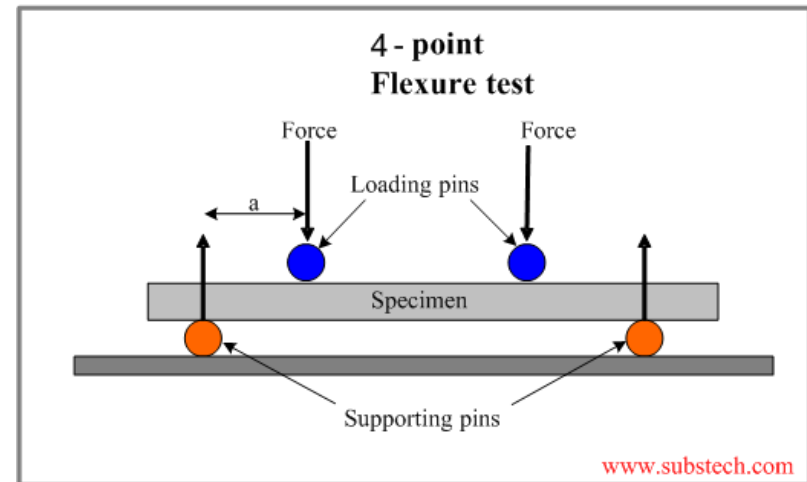
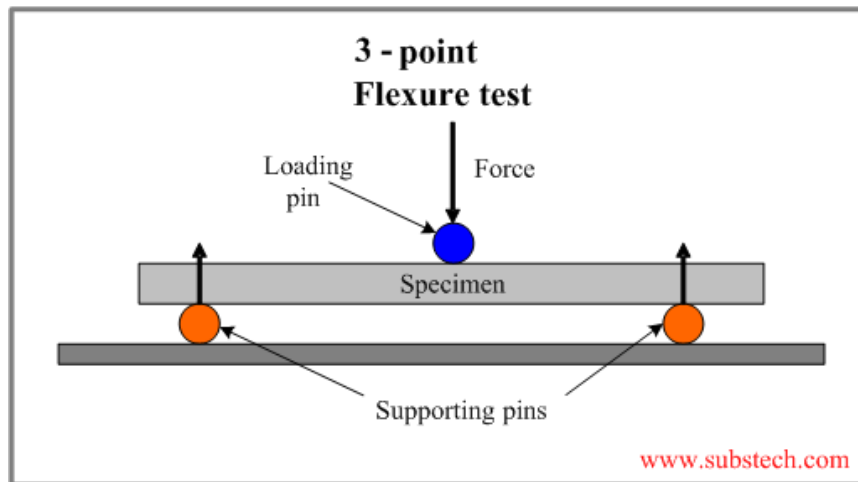


Aula 4

Propriedades Mecânicas de Cerâmicas

Materiais Cerâmicos II
Engenharia de Materiais e Manufatura
EESC/USP – São Carlos
Prof. Dr. Eduardo Bellini Ferreira

Ensaio mecânicos típicos de cerâmicas



Esquema de carregamento por flexão em três e quatro pontos para a determinação do comportamento de tensão-deformação e da resistência à flexão de cerâmicas frágeis.

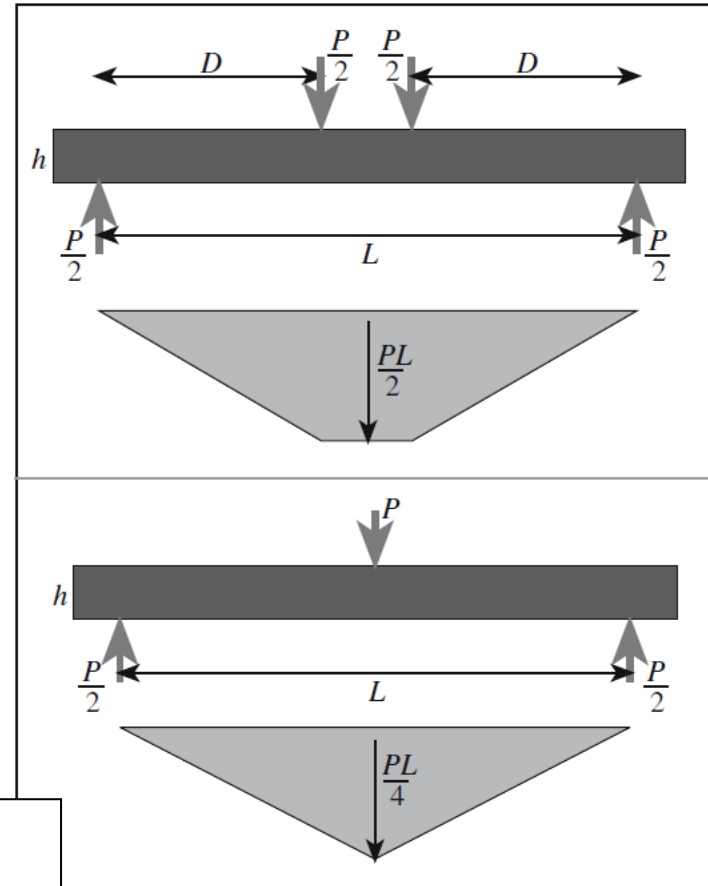
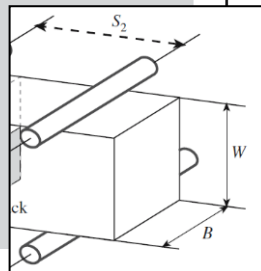
Ensaio de flexão 3 e 4 pontos

- Menor custo e maior facilidade para preparar amostras.
- Pode superestimar a resistência mecânica, dependendo da posição dos maiores defeitos!

MODULUS OF RUPTURE EQUATIONS

Three-point bend: $\sigma_r = \frac{3PL}{2BW^2}$

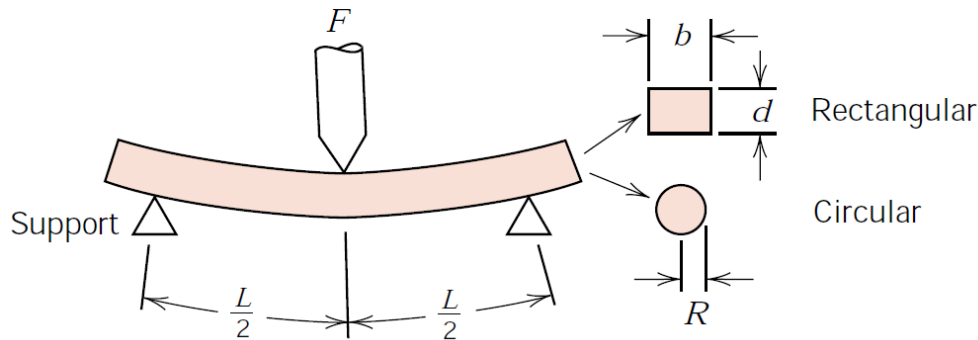
Four-point bend: $\sigma_r = \frac{3PD}{BW^2}$



W = altura do corpo de prova
B = largura do corpo de prova

Ensaio mecânicos típicos de cerâmicas

Possible cross sections



$$\sigma = \text{stress} = \frac{Mc}{I}$$

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	$\frac{\pi R^4}{4}$	$\frac{FL}{\pi R^3}$

Tensão de fratura, σ_f :

$$\sigma_f = \frac{3F_{\text{máx}} \cdot L}{2b \cdot d^2}$$

Esquema de carregamento para a determinação do comportamento de tensão-deformação e da resistência à flexão de cerâmicas frágeis, incluindo expressões para o cálculo da tensão para seções transversais retangulares e circulares.

Determinação de K_{IC} através de ensaios de flexão 4-pontos

- *Single-edged notched beam*, SENB:

$$K_{IC} = \frac{3\sqrt{c}(S_1 - S_2)\xi F_{max}}{2BW^2}$$

onde ξ = fator de calibração
 c = comprimento do entalhe.

