

ENSAIOS NÃO DESTRUTIVOS

Módulo de Elasticidade do Concreto Determinado por Frequência Ressonante Forçada

Maria Teresa Paulino Aguiar
ESCOLA DE ENGENHARIA
UF *m* G

Rosemary Bom Conselho Sales
ESCOLA DE DESIGN

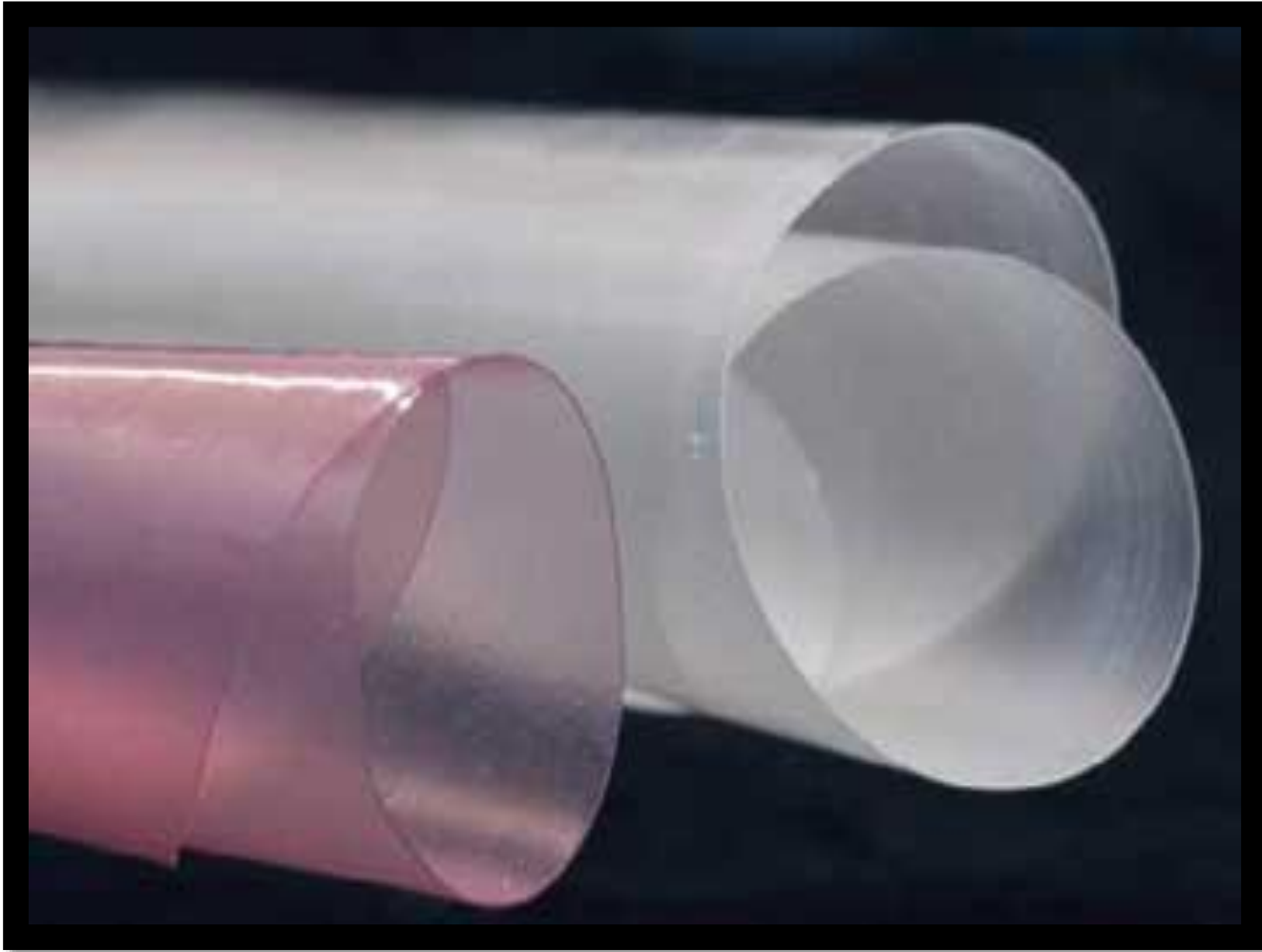


Outubro de 2016

Contextualização



Contextualização



Contextualização



75Au-25Si

Contextualização



Energia solar

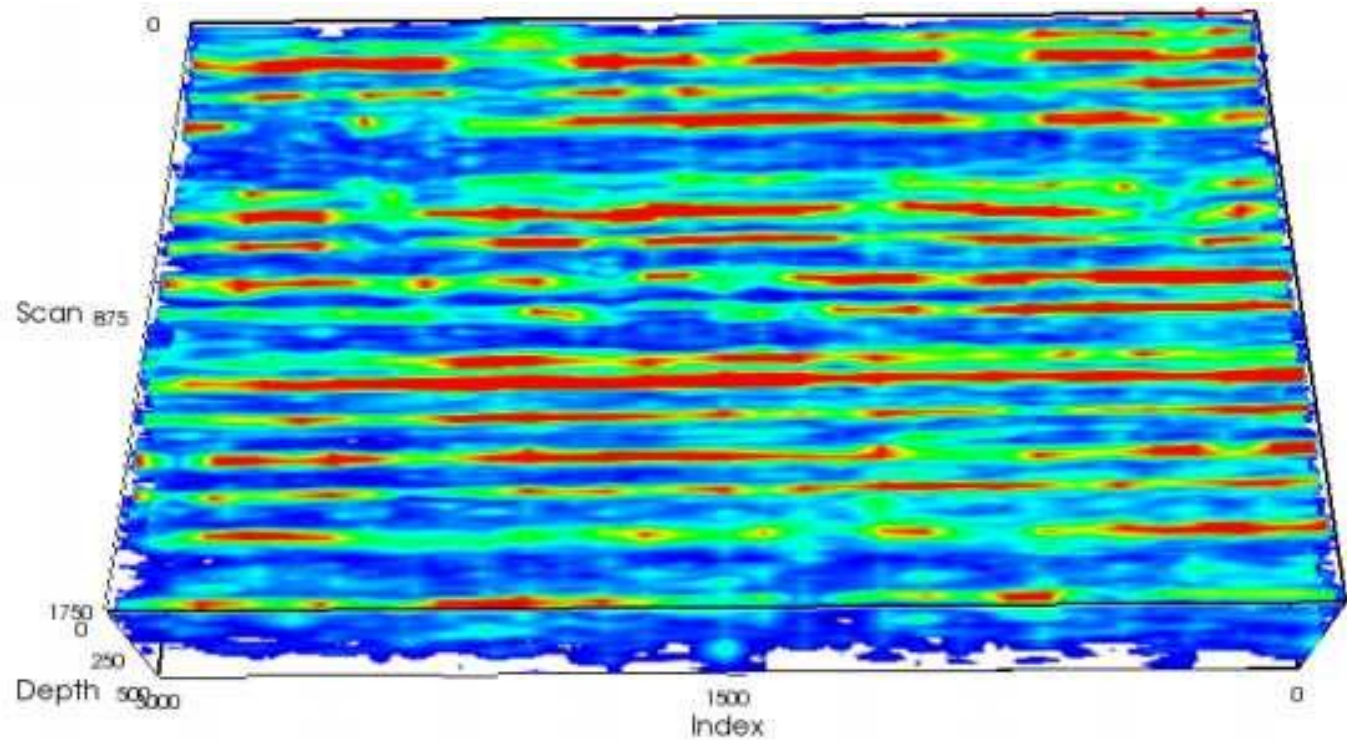
volta ao mundo = 40.000 km sem combustível

Contextualização



redução de até 15° C a temperatura da telha e
de até 30% da temperatura ambiente

Contextualização



Contextualização



Contextualização

Dimensão
econômica



Dimensão
ambiental



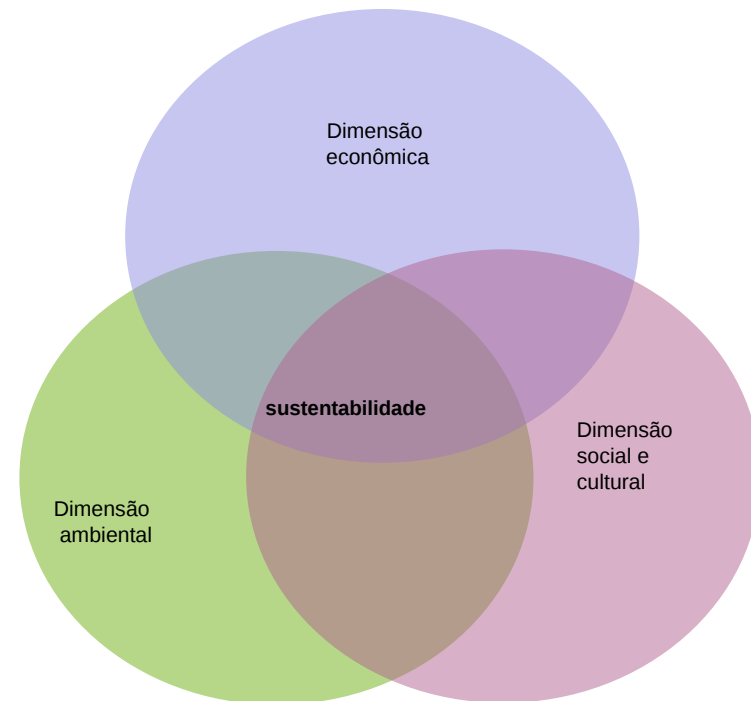
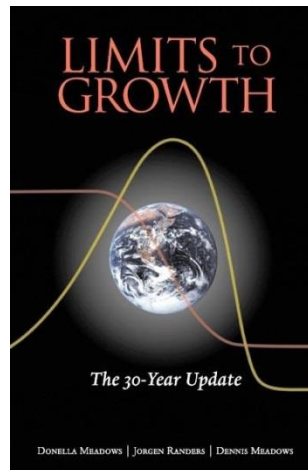
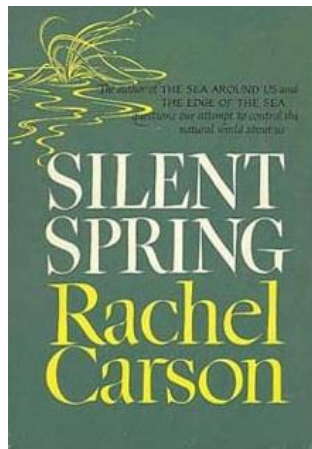
Dimensão
social e
cultural



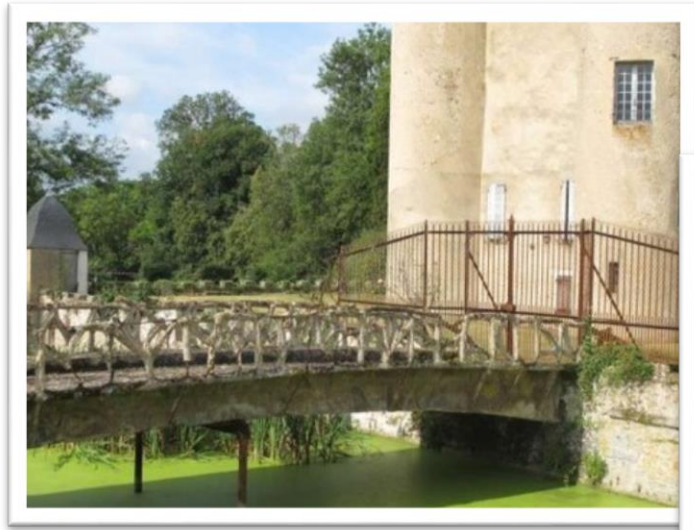
Contextualização

1962 - 1968 - 1987: desenvolvimento sustentável

*“Qualquer empreendimento humano deve ser:
ecologicamente correto, economicamente viável,
socialmente justo e culturalmente aceito.”*

