



CONCRETO ENDURECIDO

PCC 3222
2023

Revisão – Conteúdos da P1



<https://forms.gle/cPSZK7B4B7BcF7w4A>

Objetivos da aula

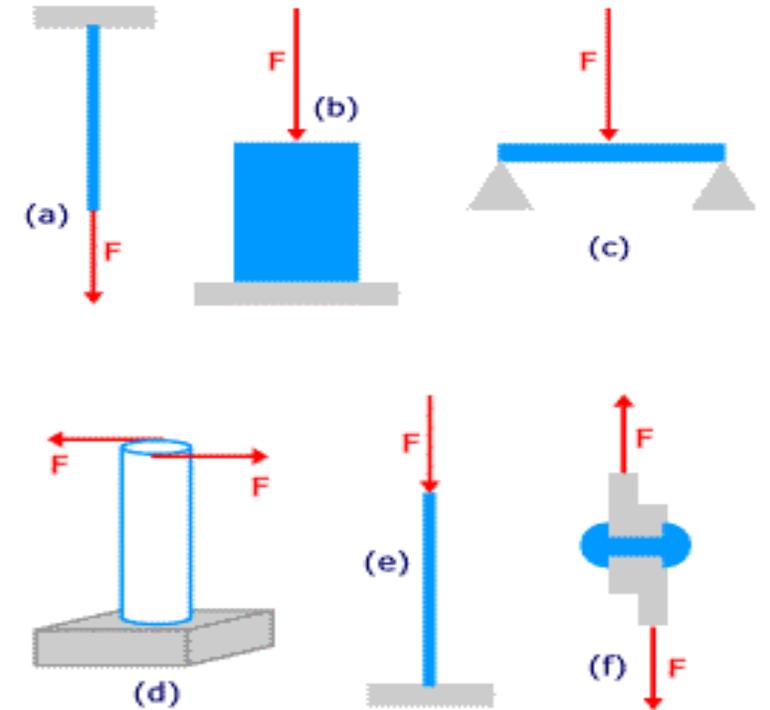
- Apresentar os fundamentos sobre o comportamento mecânico (resistência, módulo de elasticidade) do concreto, leis básicas do comportamento (efeito da porosidade, defeitos)
- Descrever os ensaios padronizados, e formas de relacionar com o comportamento efetivo da estrutura de concreto

Comportamento mecânico

- É a resposta obtida do concreto quando submetida a esforços mecânicos
 - Carga de ruptura
 - Fissuração
 - Deformação sob tensão
 - Instantânea
 - lenta (fluência)

• Tipos de esforços

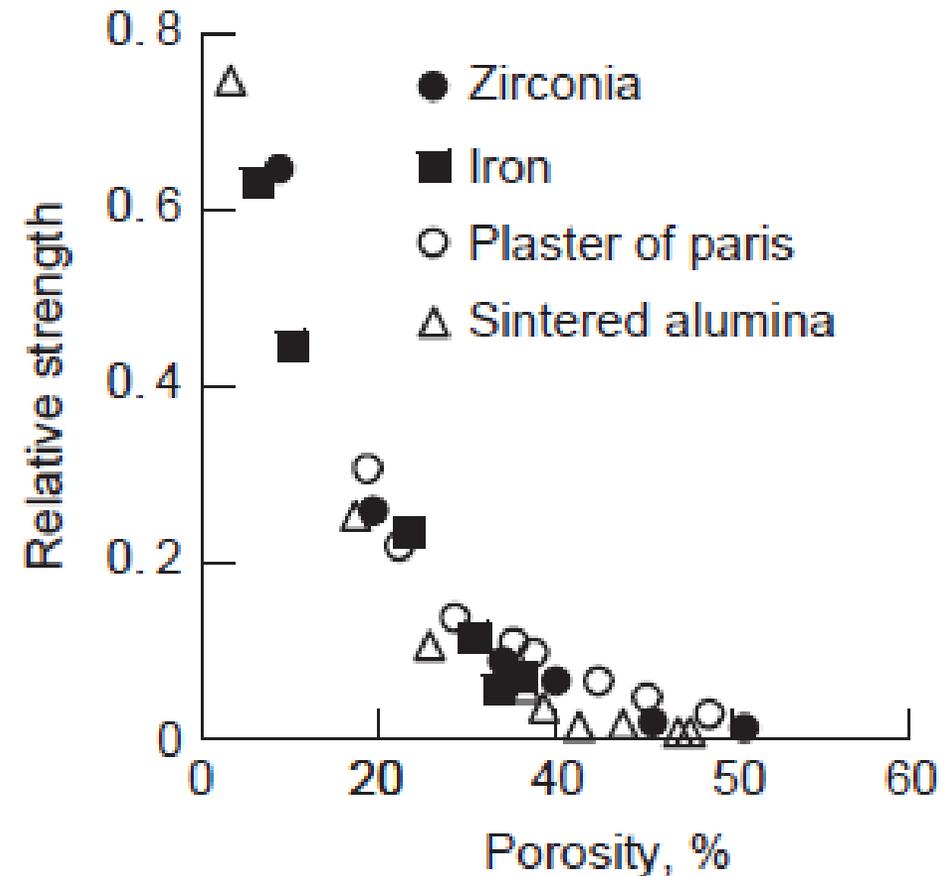
- Tração
- Compressão
- Flexão
- Torção
- Flambagem
- Cisalhamento



Concreto é um material cerâmico.
Mas é multifásico, com uma fase com mais poros

Defeitos governam a Resistência dos Materiais frágeis

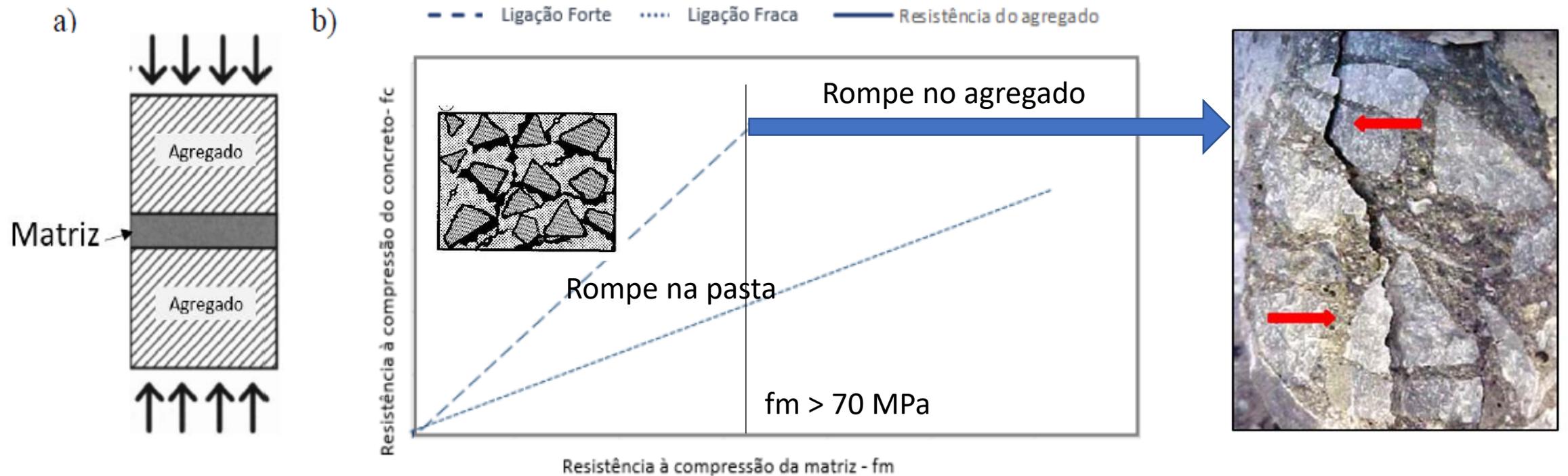
- Concentram tensões nos defeitos
- Dependem da porosidade
 - Volume
 - geometria



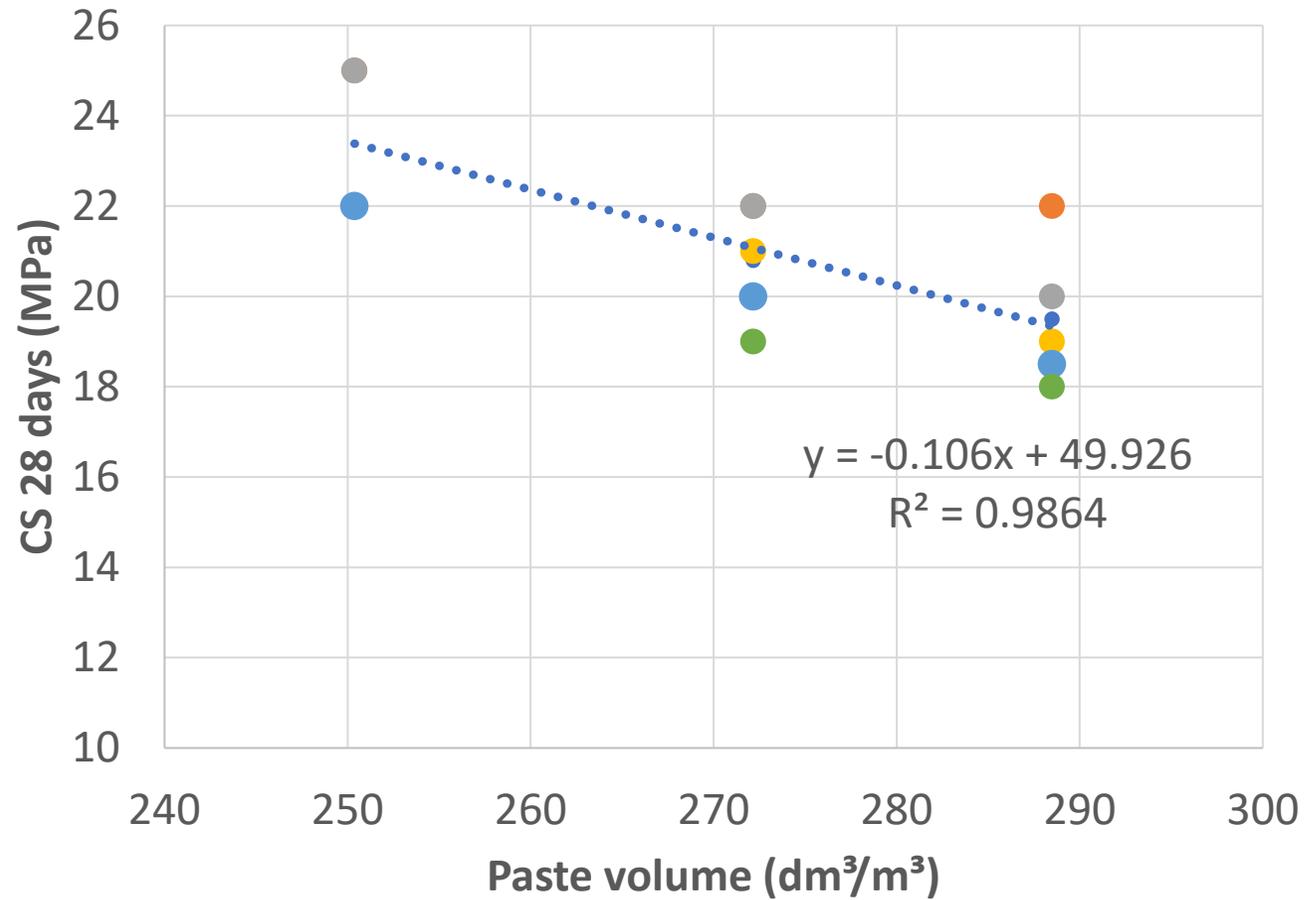
Fonte: Mehta, Kendall, Calister,

Resistência do Concreto: influência das fases

Resistência da pasta (matriz) governa a resistência do concreto com agregados naturais ótimos e resistência $< \sim 70$ MPa

