



Evolução da resistência à compressão do concreto segundo a ABNT NBR 6118:2023; *fib* Model Code 2020 e Eurocode 2: 2023.

The development of the compressive strenght of concrete according to ABNT NBR 6118:2023, fib Model Code 2020 e Eurocode 2:2023

BONI, Ricardo (1); HELENE, Paulo (2).

(1) *PhD Engenharia.*

(2) *Professor Titular da Escola Politécnica da Universidade de São Paulo. PhD Engenharia. Rua Visconde de Ouro Preto, 201. Consolação. São Paulo/SP. CEP 01303-060*

Resumo

As normas europeias *fib* Model Code 2020 e Eurocode 2:2023, recentemente publicadas, apresentam relevantes alterações na expressão teórica do desenvolvimento da resistência à compressão do concreto. Esse modelo matemático, comum às referidas normas, é mais abrangente e contempla toda a gama de concretos da atualidade, desde os mais tradicionais de $f_{ck} = 20$ MPa aos de alta resistência com $f_{ck} = 100$ MPa. Os concretos produzidos com diferentes tipos de cimento e com diferentes classes de resistência podem agora assumir valores do coeficiente s_c que variam de 0,1 a 0,6, bem mais realista que o limitado intervalo prescrito nas versões anteriores de 0,20 a 0,38. Além disso, foi flexibilizada a data de controle e referência da resistência característica, que agora pode ser tomada no intervalo de 28 dias a 91 dias, segundo decisão do projetista levando em conta as condições de execução e uso da estrutura. O objetivo deste artigo é apresentar um estudo detalhado da nova expressão, dos conceitos implícitos, comparando também com resultados reais de estruturas de concreto construídas recentemente, e controladas pelos autores. Refere-se também à norma brasileira ABNT NBR 6118:2023 sugerindo-se flexibilizar limitações para alcançar maior abrangência e assim dar mais liberdade aos projetistas para que possam, com responsabilidade e conhecimento, tornar as estruturas nacionais de concreto mais econômicas, mais sustentáveis e seguras.

Palavra-Chave: Resistência à compressão do concreto.

Abstract

The European standard *fib* Model Code 2020 and Eurocode 2:2023, recently released, introduce significant revisions to the theoretical formulations governing compression resistance. This refined mathematical framework, shared by the aforementioned standards, offers a more comprehensive approach, accommodating a spectrum of concrete compositions prevalent today, spanning from conventional concretes with $f_{ck} = 20$ MPa to ultra-high-performance concretes boasting $f_{ck} = 100$ MPa. Notably, concretes crafted with diverse cement types and varying strength grades can now be assigned s_c coefficients ranging from 0.1 to 0.6, a notably broader spectrum compared to the constrained range stipulated in earlier iterations, which typically extended from 0.20 to 0.38. Furthermore, designers are afforded greater flexibility regarding the reference duration for assessing the reference resistance class, extending from 28 days to 91 days, aligning with project-specific considerations encompassing construction practices and structural service conditions. This article aims to meticulously examine these novel formulations, elucidating their underlying principles and contrasting them with empirical findings gleaned from recently completed structures overseen by the authors. The discourse references the brazilian standard ABNT NBR 6118:2023, which advocates for a relaxation of constraints to empower designers in crafting structures that are not only safer but also more cost-effective and environmentally sustainable.

Keywords: Concrete compressive strength.



1. Apresentação dos modelos *fib* Model Code 2020 e Eurocode 2:2023

Recentemente, o *fib* Model Code for Concrete Structures 2020 e a norma europeia EN 1992-1-1, mais conhecida por Eurocode 2:2023 “*Design of concrete structures – Part 1-1: General rules and rules for buildings, bridges and civil engineering structures*” apresentaram, de maneira comum, alterações na expressão teórica do desenvolvimento da resistência à compressão do concreto empregada até então.

O *fib* Model Code 2020 em seu subitem 14.6.1.6.1 “*Development of strength with time*”, assim como o *Annex B (normative)* “*Time dependent behaviour of materials: strength, creep, shrinkage and elastic strain of concrete and relaxation of prestressing steel*” do Eurocode 2:2023 recomendam agora a utilização da mesma expressão para representar o crescimento da resistência à compressão do concreto em função do tempo, conforme apresentado na Equação 1.1.

$$f_{c(t)} = \beta_{cc}(t) * f_{c(t_{ref})} \rightarrow \frac{f_{c(t)}}{f_{c(t_{ref})}} = e^{\left\{s_c * \left[1 - \sqrt{\frac{t_{ref}}{t}}\right] * \left(\sqrt{\frac{28}{t_{ref}}}\right)\right\}} \quad (\text{Equação 1.1})$$

Onde:

$\beta_{cc}(t)$: função que representa o crescimento da resistência à compressão com o tempo, adimensional;

s_c : coeficiente adimensional relacionado ao desenvolvimento da resistência do concreto que pode variar de 0,1 a 0,6, conforme apresentado na Tabela 1.1.

Tabela 1.1. Valores de s_c segundo *fib* Model Code 2020 e Eurocode 2:2023.

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”.

