂNICOS

Orientações sobre os conteúdos a serem incluídos no Relatório + Informação sobre Grupos vs. Conjuntos de dados a serem analisados

 Aula-Ensaio_Mecanicos_Demo_2018 1.8Mb

 Enunciado relativo ao conteúdo do Relatório (2018) 1.9Mb

 Modelo de Relatório 97.9Kb ← Orientação sobre o formato do Relatório

 Texto: Distribuição de Weibull (Páginas 190 a 196 do livro *Ciência e Engenharia dos Materiais*, Donald R. Askeland Phulé – Tradução da 4a ed. Americana, Cengage Learning, São Paulo, 2008) 689.3Kb

 Dados Experimentais: Planilha de Metais (2018) 183Kb

 Dados Experimentais: Planilha de Polímeros (2018) 140Kb

 Dados Experimentais: Planilha de Cerâmicas (2018) 41.8Kb

 Norma ASTM 638 311Kb

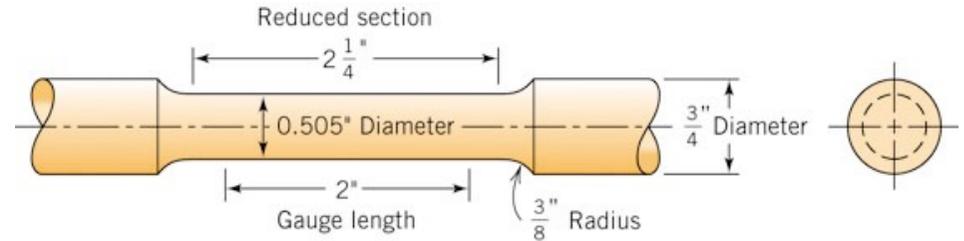
Dados para análise

O “número do grupo” define o “conjunto de dados” a ser analisado no Relatório.

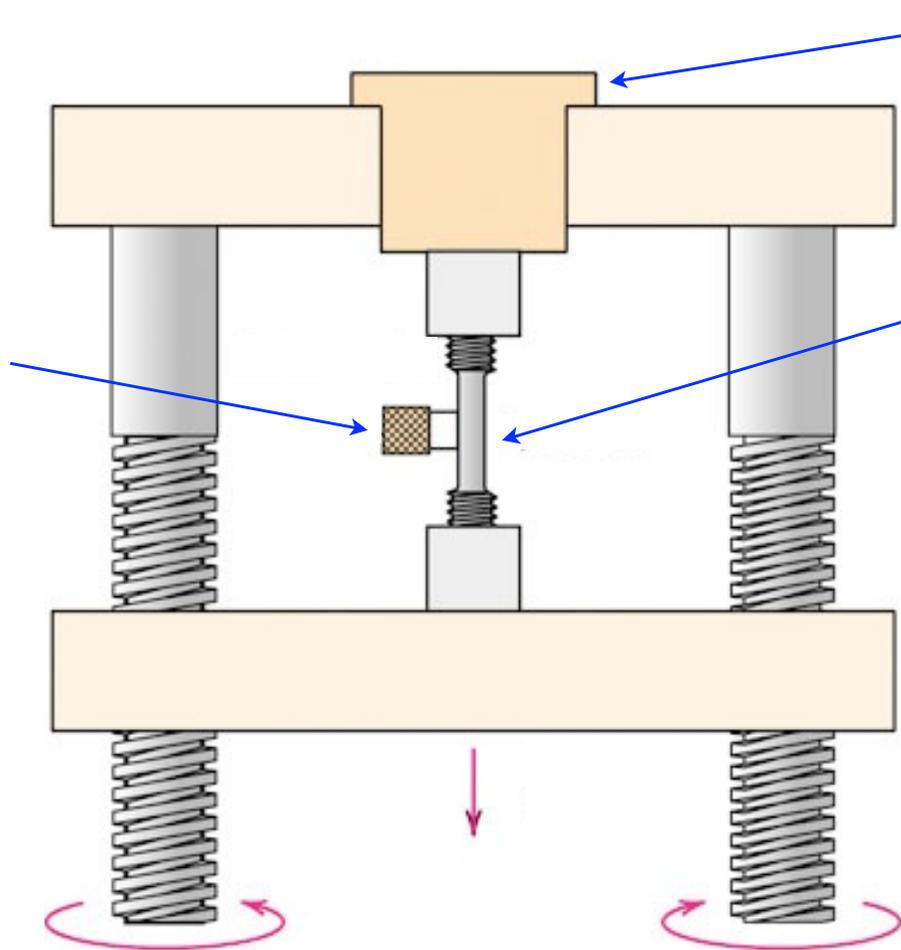
| GRUPOS | METAIS | POLÍMEROS | CERÂMICAS |
|--------|-----------|---------------------|----------------|
| 1 | Amostra 1 | Amostra 1 (PP e PS) | As duas séries |
| 2 | Amostra 2 | Amostra 2 (PP e PS) | As duas séries |
| 3 | Amostra 3 | Amostra 3 (PP e PS) | As duas séries |
| 4 | Amostra 4 | Amostra 4 (PP e PS) | As duas séries |
| 5 | Amostra 5 | Amostra 5 (PP e PS) | As duas séries |
| 6 | Amostra 6 | Amostra 6 (PP e PS) | As duas séries |
| 7 | Amostra 1 | Amostra 1 (PP e PS) | As duas séries |
| 8 | Amostra 2 | Amostra 2 (PP e PS) | As duas séries |
| 9 | Amostra 3 | Amostra 3 (PP e PS) | As duas séries |
| 10 | Amostra 4 | Amostra 4 (PP e PS) | As duas séries |
| 11 | Amostra 5 | Amostra 5 (PP e PS) | As duas séries |
| 12 | Amostra 6 | Amostra 6 (PP e PS) | As duas séries |

Ensaio de Tração

Os **CORPOS DE PROVA** (ou **AMOSTRAS**) utilizados nos ensaios de tração podem ter diferentes formas e dimensões.