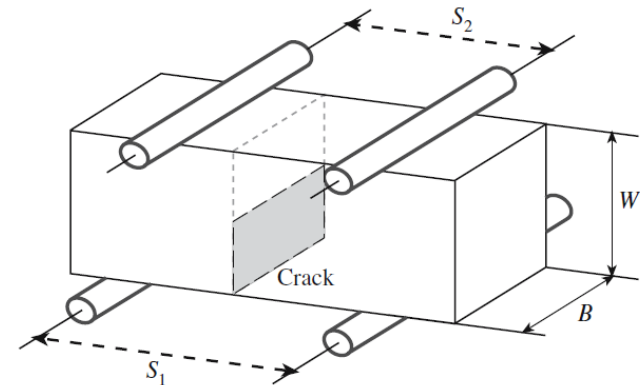
- *Chevron notched*, CN:

$$K_{IC} = \frac{(S_1 - S_2)\xi^* F_{max}}{BW^{3/2}}$$

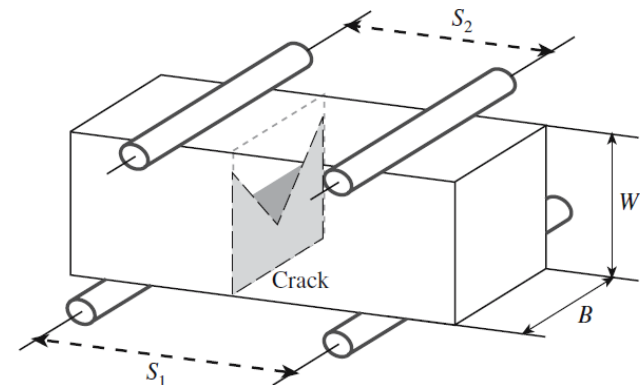
onde ξ^* = *compliance function*, ou

$$K_{IC} = \frac{F_{max}}{B\sqrt{W}} Y^*$$

onde Y^* = *parâmetro geométrico*.



(A)

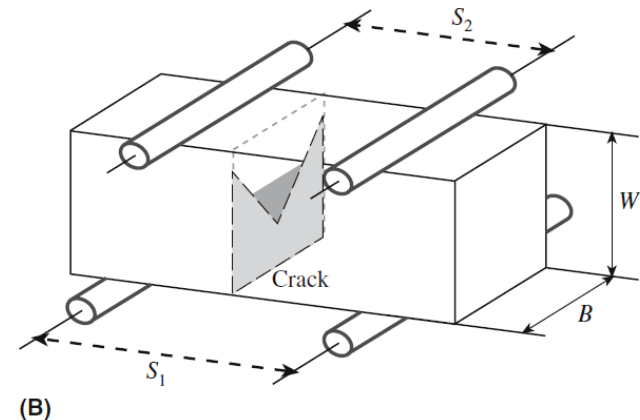
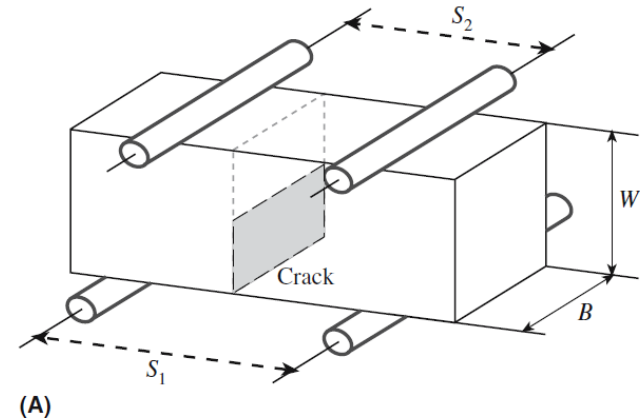


(B)

Geometrias para K_{IC} por flexão 4-pontos:
(A) *single-edged notched beam*, SENB,
(B) *chevron notched*, CN.

Determinação de K_{IC} através de ensaios de flexão 4-pontos

- *Single-edged notched beam, SENB:*
 - Superestima K_{IC} , pois a largura da extremidade da trinca não é da ordem das distâncias interatômicas (para cerâmicas com grãos finos, entalhes muito finos são necessários)
- *Chevron notched, CN:*
 - A extremidade da trinca com largura da ordem das dimensões atômicas é naturalmente produzida no início do ensaio.
 - A trinca se propaga estavelmente.
 - Não é preciso conhecer o comprimento do entalhe.



Geometrias para K_{IC} por flexão 4-pontos:
(A) *single-edged notched beam, SENB*,
(B) *chevron notched, CN*.

Durezza

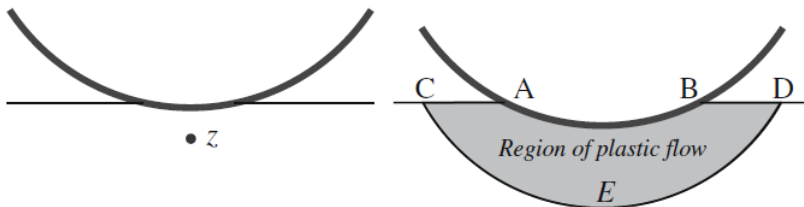


FIGURE 16.15 Plasticity under the indenter (the shaded area) causes the deviation from Hertzian behavior.

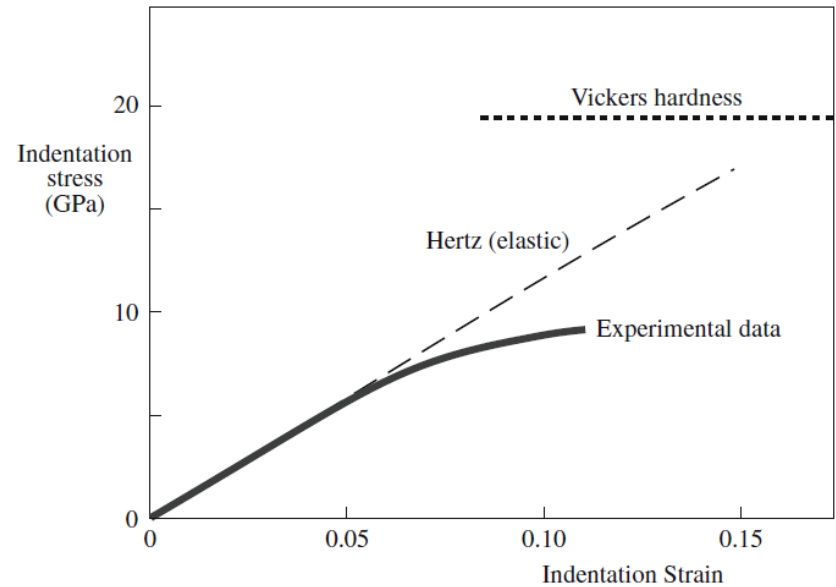


FIGURE 16.14 Indentation stress versus indentation strain.

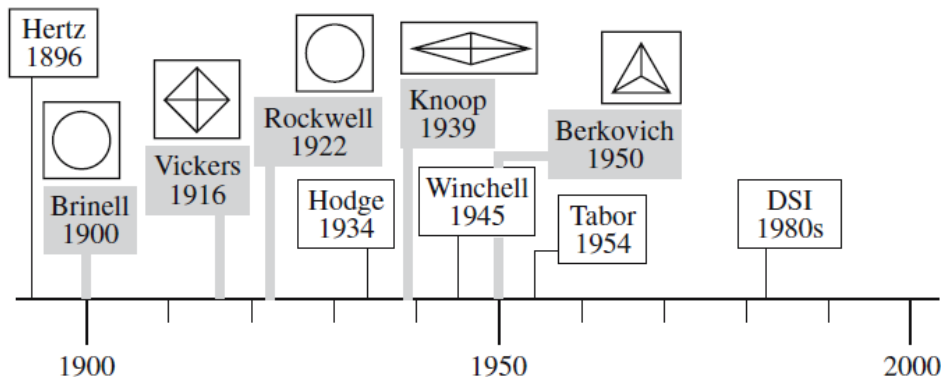


FIGURE 16.16 The evolution of common hardness tests and the corresponding indenter shapes.

TABLE 16.8 Hardness Regimes

Regime	Applied load (N)	Comments
Microhardness	0.0098–1.96	Hardness value decreases as load increases Possibility for very large variations in values depending on technique used and microstructure Surface effects may dominate
Low load hardness	1.96–98.1	
Standard hardness	>98.1	Hardness independent of applied load and microstructure.

