



PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM SISTEMAS DE INFRAESTRUTURA
URBANA – Comemoração dos 10 anos do Programa

INTRODUÇÃO DA SEGURANÇA no PROJETO ESTRUTURAL. Conceito de f_{ck} e de f_{cd} segundo *fib* Model Code, Eurocode II e ABNT NBR 6118. 2023

Paulo Helene

Diretor PhD Engenharia

Diretor Vice-Presidente do IBRACON

Prof. Titular Universidade de São Paulo

Gestor e Ex-Presidente ALCONPAT Internacional

Member fib(CEB-FIP) Model Code for Service Life Design

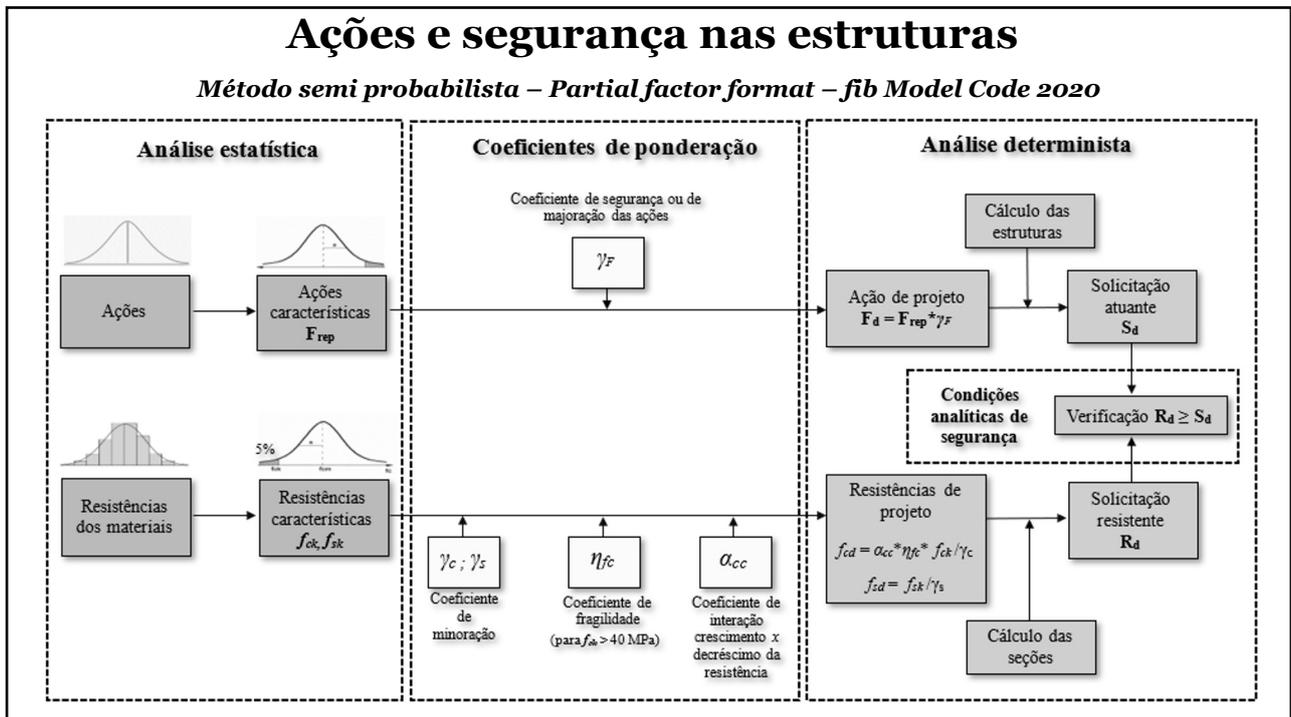
Conselheiro da CNTU, SEESP e PMSP

aula Inaugural 2024. PUC Campinas 06.05.2024

1

**...como os engenheiros projetam
estruturas, edifícios, pontes, para
ficarem de pé, frente às forças da
natureza: gravidade, ventos,
vibrações, furacões, sismos???**

2

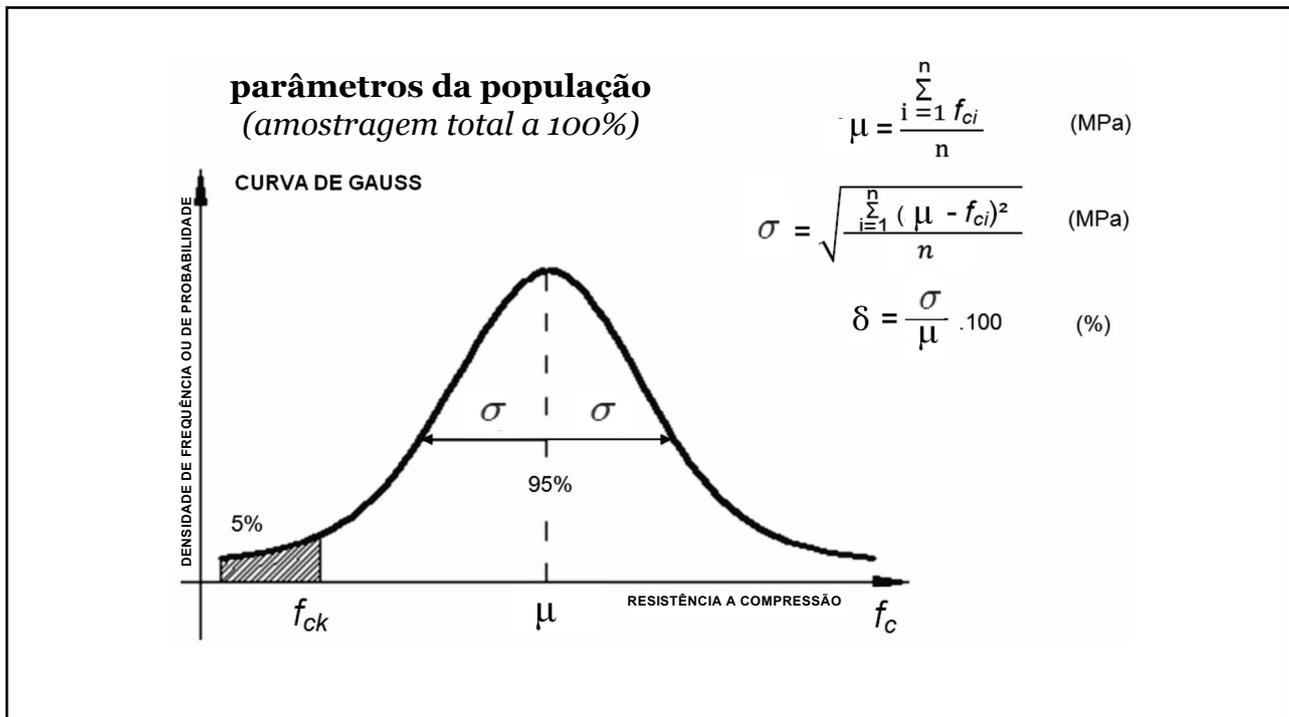


3

o que é a resistência característica do concreto à compressão, f_{ck} ?



4



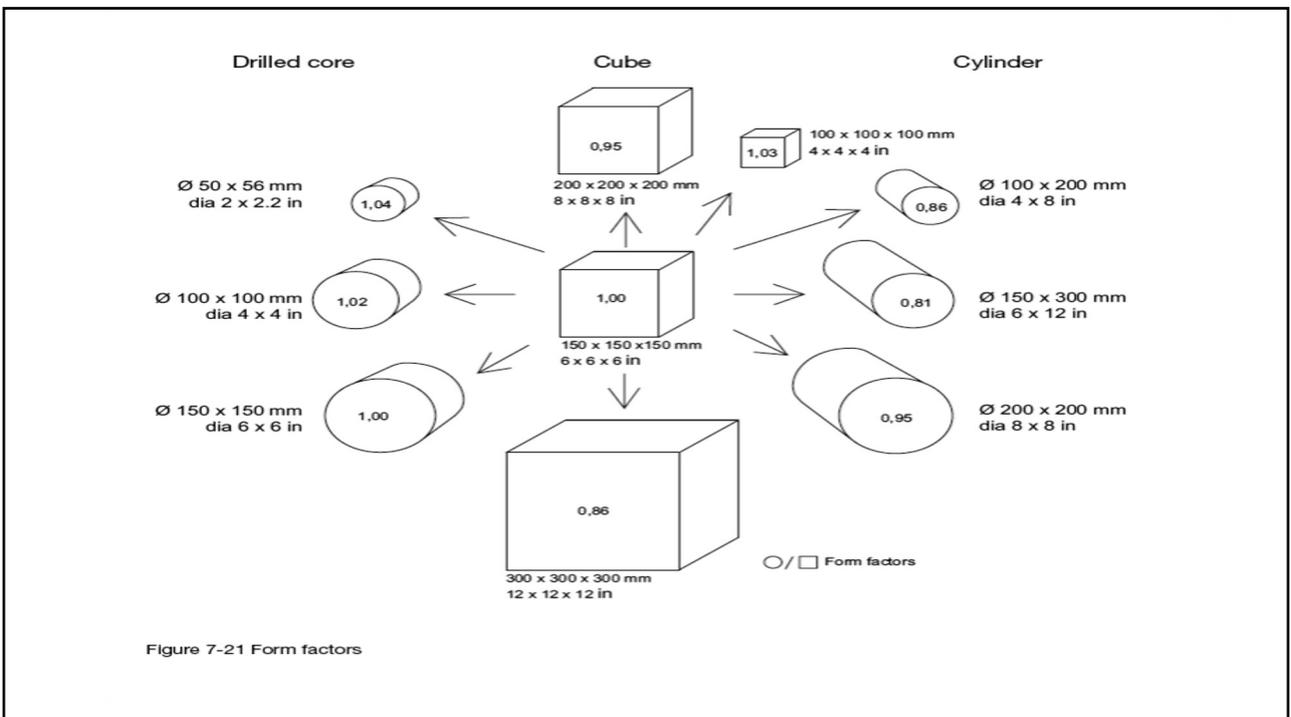
5

**qual é o referencial, para
aceitação, de resistência à
compressão do concreto,
 f_{ck}
no Brasil ?**

6



7



8

referencial BRASIL
de resistência à compressão do concreto, f_{ck}

- ✓ o cilindro 15cm ϕ * 30cm
- ✓ o cilindro 10cm ϕ * 20cm
- ✓ planejado (lotes) de acordo com a ABNT NBR 12655
- ✓ amostrado de acordo com a ABNT NM 33
- ✓ moldado de acordo com a ABNT NBR 5738
- ✓ transportado de acordo com a ABNT NBR 5738
- ✓ curado de acordo com a ABNT NBR 5738
- ✓ capeado de acordo com a ABNT NBR 5738
- ✓ ensaiado de acordo com a ABNT NBR 5739
- ✓ resultado analisado de acordo com a ABNT NBR 12655

referido a uma certa idade

9

f_{ck} é a resistência do concreto na estrutura?