$f_c(t)$: resistência à compressão na idade t , dada em MPa;

t_{ref} : idade de controle e referência, em dias;

$f_c(t_{ref})$: resistência à compressão na idade t_{ref} , dada em MPa;

t : idade do concreto, em dias, que pode ser ajustada em função da temperatura, por meio da utilização da Equação 1.2.



$$t = \sum_{i=1}^n \Delta t_i e^{\left[13,65 - \frac{4000}{273+T(\Delta t_i)}\right]} \quad (\text{Equação 1.2})$$

Onde:

Δt_i : é o número de dias nos quais a temperatura T prevalece;

$T_{(\Delta t_i)}$: é a temperatura média em °C durante o intervalo de tempo Δt_i (sendo que a temperatura T pode variar de $-20 \text{ °C} \leq T \leq 45 \text{ °C}$).

É interessante notar que para uma temperatura constante de 20 °C , ou seja, $T_{(\Delta t_i)} = 20 \text{ °C}$, não há necessidade de ajuste da idade t , uma vez que, neste caso, a Equação 1.2 pode ser simplificada da seguinte forma: $t = \sum_{i=1}^n \Delta t_i e^{[0]} \rightarrow t = \sum_{i=1}^n \Delta t_i * 1 \rightarrow t = t$.

Logo, nota-se duas alterações significativas na nova expressão teórica proposta pelo **fib** Model Code 2020 e Eurocode 2:2023 (Equação 1.1), quando comparada com a expressão anteriormente preconizada (**fib** Model Code 2010), são elas:

- Admite-se maior variabilidade do coeficiente s_c que, agora, pode assumir valores de 0,1 a 0,6. Tal alteração permitiu que curvas de crescimento de resistência mais realistas e mais adaptadas aos avanços na tecnologia do concreto fossem admitidas. Lembrando que na versão anterior da norma esse coeficiente variava entre 0,20 e 0,38;
- Admite-se também uma flexibilização da data de controle e referência (t_{ref}). Agora esta data pode ser tomada no intervalo de 28 a 91 dias, ou ainda, idades mais avançadas, caso necessário, segundo decisão do projetista, sempre levando em conta as condições de execução e uso da estrutura.

Vale registrar que para uma idade de controle e referência igual a 28 dias, ou seja, $t_{ref} = 28$ dias, a Equação 1.1 assume o seguinte formato:

$$\frac{f_{c(t)}}{f_{c(t_{ref})}} = e^{\left\{s_c * \left[1 - \sqrt{\frac{t_{ref}}{t}}\right] * \left(\sqrt{\frac{28}{t_{ref}}}\right)\right\}} \rightarrow \frac{f_{c(t)}}{f_{c(28)}} = e^{\left\{s_c * \left[1 - \sqrt{\frac{28}{t}}\right] * \left(\sqrt{\frac{28}{28}}\right)\right\}} \rightarrow \frac{f_{c(t)}}{f_{c(28)}} = e^{\left\{s_c * \left[1 - \sqrt{\frac{28}{t}}\right]\right\}} \quad (\text{Equação 1.3})$$

Observa-se que a Equação 1.3, obtida a partir da idade de controle e referência igual a 28 dias é a mesma equação preconizada pelo **fib** Model Code 2010, publicado em 2013, com a particularidade de que neste caso, o coeficiente de crescimento da resistência s_c (antes designado pela letra **s**) considerado pela referida publicação, em seu subitem 5.1.9.1 “*Development of strength with time*” assumia valores de 0,20, 0,25 e 0,38.

Registra-se que a Equação 1.3 também é adotada pela norma ABNT NBR 6118:2023 “*Projeto de estruturas de concreto*” que recomenda, em seu subitem 8.2.4 “*Resistência à compressão*” que na ausência de resultados experimentais, pode-se adotar, em caráter orientativo, para idades inferiores aos 28 dias, a referida equação.

Entretanto, no caso da norma ABNT NBR 6118:2023, o coeficiente de crescimento s é obtido em função do tipo de cimento, sendo: $s = 0,38$ para concretos produzidos com cimento tipo CP III ou CP IV; $s = 0,25$ para concretos produzidos com cimento tipo CP I ou



CP II e $s = 0,20$ para concretos produzidos com cimento tipo CP V – ARI e para concretos com classe de resistência $\geq C60$.

É imperativo registrar que há uma sutil diferença relacionada com a validade da Equação 1.1, quando aplicada à luz da do Eurocode 2:2023. Enquanto esta norma estabelece que a referida expressão tem validade apenas para $t \leq t_{ref}$, o **fib** Model Code 2020 não estabelece esta condição. Em outras palavras, significa dizer que, de acordo com o Eurocode 2:2023, as curvas são consideradas somente até que a razão $f_c(t) / f_c(t_{ref})$ seja igual a 1.

Para melhor explicar essa diferença de validade do modelo, a Figura 1.1 apresenta graficamente o desenvolvimento da resistência à compressão, de acordo com o **fib** Model Code 2020 até os 91 dias de idade, enquanto as Figuras 1.2 e 1.3 ilustram as curvas de acordo com o Eurocode 2:2023, considerando idades de controle e referência t_{ref} de 28 e 91 dias, respectivamente. Em todos os casos, adotou-se uma temperatura $T_{(\Delta t)}$ de 20°C e coeficientes de crescimento variando de $0,1 \leq s_c \leq 0,6$, conforme detalhado na Tabela 1.1.

