

CONSIDERAÇÕES SOBRE A SEGURANÇA ESTRUTURAL E A RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO DO CONCRETO



"do Laboratório de Pesquisa aos Canteiros de Obras"

Paulo Helene

*Prof. Titular da Universidade de São Paulo USP
Vice-Presidente do Instituto Brasileiro do Concreto IBRACON
Coordenador Internacional de la Red Rehabilitar CYTED
Member of fib(CEB-FIP) Model Code for Service Life Design*

28 de abril de 2009 terça-feira, 18:30h

Sede da ABECE

Av. Brigadeiro Faria Lima 1993 cj.61

1



Sumário

IBRACON

1. Edifício padrão
2. Controle → corpos-de-prova
3. Avaliação → testemunhos
4. Estudo de 2 casos
5. Idade do concreto vs relaxação
6. Concreto de alto desempenho
7. Vida útil

2



Edifício Padrão

IBRACON

- 25 pavimentos, sendo 22 pavimentos tipo
- 2 subsolos de garagens + térreo (média 650m²)
- $f_{ck} = 30\text{MPa}$ $E_{co,4} = 27\text{ GPa}$
- espessura média de 21.5cm
- andar tipo:
 - lajes → aço: 3.600kg forma: 576m² concreto: 70m³
 - vigas → aço: 4.400kg forma: 410m² concreto: 37m³
 - pilares → aço: 5.100kg forma: 432m² concreto: 33m³
- pilares:
 - aço = 40% forma=30% concreto = 24%

Direitos Reservados 2009

3

3



Edifício Padrão

IBRACON

25 pavimentos → 22 + 2 + 1

- concreto 30MPa, 10cm, B1 → 3.500 m³ R\$ 292,00 / m³
- aço CA50 (100kg/m³) → 350t R\$ 3.90 / kg
- fôrma (11m²/m³) → 38.500m² R\$ 30.00 / m²
- R\$ 1.012,00 / m³ de estrutura pronta
 - concreto r\$ 1.022.000,00 28.8%
 - aço r\$ 1.365.000,00 38.6%
 - forma R\$ 1.155.000,00 32.6%
- $f_{ck} = 30\text{MPa}$ → R\$ 240,00/m³
- $f_{ck} = 50\text{MPa}$ → R\$ 350,00/m³

Direitos Reservados 2009

4

4



corpos-de-prova padrão → exemplar

IBRACON

- cilíndricos diâmetro de 15cm e altura 30cm (176.7cm²);
- aceita-se diâmetro de 10cm e altura de 20cm (78.5cm²);
- para $f_{ck}=50\text{MPa}$ → (65MPa) → prensa + 20% → 138t & 62t → limite 100t (45MPa & 100MPa) → 200t (95MPa & 200MPa)
- moldado, câmara úmida, temperatura, capeado ou retificado, ensaio estático, monotônico crescente, instantâneo (<10 minutos), velocidade controlada → **condições ideais**;
- mais de 50 “fontes” de interferência nefastas no resultado de resistência à compressão;
- dois ou mais irmãos adotar o maior → exemplar;
- 3.500m³ → caminhão 8m³ → 440 exemplares → 880 cps

Direitos Reservados 2009

5

5



corpos-de-prova padrão → exemplar

IBRACON

- amostragem no terço médio do volume do caminhão
- exemplo → NBR 11562:1990. Fabricação e Transporte de Concreto para Estruturas de Centrais Nucleoelétricas. (*Bureau of Reclamation*)

**“desvio relativo à média de 7,5% para
resistência à compressão dentro do
balão do caminhão betoneira
(40MPa → 37MPa a 43MPa)”**

Direitos Reservados 2009

6

6



corpos-de-prova padrão → exemplar

IBRACON

- exemplo → NBR 7215:1996. Cimento Portland. Determinação da Resistência à Compressão.

“em condições ideais de laboratório, no ensaio de argamassa padrão/areia IPT:

- **molda 4 cps irmãos → tolera desvio relativo à média de 6% (40MPa → 37MPa a 43MPa) para 1 vez;**
- **no caso de repetibilidade 10%; e,**
- **no caso de reprodutibilidade 15% (40MPa → 34MPa a 46MPa)”**

Direitos Reservados 2009

7

7



corpos-de-prova padrão → exemplar

IBRACON

f_c

valor duvidoso, dependente de operações de ensaio, sujeito a efeitos climáticos, sujeito ao fator humano, variabilidade intrínseca, porém admitido como

**resistência máxima
potencial na boca da
betoneira**

*portanto na obra será sempre menor.
quanto?*

Direitos Reservados 2009

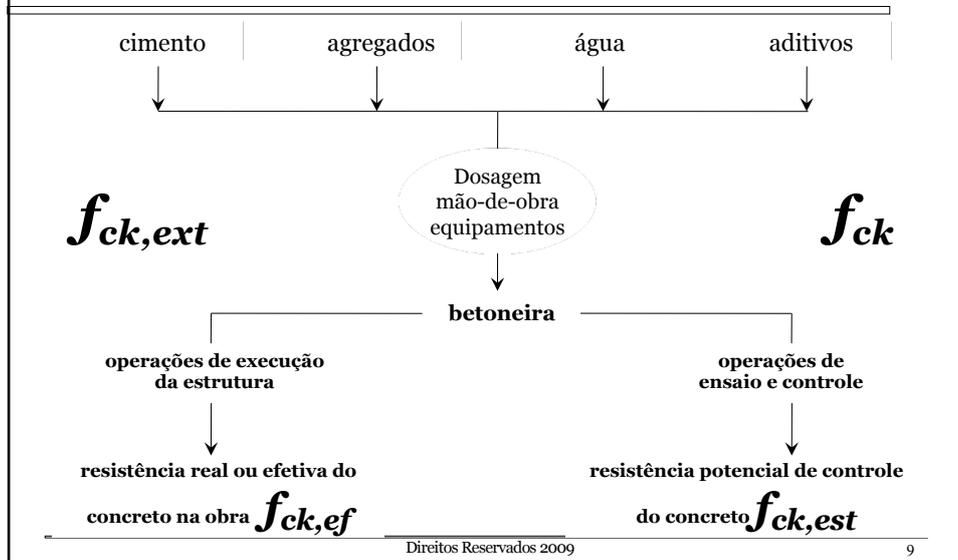
8

8



corpos-de-prova padrão → exemplar

IBRACON



9



corpos-de-prova padrão → exemplar

IBRACON

- f_{ck} → resistência característica do concreto à compressão axial obtida no cp padrão especificada pelo projetista (*máxima e hipotética!*);
“desejaria que 95% do volume de concreto entregue tivesse $f_c \geq f_{ck}$ (30MPa), ou seja, pode existir pequena quantidade de concreto com $f_c < f_{ck}$ → 3.500m³ posso admitir 175m³ (22 caminhões!)”
- $f_{ck,ef}$ → resistência característica efetiva do concreto à compressão na obra (*impossível!*) sendo a única certeza que é MENOR do que f_{ck}

Direitos Reservados 2009

10

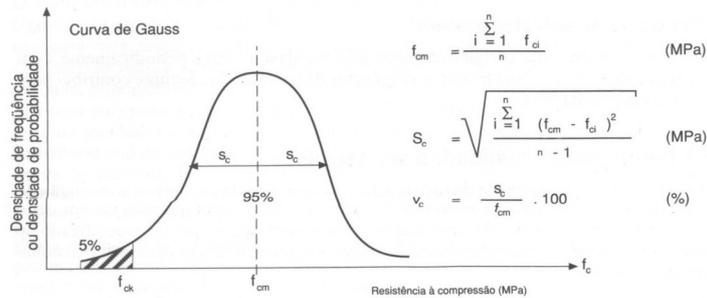
10



corpos-de-prova padrão → exemplar

IBRACON

- $f_{ck,est}$ → resistência característica estimada do concreto à compressão axial obtida de exemplares representativos das unidades de produto (betoneira), que deve atender $f_{ck,est} \geq f_{ck}$;
- no caso de amostragem parcial ou total;
no caso de amostragem total a 100%, para 3.500m³, ou seja, 440 caminhões, posso ter 22 caminhões abaixo de f_{ck} !