Dureza

TABLE 16.7 Details of Common Hardness Tests

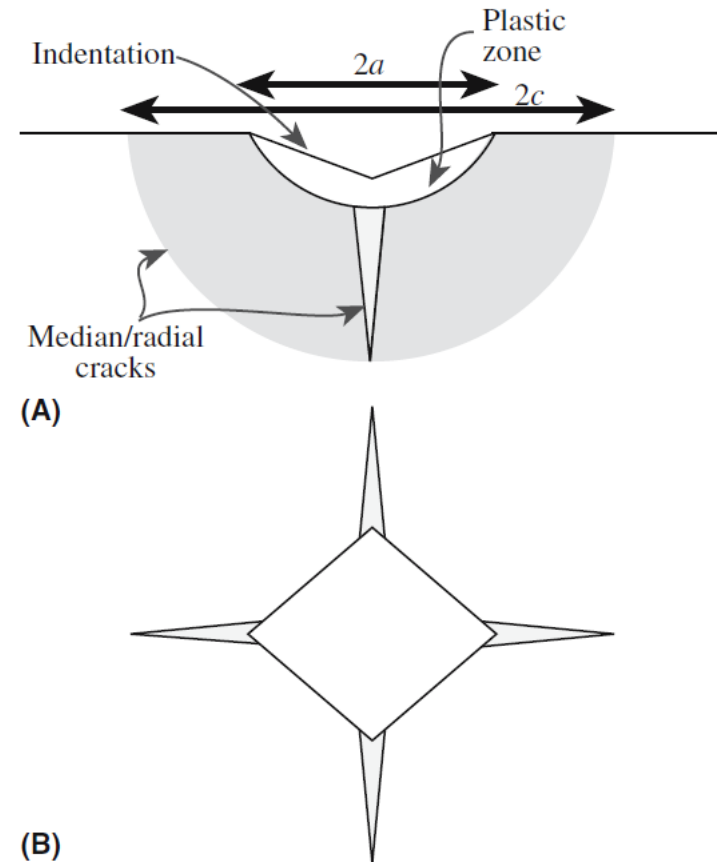
<i>Test</i>	<i>Indenter</i>	<i>Description</i>	<i>Equation</i>	<i>Notes</i>
Brinell	Hardened steel ball	Brinell hardness number (BHN) is applied force divided by surface area of indentation	$BHN = F/\pi Dt$	Spherical indenters not used for ceramics
		Meyer hardness number (MHN) uses projected area	$MHN = 4F/\pi d^2$	
Vickers	Square pyramid	Vickers hardness number (VHN) using contact area	$VHN = 1.854F/a^2$	The ceramics community uses mainly the number calculated using the projected area; need to be careful when comparing data from different sources
		VHN using projected area	$VHN = 2.000F/a^2$	
Knoop	Elongated pyramid	Knoop hardness number (KHN)	$KHN = 14.2F/L^2$	
Rockwell	Various indenter types/loads	Dimensionless number and various hardness scales		Widely used for metals but not often for ceramics except cemented carbides

Medida experimental de K_{IC} pelo método da indentação Vickers

$$K_{IC} = \frac{\zeta(E/H)^{\frac{1}{2}}P}{c^{\frac{3}{2}}}$$

- H = dureza
- E = módulo elástico
- P = carga aplicada
- $\zeta = 0,016 \pm 0,004$ (constante)

Esse método fornece resultados semiquantitativos, que podem ser usados para prospecção de materiais e métodos para produzir alta tenacidade, mas os valores da tenacidade obtidos não se comparam com os anteriores e aparentemente não são reproduzíveis!



Ensaaios de flexão 3 e 4 pontos

- Menor custo e maior facilidade para preparar amostras.
- Pode superestimar a resistência mecânica, dependendo da posição dos maiores defeitos.

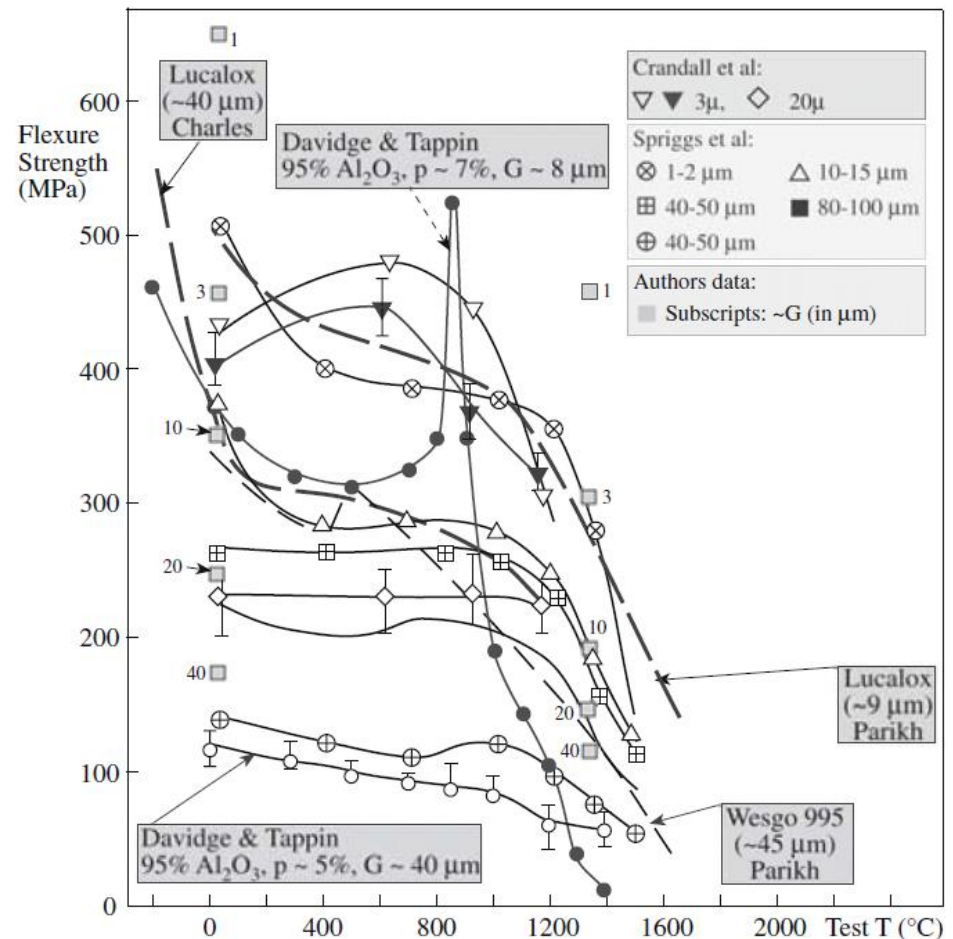


FIGURE 16.12 Flexural strength of polycrystalline Al₂O₃ as a function of test temperature.

Variação dos resultados de resistência de materiais cerâmicos *versus* projeto (design)

- Quando ensaiamos um série de corpos de prova de materiais cerâmicos encontramos uma **grande variação de resultados**.
- Mesmo se provenientes de um mesmo lote de fabricação.
- Isso é devido à distribuição de defeitos geradores de trincas nos CPs e à **grande sensibilidade** das cerâmicas a pequenas variações nas dimensões e orientações desses defeitos (baixo K_{Ic}).

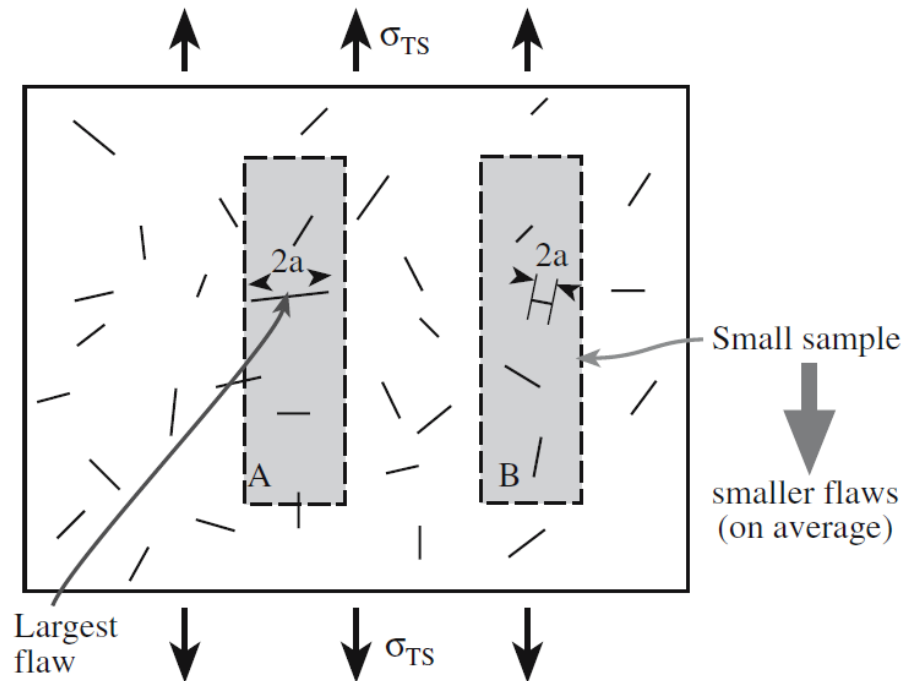
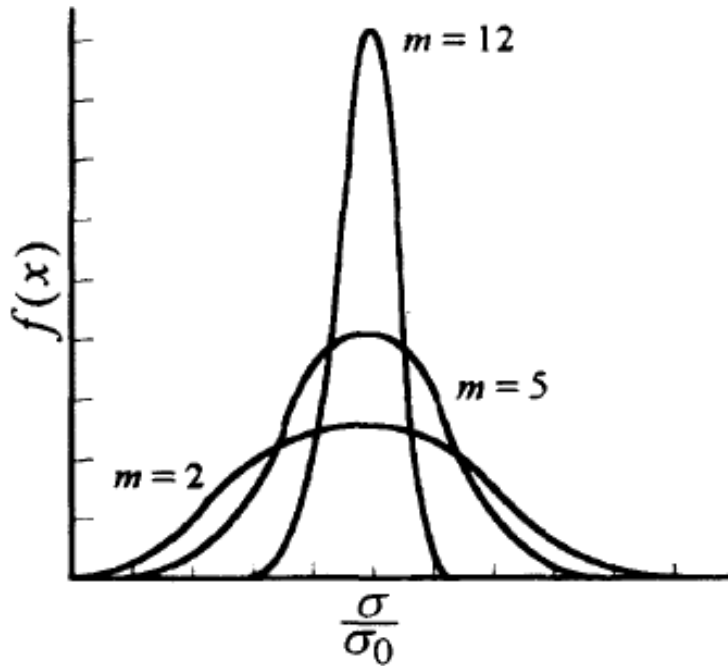


FIGURE 16.22 The largest flaw will be the weakest link and the source of failure. Smaller samples have smaller flaws.

