

 **sempat**  
TO

## Segurança e Sustentabilidade das Estruturas de Concreto

EN 1992-1-1(2023). fib MC 2020(2024). ABNT NBR 6118 (2023)

 Paulo Helene  
Rafael Silva  
Ricardo Boni



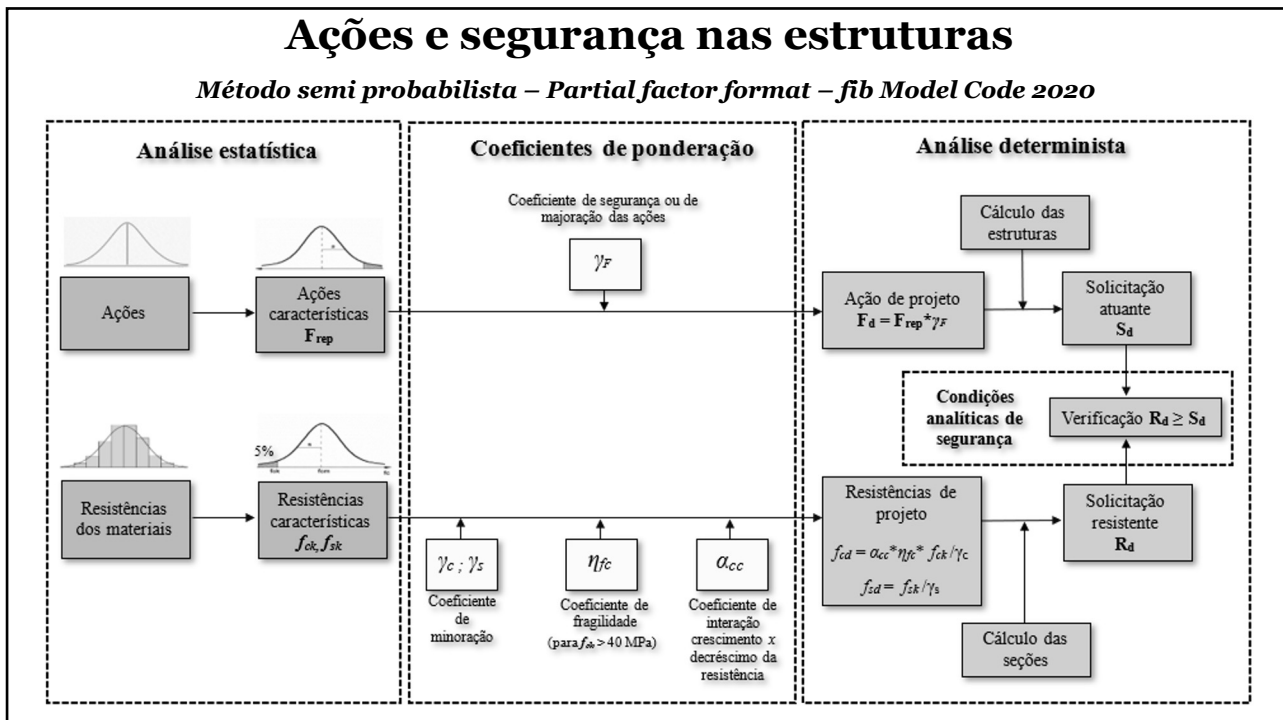
08.11.2024 - Assembleia Legislativa do Estado do Tocantins. Palmas

1

**...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.*

2

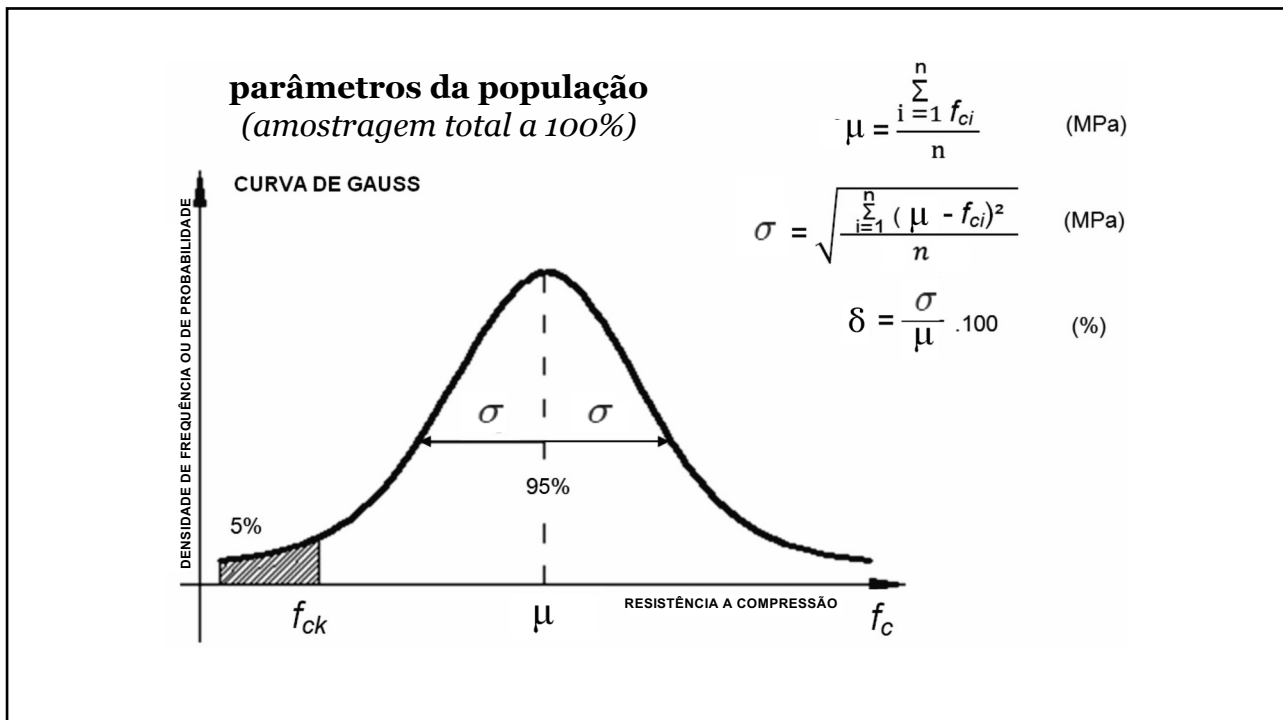


3

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



4



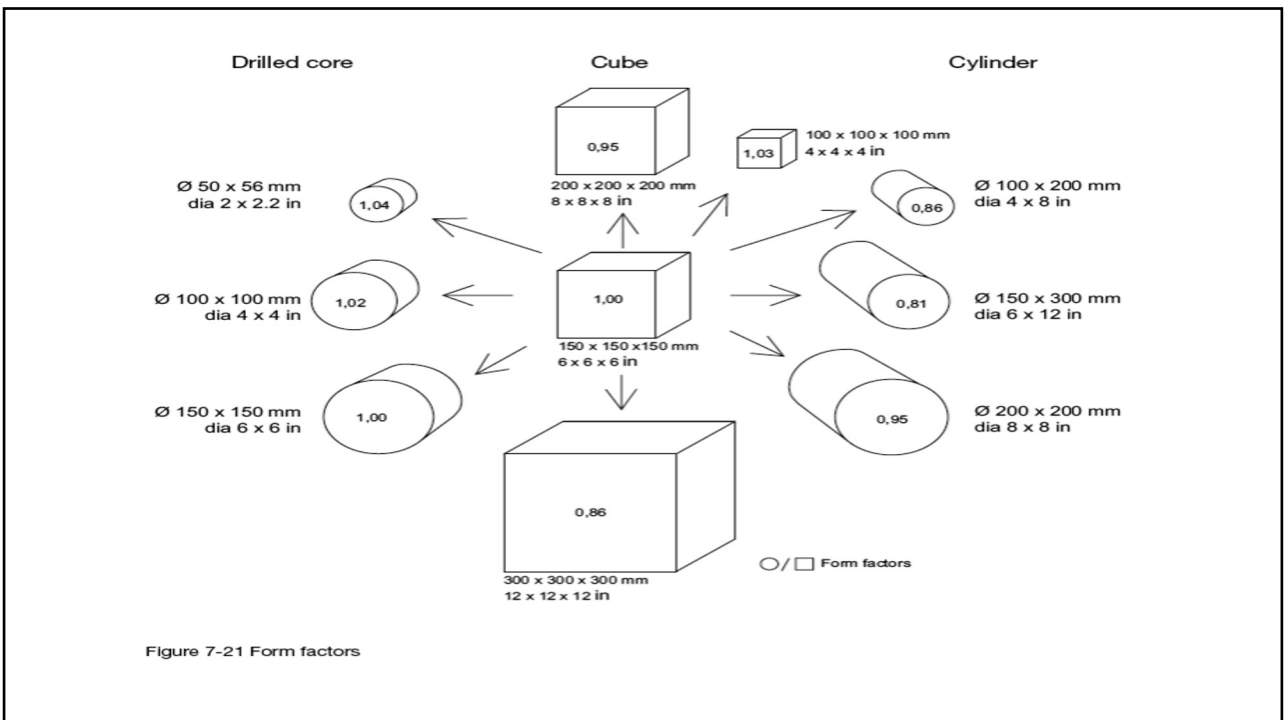
5

**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  $\phi$  \* 30cm
- ✓ o cilindro 10cm  $\phi$  \* 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