11



corpos-de-prova padrão → exemplar

IBRACON

- segurança da estrutura baseada em resultados de $f_{ck,est}$ deve ser julgada com bom senso, flexibilidade e competência
- não se trata de julgamentos estritos, absolutos e DETERMINISTAS pois a realidade da construção de uma estrutura “exige” uma visão ESTOCÁSTICA ou probabilista, ou seja, postura flexível e holística
- conclusão / advertência fundamental:

“a conformidade (probabilista) do concreto entregue $f_{ck,est}$ deve ser analisada de forma independente da segurança do elemento estrutural”

Direitos Reservados 2009

12

12



corpos-de-prova padrão → exemplar

IBRACON

raciocinando por absurdo porém conforme com a teoria vigente da introdução da segurança no projeto estrutural e de acordo com as definições e conceitos atuais:

“uma Concreteira pode fornecer um caminhão com concreto de apenas 10MPa para uma estrutura de $f_{ck}=30MPa$ e ainda estar conforme com o pedido e a normalização vigente, ou seja, dentro da lei”

Direitos Reservados 2009

13

13



corpos-de-prova padrão → exemplar

IBRACON

raciocinando por absurdo porém conforme com a teoria vigente da segurança estrutural e de acordo com as definições e conceitos atuais:

“uma Concreteira pode fornecer um caminhão com concreto de apenas 10MPa para uma estrutura de $f_{ck}=30MPa$ e ainda estar conforme com o pedido e a normalização vigente”

porém

“um pilar não pode receber um concreto com $f_{ck,est}$ muito abaixo de f_{ck} . Então quanto abaixo é razoável admitir?”

Direitos Reservados 2009

14

14



testemunhos extraídos

NBR 7680:2007; NBR 12655:2006

IBRACON

- ✓ cilíndrico, cúbico ou prismático;
- ✓ testemunhos devem ser íntegros (descartar → vazios, ninhos, madeira, armadura, falhas, fissuras, ...);
- ✓ f_c deve ser superior a 8MPa na ocasião da extração;
- ✓ $\Phi \geq 100\text{mm}$ e sempre $\Phi \geq 3D_{max}$ do agregado;
- ✓ recomendações rigorosas com relação aos equipamentos e operações de extração... cuidados! (água, fixação, ortogonalidade, quebra, transporte, sazonalidade, corte, capeamento, retificação, ensaio,...)
- ✓ $1 \geq h/\Phi \geq 2$ (evitar montagem...Anexo A permite...)
- ✓ secos ao lab. ou saturados sup. seca → ambos 48h
- ✓ *ensaio com total desagregação, observar e registrar com fotos*

Direitos Reservados 2009

15

15

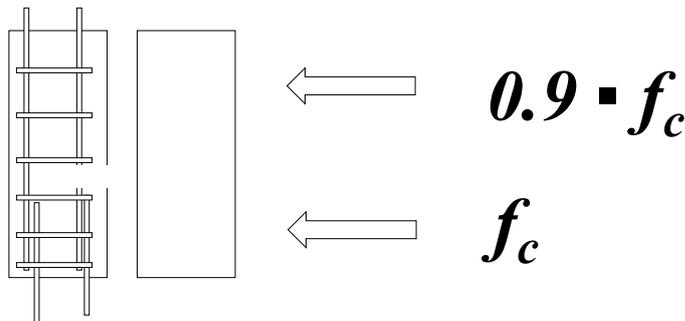


testemunhos extraídos

NBR 7680:2007; NBR 12655:2006

IBRACON

- ✓ não cortar armadura (pacômetro);
- ✓ evitar extrair de lajes, dar preferência a vigas;
- ✓ pilares evitar topo e pé, extrair logo acima dos arranques;
- ✓ pilares evitar extrair mais de um, se necessário mesma prumada;



Direitos Reservados 2009

16

16

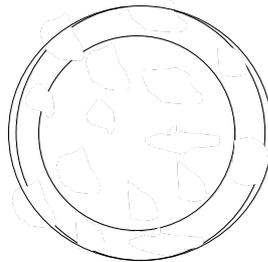


testemunhos extraídos

NBR 7680:2007; NBR 12655:2006

IBRACON

- ✓ o ACI 437:2003 Strength Evaluation of Existing Concrete Buildings no item 3.1.3.1 alerta que:
para $f_{ck} = 20\text{MPa} \rightarrow f_{ck,ext} = 1.0 \cdot f_{ck,ef}$
para $f_{ck} = 60\text{MPa} \rightarrow f_{ck,ext} = 0.7 \cdot f_{ck,ef}$
- ✓ dar preferência a testemunhos de maior diâmetro;



influência nefasta da coroa
($1/6 \Phi$) para $D_{max}=19\text{mm}$:

$\Phi = 15\text{cm} \rightarrow -8\%$

$\Phi = 10\text{cm} \rightarrow -11\%$

$\Phi = 7,5\text{cm} \rightarrow -15\%$

$\Phi = 5,0\text{cm} \rightarrow -22\%$

Direitos Reservados 2009

17

17



testemunhos extraídos

NBR 7680:2007; NBR 12655:2006

IBRACON

Problemática:

→ a resistência à compressão do concreto obtida a partir de testemunhos extraídos, $f_{ck,ext}$ é sempre inferior à resistência efetiva da estrutura, $f_{ck,ef}$ que por sua vez é sempre inferior à resistência máxima potencial obtida de corpos-de-prova moldados (padrão), $f_{ck,est} \approx f_{ck}$;

$$f_{ck,ext} < f_{ck,ef} < f_{ck,est} \approx f_{ck}$$

→ o correto seria ter 2 coeficientes de correção, um para aumentar de extraído a efetivo e outro para aumentar de efetivo ao estimado (f_{ck});

Direitos Reservados 2009

18

18



testemunhos extraídos

NBR 7680:2007; NBR 12655:2006

IBRACON

Problemática:

- a teoria de introdução da segurança no projeto estrutural atual e em vigor (método semi-probabilista), adota como parâmetro principal de cálculo o f_{ck} de projeto;

$$f_{cd} = f_{ck} / \gamma_c$$

- esse valor é o máximo potencial na boca da betoneira. Todos os demais, $f_{ck,ef}$ e $f_{ck,ext}$ são inferiores a esse, apesar de se tratar do mesmo concreto;

Direitos Reservados 2009

19

19



testemunhos extraídos

NBR 7680:2007; NBR 12655:2006

IBRACON

Problemática:

- esse valor é o máximo potencial na boca da betoneira. Todos os demais, $f_{ck,ef}$ e $f_{ck,ext}$ são inferiores a esse, apesar de se tratar do mesmo concreto;
- a questão é como passar de $f_{ck,ext}$ a $f_{ck,est}$ e refazer os cálculos com esse “novo” valor de $f_{ck,est} = f_{ck}$
- o correto seria ter 2 coeficientes de correção, um de extraído a efetivo e outro de efetivo ao estimado (f_{ck});

$$f_{ck,ext} \rightarrow f_{ck,ef} \rightarrow f_{ck,est} \approx f_{ck}$$

Direitos Reservados 2009

20

20



testemunhos extraídos

NBR 6118:2003; NBR 7680:2007; NBR 12655:2006

IBRACON

PRIMEIRA CORREÇÃO → *extraído a efetivo*

→ *não tem coeficiente consagrado, vale bom senso. Diâmetros menores que 15cm é razoável aumentar de 5% a 10%*

$$f_{ck,ef} = 1.05 \text{ a } 1.1 \cdot f_{ck,ext}$$

SEGUNDA CORREÇÃO → *efetivo (extraído) a estimado*

→ *12.4.1 da NBR 6118:2003 → com base na teoria da segurança:*

$$f_{ck,est} = 1.1 \cdot f_{ck,ext}$$

aceitando uma redução de γ_c em nome da maior representatividade de $f_{ck,ext}$ em relação a $f_{ck,ef}$

Direitos Reservados 2009

21

21



testemunhos extraídos

NBR 6118:2003; NBR 12655:2006

IBRACON

SEGUNDA CORREÇÃO → *extraído (efetivo) a estimado*

→ *a NBR 6118 de 1978 permitia considerar :*

$$f_{ck,est} = 1.15 \cdot f_{ck,ext}$$

mais coerente e mais justo

→ *o ACI 437:2003 Strength Evaluation of Existing Concrete Buildings no item 5.1.1 recomenda:*

$$f_{ck,est} = 1.18 \cdot f_{cm,ext}$$

→ *o ACI 318:2005 Building Code Requirements for Structural Concrete, nos itens 9.3 e 20.2, recomenda:*

$$f_{ck,est} = 1.21 \text{ a } 1.23 \cdot f_{ck,ext}$$

Direitos Reservados 2009

22

22



testemunhos extraídos

estudo de caso $\rightarrow f_{ck} = 35\text{MPa}$

IBRACON

pilar	c. betoneira 1	c. betoneira 2	c. betoneira 3
P11	29.5	30.9	28.7
P12	31.6	32.2	32.6
P13	33.0	34.2	33.7
P11	34.3	34.5	35.3
P14	35.2	35.1	35.4
P14	35.4	35.6	35.6
P13	35.9	36.8	35.7
P12	37.4	37.2	36.7
P15	37.7	37.3	36.9
P16	37.9	38.5	38.7
f_{em} (MPa)	34.8	35.2	34.9
s_c (MPa)	2.76	2.38	2.76
v_c (%)	8%	7%	8%