Projeto determinístico vs. abordagem estatística

Função de distribuição de Weibull – baseada na resistência do elo mais fraco

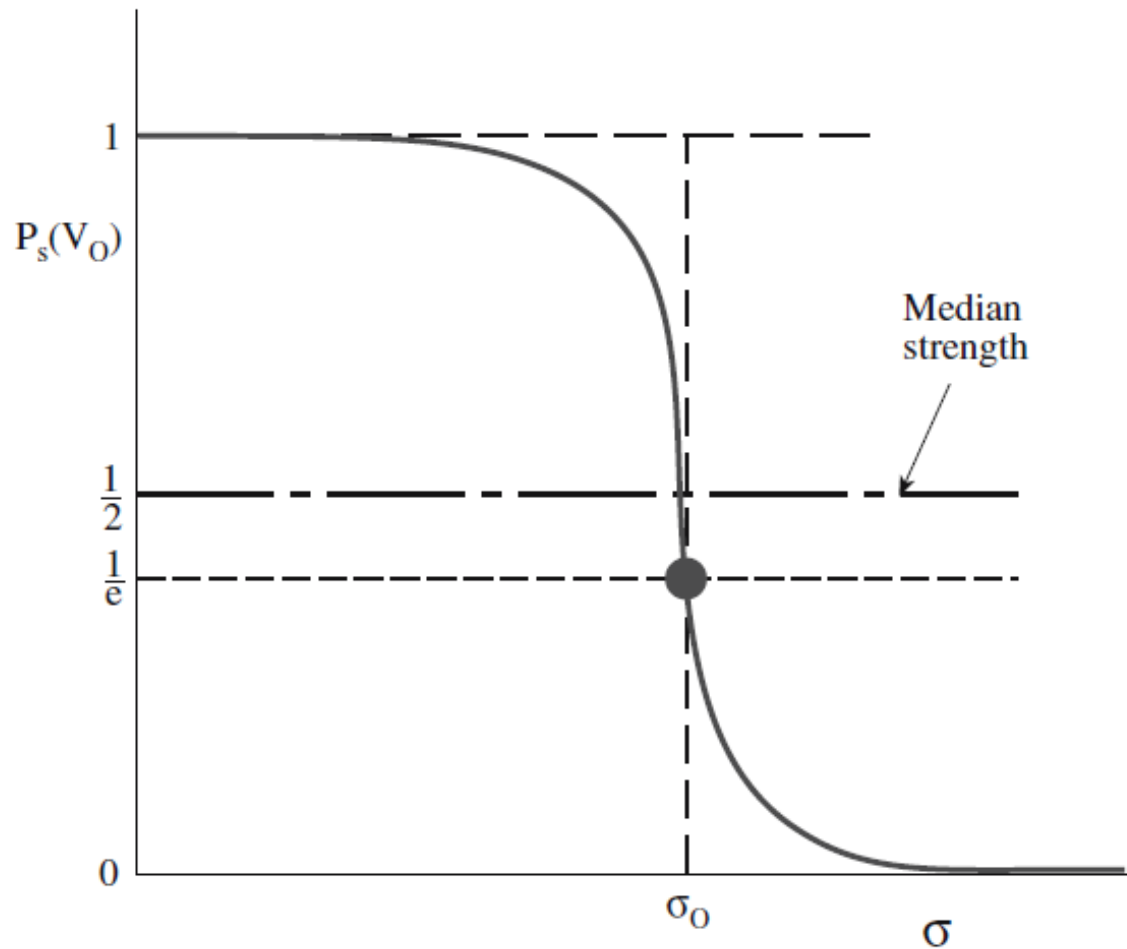


$$f(x) = m(x)^{m-1} \exp(-x^m)$$

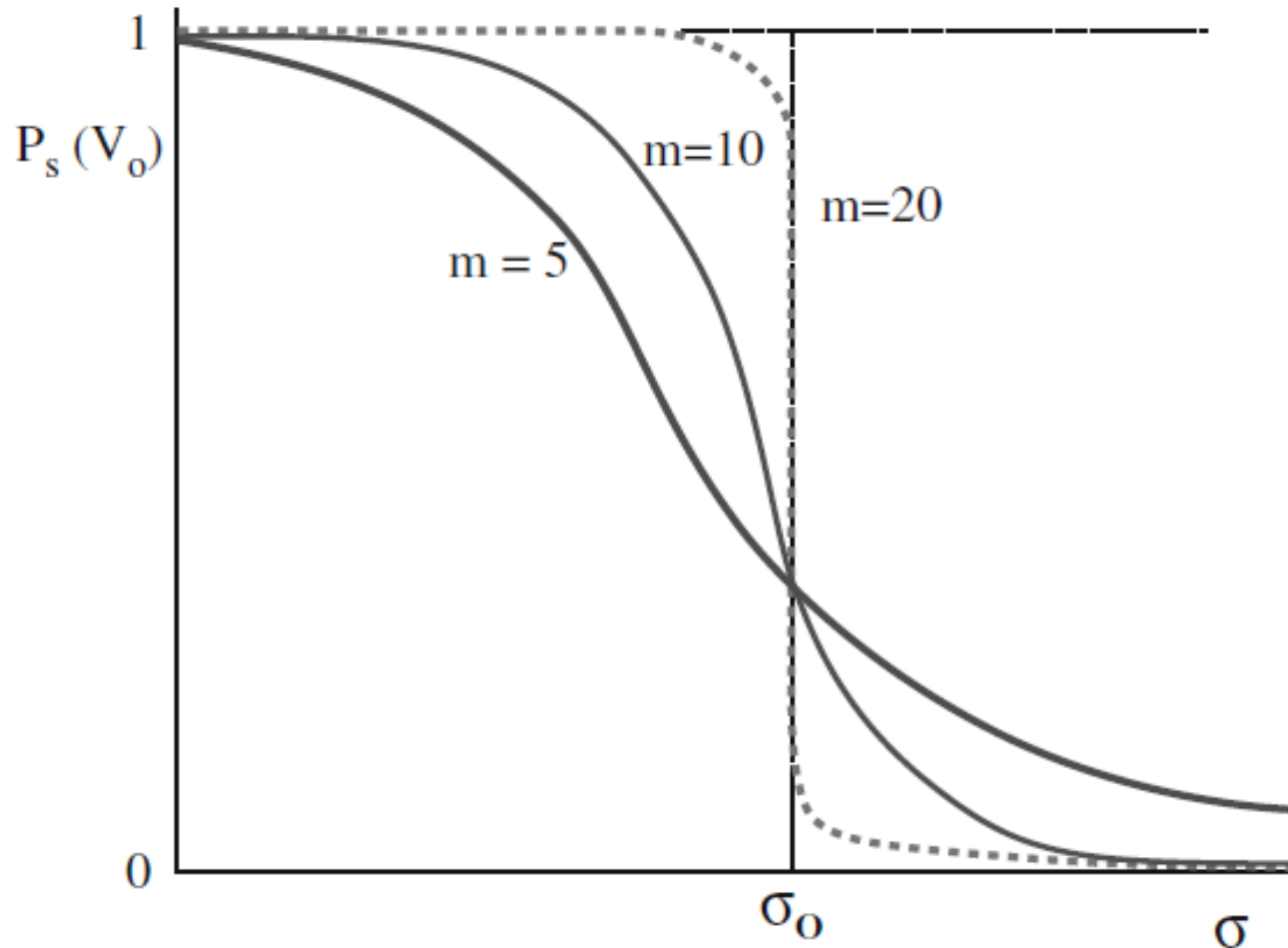
$$f\left(\frac{\sigma - \sigma_{\min}}{\sigma_0}\right) = m\left(\frac{\sigma - \sigma_{\min}}{\sigma_0}\right)^{m-1} \exp\left[-\left(\frac{\sigma - \sigma_{\min}}{\sigma_0}\right)^m\right]$$

- m = módulo de Weibull
- σ_0 = resistência característica, para a qual a probabilidade de sobrevivência é 0,37 (1/e)
- $\sigma_{\min}$ = nível de tensão abaixo do qual a probabilidade de fratura é zero

