



**edificação
+ SEGURA**

PROGRAMA NACIONAL
DE REDUÇÃO DE RISCOS
E AUMENTO DA VIDA ÚTIL
DE ESTRUTURAS DE
EDIFICAÇÕES





Curso de capacitação em inspeção de estruturas de concreto - 2014 -

**Módulo 3. Mecanismos de deterioração, manifestações patológicas em
estruturas de concreto e medidas preventivas**

Prof. Paulo Helene. PhD Engenharia





instituto brasileiro
de telas soldadas

Patrocínio:



Instituto de Metais
Não Ferrosos




produtos
quartzolit


Coordenação




Núcleo de
Gestão e
Inovação


1












Carga de Longa Duração nas Estruturas de Concreto ou Efeito Rüsçh



"do Laboratório de Pesquisa ao Canteiro de Obras"

Paulo Helene
*Diretor PhD Engenharia
 Presidente de Honor ALCONPAT
 Prof. Titular Universidade de São Paulo USP
 Member fib(CEB-FIP) Service Life of Concrete Structures
 Diretor e Conselheiro Permanente Instituto Brasileiro do Concreto IBRACON*

Centro Britânico

16 de Junho de 2014

São Paulo

2



Normalização Brasileira

- ABNT NBR 6118:2014** - Projeto de estruturas de concreto – Procedimento;
ABNT NBR 6120:1980 – Cargas para o cálculo de estruturas de edificações;
ABNT NR 6122:2010 – Projeto e execução de fundações;
ABNT NBR 6123:1988 – Forças devidas ao vento em edificações;
ABNT NBR 7188:1984 – Carga móvel em ponte rodoviária e passarela de pedestre;
ABNT NBR 8681:2004 – Ações e segurança nas estruturas – Procedimento
ABNT NBR 9062:2006 – Projeto e execução de estruturas de concreto pré-moldado;
ABNT NBR 15200:2012 – Projeto de estruturas de concreto em situação de incêndio;
ABNT NBR 15421:2006 – Projeto de estruturas resistentes a sismos – Procedimento;
ABNT NBR 15575:2013 – Edificações habitacionais – Desempenho;

PhD Engenharia

3

Normalização Internacional

ACI-318-11 – Building Code Requirements for Structural Concrete and Commentary;

EN 1991 EUROCODE 1 – Actions on structures:

Part 1-1: General actions – Densities, self-weight and imposed loads;

Part 1-2: General actions – Actions on structures exposed to fire;

Part 1-3: General actions – Snow loads;

Part 1-4: General actions – Wind actions;

Part 1-5: General actions – Thermal actions;

Part 1-6: General actions – Actions during execution;

Part 1-7: General actions – Accidental actions;

EN 1992 EUROCODE 2 – Design of concrete structures:

Part 1-1: General – Common rules for building and civil engineering structures;

Part 1-2: General – Structural fire design;

Part 2: Bridges;

Part 3: Liquid retaining and containment structures;

fib Model Code for Concrete Structures 2010;

Bulletin fib n.º 63 – Design of precast concrete structures against accidental loads;

Bulletin fib n.º 61 – Design examples for strut-and-tie models;

Bulletin CEB n.º 223 – Ultimate limit state design models;

ISO 22111:2007 – Basis for Design of Structures. General Requirements.



PhD Engenharia

4

Considerações iniciais

- Resistência do concreto na estrutura (idade) testemunhos;
- $A_{s,efetivo} \geq A_{s,calculado}$;
- Carregamento efetivo \times Carregamento de projeto;
- Qualidade da execução da estrutura (excentricidades, desaprumo, geometria, cura, adensamento etc.) – depende de inspeção

PhD Engenharia

5

Relaxação \approx Carga mantida

conceito de relaxação
“strength relaxation”
→ para concreto

“relaxação de resistência”

PhD Engenharia

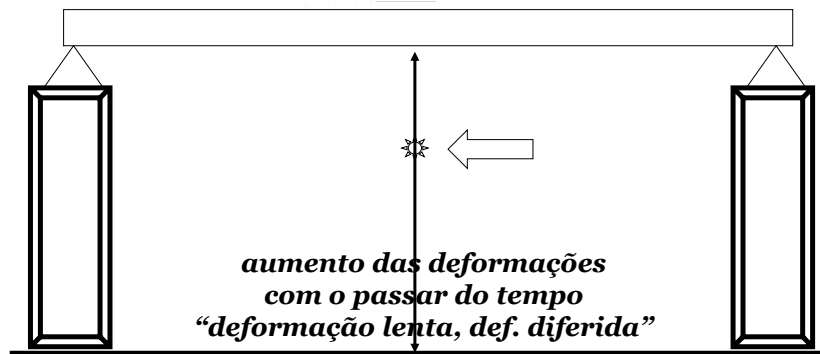
6

Fluência

carga constante por tempo longo



carga de longa duração (> 10 minutos)



PhD Engenharia

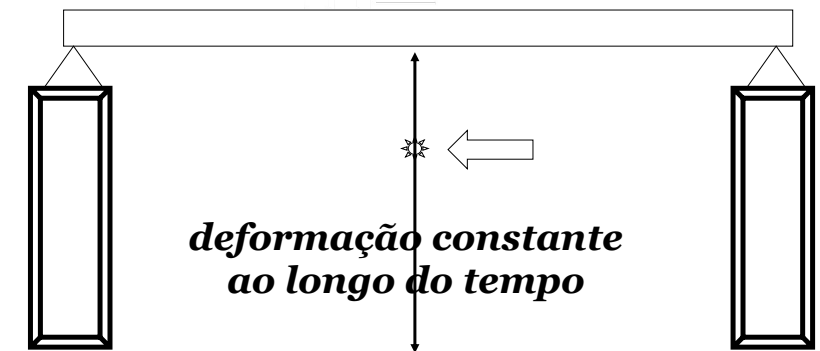
7

Relaxação

carga de longa duração (> 10 minutos)



retirando carga para manter deformação cte.

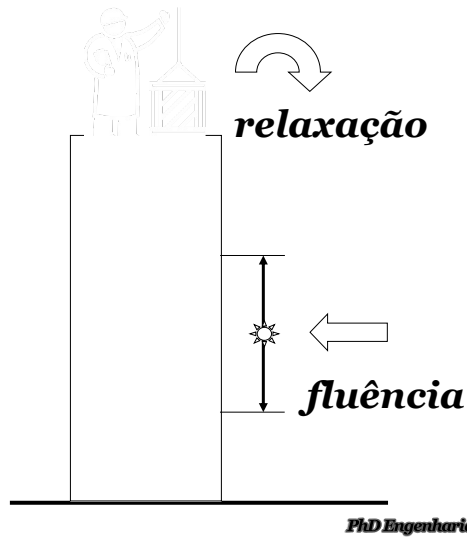


PhD Engenharia

8

Relaxação ≈ Rüsçh

efeitos das
cargas de
longa duração



9

From the work of
Comité Européen du Béton

Title No. 57-1

Researches Toward a General Flexural Theory for Structural Concrete

By HUBERT RÜSCH

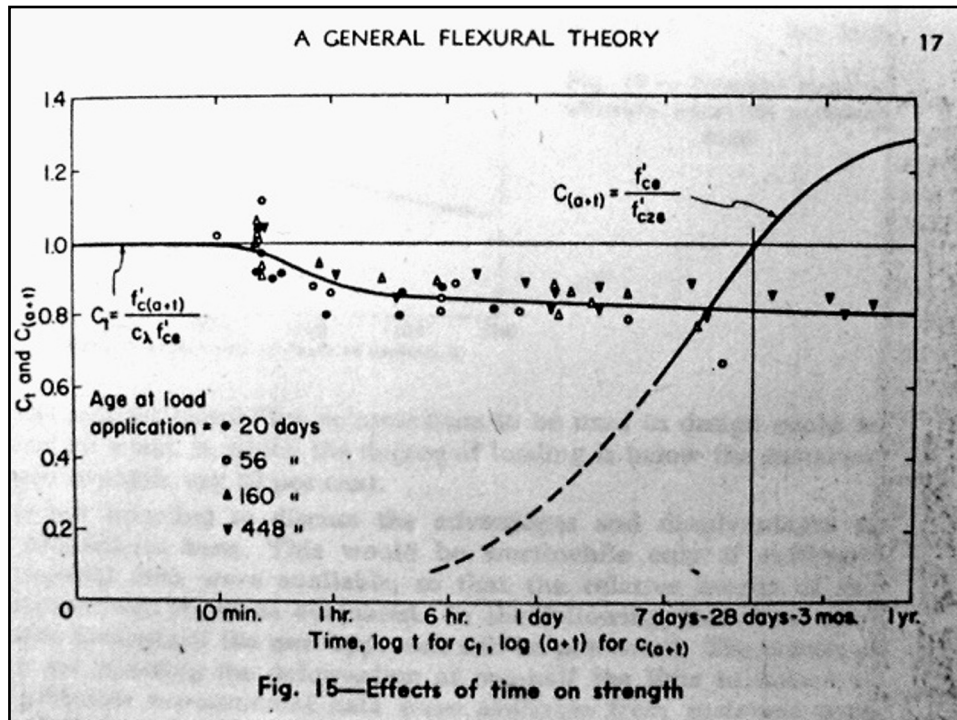
This paper is directed toward formulation of a general flexural theory based on a careful study of all important factors regarding the properties of concrete. The fact that strength and deformation of concrete depend on time is considered. The theory is based on recent tests permitting determination of the behavior of the compression zone in flexure for continuous load increase at different strain rates, and for constant sustained load. Having derived stress-strain relationships for these various types of loading, other factors were studied systematically, such as effect of concrete strength, position of neutral axis, and shape of cross section. The general theory developed is primarily a study of the true behavior of structural members. Since simplified assumptions are avoided, it naturally does not lead to simple formulas such as are desired for structural design. The theory fulfills the important function of furnishing a reliable method for the evaluation of simplified design formulas. It is also possible, however, to present all new concepts and results of this theory in the form of a simple diagram which can be used for the solution of design problems for selected cross sections ranging from pure bending to pure compression, regardless of concrete quality and the type of steel used, and independent of whether prestressing is applied or not.

