

BADUCON
5° Seminário Baiano de Durabilidade e Desempenho das Construções
Escola Politécnica da UFBA - Salvador, 14 a 17 de Agosto de 2024

INTRODUÇÃO DA SEGURANÇA e da SUSTENTABILIDADE no PROJETO das ESTRUTURAS de CONCRETO

Paulo Helene
paulo.helene@concretophd.com.br

1



BADUCON
5° Seminário Baiano de Durabilidade e Desempenho das Construções
Escola Politécnica da UFBA - Salvador, Julho de 2024

INTRODUÇÃO DA SEGURANÇA e da SUSTENTABILIDADE no PROJETO das ESTRUTURAS de CONCRETO



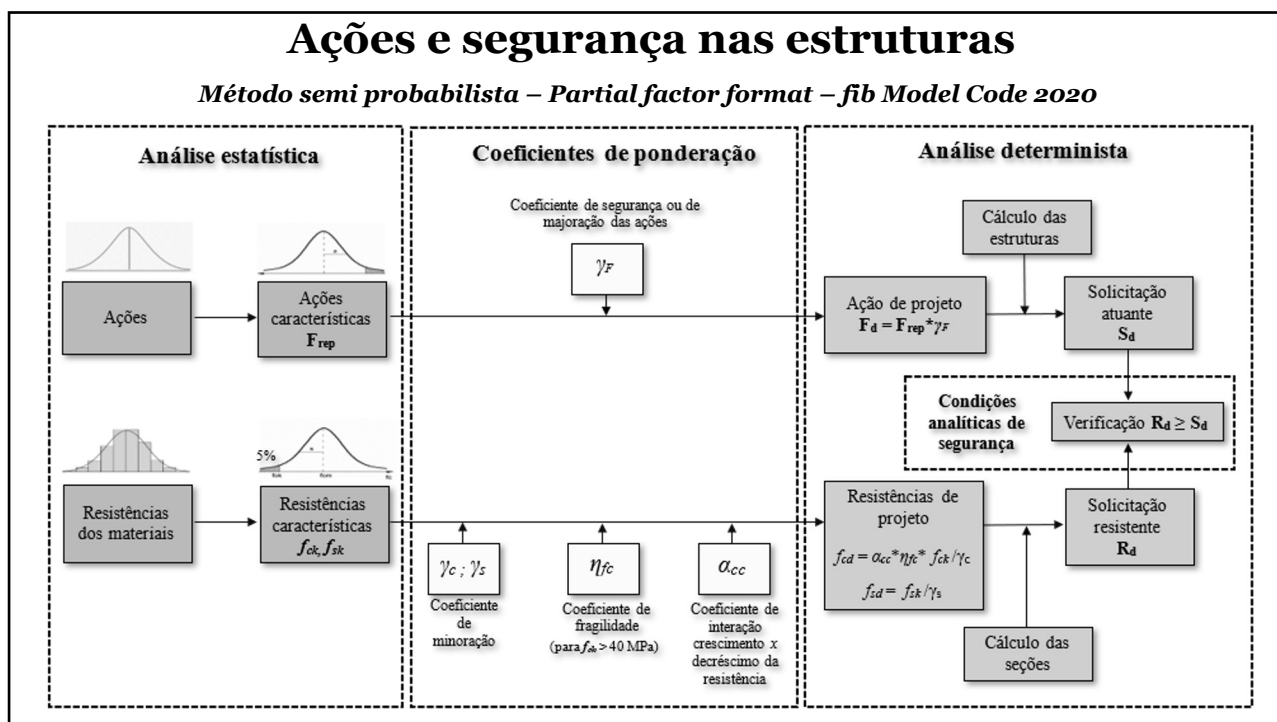
Paulo Helene
*Diretor PhD Engenharia
Diretor Vice-Presidente do IBRACON
Prof. Titular Universidade de São Paulo
Gestor e Ex Presidente ALCONPAT Internacional
Member fib(CEB-FIP) Model Code for Service Life Design
Conselheiro da CNTU, SEESP e PMSP*

2

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

obs: esta apresentação está protegida pelas leis nacionais e internacionais de direitos autorais e de imagem. É proibida a gravação, reprodução, distribuição, prints e fotografia da tela de apresentação, sem permissão do autor.

3



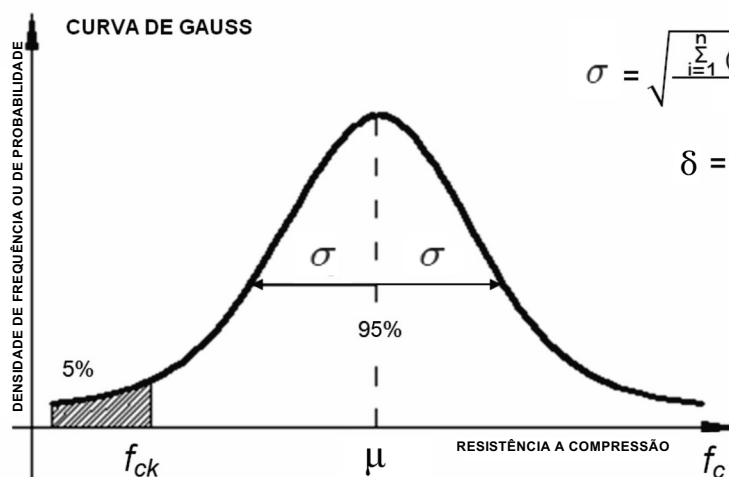
4

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



5

parâmetros da população
(amostragem total a 100%)



$$\mu = \frac{\sum_{i=1}^n f_{ci}}{n} \quad (\text{MPa})$$

$$\sigma = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (\mu - f_{ci})^2}{n}} \quad (\text{MPa})$$

$$\delta = \frac{\sigma}{\mu} \cdot 100 \quad (\%)$$

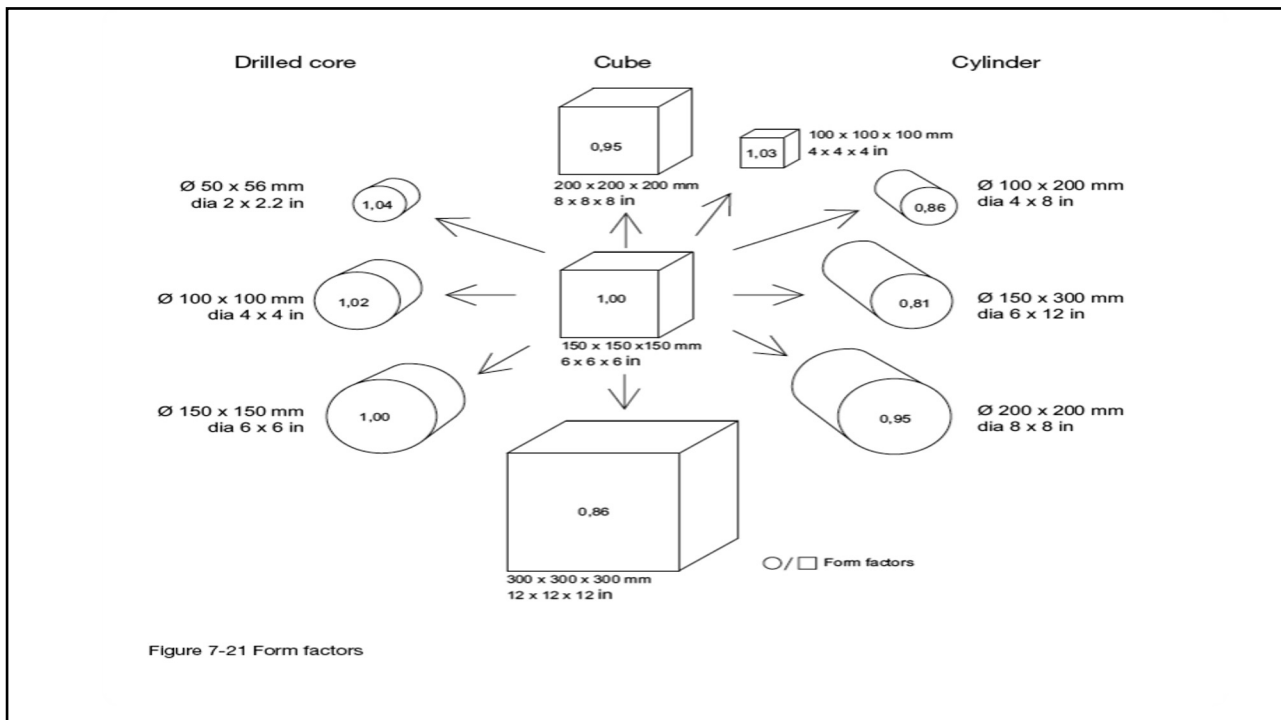
6

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

7



8



9

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

10

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



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

11


**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 !**

12

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 !