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

✓ condições ideais

2655

✓ resistência potencial

R

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

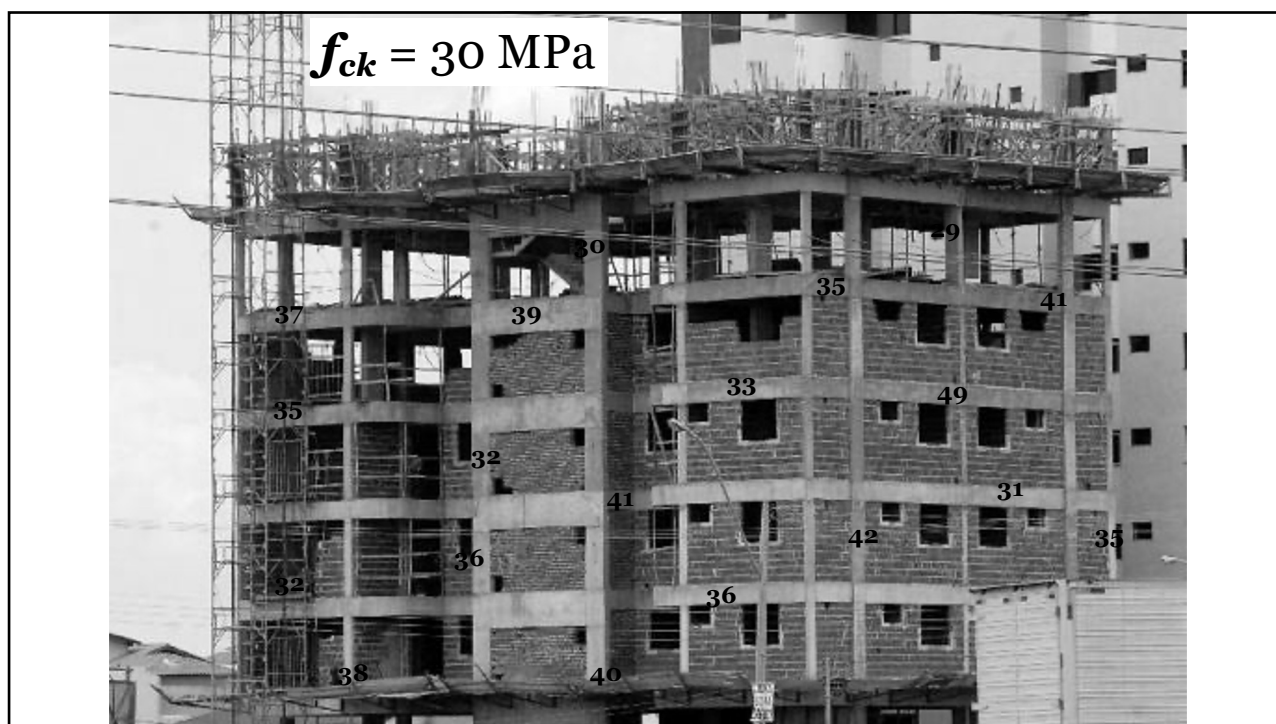
**... e esse é o grande problema porque alguns engenheiros e projetistas consideram que  $f_{ck}$  é a resistência do concreto lá na estrutura !..**

14

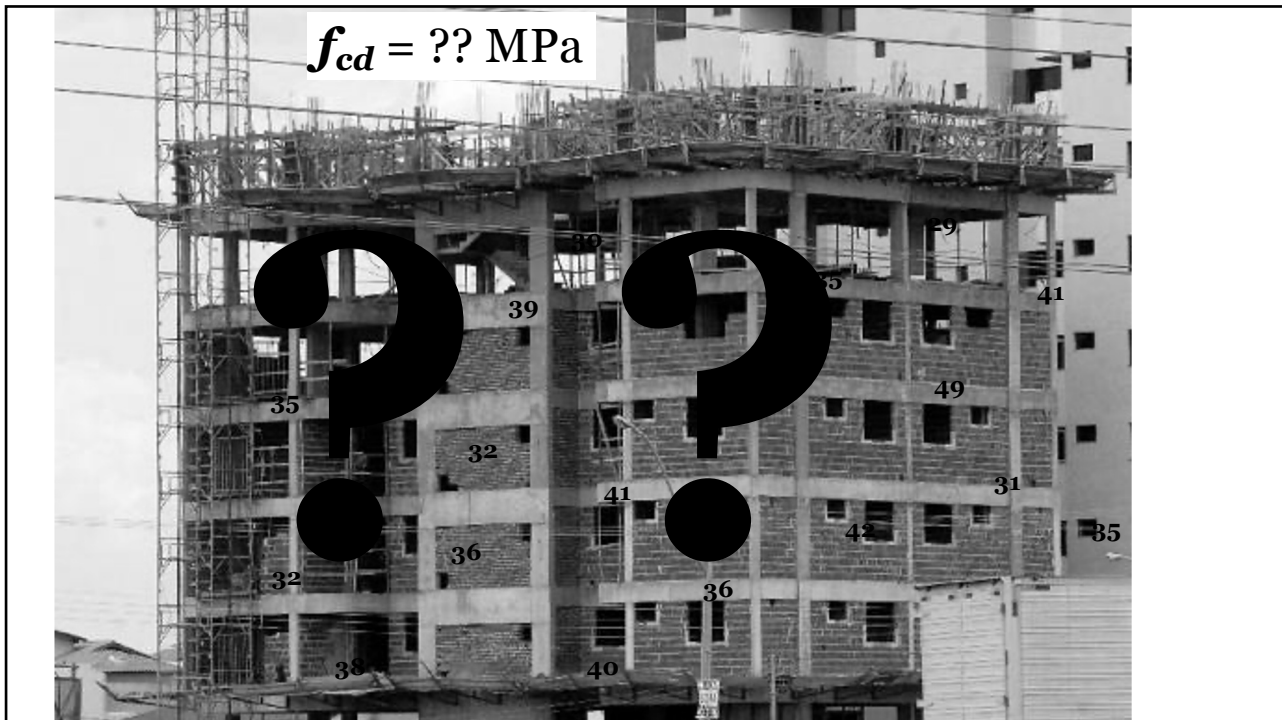
**... então qual é a resistência “mínima” à compressão do concreto lá na estrutura que um engenheiro civil pode considerar como disponível para fins de projeto e construção, com segurança, durante sua VUP?**