Função de distribuição de Weibull

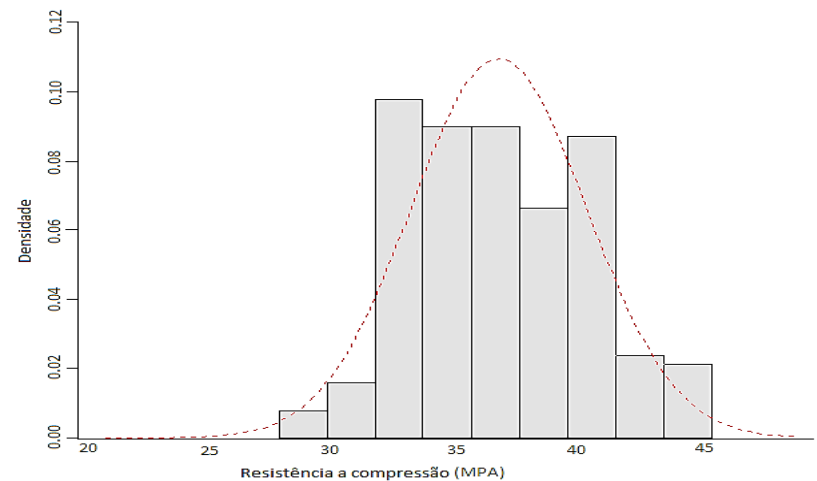
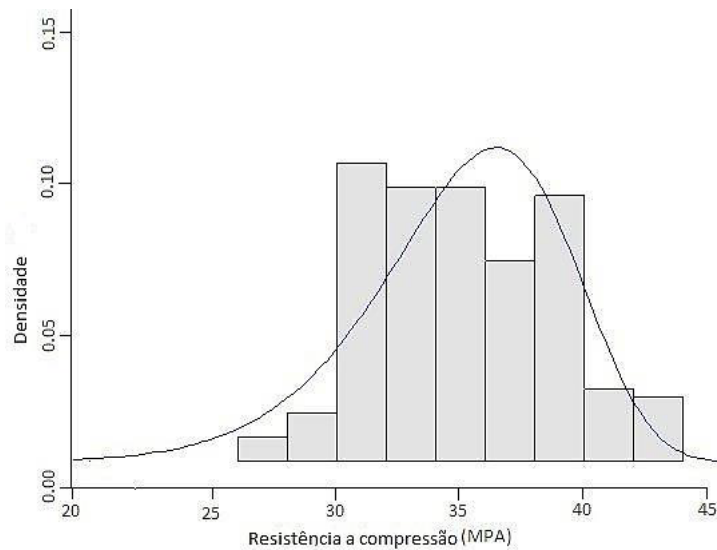


Efeito de m de Weibull na probabilidade de sobrevivência



Aços tem m da ordem de 100!

Comparação distribuições Normal e Weibull para concreto



Projeto determinístico vs. abordagem estatística

Forma acumulada da distribuição de Weibull

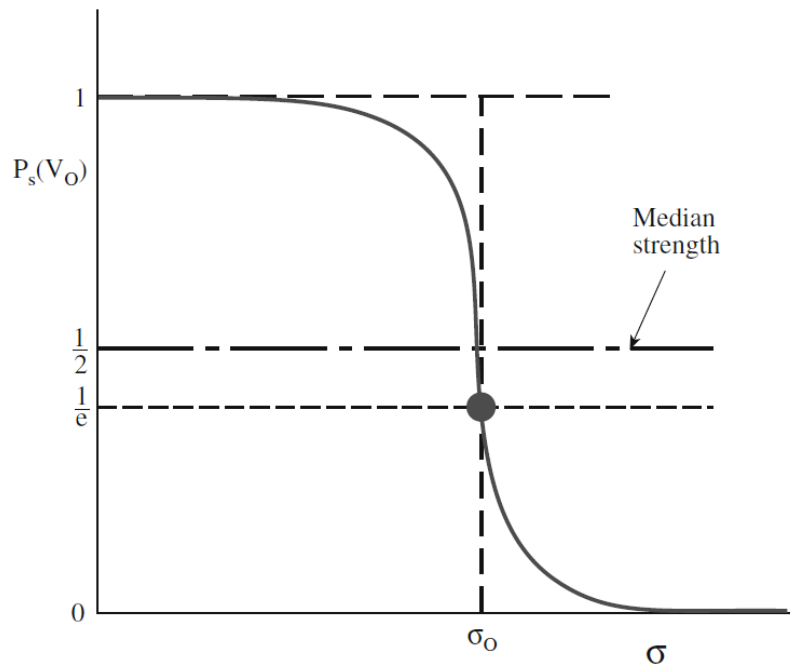
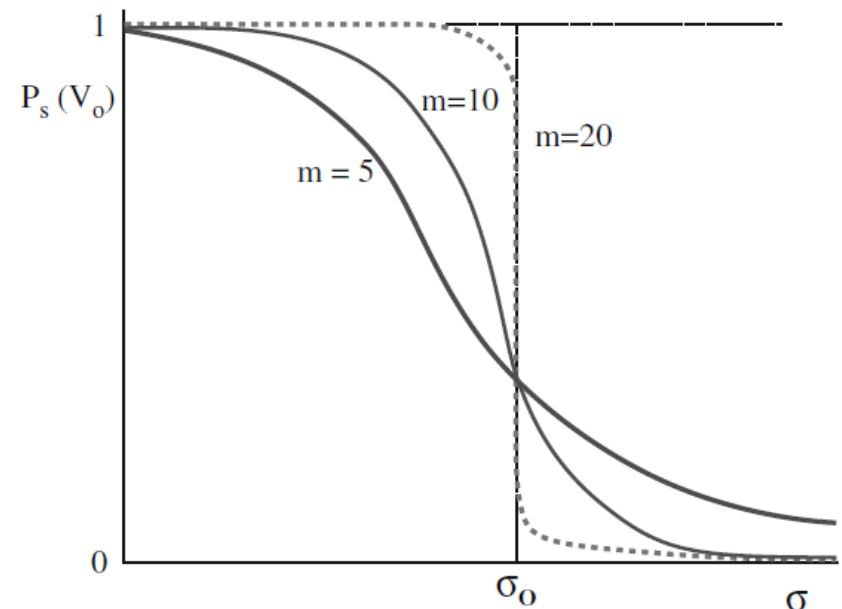


FIGURE 16.19 The Weibull distribution function.

$$P_s = 1 - P_F = \exp \left[- \int_V \left(\frac{\sigma - \sigma_{\min}}{\sigma_0} \right)^m dV \right] \quad (16.18)$$



Efeito do módulo de Weibull (m)
na probabilidade de sobrevivência.

Aços tem m da ordem de 100!

Projeto determinístico vs. abordagem estatística

$$P_S = 1 - P_F = \exp \left[- \int_V \left(\frac{\sigma - \sigma_{\min}}{\sigma_0} \right)^m dV \right]$$

Como sempre há uma probabilidade de existir um defeito muito grande, é comum considerar $\sigma_{\min} = 0$, o que resulta em:

$$P_S = \exp \left[- \int_V \left(\frac{\sigma}{\sigma_0} \right)^m dV \right]$$

Para ensaios de tração pura e uniforme (todo volume do corpo de prova fica sob tração constante):

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

Aplicando logaritmo dos dois lados da expressão acima:

$$\ln \left(\frac{1}{P_S} \right) = \left(\frac{\sigma}{\sigma_0} \right)^m$$

E aplicando logaritmo de novo:

$$\ln \left[\ln \left(\frac{1}{P_S} \right) \right] = m \ln \left(\frac{\sigma}{\sigma_0} \right) = m \ln \sigma - m \ln \sigma_0$$

Gráfico de Weibull

$$\ln \left[\ln \left(\frac{1}{P_s} \right) \right] = m \ln \left(\frac{\sigma}{\sigma_0} \right)^m = m \ln \sigma - m \ln \sigma_0$$

- Quanto maior a inclinação, maior o módulo de Weibull m e menor é a variabilidade dos resultados.
- Cerâmicas têm valores de m entre 5 e 20 (aços $m = 100$).
- É preciso um grande número de corpos de prova para determinação de m :
 - 30 cps resultam m com 20% de erro
 - ~100 cps são necessários para m com +90% confiança