Não !

f_{ck} é a resistência potencial do concreto na boca da betoneira !

10

**f_{ck}
é a resistência do
concreto na
fundação, pilares,
vigas e lajes da
estrutura?**



**Não !
 f_{ck} é a resistência
potencial do
concreto daquela
amassada medida
em corpos de
prova moldados,
sazonados e
ensaiados em
condições ideais !**

11

**f_{ck}
é a resistência do concreto de partida que o projetista estrutural usa
para verificar a segurança?**



**Sim !
 f_{ck} é a resistência característica do concreto à compressão utilizada
como valor de entrada nos programas de verificação da segurança
numa análise ou processo usual, padrão !**

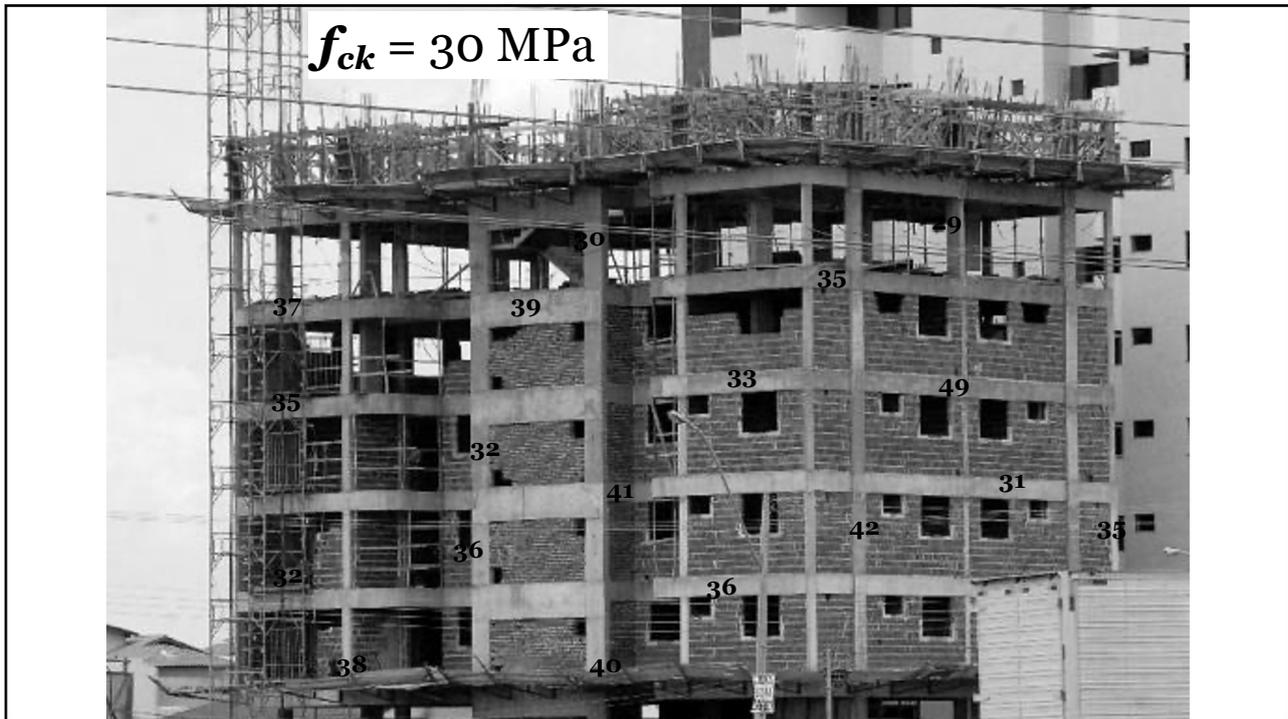
12

... e esse é o grande problema porque alguns engenheiros e projetistas consideram que f_{ck} é a resistência do concreto lá na estrutura !..

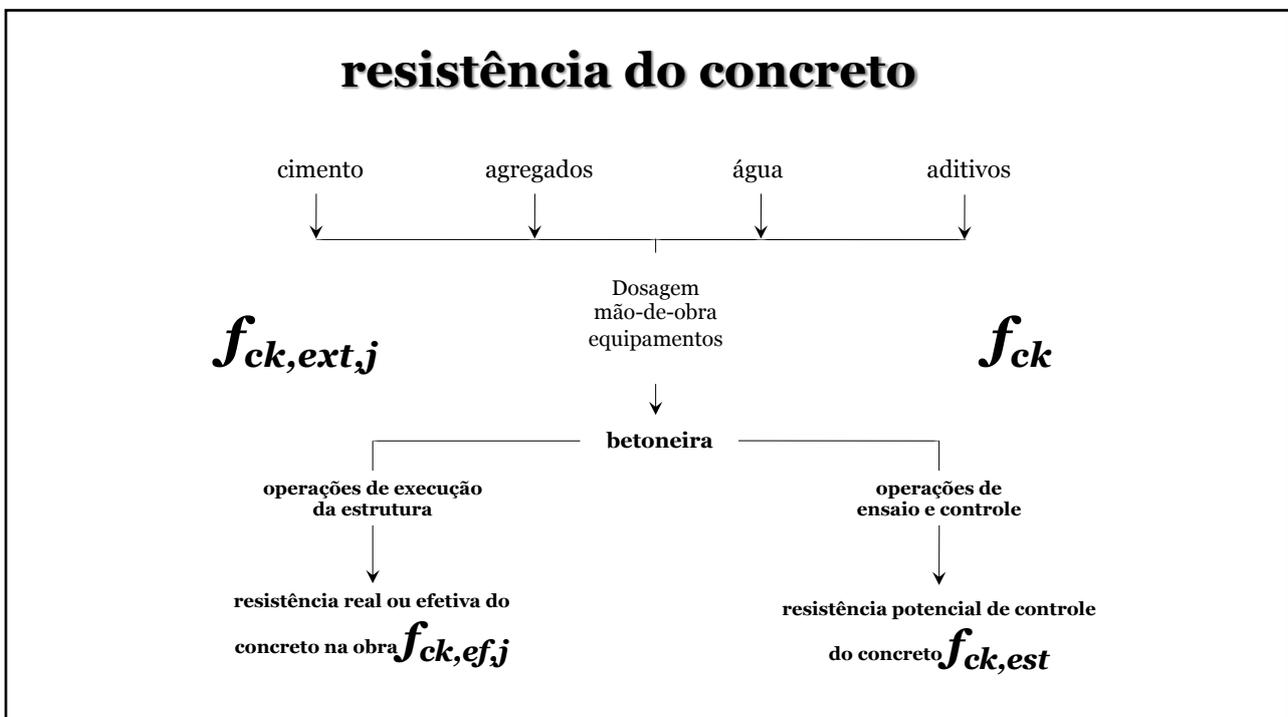
13

... então qual é a resistência “mínima” à compressão do concreto lá na estrutura que um engenheiro civil pode considerar como disponível (Vida Útil) para fins de dimensionamento, com segurança,

14



15



16

Ações e Segurança MC 2020 & EUROCODE 2

$\alpha_{cc} = 0,85 \text{ a } 1,00$

$$f_{cd} = \alpha_{cc} * \eta_{fc} * \frac{f_{ck}}{\gamma_c}$$

$$\eta_{fc} = \left(\frac{40}{f_{ck}}\right)^{1/3} \leq 1,0 \text{ MPa}$$

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

$$f_{cd} = 0,85 * 1 * \frac{30}{1,5}$$

$f_{ck,ef} \text{ (estrutura)} \approx 17 \text{ MPa}$

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

$$f_{cd} = 0,85 * \left(\frac{40}{50}\right)^{0,33} * \frac{50}{1,5}$$

$f_{ck,ef} \text{ (estrutura)} \approx 26,3 \text{ MPa}$

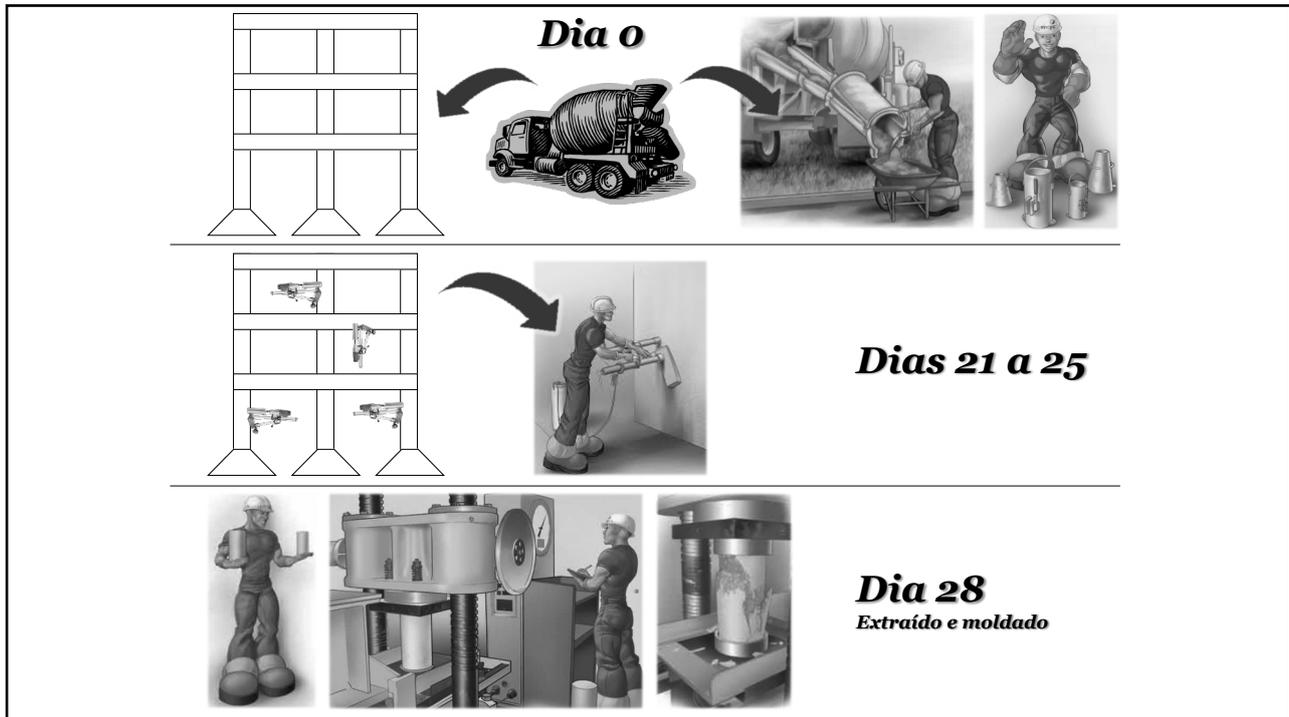
17

TESE de DOUTORADO

CREMONINI, R. A. *Análise de Estruturas Acabadas: Contribuição para a Determinação da Relação entre as Resistências Potencial e Efetiva do Concreto*. São Paulo, EPUSP, 1994.