■ RESEARCH IN THE STRUCTURAL CONCRETE FIELD is faced today with problems of unusual challenge. We find ourselves in a period of change characterized by the abandonment of the elastic theory in favor of the plastic theory, and by a conversion from allowable stresses as a basis of design to ultimate strength design. Although these trends have persisted for some time, the new methods are finding slow acceptance among design engineers in some countries. This is probably at least in part due to the fact that structural engineering can look back on a thousand-year tradition, and this tradition is by its nature a conservative one. Another reason of equal importance is the lack of detailed and extensive knowledge regarding the properties of materials desirable in the development and introduction of new methods.

In recent decades, progress has been made toward replacing structural design methods disregarding plastic properties of materials by

RÜSCH, Hubert.
**Researches Toward a
General Flexural
Theory for Structural
Concrete.** ACI Journal:
Proceedings. [s.l.] Julho,
1960. 28p. (consulta free
na biblioteca da PhD

10



11

Hubert Rüsçh, 1960

1ª constatação:

→ “relaxação” =, qq → f_{ck}

2ª constatação:

→ “relaxação” =, qq → t_o

PhD Engenharia

12

Hubert Rüsçh, 1960

3ª constatação:

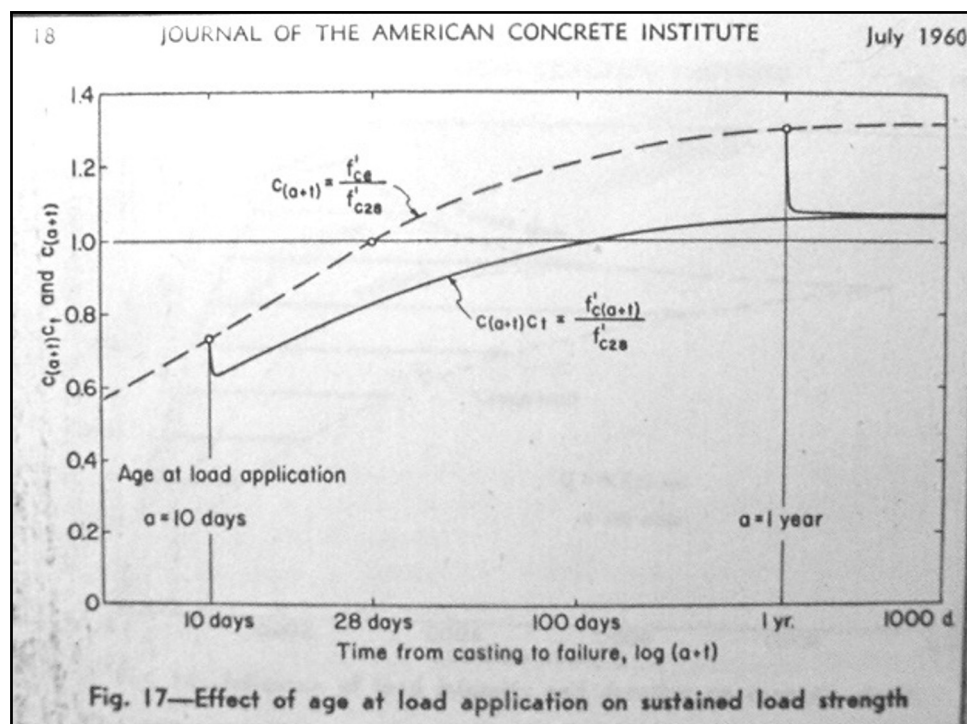
→ “relaxação” máx. = $0,75 * f_{c,t_0}$

4ª constatação:

→ “relaxação” =, qq → f_{c,t_0}

PhD Engenharia

13



14

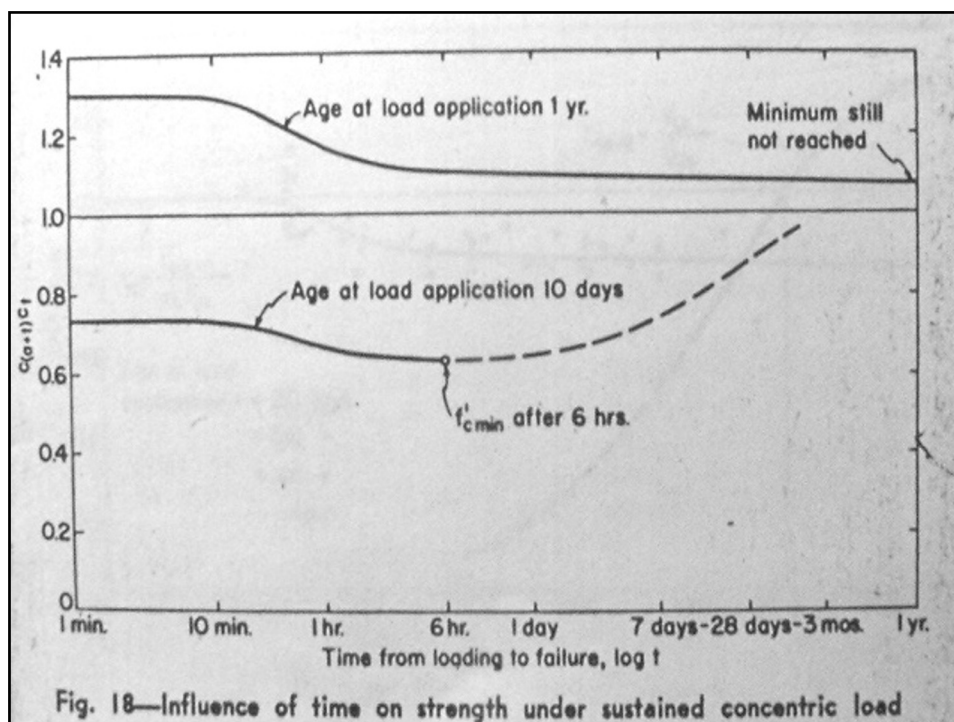
Hubert Rüsçh, 1960

5ª constatação:

→ resistência do concreto depende da data de f_{ck} , da data f_{c,t_0} e do crescimento de f_c a partir de f_{ck}