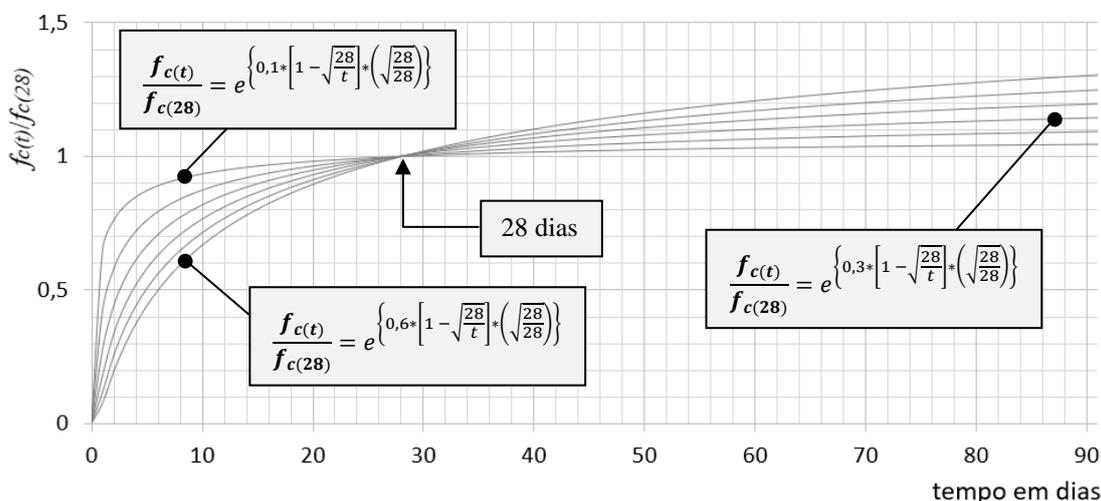


Figura 1.1. Curvas de crescimento de resistência à compressão até os 91 dias de idade, conforme **fib** Model Code 2020, considerando $t_{ref} = 28$ dias e $T_{(\Delta t)} = 20^\circ\text{C}$.

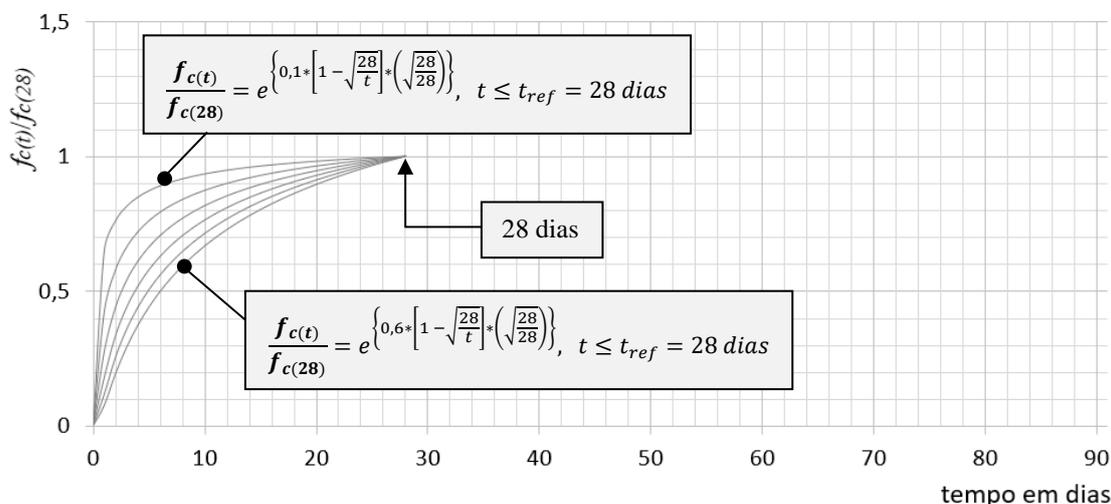


Figura 1.2. Curvas de crescimento de resistência à compressão, conforme Eurocode 2:2023, considerando $t_{ref} = 28$ dias e $T_{(\Delta t)} = 20^\circ\text{C}$.