MÁQUINA DE ENSAIO

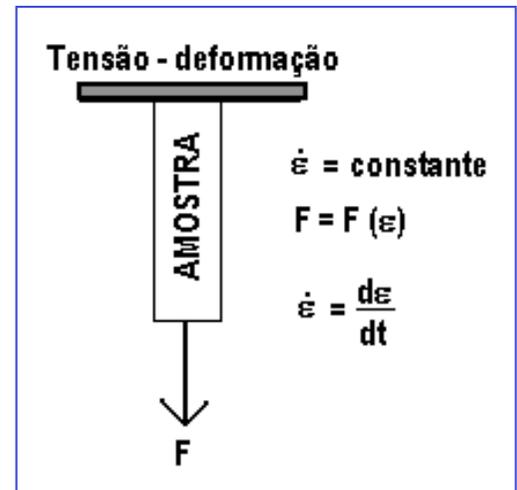


As medidas de **FORÇA** são feitas com uma **CÉLULA DE CARGA**.

CORPO DE PROVA

As medidas de **DEFORMAÇÃO** são feitas com um **EXTENSÔMETRO** ou diretamente sobre o corpo de prova.

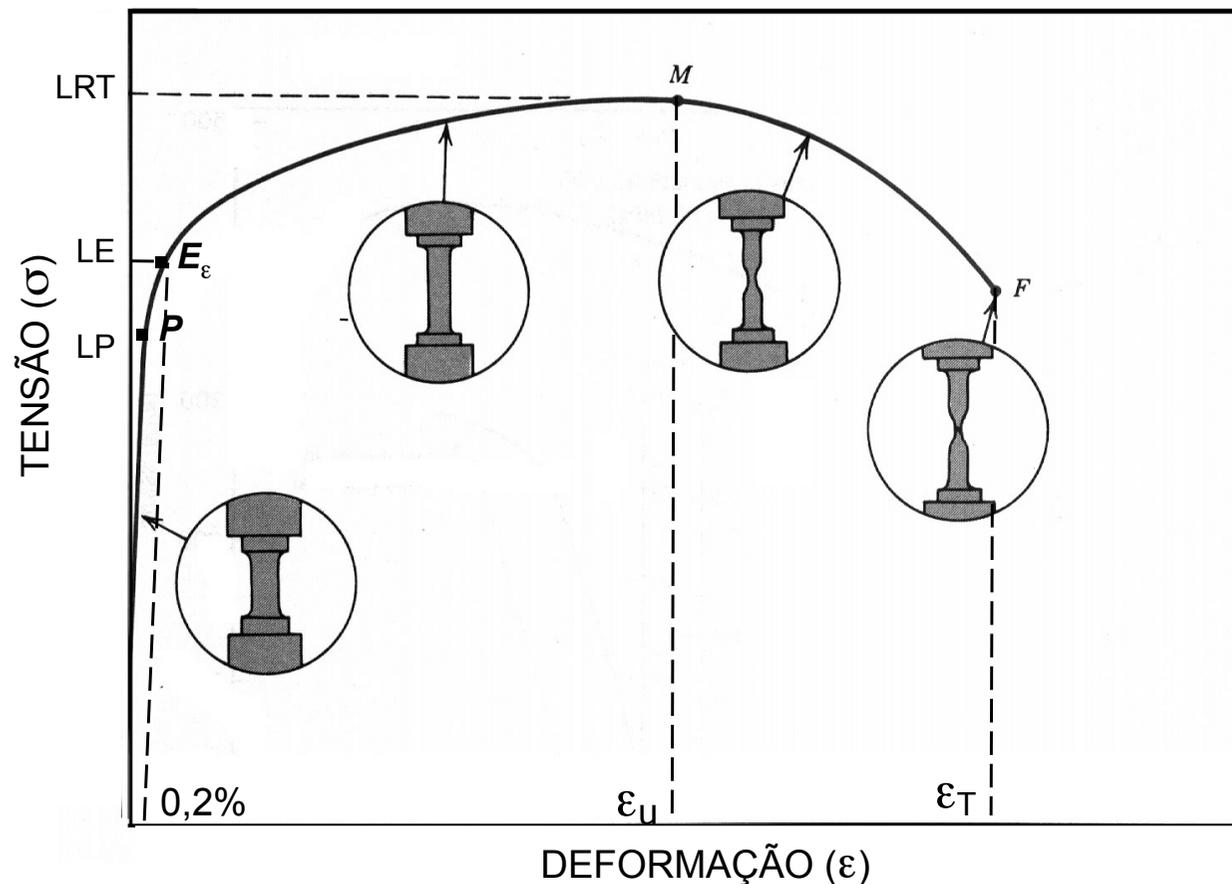
MODO DE OPERAÇÃO



Ensaio de Tração: Curva tensão x deformação

6

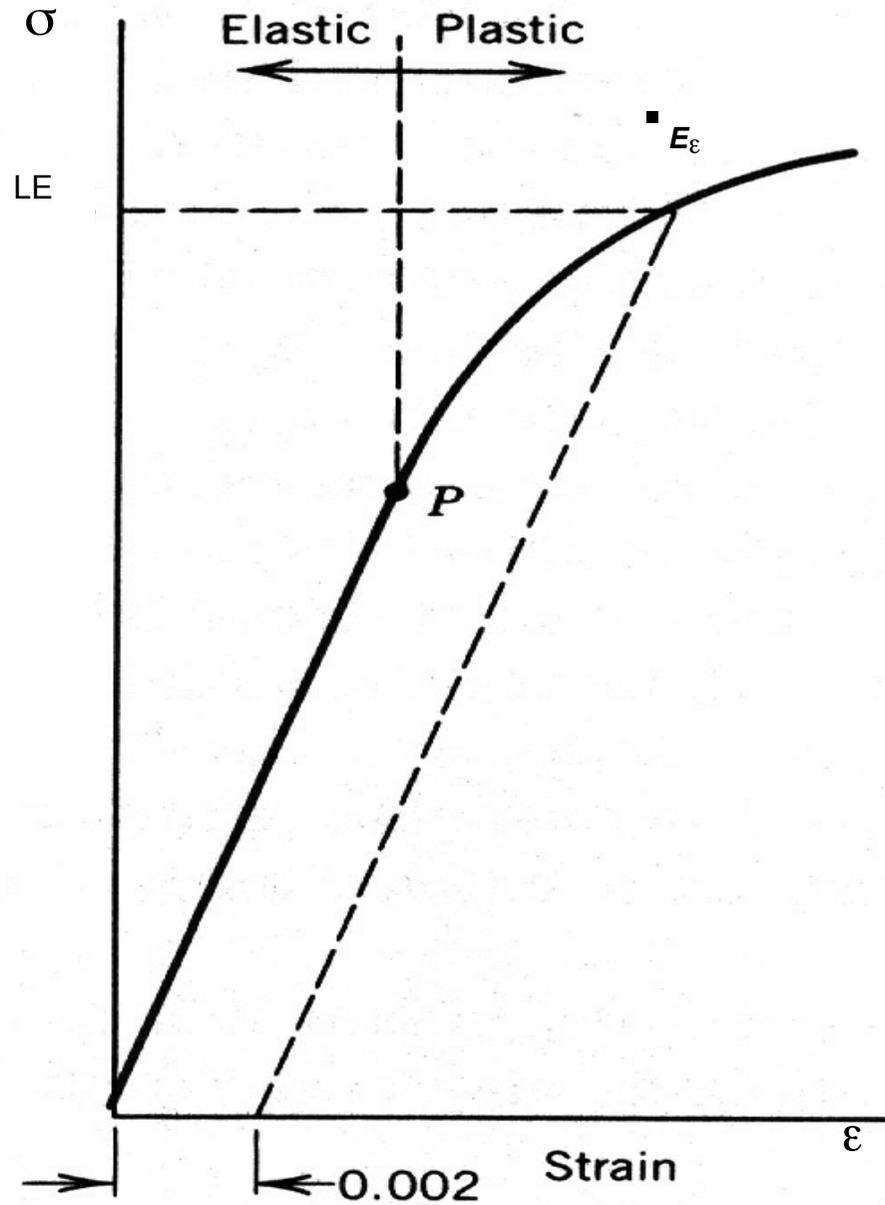
- (1) Montagem da amostra e do extensômetro.
- (2) Definição da taxa de variação temporal da deformação.
- (3) Observação da construção da curva Tensão vs. Deformação durante a aquisição dos dados.
- (4) O ensaio permite determinar diversos parâmetros característicos (E ; LE ; LRT ...)



Cada grupo analisará para o relatório três corpos de prova ensaiados em tração:

Alumínio
Polipropileno
Poliestireno

Determinação do Módulo de Elasticidade



There are some materials (e.g., gray cast iron, concrete, and many polymers) for which this elastic portion of the stress–strain curve is not linear (Figure 6.6); hence, it is not possible to determine a modulus of elasticity as described above. For this non-linear behavior, either *tangent* or *secant modulus* is normally used. Tangent modulus is taken as the slope of the stress–strain curve at some specified level of stress, while secant modulus represents the slope of a secant drawn from the origin to some given point of the σ – ϵ curve. The determination of these moduli is illustrated in Figure 6.6.