Direitos Reservados 2009

23

23



testemunhos extraídos

estudo de caso $\rightarrow f_{ck} = 35\text{MPa}$

IBRACON

pilar	mesma betoneira	diferença
P101	39.2	+ 12.0%
P102	32.2	- 8.0%
P112	33.7	-3.7%
P113	32.2	-8.0%
P114	32.2	-8.0%
P115	33.5	-4.3%
P134	34.7	-0.8%
P168	33.7	-3.7%

Direitos Reservados 2009

24

24



testemunhos extraídos recomendações “bom senso”

IBRACON

- até 10% em pilares e vigas
- até 20% no caso de lajes
- são considerados “alertas” pois as “incertezas naturais” cobrem essas diferenças;
- diferenças dessa ordem jamais justificam paralizações na execução da obra;
- não justificam reforço
- podem justificar pagar pelo f_{ck} menor, lembrando que:

NBR 8953:1992

C20 ; C25 : C30 ; C35 ; C40 ; C45 : C50
C30 ($\pm 10\%$)

Direitos Reservados 2009

25

25

ABECE Eventos Encontro Mensal

Introdução da Relaxação no Projeto das Estruturas de Concreto. “A problemática da idade de ruptura do testemunho vs segurança da estrutura”



“do Laboratório de Pesquisa aos Canteiros de Obras”

Paulo Helene

Prof. Titular da Universidade de São Paulo USP
Vice-Presidente do Instituto Brasileiro do Concreto IBRACON
Coordenador Internacional de la Red Rehabilitar CYTED
Member of fib(CEB-FIP) Model Code for Service Life Design

Direitos Reservados 2009

26



Bibliografia

IBRACON

1. **Bernard Fouré.** Étude Experimentale de la Résistance du Béton sous Contrainte Soutenue. Annales de l'Institut Technique du Batiment et des Travaux Publics ITBTP, n. 435, Juin 1985. p. 2-22
2. **Hubert Rüsçh.** Researches Toward a General Flexural Theory for Structural Concrete. ACI Journal, July 1960. p. 1-28
3. **Márcio Corrêa & Márcio Ramalho.** Considerações sobre a Evolução dos Esforços Solicitantes nas Estruturas de Concreto Armado para Edifícios. Brasília, Seminários Encol / SENAI, 1993.
4. **Paulo Helene.** A Resistência do Concreto sob Carga Mantida e a Idade de Estimativa da Resistência Característica. III Simpósio EPUSP sobre Estruturas de Concreto. São Paulo, Dez. 1993. p. 271-282
5. **Péricles Brasiliense Fusco.** Resistência do Concreto Comprimido. Brasília, 35 Congresso Brasileiro do Concreto, IBRACON, v. 2, Junho 1993. p. 467-483

Direitos Reservados 2009

27

27

IBRACON

Relaxação

conceito de relaxação
“strength relaxation”
→ para concreto

“relaxação de resistência”

Direitos Reservados 2009

28

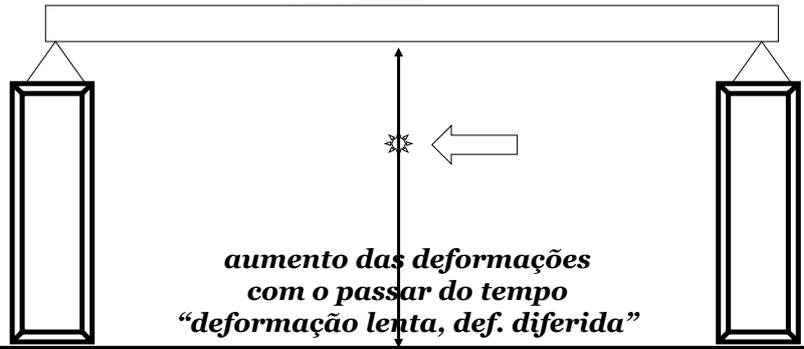
28

Fluência

carga constante por tempo longo



carga de longa duração (> 10 minutos)

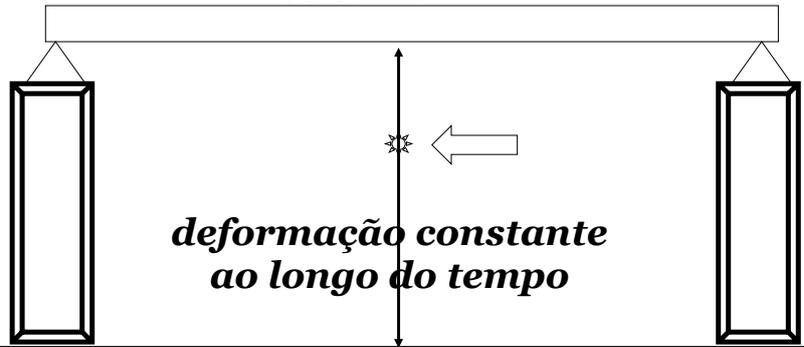


Relaxação

carga de longa duração (> 10 minutos)



retirando carga para manter deformação cte.



IBRACON

Relaxação

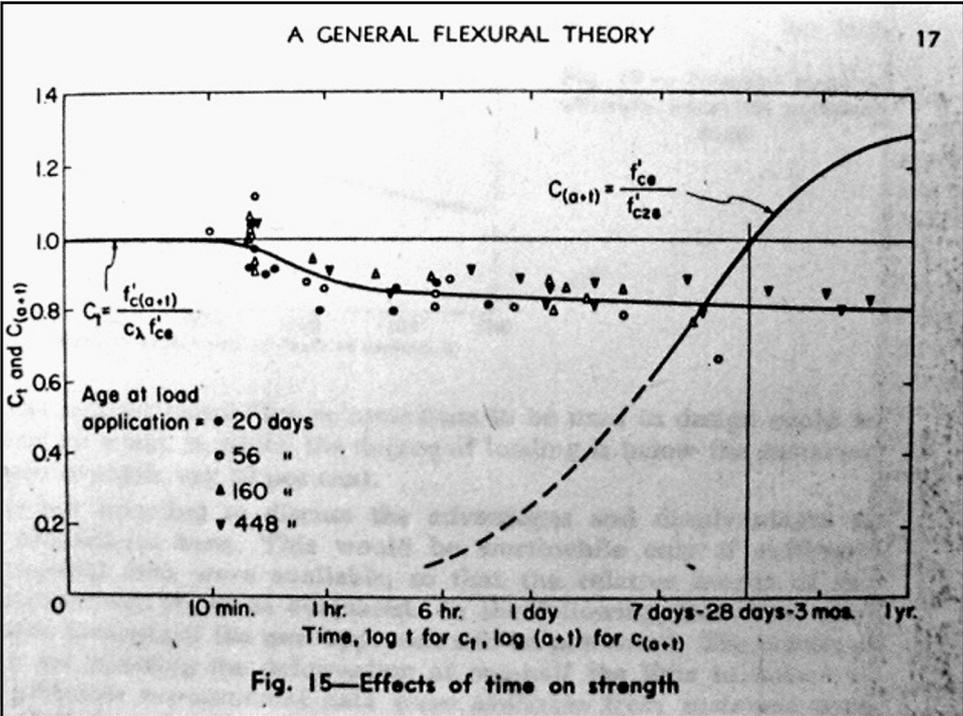
efeitos das cargas de longa duração

relaxação

fluência

Direitos Reservados 2009 31

31



32

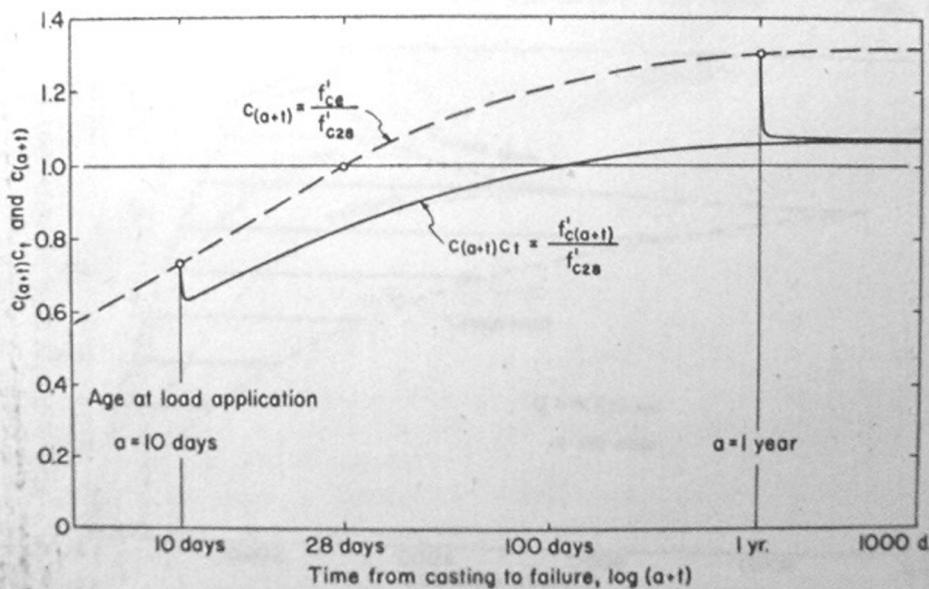


Fig. 17—Effect of age at load application on sustained load strength

33

IBRACON

NBR 8681:2004

Ações e Segurança

*introdução da segurança no
projeto estrutural*

Direitos Reservados 2009

34

34

ações 4.2.3.1

$$\gamma_f = \gamma_{f1} \cdot \gamma_{f2} \cdot \gamma_{f3} = 1.4$$

γ_{f3} → coeficiente de majoração
das ações devido a problemas
construtivos

resistências 5.2.3.1

$$\gamma_c = \gamma_{c1} \cdot \gamma_{c2} \cdot \gamma_{c3} = 1.4$$

(1,18) γ_{c1} → $s_{c,ef}$ da estrutura $\geq s_{c,est}$

(1,10) γ_{c2} → $f_{ck,ef} \neq f_{ck,est}$

(1,08) γ_{c3} → incertezas sobre **R**

Ações e Segurança

IBRACON

NBR 6118:2003; NBR 8681:2004

$$f_{cd} = \frac{f_{ck}}{\gamma_c} \quad \gamma_c = 1,4$$
$$\sigma_{cd} = f_{cd} * \beta = \frac{f_{ck}}{\gamma_c} * 0,85$$