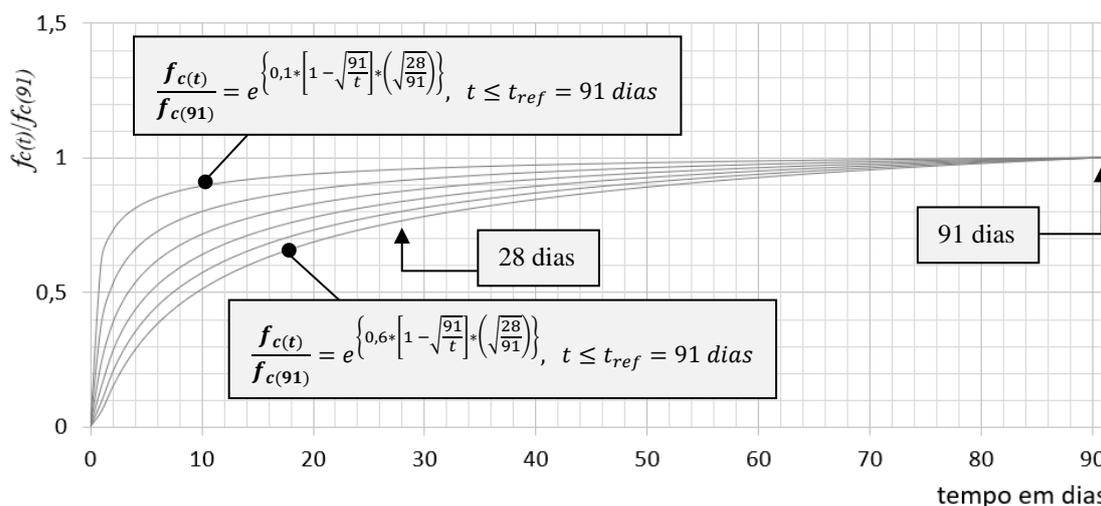


Figura 1.3. Curvas de crescimento de resistência à compressão, conforme Eurocode 2:2023, considerando $t_{ref} = 91$ dias e $T_{(\Delta t)} = 20^\circ\text{C}$.

Para finalizar este subitem, é interessante observar como as curvas de crescimento atualmente preconizadas pela norma **fib** Model Code 2020 se comportam em idades mais avançadas. A Figura 1.4 apresenta o desenvolvimento das curvas apresentadas na Figura 1.1 até uma idade de 50 anos, com o eixo das abscissas (tempo) em escala logarítmica.

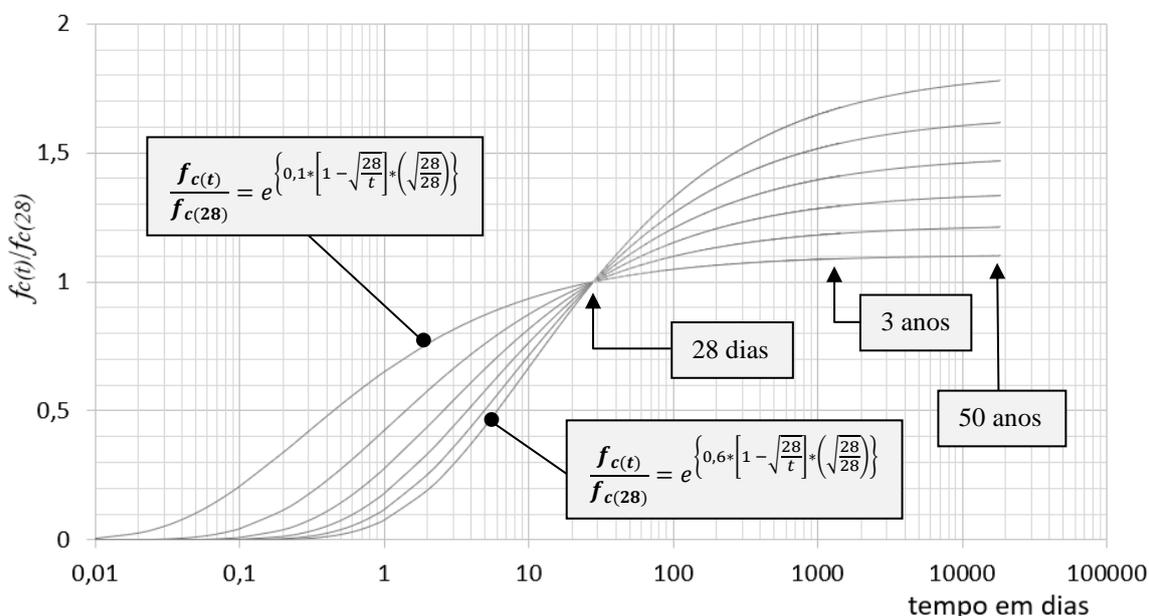


Figura 1.4. Curvas de crescimento de resistência à compressão até os 50 anos de idade, conforme **fib** Model Code 2020, considerando $t_{ref} = 28$ dias e $T_{(\Delta t)} = 20^\circ\text{C}$.

Até aqui foram apresentadas expressões que visam representar o desenvolvimento da resistência à compressão do concreto em condições relaxadas ao longo do tempo, ou seja, quando o concreto não está submetido a cargas mantidas. Entretanto, quando o concreto é submetido a tensões mantidas elevadas ocorre uma redução de sua resistência à compressão, é o chamado efeito Rüşh ou relaxação. O conceito de cargas elevadas é controverso e neste estudo, considera-se cargas elevadas quando as tensões no concreto superam $0,6 * f_{cd}$ ou $0,4 * f_{ck}$. Adiante estão apresentadas algumas considerações sobre este assunto.



1.1 A influência da carga mantida no desenvolvimento da curva de resistência

O **fib** Model Code 2020 considera os efeitos de diminuição da resistência à compressão devido aos efeitos de carga mantida, conforme apresentado no subitem 14.6.1.6.3.1 “*Sustained compressive strength*”. O modelo matemático considerado no referido documento técnico europeu está evidenciado na Equação 1.4.

$$\beta_{c,sus}(t, t_0) = \beta_{t_0}(t_0) + [1 - \beta_{t_0}(t_0)] * \left[1 + 10^4 \frac{(t-t_0)}{t_0}\right]^{-0,1} \quad (\text{Equação 1.4})$$

Onde:

$\beta_{c,sus}(t, t_0)$: função que representa a diminuição da resistência ao longo do tempo em decorrência da carga mantida. Válida para $(t - t_0) > 0,015$ dias ~ 20 minutos.

