

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



No Laboratório de Pesquisas em Construções 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



Sumário



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



Edifício Padrão



- 25 pavimentos, sendo 22 pavimentos tipo
- 2 subsolos de garagens + térreo (média 650m²)
- $f_{ck} = 30\text{MPa}$ $E_{co,d} = 27\text{GPa}$
- espessura média de 21.5cm
- andar tipo:

lajes → aço: 3.600kg	forma: 576m ²	concreto: 70m ³
vigas → aço: 4.400kg	forma: 410m ²	concreto: 37m ³
pilares → aço: 5.100kg	forma: 432m ²	concreto: 33m ³
- pilares:

aço = 40%	forma=30%	concreto = 24%
-----------	-----------	----------------



Edifício Padrão



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%
- $f_{ck} = 30\text{MPa} \rightarrow R\$ 240,00/\text{m}^3$
- $f_{ck} = 50\text{MPa} \rightarrow R\$ 350,00/\text{m}^3$



corpos-de-prova padrão → exemplar



- cilíndricos diâmetro de 15cm e altura 30cm (176.7cm²);
- aceita-se diâmetro de 10cm e altura de 20cm (78.5cm²);
- para $f_{ck}=50\text{MPa} \rightarrow (65\text{MPa}) \rightarrow$ prensa + 20% → 138t & 62t → limite 100t (45MPa & 100MPa) → 200t (95MPa & 200MPa)
- moldado, câmara úmida, temperatura, capeado ou retificado, ensaio estático, monotonico crescente, instantâneo(<10minutos), 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



corpos-de-prova padrão → exemplar



- 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)”

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

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

corpos-de-prova padrão
→ exemplar

IBRACON

cimento agregados água aditivos

Dosagem mão-de-obra equipamentos

$f_{ck,ext}$ f_{ck}

betoneira

operações de execução da estrutura

operações de ensaio e controle

resistência real ou efetiva do concreto na obra $f_{ck,ef}$

resistência potencial de controle do concreto $f_{ck,est}$

Direitos Reservados 2009 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

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} !

Curva de Gauss

Densidade de frequência ou área sob a probabilidade

Resistência à compressão (MPa)

f_{ck} f_{cm} f_c

$f_{cm} = \frac{1}{\gamma_c} \cdot f_{ck}$ (MPa)

$S_c = \sqrt{\frac{1}{n-1} \sum (f_{ci} - f_{cm})^2}$ (MPa)

$V_c = \frac{S_c}{f_{cm}} \cdot 100$ (%)

Direitos Reservados 2009 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



corpos-de-prova padrão → exemplar



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



corpos-de-prova padrão → exemplar



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



testemunhos extraídos

NBR 7680:2007; NBR 12655:2006



- ✓ 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;
- ✓ $\Phi \geq 100mm$ 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

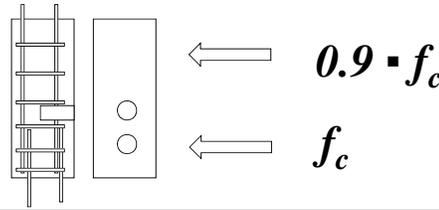


testemunhos extraídos

NBR 7680:2007; NBR 12655:2006



- ✓ 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

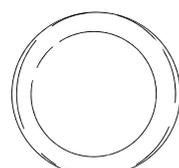


testemunhos extraídos

NBR 7680:2007; NBR 12655:2006



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



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

- $\Phi = 15cm \rightarrow -8\%$
- $\Phi = 10cm \rightarrow -11\%$
- $\Phi = 7,5cm \rightarrow -15\%$
- $\Phi = 5,0cm \rightarrow -22\%$

Direitos Reservados 2009 17



testemunhos extraídos

NBR 7680:2007; NBR 12655:2006



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



testemunhos extraídos

NBR 7680:2007; NBR 12655:2006



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



testemunhos extraídos

NBR 7680:2007; NBR 12655:2006



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



testemunhos extraídos

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



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:

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

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



testemunhos extraídos

NBR 6118:2003; NBR 12655:2006



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



testemunhos extraídos

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



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_{cm} (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



testemunhos extraídos

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



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



testemunhos extraídos

recomendações “bom senso”

- 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 (± 10%)

Direitos Reservados 2009 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”



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

“do Laboratório de Pesquisa em Concreto de Obras”

Direitos Reservados 2009



Bibliografia

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 Rüsch.** 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. **Pérciles Brasilience Fusco.** Resistência do Concreto Comprimido. Brasília, 35 Congresso Brasileiro do Concreto, IBRACON, v. 2, Junho 1993. p. 467-483

Direitos Reservados 2009 27



Relaxação

conceito de relaxação

“strength relaxation”

→ para concreto

“relaxação de resistência”

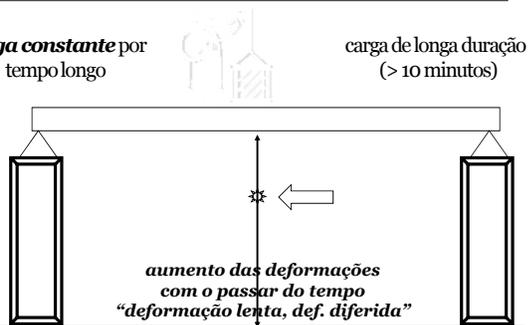
Direitos Reservados 2009 28



Fluência

carga constante por tempo longo

carga de longa duração (> 10 minutos)



aumento das deformações com o passar do tempo
“deformação lenta, def. diferida”

Direitos Reservados 2009 29



Relaxação

carga de longa duração (> 10 minutos)

retirando carga para manter deformação cte.



deformação constante ao longo do tempo

Direitos Reservados 2009 30

IBRACON

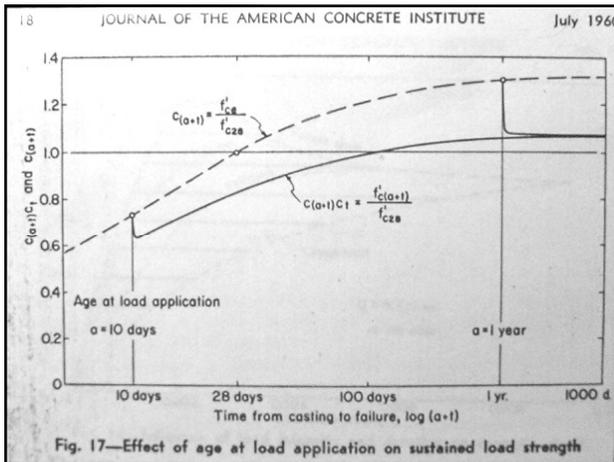
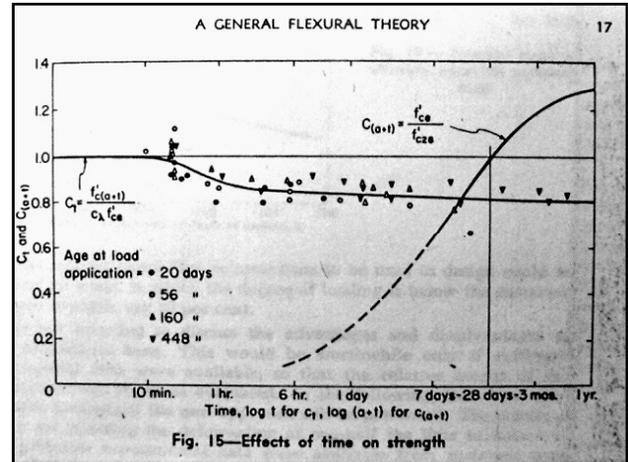
Relaxação

efeitos das cargas de longa duração

relaxação

fluência

Direitos Reservados 2009 31



IBRACON

NBR 8681:2004

Ações e Segurança

introdução da segurança no projeto estrutural

Direitos Reservados 2009 34

IBRACON

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

Direitos Reservados 2009 35

IBRACON

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

Direitos Reservados 2009 36



Ações e Segurança

NBR 6118:2003; NBR 8681:2004

$$f_{cd} = \frac{f_{ck}}{\gamma_c} \quad \gamma_c = 1,4$$

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

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

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



NBR 6118:2003; NBR 8681:2004

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

$\beta_{1,t} = 1,20 \rightarrow$ 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)



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

Como cresce e como decresce a resistência com o tempo ?