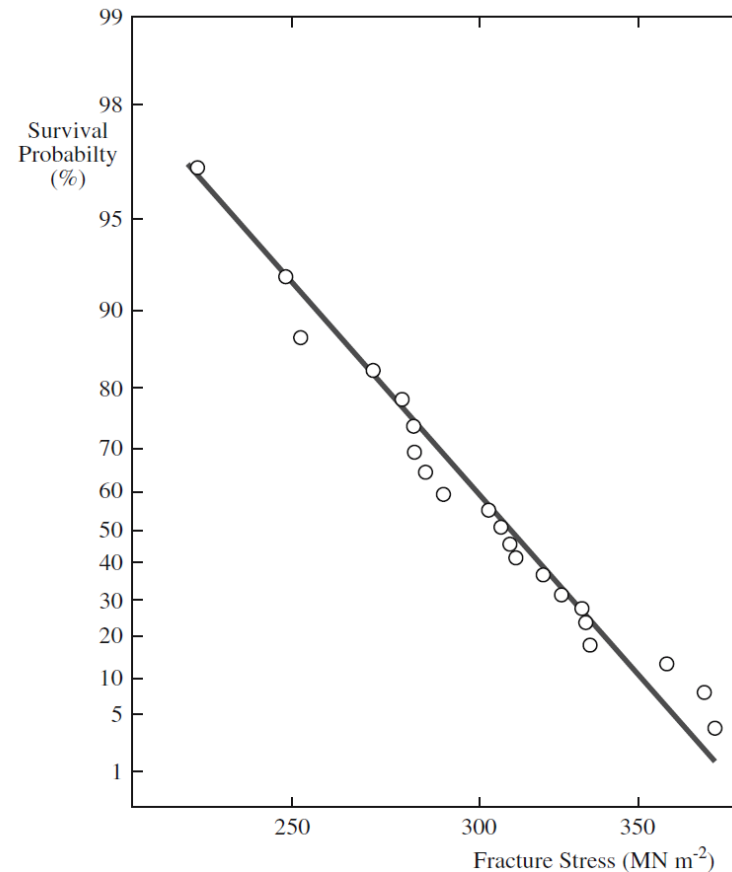


FIGURE 16.20 Weibull plot showing probability of failure as a function of fracture stress.

Procedimento para estatística de Weibull

1. Organizar os dados em ordem crescente de resistência mecânica
2. Determine P_S para cada resultado:

$$P_S = 1 - \frac{j}{N+1}, \text{ onde } j \text{ é a posição do resultado}$$

$$\text{ou } P_S = 1 - \frac{j-0,3}{N+0,4}, \text{ que é mais preciso}$$

3. Calcule $\ln \sigma$ e $-\ln \left(\ln \frac{1}{P_S} \right)$
4. Faça um gráfico de $-\ln \left(\ln \frac{1}{P_S} \right)$ versus $\ln \sigma$
5. Por regressão linear, obtenha a equação da reta. O coeficiente angular é o módulo de Weibull m .

Gráfico de Weibull

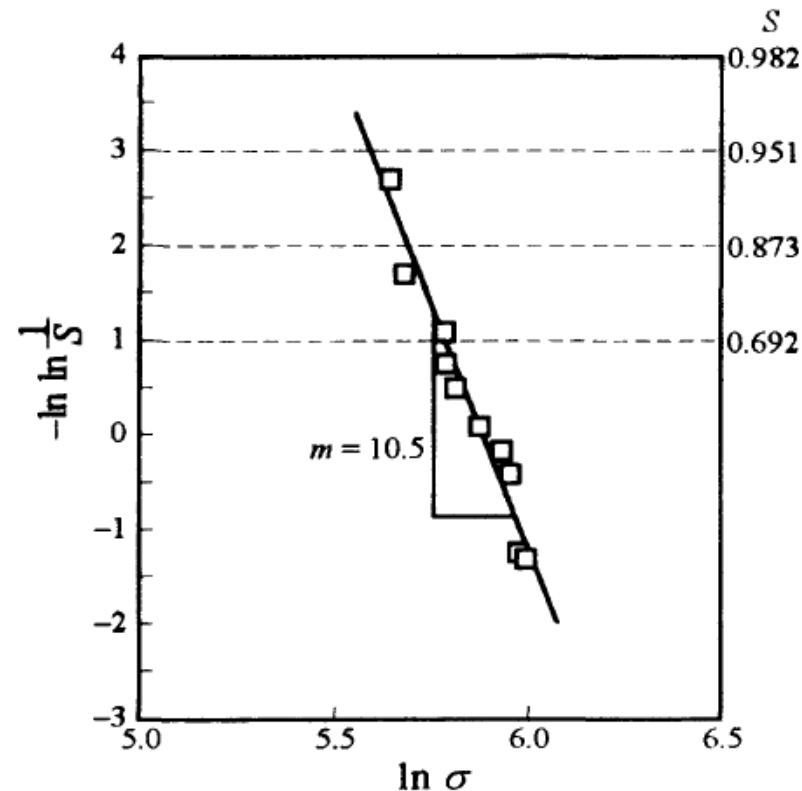


Figure 11.21 Weibull plot of data shown in Table 11.2. Slope of the line is the Weibull modulus m . The actual survival probability is shown on the right-hand side. At low stresses, S is large (left-hand corner of figure).²⁰⁴

²⁰⁴ The reason that $-\ln \ln(1/S)$ is plotted rather than $\ln \ln(1/S)$ is aesthetic, such that the high survival probabilities appear on the upper left-hand sides of the plots.

Efeito do volume

- Para outros tipos de ensaio mecânico que não o de tração pura, consideramos um volume efetivo $V_{ef} = L_F V$, onde L_F é um fator de carregamento que depende do ensaio:

TABLE 16.9 Examples of Loading Factors^a

<i>Geometry</i>	<i>Loading factor, L_F</i>
Uniaxial tension	1
Pure bending	$1/[2(m + 1)]$
Three-point bending	$1/[2(m + 1)^2]$
Four-point bending	$(mL_i + L_o)/[2L_o(m + 1)^2]$

^a L_i , inner span; L_o , outer span.

Efeito do volume

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

onde $V = nV_0$

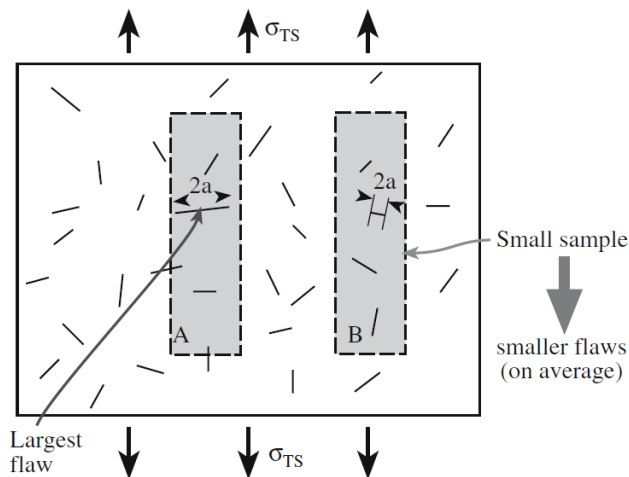


FIGURE 16.22 The largest flaw will be the weakest link and the source of failure. Smaller samples have smaller flaws.

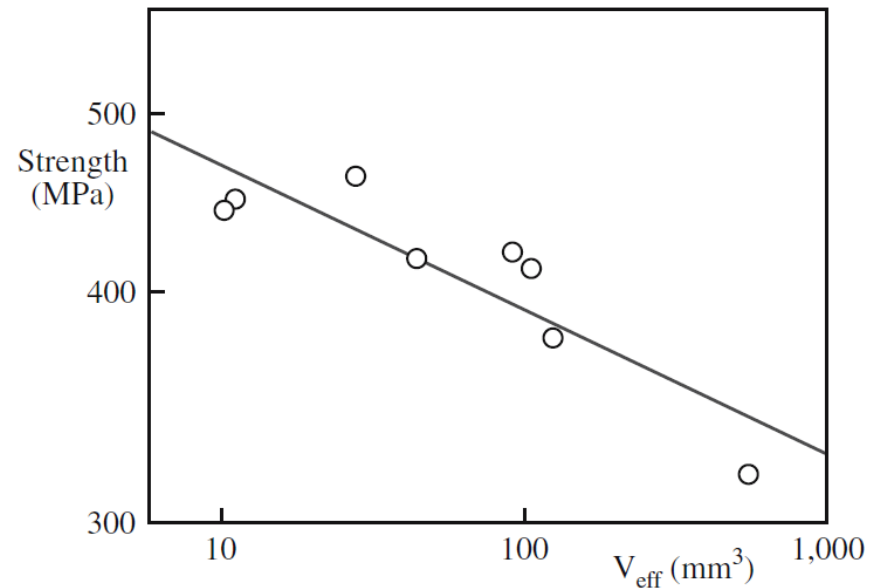
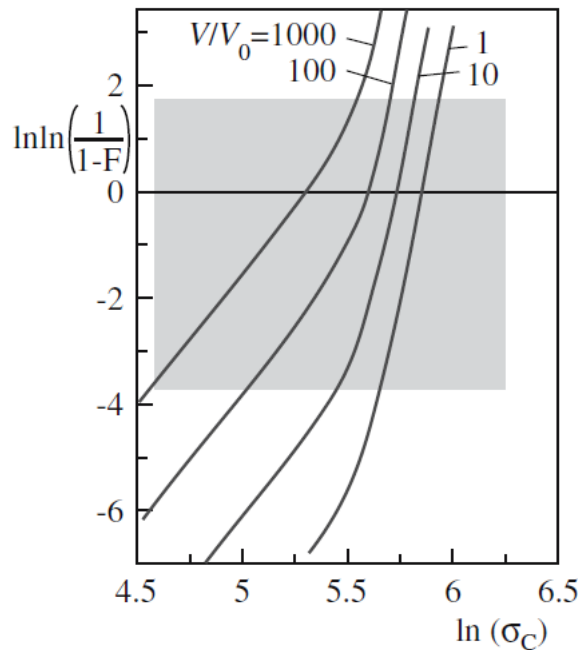