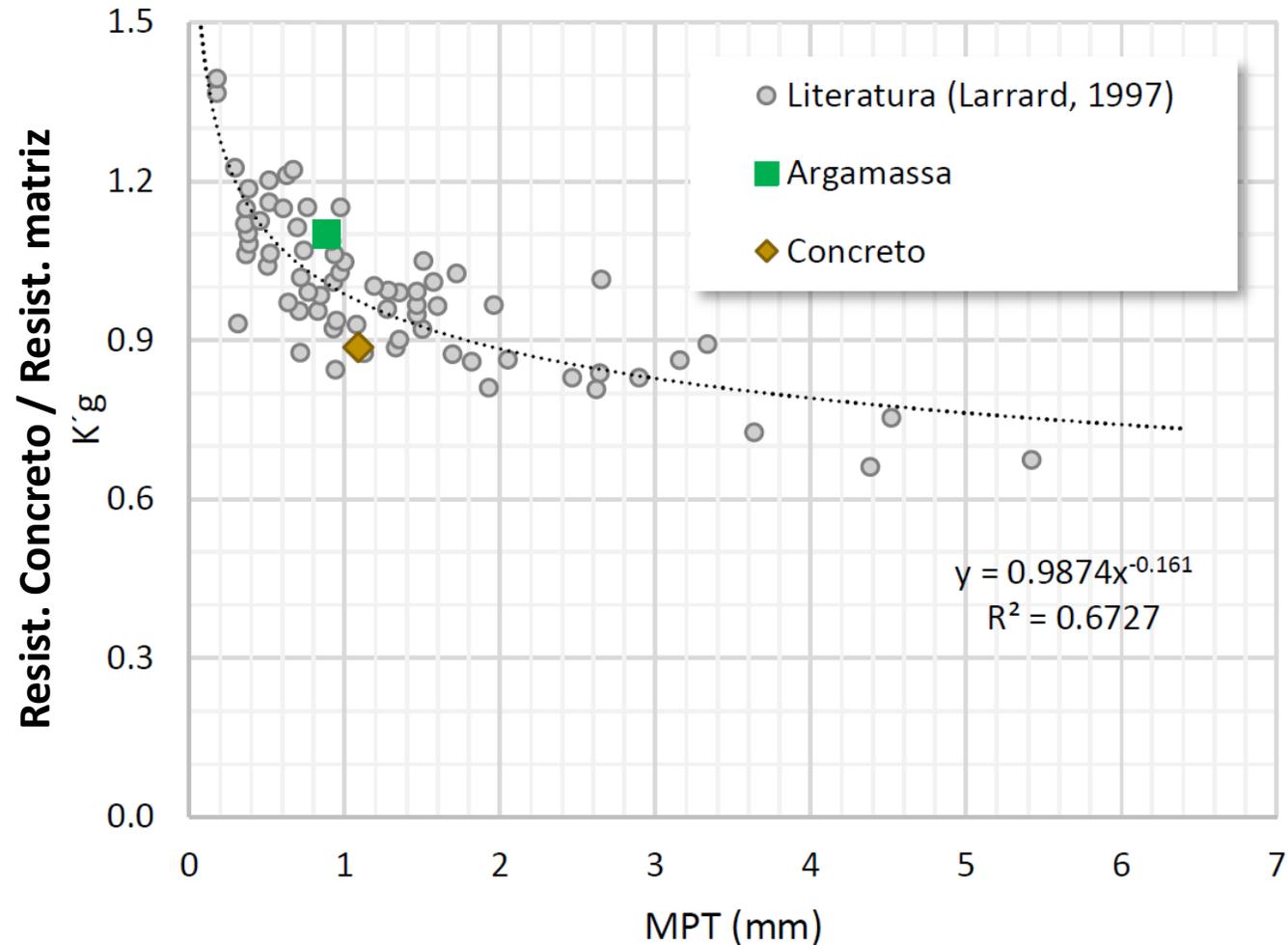


Efeito do volume de pasta



A partir de Metha e Monteiro

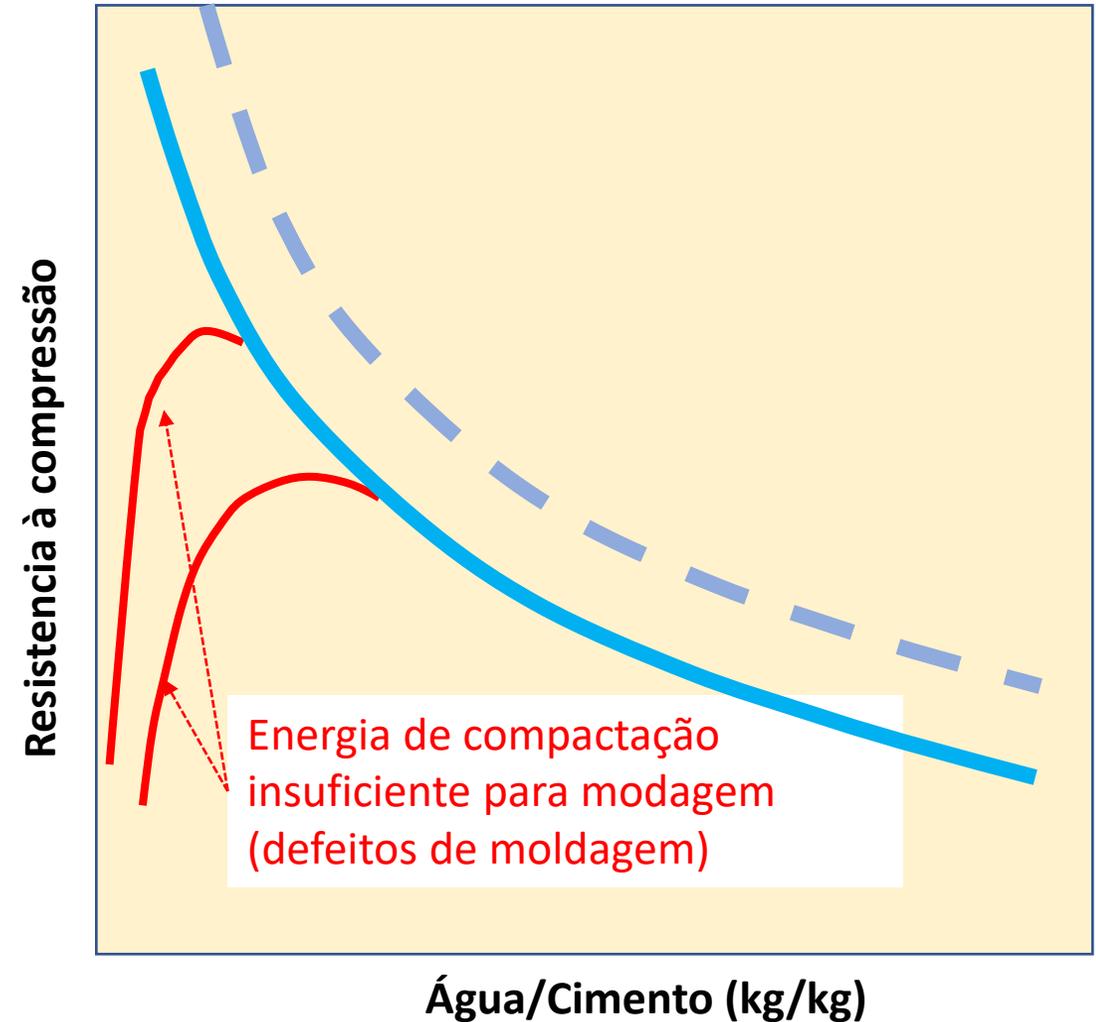
MPT (mean paste thickness) afeta a resistência do concreto



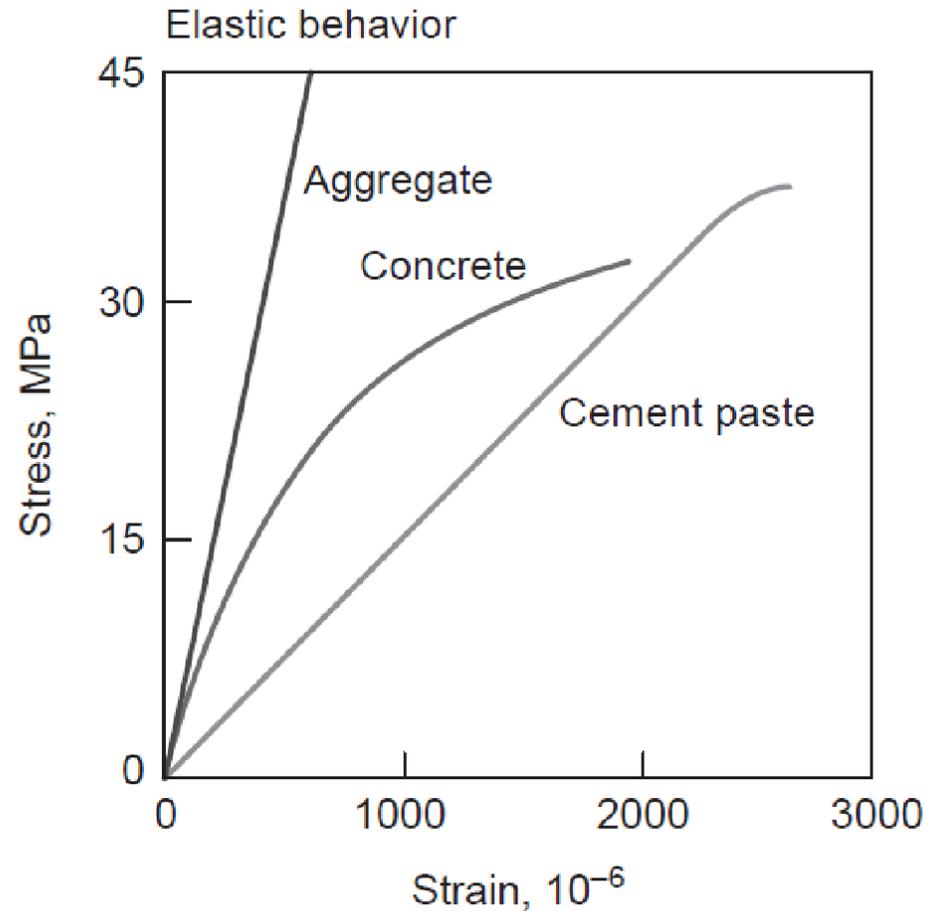
Mesmo tipo de agregado usado no concreto. Fonte: Tese Natalia V. Silva (USP)

Lei de Abrams : válida para os materiais ensaiados

- A **cada idade** resistência à compressão é inversamente proporcional ao aumento da relação água/cimento
- Hipóteses:
 - Pasta é a fase menos resistente e governa a resistência
 - Moldagem perfeita: defeito dominante é porosidade da pasta, resultado da água não combinada
 - Especifica para cada conjunto de materiais (cimento + agregados)
 - Reflete dosagem (volume de pasta....



Módulo elástico do concreto: a influência das fases



Fração volumétrica
de pasta

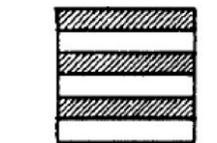
Fração volumétrica
de agregado

$$\frac{1}{E_c} = \frac{1 - V_a}{E_m} + \frac{V_a}{E_a}$$

Módulo do
concreto

Módulo da pasta
de cimento é
f(porosidade)

Módulo do
agregado



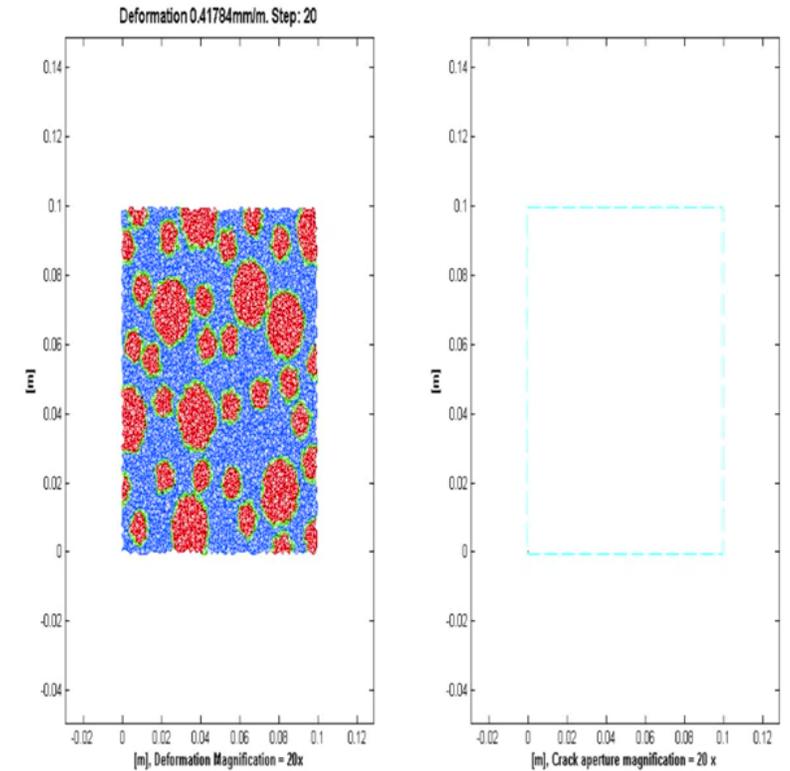
1 Series model
(uniform stress)

Mehta; Monteiro. Concreto, microestrutura, propriedades e materiais. 2006.