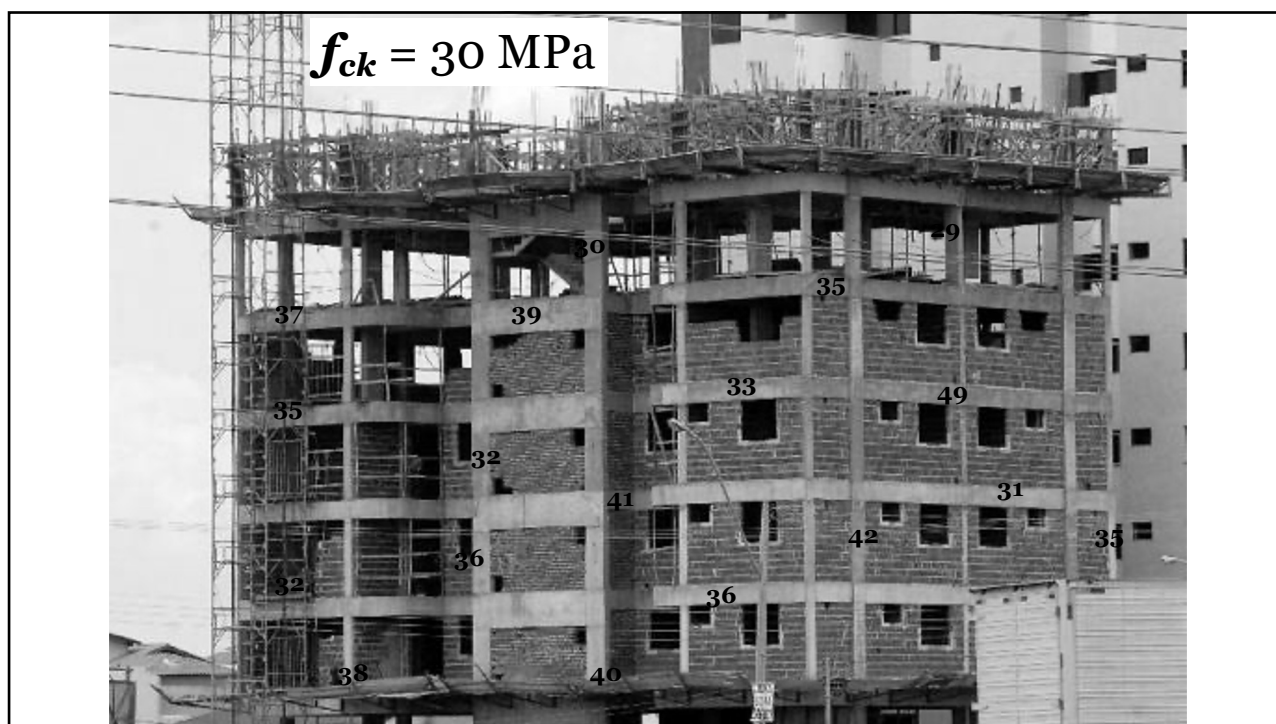
13

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

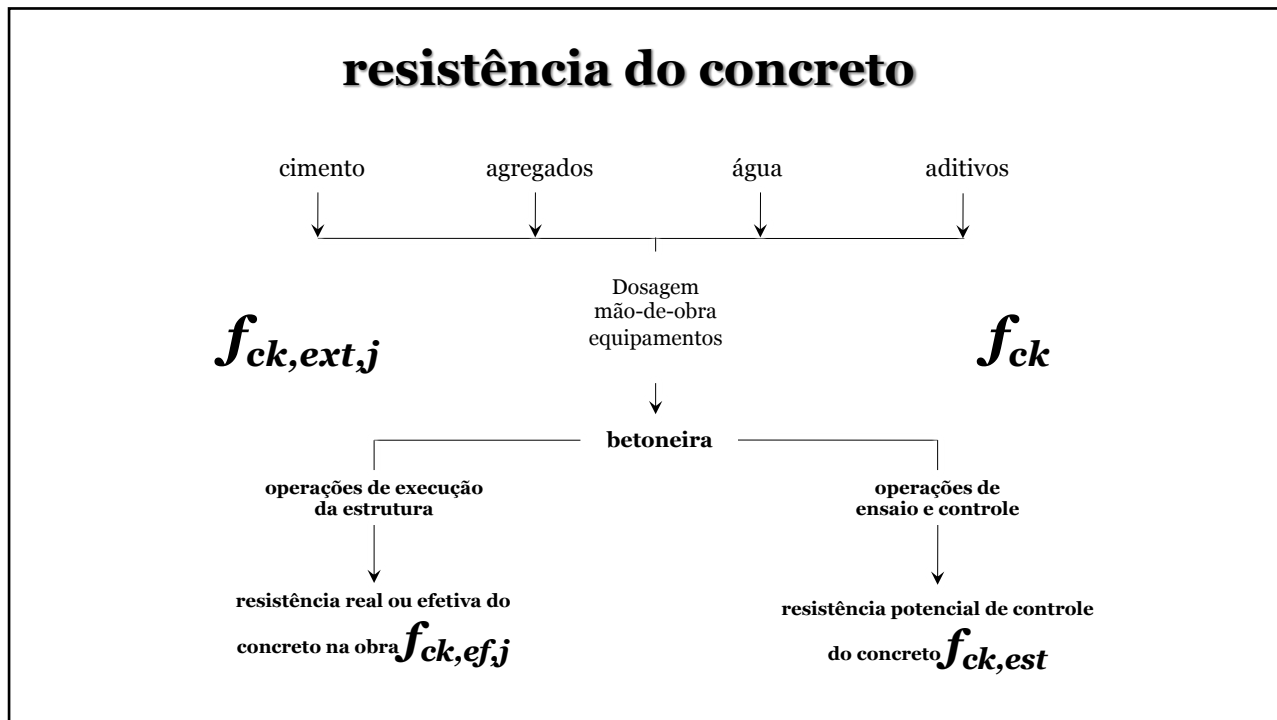
14

... então qual é a resistência “mínima” à compressão do concreto lá na estrutura que um engenheiro civil pode considerar como disponível para fins de dimensionamento, com segurança durante sua VUP, f_{cd} ?