PhD Engenharia

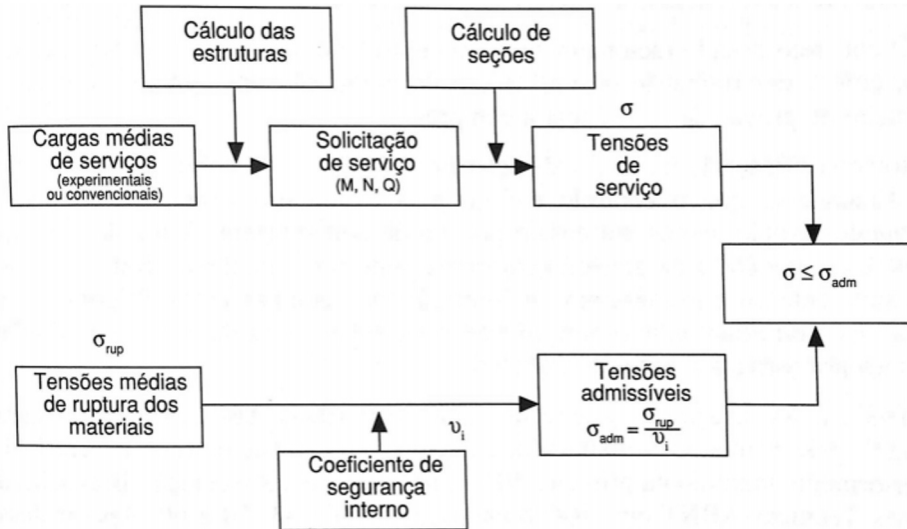
15



16

Ações e segurança nas estruturas

Método das Tensões Admissíveis

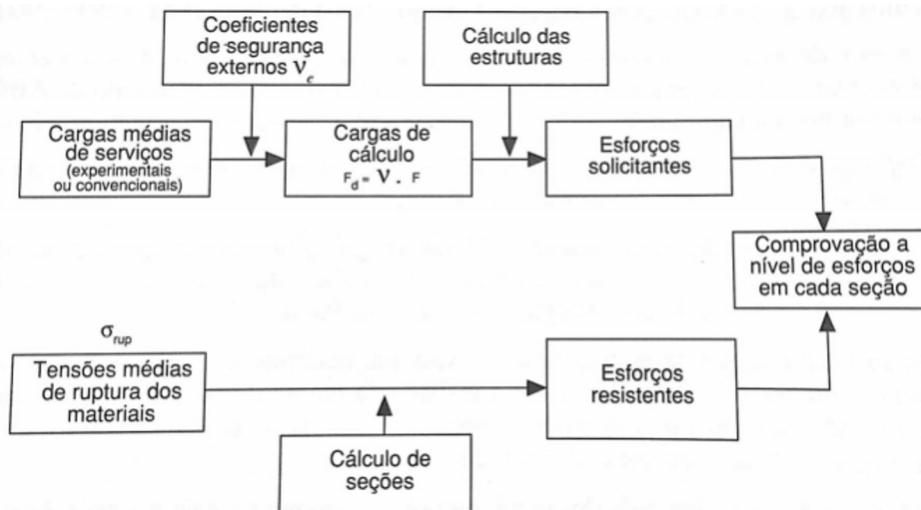


Critério adotado pelo Regulamento para Construções em Concreto Armado ABC (1931)

17

Ações e segurança nas estruturas

Método de Cálculo no Regime de Ruptura

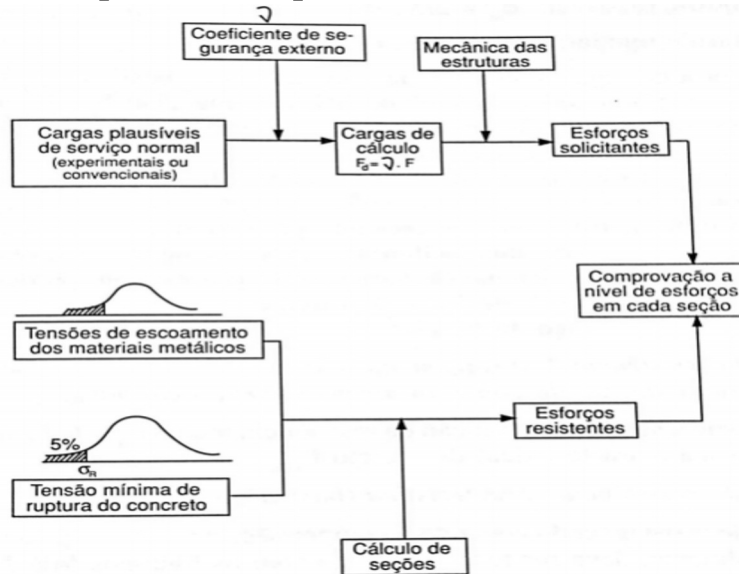


Critério adotado pela Norma para Execução e Cálculo de Concreto Armado – ABCP (1937) e mantido na NB-1 (1940 a 1950)

18

Ações e segurança nas estruturas

Método parcialmente probabilista dos Estados Limites

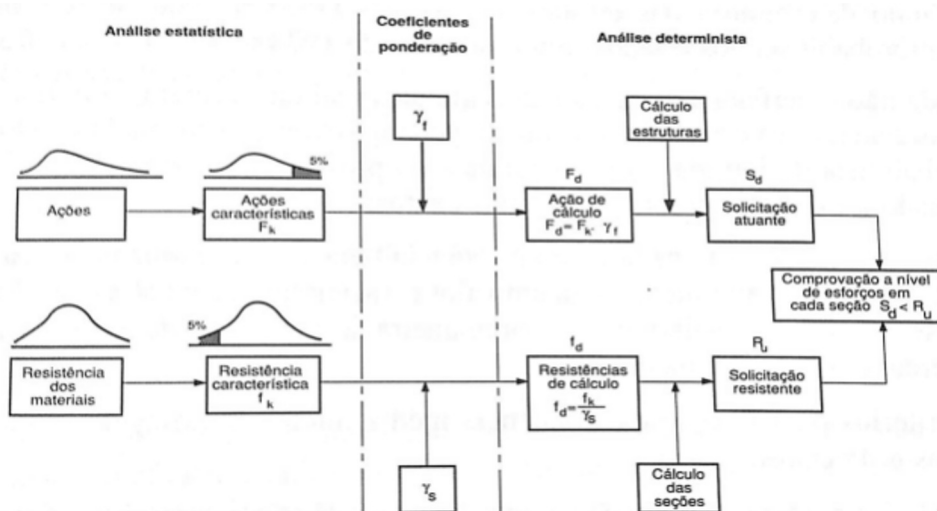


Critério adotado pela NB-1 - Cálculo e Execução de Obras de Concreto Armado (1960)

19

Ações e segurança nas estruturas

Método semi probabilista – ABNT NBR6118:1978



Seqüência para dimensionamento de estruturas pelo método semi probabilista (NBR 6118:1978)

20

Ações e segurança nas estruturas

ABNT NBR 8681:2004

Ações majoradas:

$$F_d = F_k * \gamma_f$$

Resistências minoradas:

$$f_{cd} = \frac{f_{ck}}{\gamma_m}$$

PhD Engenharia

21

Ações e segurança nas estruturas

ABNT NBR 8681:2004

Coefficientes de ponderação das ações para ELU
(coef. segurança) γ_f

$$\gamma_f = \gamma_{f1} * \gamma_{f2} * \gamma_{f3}$$

- γ_{f1} → considera variabilidade das ações;
- γ_{f2} → coef. de combinação (ψ_0 - simultaneidade);
- γ_{f3} → considera possíveis erros de avaliação dos efeitos das ações (devidas ao método construtivo ou modelo de cálculo)

PhD Engenharia

22

Ações e segurança nas estruturas

ABNT NBR 8681:2004

Coefficiente de ponderação das resistências

$$\gamma_m (\gamma_c \text{ \& } \gamma_s)$$

$$\gamma_c = \gamma_{c1} * \gamma_{c2} * \gamma_{c3}$$

γ_{c1} → considera variabilidade da resistência efetiva na estrutura

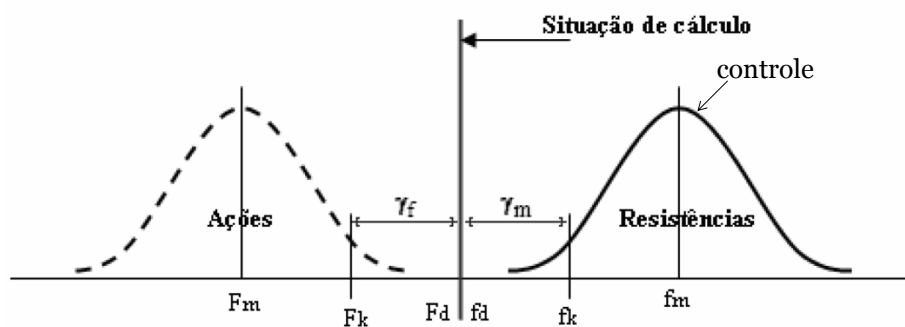
γ_{c2} → considera a diferença entre geometrias estrutura e cp