$\beta_{t_0}(t_0)$: parâmetro que considera a maturidade do concreto: $\beta_{t_0}(t_0) = 0,64 + 0,01 \cdot \ln(t_0)$.

t_0 : idade de carregamento do concreto, em dias. $t_0 \geq 7$ dias.

$(t - t_0)$: tempo de carga mantida, em dias. Para $(t - t_0) > 10$ anos, adotar $(t - t_0) = 3650$ dias.

Sendo assim, para representar os efeitos de crescimento e decréscimo da resistência à compressão ao longo do tempo, devido às reações de hidratação e de carga mantida, respectivamente, de maneira conjunta, é necessário associar as Equações 1.1 e 1.4, resultando em:

$$f_c(t) = \beta_{cc}(t) * \beta_{c,sus}(t, t_0) * f_c(t_{ref}) \quad (\text{Equação 1.5})$$

Para melhor entendimento, a Figura 1.5 evidencia a curva do desenvolvimento de resistência do concreto considerando as parcelas de crescimento e de decréscimo combinadas, para uma carga mantida aplicada a partir dos 28 dias de idade.

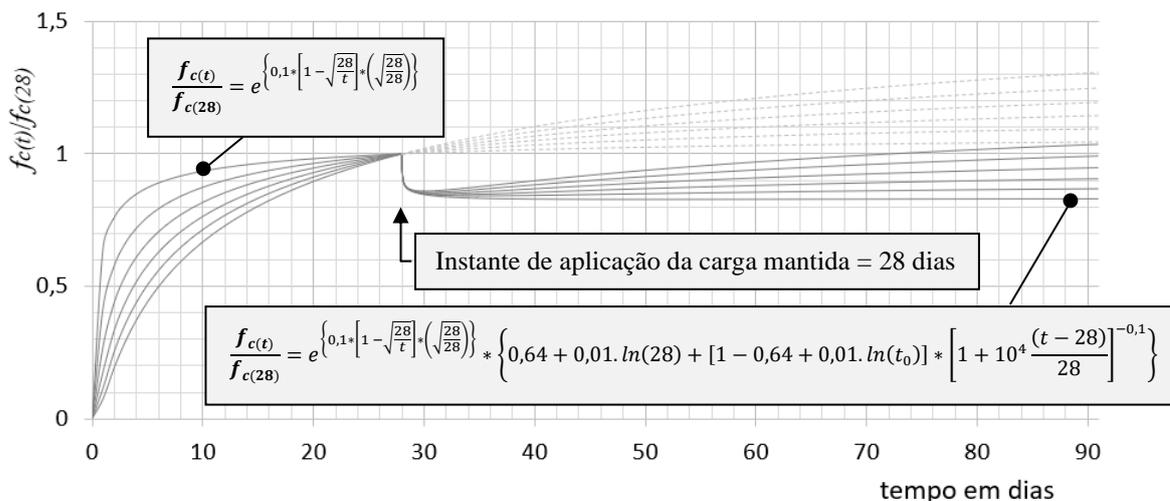


Figura 1.5. Curvas de crescimento e decréscimo de resistência à compressão, conforme **fib** Model Code 2020, considerando $t_{ref} = 28$ dias, $T_{(Ati)} = 20^\circ\text{C}$, aplicação da carga $t_0 = 28$ dias.



Há de se considerar também o efeito da carga mantida aplicada em diferentes idades. Sendo assim, na Figura 1.6 evidencia-se o desenvolvimento da resistência até idade de 50 anos para concretos com $s_c = 0,6$ e $t_{ref} = 28$ dias (curva destacada na cor preta), com carga aplicada em três datas distintas a saber: 28, 56 e 91 dias.

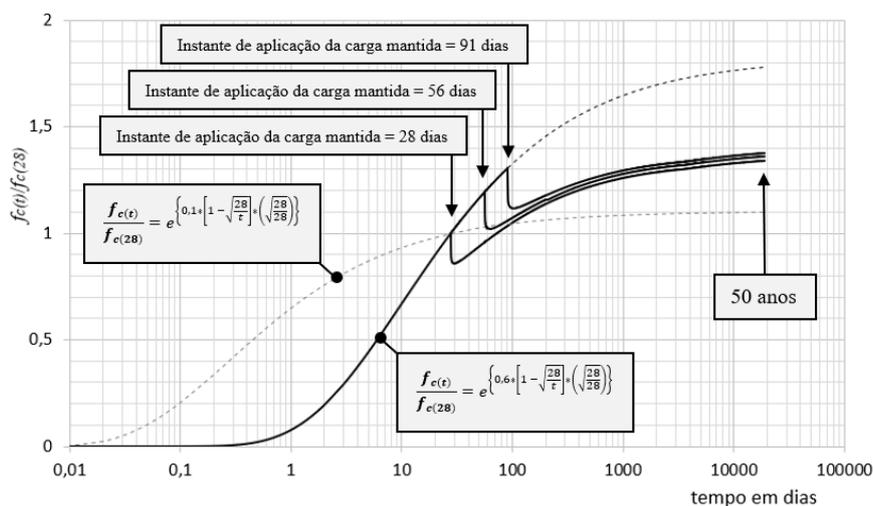


Figura 1.6. Curvas de crescimento e decréscimo de resistência à compressão até os 50 anos de concretos $s_c = 0,6$, conforme *fib* Model Code 2020, considerando $t_{ref} = 28$ dias, $T_{(\Delta t_i)} = 20^\circ\text{C}$, aplicação da carga mantida em $t_0 = 28$ dias, $t_0 = 56$ dias e $t_0 = 91$ dias.