Ruy Alberto Cremonini. Prof. Associado, UFRGS

18



19

Conclusões

pilares:

$$\eta = \frac{f_c}{f_{c,ext}} = \frac{f_{ck}}{f_{ck,ext}} = 1.24$$

lajes & (vigas)

$$\eta = \frac{f_c}{f_{c,ext}} = \frac{f_{ck}}{f_{ck,ext}} = 1.20$$

20

edificações

$$f_{cd} = \alpha_{cc} * \eta_{fc} * \frac{f_{ck}}{\gamma_c}$$

$$f_{cd} = 0,85 * 1 * \frac{f_{ck}}{1,4}$$

$$f_{cd} \cong 0,61 * f_{ck}$$

estaca hélice

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

$$f_{cd} = 0,85 * \frac{f_{ck}}{2,7}$$

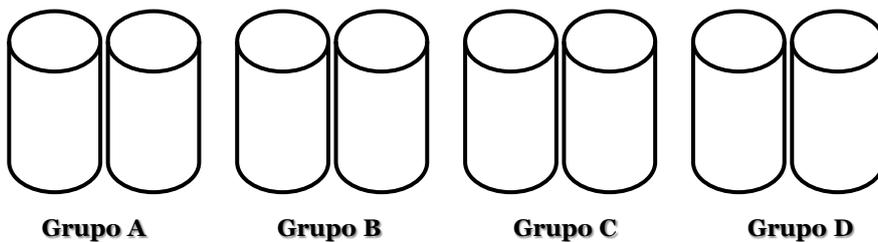
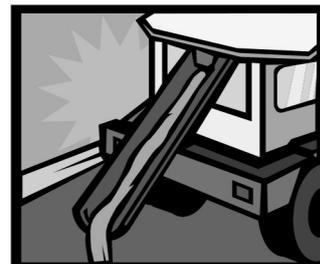
$$\therefore f_{cd} \cong 0,30 * f_{ck}$$

21

Como obter a maior resistência à compressão aos 28 dias?

Concreto de uma betonada:
ABNT NBR 12655:2022
ABNT NBR 5738:2015

Moldagem de corpos de prova cilíndricos irmãos, por grupo



22

quantas resistências tem o concreto
de um caminhão betoneira?

$$f_{c1} \quad f_{c2} \quad f_{c3} \quad f_{c4} \quad f_{c5}$$

exemplar = mais alto ($f_{ck,est}$)

$$f_{ck,est} = 48,7 \text{ MPa}$$

“potencial do concreto”

23

...considerando que se trata de uma
estrutura com $f_{ck} = 45 \text{ MPa}$,
pergunta-se se está OK, ou seja, se
esse caminhão tem um concreto
conforme?

24

quantas resistências tem o concreto
de um caminhão betoneira?

$$f_{c1} \quad f_{c2} \quad f_{c3} \quad f_{c4} \quad f_{c5}$$

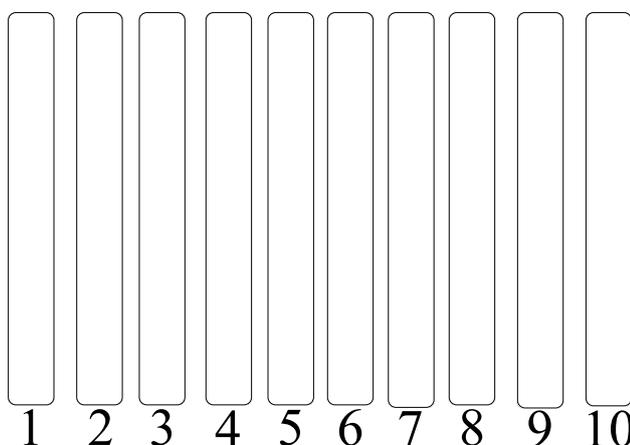
exemplar = mais alto ($f_{ck,est}$)

$$f_{ck,est} = 48,7\text{MPa}$$

$$f_{ck} = 45\text{MPa}$$

25

com esse concreto foram construídos 10 pilares. qual a
resistência característica do concreto à compressão nesses
pilares para fins de verificação da segurança?

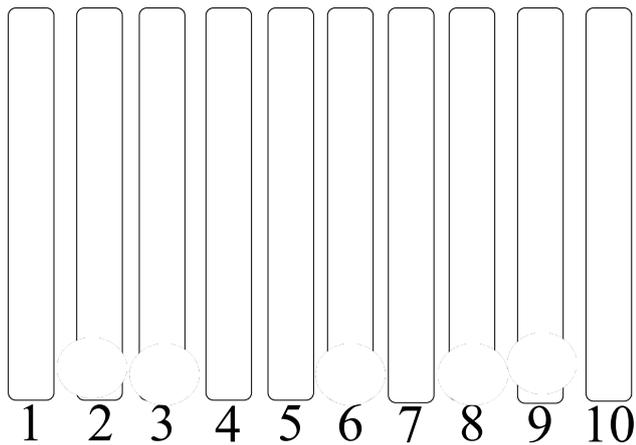


$$f_{ck}$$

$$45\text{MPa}$$

26

“ninhos de concretagem”
qual a resistência característica do concreto à compressão
nesses pilares para fins de verificação da segurança?



27



28

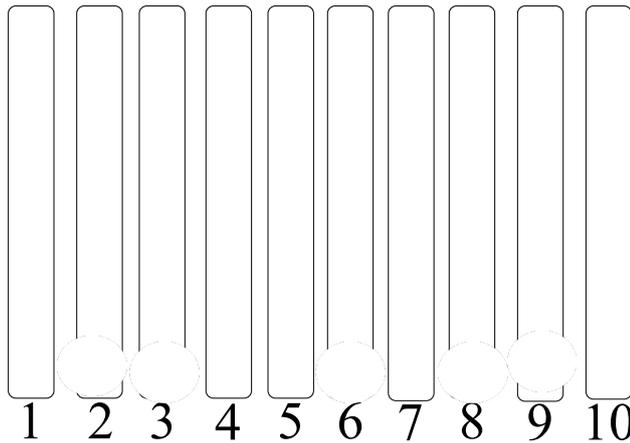


29



30

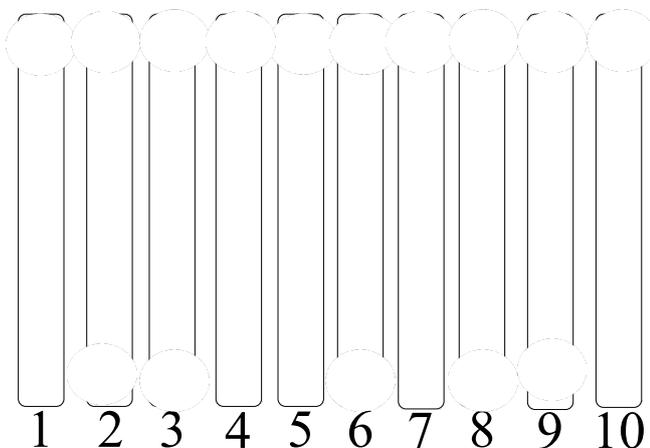
“ninhos de concretagem”
 qual a resistência do concreto nesses pilares para fins de
 verificação da segurança?



f_{ck}
45MPa

31

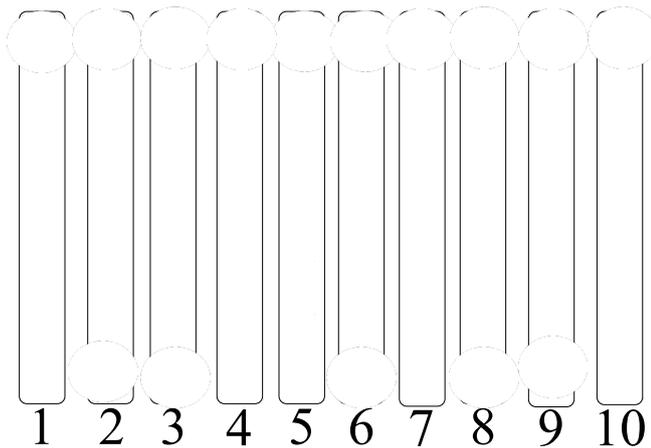
qual a resistência do concreto nos pilares que está mais próxima
 da resistência característica do concreto à compressão
 (controle, moldado) $f_{ck,est}$?



f_{ck}
45MPa

32

qual a resistência do concreto nos pilares que está mais próxima da resistência de controle (moldado) $f_{ck,est}$?

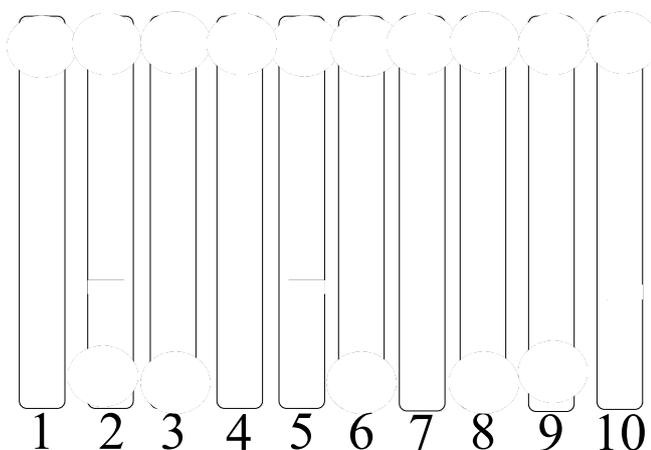


terço inferior

33

qual a resistência obtida de um pilar?