γ_{c3} → considera as incertezas de cálculo/modelos

PhD Engenharia

23

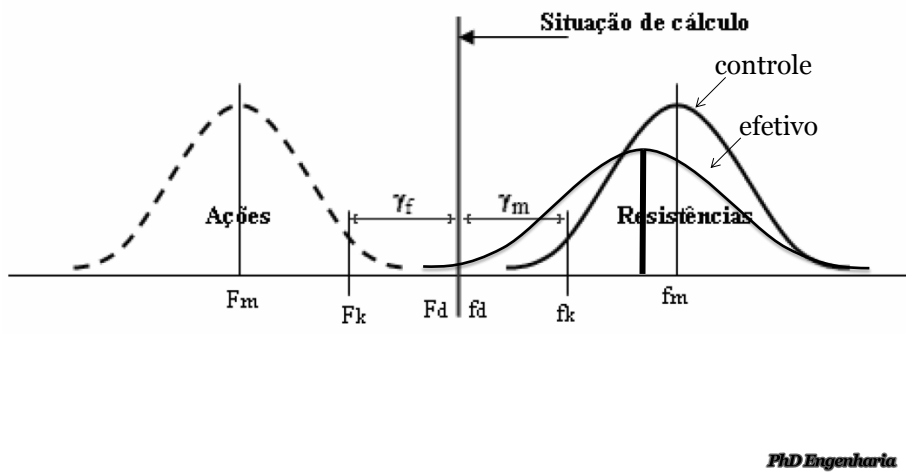
Análise Semi-probabilista



PhD Engenharia

24

Análise Semi-probabilista



25

Ações e Segurança

NBR 6118:2014; 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 $f_{ck} = 30$ MPa $\rightarrow f_{ck,ef}$ (estrutura) $\approx 18,2$ MPa

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

PhD Engenharia

26

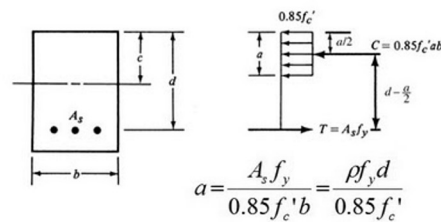
Como é considerado o efeito de cargas de longa duração em normas internacionais?

PhD Engenharia

27

ACI 318-11

- Atualmente em revisão



Item 10.2.7.1

- Considera **$0,85 \cdot f'_c$** no processo de cálculo à flexão, tração e compressão;

$0,85 \cdot f'_c$

Nominal Strength*

$\phi^*(\text{Nominal Strength}^*) \geq U$

Resistência minorada

Combinações de ações majoradas (cap. 9)

PhD Engenharia

28

ACI 318-11

- Coeficiente de minoração das resistências: ϕ
(diferente para vários casos)

Tração predominante	0,90
Compressão com estribos em espiral	0,75
Compressão de outras peças armadas	0,65
Cisalhamento e torção	0,75
Sistema biela-tirante	0,75
Zonas de ancoragem pós tracionadas	0,85
Outras estruturas carregadas (sem biela-tirante ou protensão)	0,65

PhD Engenharia

29

fib Model Code 2010

- Muito semelhante ao método preconizado pela Norma Brasileira
- Flexão e cargas axiais: $\gamma_c = 1,35$ a $1,50$

Item 5.1.9.2 (strength under sustained loads)

- Compressão no concreto:

$$f_{cm,sus}(t, t_0) = f_{cm} * \beta_{cc}(t) * \beta_{c,sus}(t, t_0)$$

- Tração no concreto:

$$f_{ctk,sus} = \alpha * f_{ctk}$$

$\alpha = 0,60$ para concreto normal
 $\alpha = 0,75$ para HPC

PhD Engenharia

30

NBR 6118:2014; NBR 8681:2004

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

$\beta_{1,t} = 1,16 \rightarrow$ crescimento f_{ck} após t_0 até t_{infinito} (50 anos)

$\beta_{2,t} = 0,73 \rightarrow$ decréscimo de f_{ck} devido às cargas de longa duração, aplicadas na idade t_0 até t_{infinito} (50 anos)

t_0 = idade de aplicação da carga de longa duração

(cargas permanentes + parte das acidentais)

PhD Engenharia

31

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

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

PhD Engenharia

32

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

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

PhD Engenharia

33

Crescimento da Resistência

fib Model Code 2010

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

CPV ARI	→ s	= 0,20	→	1,22 (100anos)
CP I / II	→ s	= 0,25	→	1,28 (100anos)
CP III / IV	→ s	= 0,38	→	1,45 (100anos)

PhD Engenharia

34

$\beta_{1,t} = \text{crescimento } f_{ck} \text{ após } t_0$
(em 50 anos)

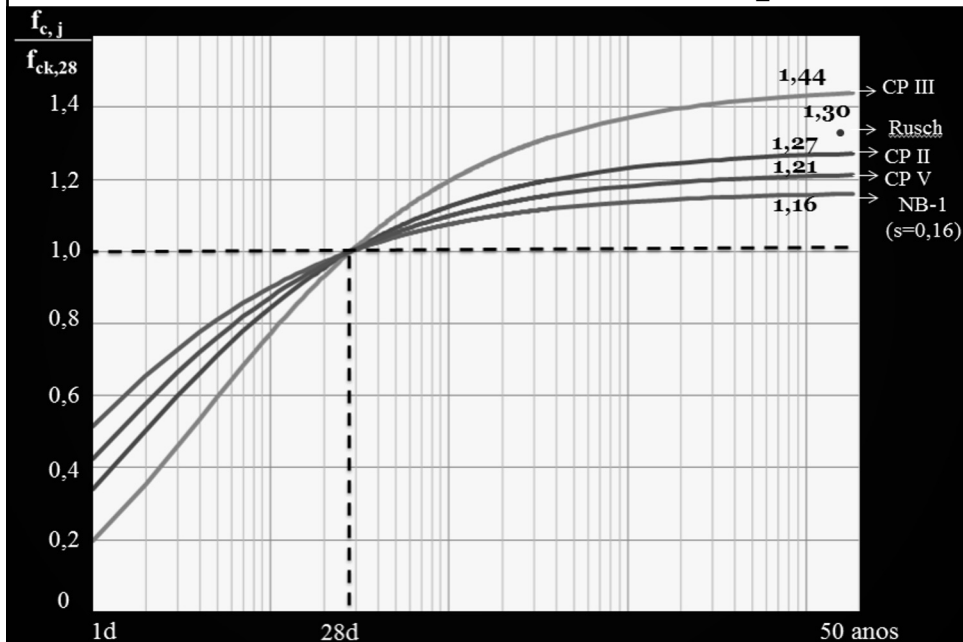
$$\beta_{1,t} = \frac{f_{cm,t_\infty}}{f_{cm,t}}$$

	$t_0=28d$
Rüsch (1960)	1,30
· POZ & AF	1,45
fib(2010)	1,28
· normal	1,28
· ARI + CAR	1,22
NBR 6118:2014	1,16