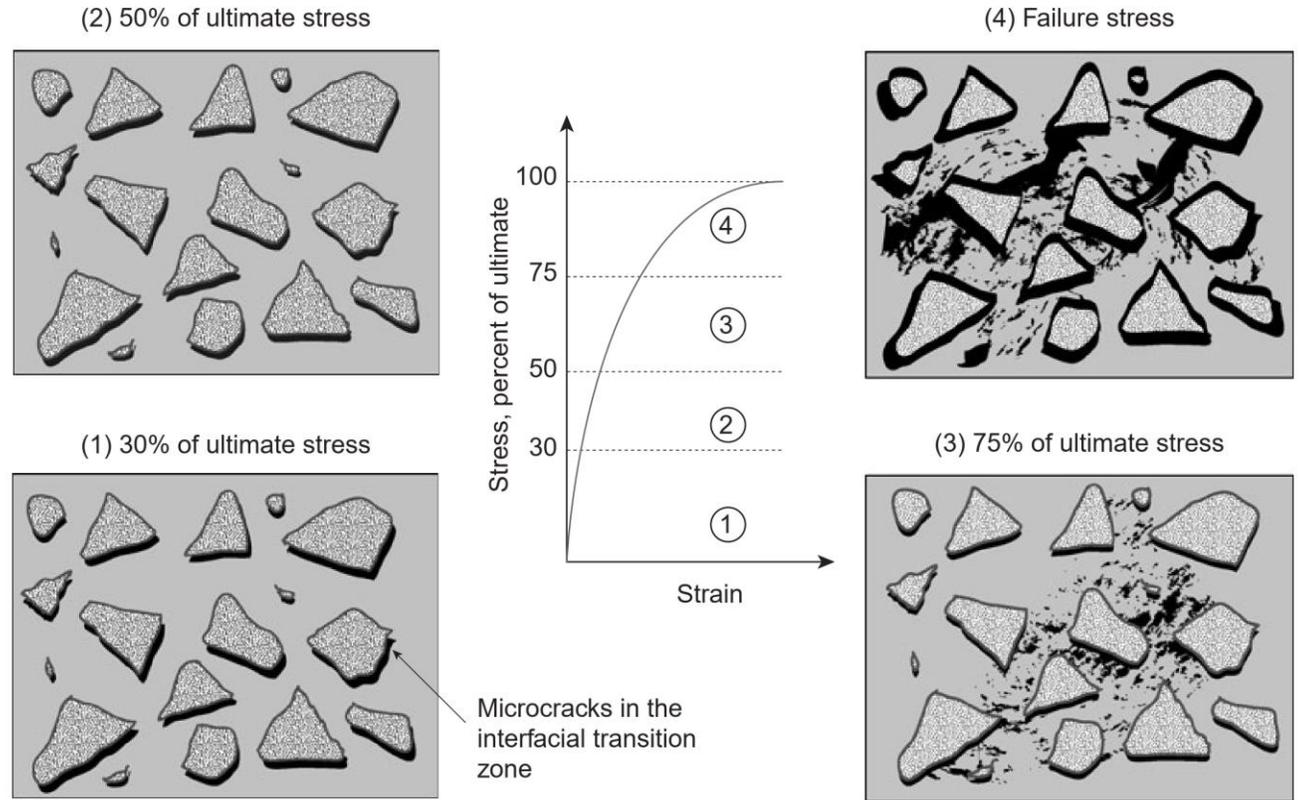
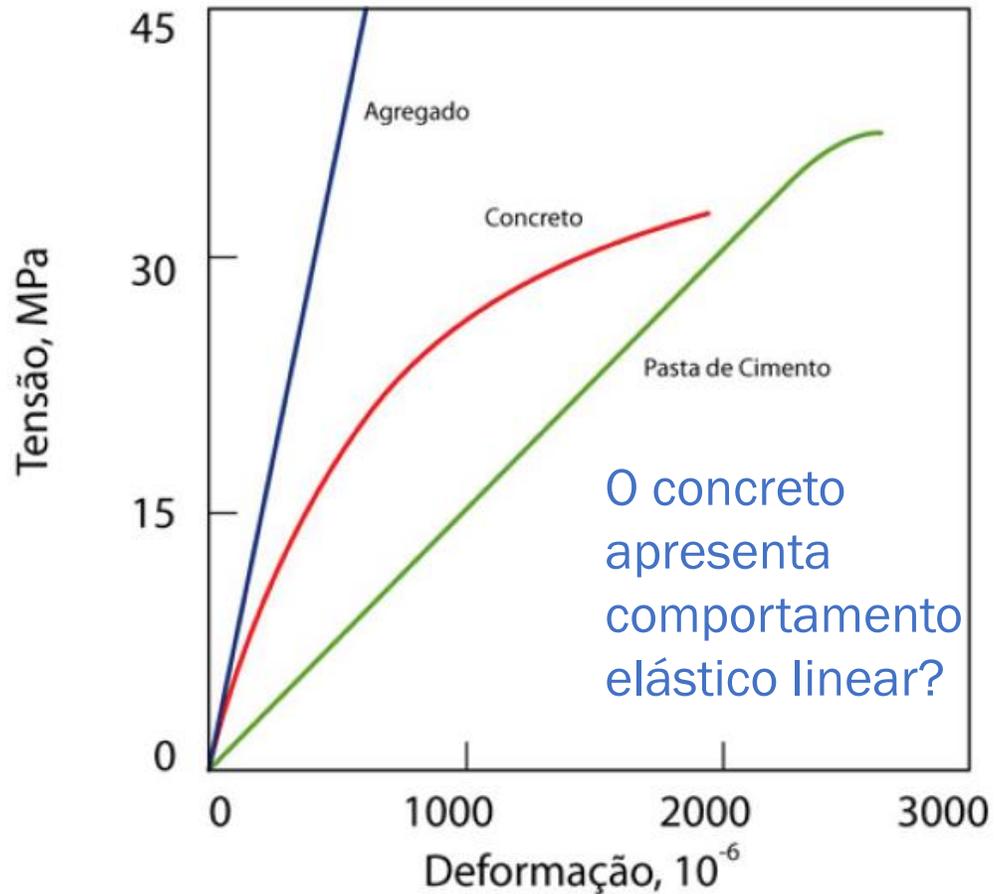
Mark Alexander; Mindess. Aggregates in Concrete. 2005.

Fraturamento do concreto na compressão

3

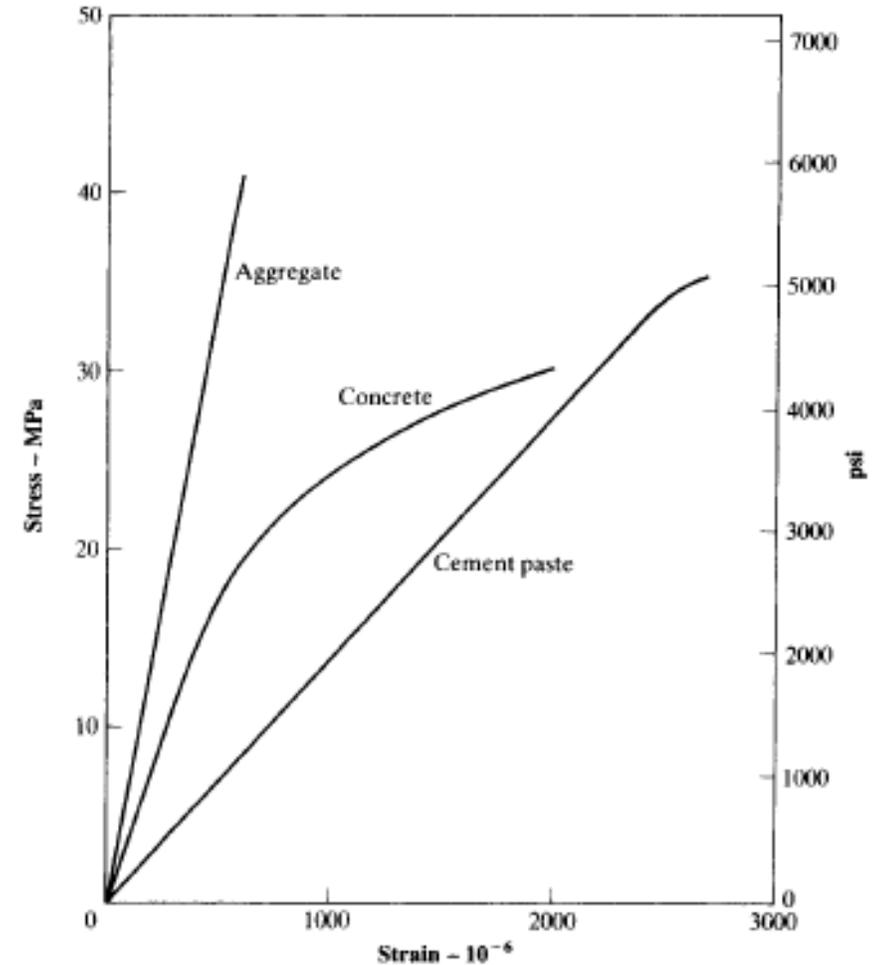


A elasticidade (não linear) do concreto.



Comportamento mecânico do concreto

- Fratura quase-frágil
 - pouca deformação plástica (residual)
- Módulo elástico não linear
 - Módulo de deformação
- Resist. à compressão $\sim 10x$ Resist. à tração



Fontes: Neville,

Exercício 1: Resistência à compressão

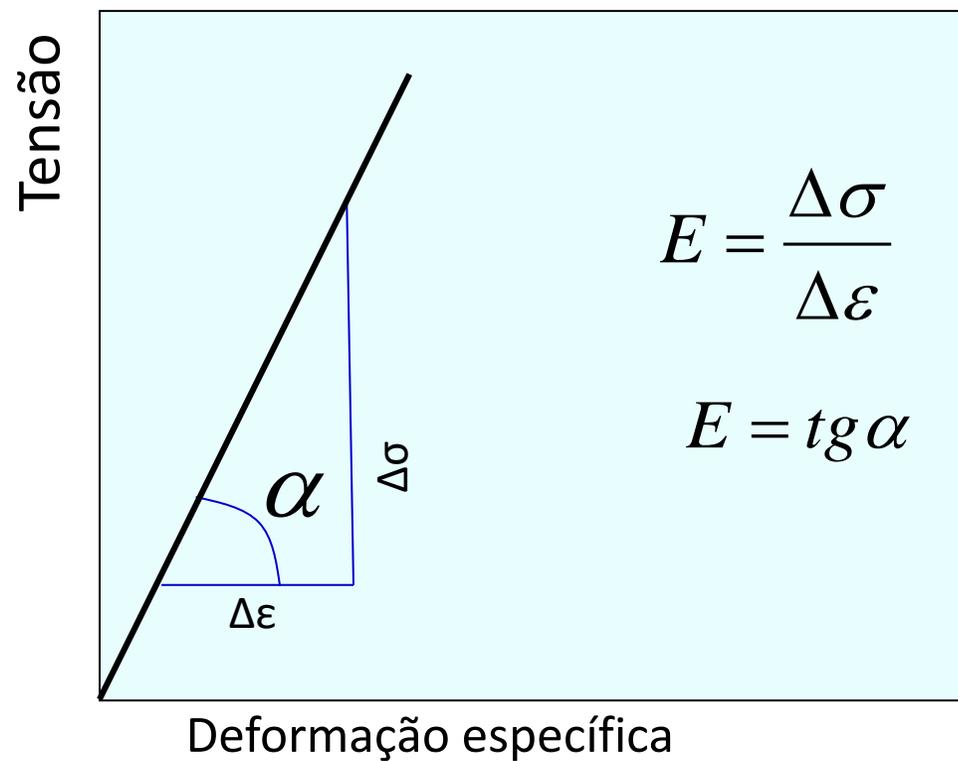
- Um corpo-de-prova cilíndrico de 10 cm de diâmetro é carregado a compressão atingindo uma carga máxima de 500.000 N. Calcule a resistência do material fornecendo o valor em MPa.

Exercício 1. Resistência à compressão

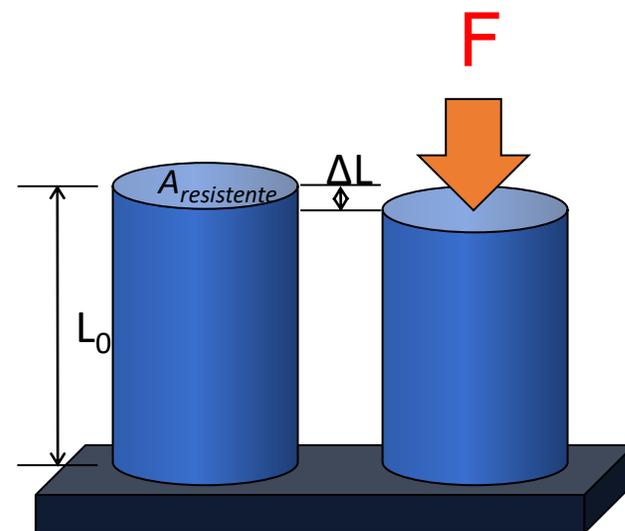
- Um corpo-de-prova cilíndrico de 10 cm de diâmetro é carregado á compressão atingindo uma carga máxima de 500.000 N. Calcule a resistência do material fornecendo o valor em MPa (N/mm²).

Força máxima	500.000 N
Área	7854 mm ²
Tensão	63,7 MPa (N/mm ²)

Módulo de elasticidade



$$\varepsilon(\text{mm/mm}) = \frac{\Delta L}{L_0}$$



Exercício 2. Módulo de Elasticidade

Um corpo-de-prova de 10 cm de diâmetro e 20 cm de altura, foi submetido ao ensaio de determinação do módulo de elasticidade. Quando carregado até 40% da carga máxima medida anteriormente (500.000 N) o extensômetro de base inicial de 100mm mediu uma deformação de 0,07 mm com um extensômetro com base inicial de medida de 100mm. Estime o módulo de elasticidade desse concreto (GPa).