para $f_{ck} = 30$ MPa $\rightarrow f_{ck,ef}$ (estrutura) $\approx \sigma_{cd} \approx 18,2$ MPa

para $f_{ck} = 50$ MPa $\rightarrow f_{ck,ef}$ (estrutura) $\approx \sigma_{cd} \approx 30,3$ MPa

Direitos Reservados 2009

37

37

NBR 6118:2003; NBR 8681:2004

IBRACON

0,85? $\approx \beta_{1,t} * \beta_{2,t}$

$\beta_{1,t} = 1,20 \rightarrow$ crescimento f_{ck} após t_0 até t_{infinito} (100 anos)

$\beta_{2,t} = 0,71 \rightarrow$ decréscimo de f_{ck} devido às cargas de longa duração, aplicadas na idade t_0 até t_{infinito} (100 anos)

$t_0 =$ idade de aplicação da carga de longa duração

(cargas permanentes + parte das acidentais)

Direitos Reservados 2009

38

38

????????????

IBRACON

**Como cresce e como
decrece a resistência
com o tempo ?**

Direitos Reservados 2009

39

39

????????????

IBRACON

**Como cresce a
resistência com o
tempo ?**

Direitos Reservados 2009

40

40

Crescimento da Resistência

IBRACON

CEB – FIP Model Code 1990
Bulletin d'Information 213/214, May 93

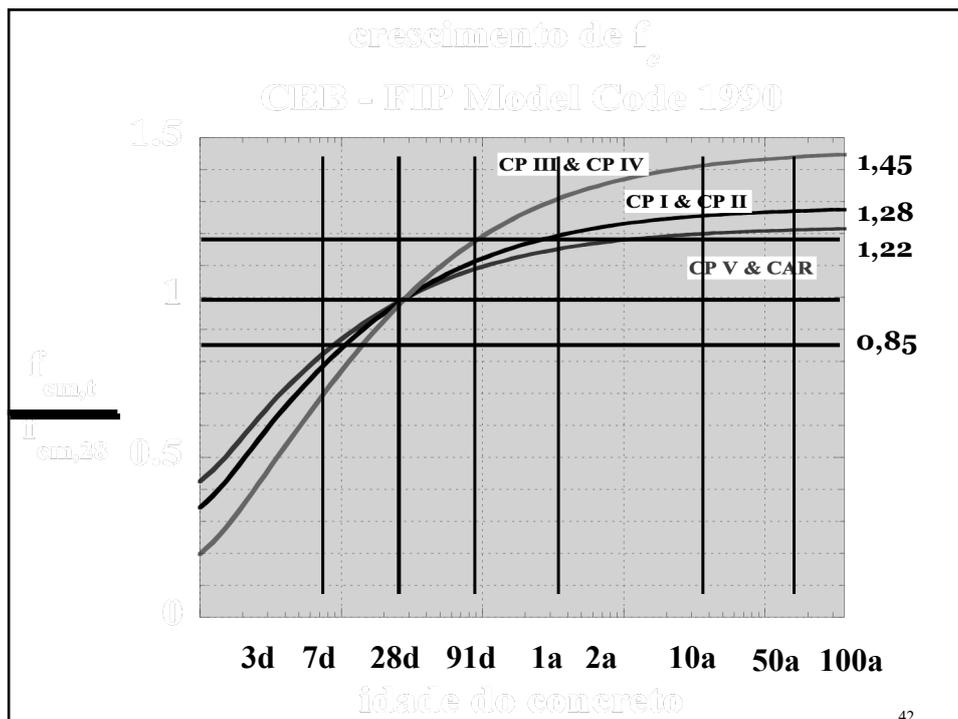
$$\frac{f_{cm,t}}{f_{cm,28}} = e^{s*(1-\sqrt{\frac{28}{t}})}$$

CPV ARI	→ s	= 0,2	→	1,22 → 100anos
CP I / II	→ s	= 0,25	→	1,28 → 100anos
CP III / IV	→ s	= 0,38	→	1,45 → 100anos