PhD Engenharia

35

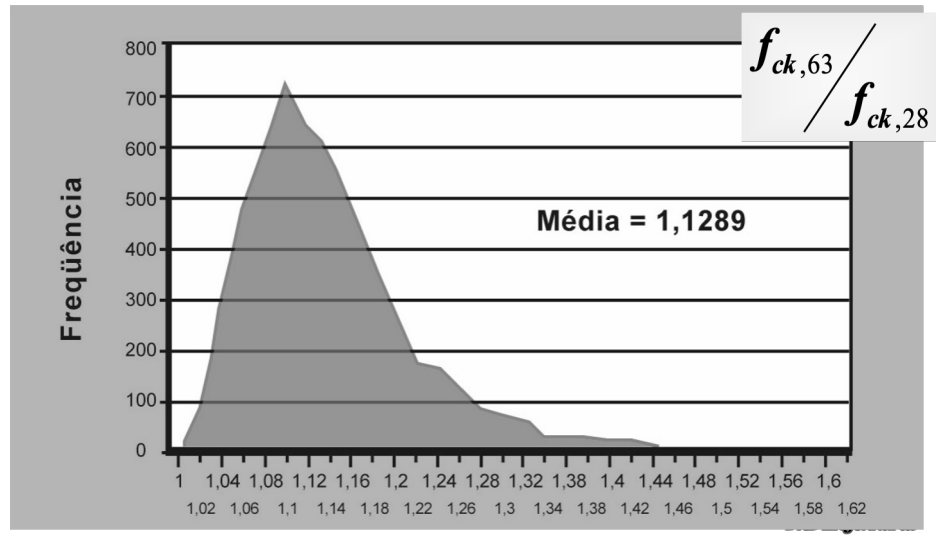
Gráfico de crescimento x tempo



36

Análise Geral

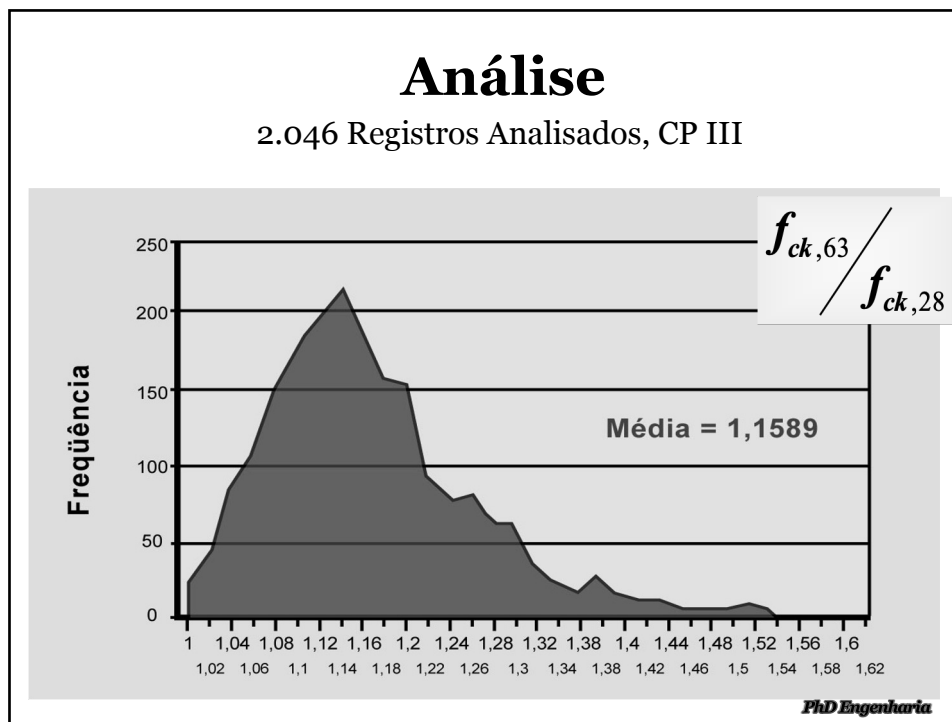
8.429 Registros Analisados, todos os cimentos



37

Análise

2.046 Registros Analisados, CP III



38

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

Como decresce a resistência com o tempo ?

PhD Engenharia

39

Redução das Resistências (efeito Rüschi)

fib Model Code 2010

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

→ t em dias
→ sob tensões elevadas??

PhD Engenharia

40

Redução das Resistências

(efeito Rüschi) *fib* Model Code 2010

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

$$\frac{f_{cm,sus,t}}{f_{cm,t_0}} = 0,96 - 0,12 * \sqrt[4]{\ln\{72 * (50 * 364 - 28)\}}$$

$$\frac{f_{cm,sus,t}}{f_{cm,t_0}} = 0,728$$

$$\frac{f_{cm,sus,t}}{f_{cm,t_0}} = 0,73$$

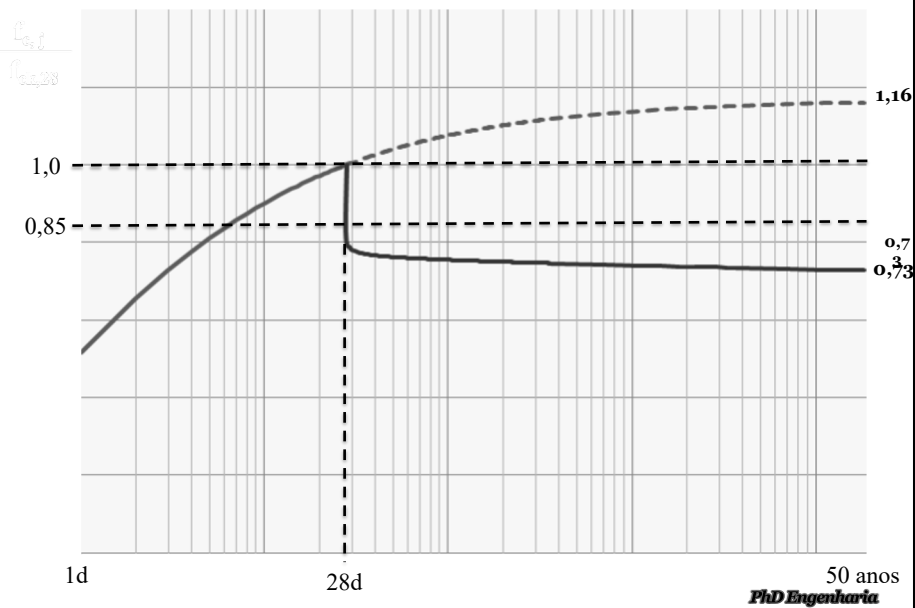
→ t em dias

→ sob tensões elevadas??

PhD Engenharia

41

Redução das Resistências (efeito Rüschi)



42

$\beta_{2,t}$ = decréscimo de f_c devido às cargas de longa duração, aplicadas na idade $t_0 = qq$ (em 50 anos)

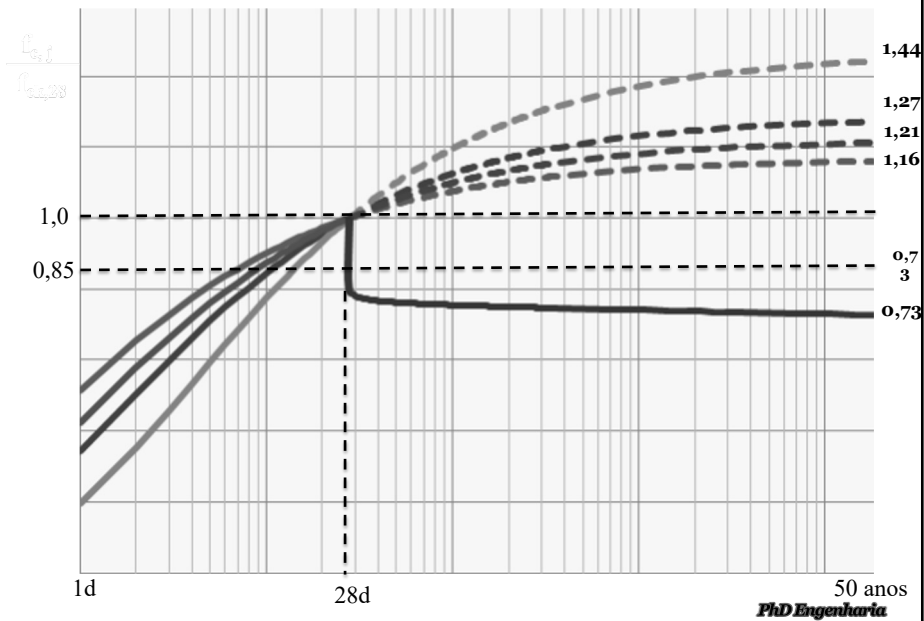
$$\beta_{2,t} = \frac{f_{cm,sus,t_\infty}}{f_{cm,t_0}}$$

	t infinito
Rüsch (1960)	0,75
fib (2010)	0,73
NBR 6118:2014	0,73

PhD Engenharia

43

Redução das Resistências (efeito Rüsch)



PhD Engenharia

44

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

resistência do concreto com o tempo ?

PhD Engenharia

45

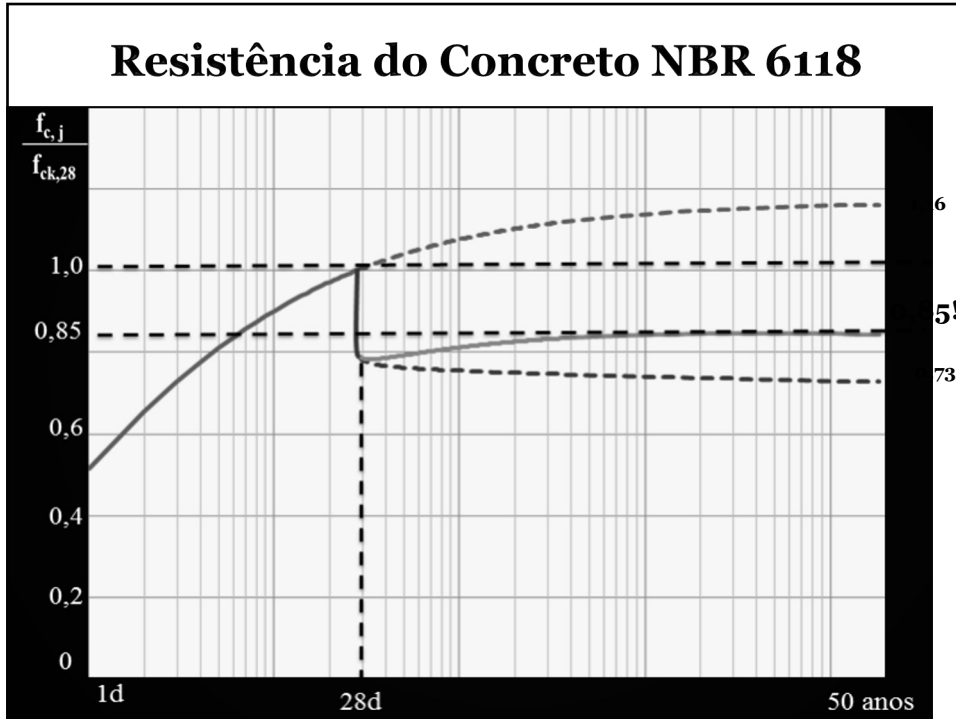
Resistência

Resistência final do concreto a **50 anos** de idade para cargas de longa duração aplicadas aos 7d, 28d, 1ano ou qualquer idade