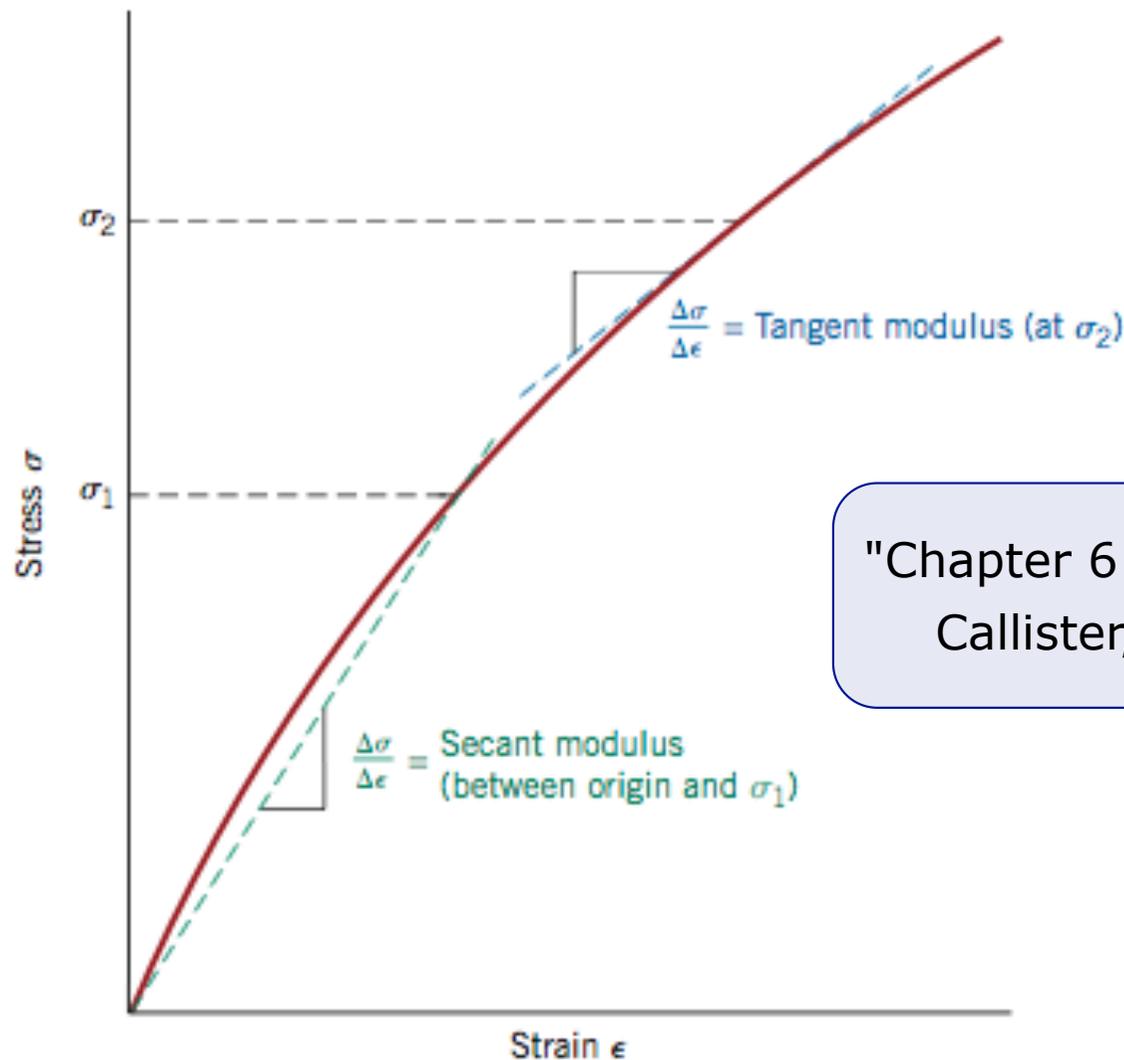


Figure 6.6 Schematic stress–strain diagram showing non-linear elastic behavior, and how secant and tangent moduli are determined.

"Chapter 6: Mechanical Properties of Metals"
Callister, 7th Ed., pg.138 (pdf pg. 161)

Piso antiácido industrial (Gail)



Cada grupo analizará para o relatório dois corpos de prova ensaiados em flexão correspondentes as duas cerâmicas aqui apresentadas.



Litocerâmica aplicada em revestimentos (construção civil)



DISTRIBUIÇÃO DE WEIBULL

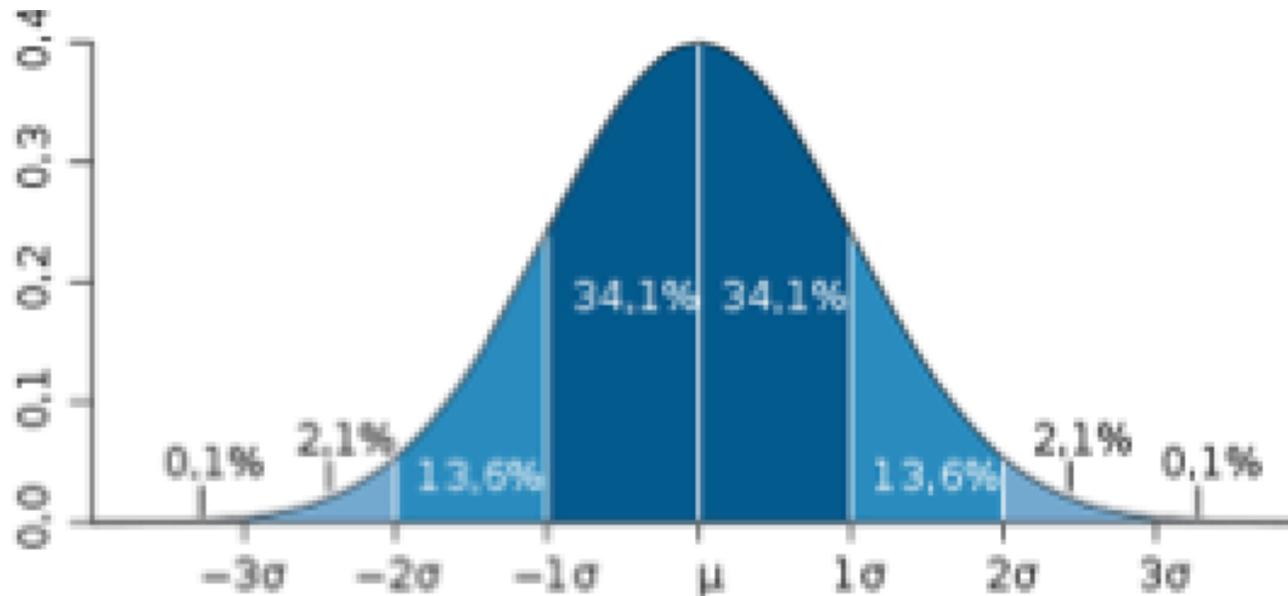
 Texto: Distribuição de Weibull (Páginas 190 a 196 do livro Ciência e Engenharia dos Materiais, Donald R. Askeland e Pradeep P. Phulé – Tradução da 4a ed. Americana, Cengage Learning, São Paulo, 2008) 689.3Kb