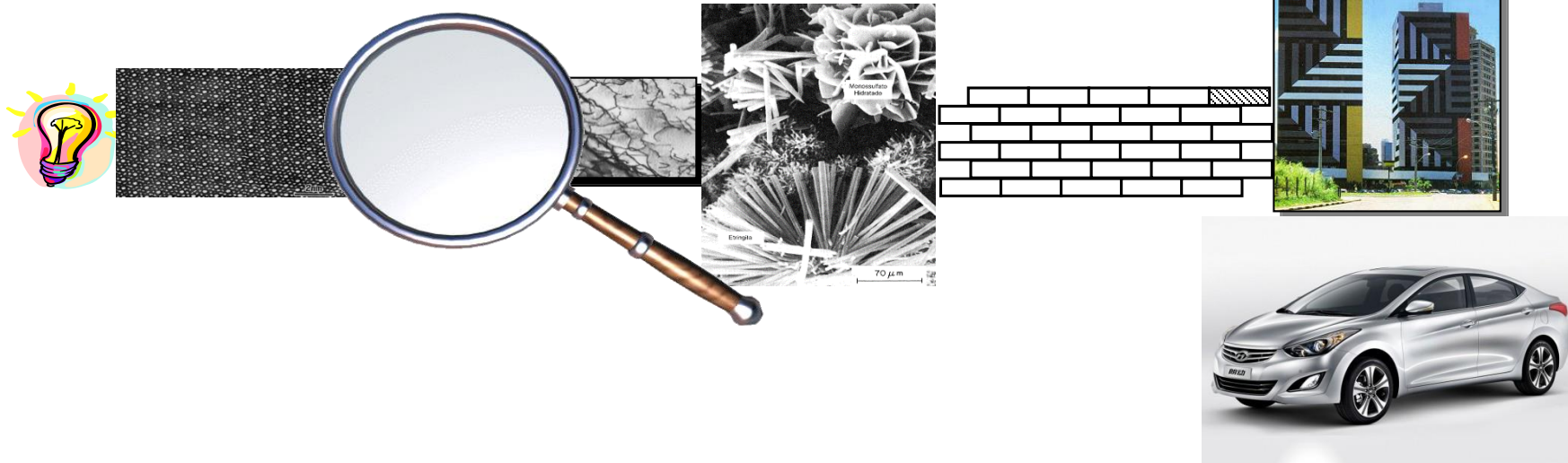
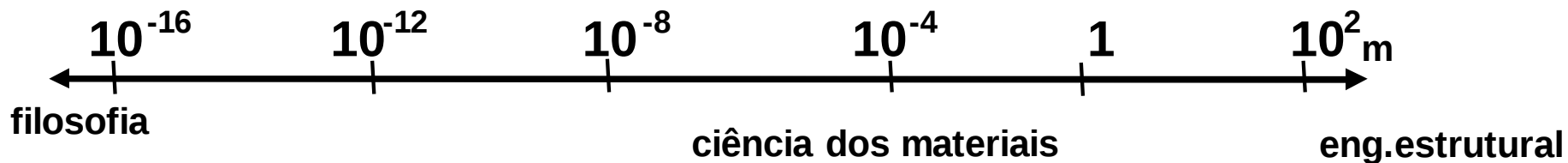


Contextualização



Contextualização

Incorporação de conceitos básicos em ciência permite controle de desempenho, aumento de qualidade e competitividade



O COMPORTAMENTO(**PROPRIEDADES**) DO MATERIAL DEPENDE DA
ESTRUTURA/PROCESSAMENTO

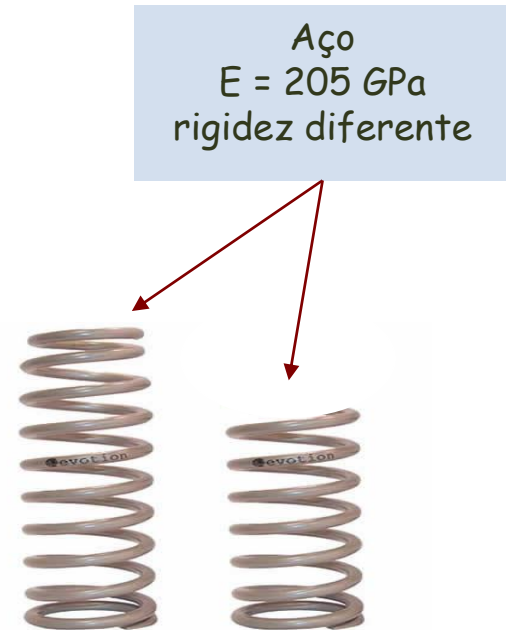
Módulo de Young (elasticidade)

Avalia a resistência do material à deformação no regime elástico.

- é usado para calcular a rigidez do sistema.



Momento de inércia (massa, forma de aplicação da carga e da geometria) e E (material)



Sistema é caracterizado pela sua elasticidade e o material pelo módulo de *Young*

Módulo de Elasticidade

1 –Econômicos: determinação da espessura mínima de uma laje é:

$$t = f \left(\frac{1}{E} \right)^{1/3}$$

para uma mesma deformação, mesma força aplicada e mesma geometria.



$E = 25 \text{ GPa}$ ou 30 GPa

espessura da laje
varia em 1 cm

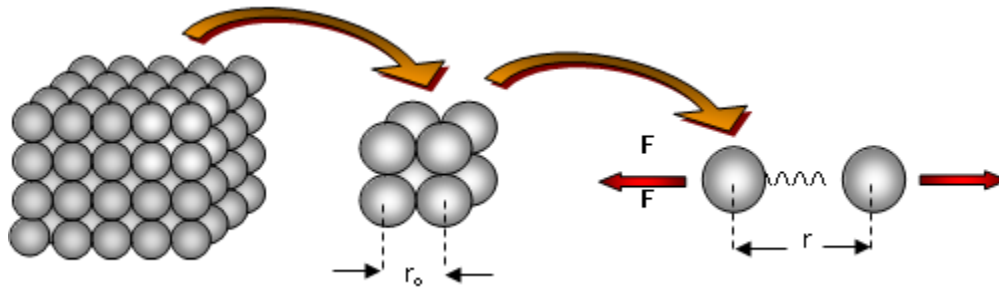


2 – Segurança: a estrutura de concreto tem que ter rigidez suficiente para que se retire o escoramento.



3 – Durabilidade: durante a fase de endurecimento do concreto restringido, surgem tensões de contração que provocam trincas no concreto. Dependendo do módulo de elasticidade, essas trincas podem levar à fratura do material.

Determinação do Módulo de Elasticidade



$$S = \frac{dF}{dr}$$

Representação das ligações individuais dos átomos dentro de um cristal.

Para pequenas deformações, a *rigidez* é constante e recebe o nome de constante elástica da ligação (S_o):

$$F = S_o \int_{r_0}^r dr$$

$$F = S_o(r - r_o)$$

Se F age em uma área na qual existem N ligações (ligações por unidade de área), considerando que os átomos se tangenciam e convertendo o deslocamento em deformação

$$F = NS_o(r - r_o) \quad F = \left(\frac{S_o}{r_0} \right) \varepsilon$$

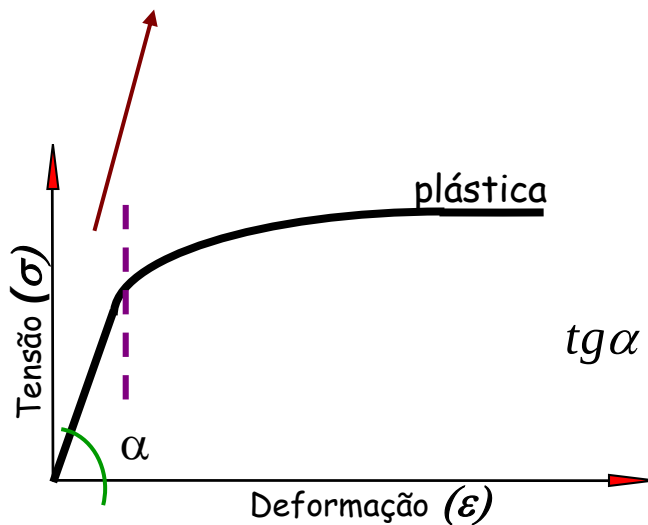
$$E = \left(\frac{S_o}{r_0} \right)$$

Determinação do Módulo de Elasticidade

Material elásticos (metais)

tração/compressão

Lei de Hooke: $\sigma = E\varepsilon$



$$\operatorname{tg} \alpha = \frac{\sigma}{\varepsilon} = E$$

módulo
de elasticidade

(estático ????)