$$f_{cd}$$

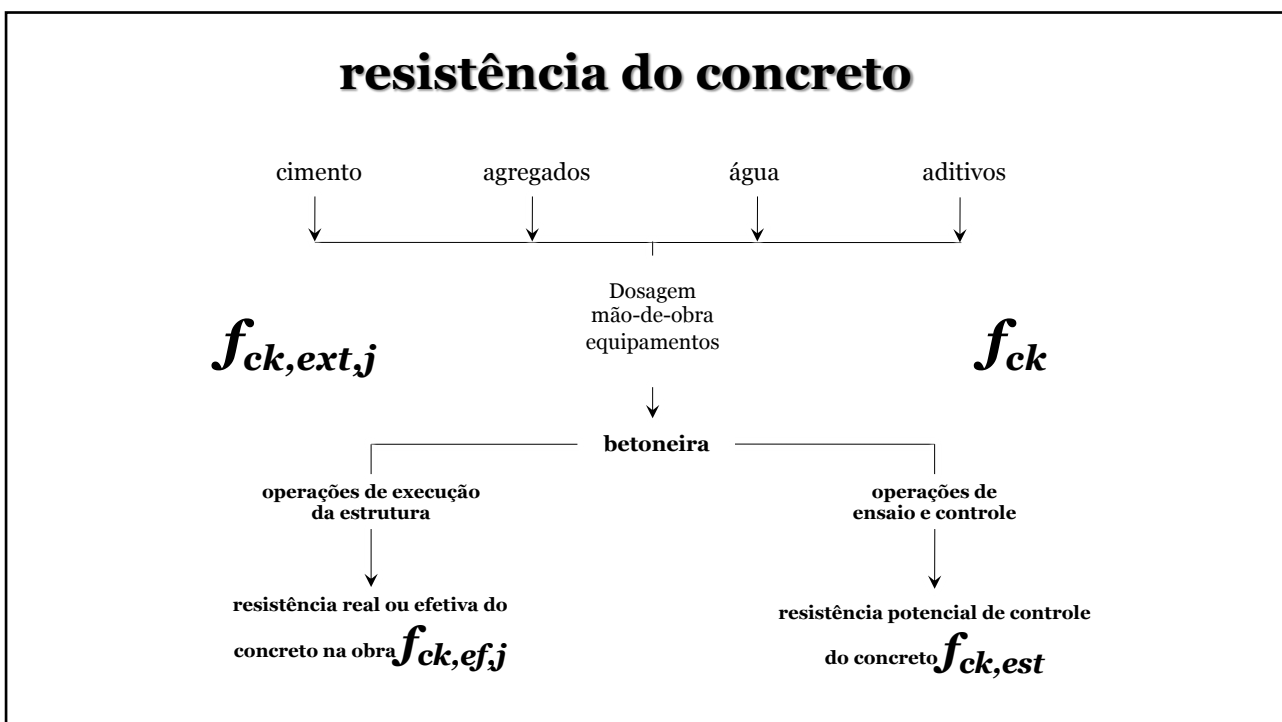
15



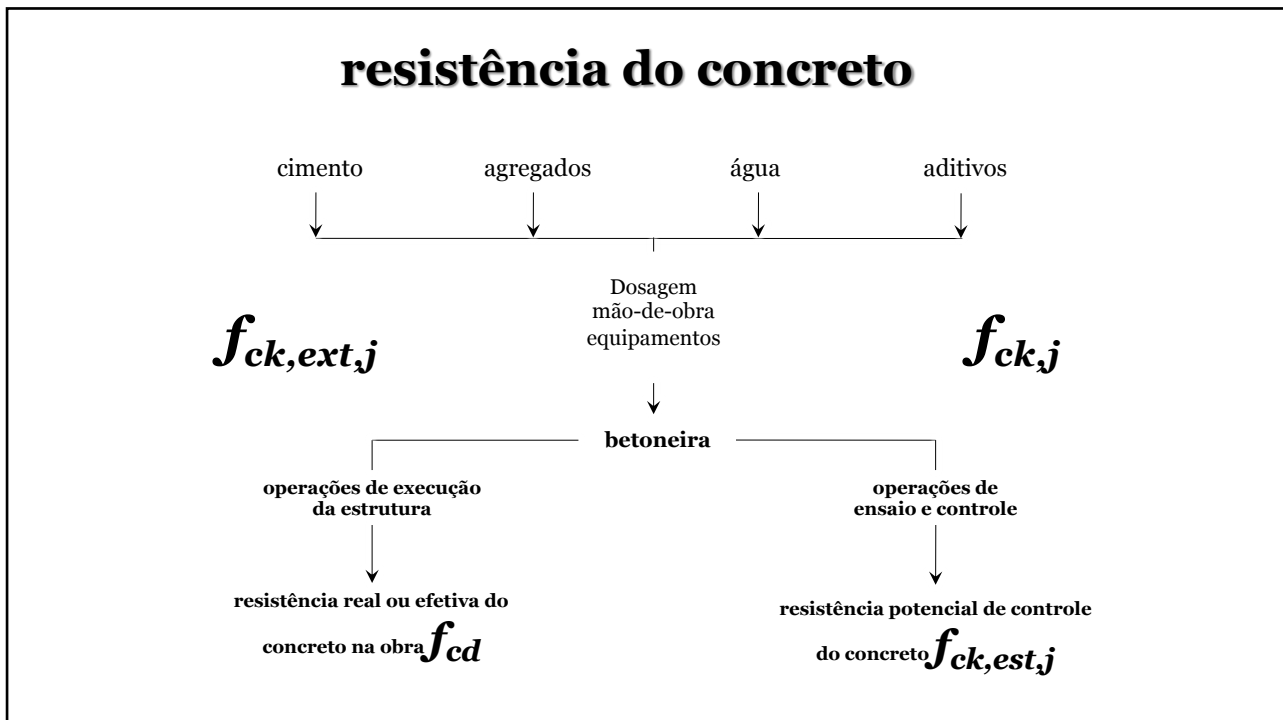
16



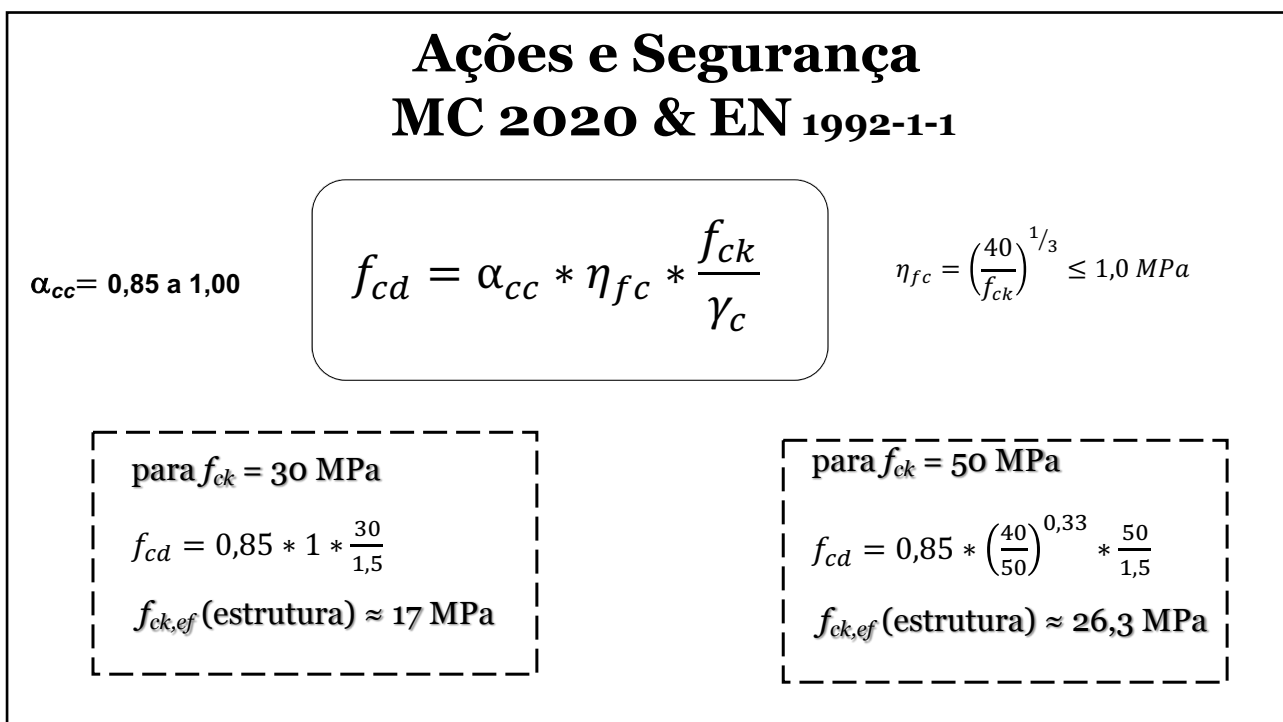
17



18



19

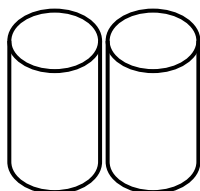
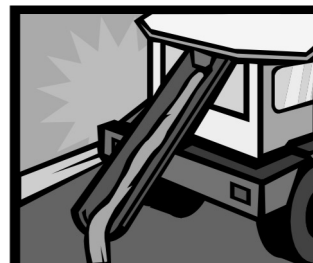


20

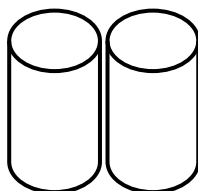
**...como obter a maior resistência a compressão,  
 $f_c$  a uma certa idade?**

Concreto de um traço bem misturado:

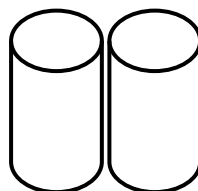
*pode moldar, curar e tratar como quiser !*



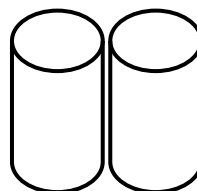
**Grupo A**



**Grupo B**



**Grupo C**



**Grupo D**

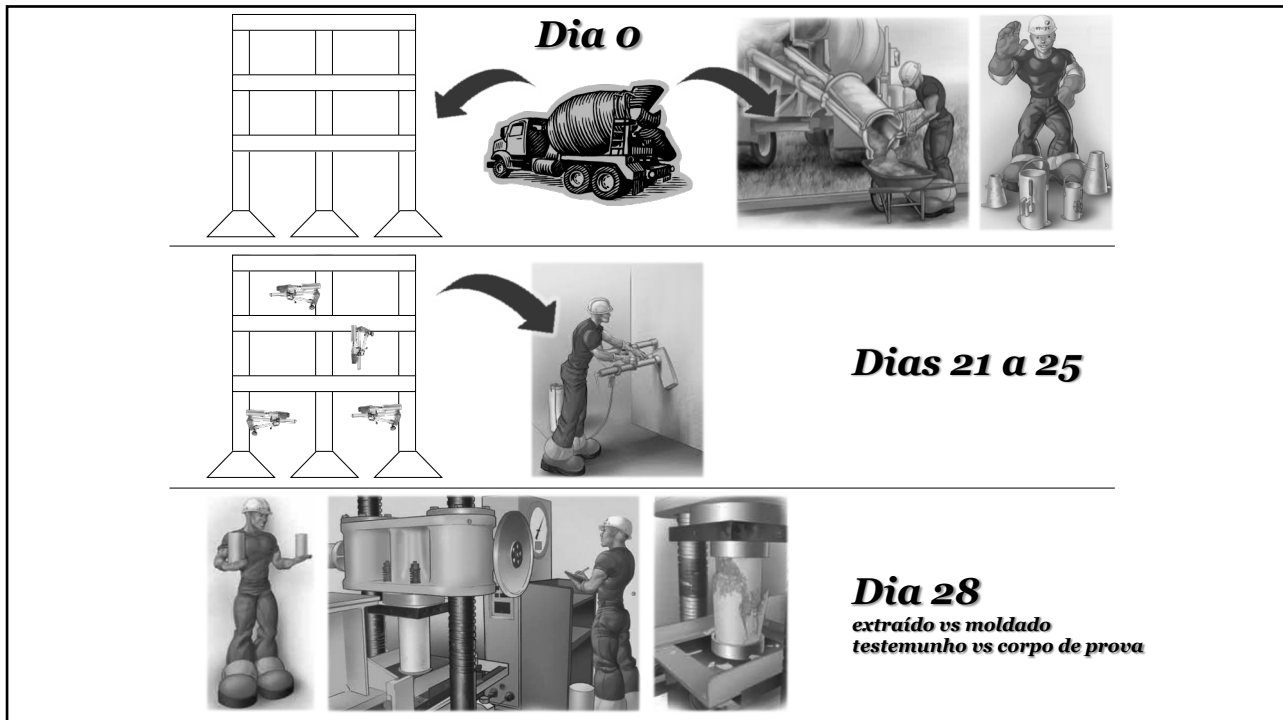
21

## **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**

22



23

## Conclusões

pilares:

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

lajes & (vigas)

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

24



Edificações NBR 6118	estaca hélice NBR 6122
$f_{cd} = \alpha_{cc} * \eta_{fc} * \frac{f_{ck}}{\gamma_c}$	$f_{cd} = 0,85 * \frac{f_{ck}}{\gamma_c}$
$f_{cd} = 0,85 * 1 * \frac{f_{ck}}{1,4}$	$f_{cd} = 0,85 * \frac{f_{ck}}{2,7}$
$f_{cd} \cong 0,61 * f_{ck}$	$\therefore f_{cd} \cong 0,30 * f_{ck}$

25

<b>ABNT NBR 7680:2015 <math>f_{ck,ext,j}</math></b>
<b>ABNT NBR 6118:2023 <math>f_{ck,j}</math></b>
<b>ABNT NBR 12655:2022 <math>f_{ck,est,j}</math></b>
<b>referencial de segurança</b>
<b><math>f_{ck}</math></b>

26

### ...quais as diferenças principais entre o corpo de prova padronizado de referência e a obra?...

- ✓ geometria é cilindro
- ✓ moldado, curado, compactado
- ✓ protegido da agressividade
- ✓ temperatura, umidade relativa
  - ✓ sem carga
- ✓ carga monotônica crescente
  - ✓ carga rápida
- ✓ idade prematura definida

- ✓ geometria qualquer
- ✓ mão de obra e equipamentos
- ✓ sob a agressividade ambiental
  - ✓ à intempérie
  - ✓ sob carga
- ✓ carga cíclica variável
- ✓ carga de longa duração
  - ✓ 50 anos ou mais

27

quantas resistências tem o concreto de um caminhão betoneira?

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

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

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

“potencial do concreto”

28

...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?