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

Como cresce a resistência com o tempo ?

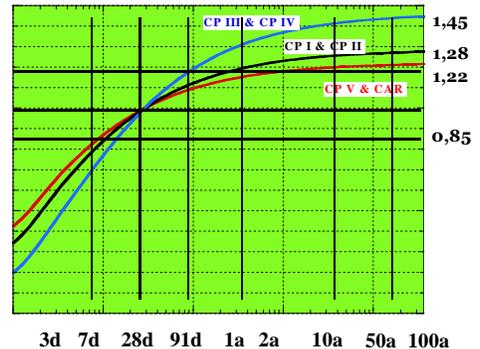


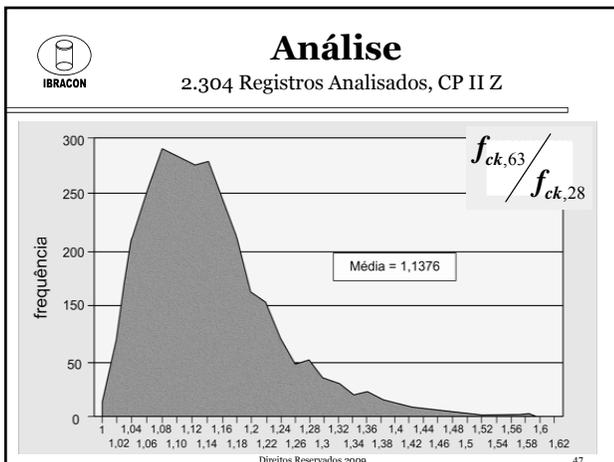
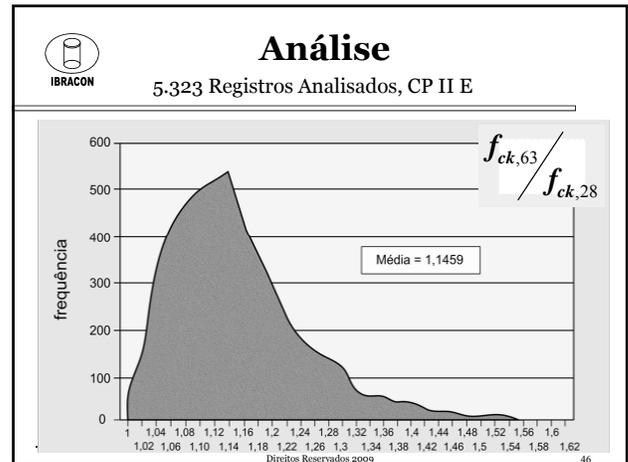
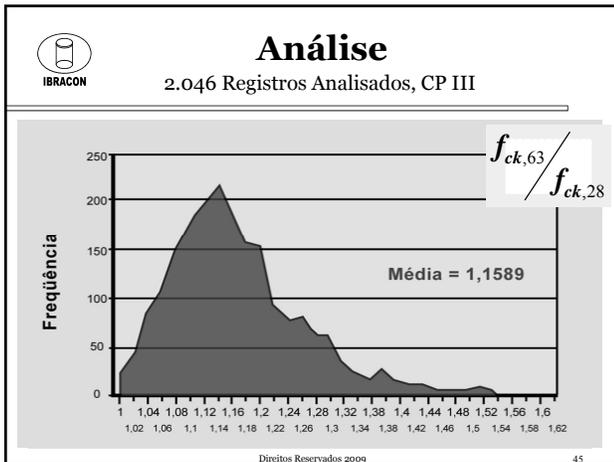
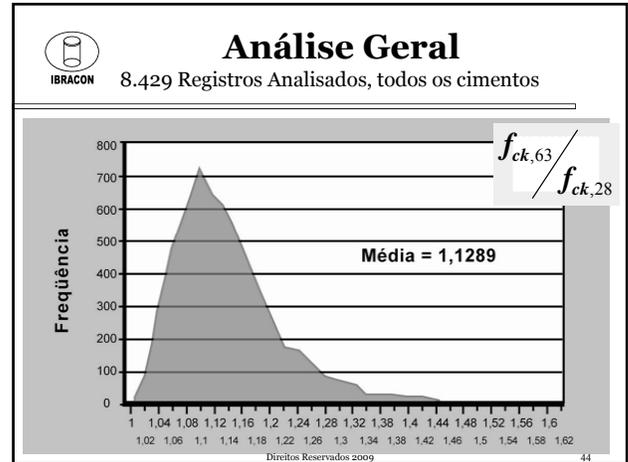
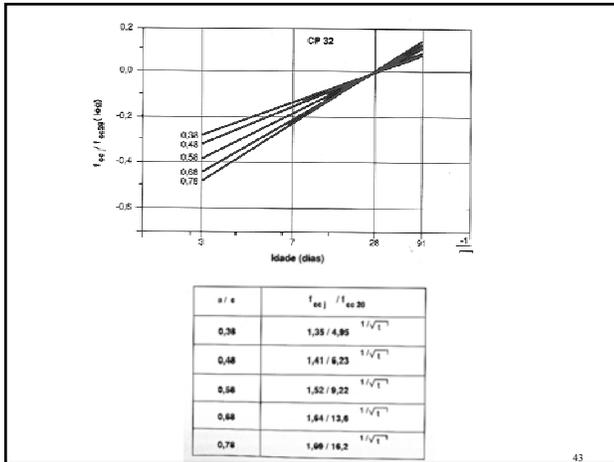
Crescimento da Resistência