Exemplo de Distribuição Estatística

Distribuição Normal (ou Gaussiana)

$$f(x | \mu, \sigma^2) = \frac{1}{\sqrt{2\pi\sigma^2}} e^{-\frac{(x-\mu)^2}{2\sigma^2}}$$

onde μ representa a média e σ o desvio padrão.



Propriedades Mecânicas: Distribuição de Weibull

- Normalmente encontramos uma grande dispersão nos resultados de resistência mecânica obtidos para cerâmicas, mesmo quando são testados corpos de prova de mesma composição e processados com a mesma técnica.
- Essa variação existe devido à presença de um grande número de defeitos em escala microestrutural nos corpos cerâmicos (em especial, trincas) e porque a resistência mecânica de materiais cerâmicos - e materiais frágeis em geral - depende da probabilidade de se encontrar um desses defeitos que exceda um certo tamanho crítico.

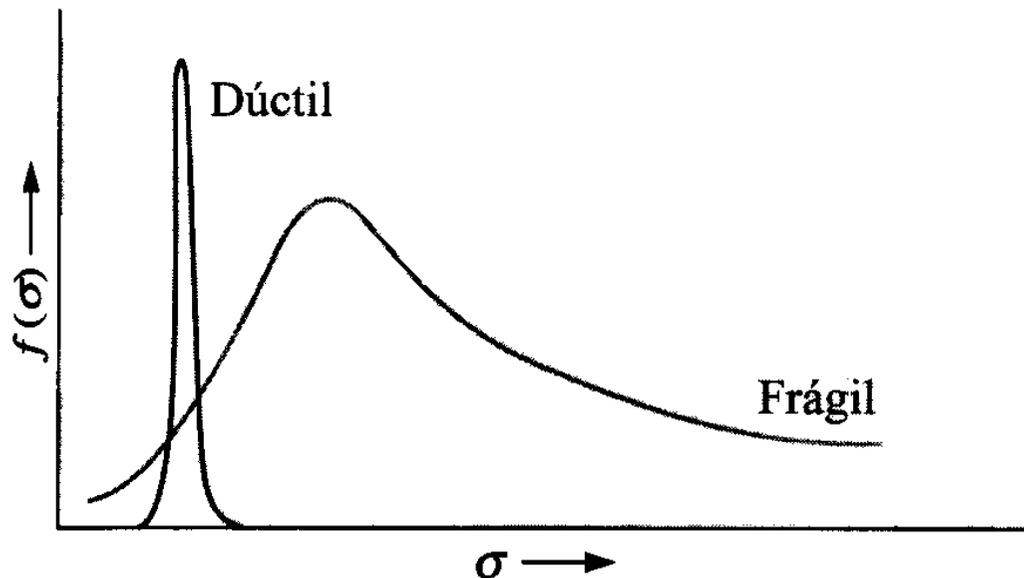
*Portanto, a **resistência mecânica de materiais frágeis** (“brittle materials”) como é o caso dos materiais cerâmicos, **varia consideravelmente**.*

- Por causa disso, ao invés de apresentar-se os resultados obtidos numa série de ensaios de resistência mecânica de materiais frágeis, na forma apenas de uma média aritmética dos resultados obtidos, é recomendável apresentá-los utilizando-se uma ferramenta matemática própria: a **distribuição de Weibull**.