$f_{ck,ext}$?



terço inferior

$f_{ck,ext,1}$

$f_{ck,ext,2}$

$f_{ck,ext,3}$

34

ABNT NBR 7680:2015 $f_{ck,ext,j}$

ABNT NBR 6118:2023 f_{ck}

ABNT NBR 12655:2022 $f_{ck,est}$

**referencial de segurança
 f_{ck}**

35

Premissas

**Como *cresce* a resistência
do concreto com o tempo a
partir de 28 dias ?**

36

Crescimento da Resistência *fib* Model Code 2020

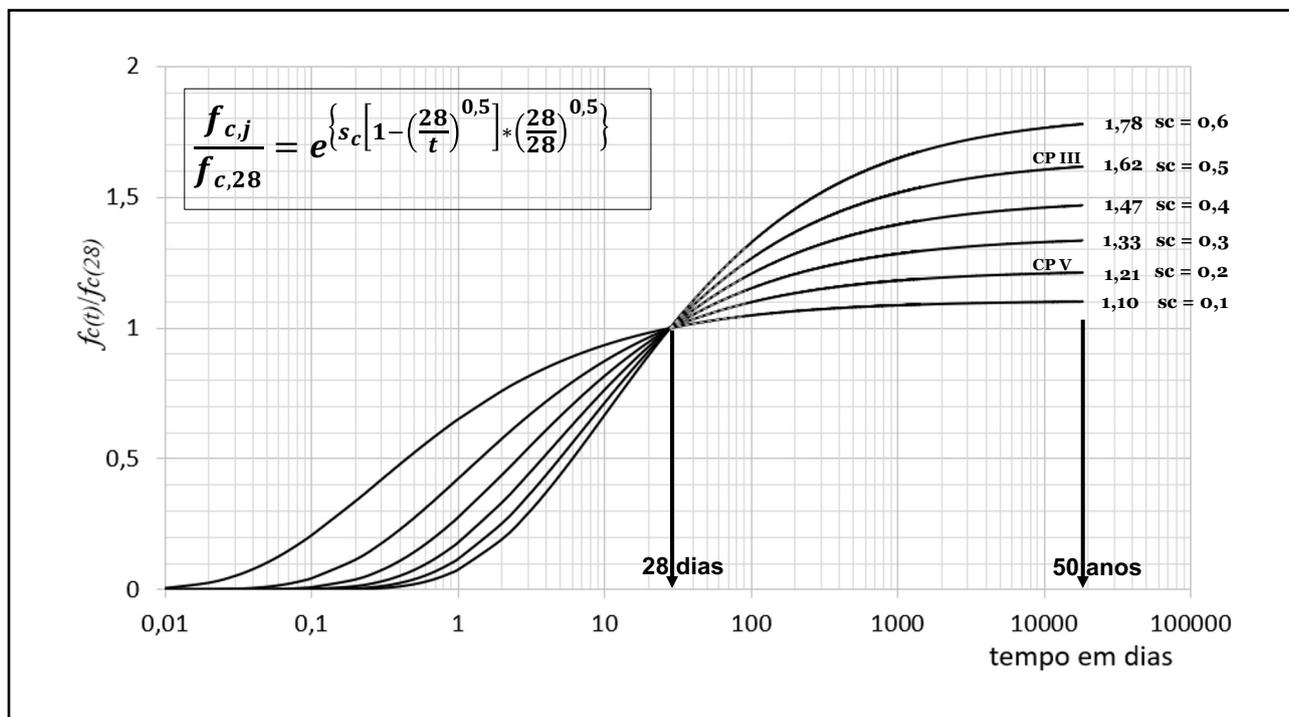
$$\frac{f_{c,j}}{f_{c,ref}} = e^{\left\{ s_c \left[1 - \left(\frac{t_{ref}}{t} \right)^{0,5} \right] * \left(\frac{28}{t_{ref}} \right)^{0,5} \right\}}$$

fib Model
Code 2020
Item 14.9.1

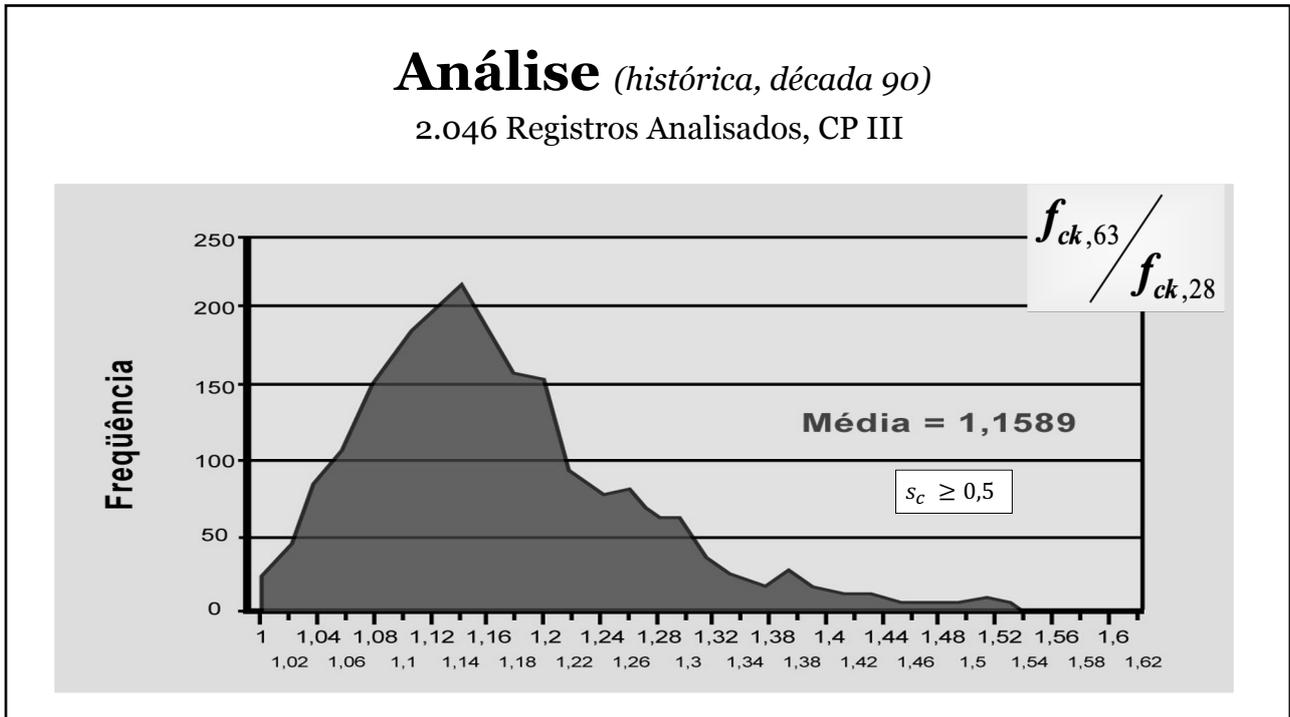
Resistência à compressão do Concreto (MPa)	s_c		
	Classe CS	Classe CN	Classe CR
$f_c \leq 35$	0,6	0,5	0,3
$35 < f_c < 60$	0,5	0,4	0,2
$f_c \geq 60$	0,4	0,3	0,1

Nota: As Classes CS, CN e CR são determinadas em função do tipo e da classe de resistência do cimento. Pode-se admitir, para efeitos de equivalência com os cimentos nacionais: CS (CP III ou CP IV), CN (CP I ou CP II) e CR (CP V). Para determinação das Classes CS, CN e CR, consultar Tabela 14.6.8 "Strength development classes of concrete" do *fib* Model Code 2020, ou a Table B1 "Strength development classes of concrete" do Eurocode 2:2023 e a norma EN 197-1 "Cement – Part 1: Composition, specifications and conformity criteria for common cements".

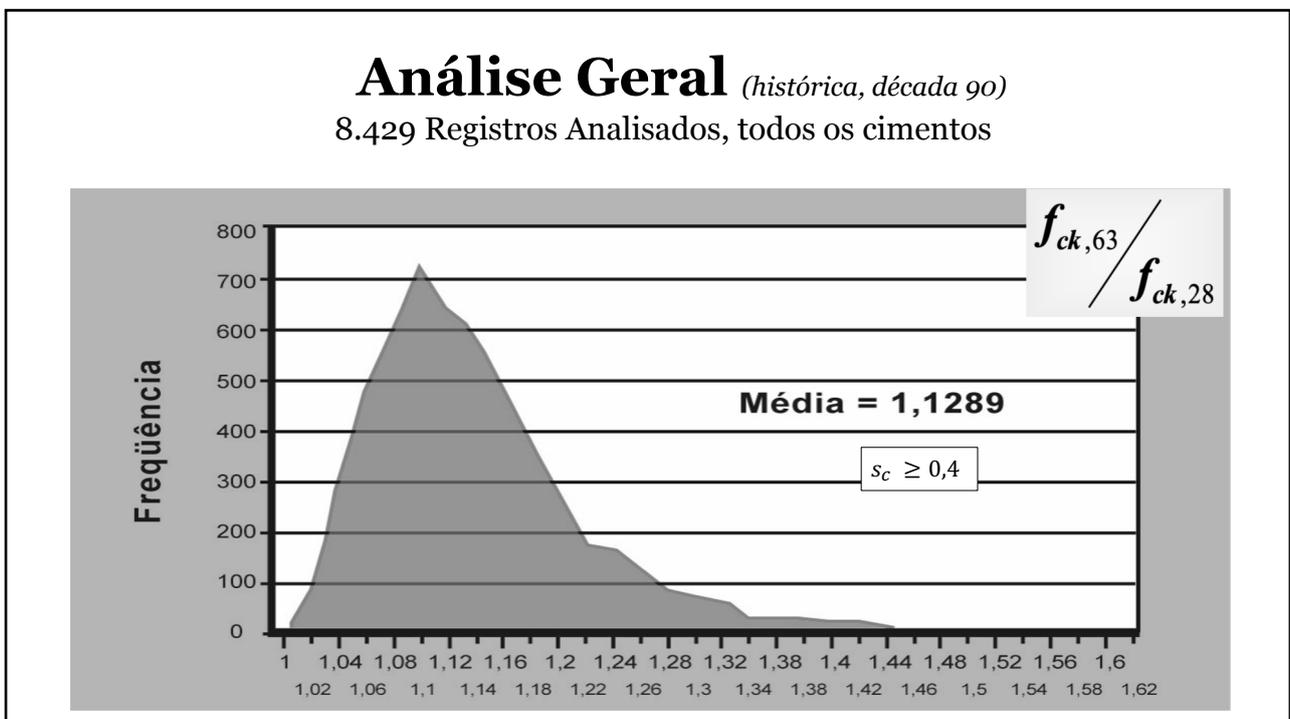
37



38



39



40

Premissas

Como decresce a resistência com o tempo a partir de 28dias ?