Direitos Reservados 2009

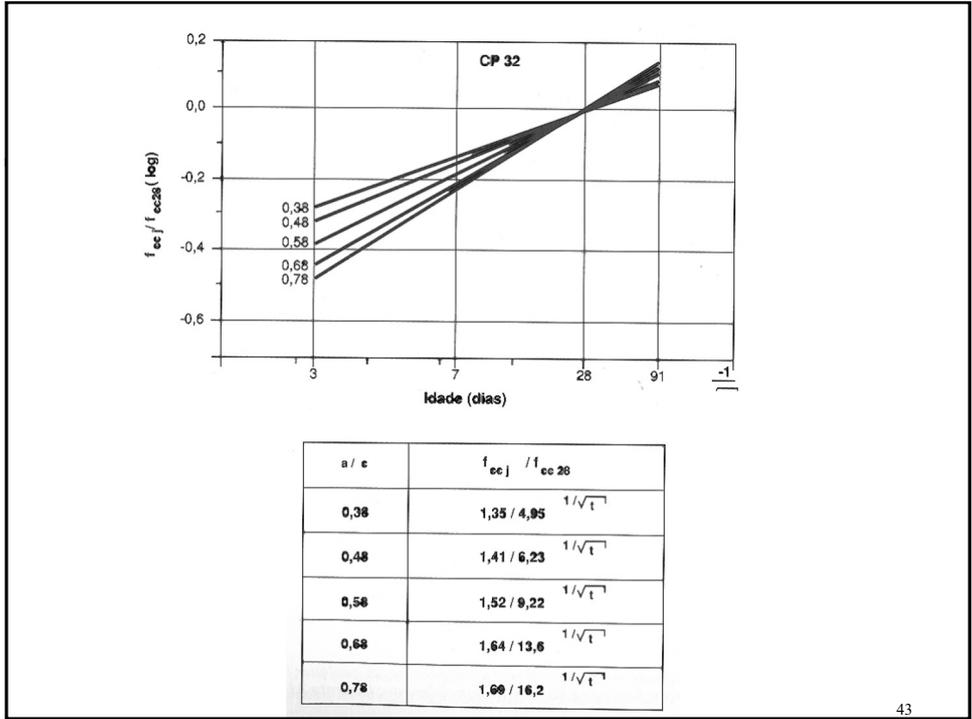
41

41

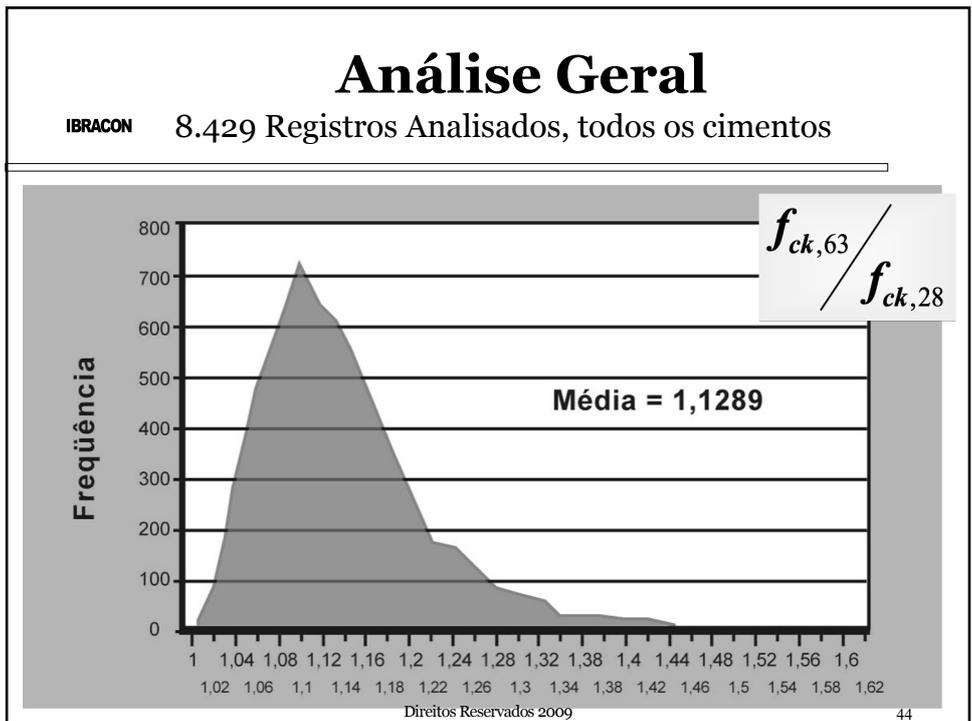


42

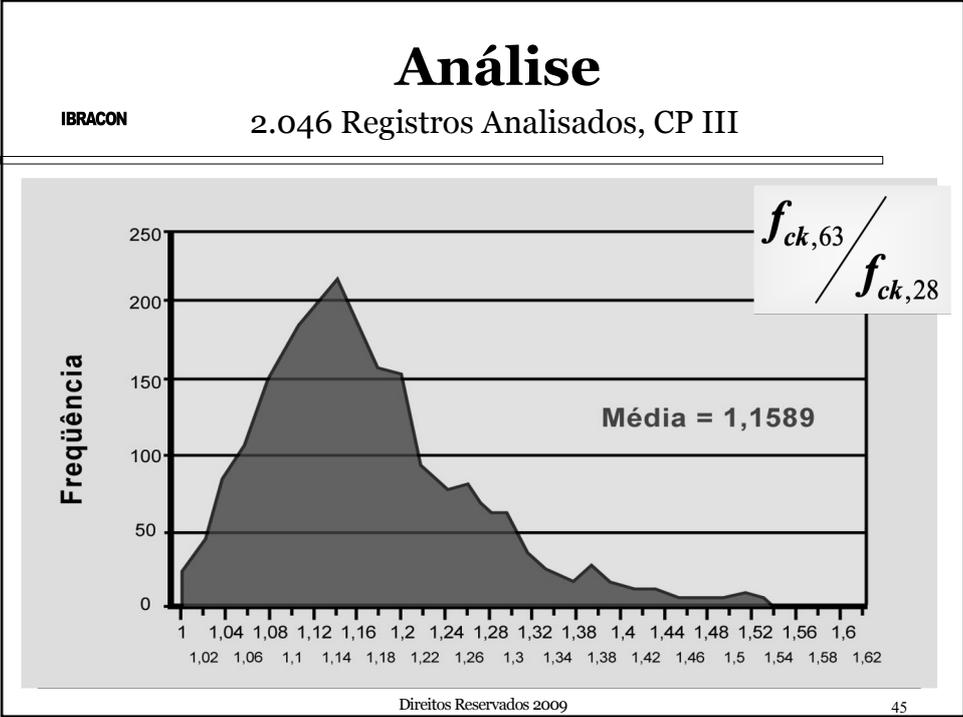
42



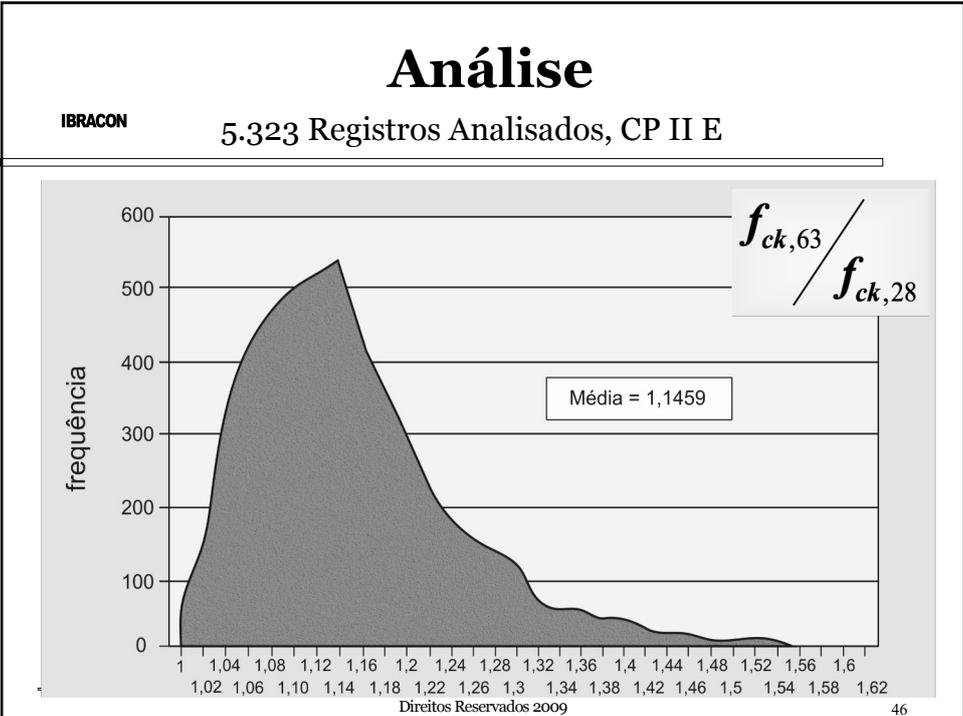
43



44



45

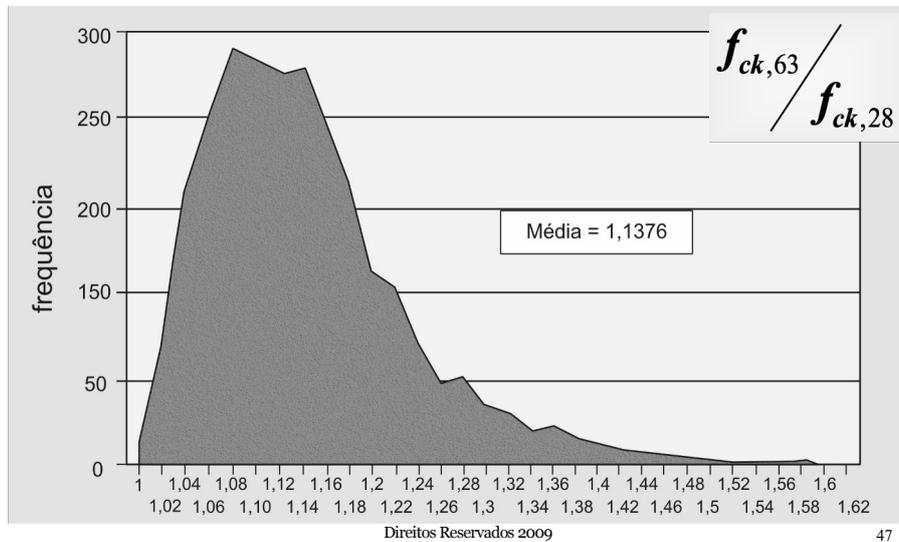


46

Análise

IBRACON

2.304 Registros Analisados, CP II Z



47

$\beta_{1,t} = \text{crescimento } f_{ck} \text{ após } t_o$

IBRACON

$$\beta_{1,t} = \frac{f_{cm,t_{\infty}}}{f_{cm,t}}$$

		28d
Rüsch (1960)		1,30
	• POZ & AF	1,45
CEB(1990)	• normal	1,28
	• ARI + CAR	1,22
NBR 6118:2003		1,20

Direitos Reservados 2009

48

48

????????????

Como decresce a resistência com o tempo ?