ensaio trabalhoso

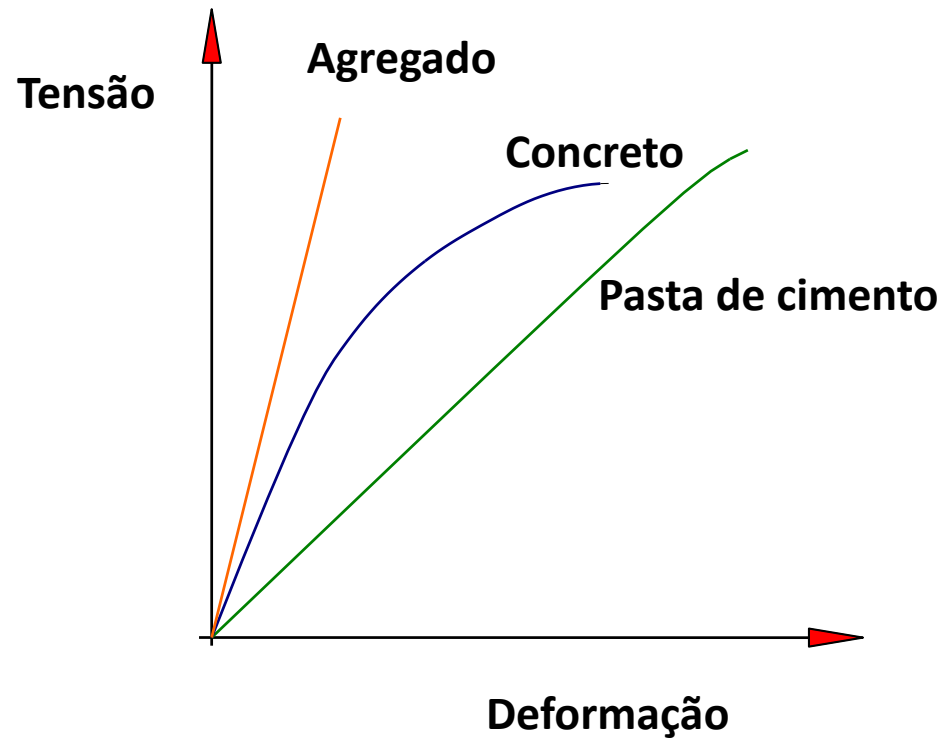


medidas diferem entre si
em até 30%

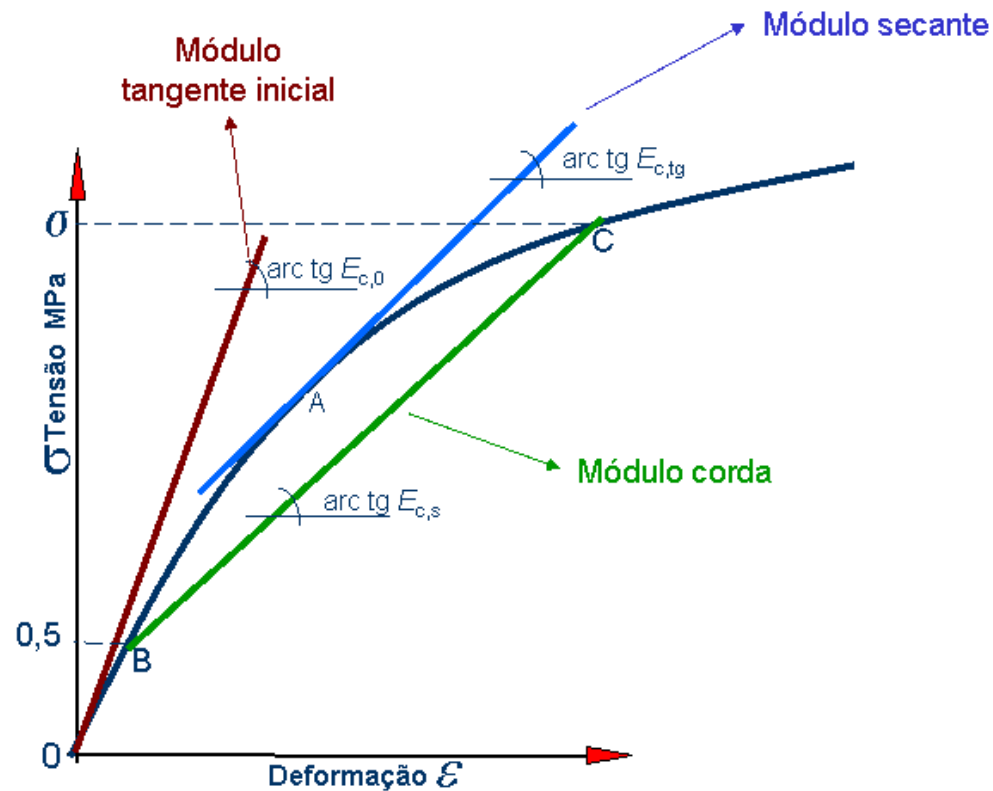


afetado pela velocidade de
aplicação de carga e pela rigidez da
máquina

Determinação do Módulo de Elasticidade de Concretos



Determinação do Módulo de Elasticidade de Concretos



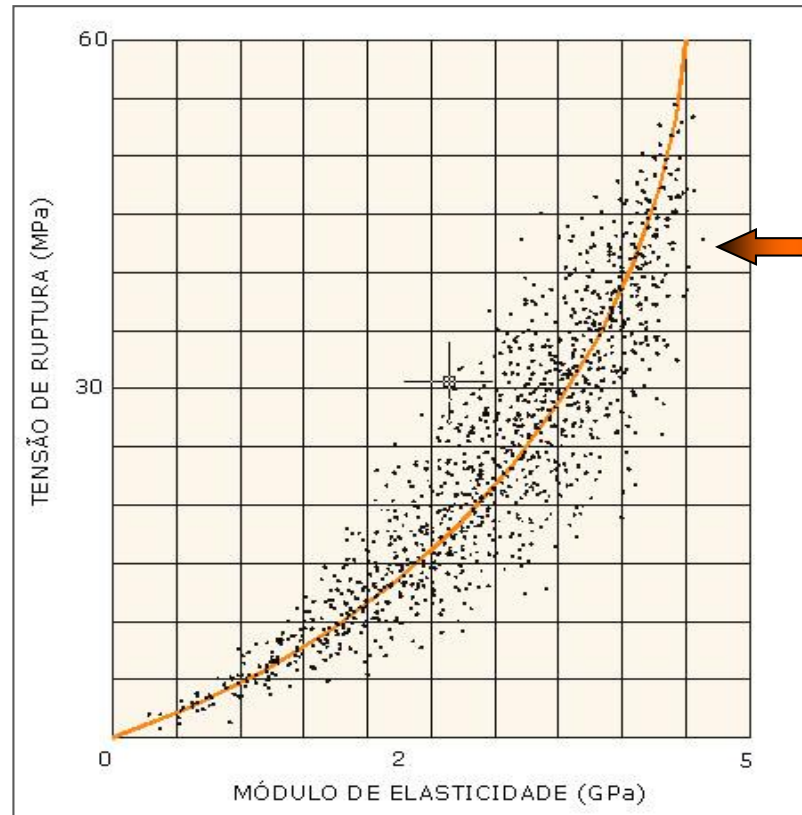
Determinação do Módulo de Elasticidade de Concretos

$$E_c = k \rho^x f_c^y$$

$$E_c = 5600 \sqrt{f_{ck}} \propto \beta$$

$$E_c = E_1 V_1 + E_2 V_2$$

$$E_c = \frac{E_1 E_2}{E_1 V_2 + E_2 V_1}$$



diferenças significativas entre os valores medidos.

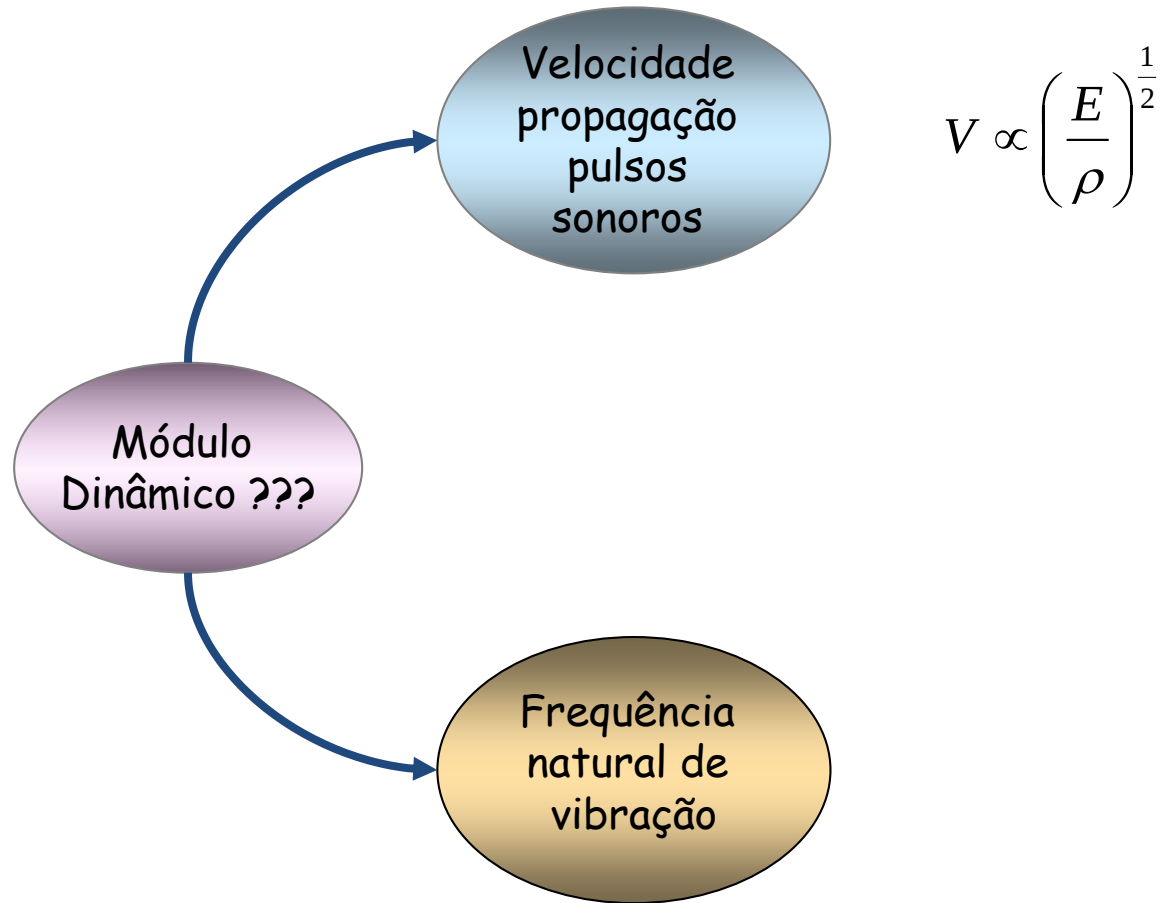


$E = 25 \text{ GPa}$ ou 30 GPa

$$\frac{1}{E_c} = \left(1 - \frac{2z}{\pi}\right) \cdot \left(\frac{V_a}{E_a} + \frac{1 - V_a}{E_p}\right) + \frac{2z}{\pi} \left[\frac{1}{V_a E_a + (1 - V_a) E_p} \right]$$

espessura da laje
varia em 1 cm

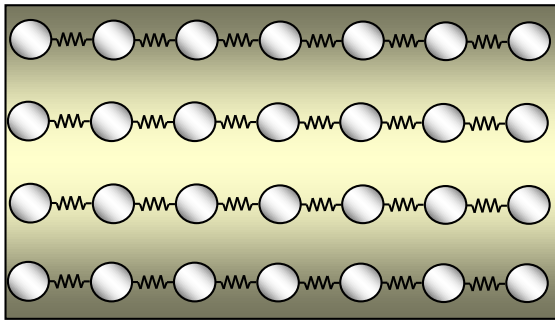
Determinação do Módulo de Elasticidade de Concretos



Frequência Ressonante

Todo sistema vibra em determinada frequência: frequência natural.

A frequência natural depende da massa e da rigidez do sistema: qualquer modificação nessas propriedades altera o valor da frequência natural - frequência de ressonância.



material

Rigidez: módulo de elasticidade ou de Young (E)



estrutura

Rigidez = momento de inércia (forma de aplicação da carga e da geometria) x E (material)

Frequência Ressonante



Ensaio Dinâmico ????? Tacoma

Por serem aplicadas tensões muito pequenas durante o ensaio, não há indução de microtrincamento, assim como não há o efeito de fluência.

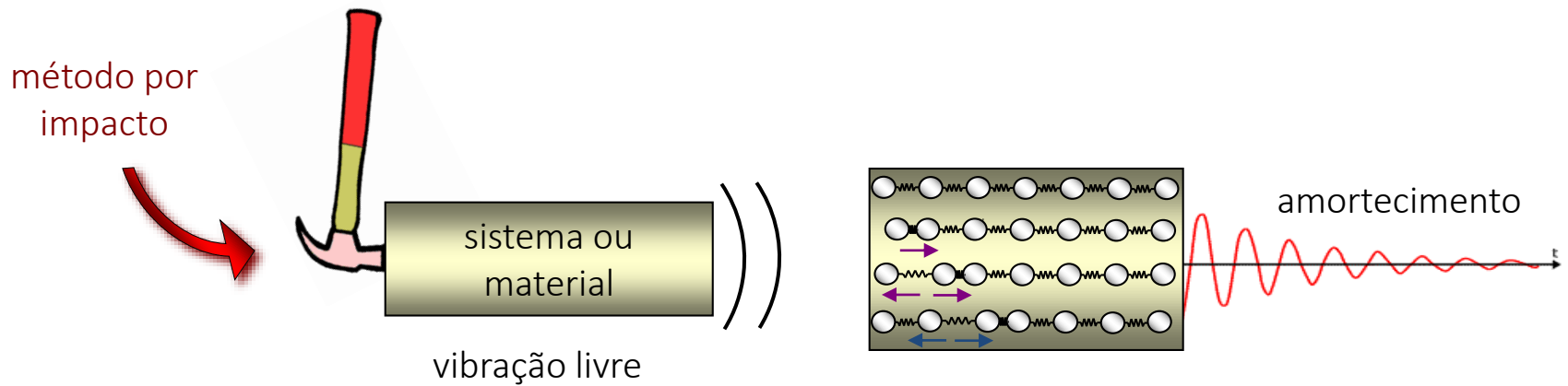
O ensaio de frequência ressonante depende do método utilizado para gerar as ondas mecânicas