Distribuição de Weibull

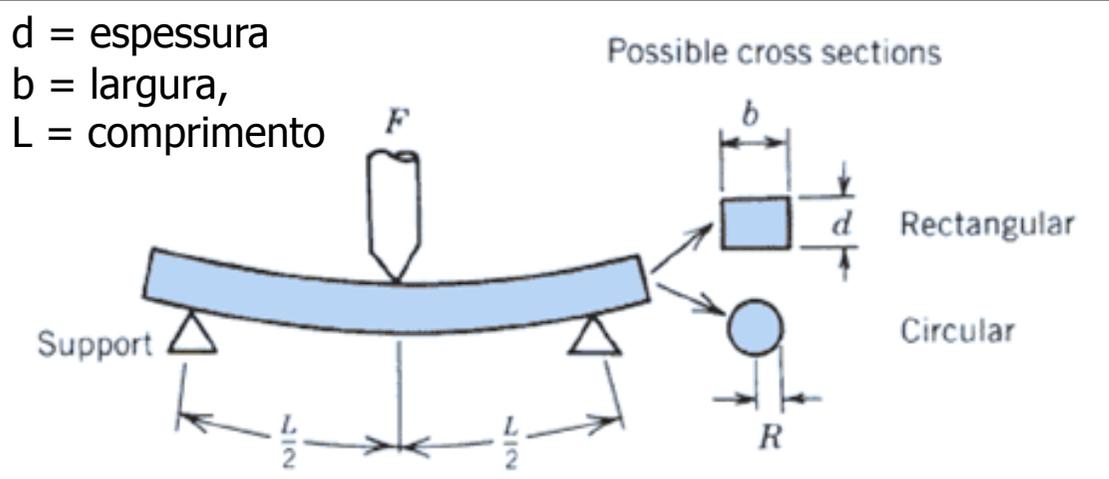
- Uma distribuição matemática que apresenta a probabilidade de falha ou de “sobrevivência” de um material em função da tensão à qual esse material é submetido.
- Fornece também uma medida da variabilidade dos resultados de resistência mecânica para esse material – a teoria é baseada no conceito de “elo mais fraco da corrente”, ou seja, é o maior defeito presente no corpo de prova que condiciona a resistência mecânica desse material.

Fração das amostras ensaiadas, $f(\sigma)$, que falharam na tensão σ .



Distribuição de Weibull de amostras que fraturam sob ação da tensão aplicada.

O Ensaio de Flexão (Materiais Cerâmicos)



$\sigma = \text{stress} = \frac{Mc}{I}$
 where M = maximum bending moment
 c = distance from center of specimen to outer fibers
 I = moment of inertia of cross section
 F = applied load

| | $\frac{M}{4}$ | $\frac{c}{2}$ | $\frac{I}{12}$ | $\frac{\sigma}{2bd^2}$ |
|-------------|----------------|---------------|---------------------|------------------------|
| Rectangular | $\frac{FL}{4}$ | $\frac{d}{2}$ | $\frac{bd^3}{12}$ | $\frac{3FL}{2bd^2}$ |
| Circular | $\frac{FL}{4}$ | R | $\frac{\pi R^4}{4}$ | $\frac{FL}{\pi R^3}$ |

AMOSTRA GAIL

| C.Prova | d (mm) | b (mm) | L (mm) | F (N) |
|---------|---------|----------|---------|--------|
| 1 | 8.13 | 63.55 | 204 | 417.77 |
| 2 | 8.19 | 63.15 | 204 | 524.17 |
| 3 | 7.75 | 63.21 | 204 | 426.11 |
| 4 | 7.99 | 62.8 | 204 | 541.34 |
| 5 | 8.08 | 63.2 | 204 | 516.82 |
| 6 | 7.76 | 63.17 | 204 | 514.37 |
| 7 | 7.98 | 63.06 | 204 | 466.31 |
| 8 | 7.88 | 63.03 | 204 | 539.37 |
| 9 | 7.93 | 63.04 | 204 | 546.24 |
| 10 | 7.67 | 62.78 | 204 | 498.19 |
| 11 | 7.74 | 63.08 | 204 | 508.48 |
| 12 | 7.97 | 63.11 | 204 | 524.66 |
| 13 | 7.93 | 63.08 | 204 | 474.40 |
| 14 | 8.67 | 62.86 | 204 | 488.89 |
| 15 | 8.05 | 62.95 | 204 | 515.84 |
| 16 | 7.79 | 62.96 | 204 | 432.23 |
| 17 | 8.14 | 62.91 | 204 | 525.15 |
| 18 | 7.82 | 63.01 | 204 | 486.91 |
| 19 | 7.96 | 62.71 | 204 | 487.89 |
| 20 | 7.86 | 63.08 | 204 | 492.79 |
| 21 | 8.02 | 62.9 | 204 | 471.95 |
| 22 | 7.76 | 63.23 | 204 | 456.02 |
| 23 | 8.02 | 62.79 | 204 | 507.99 |
| 24 | 8.10 | 62.94 | 204 | 547.22 |
| 25 | 7.98 | 62.92 | 204 | 524.66 |

- Consideremos um corpo de prova com um volume V e com uma certa distribuição de trincas, sendo submetido a uma tensão σ .
- Vamos assumir que o volume V é constituído de n elementos de volume V_0 .
- **A probabilidade de sobrevivência** do elemento V_0 (ou seja, a probabilidade de que o elemento V_0 não falhe sob a tensão σ) é dada por:

$$P(V_0) = \exp \left[- \left(\frac{\sigma - \sigma_u}{\sigma_0} \right)^m \right]$$

- σ é a tensão aplicada;
- σ_0 é a tensão característica (geralmente assumida como sendo igual à resistência média);
- σ_u é a tensão abaixo da qual a probabilidade de falha é zero;
- m é o módulo de Weibull, que indica a variabilidade de resistência do material;
- Essa expressão é conhecida como a “expressão de Weibull com 3 parâmetros”

Propriedades Mecânicas: Distribuição de Weibull

- Assim, a **probabilidade de falha** do elemento V_0 é dada por:

$$F(V_0) = 1 - P(V_0) = 1 - \exp \left[- \left(\frac{\sigma - \sigma_u}{\sigma_0} \right)^m \right]$$

- Teoricamente, o **módulo de Weibull** pode apresentar valores entre zero e infinito.
 - Para **metais e ligas** (materiais dúcteis), o módulo de Weibull apresenta valores muito altos (**>100**).
 - Para **cerâmicas tradicionais** (tijolos, telhas, etc...) apresenta valores normalmente **inferiores a 3**.
 - Para **cerâmicas de alto desempenho** (nas quais o processamento é mais controlado e, portanto, se espera que o número de defeitos tais como trincas e poros seja menor) o valor de **m** varia normalmente **entre 5 e 10**.