Nota-se que para um concreto $s_c = 0,6$ ocorre uma diminuição de resistência da ordem de 14% quando da aplicação da carga aos 28 dias de idade. Entretanto, em decorrência do crescimento da resistência, aos 70 dias de idade já é possível observar que esta perda é recuperada ($f_{c(t)}/f_{c(28)} = 1$). Para cargas aplicadas aos 91 dias, nota-se sempre que a razão $f_{c(t)}/f_{c(28)} > 1$.

Analogamente, na Figura 1.7 evidencia-se o desenvolvimento da resistência para concretos com $s_c = 0,1$ e $s_c = 0,6$, conforme *fib* Model Code 2020, considerando $t_{ref} = 28$ dias, $T_{(\Delta t_i)} = 20^\circ\text{C}$, aplicação da carga elevada também aplicada nas datas 28, 56 e 91 dias.

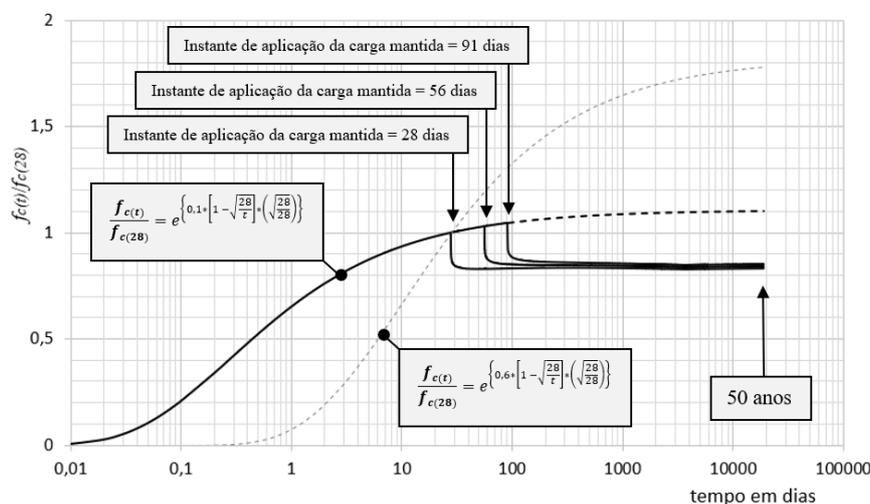


Figura 1.7. Curvas de crescimento e decréscimo de resistência à compressão até os 50 anos de concretos $s_c = 0,1$ e $s_c = 0,6$, conforme *fib* Model Code 2020, considerando $t_{ref} = 28$ dias, $T_{(\Delta t_i)} = 20^\circ\text{C}$, aplicação da carga elevada também aplicada nas datas 28, 56 e 91 dias.



Neste caso, nota-se que para um concreto $s_c = 0,1$ ocorre uma diminuição de resistência da ordem de 18% quando da aplicação da carga aos 28 dias de idade. Para o caso de carga aplicada aos 91 dias a diminuição da resistência à compressão é um pouco menor. Entretanto, em ambos os casos, após a aplicação e manutenção da carga a resistência final será sempre inferior a resistência atingida aos 28 dias em condições relaxadas ($f_{c(t)}/f_{c(28)} < 1$).

Sendo assim, é possível afirmar que dentre as inúmeras possibilidades de datas de aplicação das cargas mantidas, em diferentes curvas de crescimento ($0,1 \leq s_c \leq 0,6$), com diferentes temperaturas de cura, o resultado pode ser o mais variado possível e, em vários casos sempre superior a $f_{cd} = 0,85 * f_{ck} / 1,4$.

Vale registrar que o modelo teórico que representa o decréscimo da resistência em função da carga mantida também sofreu alterações no **fib** Model Code 2020. Na versão anterior (**fib** Model Code 2010), adotava-se, em vez da Equação 1.4, a seguinte expressão:

$$\beta_{c,sus}(t, t_0) = 0,96 - 0,12 \{ \ln [72 (t - t_0)] \}^{1/4} \quad (\text{Equação 1.5})$$

Onde:

$\beta_{c,sus}(t, t_0)$: função que representa a diminuição da resistência ao longo do tempo em decorrência da carga mantida, adimensional. Válida para $(t - t_0) > 0,015$ dias ~ 20 minutos.

t_0 : idade de carregamento do concreto, em dias.

$(t - t_0)$: tempo de carga mantida, em dias.