- método por impacto
- método de vibrações forçadas

ASTM E1876

ASTM C215 - BS 1881: Part 209

Frequência Ressonante por Impacto



Frequência Ressonante Forçada

vibrações
periódicas
com frequências
variadas

f_1 f_2 f_3 f_4 f_5
 f_6

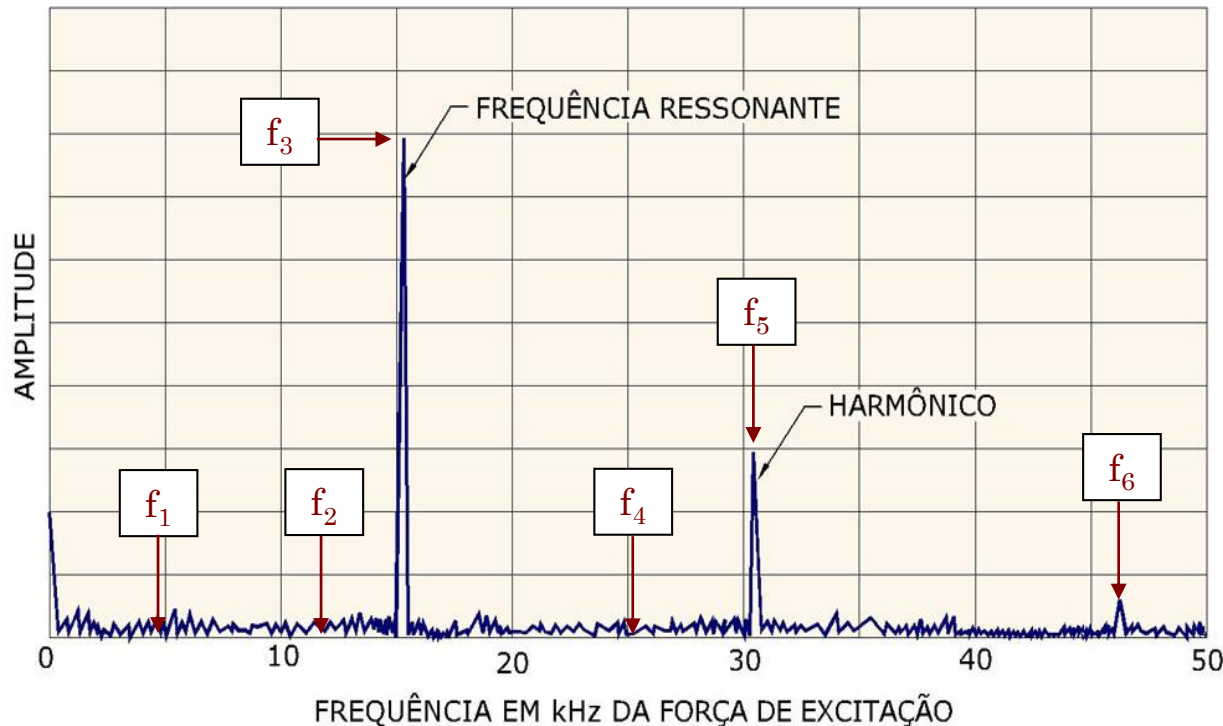


frequência
natural de vibração
 f_n



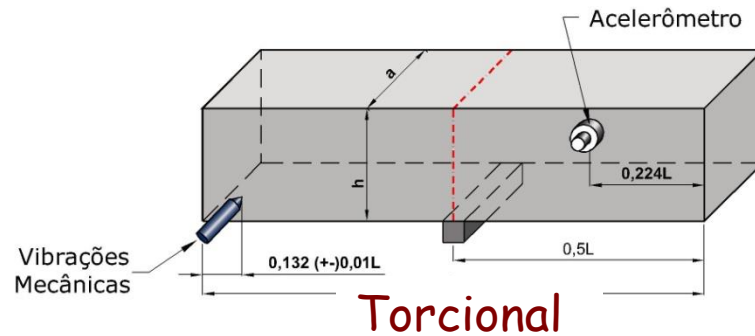
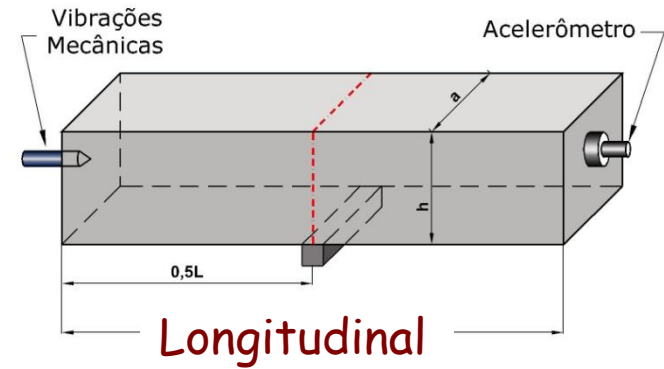
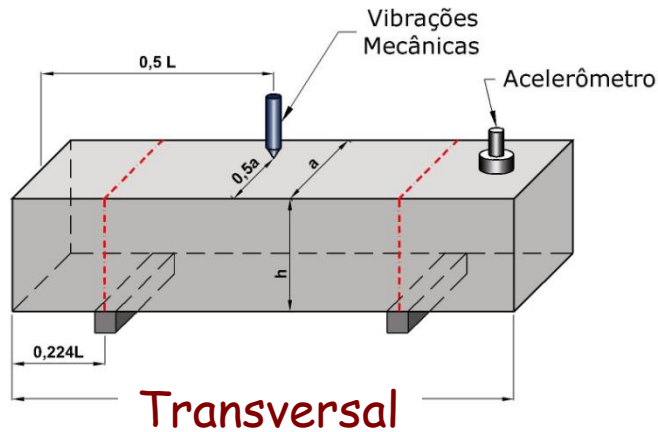
para cada frequência
aplicada é captada a
amplitude de vibração

amplificadas



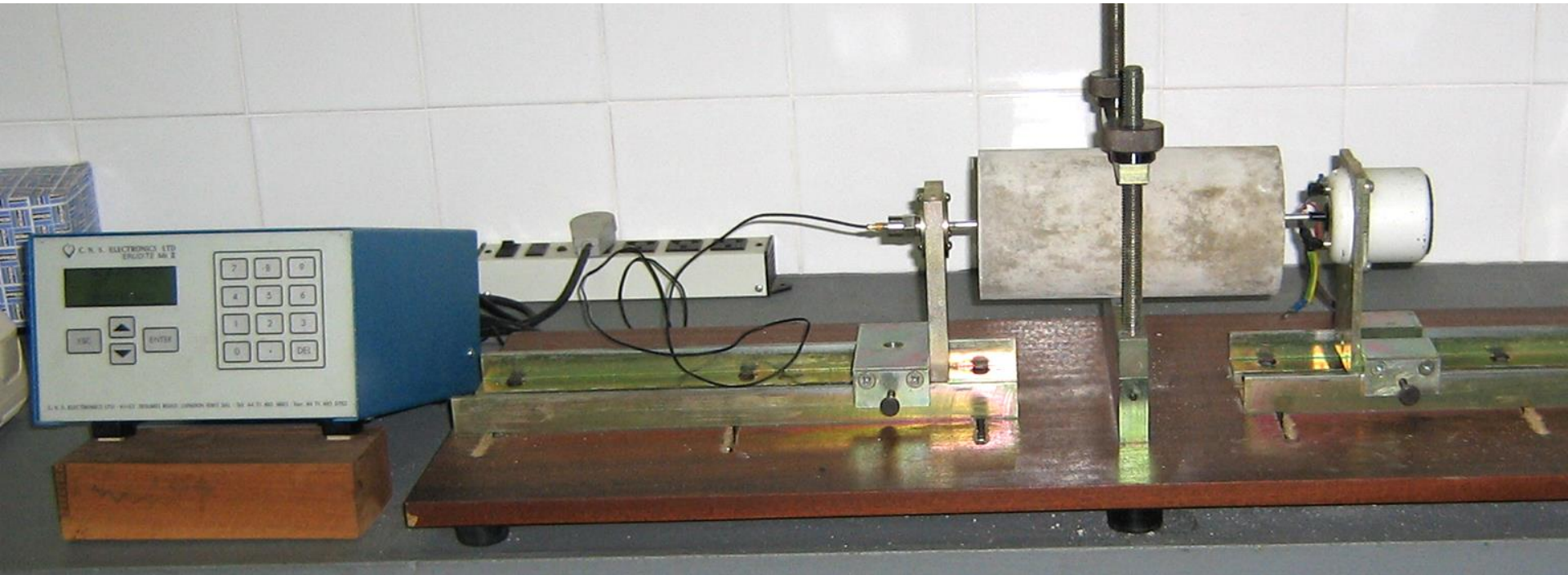
Quando a frequência de excitação se aproxima da frequência natural do sistema, a amplitude de vibração cresce até um valor máximo, que é a frequência ressoante.

Frequência Ressonante Forçada



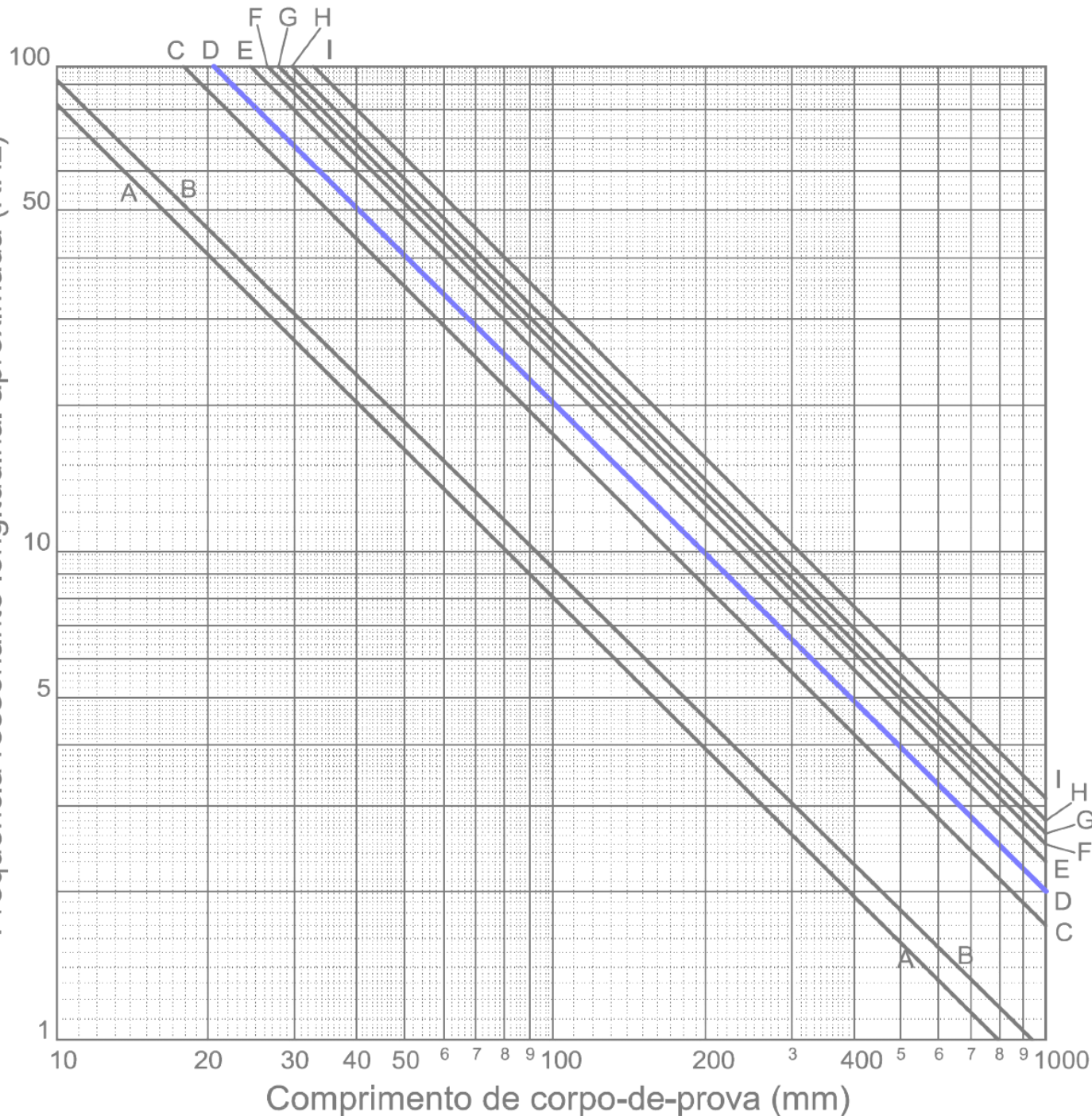
Teoricamente fornecem o mesmo valor de E .