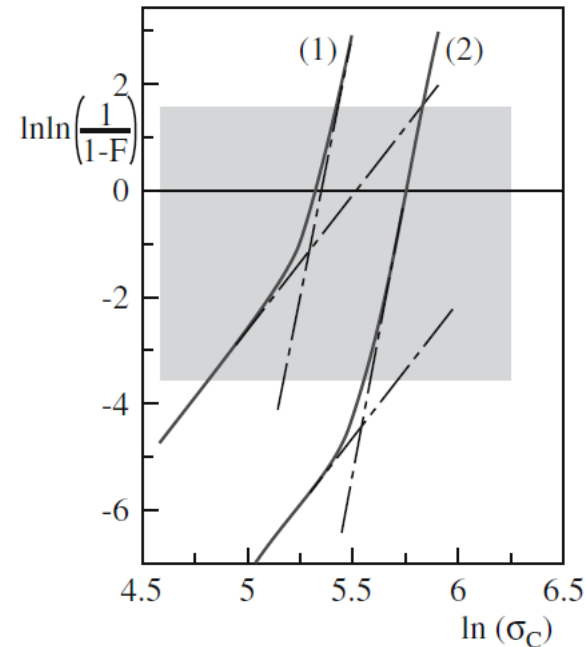
FIGURE 16.23 Fracture stress as a function of volume for Si_3N_4 springs.

Efeito de duas populações de defeitos

$$P_S = \exp \left[- \left(\frac{\sigma_c}{\sigma_1} \right)^{m_1} - \left(\frac{\sigma_c}{\sigma_2} \right)^{m_2} \right] \quad P_S = \exp \left[- \frac{V_{\text{eff1}}}{V_0} \left(\frac{\sigma_c}{\sigma_{v1}} \right)^{m_1} - \frac{V_{\text{eff2}}}{V_0} \left(\frac{\sigma_c}{\sigma_{v2}} \right)^{m_2} \right]$$



(A)



(B)

FIGURE 16.24 (a) Different flaws lead to different values of m . (b) Weibull plot for a sample having both surface and volume flaws.

Probabilidade de falha para alguns níveis de responsabilidade

TABLE 16.10 Suggested Failure Probabilities

P_F	<i>Possible consequences of failure</i>	<i>Example</i>
0.3	Slight inconvenience	Sticks of chalk
10^{-2}	Inconvenience and small expense	Ceramic cutting tool
10^{-6}	Injury	Window on a vacuum system
10^{-8}	Loss of life and significant expense	Ceramic protective tile on space shuttle

Proof testing: 100% dos componentes ensaiados em uma tensão máxima σ_{PT}

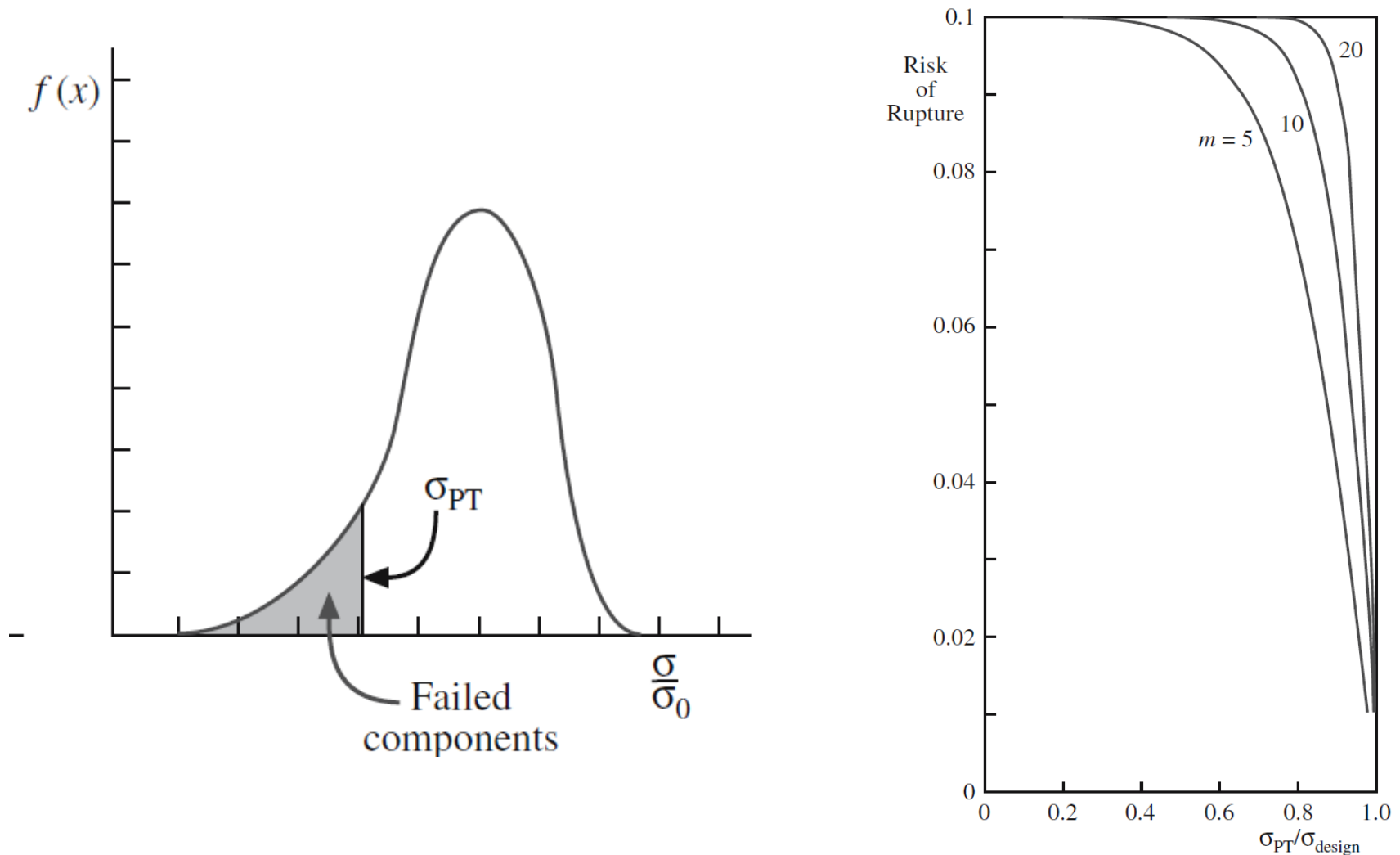


FIGURE 16.26 Plot showing the risk of rupture after proof testing to the ratio of proof-test stress to design stress.