29

quantas resistências tem o concreto de um caminhão betoneira?

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

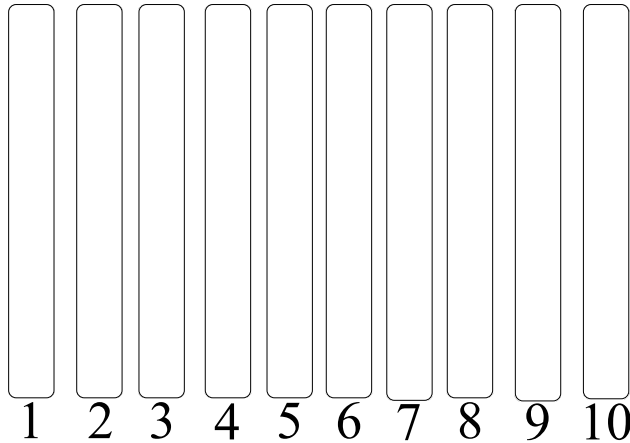
exemplar = mais alto ( $f_{ck,est}$ )

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

$f_{ck} = 45$ MPa

30

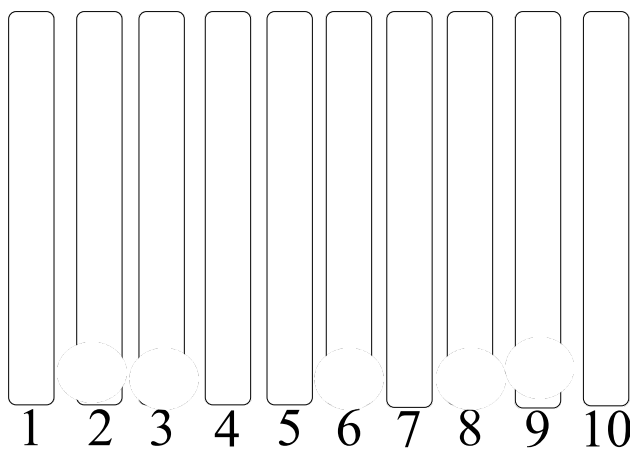
com esse concreto foram construídos 10 pilares. qual a resistência característica do concreto à compressão nesses pilares para fins de verificação da segurança?



**$f_{ck}$**   
**45MPa**

31

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



32



33



34



35

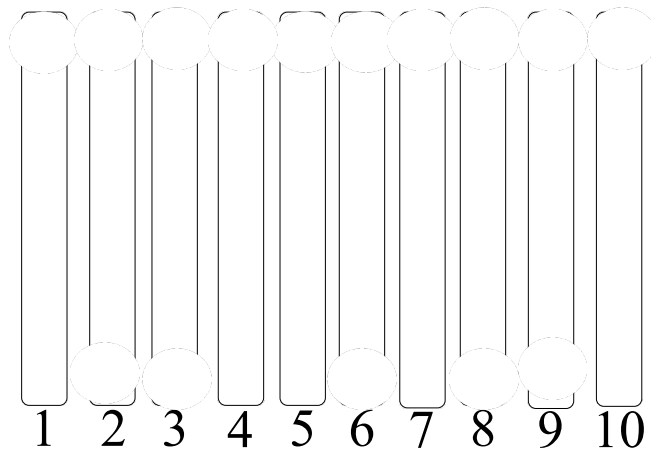
“ninhos de concretagem”  
qual a resistência do concreto nesses pilares para fins de  
verificação da segurança?

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10

$f_{ck}$   
**45MPa**

36

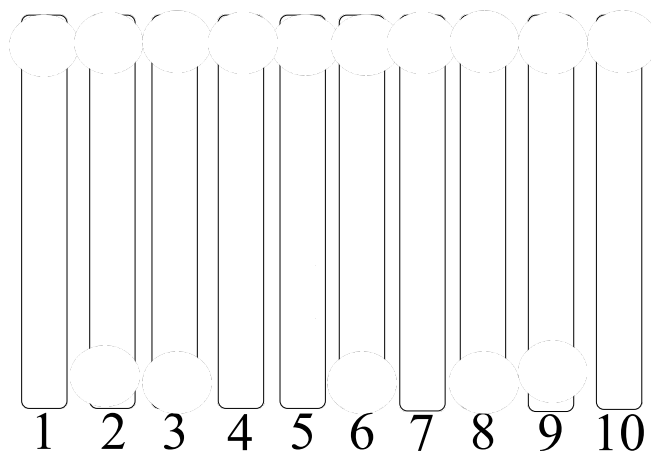
qual a resistência do concreto nos pilares que está mais próxima da resistência característica do concreto à compressão (controle, moldado)  $f_{ck,est}$ ?



$f_{ck}$   
45MPa

37

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

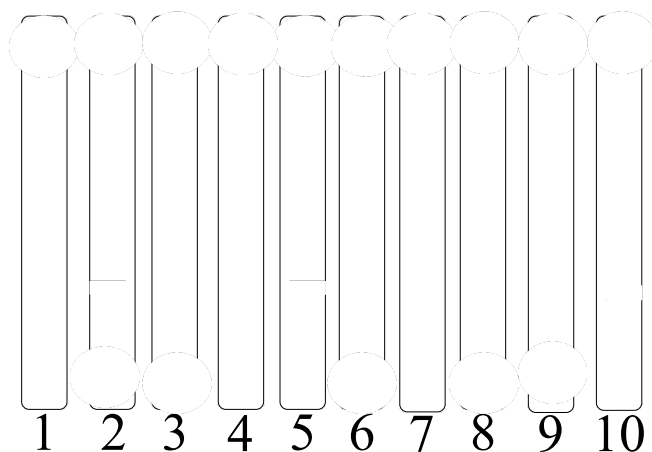


terço inferior

38

qual a resistência obtida de um pilar?

$f_{ck,ext}$



**terço inferior**

$f_{ck,ext,1}$

$f_{ck,ext,2}$

$f_{ck,ext,3}$

39

**...então o  $\gamma_c$  em *fib Model Code 2020* está para cobrir:**

- \* diferenças na moldagem e compactação entre os corpos de prova e obra;
- \* diferenças de cura, temperatura e UR entre cps e obra;
- \* diferenças entre a geometria do cp e a geometria das peças na obra;
- \* variabilidades geométricas das peças;
- \* variabilidade da posição das barras de aço;
- \* variabilidade dos cobrimentos;
- \* simplificação dos modelos de cálculo...

40



## ...mas ainda falta!:

→ passar da idade de ensaio (28, 56, 63 ou 91 dias)  
a uma idade qualquer ao longo de 50 anos ou  
mais!!

a resistência **cresce**  
com a idade devido à hidratação  
do cimento

$$\beta_{cc}(t)$$

41

$$f_{cd} = \beta_{cc}(t) * \frac{f_{ck,j}}{\gamma_c}$$

42

## ...mas também falta!:

→ passar de um ensaio de carga rápida numa certa idade para uma situação de carga de longa duração durante toda a vida VUP

a resistência **decrece**  
com cargas que durem  
mais de 15 minutos

$$\beta_{c,sus(t,t_0)}$$

43

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

44

## **natureza do concreto**

1. a resistência do concreto **cresce** com a idade
2. a resistência do concreto **decrece** com a carga mantida

45

**como cresce a resistência do concreto com a idade?**

46

# Crescimento da Resistência fib Model Code 2020

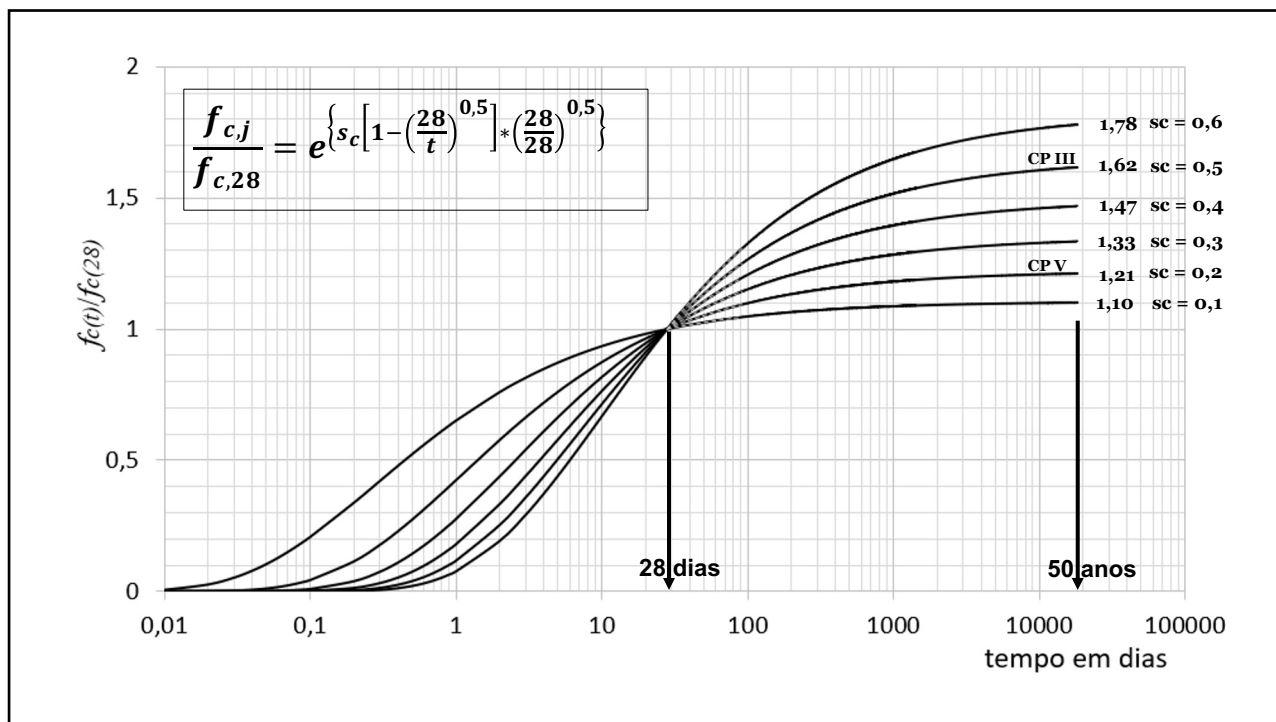
$$\frac{f_{c,j}}{f_{c,ref}} = e^{\left\{ s_c \left[ 1 - \left( \frac{t_{ref}}{t} \right)^{0,5} \right] * \left( \frac{28}{t_{ref}} \right)^{0,5} \right\}}$$