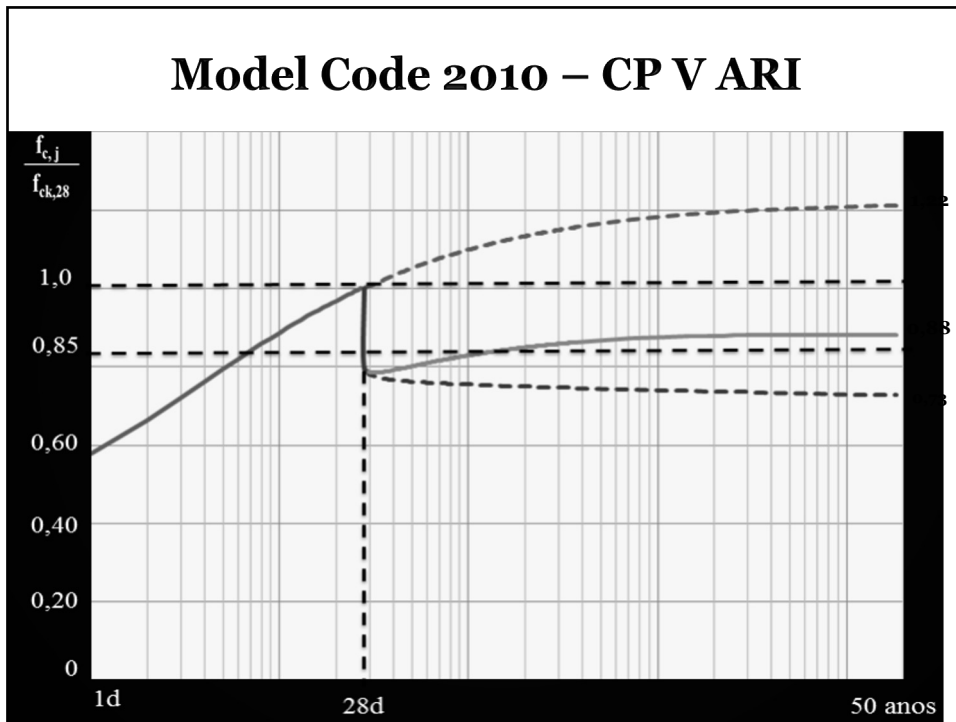
		crece	decrece	resulta
Rüsch		1,30	0,75	0,98
	CP III & IV	1,45	0,73	1,05
CEB (2010)	CP I & II	1,28	0,73	0,92
	CP V & CAR	1,22	0,73	0,88
NBR 6118:2014		1,16	0,73	0,85

PhD Engenharia

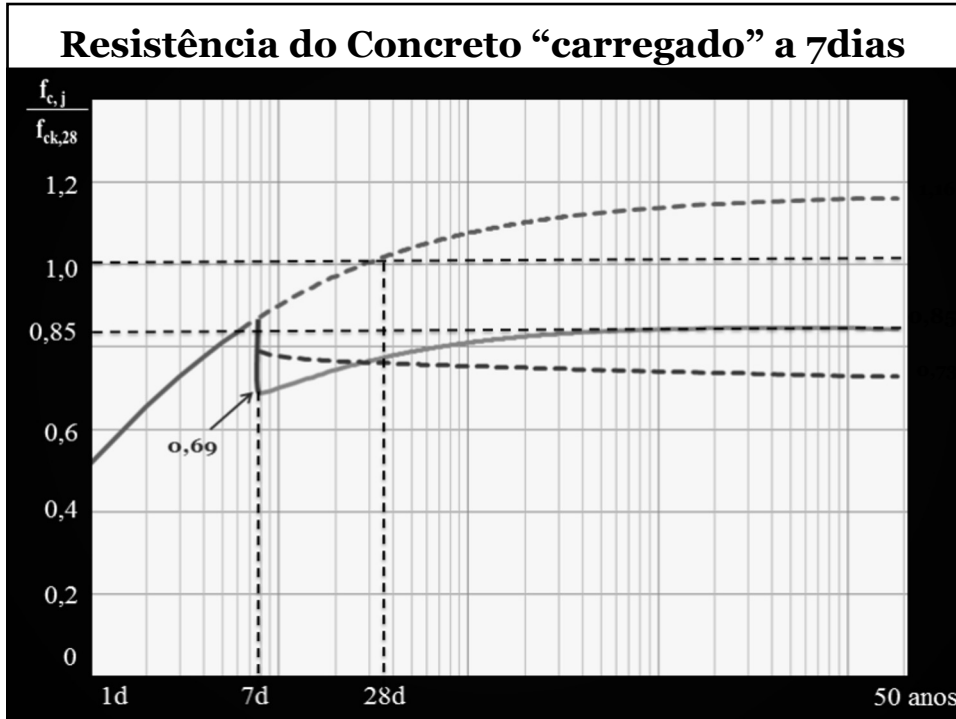
46



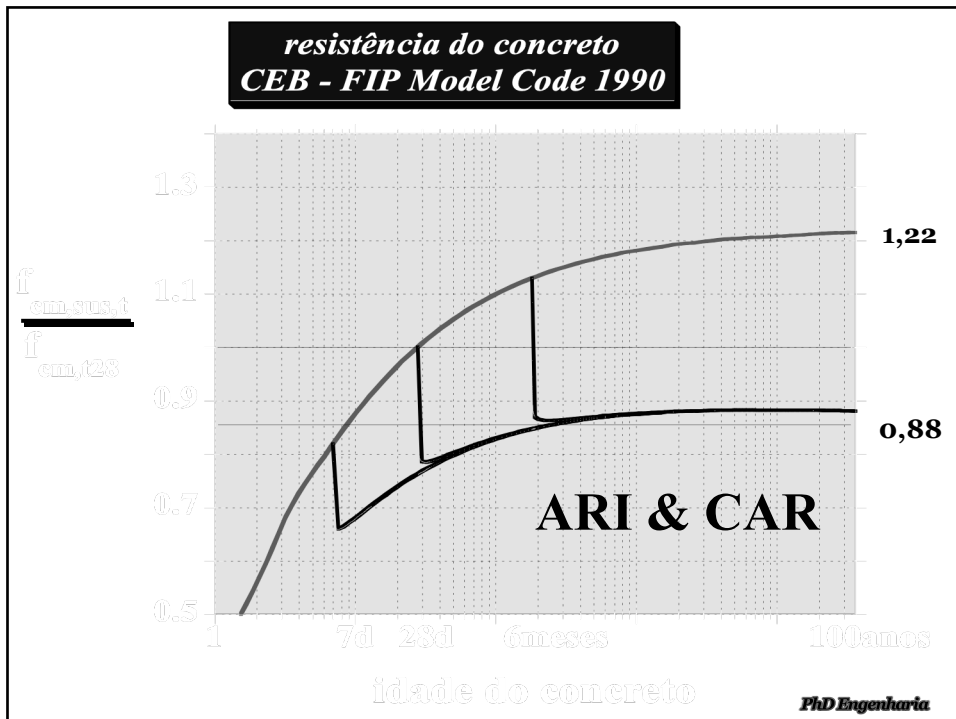
47



48



49



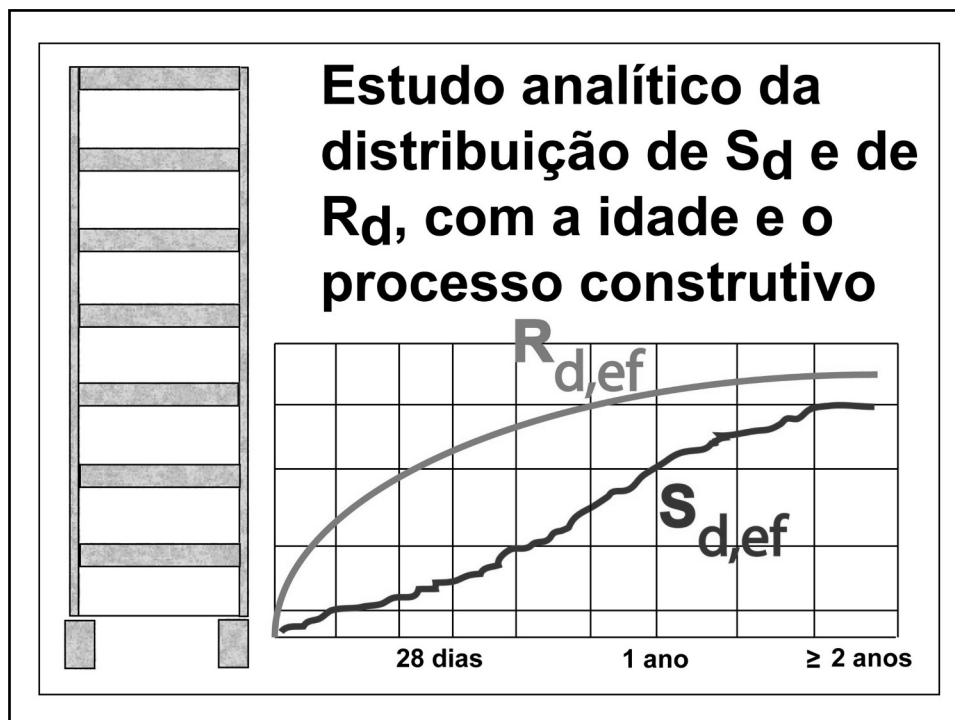
50

Quando efetivamente os elementos estruturais são carregados?