Resolução Exercício 2

- Área = $\pi \cdot 10^2 / 4 = 78,54 \text{ cm}^2 = 7854 \text{ mm}^2$
- Carga = $0,40 \times 500.000 \text{ N} = 200.000 \text{ N}$
- Tensão = $200.000 \text{ N} \div 7854 \text{ mm}^2 = 25,4 \text{ MPa}$

- Deformação específica = $0,07 \div 100 = 0,0007 \text{ mm/mm}$
- Módulo de elasticidade = $25,4 \div 0,0007 = 36.268 \text{ MPa}$
- **Módulo de elasticidade = 36,3 GPa**

Exercício 3

- Dados os resultados obtidos no estudo de dosagem ao lado defina qual é a relação a/c que fornecerá um concreto com resistência média de 40 MPa

a/c	fc (MPa)
0,38	55
0,42	47
0,49	38
0,57	30

- Por interpolação, aproximadamente 0,47

Resolução exercício 3 – por interpolação

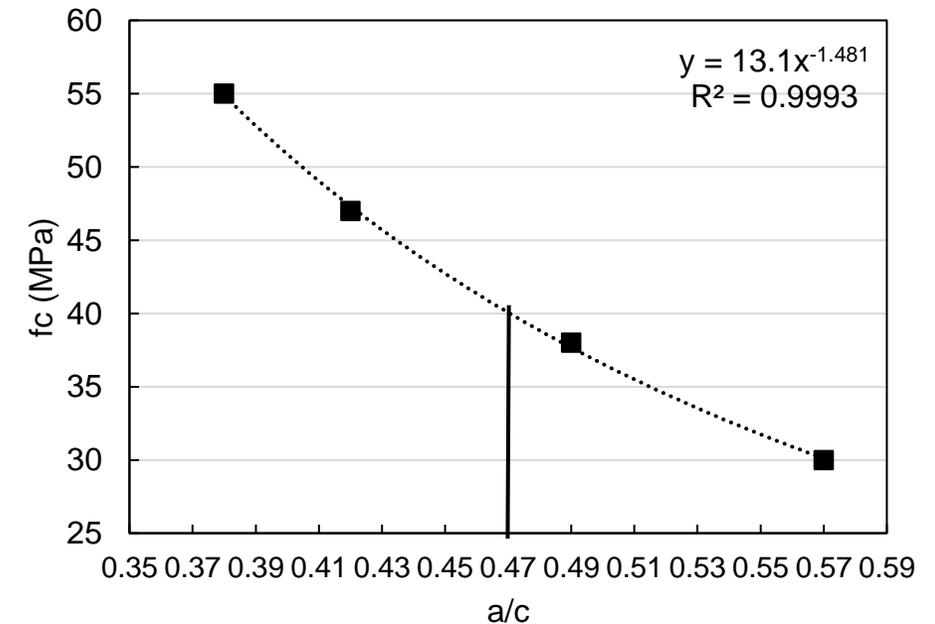
- $Y_2 = 0,42$
- $Y_1 = 0,49$
- $Y = ?$
- $X_2 = 47$
- $X_1 = 38$
- $X = 40$

$$\frac{y - y_1}{y_2 - y_1} = \frac{x - x_1}{x_2 - x_1}$$

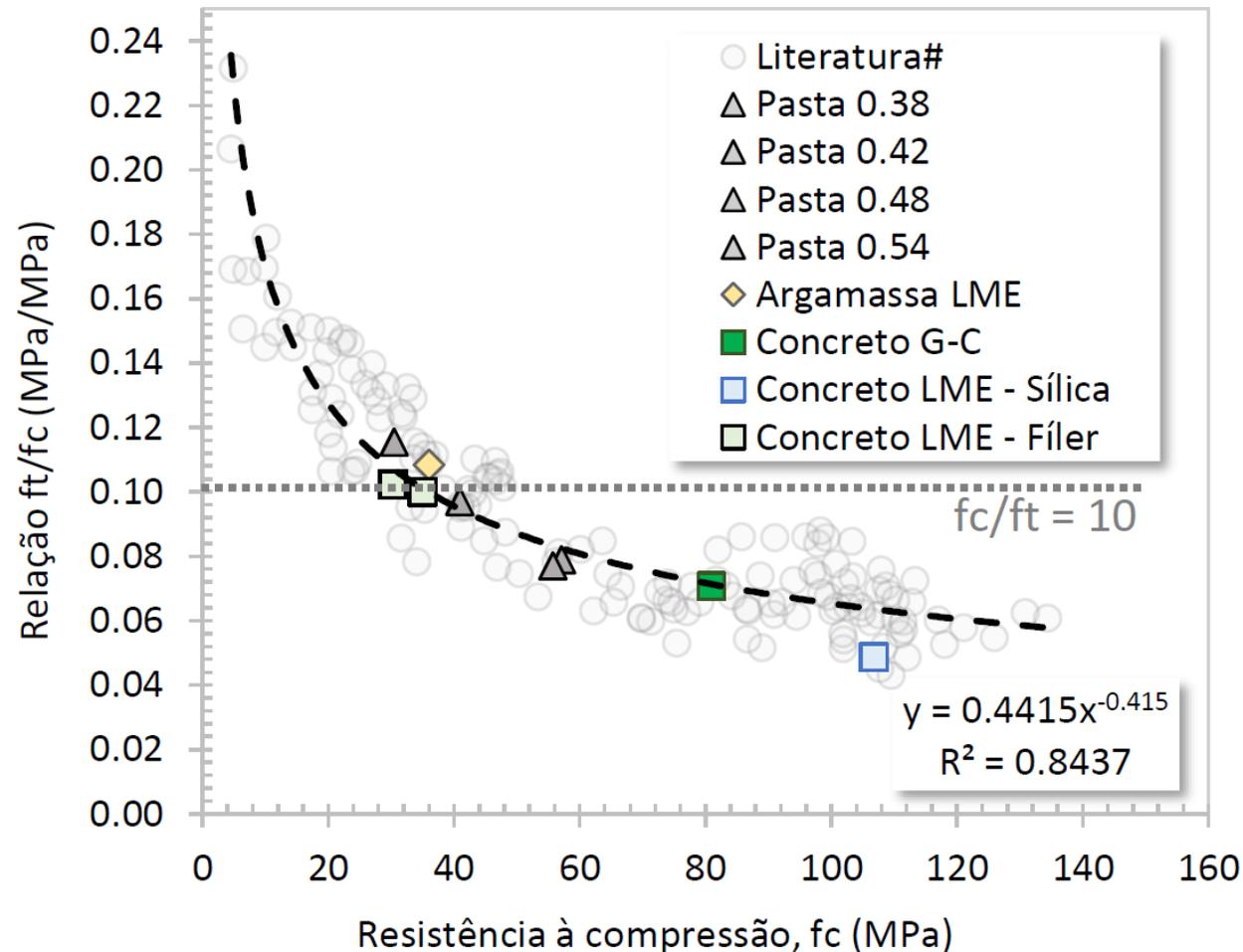
$$\frac{y - 0,49}{0,42 - 0,49} = \frac{40 - 38}{47 - 38}$$

$$y = 0,49 + \left[\left(\frac{40 - 38}{47 - 38} \right) (0,42 - 0,49) \right]$$

$$y = 0,47$$

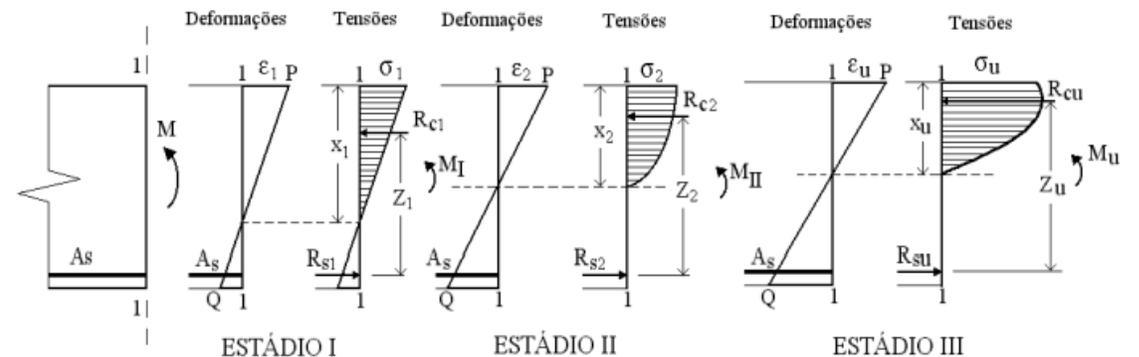
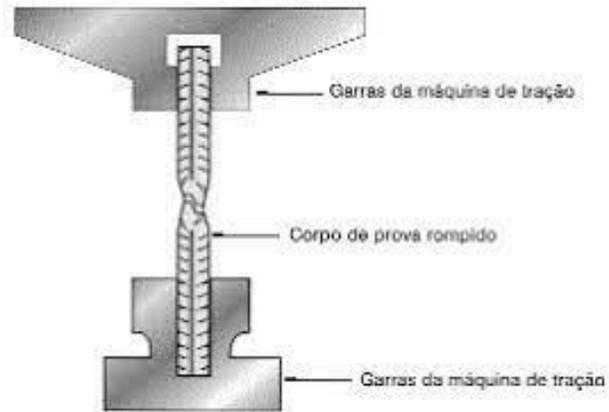


Resist. tração / compressão: é afetada pela resistência do concreto.



Peças estruturais de concreto armado

- São parametrizadas pelas propriedades mecânicas dos materiais (concreto à compressão, aço à tração)



Ensaaios normalizados

Módulo de elasticidade do concreto

Metrologia depende muito do equipamento.
Exige medir deformações com precisão de 1/1000mm