- Para materiais cerâmicos e outros frágeis, é freqüente admitir-se $\sigma_u = 0$
- Isso quer dizer que não existe um valor de tensão mínimo para o qual todas as peças irão resistir. Ou seja, assume-se que sempre pode haver uma peça para qual uma tensão qualquer, mesmo mínima, possa ser suficiente para quebrá-la.
- Assim, as duas equações anteriores assumem a seguinte forma:

$$P(V_o) = \exp \left[- \left(\frac{\sigma}{\sigma_0} \right)^m \right]$$

**Probabilidade do corpo falhar =
1 – probabilidade do corpo sobreviver**

$$F(V_o) = 1 - P(V_o) = 1 - \exp \left[- \left(\frac{\sigma}{\sigma_0} \right)^m \right]$$

Essas expressões são conhecidas como “expressões de Weibull com 2 parâmetros”

Tensão característica de Weibull σ_0

$$P(V_o) = \exp \left[- \left(\frac{\sigma}{\sigma_0} \right)^m \right]$$

- Se a tensão aplicada (σ) for igual a 0, a probabilidade de “sobrevivência” é igual a 1
- Conforme a tensão aplicada aumenta, o valor de $P(V_o)$ diminui, aproximando-se de zero para valores elevados de tensão aplicada
- Quando $\sigma = \sigma_0$ (ou seja, a tensão aplicada é igual à média aritmética dos resultados), a probabilidade de “sobrevivência” é igual a $1/e = 0,37$ (= 37%). Define-se “**tensão característica de Weibull**” como a tensão na qual a probabilidade de falha é igual a 0,63 (63%). Esse valor deve ser lido a partir do gráfico.
- Observe que as equações anteriores podem ser modificadas para levar em conta o volume do corpo cerâmico: para igual probabilidade de sobrevivência, corpos maiores suportam tensões menores.

Distribuição de Weibull: construção do gráfico

- As resistências mecânicas (tensões de ruptura) dos corpos de prova devem ser ordenadas de forma crescente (coluna “tensão”, na tabela) e a probabilidade de falha correspondente a cada valor de tensão deve ser calculada.

| i-ésimo corpo de prova | Tensão (σ) | Probabilidade de falha: $F(V_0)$ |
|------------------------|---------------------|----------------------------------|
| 1 | σ_1 | $1/(n+1)$ |
| 2 | σ_2 | $2/(n+1)$ |
| 3 | σ_3 | $3/(n+1)$ |
| 4 | σ_4 | $4/(n+1)$ |
| ... | ... | ... |
| n | σ_n | $n/(n+1)$ |

- $F(V_0)$ é uma espécie de “contador” que só depende do número de corpos de prova ensaiados (n). Essa é uma maneira de atribuir probabilidades de falha a todos os corpos de prova, distribuindo-os na faixa de 0 a 100%.

Distribuição de Weibull: construção do gráfico

- Lineariza-se a expressão da probabilidade de falha

$$\begin{array}{c}
 \text{Probabilidade de falha} \longrightarrow F(V_0) = 1 - \exp [-(\sigma / \sigma_0)^m] \\
 \downarrow \text{Linearização} \\
 \text{Probabilidade acumulada de falha} \longrightarrow \ln [\ln (1 / [1 - F(V_0)])] = m \cdot [\ln (\sigma) - \ln (\sigma_0)]
 \end{array}$$