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





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

$$\beta_{1,t} = \frac{f_{cm,t}}{f_{cm,t_0}}$$

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



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

Como decresce a resistência com o tempo ?

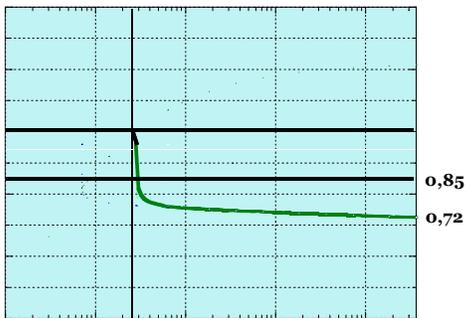


Relaxação das Resistências (efeito Rüschi)

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

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

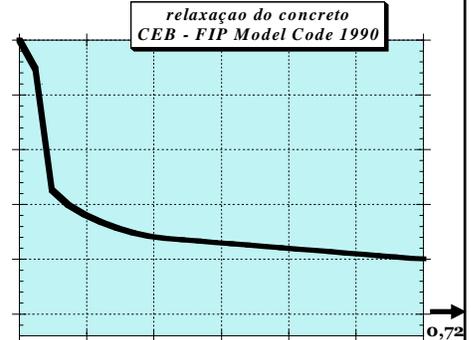
→ t em dias
→ sob tensões elevadas??