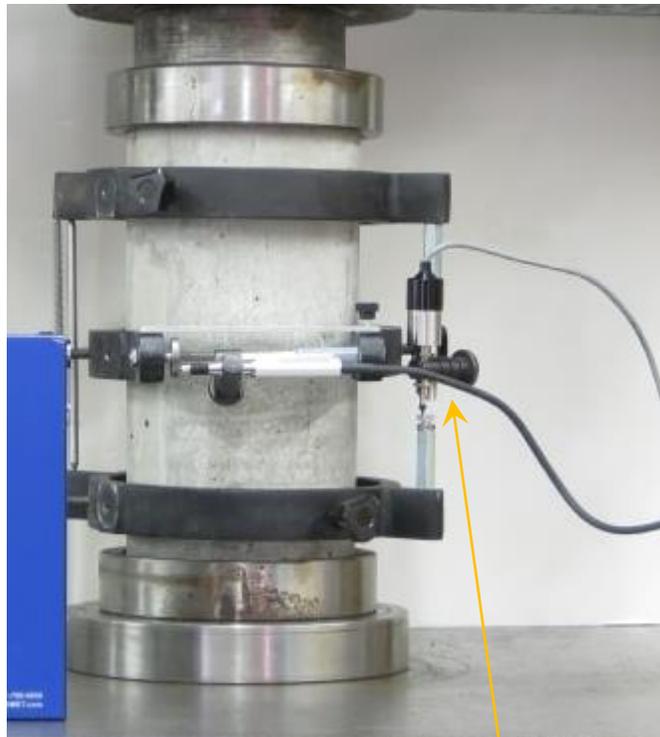


Relógio comparador

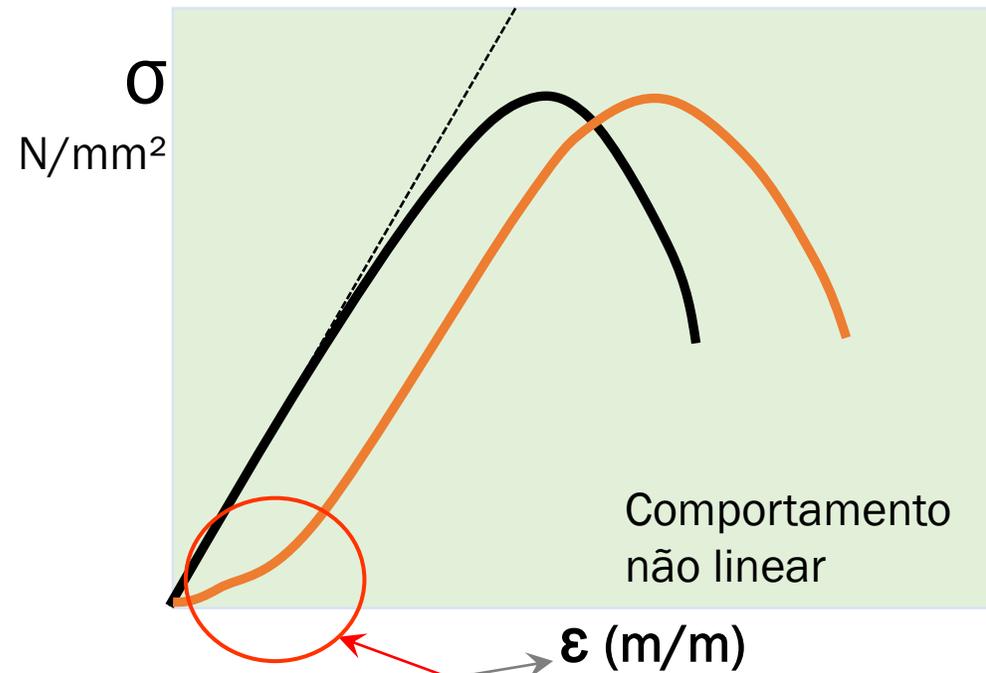


Clip gage

Medida da curva Tensão x deformação

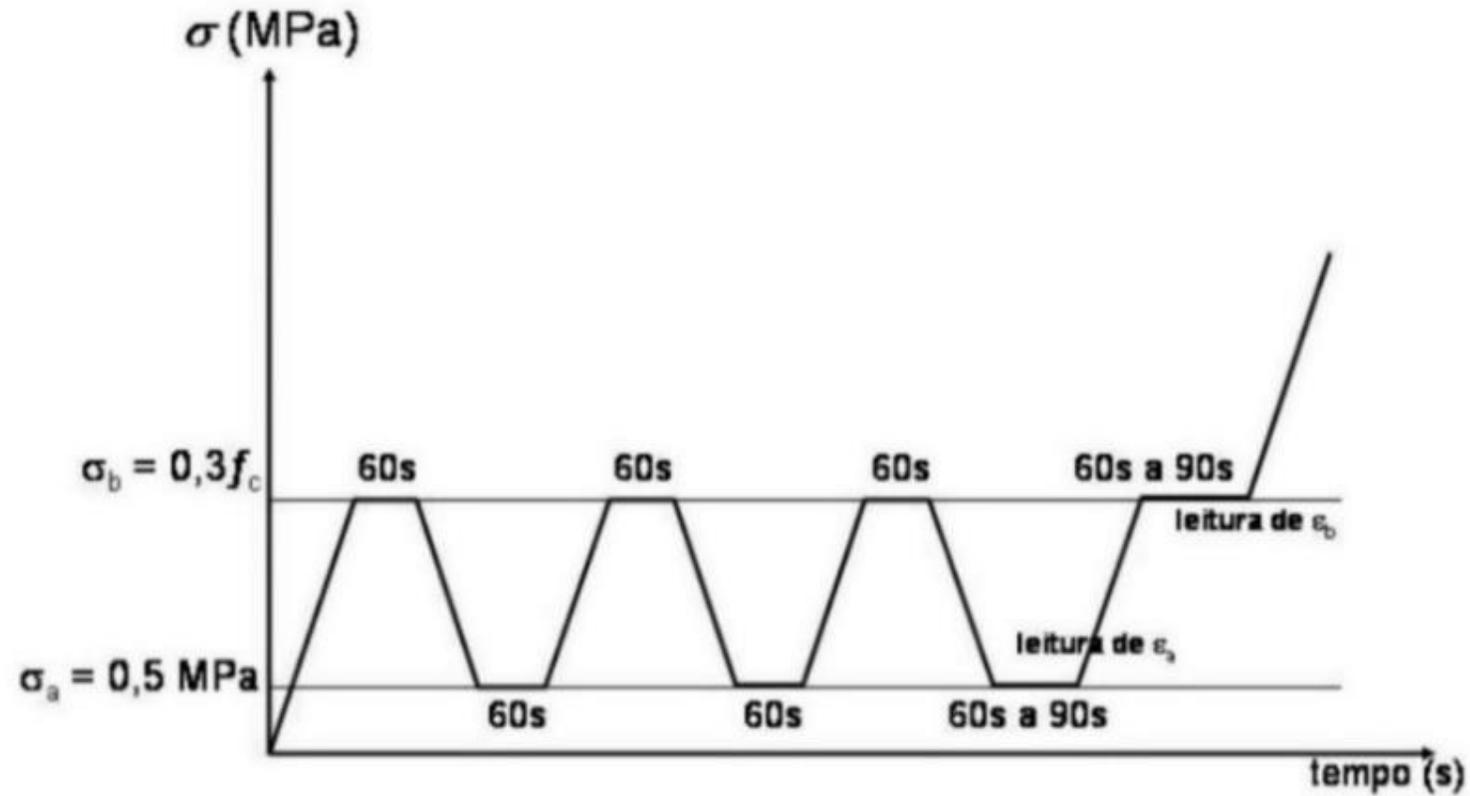


extensômetros fixos no
concreto



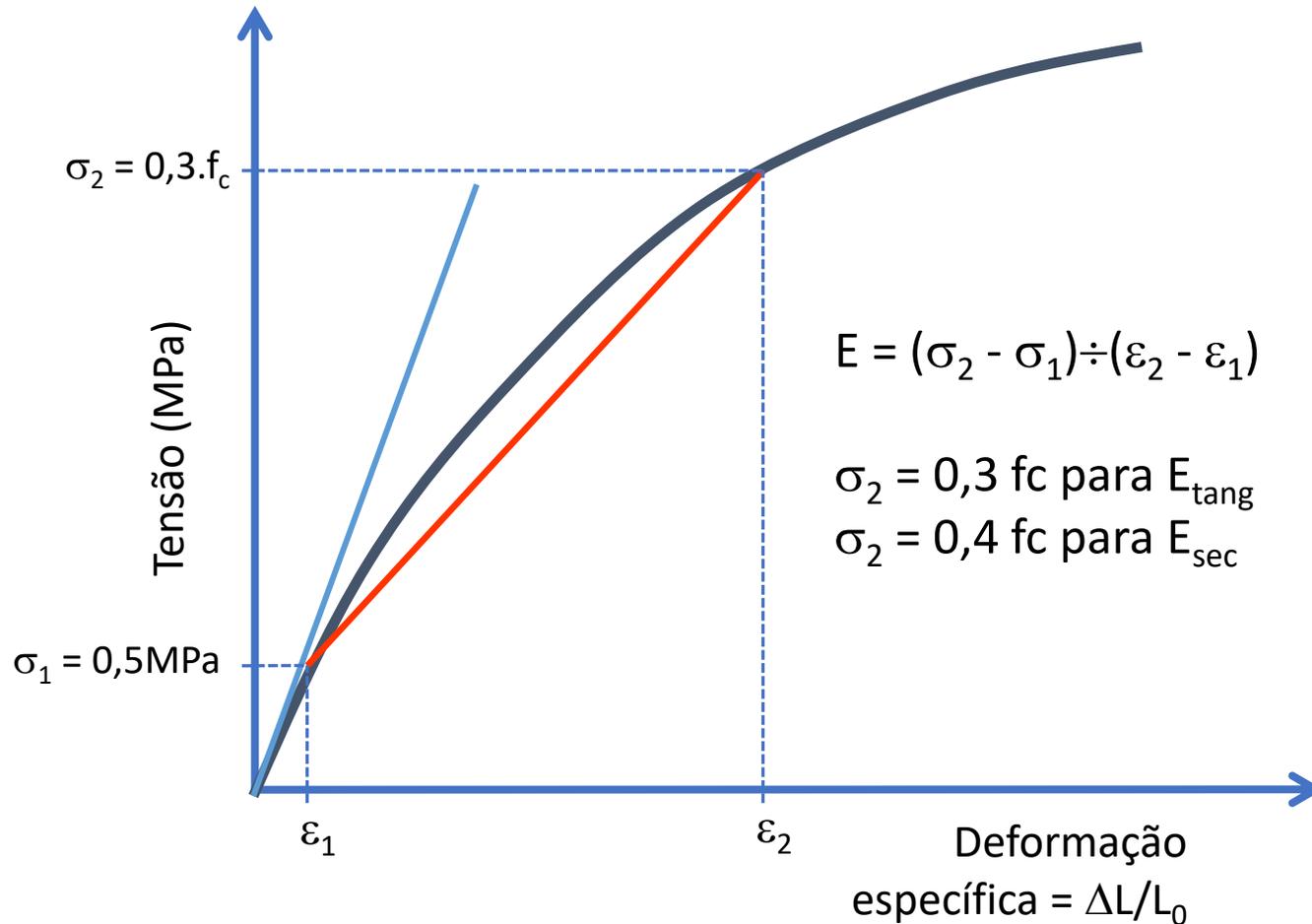
erro p/acomodação
de extensômetro

Ciclos de carga da NBR 8522 2021



resposta

Módulo de Elasticidade NBR 8522 (2021)



Resistência à compressão do concreto: ensaio normalizado

- Moldagem e cura (**NBR 5738**)
- Ensaio **NBR 5739**
- Corpos-de-prova cilíndricos:
 - $\Phi 15\text{cm} \times 30\text{cm}$
 - $\Phi 10 \times 20 \text{ cm}$;
 - Proporção $h/d = 2$
- Adensamento padronizado
 - manual
 - Mecânico (vibrador)
- Desforma com 24 h
- Cura por n dias
 - câmara úmida ($T 23 \pm 2^\circ\text{C}$ e $UR > 95\% \pm 5\%$)
 - Imersão em água saturada Ca(OH)_2 23°C
- Acabamento superficial
- Ruptura cp úmido
 - Carregamento com velocidade controlada

As condições de realização do ensaio devem ser padronizadas.

Corpo de prova e a resistência à compressão



Corpo de prova padrão Mercosul/Europeu

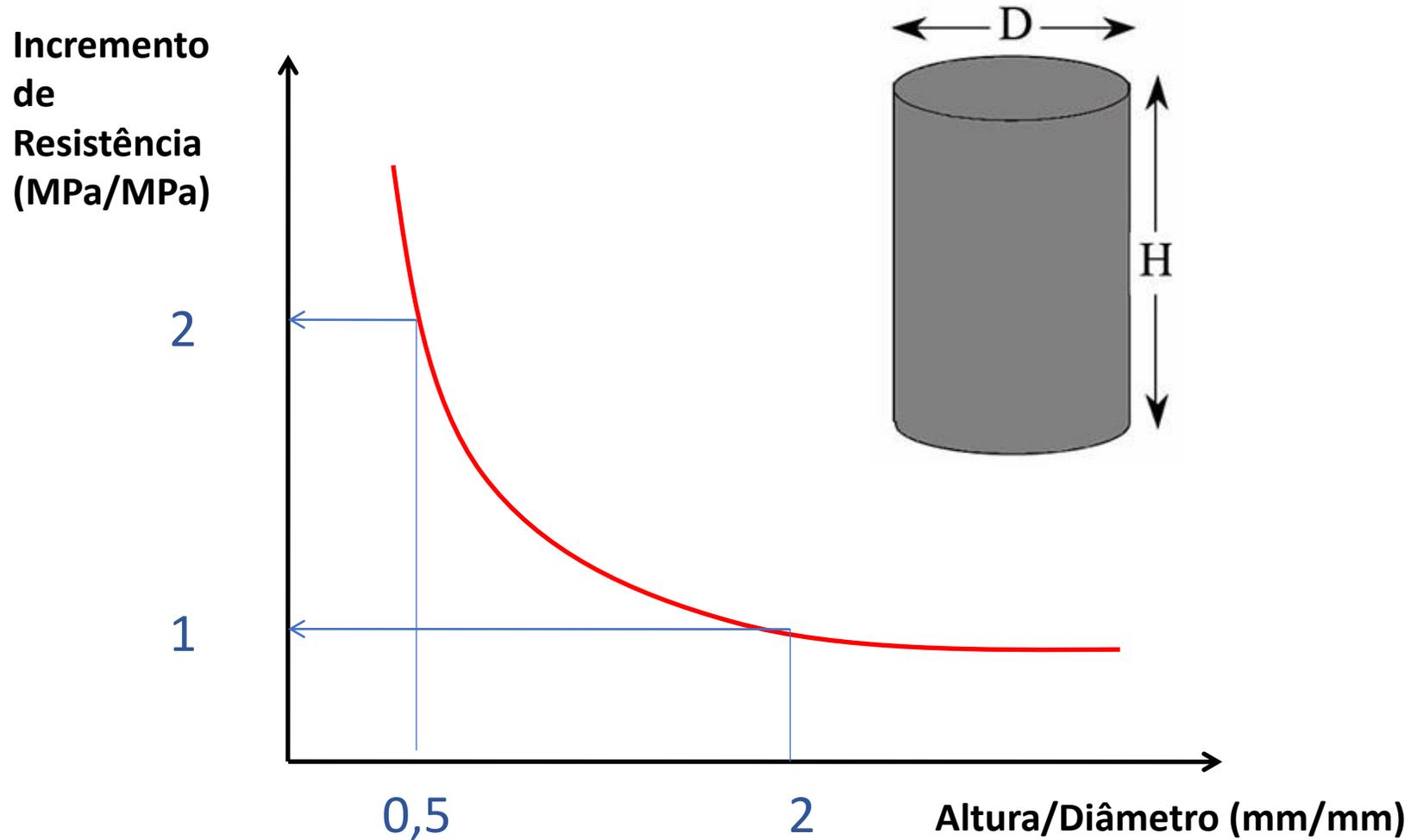


Corpo de prova padrão Brasil

$$f_{C_{cubo}} \approx 1,2 \times f_{C_{cilindro}}$$

<http://buildingresearch.com.np/services/mt/mt1.php>

Relação altura/diâmetro do corpo de prova



Variação da velocidade de carregamento

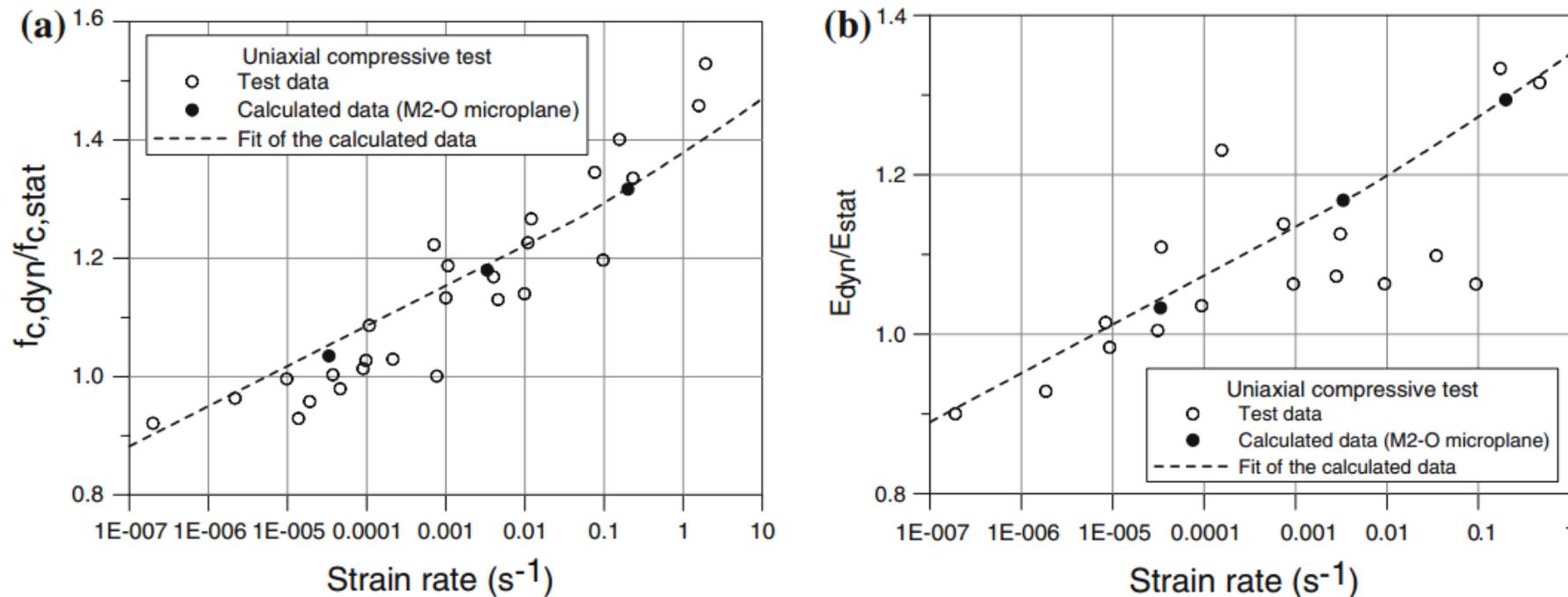


Figure 2. Uniaxial compressive test: (a) rate-dependent compressive strength – test data and model prediction and (b) rate dependent initial Young's modulus – test data and model prediction.