41

Resistência sob Carga de Longa Duração (efeito Rüsçh)

*fib Model
Code 2020
Item 14.6.1.6.3*

$$\beta_{c,sus}(t, t_0) = \beta_{t_0}(t_0) + [1 - \beta_{t_0}(t_0)] * \left[1 + 10^4 \frac{(t - t_0)}{t_0} \right]^{-0,1}$$

Sendo:

$$\beta_{t_0}(t_0) = 0,64 + 0,01 \cdot \ln(t_0)$$

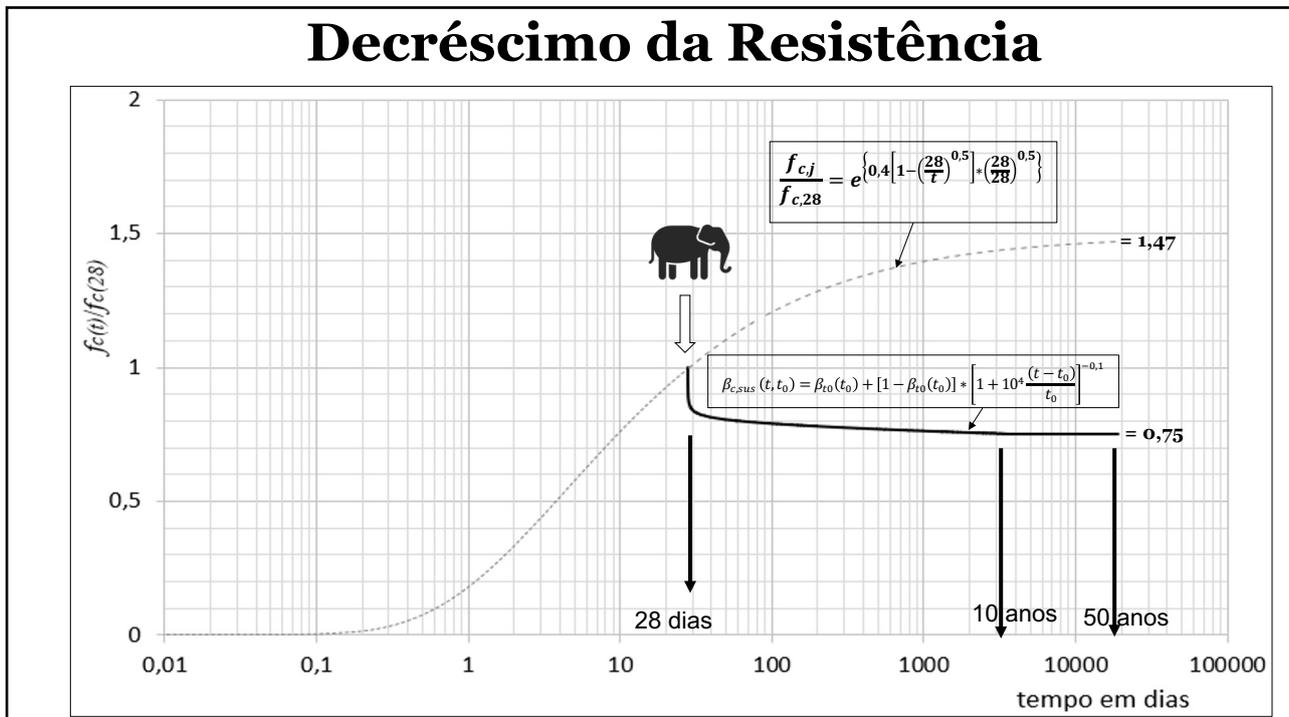
→ t em dias

→ t_0 → idade de aplicação das cargas

→ $t - t_0 > 15$ minutos

42

Decréscimo da Resistência



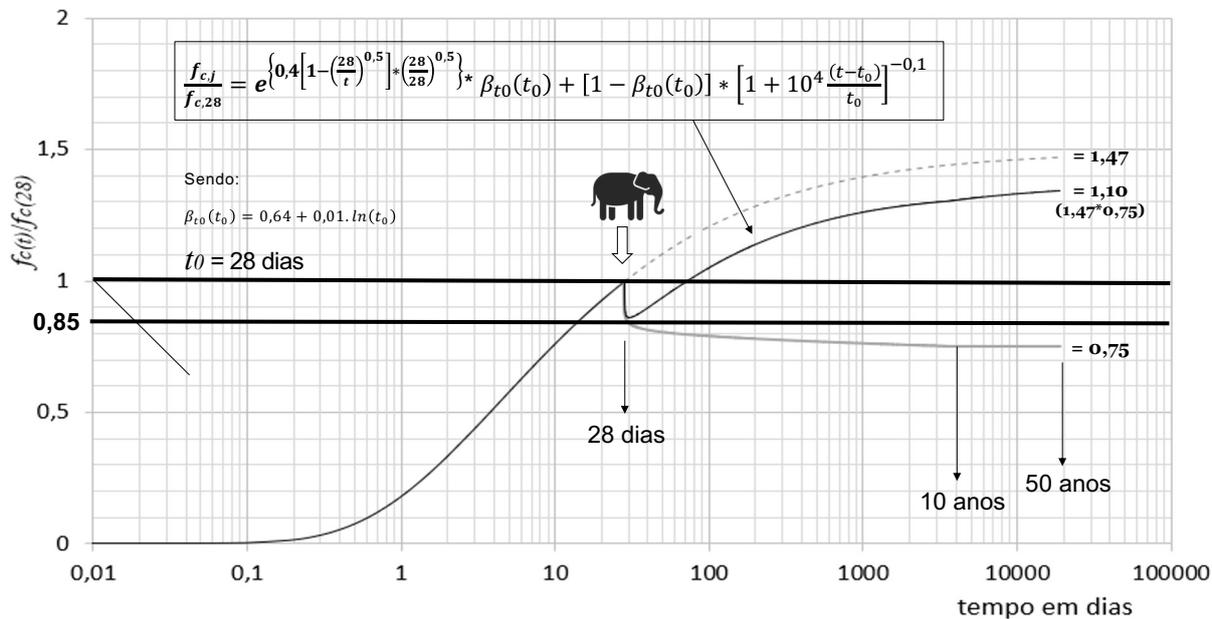
43

Premissas

Combinando crescimento com
decréscimo a partir de
28 dias ?

44

Resistência do Concreto “carregado” a 28 dias



45

Coeficientes de segurança parciais

MC 2020; ABNT NBR 6118:2023 e Eurocode 2.

ABNT NBR 6118:2023		MC 2020 Eurocode 2 EN 1992-1-1:2023	
Materiais (γ_m)	Ações (γ_f)	Materiais (γ_m)	Ações (γ_f)
γ_c (concreto) 1,4	γ_g (ações permanentes) 1,4	γ_c (concreto) 1,4 a 1,6 1,5	γ_g (ações permanentes) 1,3 a 1,4 1,35
γ_s (aço) 1,15	γ_q (ações variáveis) 1,4	γ_s (aço) 1,1 a 1,175 1,15	γ_q (ações variáveis) 1,3 a 1,7 1,5

46

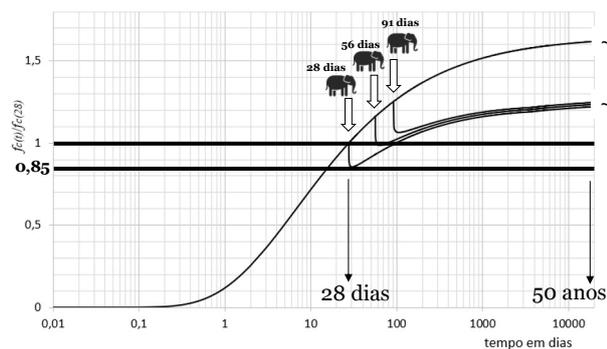
Cálculo do *fcd* segundo várias normas

$f_{ck28} = 20$ a 40 MPa com cimento CP III ($s=0,5$)

$t_{ref} = 28$ dias
 $t_{carga} = 28$ dias

$t_{ref} = 28$ dias
 $t_{carga} = 56$ dias

$t_{ref} = 28$ dias
 $t_{carga} = 91$ dias



cimento. carga	ABNT NBR 6118:2023	fib Model Code 2020 (MC 2020)	Eurocode 2: 2023
CP III. 28d	$0,61 * f_{ck}$	$0,67 * f_{ck}$	$0,67 * f_{ck}$
CP III. 56d	$0,61 * f_{ck}$	$0,67 * f_{ck}$	$0,67 * f_{ck}$
CP III. 91d	$0,61 * f_{ck}$	$0,67 * f_{ck}$	$0,67 * f_{ck}$

47

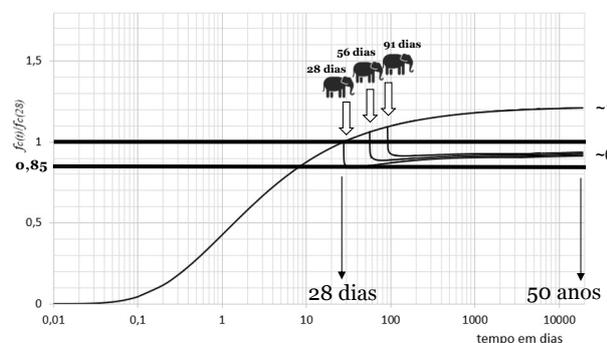
Cálculo do *fcd* segundo várias normas

$f_{ck28} = 20$ a 40 MPa com ($s=0,2$)

$t_{ref} = 28$ dias
 $t_{carga} = 28$ dias

$t_{ref} = 28$ dias
 $t_{carga} = 56$ dias

$t_{ref} = 28$ dias
 $t_{carga} = 91$ dias



cimento. carga	ABNT NBR 6118:2023	fib Model Code 2020 (MC 2020)	Eurocode 2: 2023
CP II&III&V 28d	$0,61 * f_{ck}$	$0,67 * f_{ck}$	$0,67 * f_{ck}$
CP II&III 56d	$0,61 * f_{ck}$	$0,67 * f_{ck}$	$0,67 * f_{ck}$
CP II&III&V 91d	$0,61 * f_{ck}$	$0,67 * f_{ck}$	$0,67 * f_{ck}$

48

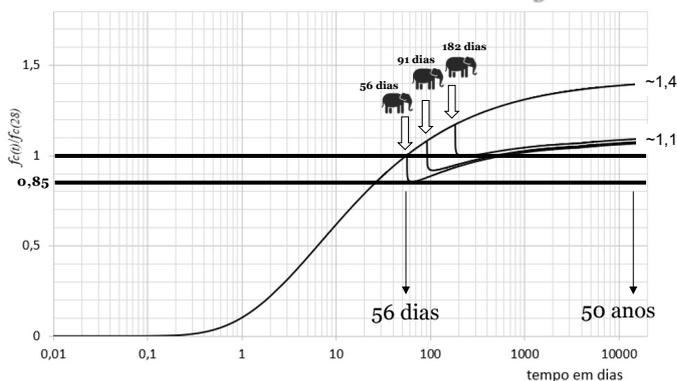
Cálculo do *fcd* segundo várias normas

$f_{ck28} = 20$ a 40 MPa com cimento CP III ($s=0,5$)