Frequência Ressonante Forçada



*Erudite MKII Resonancy Frequency Test System, da C.N.S. Electronics, pertencente ao laboratório de **Caracterização de Materiais de Construção Civil e Mecânica** do Departamento de Engenharia de Materiais e Construção da UFMG.*

Frequência ressonante longitudinal aproximada (KHz)



- A = Acetal;
- B = Acrílico;
- C = Latão;
- D = Ouro e Concreto;
- E = Cristal de chumbo, Ferro fundido e Tungstênio;
- F = Aço;
- G = Ligas de alumínio;
- H = Vidro;
- I = Carboneto de tungstênio

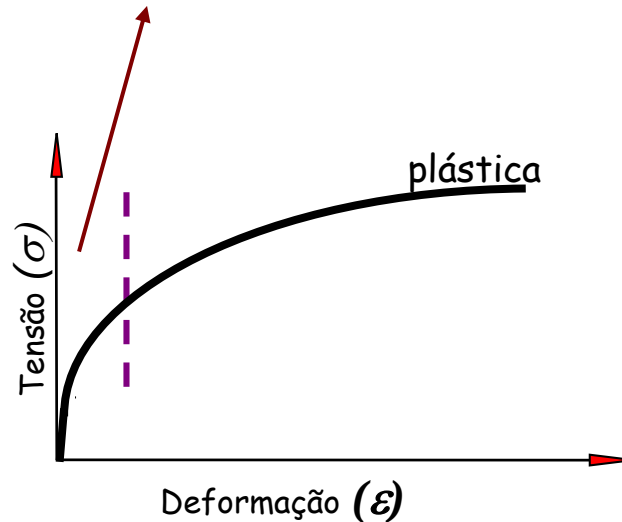
Frequência Ressonante - Módulo de Elasticidade

Material viscoelásticos: a tensão e a deformação dependentes do tempo e da frequência:

tração/compressão

$$\text{Maxwell: } \frac{\dot{\sigma}}{E} + \frac{\sigma}{\eta} = \dot{\varepsilon}$$

$$\text{Kelvin: } \sigma = \eta \dot{\varepsilon} + E \varepsilon$$



Frequência Ressonante - Módulo de Elasticidade

$$\text{Kelvin: } \sigma = \eta \dot{\varepsilon} + E\varepsilon$$

$$\text{Maxwell: } \frac{\dot{\sigma}}{E} \div \frac{\sigma}{\eta} = \dot{\varepsilon}$$



Utilizando a transformada de Fourier, que converte os sinais obtidos no domínio do tempo para o domínio da frequência, e considerando que os sólidos são homogêneos e que a relação comprimento/largura é suficientemente grande para desprezar os efeitos do cisalhamento e da inércia à rotação, Euler-Bernoulli propuseram a seguinte solução:

$$n = \frac{\sqrt{\frac{kE}{m}}}{2\pi}$$

n = frequência natural de vibração

$K = f(\text{geometria e forma de vibração})$

Frequência Ressonante - Módulo de Elasticidade

$$n = \frac{\sqrt{\frac{kE}{m}}}{2\pi}$$

Pickett (1945) e Spinner e Tefft (1961) sugeriram modificações para que ela pudesse ser usada para materiais com dimensões menos restritas (corpo de prova).



$$E(MPa) = C_m m n_t^2$$

O módulo de elasticidade assim calculado seria a medida adequada do módulo de elasticidade dos viscoelásticos.

No caso de materiais heterogêneos, como os concretos, para utilizar essa relação, as dimensões da amostra devem ser bem maiores que as dos materiais constituintes

Frequência Ressonante - Módulo de Elasticidade

Norma britânica BS 1881: Part 209 (BSI, 1990) recomenda que, para a aplicação do método de ressonância ao concreto, a amostra deve possuir configuração prismática (tipo viga).

Neville em seu livro descreve esse tipo de ensaio, no qual o módulo dinâmico é determinado em corpos-de-prova prismáticos, cujas dimensões devem ser medidas com bastante precisão e podem ser: 15 x 15 x 75 cm ou 10 x 10 x 50 cm.

Norma americana ASTM C-215 (2008) padroniza o ensaio tanto para corpos-de-prova cilíndricos como prismáticos, desde que a relação entre o comprimento e a maior dimensão da seção transversal seja de no mínimo 2. A norma ressalta que melhores resultados são obtidos com os índices de forma entre 3 e 5. Segundo Malhotra e Sivasundaram (1991), as amostras que possuem índice muito alto ou baixo são dificilmente excitadas no modo de vibração fundamental. O mesmo pesquisador cita que ensaios têm sido feitos utilizando cilindros de 15, 2 x 30,5 cm e prismas de 7,6 x 7,6 x 30,5 mm. O fabricante de equipamento C.N.S. Electronics, (1995) sugere uma relação de 2 para corpos cilíndricos.

Frequência Ressonante - Módulo de Elasticidade

Transversal

$$E_{d,t} (MPa) = C_m m n_t^2$$

$E_{d,t}$ = módulo de elasticidade transversal

m = massa da amostra em kg

n_t = frequência fundamental transversal (Hz).

$$C_m = 0,9464 \left(\frac{\ell^3 T}{b t^3} \right)$$

prismas

$$C_m = 1,6067 \left(\frac{\ell^3 T}{d^4} \right)$$

cilindros

ℓ = comprimento da amostra em metros d = diâmetro do cilindro em metros

t e b = dimensões em metro da seção transversal do prisma, sendo t na direção da vibração.

T = fator de correção

Frequência Ressonante - Módulo de Elasticidade

Valores do fator de correção T para coeficiente de Poisson de 0,17

i/ℓ	T	i/ℓ	T	i/ℓ	T	i/ℓ	T
0,00	1,00	0,05	1,20	0,10	1,73	0,20	3,58
0,01	1,01	0,0	1,28	0,12	2,03	0,25	4,78
0,02	1,03	0,07	1,38	0,14	2,36	0,30	6,07
0,03	1,07	0,08	1,48	0,16	2,73	-	-
0,04	0,13	0,09	1,60	0,18	3,14	-	-

ℓ

Valores do fator de correção T para coeficiente de Poisson diferente de 0,17

$$T' = T \cdot \left[\frac{1 + (0,26.v + 3,22.v^2).i/\ell}{1 + 0,3228.i/\ell} \right]$$

$$i = \frac{d}{4}$$

cilindros

$$i = 0,2887t$$

prismas

Frequência Ressonante - Módulo de Elasticidade

Longitudinal

$$E_{d,l}(\text{MPa}) = D_m m n_l^2$$

$$D_m = 4 \left(\frac{\ell}{bt} \right) \quad \text{prismas}$$

$$D_m = 5,093 \left(\frac{\ell}{d^2} \right) \quad \text{cilindros}$$

Torcional

$$E_{d,to}(\text{MPa}) = B_m m n_{to}^2$$

$$B_m = \frac{4\ell R}{A}$$

A é a área da seção transversal da amostra (m^2)

R = fator de forma

$R = 1$ para cilindros

$R = 1,183$ para prismas de seção transversal quadrada)

$$R = \left(\frac{a}{b} + \frac{b}{a} \right) \div \left[4 \left(\frac{a}{b} \right) - 2,52 \left(\frac{a}{b} \right)^2 + 0,21 \left(\frac{a}{b} \right)^6 \right]$$

para prismas retangulares cujas dimensões da seção transversal são a e b , com $a < b$.

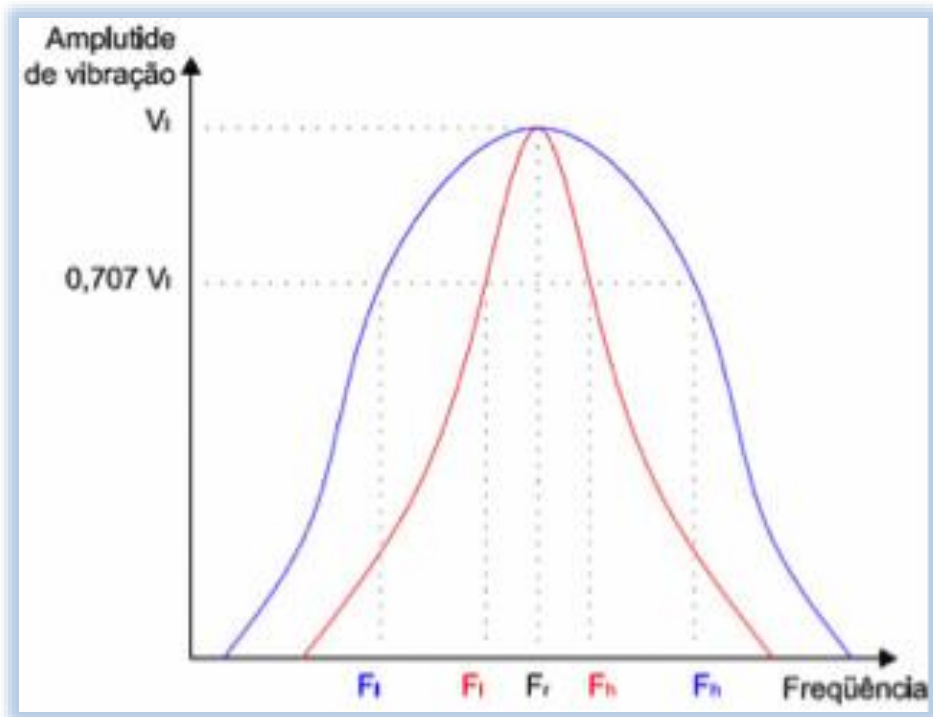
Frequência Ressonante - Módulo de Elasticidade