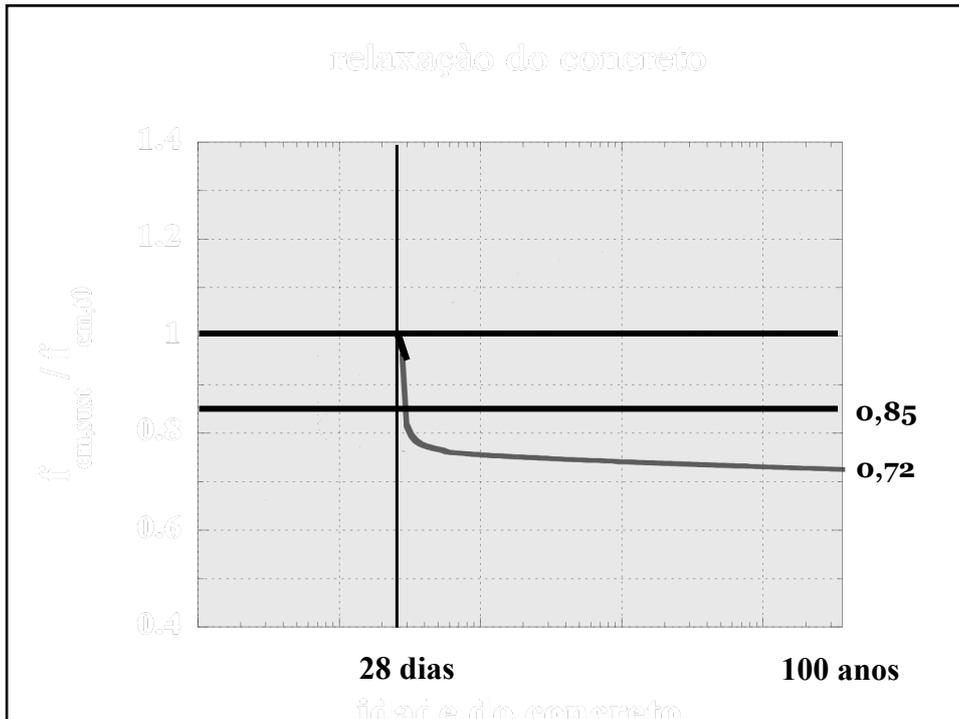
Relaxação das Resistências (efeito Rüsçh)

CEB – FIP Model Code 1990
Bulletin d'information 213/214, May 93

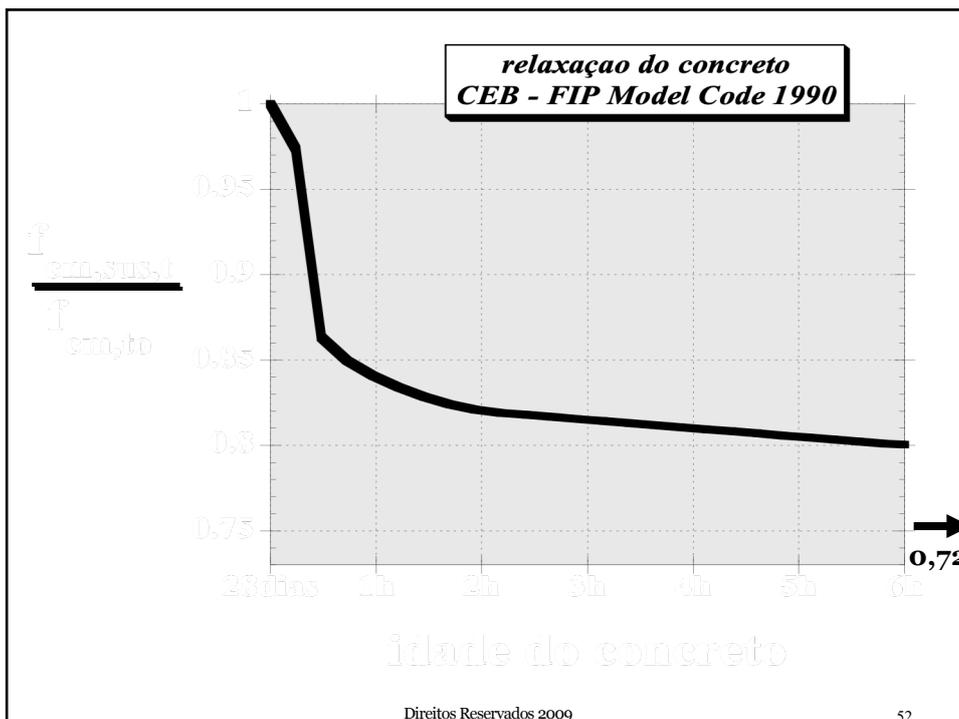
$$\frac{f_{cm,sus,t}}{f_{cm,t_0}} = 0,96 - 0,12 * \sqrt[4]{\ln\{72 * (t - t_0)\}}$$

→ t em dias

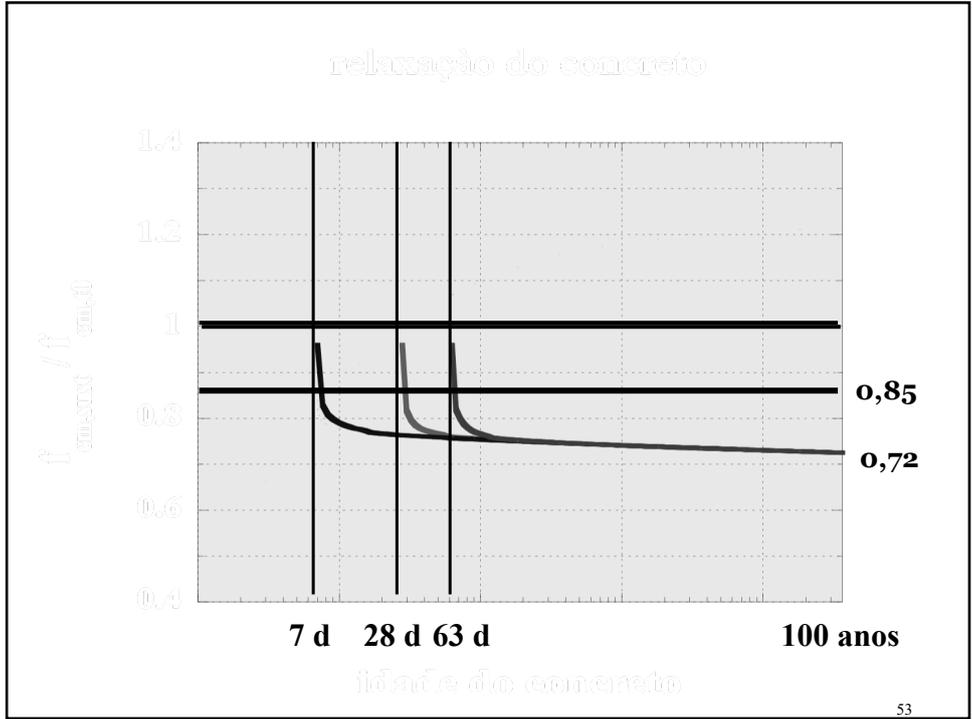
→ sob tensões elevadas??



51



52



53

$\beta_{2,t}$ = decréscimo de f_c devido às cargas de longa duração, aplicadas na idade $t_0 = q$

IBRACON

$$\beta_{2,t} = \frac{f_{cm,sus,t_\infty}}{f_{cm,t_0}}$$

	t infinito
Rüsch (1960)	0,75
CEB(1990)	0,72
NBR 6118:2003	0,71

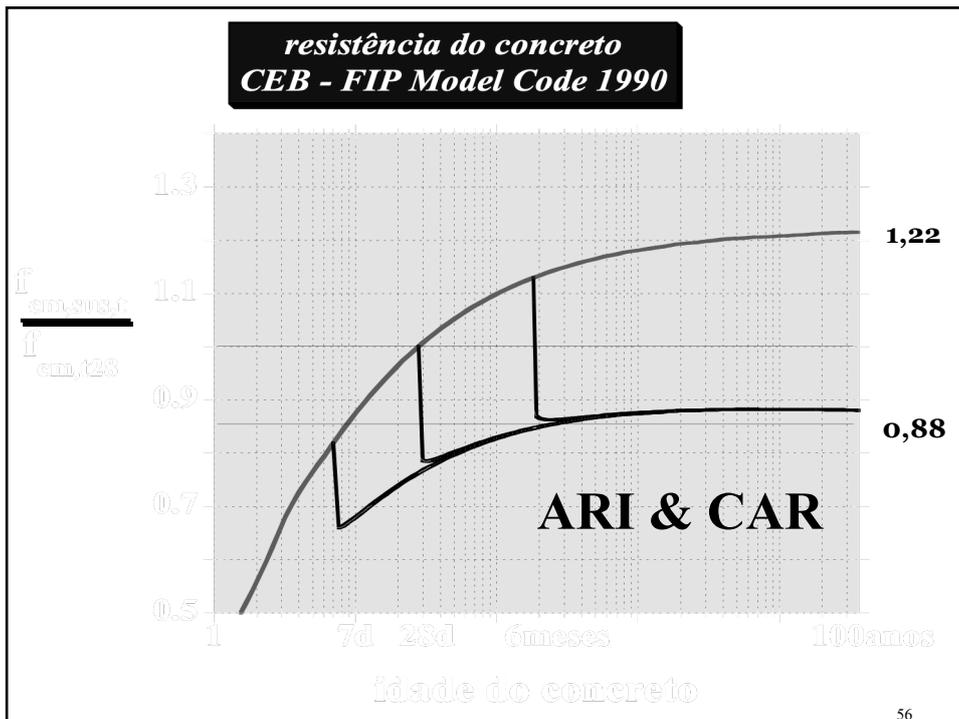
Direitos Reservados 2009 54

54

????????????

resistência do concreto com o tempo ?