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

PhD Engenharia

51



52

Qual o melhor período para carregamento da estrutura?

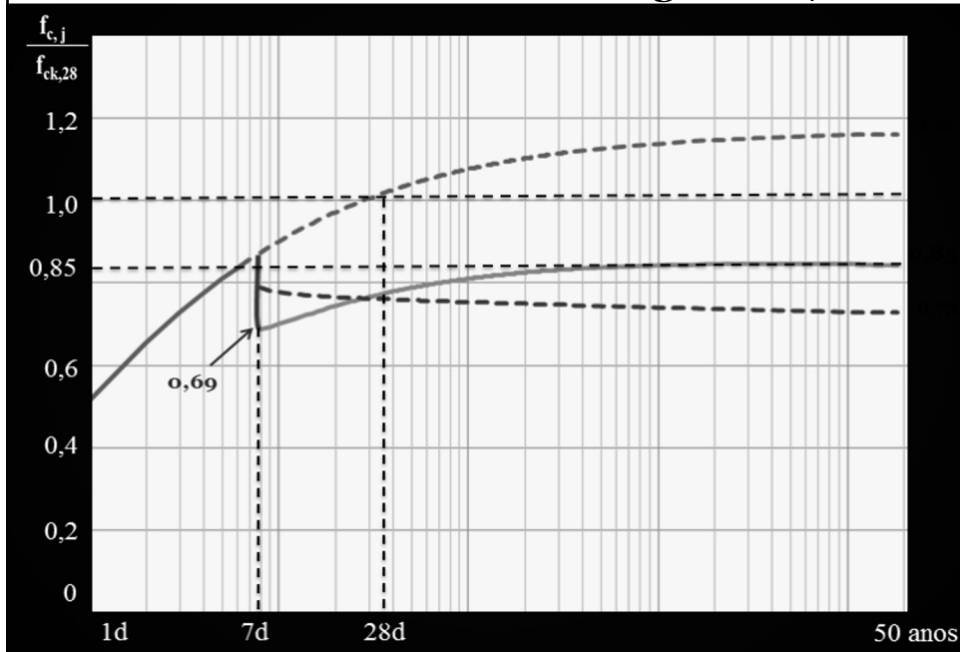
Δt após carga	7d	28d	63d
20 min	0,79	0,96	1,03
0,5 h	0,71	0,86	0,92
1 h	0,69	0,84	0,89
10h	0,66	0,80	0,85
1dia	0,66	0,79	0,84
1 mês	0,76	0,81	0,83
3 meses	0,82	0,83	0,84
6 meses	0,85	0,85	0,85
1 ano	0,86	0,86	0,86
100 a	0,88	0,88	0,88

f_{ck} a
28 dias

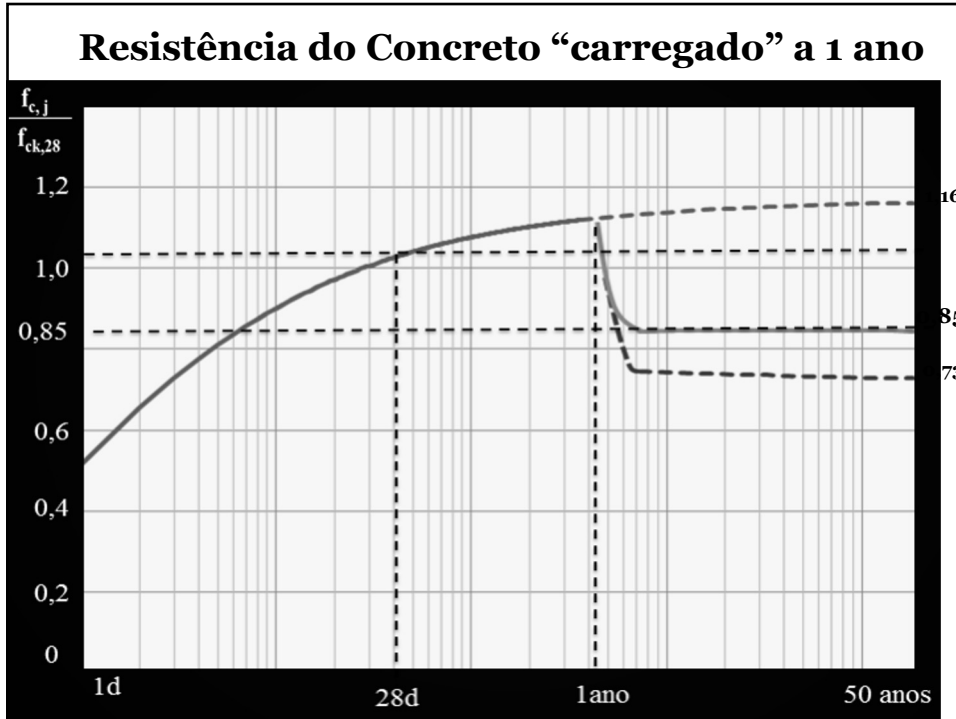
PhD Engenharia

53

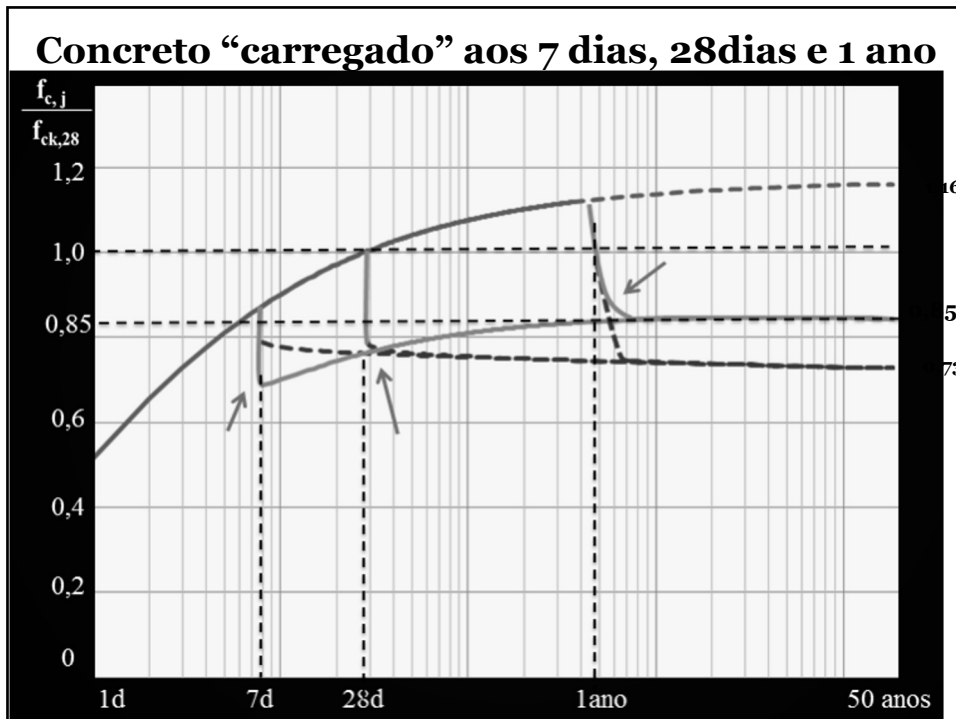
Resistência do Concreto “carregado” a 7dias



54



55



56

Dúvidas

Considerando que o E.L.S. recomenda manter as tensões de serviço dos elementos estruturais em

$$\sigma_c = 0,4 * f_c$$

será que faz sentido considerar risco de redução das resistências por conta das cargas de longa duração?

PhD Engenharia

57

Dúvidas

É razoável considerar que haverá relaxação de resistências somente quando a carga atuante superar 70% de f_{ck} , ou de f_{cd} ?