Constante de amortecimento

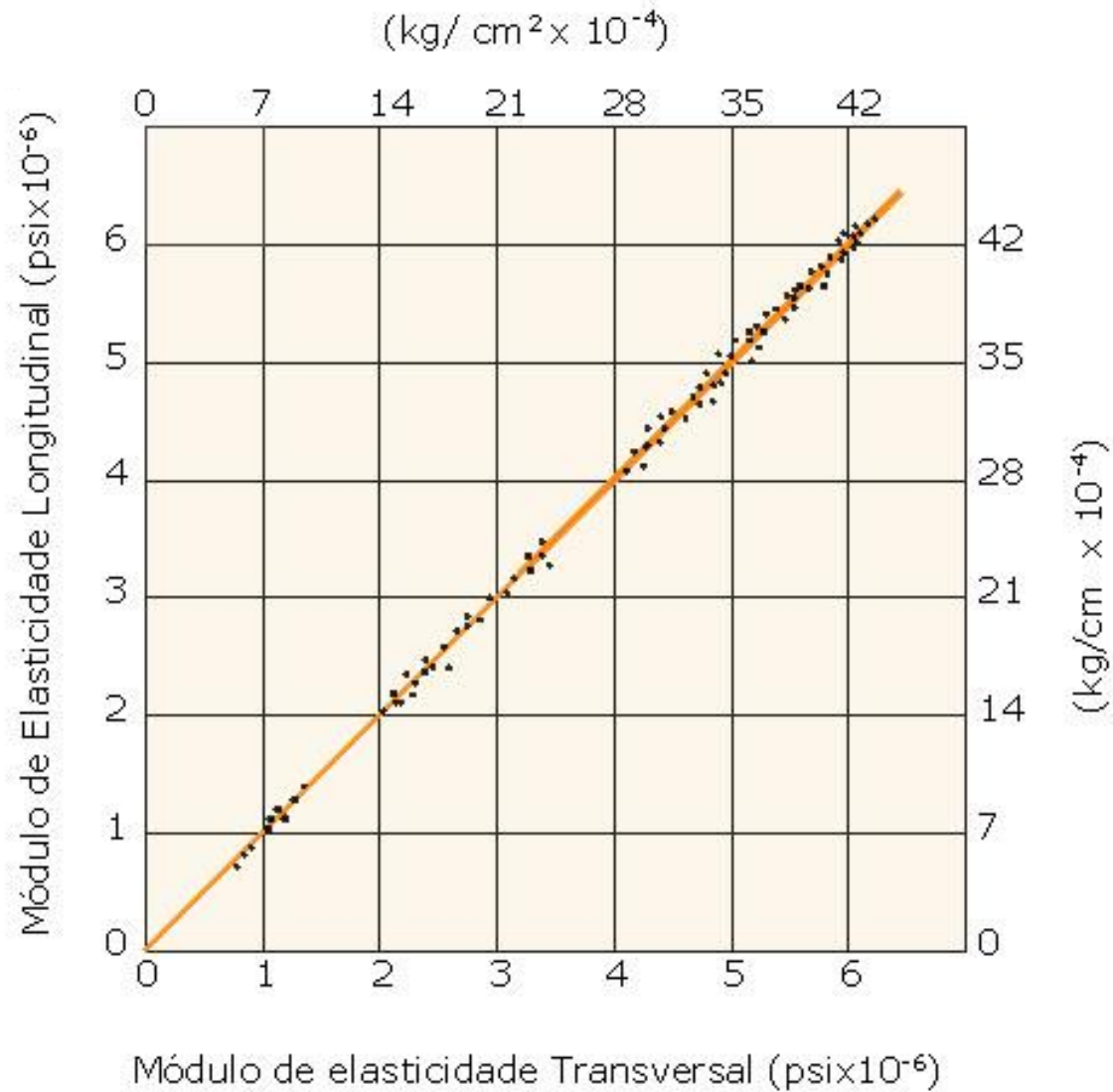
Indicativo das interferências dos vários elementos atuantes no sistema.

$$Q = \frac{F_r}{F_h - F_l}$$

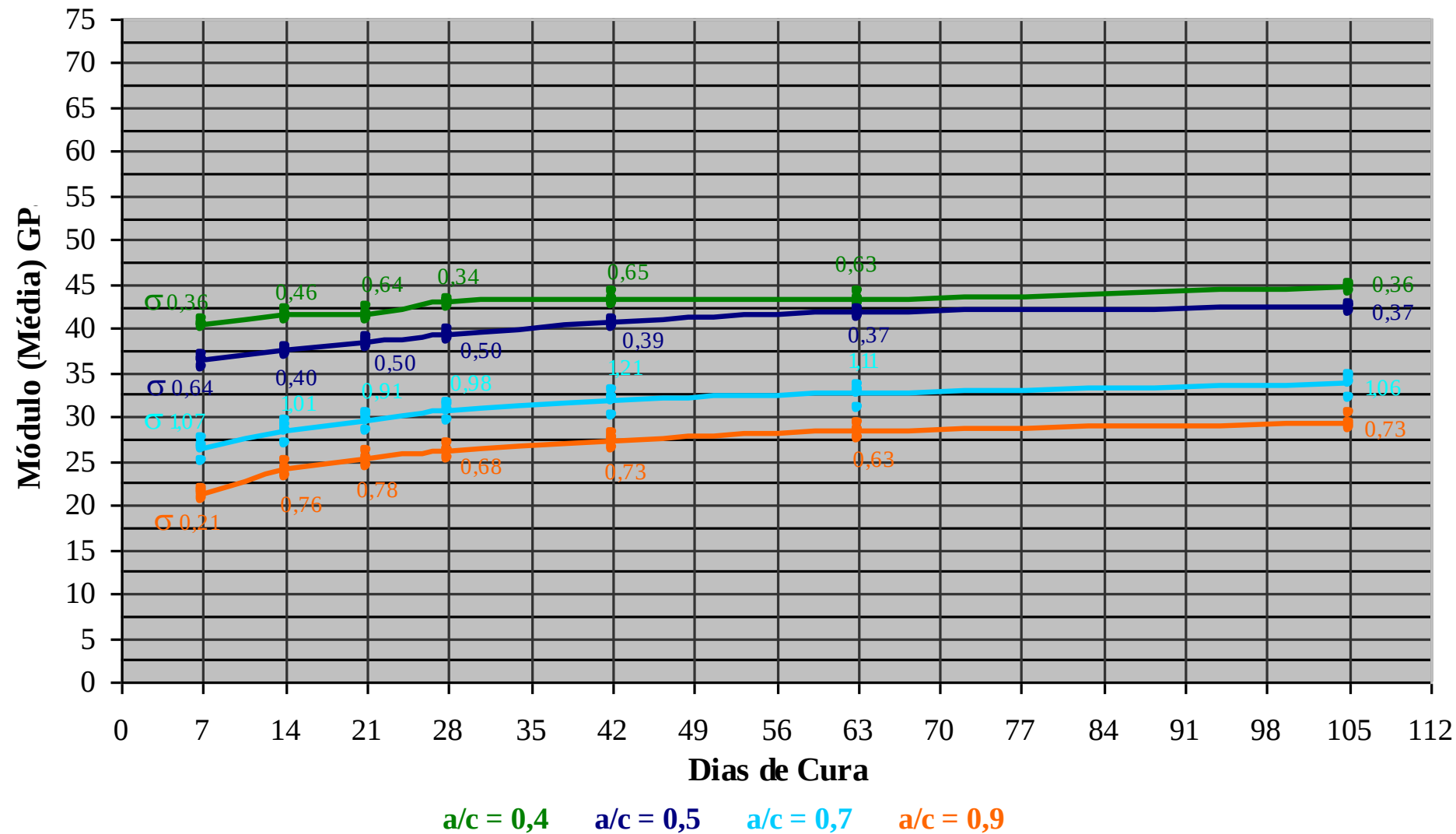
No catálogo do fabricante *Germann Instruments* é sugerido uma razão de 3dB para avaliação do amortecimento:



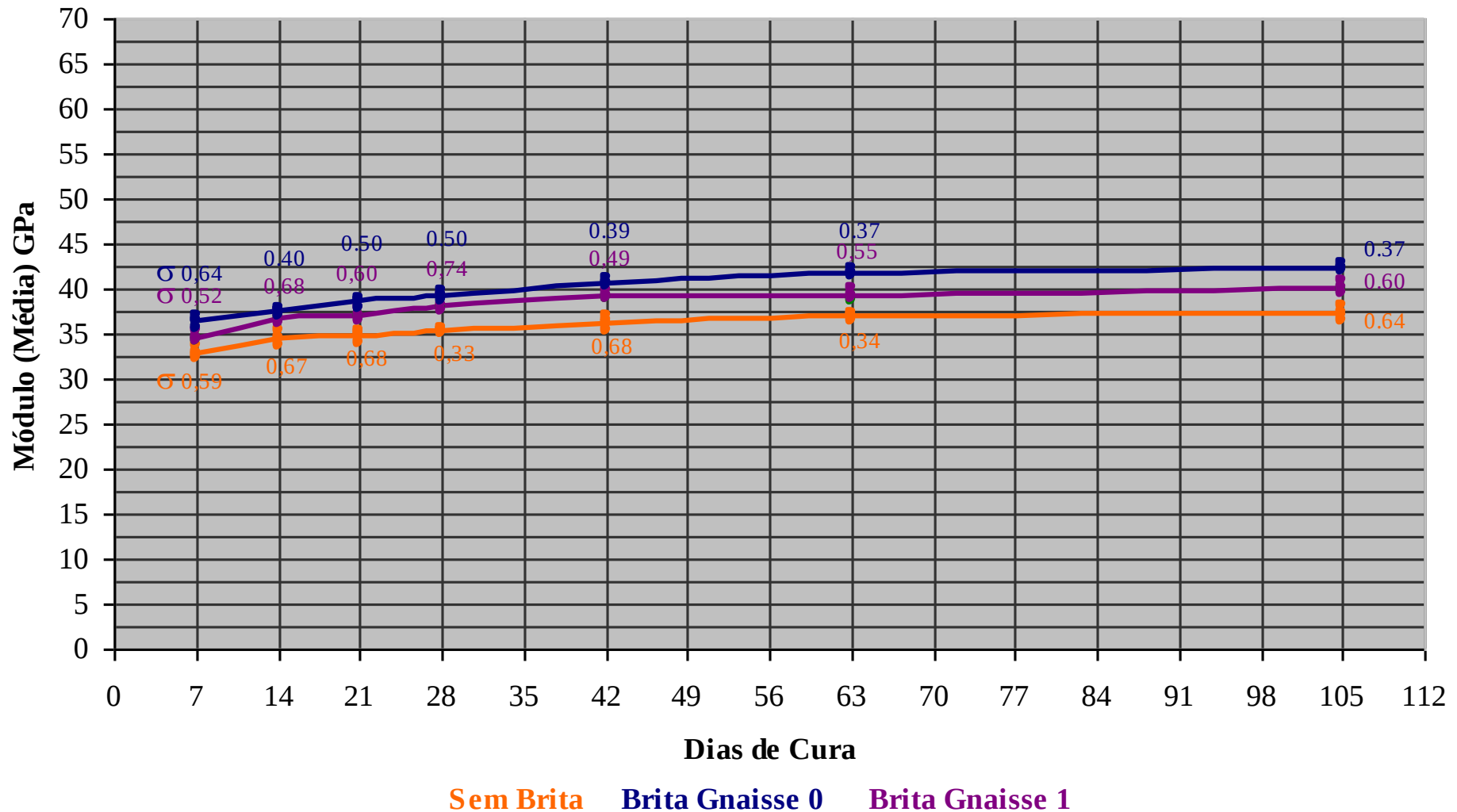
Módulo de Elasticidade por Frequência Ressonante Forçada