55



56

Resistência

IBRACON

Resistência final do concreto a 100 anos de idade para cargas de longa duração aplicadas aos 7d, 28d, 1ano ou qualquer idade

		crece	decrece	resulta
Rüsch		1,30	0,75	0,98
	CP III & IV	1,45	0,73	1,05
CEB 90	CP I & II	1,28	0,73	0,92
	CP V & CAR	1,22	0,73	0,88
NBR 6118		1,20	0,71	0,85

Direitos Reservados 2009

57

57

Quando efetivamente os elementos estruturais são carregados?

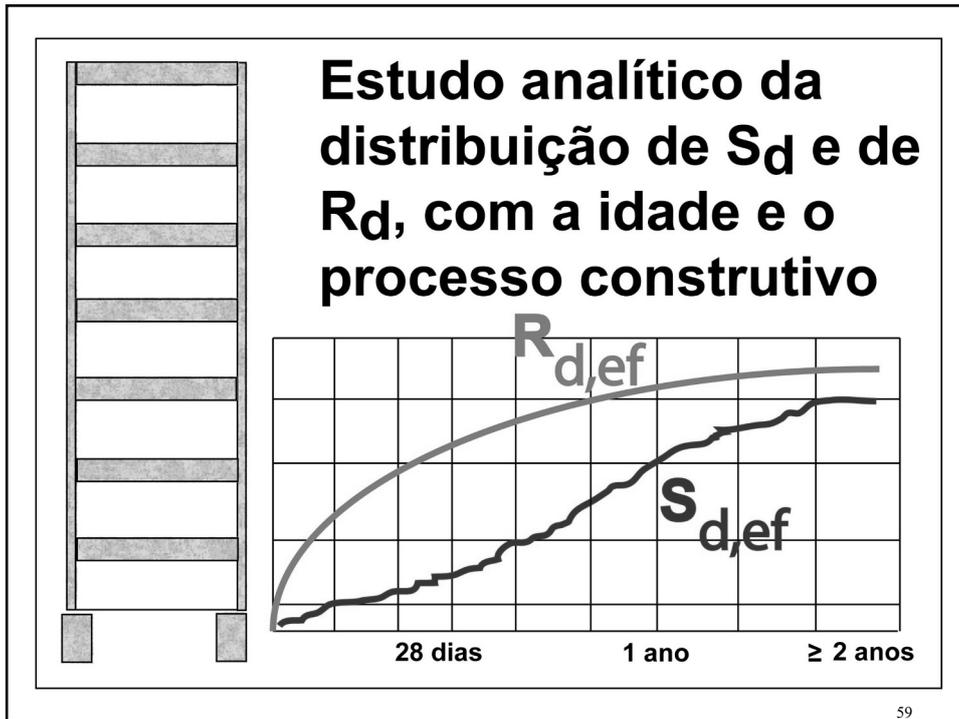
IBRACON

- lajes e vigas → 7 dias?
- pilares e fundações → 6 meses?

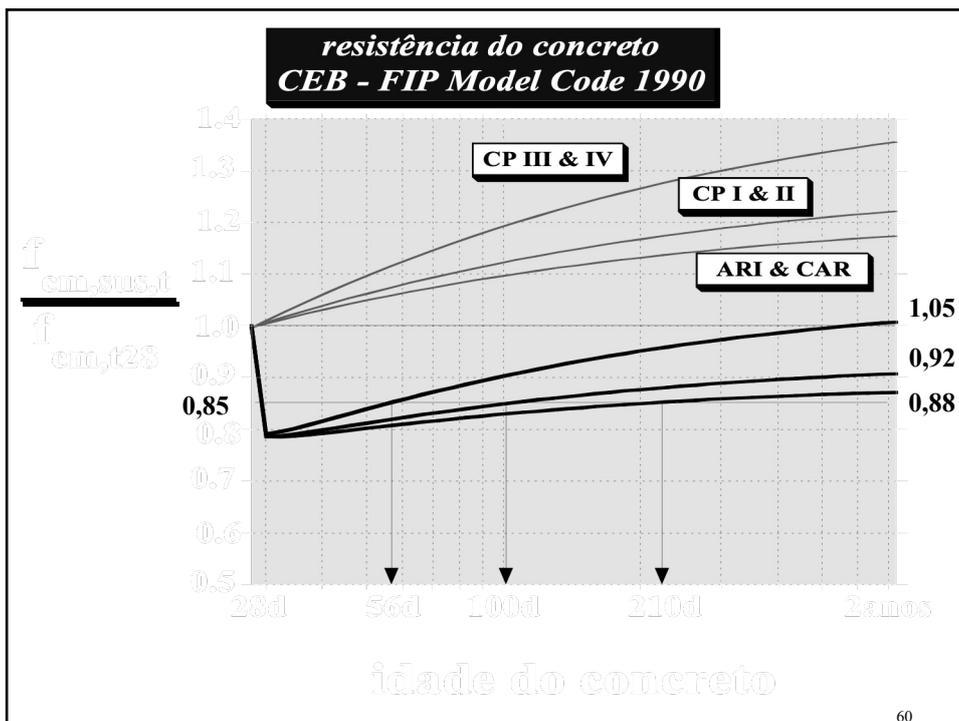
Direitos Reservados 2009

58

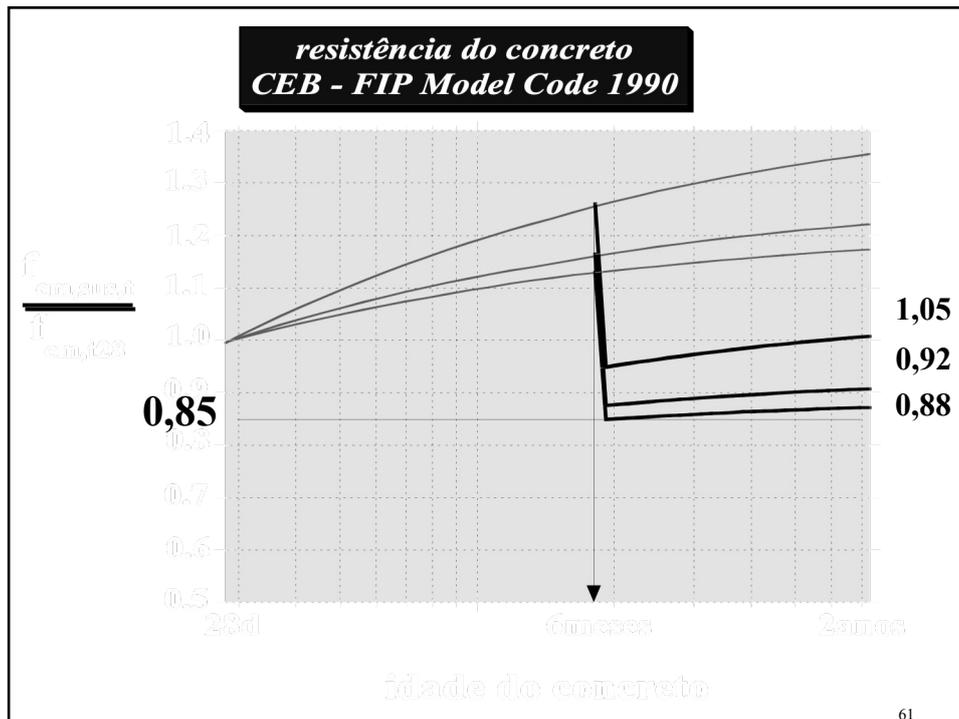
58



59



60



61

Dúvidas

IBRACON

Uma vez que o β é variável e depende da idade de carga e do concreto, faz sentido usar o coeficiente fixo

$\beta = 0,85?$

Direitos Reservados 2009

62

62

Em lugar de

$$\sigma_{cd} = \frac{f_{ck}}{\gamma_c} * 0,85$$

63

Proposta

$$\sigma_{cd} = \frac{f_{ck}}{\gamma_c} * \beta_t * \beta_{ci}$$

- β_t → idade de aplicação da carga
- β_{ci} → tipo de cimento e a / c

64

Dúvidas

- deveria diferenciar lajes (e vigas?) de pilares e existir pelo menos dois β etas \rightarrow 0.6 para lajes e 0.9 para pilares?
- testemunhos extraídos a elevadas idades (mais de 3meses, 6meses, 10anos) já incluem relaxação? No redimensionamento poderia dispensar o tal 0,85?

Propostas

- para rejeição de concreto precisa considerar a data de aplicação da carga elevada? Quanto? Acima de 70% da de projeto???.
- para edifícios com 25 pavimentos, com taxa de elevação de 1andar/semana, há vantagem em controlar f_{ck} a 63 dias, sem prejudicar a segurança, (*CP I, CP II, CP III, CP IV*) ?

Problema

IBRACON

1. O concreto não atendeu o f_{ck} de 28 dias mas com 63 dias o testemunho atendeu.
2. A carga efetiva só atuou a 6 meses.
3. Alterou a segurança?