$t_{ref} = 56$ dias
 $t_{carga} = 56$ dias

$t_{ref} = 56$ dias
 $t_{carga} = 91$ dias

$t_{ref} = 56$ dias
 $t_{carga} = 182$ dias



cimento. carga	ABNT NBR 6118:2023	fib Model Code 2020 (MC 2020)	Eurocode 2: 2023
CP III.56	<i>nil</i>	$0,57 \cdot f_{ck}$	$0,67 \cdot f_{ck}$
CP III.91	<i>nil</i>	$0,57 \cdot f_{ck}$	$0,67 \cdot f_{ck}$
CP III.182	<i>nil</i>	$0,57 \cdot f_{ck}$	$0,67 \cdot f_{ck}$

49

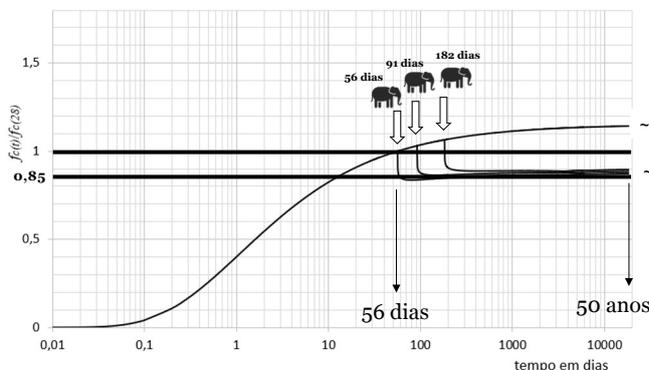
Cálculo do *fcd* segundo várias normas

$f_{ck28} = 20$ a 40 MPa com cimento CP V ($s=0,2$)

$t_{ref} = 56$ dias
 $t_{carga} = 56$ dias

$t_{ref} = 56$ dias
 $t_{carga} = 91$ dias

$t_{ref} = 56$ dias
 $t_{carga} = 182$ dias



cimento. carga	ABNT NBR 6118:2023	fib Model Code 2020 (MC 2020)	Eurocode 2: 2023
CP V.56	<i>nil</i>	$0,57 \cdot f_{ck}$	$0,57 \cdot f_{ck}$
CP V.91	<i>nil</i>	$0,57 \cdot f_{ck}$	$0,57 \cdot f_{ck}$
CP V.182	<i>nil</i>	$0,57 \cdot f_{ck}$	$0,57 \cdot f_{ck}$

50

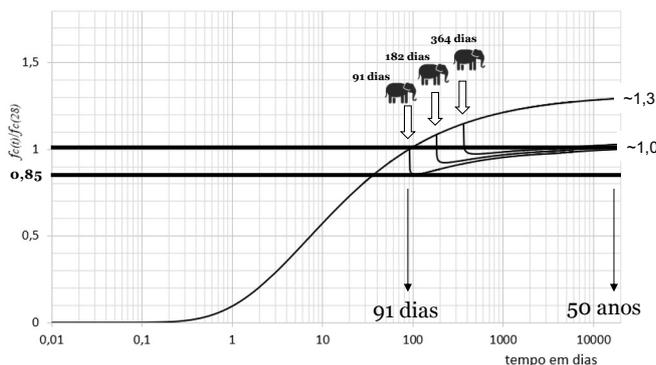
Cálculo do *fcd* segundo várias normas

$f_{ck28} = 20$ a 40 MPa com cimento CP III ($s=0,5$)

$t_{ref} = 91$ dias
 $t_{carga} = 91$ dias

$t_{ref} = 91$ dias
 $t_{carga} = 182$ dias

$t_{ref} = 91$ dias
 $t_{carga} = 364$ dias



cimento. carga	ABNT NBR 6118:2023	fib Model Code 2020 (MC 2020)	Eurocode 2: 2023
CP III.91	<i>nil</i>	$0,57 * f_{ck}$	$0,57 * f_{ck}$
CP III.182	<i>nil</i>	$0,57 * f_{ck}$	$0,57 * f_{ck}$
CP III.364	<i>nil</i>	$0,57 * f_{ck}$	$0,57 * f_{ck}$

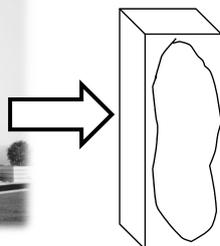
51

Estudo de sustentabilidade



Edifício residencial de estrutura de concreto armado com 24 pavimentos tipo + 2 subsolos.

Área do pavimento tipo: 365 m².

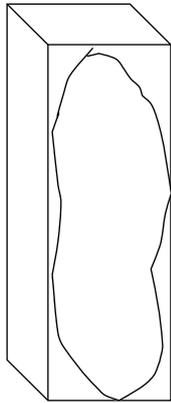


Estudo de um pilar curto de seção quadrada, localizado entre o 1º e 2º pavimento (pé direito 2,88 m).

Edifício com 1008 tramos de pilar

52

Premissas para o dimensionamento do pilar



Força normal característica:

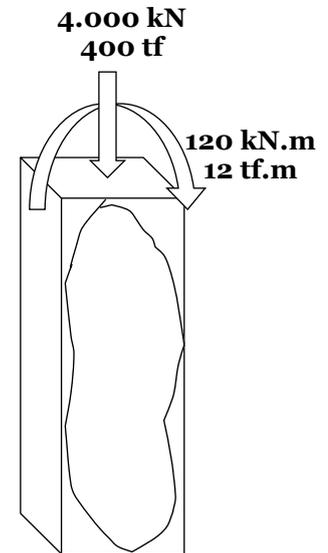
$$N_{sk} = 4000 \text{ kN} = 400 \text{ tf}$$

Momentos totais característicos:

$$M_{xsk} = 120 \text{ kN.m} = 12 \text{ tf.m}$$

$$M_{ysk} = 120 \text{ kN.m} = 12 \text{ tf.m}$$

Considerou-se que as ações acidentais correspondem a 25% da força normal característica total



53

Normas utilizadas

dimensionamento do pilar curto ($\lambda < 35$) de acordo com as normas:

✓ *ABNT NBR 6118:2023*



✓ *fib Model Code 2020*



✓ *Eurocode 2:2023*

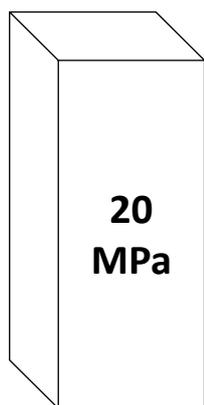


54

Dimensionamento do pilar curto

- ✓ *2 taxas de armadura, uma mínima ($\geq 0,4\%$) e uma máxima para emendas por traspasse ($< 4,0\%$);*
- ✓ *2 diferentes classes de resistência do concreto, C20 e C50, com f_{ck} referido a três diferentes idades de 28, 56 e 91 dias.*
- ✓ *concretos amassados com duas diferentes classes de cimentos; CR (CP V) e CS (CP III).*

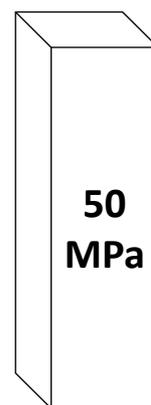
55



armadura

0,4%

4,0%



cimento; agregados; aditivos; traço; data do f_{ck}

56

Para a quantificação das emissões de CO₂ foram utilizados dados disponíveis em:



Cimento CP III Santa Helena -Votorantim **384 kg CO₂ eq.** por tonelada.
Cimento CP V Santa Helena -Votorantim **852 kg CO₂ eq.** por tonelada.



8 kg CO₂ eq. por metro quadrado de fôrma.



Aço CA 50 ArcelorMittal Piracicaba **786 kg CO₂ eq.** por tonelada.



Os dados utilizados ficaram dentro das faixas informadas pelo Sidac.