fib Model Code 2020  
Item 14.9.1

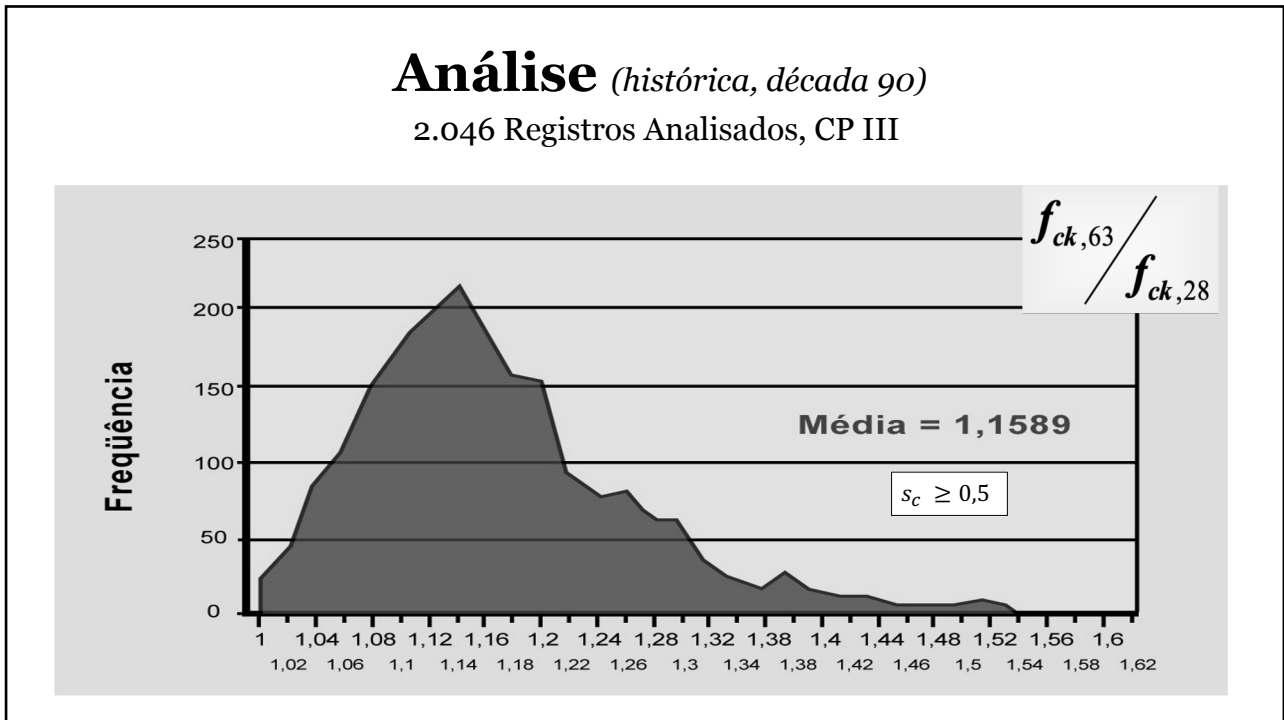
Resistência à compressão do Concreto (MPa)	s <sub>c</sub>		
	Classe CS	Classe CN	Classe CR
f <sub>c</sub> ≤ 35	0,6	0,5	0,3
35 < f <sub>c</sub> < 60	0,5	0,4	0,2
f <sub>c</sub> ≥ 60	0,4	0,3	0,1

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".

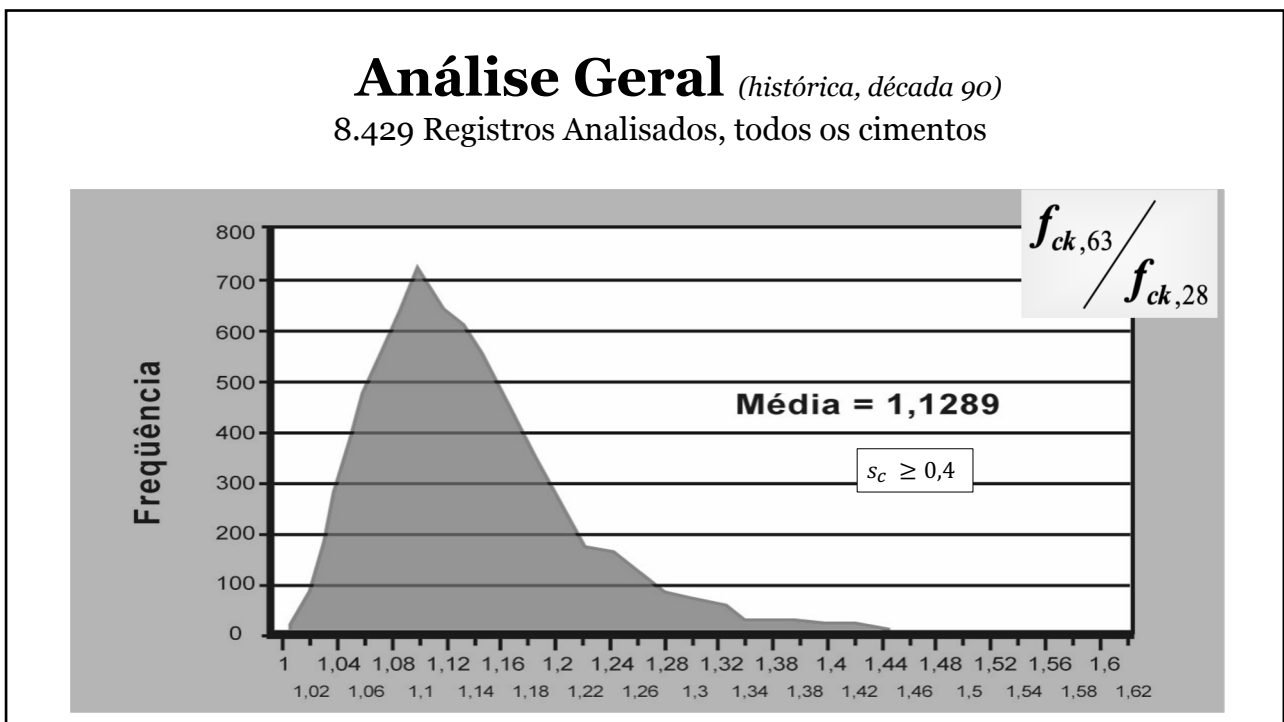
47



48



49



50

“efeito Rüsçh”