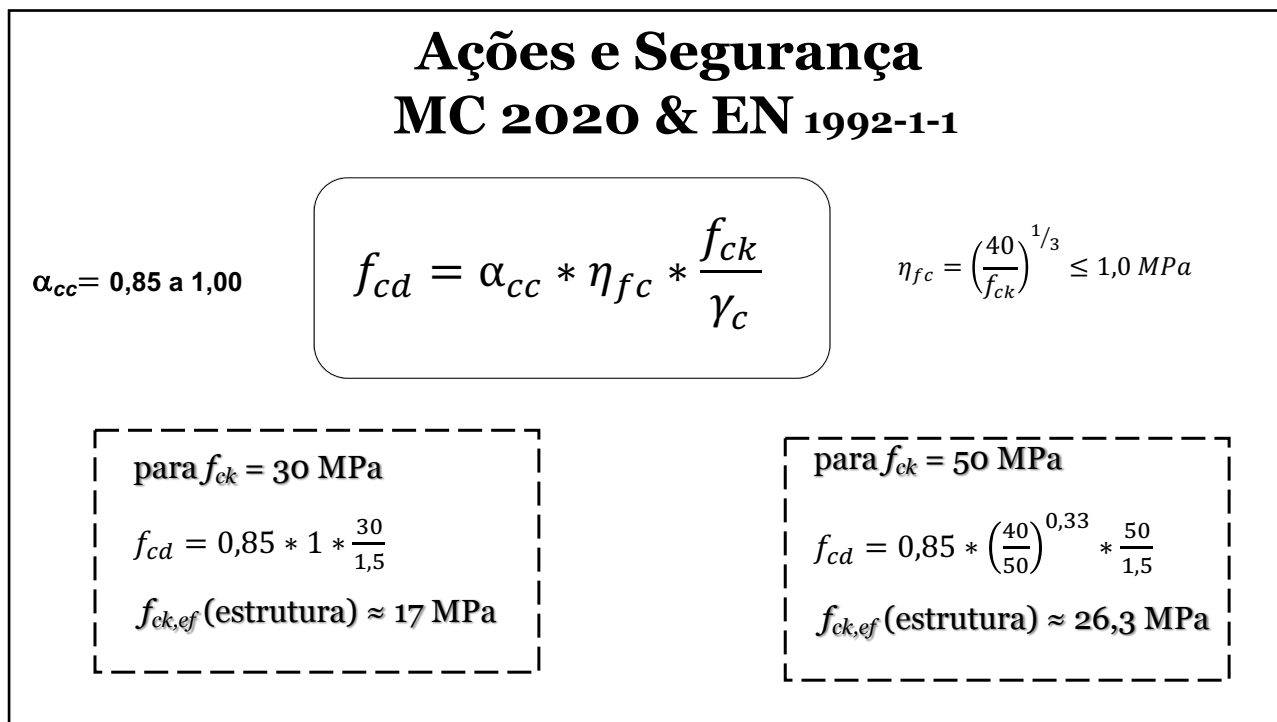
15



16



17



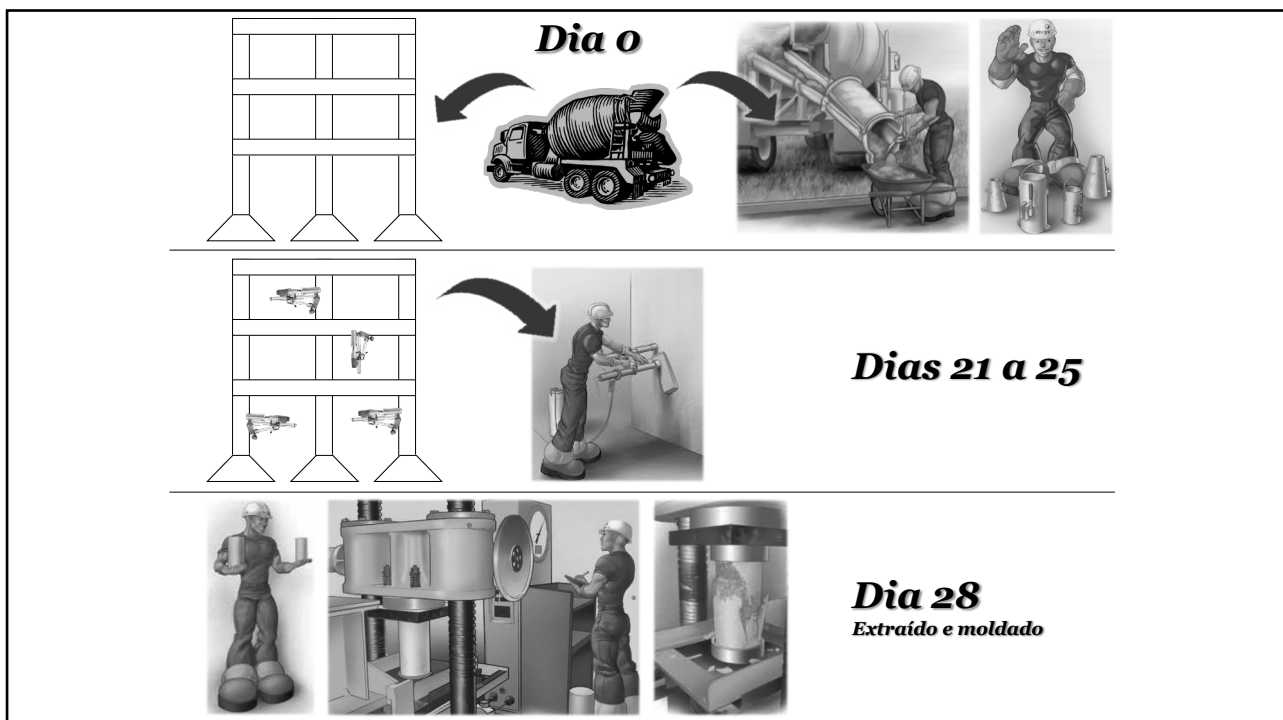
18

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

19



20

Conclusões

pilares:

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

lajes & (vigas)

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

21

Edificações
NBR 6118

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

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

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

estaca hélice
NBR 6122

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

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

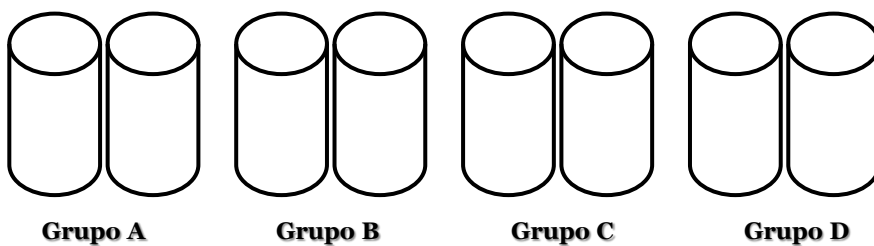
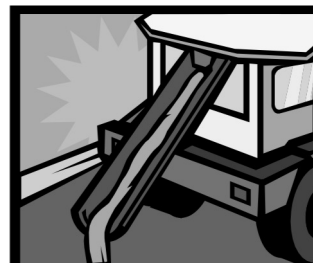
$$\therefore f_{cd} \cong 0,30 * f_{ck}$$

22

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



23

quantas resistências tem o concreto de um caminhão betoneira?

f_{c1} f_{c2} f_{c3} f_{c4} f_{c5}

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

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

“potencial do concreto”

24

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

25

quantas resistências tem o concreto de um caminhão betoneira?

f_{c1} f_{c2} f_{c3} f_{c4} f_{c5}

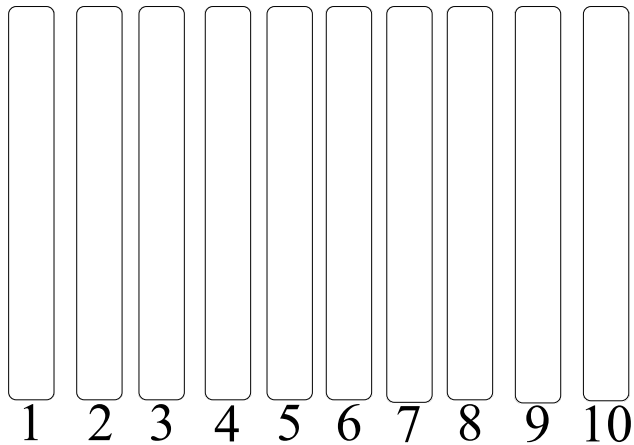
exemplar = mais alto ($f_{ck,est}$)

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

$f_{ck} = 45$ MPa

26

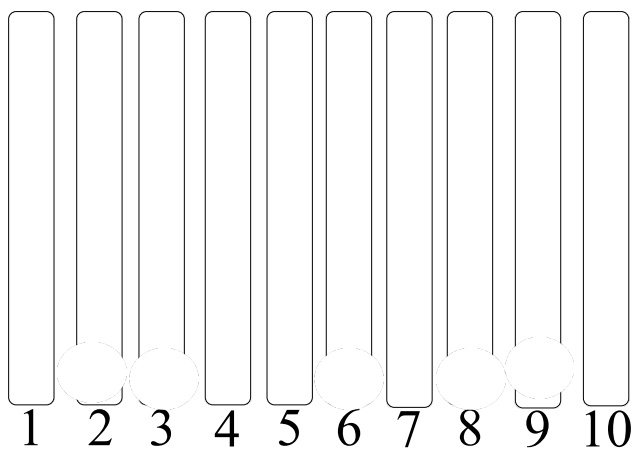
com esse concreto foram construídos 10 pilares. qual a resistência característica do concreto à compressão nesses pilares para fins de verificação da segurança?



f_{ck}
45MPa

27

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



28



29



30



31

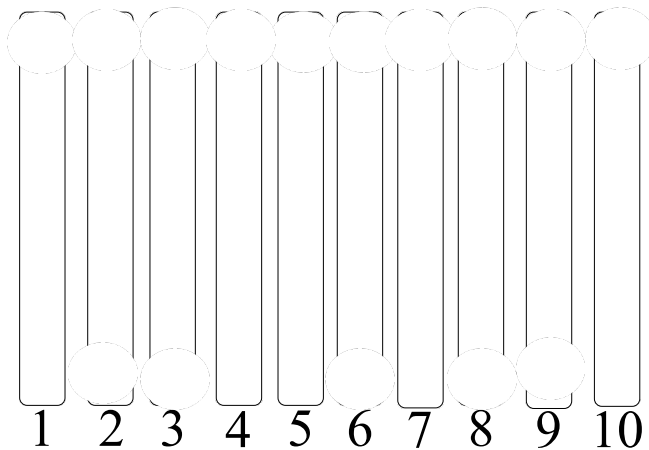
“ninhos de concretagem”
qual a resistência do concreto nesses pilares para fins de
verificação da segurança?