57

440 kgCO₂eq

180 kgCO₂eq

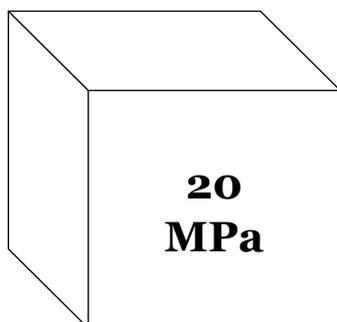
50 cm

45 cm

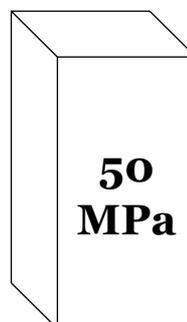
f_{ck} 28 dias

CP V

4,0%



20 MPa



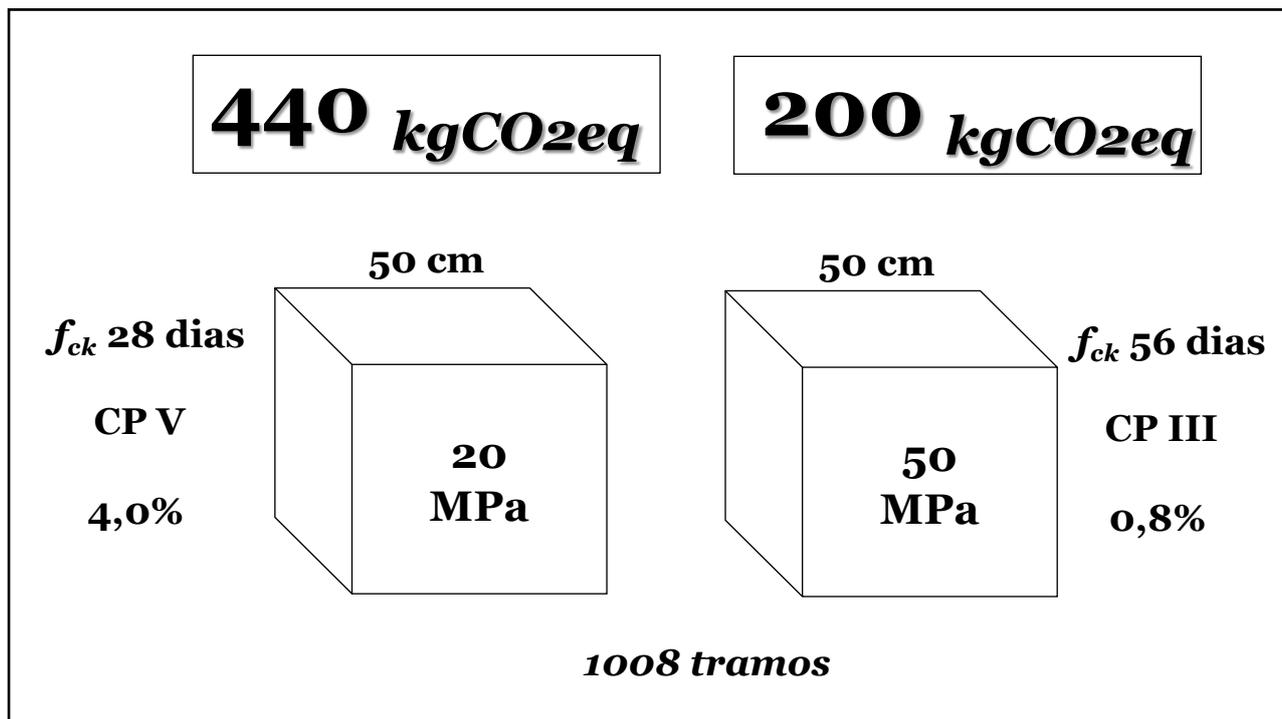
50 MPa

f_{ck} 56 dias

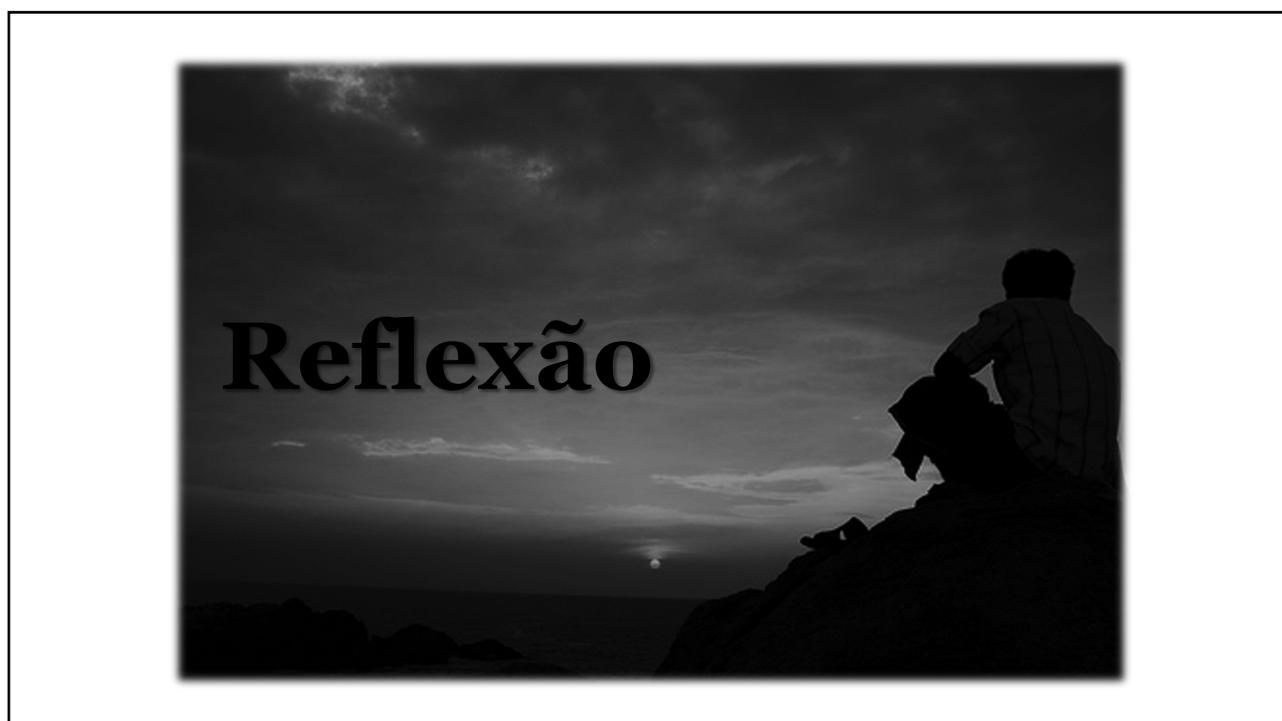
CP III

1,0%

58



59

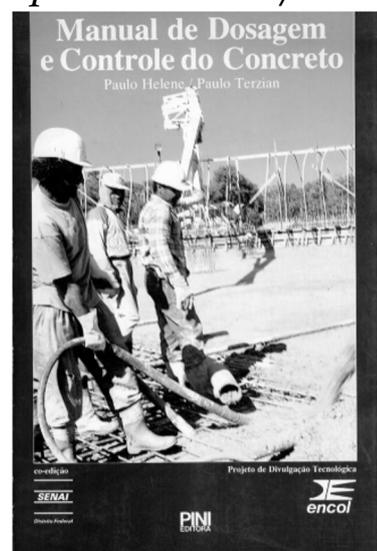
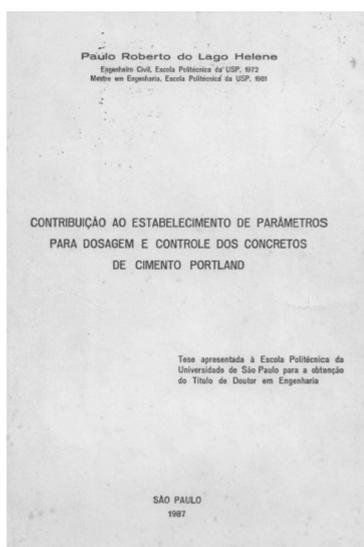


60

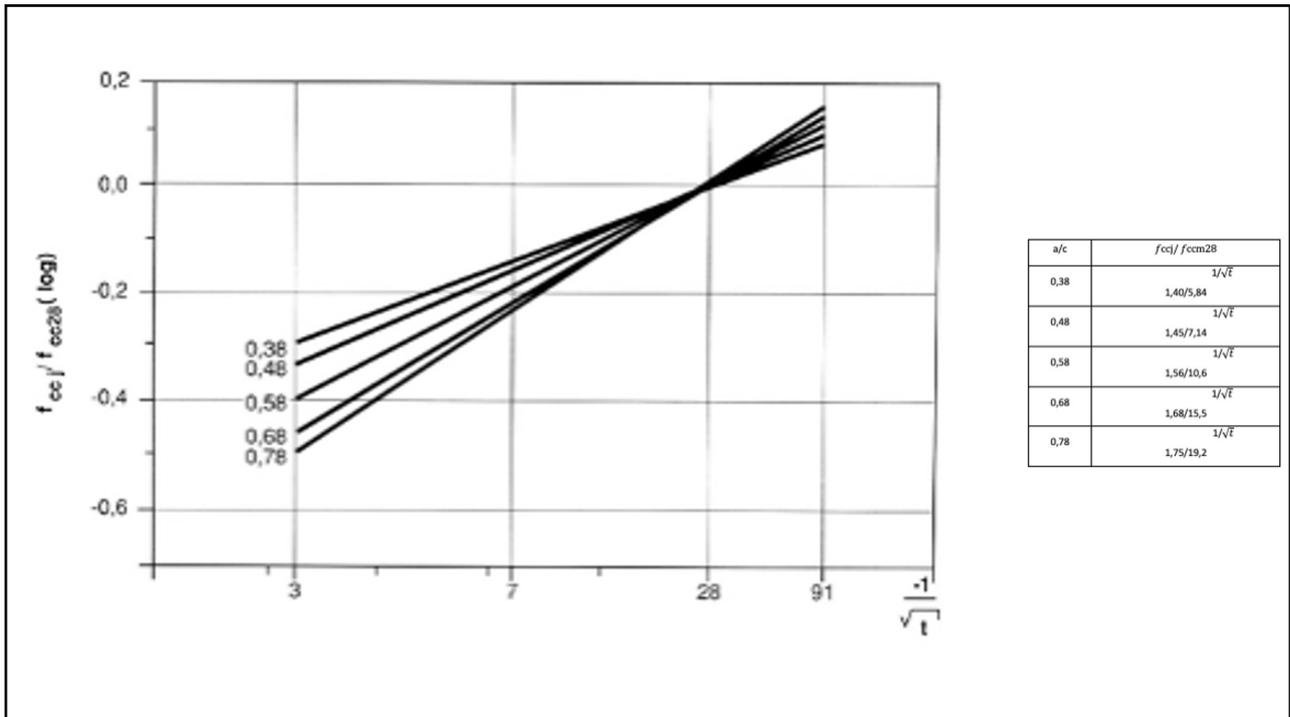
SEGURANÇA

61

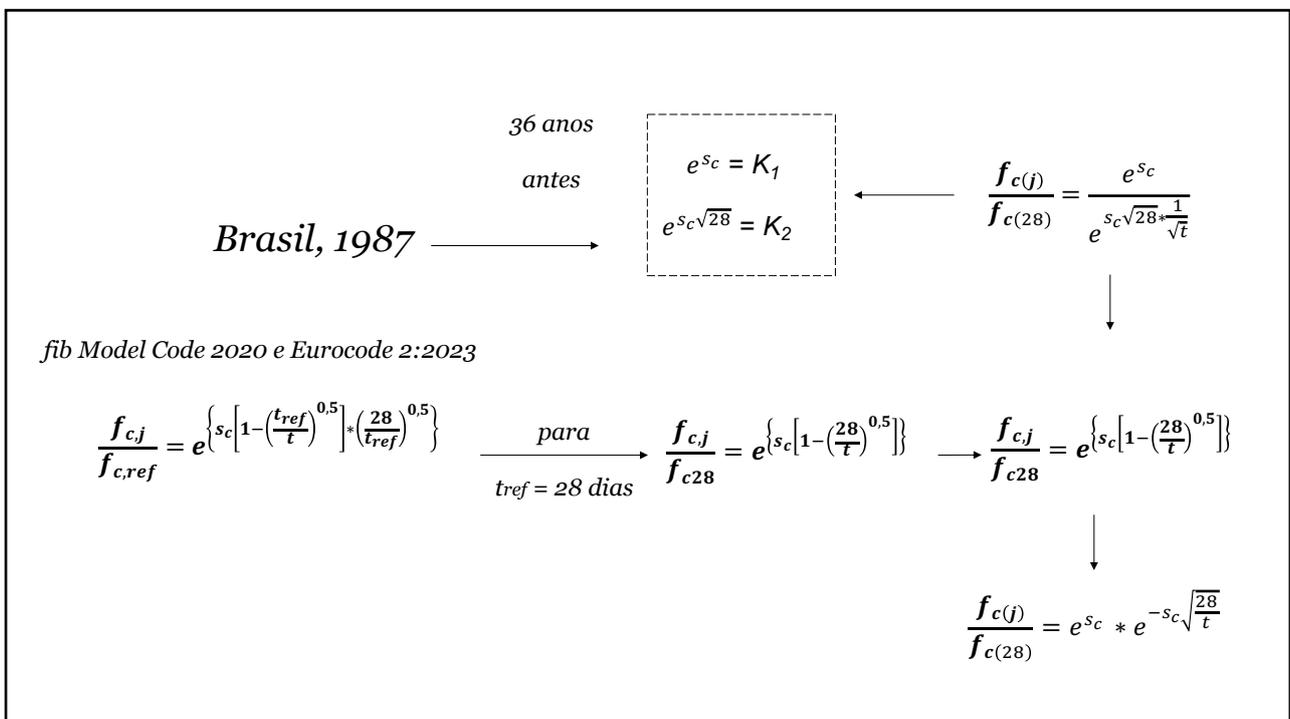
Na década de 80, há 40 anos, na minha tese de doutorado mostrei que as curvas de crescimento da resistência do concreto por hidratação do cimento deveriam ser escritas como dependentes de a/c :