Efeito do tempo

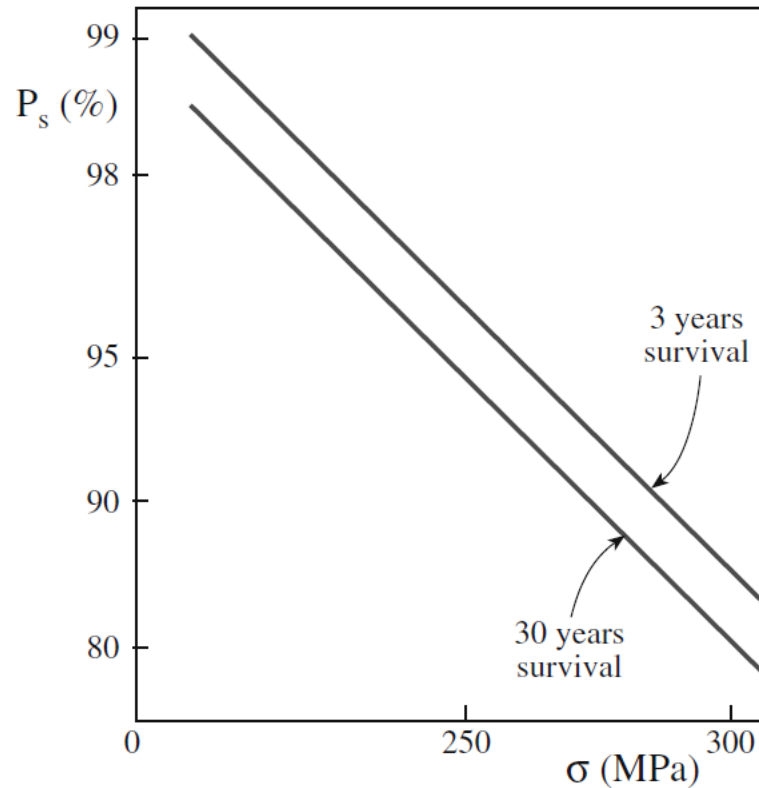
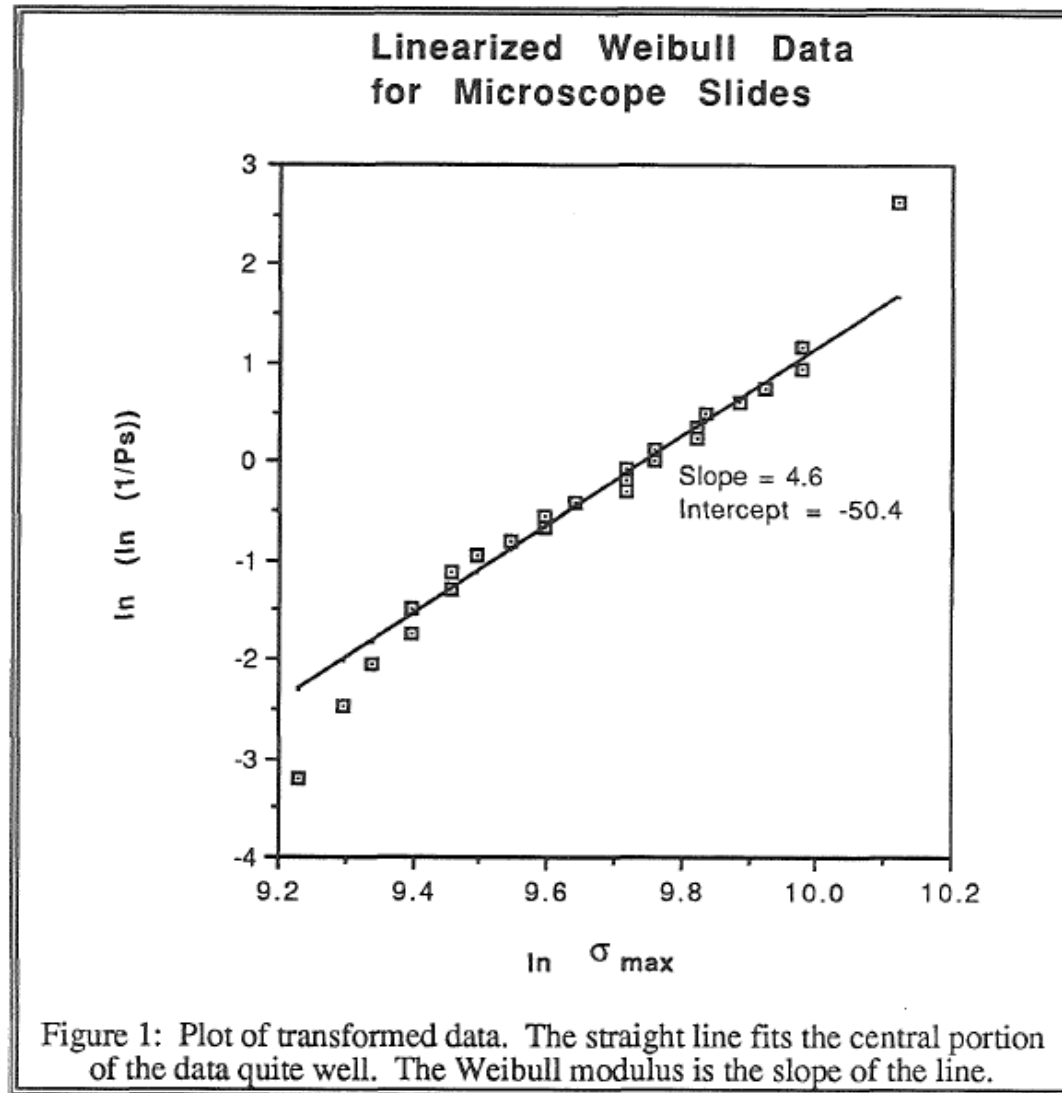
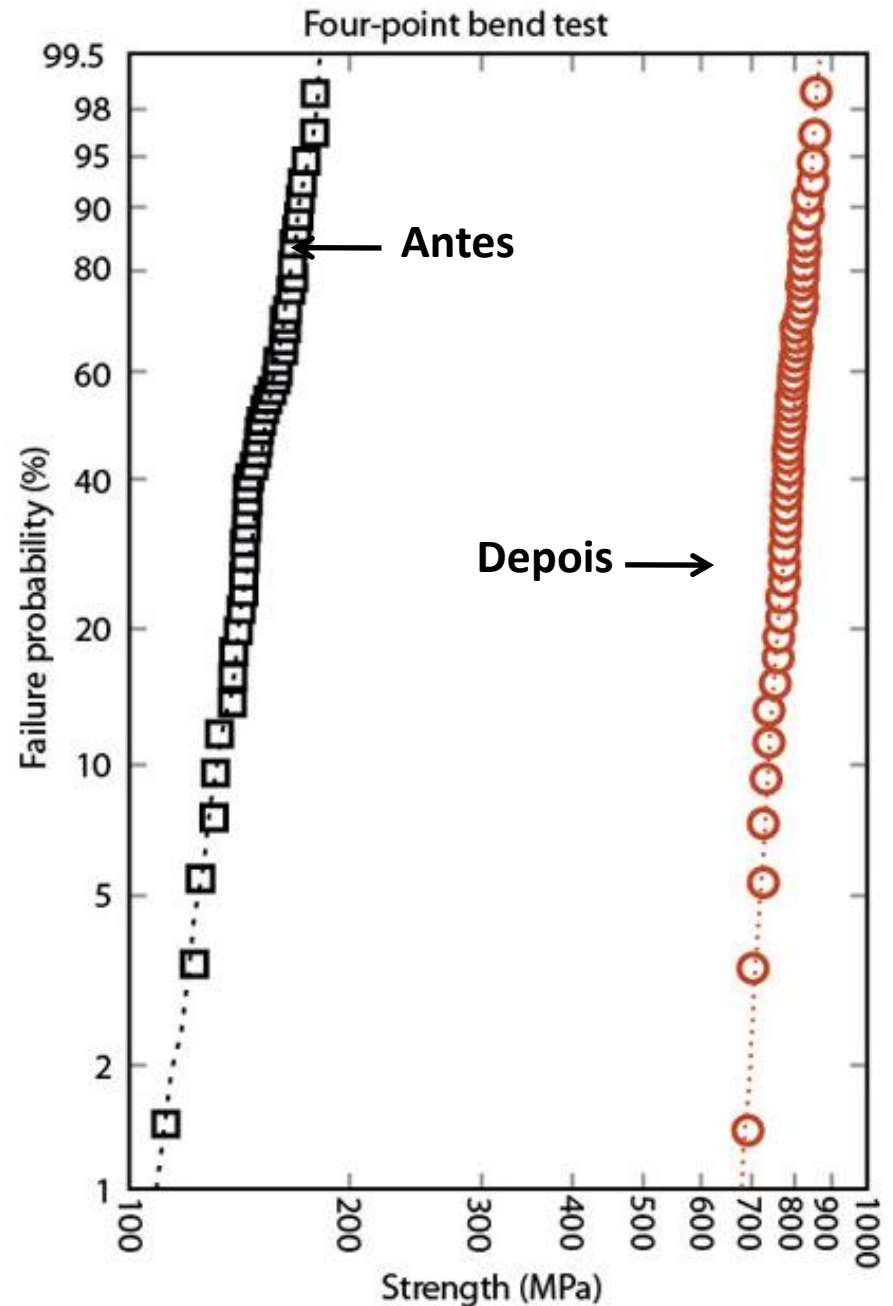


FIGURE 16.27 SPT diagram for medical grade Al_2O_3 . The survival probability decreases with increasing stress and longer times.

Gráfico de Weibull



- Vidro de janela
 - $T_g = 550^\circ\text{C}$
- Alumino-silicato de lítio
 - $T_g = 800^\circ\text{C}$
- Varshneya (SGT):
 - **650 MPa a 1 GPa**
 - **1 mm de espessura!**



Exercícios

- 16.6 For the data shown in Figure 16.20 determine the Weibull modulus.
- 16.7 The following data were obtained in a series of tensile strength tests on polycrystalline silicon carbide specimens (in MPa): 334, 289, 232, 294, 252, 337, 256, 339, 308, 365, 311, 341, 286, 314, 274, 285, 382, 379, 282, 324, 316. (a) Determine the Weibull modulus for these samples. (b) Would you expect the value of m for a set of steel specimens to be higher or lower than the value you calculated in part (a). Assuming that these SiC specimens were made by hot pressing, would you expect m for a series of SiC made by sintering to be higher or lower?