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10

f_{ck}
45MPa

32

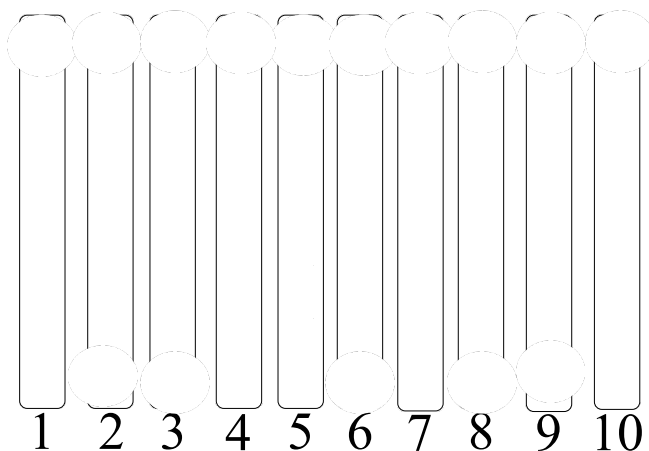
qual a resistência do concreto nos pilares que está mais próxima da resistência característica do concreto à compressão (controle, moldado) $f_{ck,est}$?



f_{ck}
45MPa

33

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

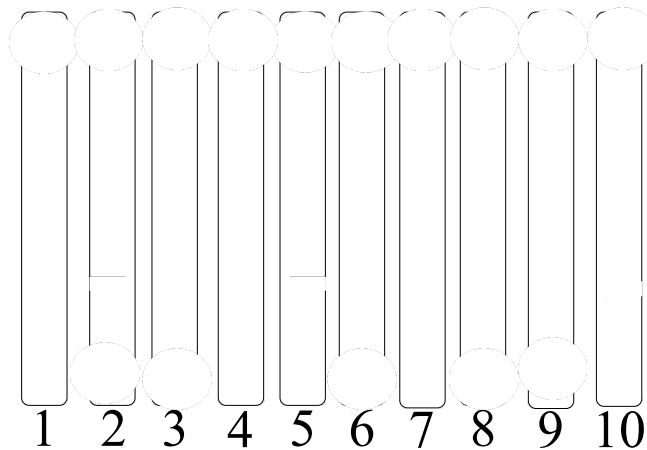


terço
inferior

34

qual a resistência obtida de um pilar?

$f_{ck,ext}$



terço inferior

$f_{ck,ext,1}$

$f_{ck,ext,2}$

$f_{ck,ext,3}$

35

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}

36

Premissas

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

37

Crescimento da Resistência *fib Model Code 2020*

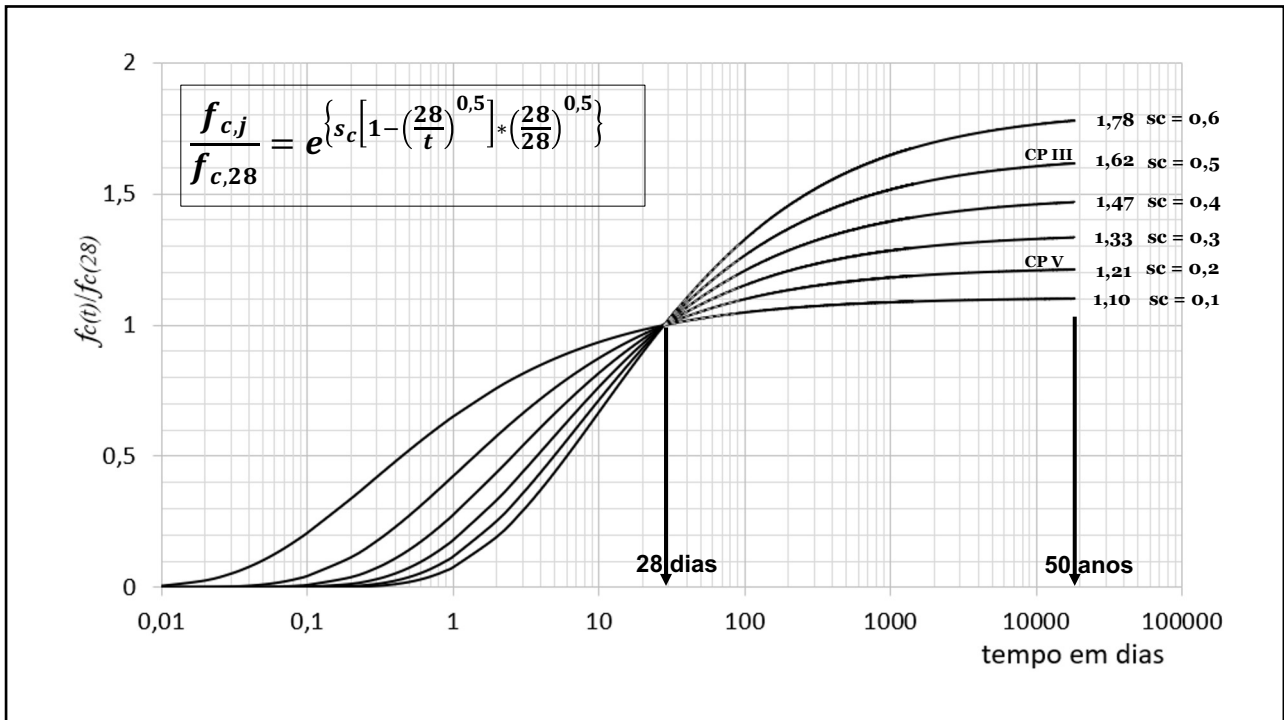
$$\frac{f_{c,j}}{f_{c,ref}} = e^{\left\{ s_c \left[1 - \left(\frac{t_{ref}}{t} \right)^{0,5} \right] * \left(\frac{28}{t_{ref}} \right)^{0,5} \right\}}$$

*fib Model
Code 2020
Item 14.9.1*

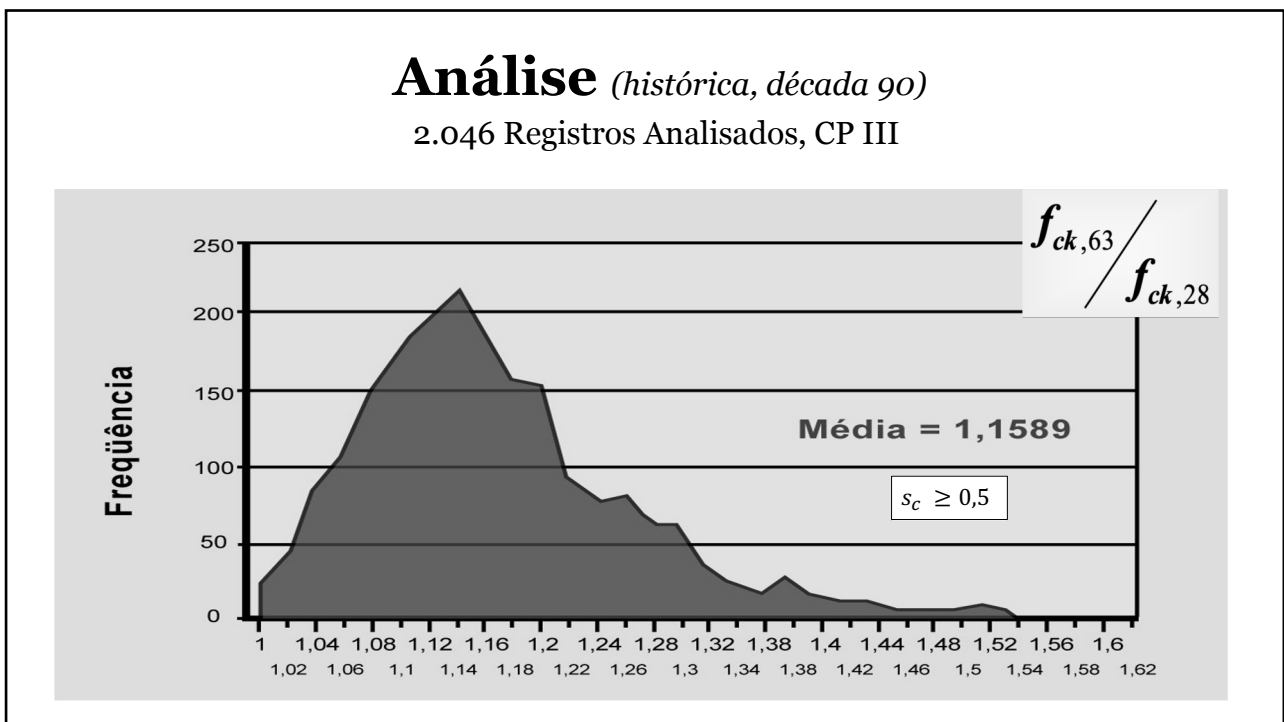
Resistência à compressão do Concreto (MPa)	s_c		
	Classe CS	Classe CN	Classe CR
$f_c \leq 35$	0,6	0,5	0,3
$35 < f_c < 60$	0,5	0,4	0,2
$f_c \geq 60$	0,4	0,3	0,1

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".