**como decresce a resistênciã  
com a idade a partir do dia  
de carregamento?**

51

**Resistênciã sob Carga de  
Longa Duraçãõ**  
(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:

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

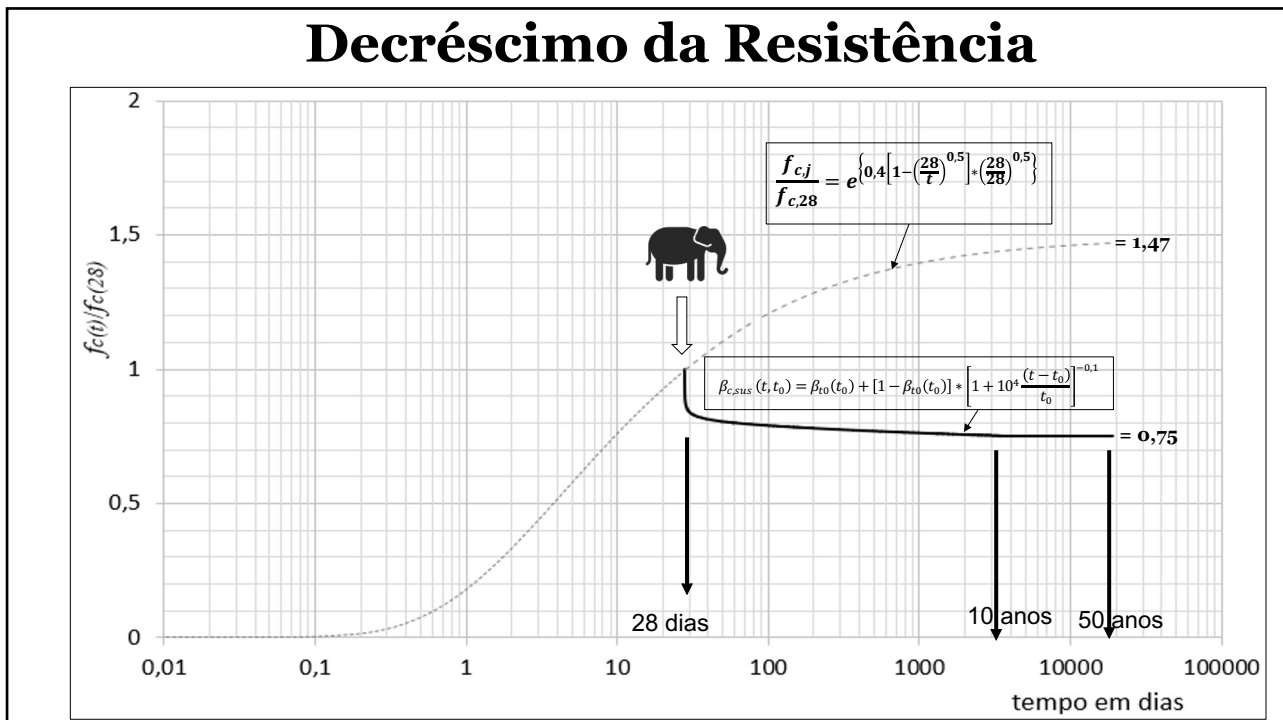
→  $t$  em dias

→  $t_0$  → idade de aplicaçãõ das cargas

→  $t - t_0 > 15$  minutos

52

## Decréscimo da Resistência

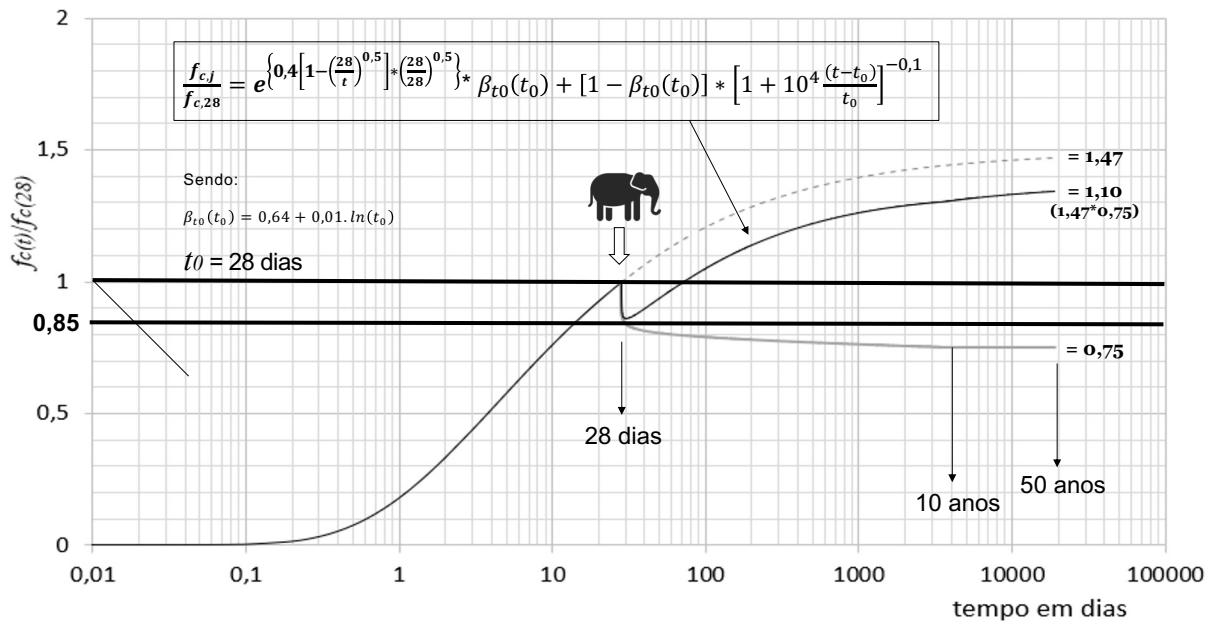


53

combinando crescimento com  
decréscimo a qualquer idade?

54

## Resistência do Concreto “carregado” a 28 dias



55

## Coeficientes de segurança parciais

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

ABNT NBR 6118:2023		MC 2020 EN 1992-1-1	
Materiais ( $\gamma_m$ )	Ações ( $\gamma_f$ )	Materiais ( $\gamma_m$ )	Ações ( $\gamma_f$ )
$\gamma_c$ (concreto) 1,4	$\gamma_g$ (ações permanentes) 1,4	$\gamma_c$ (concreto) 1,4 a 1,6 1,5	$\gamma_g$ (ações permanentes) 1,3 a 1,4 1,35
$\gamma_s$ (aço) 1,15	$\gamma_q$ (ações variáveis) 1,4	$\gamma_s$ (aço) 1,1 a 1,175 1,15	$\gamma_q$ (ações variáveis) 1,3 a 1,7 1,5

56



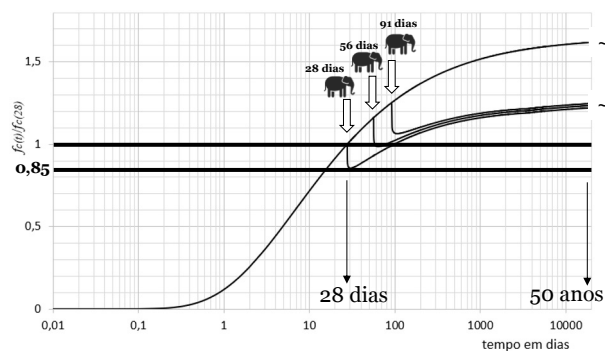
# Cálculo do $f_{cd}$ segundo várias normas

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

$t_{ref} = 28$  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
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	$0,61 * f_{ck}$	$0,67 * f_{ck}$	$0,67 * f_{ck}$

57

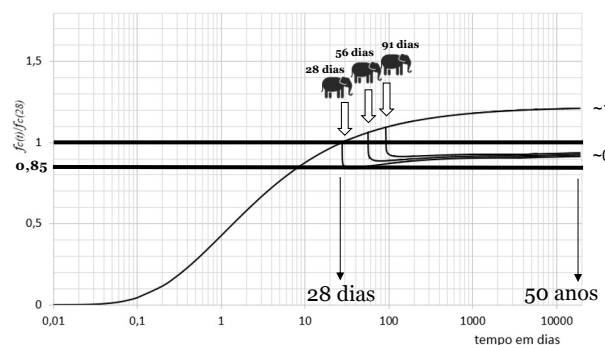
# Cálculo do $f_{cd}$ segundo várias normas

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

$t_{ref} = 28$  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
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	$0,61 * f_{ck}$	$0,67 * f_{ck}$	$0,67 * f_{ck}$

58

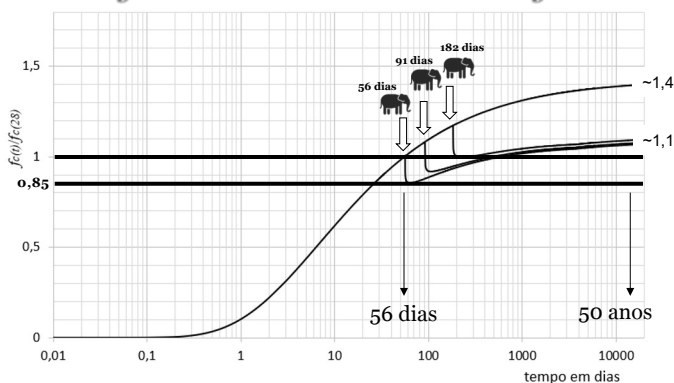
## Cálculo do $f_{cd}$ segundo várias normas

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

$t_{ref} = 56$  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>	$0,57 * f_{ck}$	$0,67 * f_{ck}$
CP III.91	<i>nil</i>	$0,57 * f_{ck}$	$0,67 * f_{ck}$
CP III.182	<i>nil</i>	$0,57 * f_{ck}$	$0,67 * f_{ck}$

59

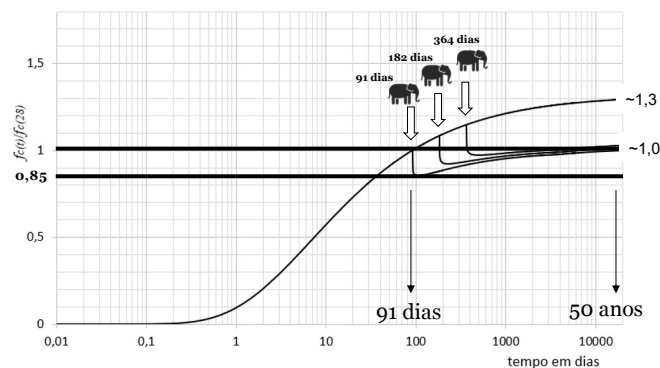
## Cálculo do $f_{cd}$ segundo várias normas

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

$t_{ref} = 91$  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
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>	$0,57 * f_{ck}$	$0,57 * f_{ck}$

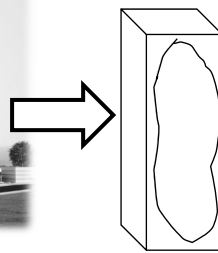
60

## Estudo de sustentabilidade



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

*Área do pavimento tipo: 365 m<sup>2</sup>*

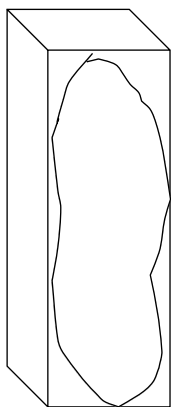


*Estudo de um pilar curto de seção quadrada, localizado entre o 1º e 2º pavimento (pé direito 2,88 m).*

*Edifício com 1008 tramos de pilar*

61

## Premissas para o dimensionamento do pilar



*Força normal característica:*

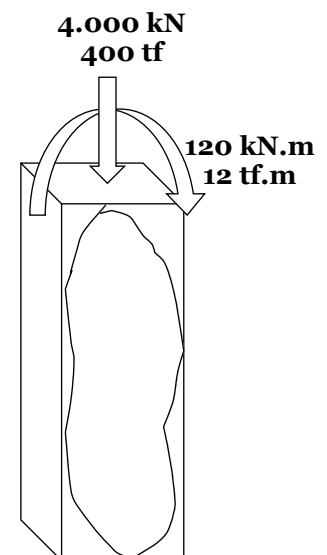
$$N_{sk} = 4000 \text{ kN} = 400 \text{ tf}$$

*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*



62

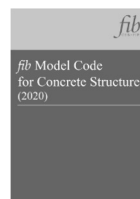
## Normas utilizadas

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

✓ *ABNT NBR 6118:2023*



✓ *fib Model Code 2020*



✓ *Eurocode 2:2023*



63

## 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).*

64

## consumo de cimento dos 2 concretos

$$f_{ck} = 20 \text{ MPa}$$

→ 28 dias

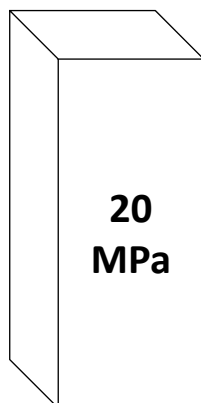
- $f_{cm} = f_{ck} + 8 = 28 \text{ MPa}$
- cimento CR → 9 kg/MPa
- consumo =  $28 * 9 = 252 \text{ kg/m}^3$
- cimento CS → 10 kg/MPa
- consumo =  $28 * 10 = 280 \text{ kg/m}^3$

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

→ 56 dias

- $f_{cm} = f_{ck} + 8 = 58 \text{ MPa}$
- 28 dias →  $56/1,12 = 50 \text{ MPa}$
- cimento CR → 7,0 kg/MPa
- consumo =  $50 * 7,0 = 350 \text{ kg/m}^3$
- cimento CS → 7,5 kg/MPa
- consumo =  $50 * 7,5 = 375 \text{ kg/m}^3$

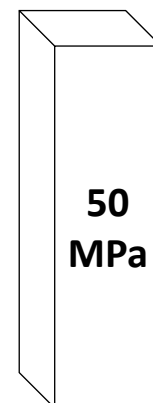
65



### armadura

0,4%

4,0%



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

66

*Para a quantificação das emissões de CO<sub>2</sub> foram utilizados dados disponíveis em:*



Cimento CP III Santa Helena -Votorantim **384 kg CO<sub>2</sub> eq.** por tonelada.  
Cimento CP V Santa Helena -Votorantim **852 kg CO<sub>2</sub> eq.** por tonelada.