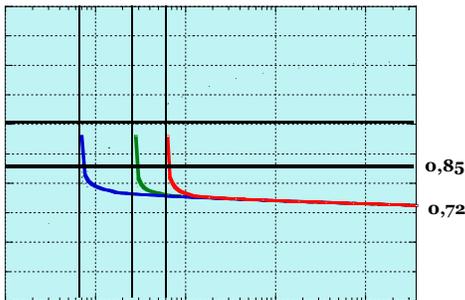
28 dias

100 anos

0,85
0,72



0,72



7 d 28 d 63 d

100 anos

0,85
0,72



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

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

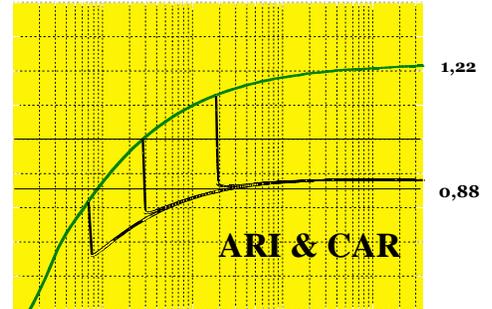
	t infinito
Rüschi (1960)	0,75
CEB(1990)	0,72
NBR 6118:2003	0,71



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

resistência do concreto com o tempo ?

resistência do concreto
CEB - FIP Model Code 1990



Resistência

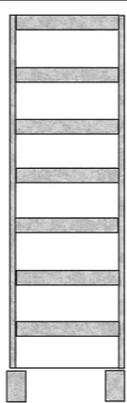
Resistência final do concreto a 100 anos de idade para cargas de longa duração aplicadas aos 7d, 28d, 1ano ou qualquer idade

		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

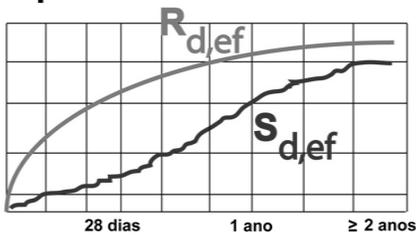


Quando efetivamente os elementos estruturais são carregados?

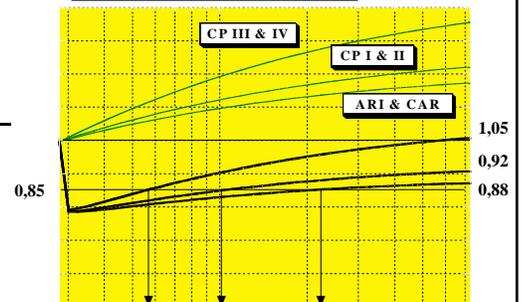
- lajes e vigas → 7 dias?
- pilares e fundações → 6 meses?

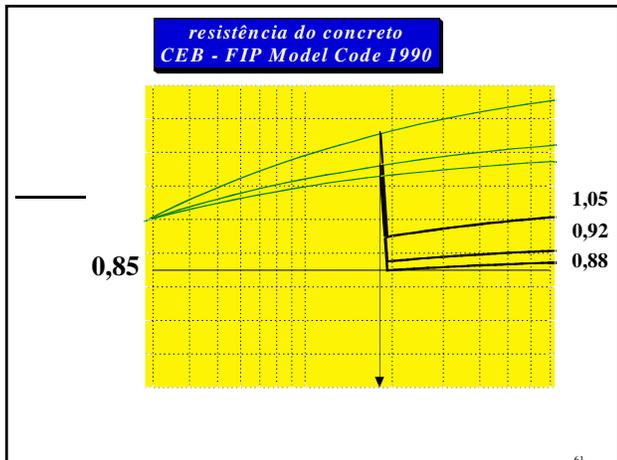


Estudo analítico da distribuição de S_d e de R_d , com a idade e o processo construtivo



resistência do concreto
CEB - FIP Model Code 1990





Dúvidas

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

$\beta = 0,85$?

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 → 0.6 para lajes e 0.9 para pilares?
- testemunhos extraídos a elevadas idades (mais de 6h, 6 meses, 10anos) já incluem relaxação? No redimensionamento poderia dispensar o tal 0,85?

65

Propostas

- para rejeição de concreto precisa considerar a data de aplicação da carga elevada? Quanto? Acima de 70% da de projeto???.
- para edifícios acima de 10 pisos, com taxa de elevação de 1 piso/semana, há vantagem em controlar f_{ck} a 63 dias, sem nenhum prejuízo à segurança, (CP I, CPII, CP III, CP IV).