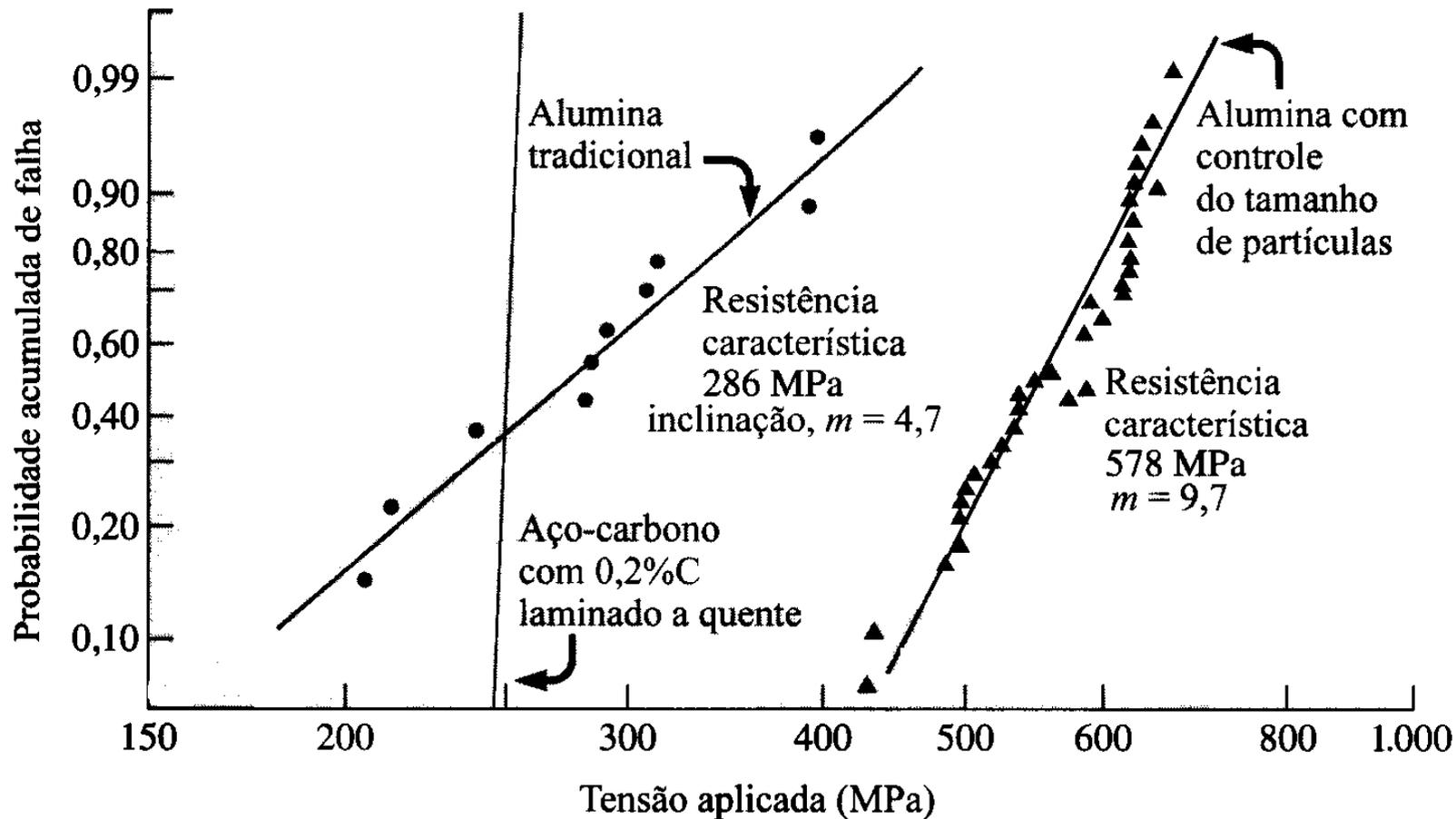
Tensão de ruptura \swarrow σ \nwarrow Módulo de Weibull m
Tensão Característica \swarrow σ_0

- Utilizando os valores da tabela, faz-se um gráfico da probabilidade acumulada de falha em função do $\ln(\sigma)$. Note que esse gráfico corresponde a uma função linear, cujo coeficiente angular define o módulo de Weibull.

| i-ésimo corpo de prova | Tensão (σ) | Probabilidade de falha: $F(V_0)$ |
|------------------------|---------------------|----------------------------------|
| 1 | σ_1 | $1/(n+1)$ |
| 2 | σ_2 | $2/(n+1)$ |
| 3 | σ_3 | $3/(n+1)$ |
| 4 | σ_4 | $4/(n+1)$ |
| ... | ... | ... |
| n | σ_n | $n/(n+1)$ |

Distribuição de Weibull: Exemplo

$$F(V_0) = 1 - \exp [-(\sigma/\sigma_0)^m] \Rightarrow \ln [\ln (1 / [1 - F(V_0)])] = m \cdot [\ln (\sigma) - \ln (\sigma_0)]$$



Probabilidade acumulada de falha de amostras sob tensão ajustada com a distribuição de Weibull. Os materiais são duas aluminas produzidas por dois métodos e um aço de baixo teor de carbono. Obtém-se uma boa confiabilidade de projeto com módulos de Weibull elevados, pois indicam menor dispersão e maior confiabilidade. (Fonte: Mechanical Behavior of Materials, de M.A. Meyers e K.K. Chawla, 1999. Copyright © 1999 Prentice-Hall. Reproduzida com permissão da Pearson Education, Inc., Upper Saddle River, NJ)

Distribuição de Weibull: Exemplo

No exemplo do slide nº 21

- A curva obtida para o exemplo do aço carbono é quase vertical, ou seja, o valor de m é muito elevado. Isso indica uma pequena variação de valores de tensão de ruptura observados para os diferentes corpos de prova de aço carbono ensaiados.
- Para a alumina preparada de acordo com métodos de processamento tradicionais, a variação é elevada: valor de m é baixo ($m = 4,7$).
- Para a alumina na qual houve um maior controle da distribuição do tamanho de partículas, o valor de m é maior ($m = 9,7$), indicando uma distribuição mais uniforme de trincas, as quais seriam a causa da menor variação observada nos resultados.

Referências

- Referência para o tema “Distribuição de Weibull”
Askeland, D.R.; Phulé, P.P. – Ciência e Engenharia dos Materiais. 4ª ed. traduzida, Cengage Learning. São Paulo. 2008.
Cap.6 (texto disponível no Moodle-USP).
- O livro do Callister não aborda o tema “Distribuição de Weibull”.