CECarbon

**8 kg CO<sub>2</sub> eq.** por metro quadrado de fôrma.



Aço CA 50 ArcelorMittal Piracicaba **786 kg CO<sub>2</sub> eq.** por tonelada.



Os dados utilizados ficaram dentro das faixas informadas pelo Sidac.

67

**440 kgCO<sub>2</sub>eq**

**180 kgCO<sub>2</sub>eq**

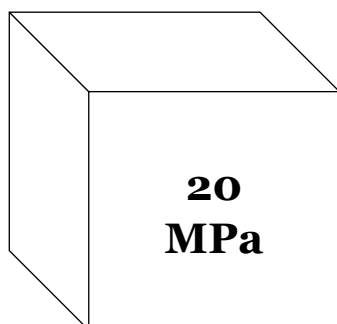
50 cm

45 cm

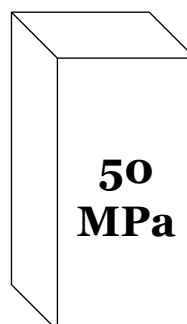
$f_{ck}$  28 dias

CP V

4,0%



**20 MPa**



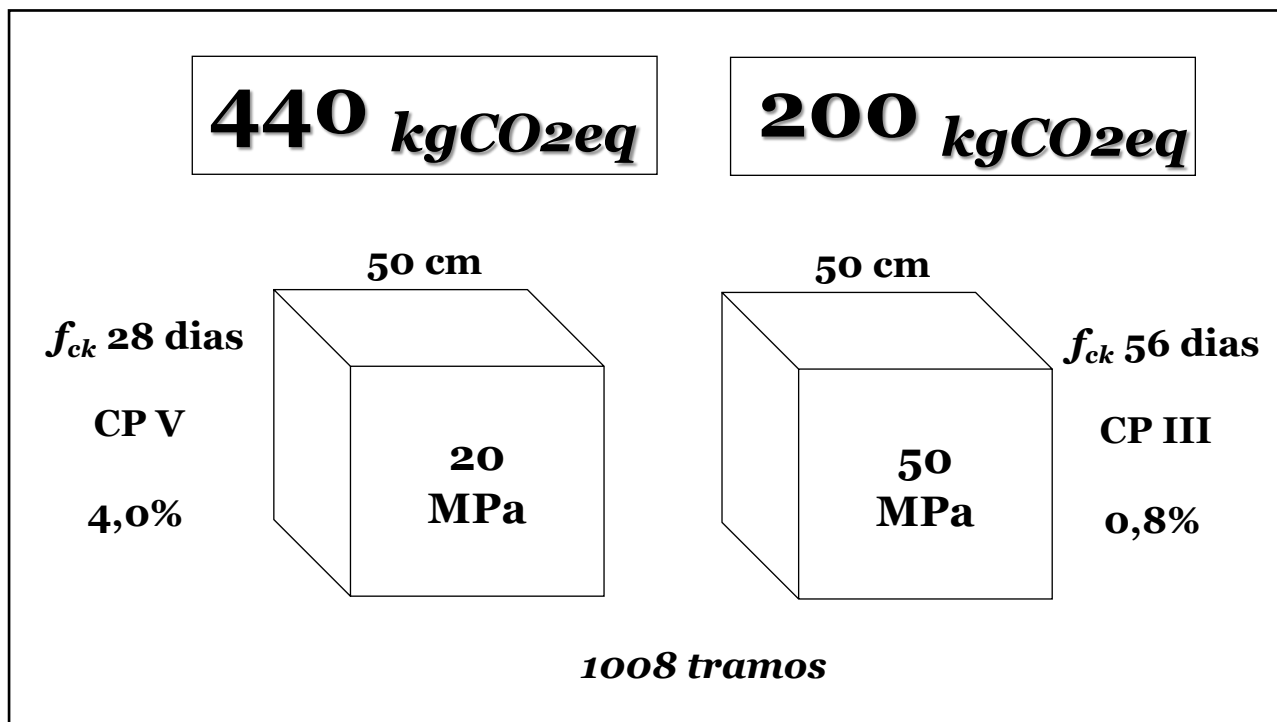
**50 MPa**

$f_{ck}$  56 dias

CP III

1,0%

68



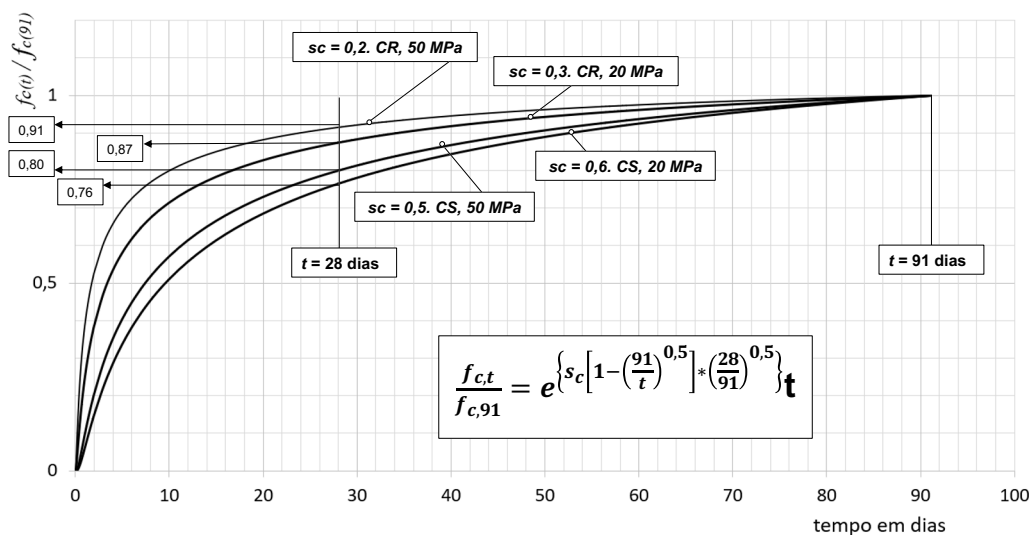
69

...qual a influência na desmaterialização e na redução da emissão de gases tipo estufa ao passar de  $f_{ck}$  a 28 dias para  $f_{ck}$  a 91 dias de idade...

**fib** Model Code 2020 e EN 1992-1-1

70

## fib Model Code 2020 e EN 1992-1-1



71

## Desmaterialização

**Para concreto controlado aos 28 dias:**

$f_{ck}$ (MPa)	$f_{cm}$ (MPa)	Tipo de cimento	Consumo de cimento (kg/MPa)	Consumo de cimento (kg/m <sup>3</sup> )
20	28	CR	9	9 * 28 = 252
		CS	10	10 * 28 = 280
50	58	CR	7	7 * 58 = 406
		CS	7,5	7,5 * 58 = 435

**Para concretos controlados aos 91 dias, aos 28 dias teremos:**

$f_{ck}$ (MPa)	$f_{cm}$ (MPa)	Tipo de cimento	Consumo de cimento (kg/MPa)	Consumo de cimento (kg/m <sup>3</sup> )
20	(28 * 0,87) = 24,4	CR	9	9 * 24,4 = 219
	(28 * 0,76) = 21,3	CS	10	10 * 21,3 = 213
50	(58 * 0,91) = 52,8	CR	7	7 * 52,8 = 369
	(58 * 0,80) = 46,4	CS	7,5	7,5 * 46,4 = 348

72



## Desmaterialização e Gases Estufa

*para concretos com  $f_{ck}$  especificado a 91 dias de idade em relação a 28 dias:*

$f_{ck}$ (MPa)	$f_{cm}$ (MPa)	Tipo de cimento	Consumo de cimento (kg/MPa)	Economia de cimento ou desmaterialização por m <sup>3</sup> (kg/m <sup>3</sup> )	Redução de emissões de CO <sub>2</sub> kg.CO <sub>2</sub> / m <sup>3</sup>
20	24,4	CR	9	<b>33 → 13%</b>	<b>29 → 13%</b>
	21,3	CS	10	<b>67 → 24%</b>	<b>26 → 24%</b>
50	52,8	CR	7	<b>37 → 09%</b>	<b>32 → 09%</b>
	46,4	CS	7,5	<b>87 → 20%</b>	<b>33 → 20%</b>

73

...qual a influência na desmaterialização e na redução da emissão de gases tipo estufa ao passar o coeficiente  $k_{tc} = \alpha_{cc}$  de 0,85 a 1,00 para  $f_{ck}$  a 28 dias...