Baixa velocidade de carregamento

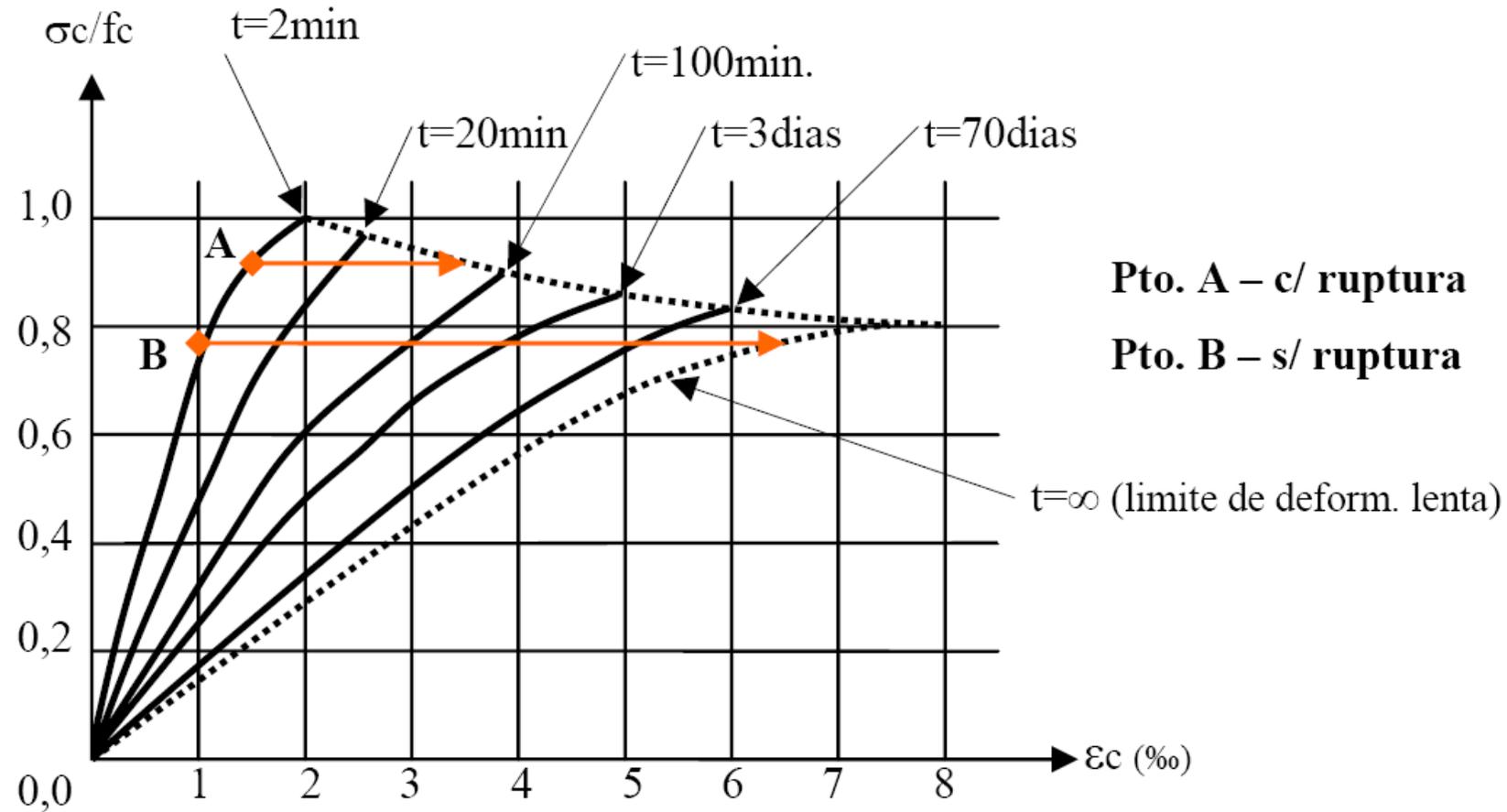
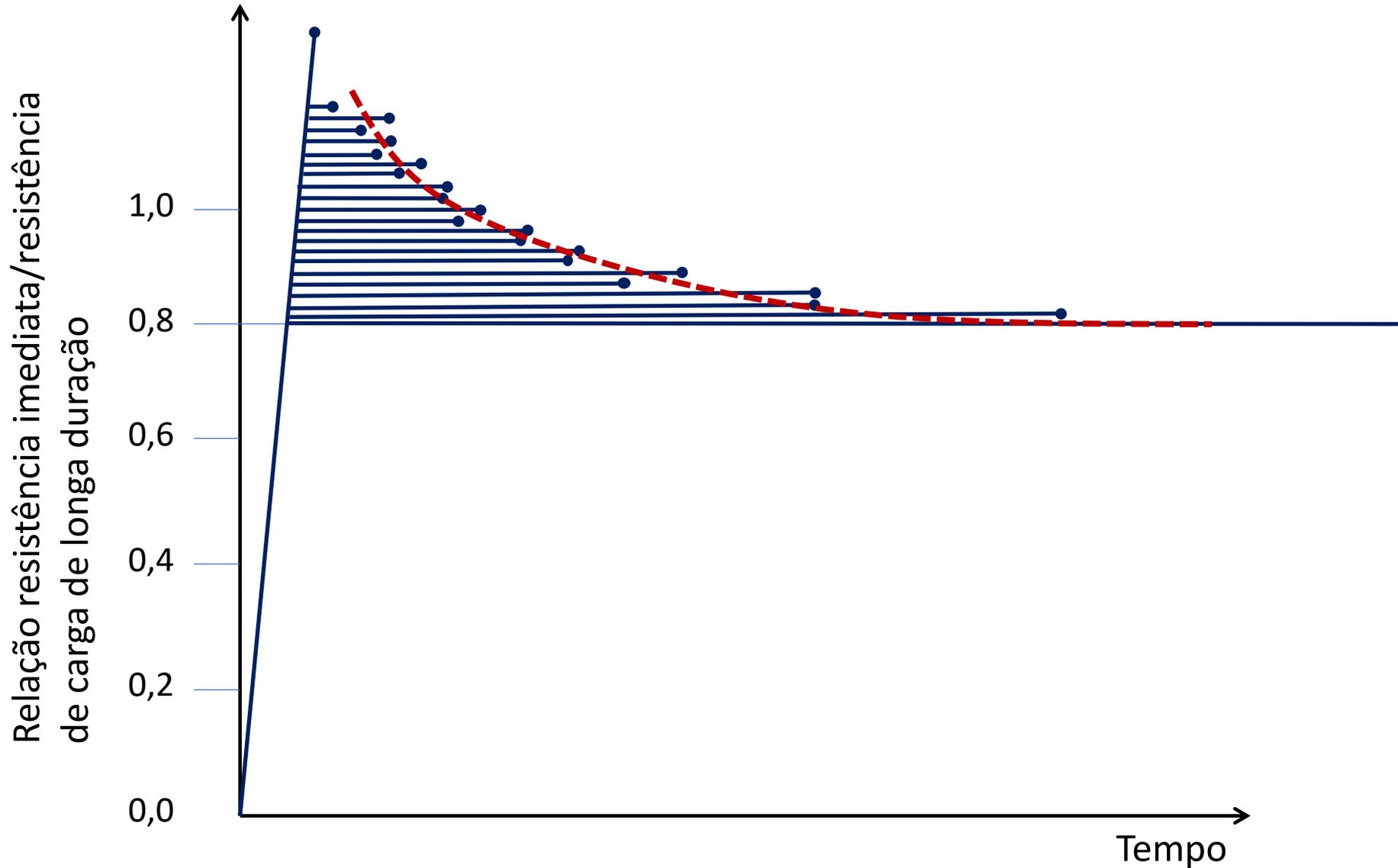


Figura 9 – Velocidade de carregamento do concreto

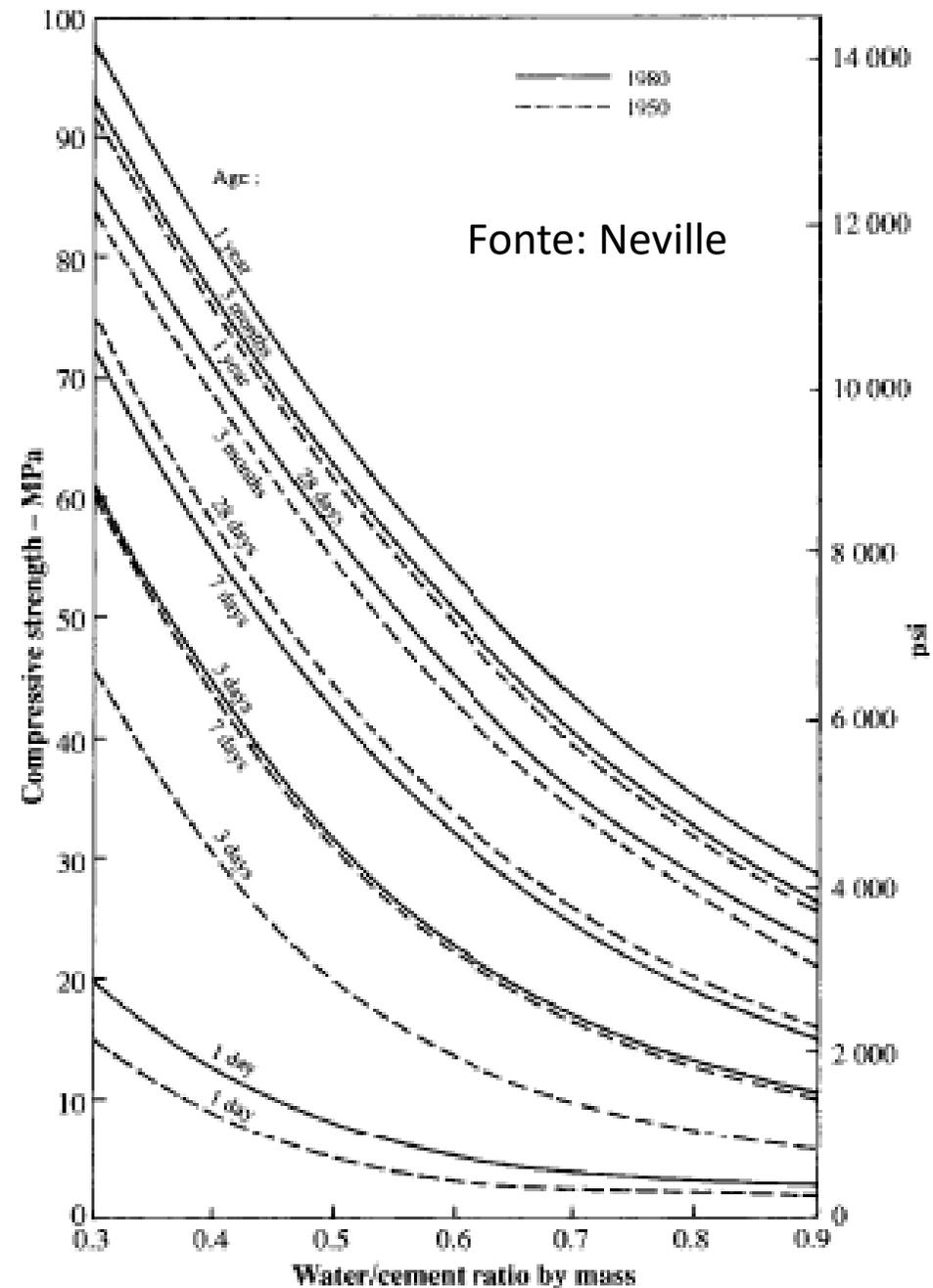
Dinâmica do efeito Rüsçh

(fadiga estática ou ruptura por carga mantida)