66



Problema

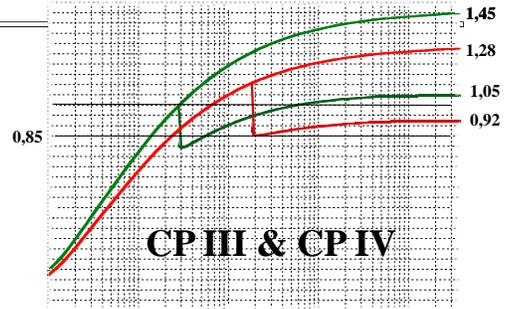
1. O concreto não atendeu o f_{ck} de 28 dias mas com 63 dias o testemunho atendeu.
2. A carga efetiva só atuou a 6 meses.
3. Alterou a segurança?

Direitos Reservados 2009

67



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)



Direitos Reservados 2009

68



Concreto de Alto Desempenho HPC

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

Direitos Reservados 2009

69



Concreto de Alto Desempenho HPC

Resultados chocantes !!!

Direitos Reservados 2009

70



Concreto de Alto Desempenho HPC

- 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



Edifício Padrão

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
- forma (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

72



Concreto de Alto Desempenho HPC

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



Concreto de Alto Desempenho HPC

→ para o edifício padrão com 3.500m³, sendo 24% pilares (840m³), 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



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

Cimento = 325 kg/m³

Areia = 845 kg/m³

Brita = 1036 kg/m³

Água = 191 kg/m³

Direitos Reservados 2009

75



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

Cimento = 450 kg/m³

Areia = 801 kg/m³

Brita = 1010 kg/m³

Água = 165 kg/m³

Direitos Reservados 2009

76



HPC → Sustentabilidade

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



HPC → Sustentabilidade

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



Vida Útil

usar de forma irresponsável a benesse do controle rigoroso

7.1 Simbologia (NBR 6118:2003)

c_{min} → *cobertura mínima 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} → *cobertura nominal ($c_{min} + \Delta_c$)*

UR → *umidade relativa do ar em %*

Δ_c → *tolerância da espessura de cobertura*

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

Direitos Reservados 2009

79



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

Direitos Reservados 2009

80



Vida Útil

- admitindo classe III
→ $c_{nom} \geq 40\text{mm}$, para $f_{ck} \geq 30\text{MPa}$
- portanto → $c_{min} = c_{nom} - 10 = 30\text{mm}$
- admitindo vida útil de projeto de 50 anos

$$\rightarrow c_{min} = k * t^{-1/2}$$

$$2. \quad k = 4.2 \text{ mm} * \text{ano}^{-1/2}$$

Direitos Reservados 2009

81



Vida Útil

- ao reduzir Δ_c de 5mm
→ $c_{nom} = 35\text{mm}$
- como o controle rigoroso não é implantado,
 Δ_c continua sendo 10mm
→ $c_{min} = c_{nom} - 10 = 25\text{mm}$
- qual a nova vida útil de projeto?

$$\rightarrow t = c_{min}^2 / k^2$$

$$\rightarrow t = 35 \text{ anos !!!}$$

Direitos Reservados 2009

82



Edifício Padrão

25 pavimentos → 22 + 2 + 1

- área externa do andar tipo → 166m²
total = 3.652m²
- área do térreo e garagens → 4.620m²
- área total exposta à intempérie
8.272m² 21%

Direitos Reservados 2009

83



Concreto de Alto Desempenho HPC

→ para o edifício padrão com 3.500m³ e com 38.500m² de forma, tem-se:

- aumento no volume de concreto:
→ 8.272m² * 0.005 = 41 m³
- incidência no concreto
→ 41 / 3500 = + 1.2%
- incidência na fôrma
→ 413m² / 38500 = + 1.1%

perda de vida útil → 15 anos !!!!

obs.: análise determinista, ideal é probabilista

Direitos Reservados 2009

84