A Figura 1.8 ilustra graficamente a diferença no desenvolvimento da curva quando do emprego do modelo atual (Equação 1.4) e o antigo (Equação 1.6) para um concreto com $s_c = 0,2$ (comum as duas versões da norma), $T_{(\Delta t)} = 20^\circ\text{C}$ e carga aplicada aos 28 dias ($t_0 = 28$ dias).

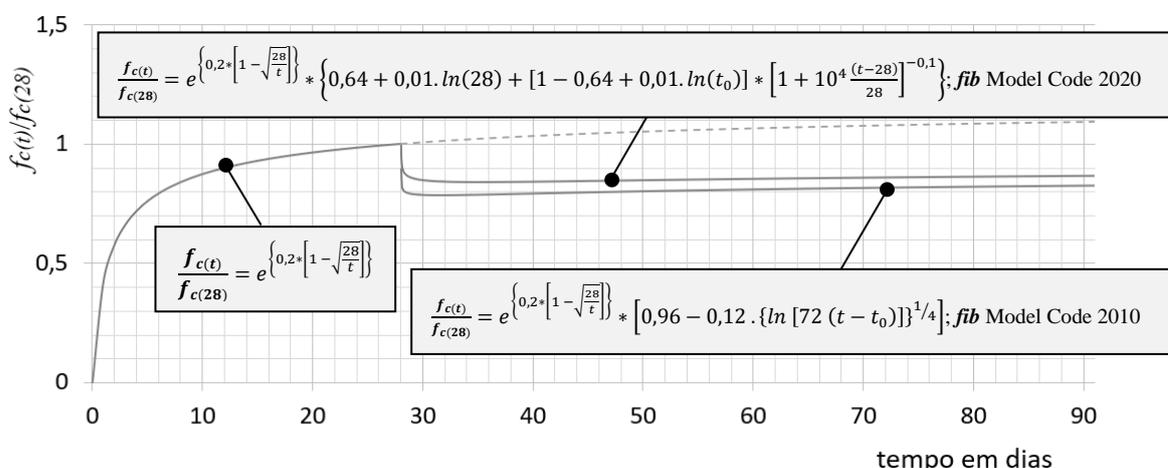


Figura 1.8. Análise comparativa do decréscimo da resistência em função de carga mantida entre os modelos: **fib** Model Code 2020 e 2010, considerando, $s_c = 0,2$; $t_{ref} = 28$ dias; $T_{(\Delta t)} = 20^\circ\text{C}$ e $t_0 = 28$ dias.

Mediante observação da figura anterior, nota-se que o modelo proposto pelo **fib** Model Code 2020 implica em uma menor redução da resistência do concreto em função da carga



mantida, sempre considerando os efeitos combinados de crescimento e redução da resistência, quando comparado ao modelo anterior.

Para uma carga aplicada aos 28 dias de idade em um concreto $s_c = 0,2$, enquanto o antigo modelo *fib* Model Code 2010 apontava uma redução da resistência de aproximadamente 20% quando da aplicação da carga, o atual modelo *fib* Model Code 2020 considera uma redução da ordem de 14%, vide Figura 1.8.

2. Linearização da expressão proposta pelo *fib* Model Code 2020 e Eurocode 2:2023

Para facilitar a determinação dos coeficientes de crescimento de resistência à compressão de um determinado traço de concreto, ou seja, encontrar o parâmetro s_c , tendo os resultados de resistência à compressão em diferentes idades, faz-se necessário que a expressão que se apresenta no formato exponencial (Equação 1.1), seja transformada no formato linear: $y = Ax + B$.

Logo, para obtenção da referida expressão linearizada foram efetuadas algumas operações matemáticas, tendo como premissa $T_{(\Delta t_i)} = 20 \text{ °C}$ e $t_{ref} = 28$ dias, conforme detalhado adiante:

$$\frac{f_{c(t)}}{f_{c(28)}} = e^{\left\{s_c \left[1 - \sqrt{\frac{28}{t}}\right] \left(\sqrt{\frac{28}{t}}\right)\right\}} \rightarrow \frac{f_{c(t)}}{f_{c(28)}} = e^{s_c \left[1 - \sqrt{\frac{28}{t}}\right]} \rightarrow \frac{f_{c(t)}}{f_{c(28)}} = e^{s_c \left[1 - \sqrt{\frac{28}{t}}\right]} \rightarrow \ln \frac{f_{c(t)}}{f_{c(28)}} = \ln e^{s_c \left[1 - \sqrt{\frac{28}{t}}\right]}$$

$$\ln \frac{f_{c(t)}}{f_{c(28)}} = \sqrt{28} * s_c \left(-\frac{1}{\sqrt{t}}\right) + s_c \quad (\text{Equação 2.1})$$

Nota-se, na expressão anterior, que ambos os coeficientes obtidos [angular ($A = \sqrt{28} * s_c$) e linear ($B = s_c$)] estão relacionados com o parâmetro de desenvolvimento da resistência à compressão do concreto (coeficiente s_c).

A Figura 2.1 apresenta graficamente a expressão linearizada, para os valores do coeficiente s_c recomendados pelo *fib* Model Code 2020 e Eurocode 2:2023: $s_c = 0,2$; $s_c = 0,3$; $s_c = 0,4$; $s_c = 0,5$ e $s_c = 0,6$ para idades de controle 7 e 28 dias.