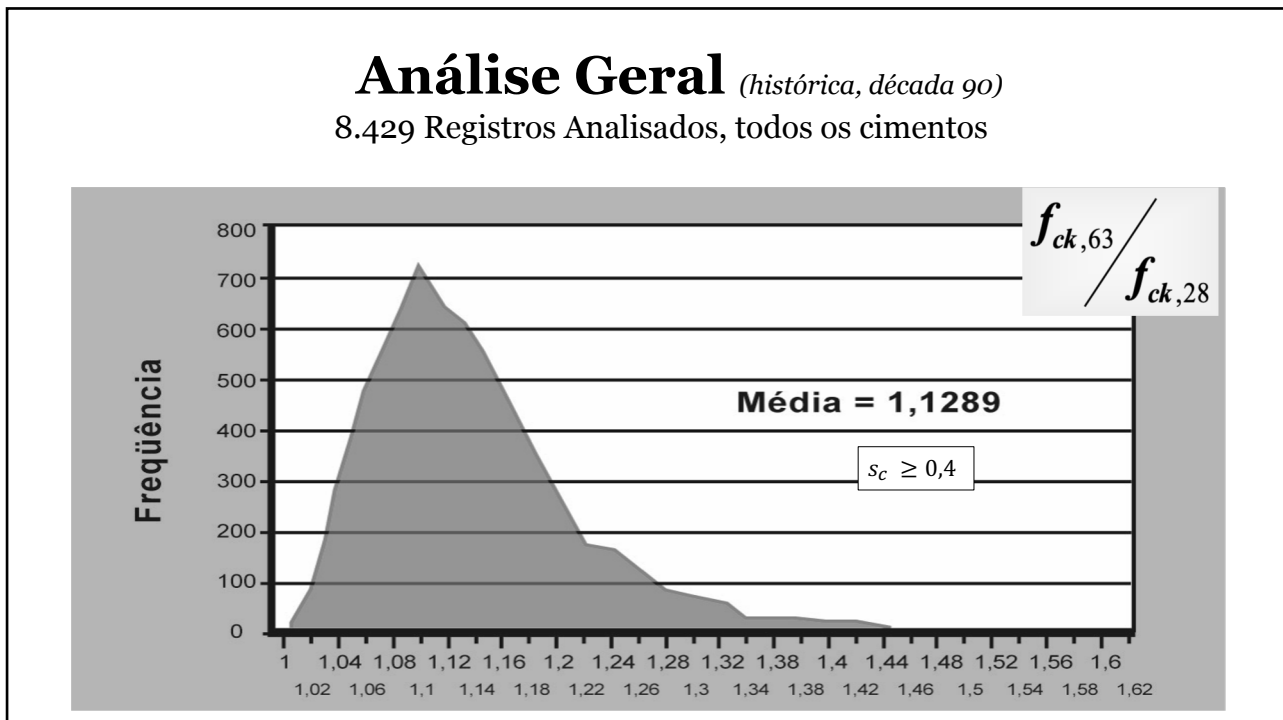
38



39



40



41

Premissas

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

42

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:

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

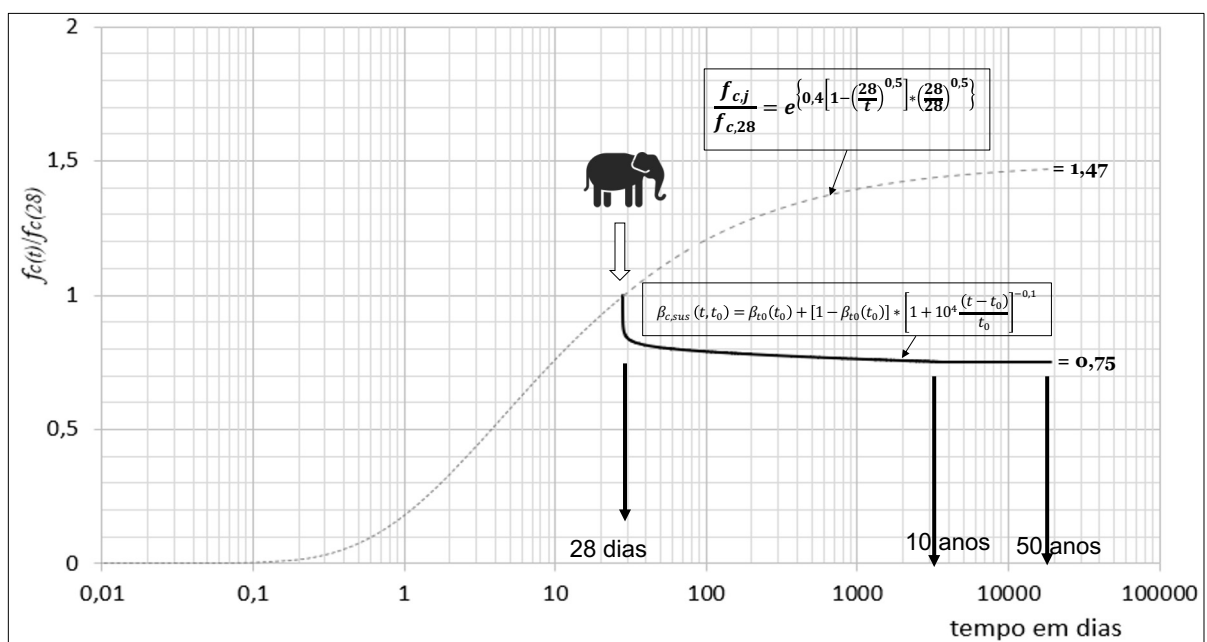
→ t em dias

→ t_0 → idade de aplicação das cargas

→ $t - t_0 > 15$ minutos

43

Decréscimo da Resistência

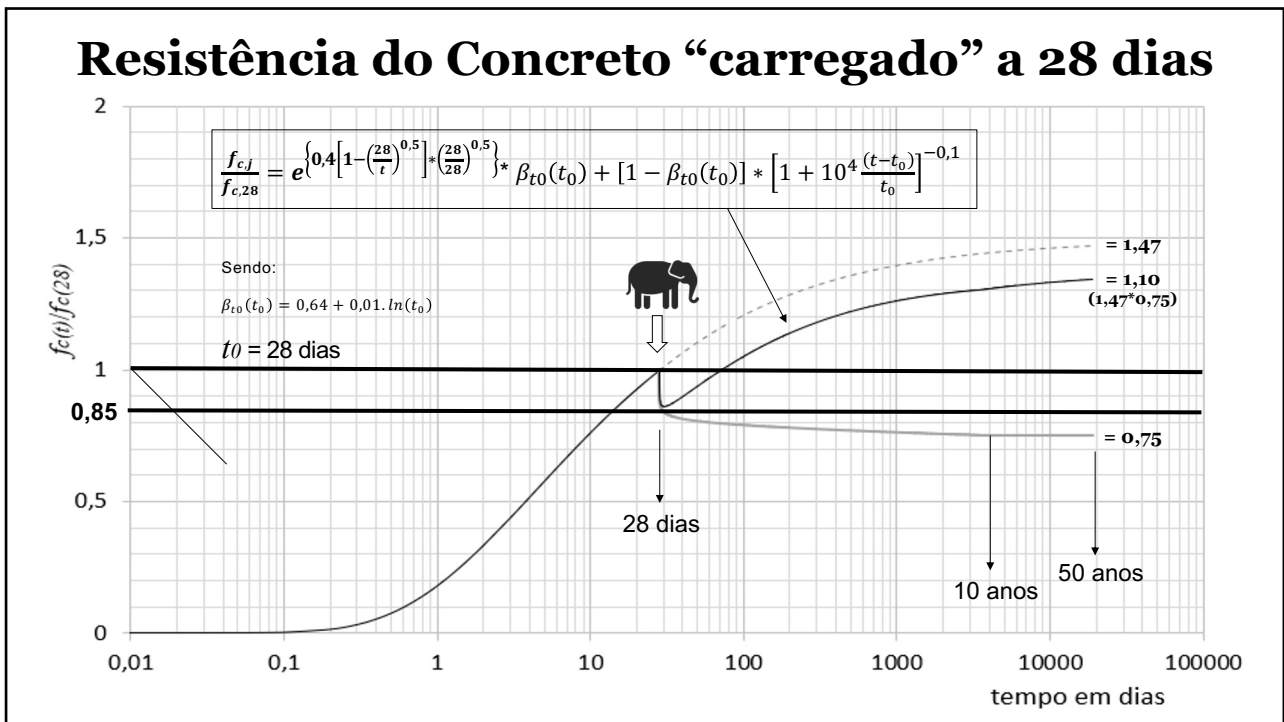


44

Premissas

Combinando crescimento com decréscimo a partir de 28 dias ?

45



46

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

47

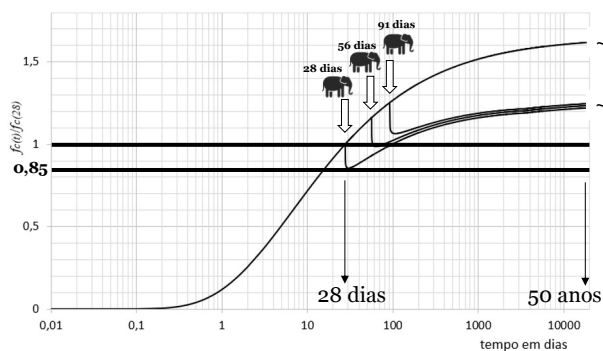
Cálculo do f_{cd} segundo várias normas

$f_{ck28} = 20$ 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	$0,61 * f_{ck}$	$0,67 * f_{ck}$	$0,67 * f_{ck}$

48

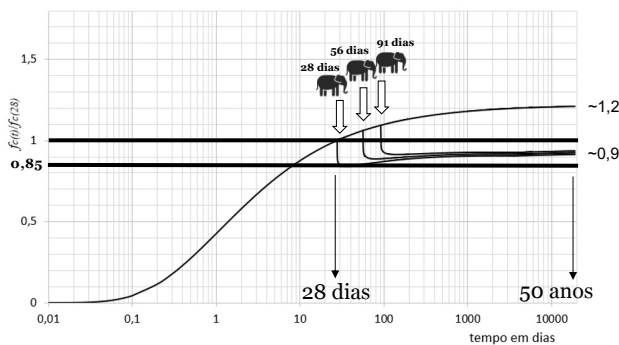
Cálculo do f_{cd} segundo várias normas

$f_{ck28} = 20$ 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	$0,61 * f_{ck}$	$0,67 * f_{ck}$	$0,67 * f_{ck}$

49

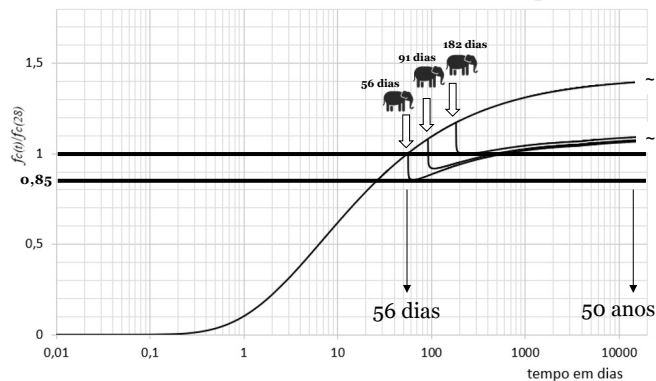
Cálculo do f_{cd} segundo várias normas

$f_{ck28} = 20$ 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>nihil</i>	$0,57 * f_{ck}$	$0,67 * f_{ck}$
CP III.91	<i>nihil</i>	$0,57 * f_{ck}$	$0,67 * f_{ck}$
CP III.182	<i>nihil</i>	$0,57 * f_{ck}$	$0,67 * f_{ck}$

50

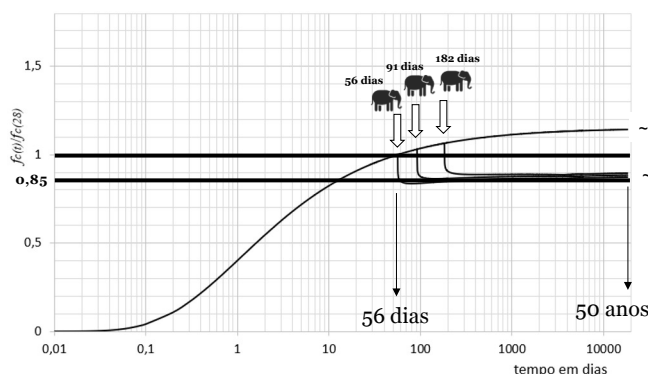
Cálculo do f_{cd} segundo várias normas

$f_{ck28} = 20$ 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>	$0,57 * f_{ck}$	$0,57 * f_{ck}$
CP V.91	<i>nil</i>	$0,57 * f_{ck}$	$0,57 * f_{ck}$
CP V.182	<i>nil</i>	$0,57 * f_{ck}$	$0,57 * f_{ck}$

51

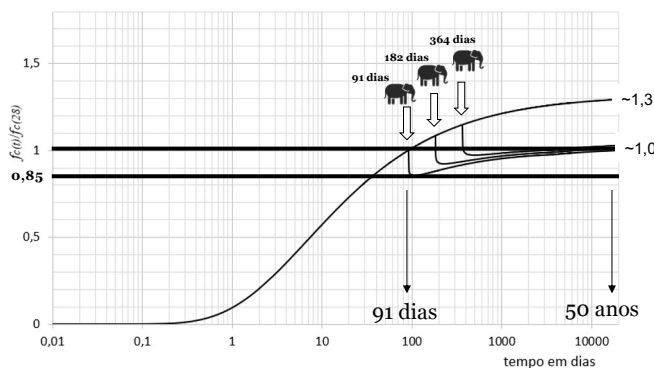
Cálculo do f_{cd} segundo várias normas

$f_{ck28} = 20$ 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>	$0,57 * f_{ck}$	$0,57 * f_{ck}$

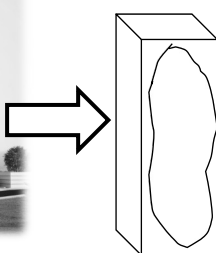
52

Estudo de sustentabilidade



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

Área do pavimento tipo: 365 m².

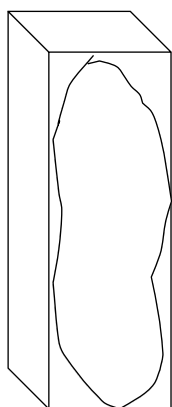


Estudo de um pilar curto de seção quadrada, localizado entre o 1º e 2º pavimento (pé direito 2,88 m).