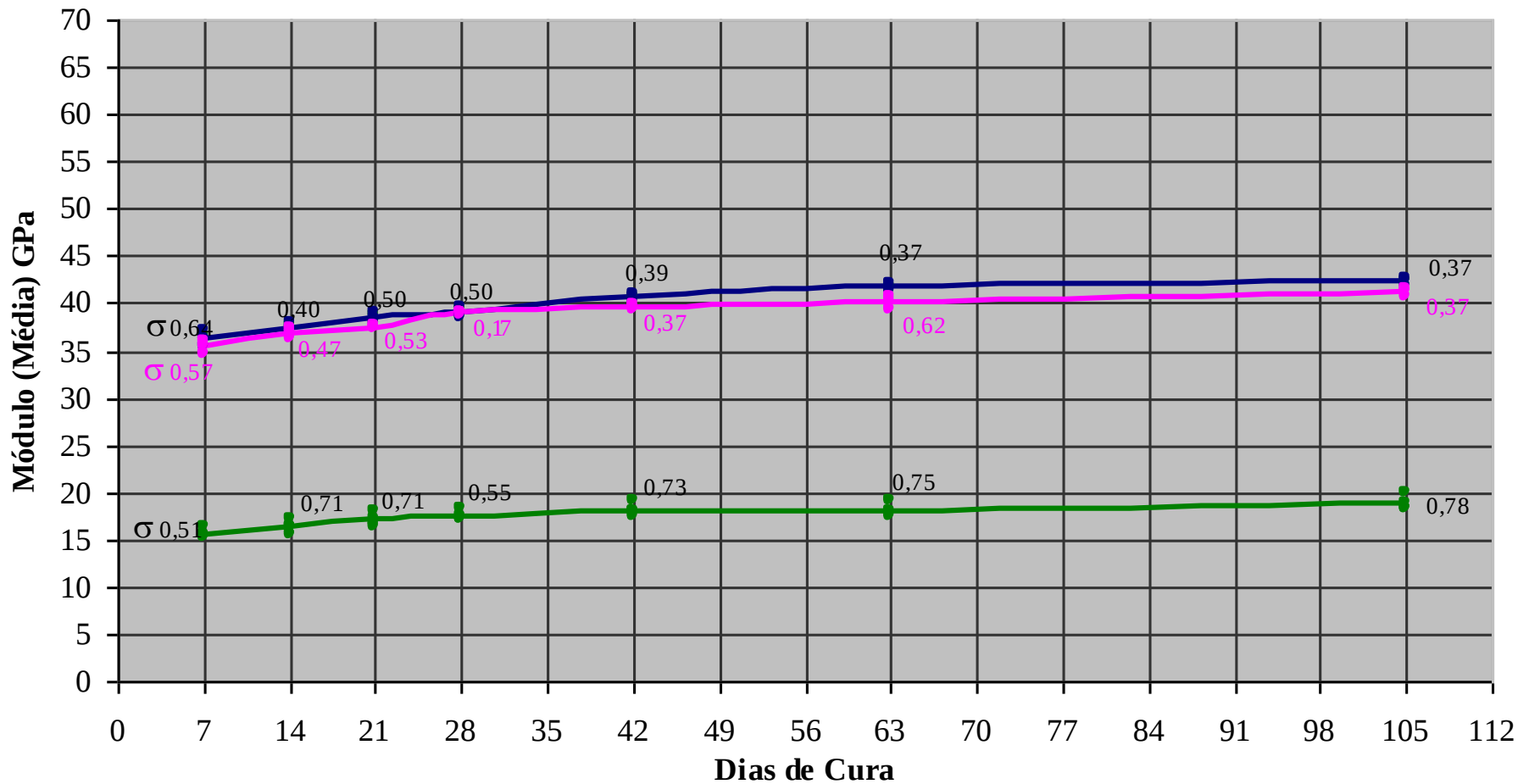
Módulo de Elasticidade por Frequência Ressonante Forçada



Módulo de Elasticidade por Frequência Ressonante Forçada



Módulo de Elasticidade por Frequência Ressonante Forçada



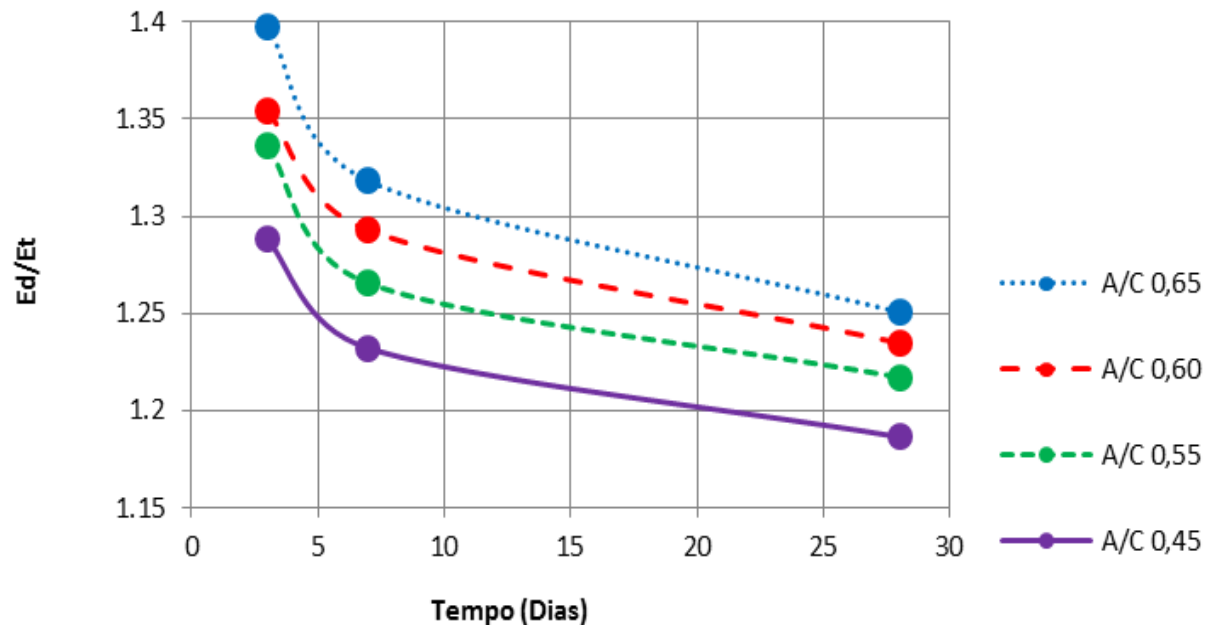
Gnaisse 0

Calcárea 0

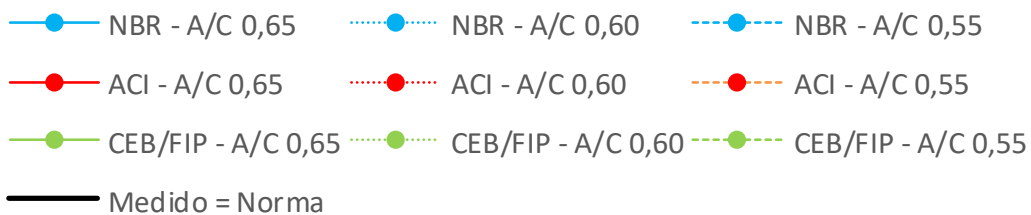
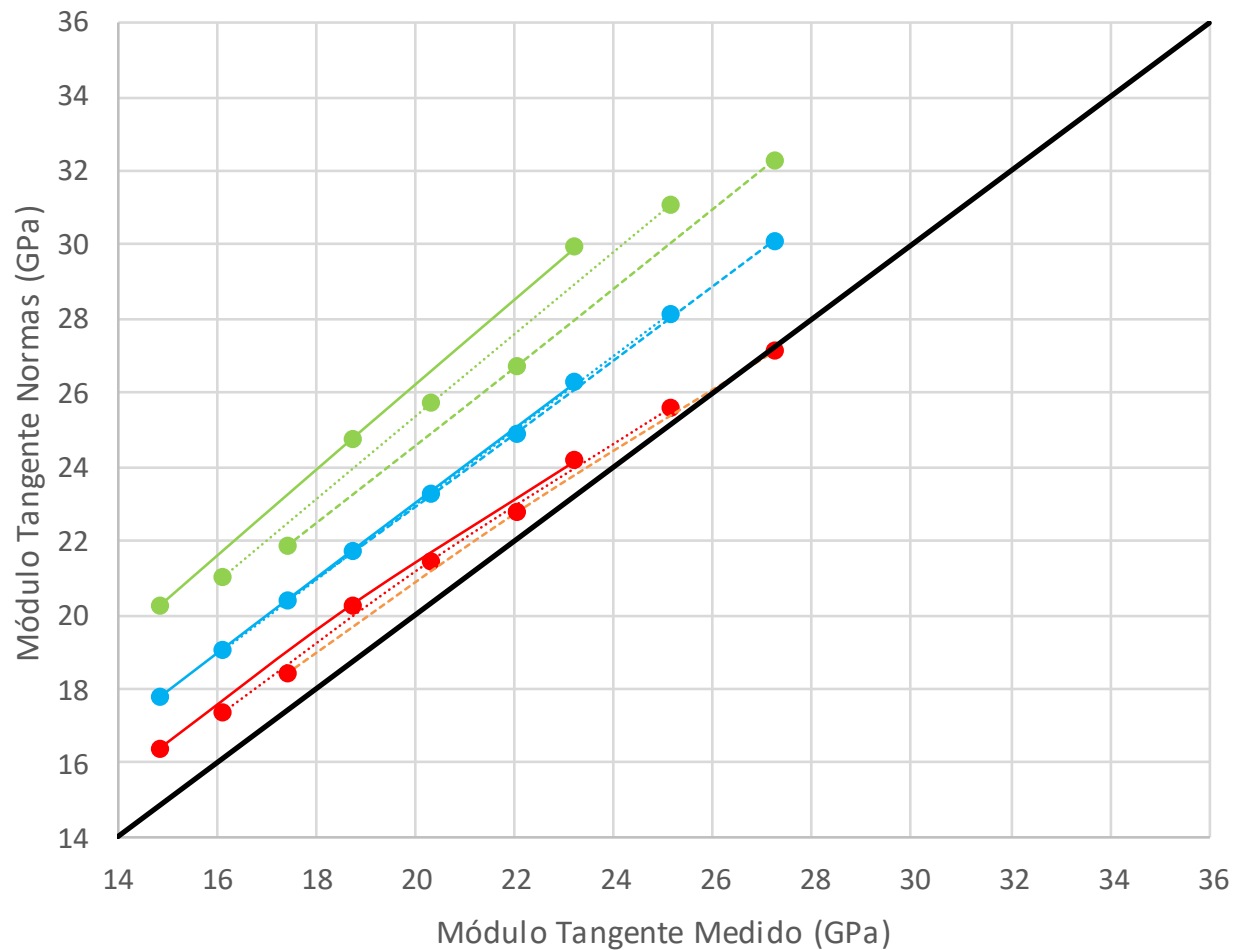
Argila Expandida