PhD Engenharia

58

Dúvidas

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

$$\beta = 0,85?$$

PhD Engenharia

59

Em lugar de

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

PhD Engenharia

60

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 relação a/c

PhD Engenharia

61

Dúvidas

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

PhD Engenharia

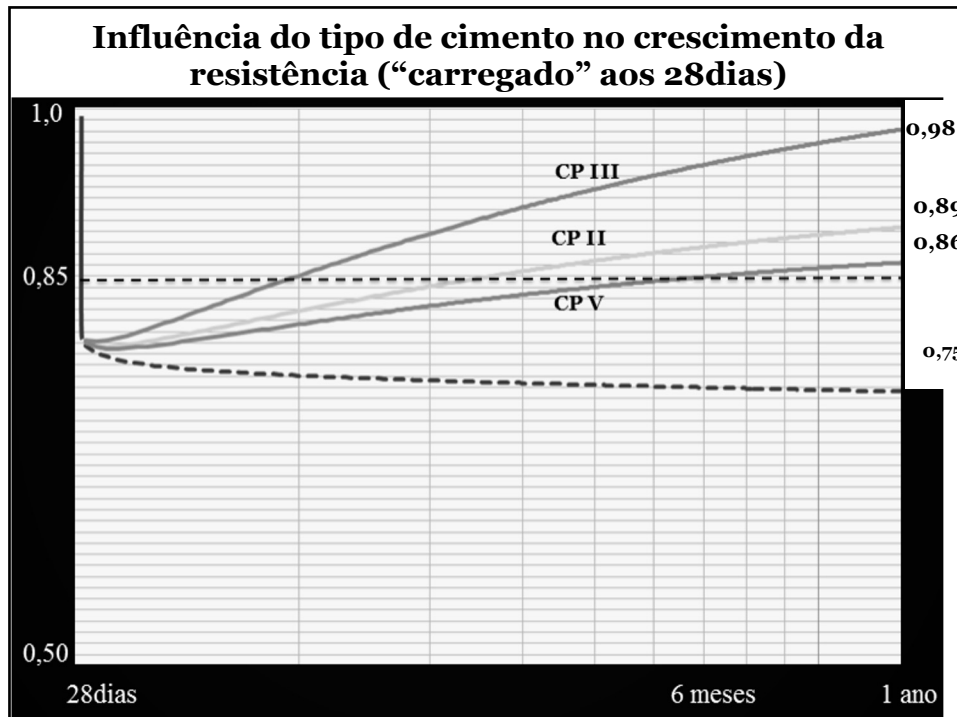
62

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, CP II, CP III, CP IV)

PhD Engenharia

63



64

Carregamento	Idade	β mínimo	Concreto
7dias	7d + 13h	0,660	ARI & CAR
7dias	7d + 11h	0,630	CP I & CP II
7dias	7d + 8h	0,557	CP III & CP IV
28dias	28d + 3d + 12h	0,785	ARI & CAR
28dias	28d + 2d + 20h	0,787	CP I & CP II
28dias	28d + 1d + 21h	0,791	CP III & CP IV
6meses	6m + 1h	0,847	ARI & CAR
6meses	6m + 1h	0,873	CP I & CP II
6meses	6m + 1h	0,945	CP III & CP IV

PhD Engenharia

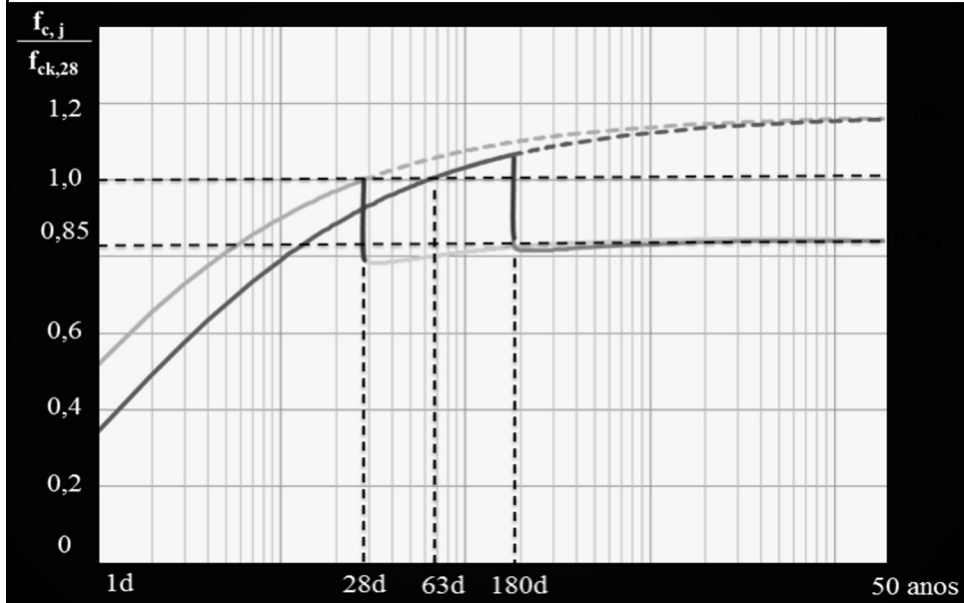
65

O concreto não atendeu o fck de 28dias mas com 63 dias o testemunho atendeu. Alterou a segurança?

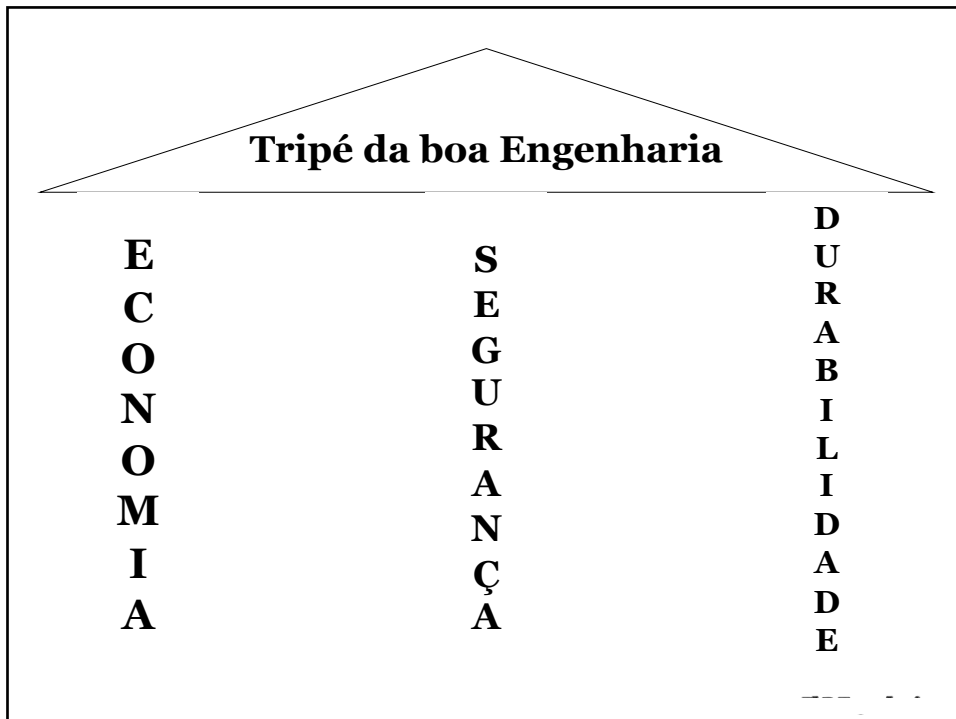
PhD Engenharia

66

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)



67



68



69

Bibliografia efeito Rüsçh

ABNT NBR 6118:2014 – Projeto de estruturas de concreto – Procedimento. (consulta free na biblioteca da PhD)

ABNT NBR 8681:2003 Versão Corrigida:2004 – Ações e segurança nas estruturas – Procedimento. (consulta free na biblioteca da PhD)

ACI-318-11 – Building Code Requirements for Structural Concrete. (consulta free na biblioteca da PhD)

fib Model Code for Concrete Structures 2010. (consulta free na biblioteca da PhD)

PhD Engenharia

70

Bibliografia

ISO 22111:2007 – **Basis for Design of Structures. General Requirements.**

HELENE, Paulo. **Resistência do Concreto sob Carga Mantida e a Idade de estimativa da Resistência Característica** In: III Simpósio EPUSP sobre Estruturas de Concreto, 1993, São Paulo. III Simpósio EPUSP sobre Estruturas de Concreto. , 1993. p.271 – 282. *(consulta free na biblioteca da PhD)*

RÜSCH, Hubert. **Researches Toward a General Flexural Theory for Structural Concrete.** ACI Journal: Proceedings. [s.l.] Julho, 1960. 28p. *(consulta free na biblioteca da PhD)*

PhD Engenharia

71

OBRIGADO!



"do Laboratório de Pesquisa ao Canteiro de Obras"

www.concretophd.com.br
www.phd.eng.br

11-2501-4822 / 23
11-7881-4014

PhD Engenharia

72