Edifício com 1008 tramos de pilar

53

Premissas para o dimensionamento do pilar



Força normal característica:

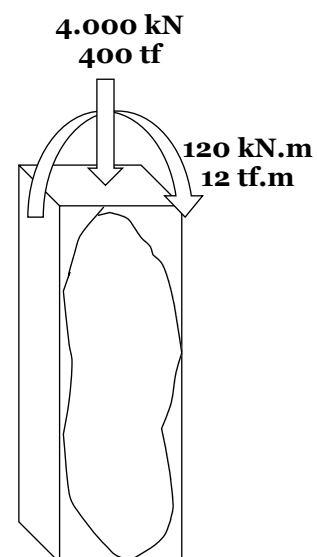
$$N_{sk} = 4000 \text{ kN} = 400 \text{ tf}$$

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



54

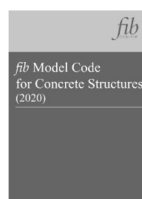
Normas utilizadas

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

✓ *ABNT NBR 6118:2023*



✓ *fib Model Code 2020*



✓ *Eurocode 2:2023*

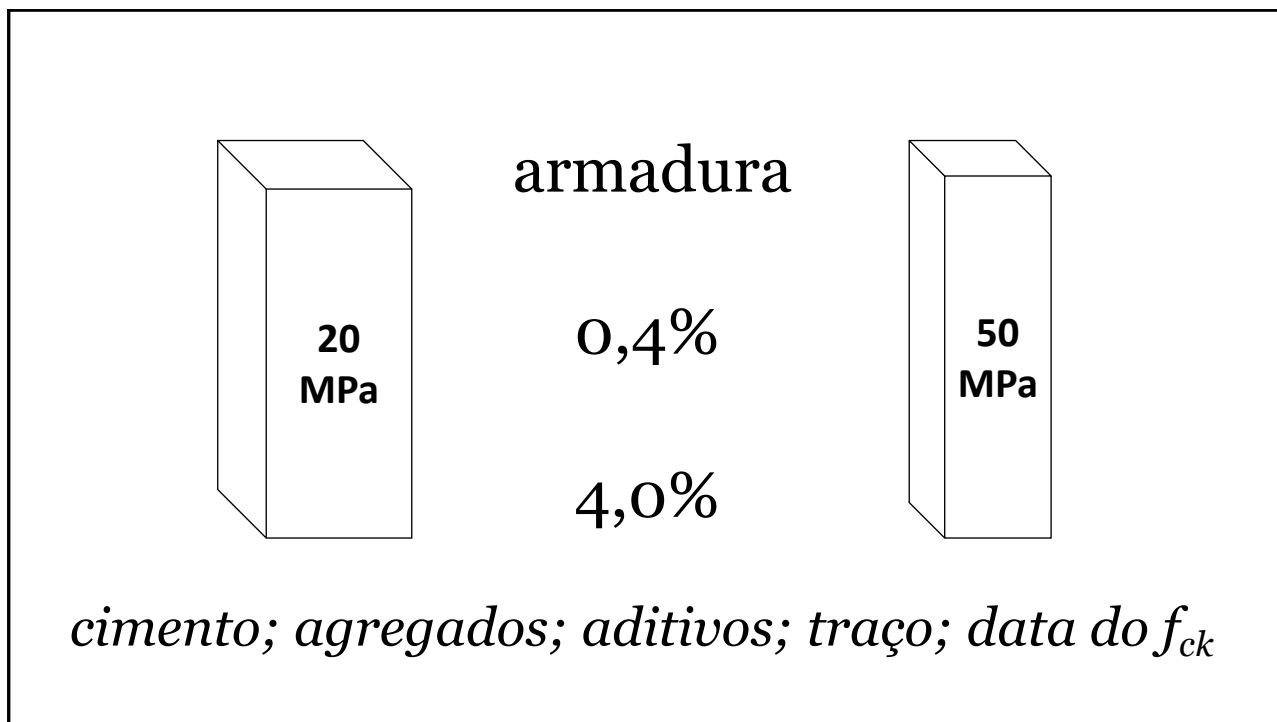


55

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).*

56



57


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




THE INTERNATIONAL EPD® SYSTEM

*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.*



THIRD-PARTY VERIFIED
EPD
ISO 14025 and EN 15804

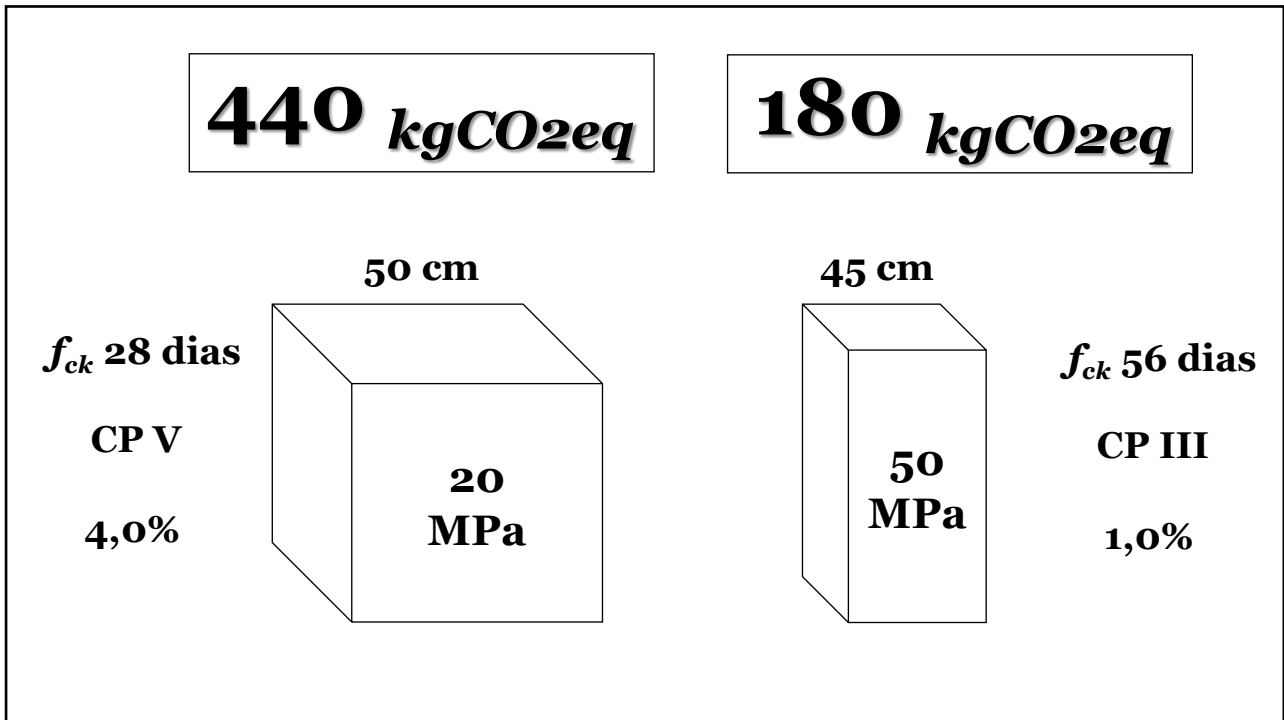
*Aço CA 50 ArcelorMittal Piracicaba **786 kg CO₂ eq.** por tonelada.*



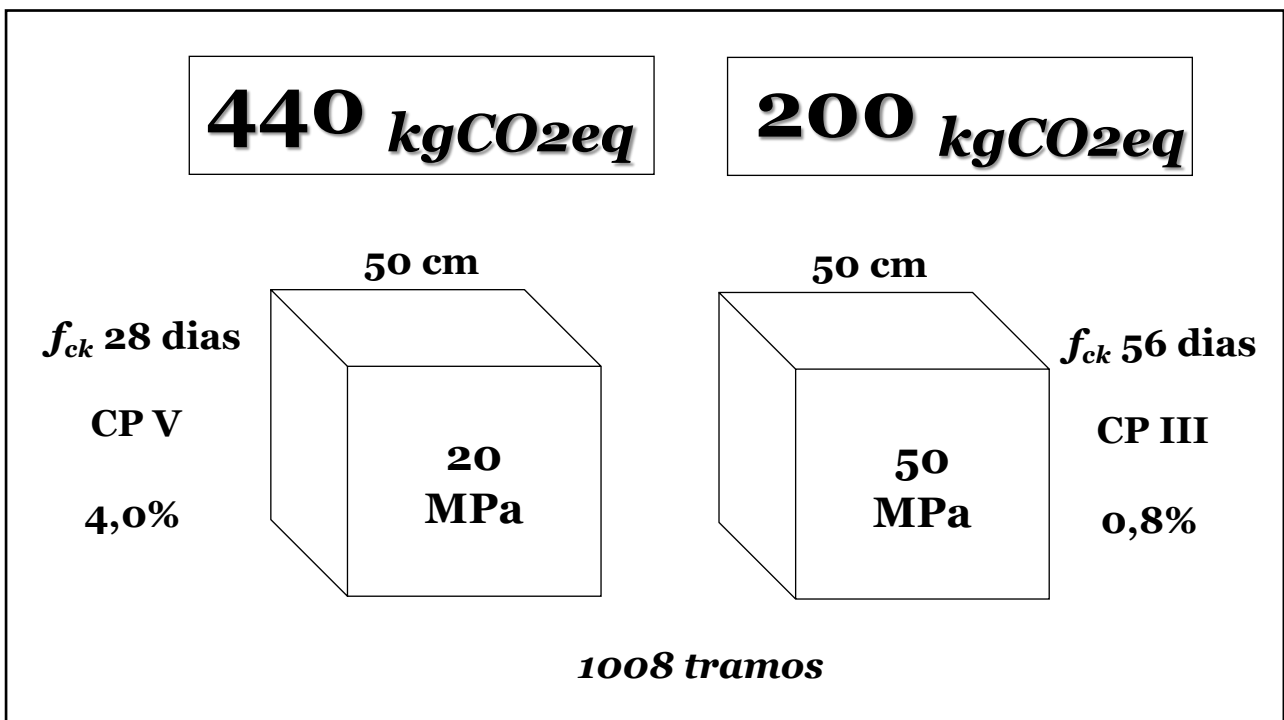
sistema de informação do desempenho ambiental da construção.