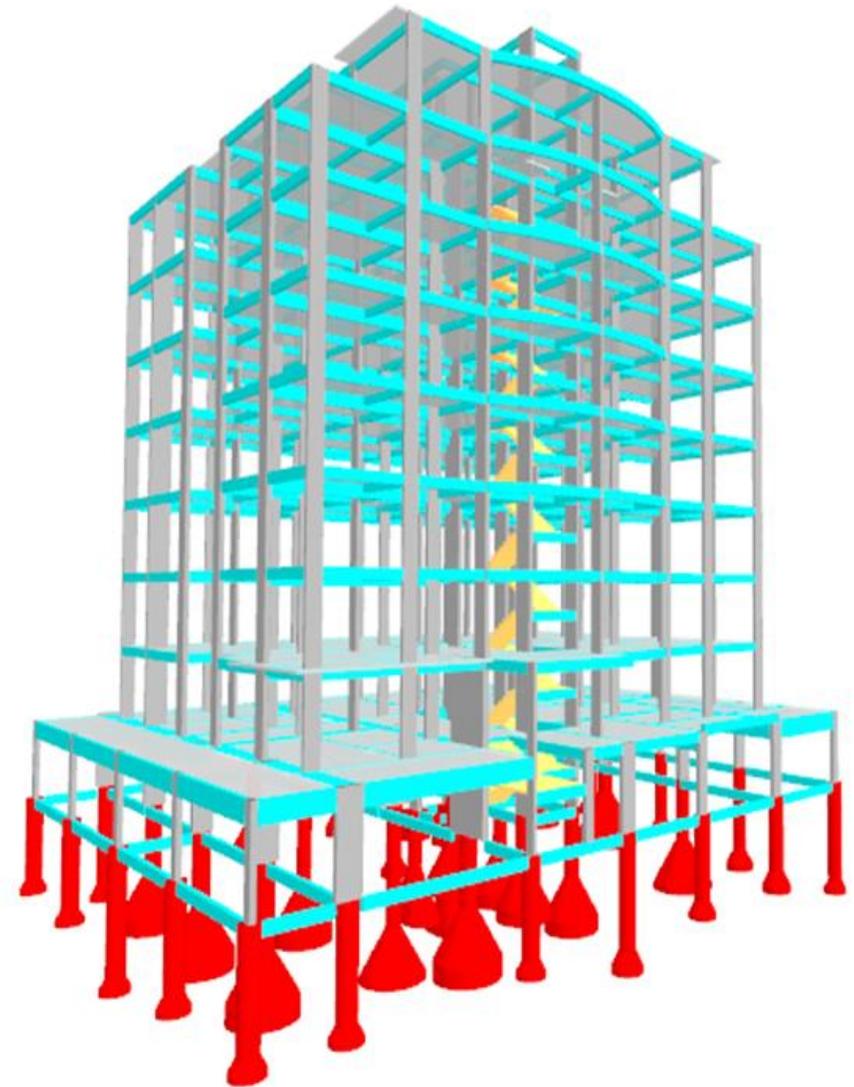
Efeito da idade do concreto

- Para o mesmo tipo e volume de agregado, a **relação água/cimento** (em massa) e a **idade** definem a porosidade e a resistência do concreto.

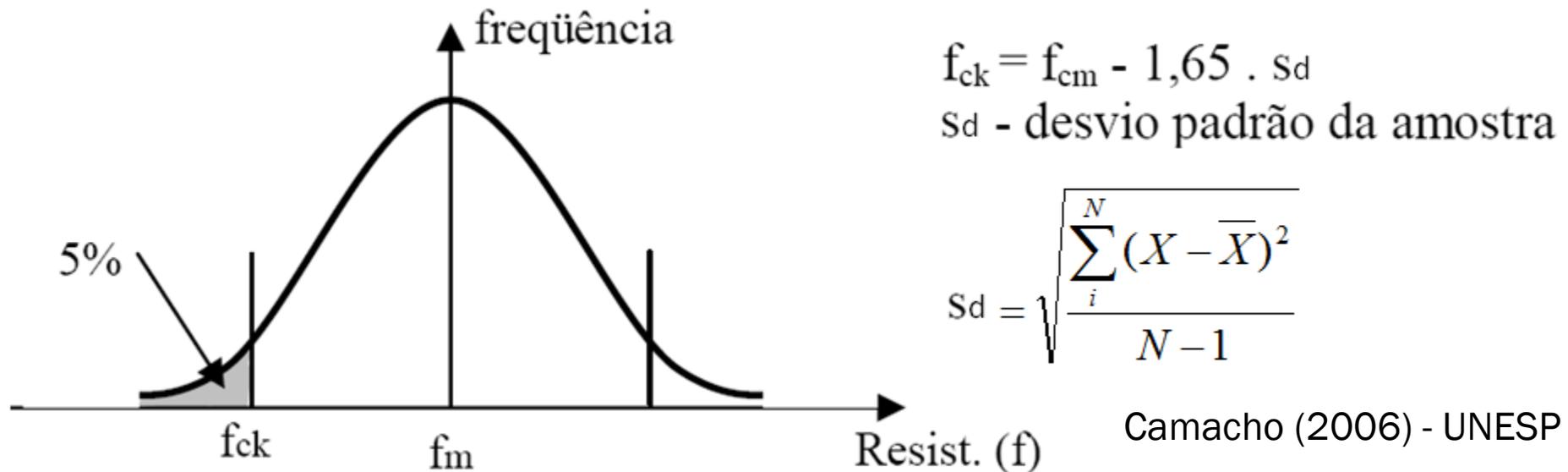


A resistência do concreto é variável

- Há uma variabilidade naturalmente esperada para a resistência do concreto
- Vários fatores interferem:
 - Variação da relação a/c (Exemplo: erros de pesagem)
 - Defeitos (Exemplo: falhas de compactação)
 - Variabilidade das matérias primas
- Deve-se controlar o nível de variação para garantir a segurança da estrutura (a corrente rompe no elo mais fraco).

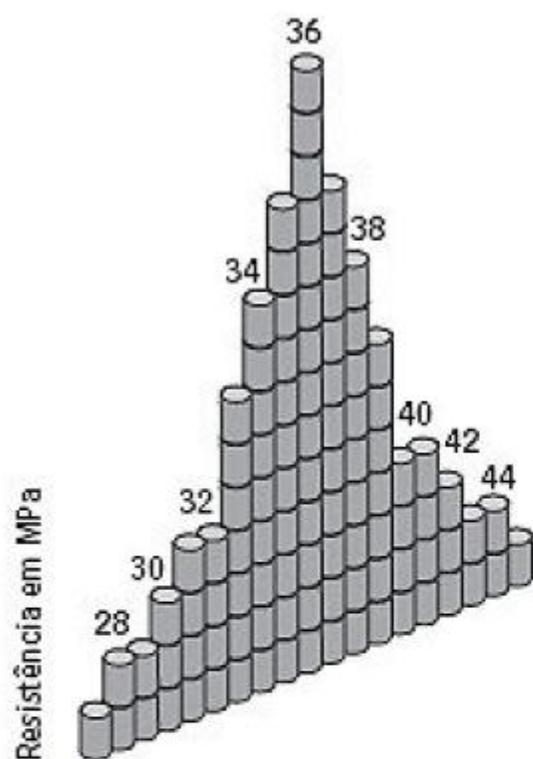


Resistência Característica do Concreto

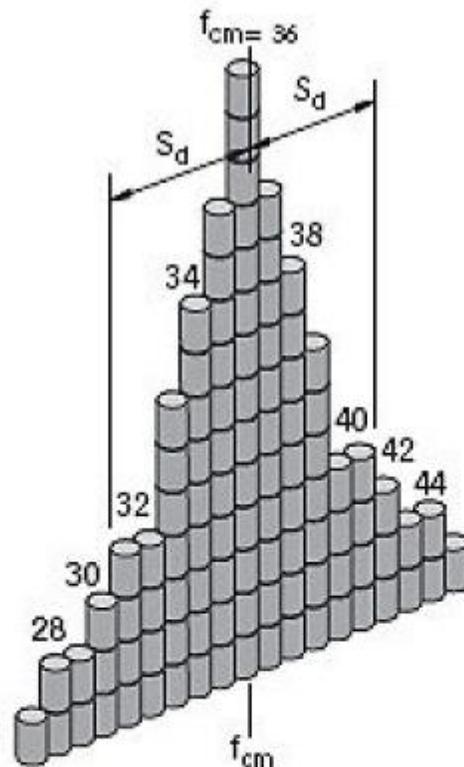


- f_{cm} = resistência média à compressão (dosagem)
- f_{ck} = resistência característica à compressão
- s_d = desvio-padrão da produção (dosagem)
- Importantíssimo: amostragem deve ser confiável para o controle (aula de controle de qualidade)

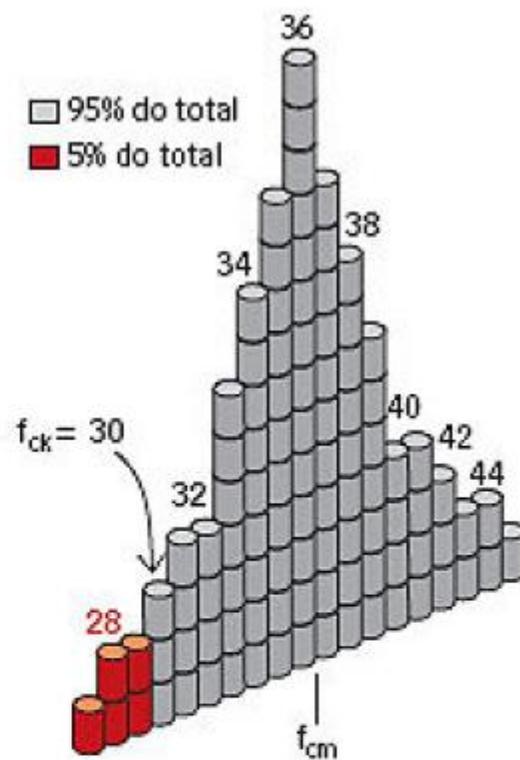
Resistência é parâmetro estatístico



1. Se todos os corpos de prova fossem empilhados lado a lado de acordo com as resistências obtidas nos ensaios, formariam uma imagem que pode ser comparada à ilustração acima. Trata-se de uma distribuição Normal de Probabilidade, semelhante à distribuição de Gauss.

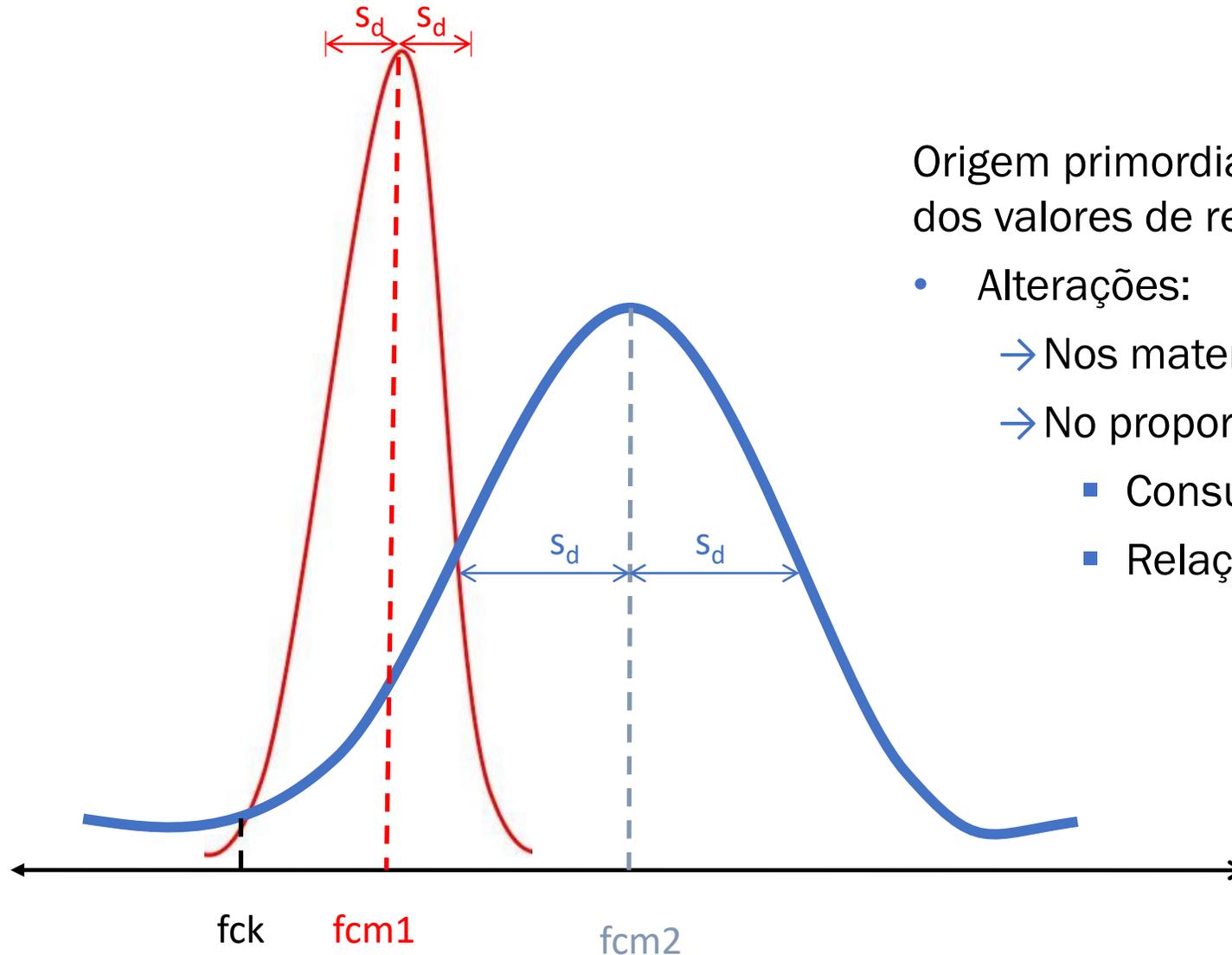


2. A média das resistências dos corpos de prova é indicada por f_{cm} . O desvio-padrão (s_d) é a unidade básica da variação dos resultados em torno dessa média. Quanto menor o valor de s_d , mais efetivo o controle que a central dosadora de concreto tem sobre a qualidade do material que fornece.