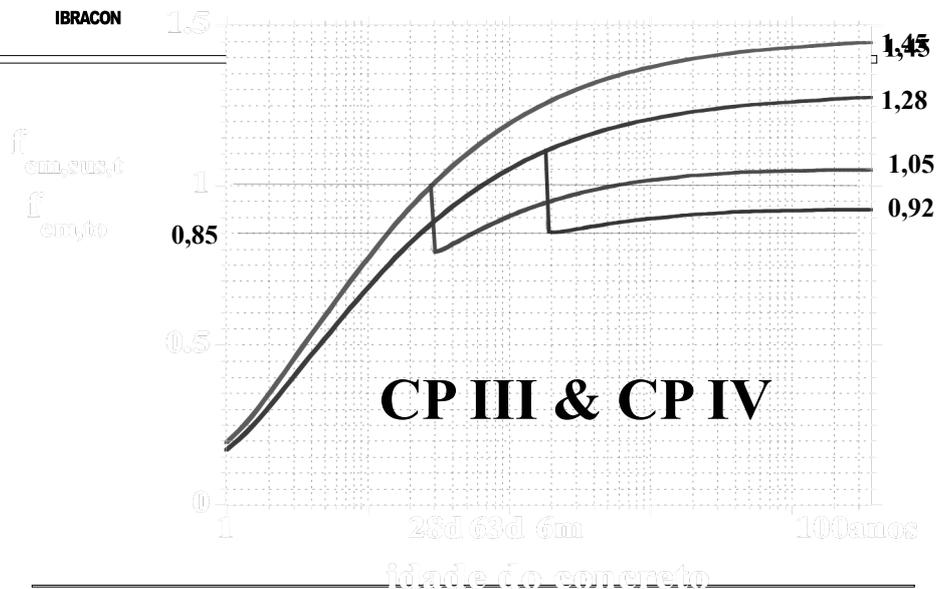
Direitos Reservados 2009

67

67

premissa de projeto: f_{ck} para 28 dias e carga aos 28 dias
alternativa: f_{ck} para 63 dias e carga a 6 meses (pilares)

IBRACON



Direitos Reservados 2009

68

68

Concreto de Alto Desempenho HPC

Pilar para 500t
substituir o $f_{ck} = 30\text{MPa}$
por um $f_{ck} = 50\text{MPa}$

Concreto de Alto Desempenho HPC

**Resultados
chocantes !!!**

Concreto de Alto Desempenho HPC

IBRACON

- considerando um pilar central típico → edifício de 25 andares
- seção quadrada, 3m de altura, armadura principal

f_{ck} (MPa)	taxa de armadura (%)/kg	seção (cm)	adotado (cm)
30	0.4 → 49kg	71.8 x 71.8	72 x 72
50	0.4 → 24kg	46.9 x 46.9	50 x 50
30	4.0 → 255kg	51.2 x 51.2	52 x 52
50	4.0 → 151kg	39.5 x 39.5	40 x 40

Direitos Reservados 2009

71

71

Edifício Padrão

IBRACON

25 pavimentos → 22 + 2 + 1

- concreto 30MPa, 10cm, B1 → 3.500 m³ R\$ 292,00 / m³
- aço CA50 (100kg/m³) → 350t R\$ 3.90 / kg
- fôrma (11m²/m³) → 38.500m² R\$ 30.00 / m²
- R\$ 1.012,00 / m³ de estrutura pronta

concreto	r\$ 1.022.000,00	28.8%
aço	r\$ 1.365.000,00	38.6%
forma	R\$ 1.155.000,00	32.6%
- $f_{ck} = 30MPa \rightarrow R\$ 240,00/m^3$
- $f_{ck} = 50MPa \rightarrow R\$ 350,00/m^3$

Direitos Reservados 2009

72

72

Concreto de Alto Desempenho HPC				
IBRACON				
f_{ck}	aço (kg)	forma (m ²)	concreto (m ³)	reais/pilar
30 → 0.4%	49	8.64	1.5552	904
50 → 0.4%	24	6.00	0.7500	575
30 → 4.0%	255	6.24	0.8112	1420
50 → 4.0%	151	4.80	0.4800	925

30 (4%) a 50 (4%) → economia de 35%
30(4%) a 50 (0.4%) → economia de 60%

Direitos Reservados 2009 73

73

Concreto de Alto Desempenho HPC				
IBRACON				
→ para o edifício padrão com 3.500m ³ , sendo 24% pilares (840m ³), haverá uma economia de:				
30 (4%) a 50 (4%) → economia de 8.4% 30(4%) a 50 (0.4%) → economia de 14.4%				
30 (4%) a 50 (4%) → R\$ 297.528,00 30(4%) a 50 (0.4%) → R\$ 510.048,00				

Direitos Reservados 2009 74

74

$$f_{ck} = 30\text{MPa}$$

$$\text{Cimento} = 325 \text{ kg/m}^3$$

$$\text{Areia} = 845 \text{ kg/m}^3$$

$$\text{Brita} = 1036 \text{ kg/m}^3$$

$$\text{Água} = 191 \text{ kg/m}^3$$

$$f_{ck} = 50\text{MPa}$$

$$\text{Cimento} = 450 \text{ kg/m}^3$$

$$\text{Areia} = 801 \text{ kg/m}^3$$

$$\text{Brita} = 1010 \text{ kg/m}^3$$

$$\text{Água} = 165 \text{ kg/m}^3$$

HPC → Sustentabilidade

IBRACON

economia de recursos naturais

- 44% menos areia
- 42% menos pedra
- 41% menos concreto
- 49% menos água
- 18% menos cimento
- 23% menos forma
- 41% menos aço

Direitos Reservados 2009

77

77

HPC → Sustentabilidade

IBRACON

economia de recursos naturais

Pode !!!

sem falar de CO₂, energia, etc.

é possível encontrar melhor substituto ao concreto que o próprio concreto?

Direitos Reservados 2009

78

78

Vida Útil

usar de forma irresponsável a benesse do controle rigoroso

7.1 Simbologia (NBR 6118:2003)

c_{min} → *cobrimento mínimo de concreto à armadura, referido à distância entre a superfície do componente estrutural e a face mais externa da armadura (em geral estribo)*

c_{nom} → *cobrimento nominal ($c_{min} + \Delta_c$)*

UR → *umidade relativa do ar em %*

Δ_c → *tolerância da espessura de cobrimento*

passar $\Delta_c = 10\text{mm}$ para $\Delta_c = 5\text{mm}$

NBR 6118:2003

“espessura do cobrimento”

Tabela 7.2 Correspondência entre classe de agressividade ambiental e espessura de cobrimento nominal para $\Delta_c = 10\text{mm}$

tipo de estrutura	componente	classe de agressividade			
		I	II	III	IV
concreto armado	laje	≥ 20	≥ 25	≥ 35	≥ 45
	viga / pilar	≥ 25	≥ 30	≥ 40	≥ 50
concreto protendido	todos	≥ 30	≥ 35	≥ 45	≥ 55

Vida Útil

1. admitindo classe III
 $\rightarrow c_{nom} \geq 40\text{mm}$, para $f_{ck} \geq 30\text{MPa}$
 2. portanto $\rightarrow c_{min} = c_{nom} - 10 = 30\text{mm}$
 3. admitindo vida útil de projeto de 50 anos
 $\rightarrow c_{min} = k * t^{-1/2}$
- 2. $k = 4.2 \text{ mm} * \text{ano}^{-1/2}$**

Vida Útil

1. ao reduzir Δ_c de 5mm
 $\rightarrow c_{nom} = 35\text{mm}$
 2. como o controle rigoroso não é implantado,
 Δ_c continua sendo 10mm
 $\rightarrow c_{min} = c_{nom} - 10 = 25\text{mm}$
 3. qual a nova vida útil de projeto?
 $\rightarrow t = c_{min}^2 / k^2$
- $\rightarrow t = 35 \text{ anos} !!!$**

Edifício Padrão

IBRACON

25 pavimentos $\rightarrow 22 + 2 + 1$

■ área externa do andar tipo $\rightarrow 166\text{m}^2$

total = 3.652m^2

■ área do térreo e garagens $\rightarrow 4.620\text{m}^2$

■ *área total exposta à intempérie*

8.272m^2 21%

Direitos Reservados 2009

83

83

Concreto de Alto Desempenho HPC

IBRACON

\rightarrow para o edifício padrão com 3.500m^3 e com 38.500m^2 de forma, tem-se:

1. aumento no volume de concreto:

$\rightarrow 8.272\text{m}^2 * 0.005 = 41\text{ m}^3$

2. incidência no concreto

$\rightarrow 41 / 3500 = + 1.2\%$

3. incidência na fôrma

$\rightarrow 413\text{m}^2 / 38500 = + 1.1\%$

perda de vida útil $\rightarrow 15$ anos !!!!

obs.: análise determinista, ideal é probabilista

Direitos Reservados 2009

84

84



1901
primeiro edifício de concreto armado
Paris, França → François Hennebique
“nunca mais colapso por incêndio”

85



Obrigado!

86