Módulo de Elasticidade por Frequência Ressonante Forçada

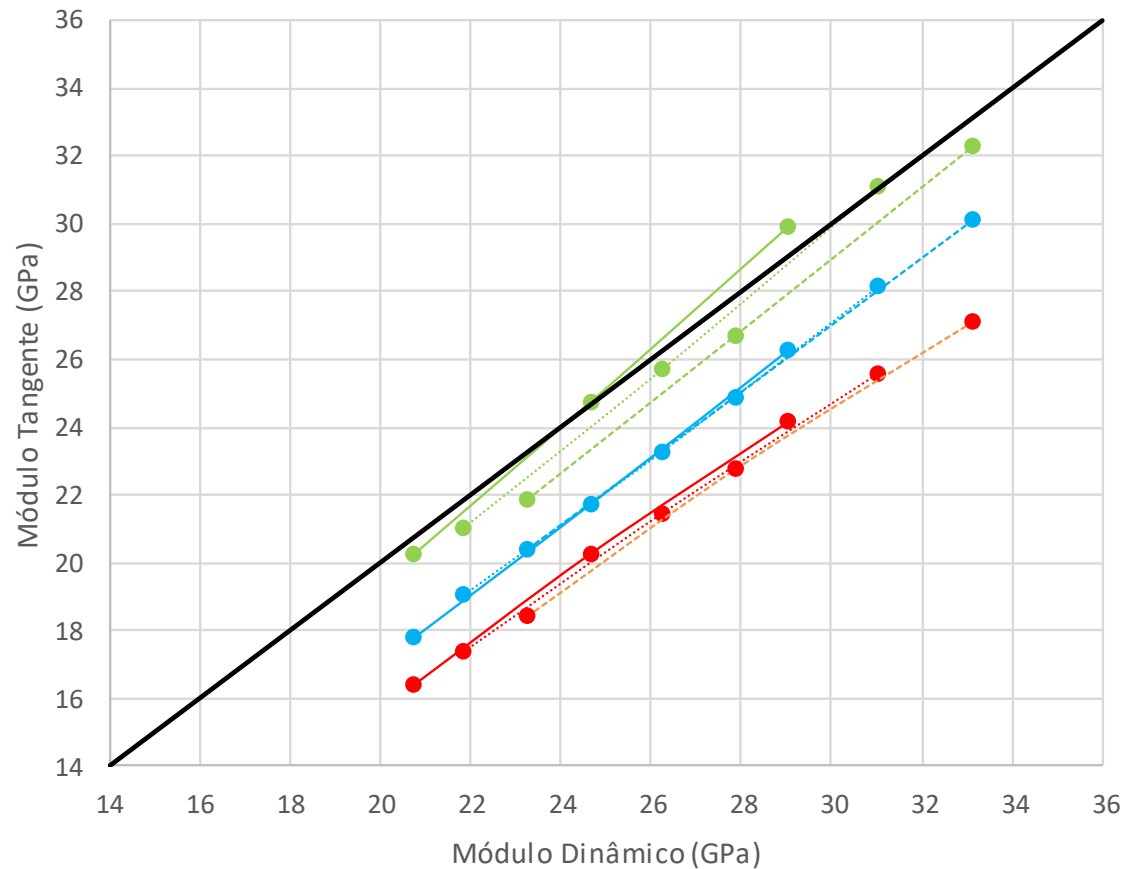
Fator água/cimento	Et (GPa)	Ed (GPa)	Diferença (%)	Et (GPa)	Ed (GPa)	Diferença (%)	Et (GPa)	Ed (GPa)	Diferença (%)
	3 dias			7 dias			28 dias		
0,65	14,85	20,75	39,75	18,71	24,67	31,82	23,23	29,05	25,08
0,60	16,14	21,86	35,45	20,31	26,25	29,27	25,14	31,05	23,50
0,55	17,40	23,25	33,61	22,02	27,87	26,55	27,23	33,14	21,73
0,45	20,31	26,15	28,80	25,49	31,4	23,22	31,41	37,27	28,66



Módulo de Elasticidade por Frequência Ressonante Forçada

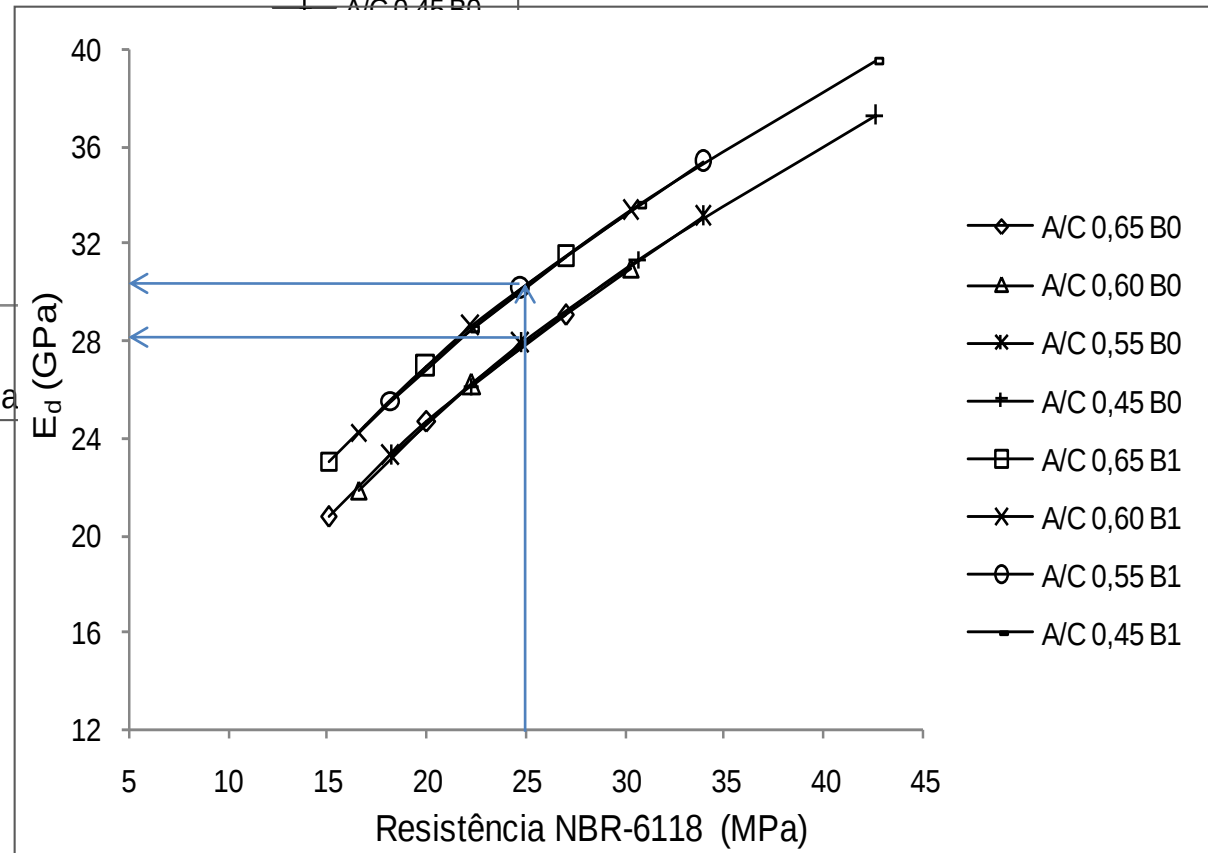
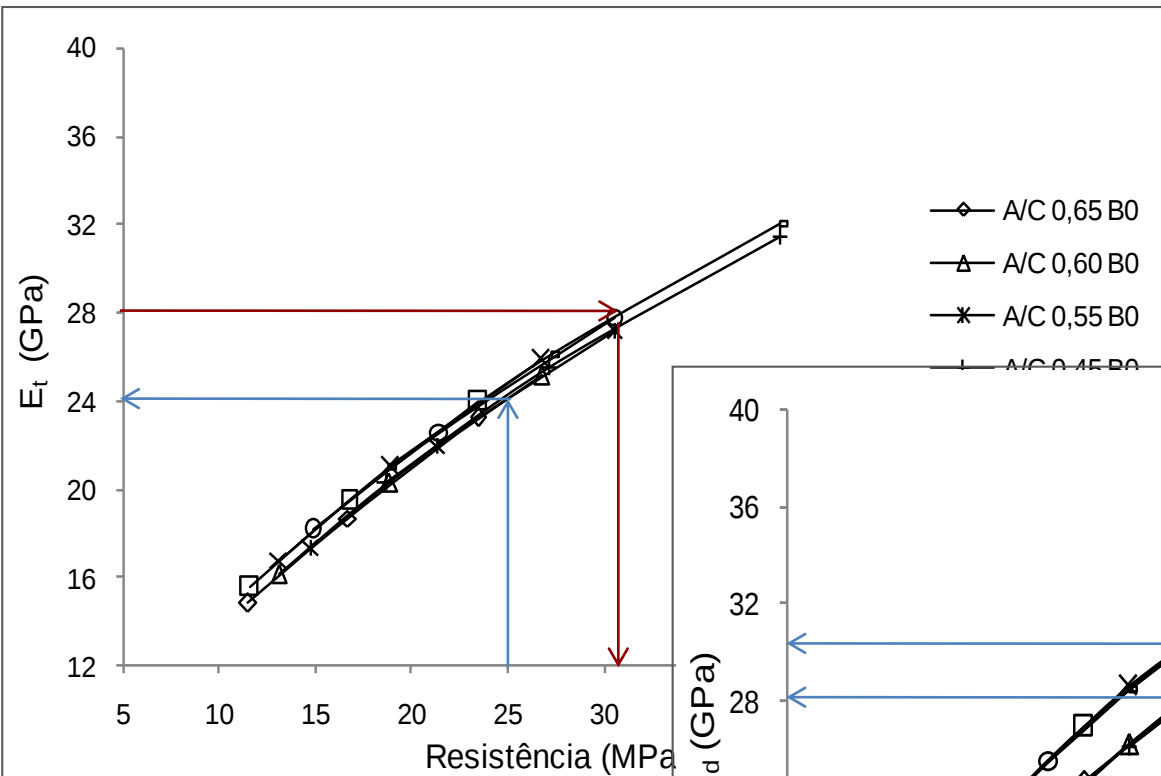


Módulo de Elasticidade por Frequência Ressonante Forçada



- NBR - A/C 0,65
- ACI - A/C 0,65
- CEB/FIP - A/C 0,65
- NBR - A/C 0,60
- ACI - A/C 0,60
- CEB/FIP - A/C 0,60
- NBR - A/C 0,55
- ACI - A/C 0,55
- CEB/FIP - A/C 0,55
- Dinâmico = Tangente

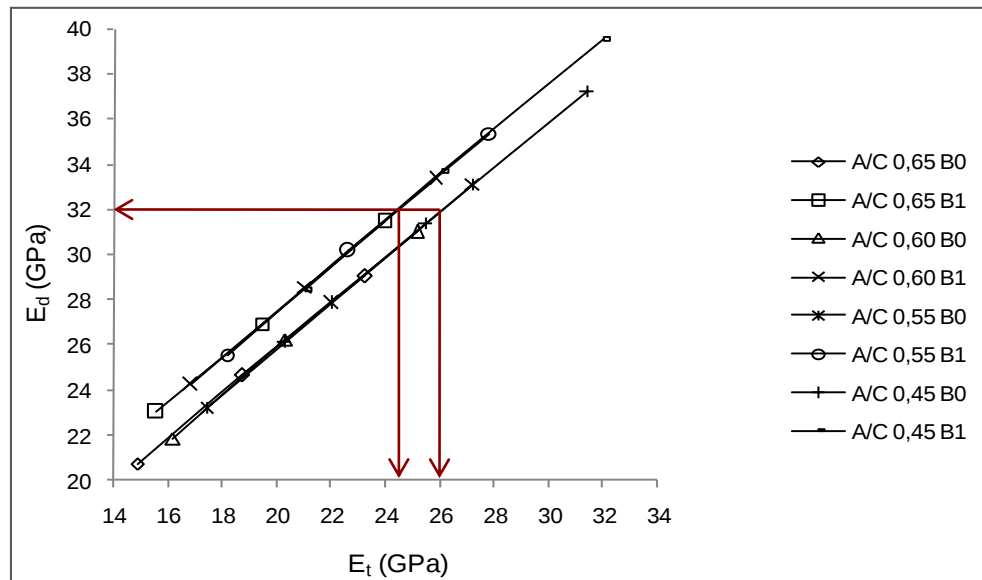
Módulo de Elasticidade por Frequência Ressonante Forçada



Módulo de Elasticidade por Frequência Ressonante Forçada

Mehta e Monteio: módulo dinâmico é geralmente 20, 30 e 40% maior do que o módulo estático de deformação para concretos de alta, média e baixa resistência, respectivamente.

Coutinho e Gonçalves: a razão entre o módulo tangente e o dinâmico é em torno de 0,5 para concretos de baixa resistência, crescendo para perto de 0,8 com o aumento da resistência.



Módulo de elasticidade dinâmico



Menor consumo de materiais

OBRIGADO

teresa@ufmg.br