3. As normas técnicas brasileiras dizem que apenas 5% dos resultados dos ensaios podem ficar abaixo da resistência característica à compressão especificada em projeto (f_{ck}). Por isso, a central dosadora deve produzir o concreto com uma resistência média (f_{cm}) maior do que a resistência de projeto (f_{ck}). A fórmula aplicada é $f_{cm} = f_{ck} + 1,65s_d$

Resistência x desvio de produção do concreto



Origem primordial da dispersão dos valores de resistência:

- Alterações:
 - Nos materiais constituintes
 - No proporcionamento:
 - Consumo de cimento
 - Relação água/cimento

Exercício 4. Controle tecnológico do concreto

- Nas situações abaixo, qual deve ser a resistência média obtida (f_{cm}) quando se deseja obter uma resistência característica à compressão (f_{ck}) de 30 MPa?
 - a) Em central dosadora de concreto que faz a dosagem em massa. Desvio padrão (S_d) de 4 MPa;
 - b) Em um obra que faz a dosagem em volume, sem controle de umidade. Desvio padrão (S_d) de 7 MPa;

Resist. de projeto x Resist. dos corpos de prova

$$f_{c,estr} = 0,95 * 1,2 * 0,75 * f_{c,cp} = 0,85 * f_{c,cp}$$

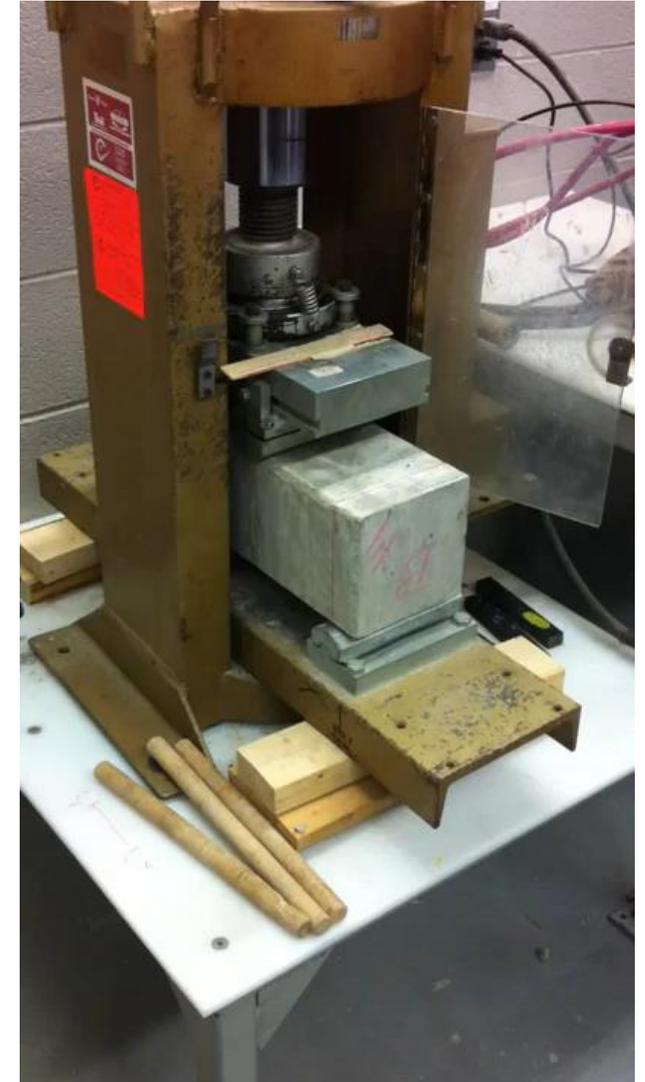
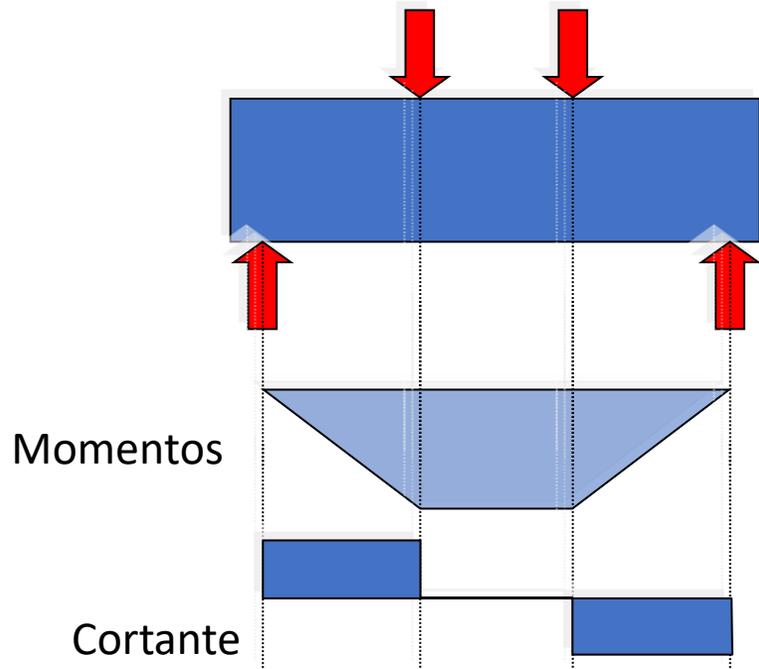
- Formato do corpo de prova: 0,95
 - Ganho de resistência após 28 dias: 1,20
 - Ruptura por carga de longa duração: 0,75
-
- *Quando o cimento não aumenta a resistência após os 28 dias:*
 $f_{c,estr} = 0,95 * 0,75 * f_{cd} = 0,71 * f_{c,cp}$



Comportamento mecânico do concreto e a segurança da estrutura

- Em um pilar a resistência do concreto define a capacidade resistente do elemento estrutural.
 - Esforço principal de compressão.
- Em uma viga ou laje o vergalhão de aço tem papel mais relevante para segurança da estrutura.
 - Esforço de tração resistido pelo aço.
- Num pavimento de concreto simples a resistência à tração do concreto é o parâmetro mais importante.

Resistência à tração na flexão 4 pontos



$$MOR = \frac{M}{W} = \frac{PL}{be^2}$$

M = Momento no vão central

W = momento de inércia

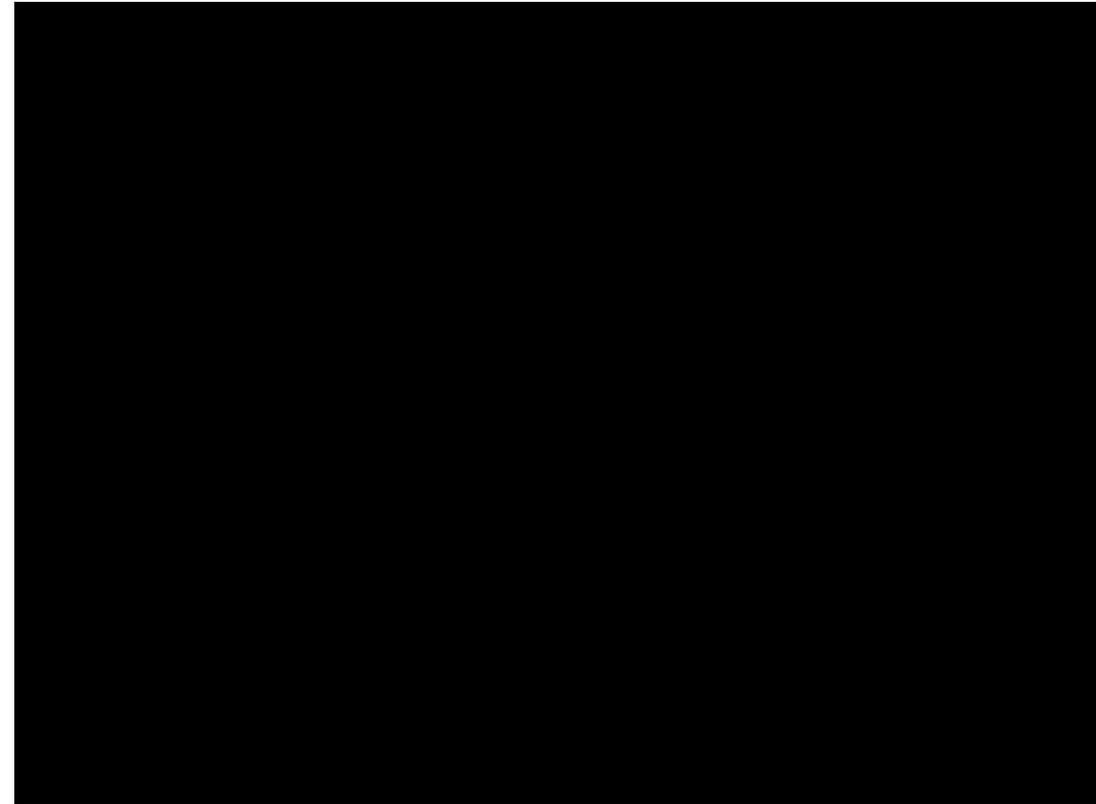
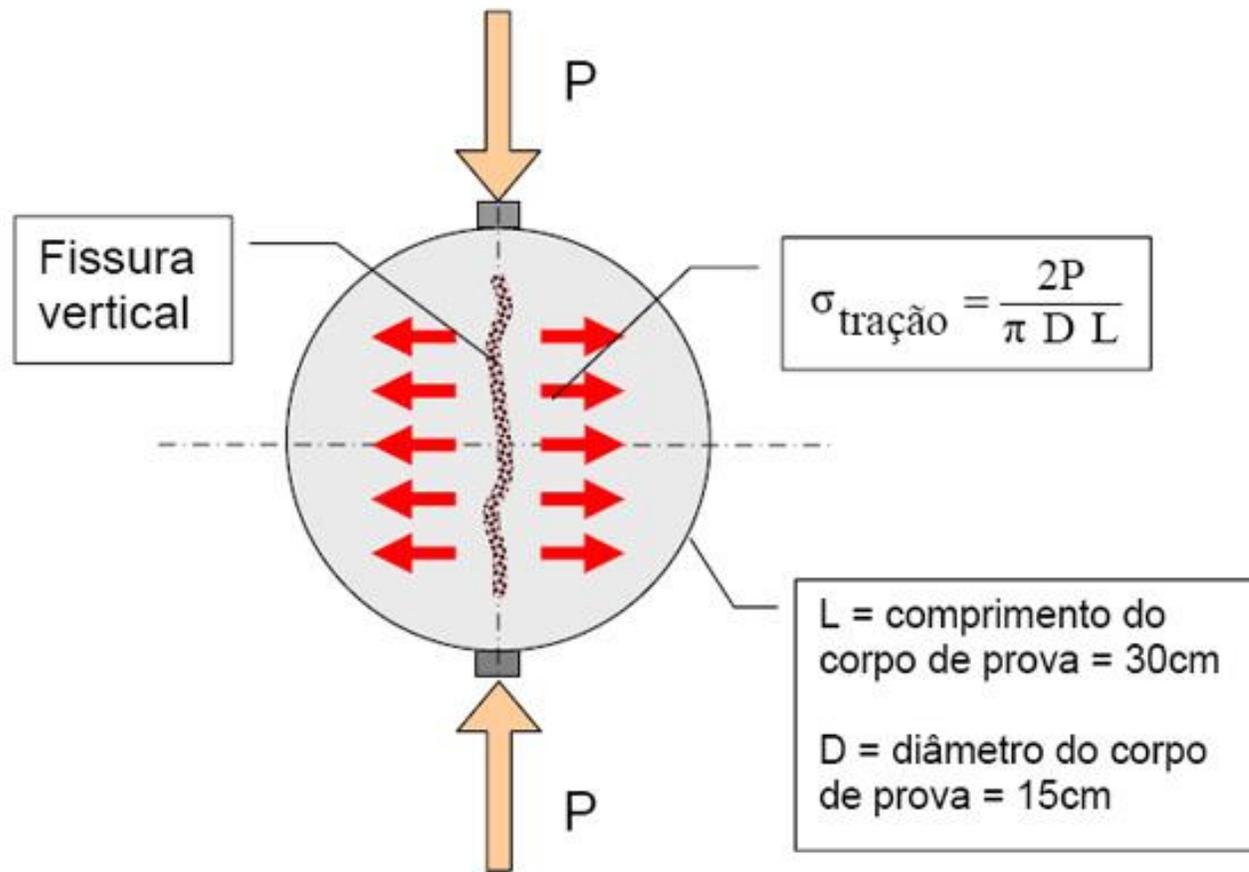
P = carga

L = vão

b = largura da viga

e = altura de viga

Resistência à tração (compressão diametral)



Os resultados de resistência à tração dependem do método de ensaio? Explique.

Conclusões

- Resistência à compressão, módulo de deformação
 - Usadas no projeto da peça estrutural de concreto armado
 - Após fissuração, o controle da deformação residual (estado limite de uso) é relevante.
- São usados ensaios padronizados
 - São condições particulares
 - afetado pelo formato do corpo de prova, velocidade de carregamento, etc
 - Deve se considerar o resultado estatístico (f_{ck})
 - Precisa corrigir os valores para representar o comportamento “real” da estrutura

Leitura recomendada

- Capítulo 3 – Resistência em Mehta; Monteiro. IBRACON. P.49-84
- Capítulo 4 – Estabilidade dimensional em Mehta; Monteiro. IBRACON. P.85-120