Os dados utilizados ficaram dentro das faixas informadas pelo Sidac.

58



59

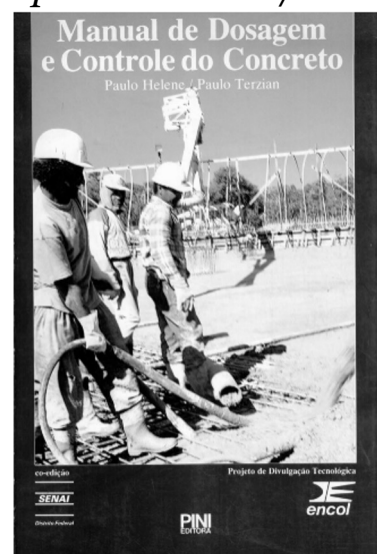
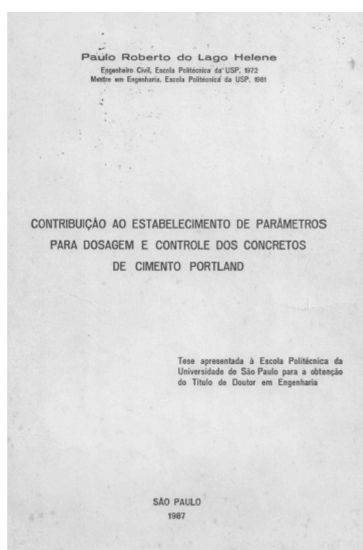


60

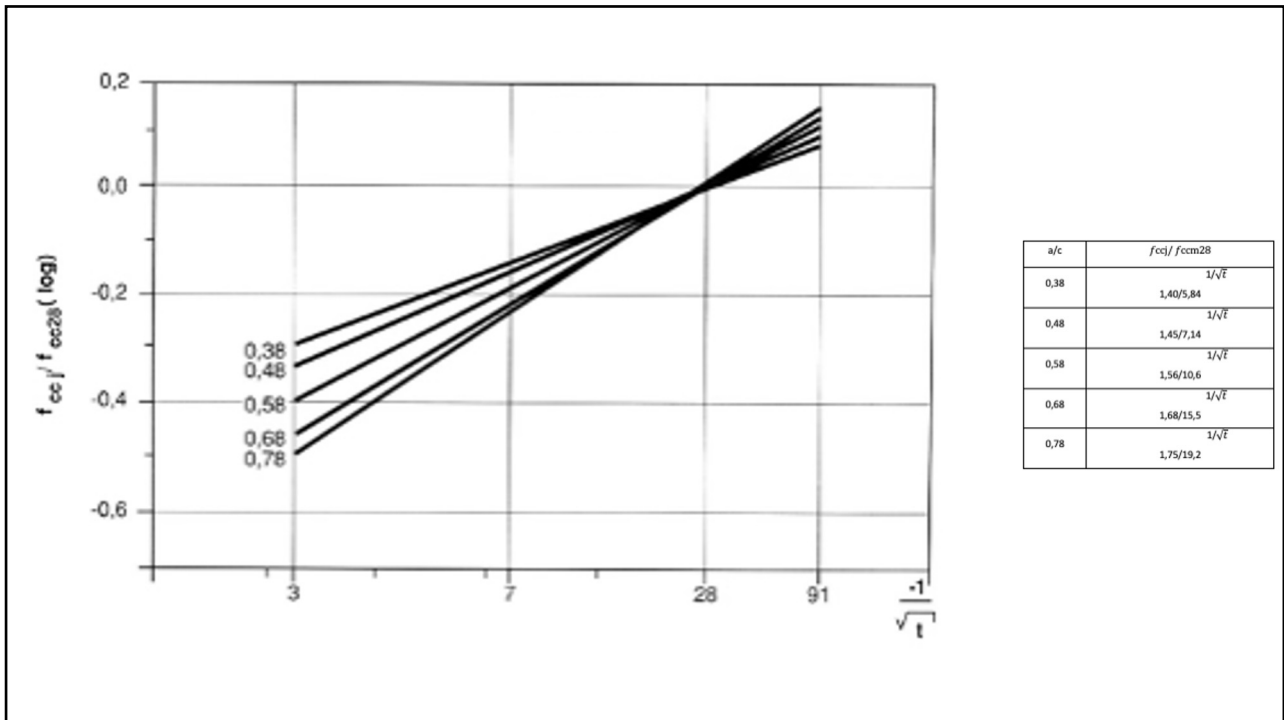


61

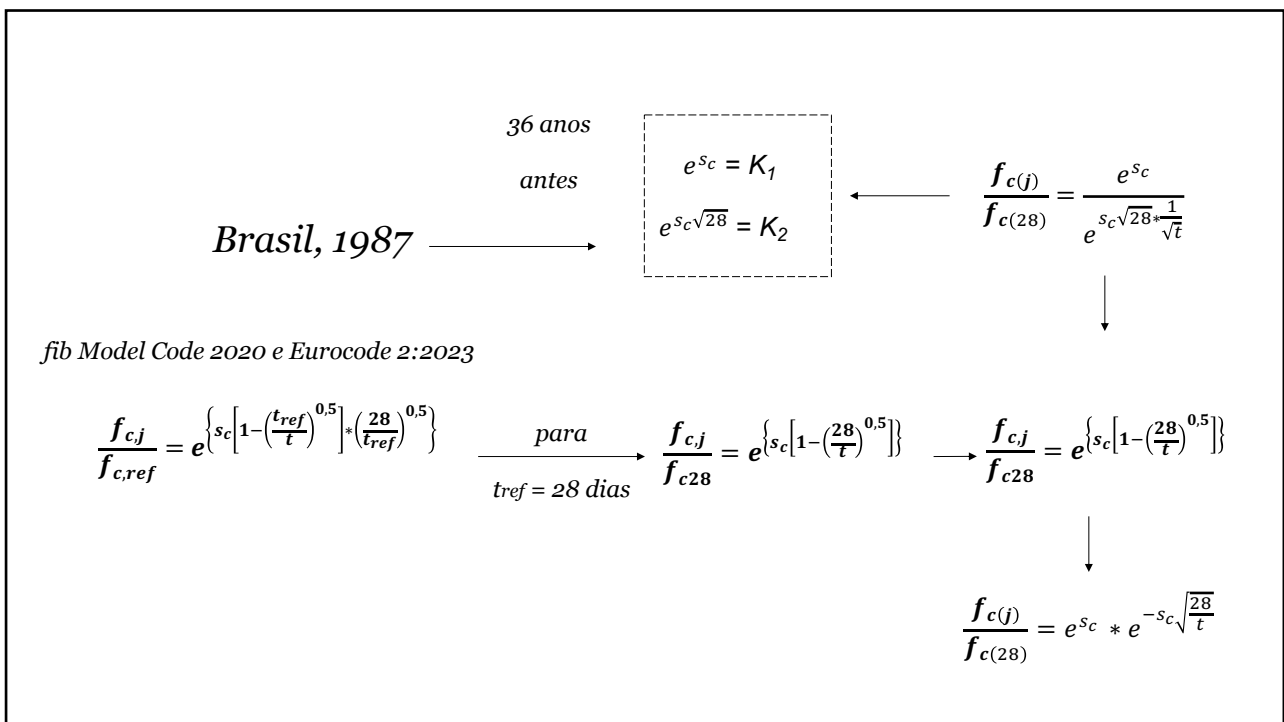
Na década de 80, há 40 anos, na minha tese de doutorado mostrei que as curvas de crescimento da resistência do concreto por hidratação do cimento deveriam ser escritas como dependentes de a/c :



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*. p. 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*. p. 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

OBRIGADO!



www.phd.eng.br

11.2501.4822 / 23

11.9.5045.4940

68