62



63



64

1993. HELENE, Paulo. *A 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. Pg. 271-282

A RESISTÊNCIA DO CONCRETO SOB CARGA MANTIDA E A IDADE
DE ESTIMATIVA DA RESISTÊNCIA CARACTERÍSTICA

HELENE, Paulo R. L.
Eng. Civil, Doutor em Engenharia, Prof. Associado EPUSP, C. Postal 61548, SP 05424-970,
BRASIL

Resumo

A resistência do concreto na estrutura depende da idade a partir da qual os esforços solicitantes atingem níveis elevados. Com esforços solicitantes acima de 70% dos esforços resistentes e desde que as tensões de compressão no concreto também atinjam e permaneçam acima de 70 a 80% da resistência à compressão do concreto, deve-se levar em conta a redução da resistência à compressão do concreto, por efeito de carga mantida.

Esse fenômeno, também conhecido no país por efeito Rüsçh, está considerado no atual método semi-probabilista de introdução da segurança no projeto estrutural, normalizado pela NBR 6118 de 1978, de uma maneira indireta e não explícita, através de um coeficiente "extra" de minoração da resistência à compressão do concreto, cujo valor é de 0,85 ou 0,80 segundo a natureza do esforço considerado.

65

1993. HELENE, Paulo. *A 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. Pg. 271-282

5.4 $f_{ck,63}$ com tensão elevada atuando a partir de 364 dias

Estudando a evolução da resistência à compressão do concreto a partir de 63 dias admitindo que o concreto é submetido a elevadas tensões a partir de 1 ano e que assim permanecem durante toda a sua vida útil e considerando o caso de concretos amassados com cimento Portland de endurecimento lento que sigam a curva de crescimento relativo do Model Code CEB/FIP 90, o produto $k_1 \cdot k_2 = k$ deveria ser 0,90, ou seja, o valor de 0,85 da NBR 6118 seria contra a economia durante toda a vida útil da estrutura.

6. Considerações finais

Este trabalho procura mostrar de maneira conceitual e prática o problema complexo que é a consideração da variação da resistência do concreto com o tempo e as implicações que isso pode acarretar no comprometimento da segurança ou da economia, segundo sejam adotados critérios muito simplistas.

66

$$\beta_{cc} = \frac{f_{c,j}}{f_{c,28}} = e^{\left\{ s_c \left[1 - \left(\frac{t_{ref}}{t} \right)^{0,5} \right] * \left(\frac{28}{t_{ref}} \right)^{0,5} \right\}}$$

$$\beta_{c,sus}(t, t_0) = \beta_{t_0}(t_0) + [1 - \beta_{t_0}(t_0)] * \left[1 + 10^4 \frac{(t - t_0)}{t_0} \right]^{-0,1}$$

$\alpha_{cc} = 0,85$ a $1,00$

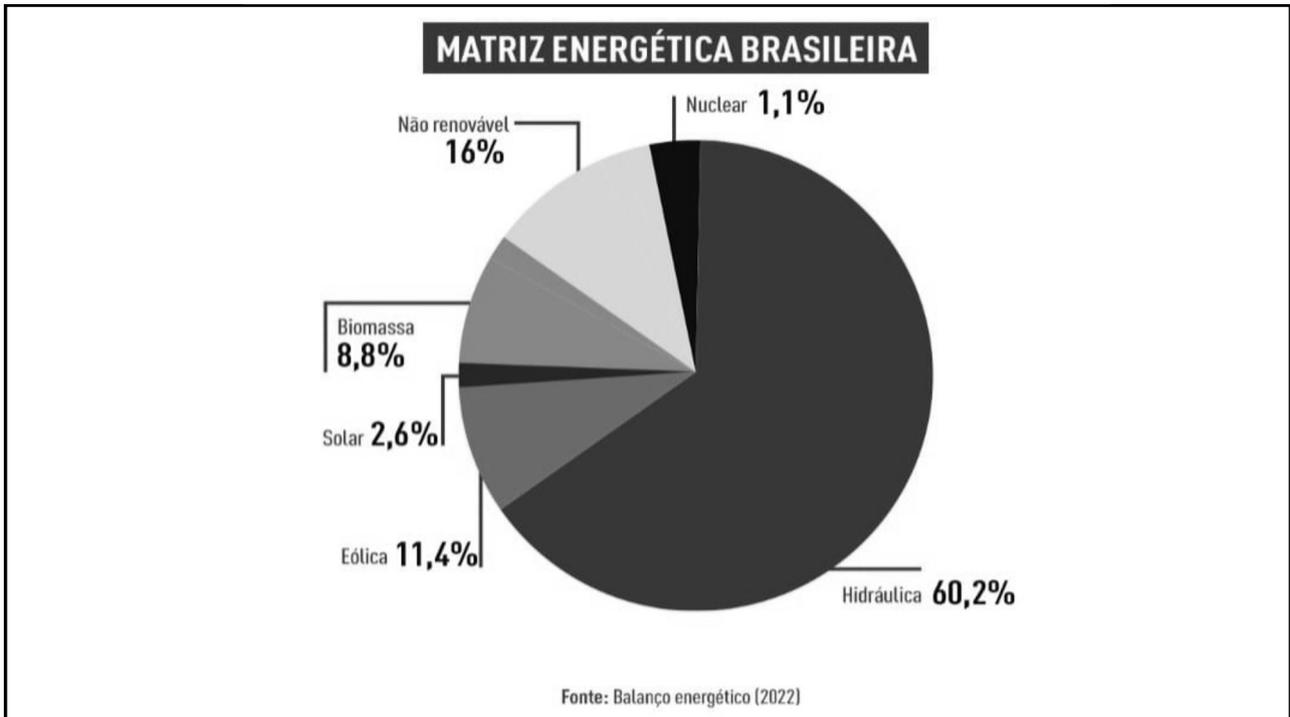
$$f_{cd} = \alpha_{cc} * \eta_{fc} * \frac{f_{ck}}{\gamma_c} \quad \eta_{fc} = \left(\frac{40}{f_{ck}} \right)^{1/3} \leq 1,0 \text{ MPa}$$

$$f_{cd} = \beta_{cc} * \beta_{c,sus} * \frac{f_{ck}}{\gamma_c}$$

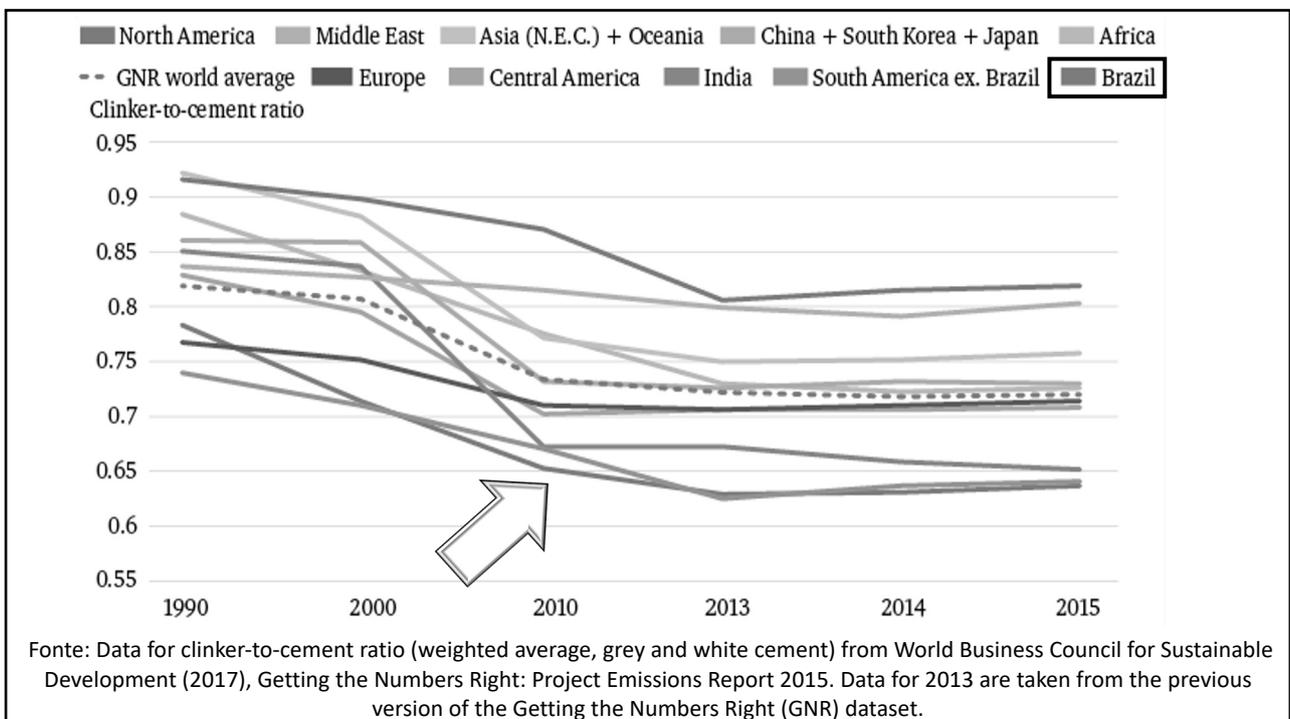
67

SUSTENTABILIDADE

68



69



70



71



72

... considerando a situação privilegiada do Brasil no contexto mundial posso prever que seremos capazes de produzir o concreto mais sustentável do planeta... e essa vitória vai ser alcançada por vocês, as novas gerações...

73



... não basta ser estudante da PUC. CAMPINAS...

74



75

OBRIGADO!

PhD
Engenharia

"do Laboratório de Pesquisa ao Canteiro de Obras"

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

11.2501.4822 / 23
11.9.5045.4940

76