***fib*** Model Code 2020 e EN 1992-1-1

74

- ✓ pilares com taxa de armadura máxima (~4,0%) e mínima (~1,0%)
  - ✓ coeficiente  $k_{tc} = 0,85$  ( $\alpha_{cc}$  - fib Model Code 2020)
  - ✓ coeficiente  $k_{tc} = 1,00$  ( $\alpha_{cc}$  - fib Model Code 2020)

ABNT NBR 6118:2023

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

$$\sigma_c = \begin{cases} 0,85 \cdot \eta_c \cdot f_{cd} \cdot [1 - (1 - \varepsilon_c / \varepsilon_{c2})^n] & \text{para } 0 \leq \varepsilon_c \leq \varepsilon_{c2} \\ 0,85 \cdot \eta_c \cdot f_{cd} & \text{para } \varepsilon_{c2} \leq \varepsilon_c \leq \varepsilon_{cu} \end{cases}$$

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

$$\varepsilon_{c2} = \begin{cases} 2,0\text{‰} & \text{para concretos até C50} \\ 2,0\text{‰} + 0,085\text{‰} \cdot (f_{ck} - 50)^{0,53} & \text{para concretos C55 até C90} \end{cases}$$

$$\varepsilon_{cu} = \begin{cases} 3,5\text{‰} & \text{para concretos até C50} \\ 2,6\text{‰} + 35\text{‰} \cdot [(90 - f_{ck})/100]^4 & \text{para concretos C55 até C90} \end{cases}$$

EN 1992-1-1:2023

$$f_{cd} = \eta_{cc} \cdot k_{tc} \cdot \frac{f_{ck}}{\gamma_c}$$

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

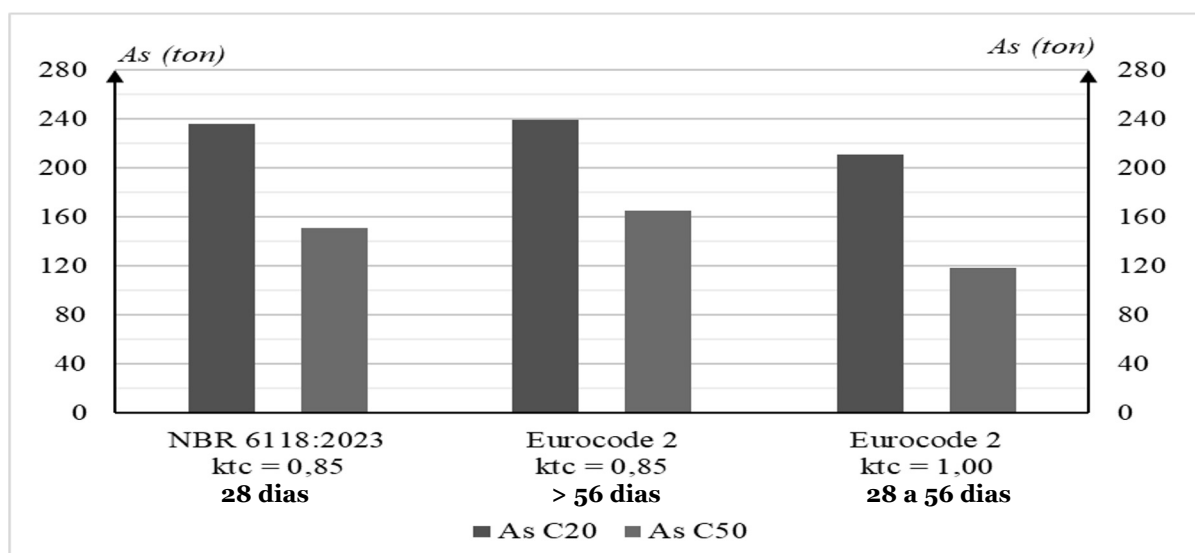
$$\sigma_{cd} = \begin{cases} f_{cd} \cdot [1 - (1 - \varepsilon_c / \varepsilon_{c2})^2] & \text{para } 0 \leq \varepsilon_c \leq \varepsilon_{c2} \\ f_{cd} & \text{para } \varepsilon_{c2} \leq \varepsilon_c \leq \varepsilon_{cu} \end{cases}$$

$$\varepsilon_{c2} = 0,002$$

$$\varepsilon_{cu} = 0,0035$$

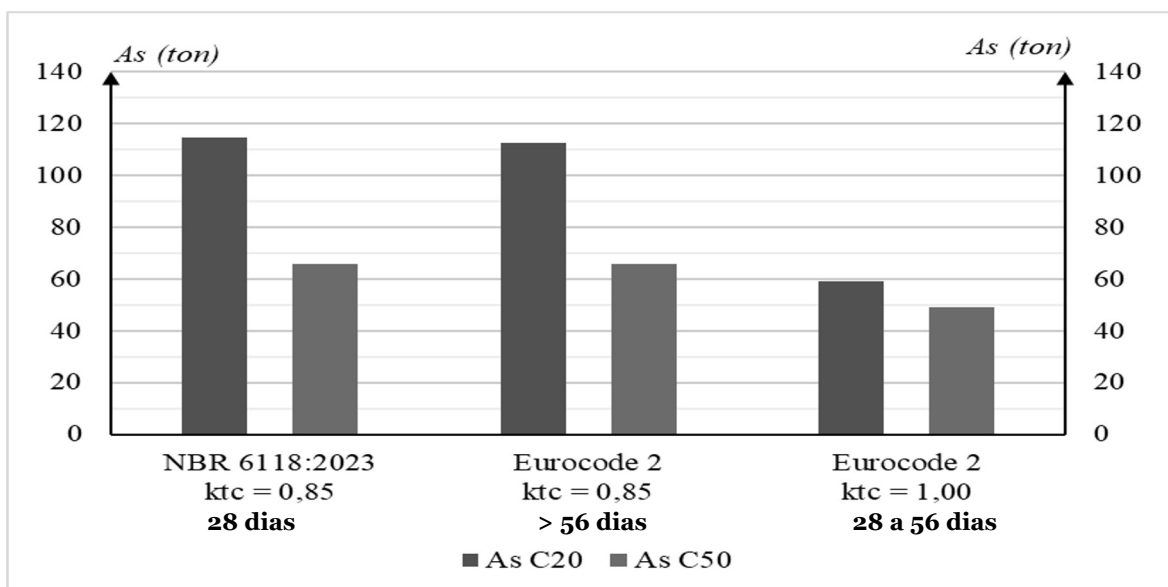
75

## Consumo de aço (~4,0%)



76

## Consumo de aço (~1,0%)



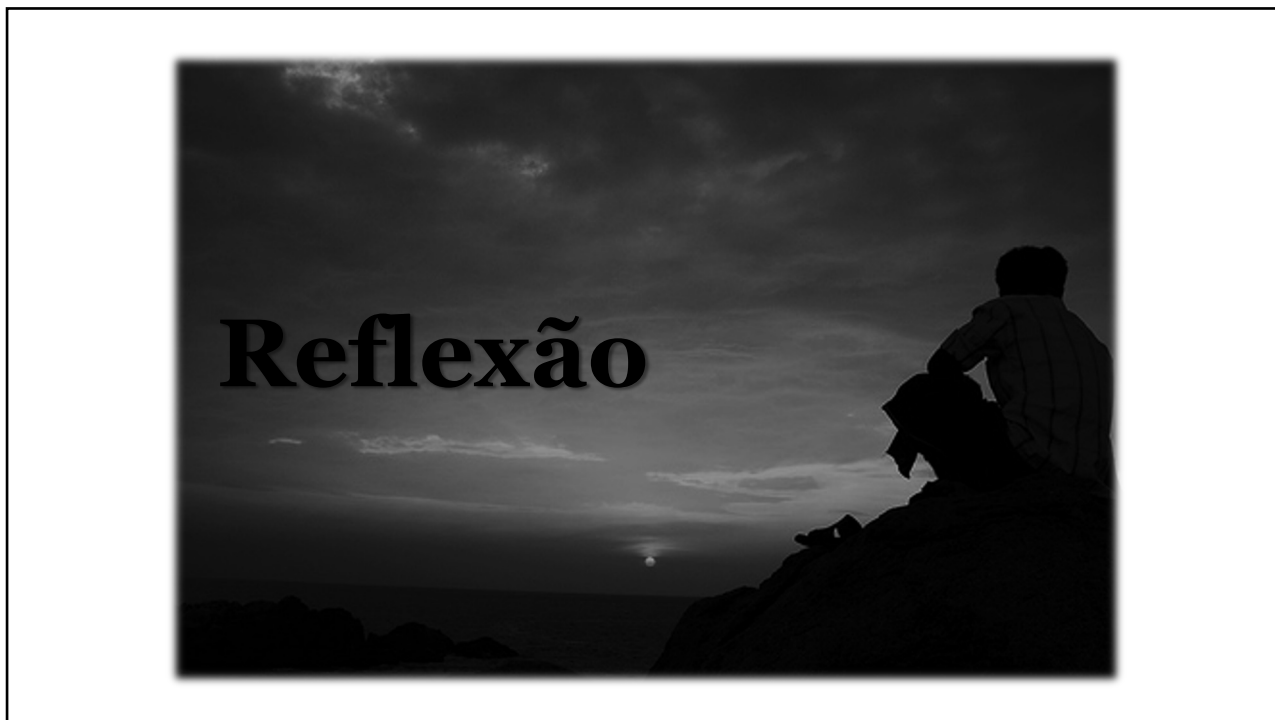
77

## Desmaterialização e Gases Estufa

*para pilares dimensionados com  $k_{tc} = \alpha_{cc} = 1,00$  em relação a  $k_{tc} = \alpha_{cc} = 0,85$ :*

$f_{ck}$ MPa	Taxa aço	Economia de aço por pilar kg/pilar	Redução de emissões de CO <sub>2</sub> kg.CO <sub>2</sub> / pilar
20	4%	30 → 12%	23 → 12%
	1%	57 → 49%	45 → 49%
50	4%	40 → 25%	32 → 25%
	1%	15 → 23%	12 → 23%

78



79

1. empregar concreto acima de 50 MPa em pilares, é mais sustentável;
2. empregar cimentos com adições, é mais sustentável;
3. projetar e especificar concretos para  $f_{ck}$  a 56, 63 e 91 dias de idade, é mais sustentável;
4. empregar menores taxas de aço, é mais sustentável;

80

sabendo que:

a resistência  
cresce assim:

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

a resistência  
decrece assim:

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

81

Porque usar coeficientes ou coeficientes empíricos?

$$\alpha_{cc} = 0 \times 1,00$$

$$f_{cd} = 0 \times \eta_{fc} * \frac{f_{ck}}{\gamma_c}$$


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

$$(0,65 \text{ a } 0,90) * 0 \text{ a } 0,85 * 0,80 * f'_c$$


talvez usar →

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

82

 **sempat**  
TO

# OBRIGADO!

 **PhD**  
Engenharia  
*"do Laboratório de Pesquisa ao Canteiro de Obras"*

[www.phd.eng.br](http://www.phd.eng.br)  
11-2501-4822 / 23