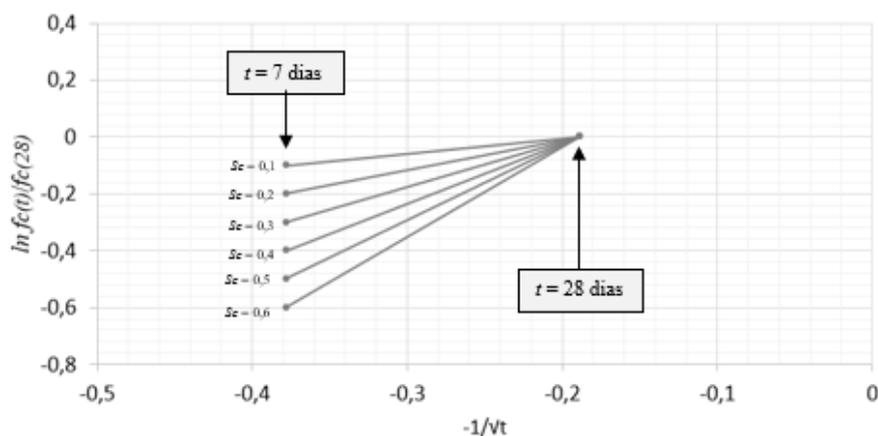


Figura 2.1. Representação linear das curvas de crescimento de resistência à compressão propostas pelo *fib* Model Code 2020 e Eurocode 2:2023, com $t_{ref} = 28$ dias, conforme Equação 1.5.



Na figura anterior, a idade de 28 dias está representada no eixo das abscissas pelo valor $-\frac{1}{\sqrt{28}} = -0,189$. A resistência à compressão aos 28 dias de idade está indicada no eixo das ordenadas e, em todos os casos, independentemente do coeficiente s_c considerado, sempre com valor igual a 0, pois $\ln \frac{f_c(t)}{f_c(28)} = \ln 1 = 0$.

Portanto, no caso da expressão linearizada, é possível observar que a inclinação das retas (coeficiente angular) varia de acordo com o parâmetro de crescimento de resistência (s_c) e que todas as retas possuem o par ordenado $(-0,189; 0)$ em comum, para qualquer valor do coeficiente s_c .

Por exemplo para o caso do concreto que possui $s_c = 0,6$ a expressão linearizada é dada por: $\ln \frac{f_c(t)}{f_c(28)} = \sqrt{28} * s_c \left(-\frac{1}{\sqrt{t}}\right) + s_c \rightarrow \ln \frac{f_c(t)}{f_c(28)} = \sqrt{28} * 0,6 \left(-\frac{1}{\sqrt{t}}\right) + 0,6 \rightarrow \ln \frac{f_c(t)}{f_c(28)} \sim -\frac{3,2}{\sqrt{t}} + 0,6$. Na tabela 2.1 estão apresentadas as 6 expressões linearizadas para os valores de s_c recomendados pelo **fib** Model Code 2020 e Eurocode 2:2023.

Tabela 2.1 – Valores de s_c teóricos de acordo com o **fib** Model Code 2020 e Eurocode 2:2023 e suas respectivas equações teóricas linearizadas.

Coefficiente de crescimento s_c^a	Equação teórica linearizada ^b	Coefficiente de crescimento s_c^a	Equação teórica linearizada ^b
0,1	$\ln \frac{f_c(t)}{f_c(28)} = \sqrt{28} * 0,1 \left(-\frac{1}{\sqrt{t}}\right) + 0,1$	0,4	$\ln \frac{f_c(t)}{f_c(28)} = \sqrt{28} * 0,4 \left(-\frac{1}{\sqrt{t}}\right) + 0,4$
0,2	$\ln \frac{f_c(t)}{f_c(28)} = \sqrt{28} * 0,2 \left(-\frac{1}{\sqrt{t}}\right) + 0,2$	0,5	$\ln \frac{f_c(t)}{f_c(28)} = \sqrt{28} * 0,5 \left(-\frac{1}{\sqrt{t}}\right) + 0,5$
0,3	$\ln \frac{f_c(t)}{f_c(28)} = \sqrt{28} * 0,3 \left(-\frac{1}{\sqrt{t}}\right) + 0,3$	0,6	$\ln \frac{f_c(t)}{f_c(28)} = \sqrt{28} * 0,6 \left(-\frac{1}{\sqrt{t}}\right) + 0,6$

Notas: (a) conforme valores teóricos recomendados pelo **fib** Model Code 2020 e Eurocode 2:2023.

(b) determinadas conforme metodologia apresentada neste subitem.

Adiante, apresenta-se um estudo de caso realizado em uma obra localizada na cidade de São Paulo, SP onde foram analisados centenas de resultados de resistência à compressão de concretos de 3 diferentes classes de resistência, todos produzidos com cimento tipo CP II E 40.

3. Exemplo prático de aplicação do modelo teórico

Com o intuito de se verificar a aderência do modelo teórico apresentado pelo Eurocode 2:2023 com o desenvolvimento da resistência à compressão real de alguns concretos utilizados em obras de construção civil foram analisados 3 famílias de traços distintos:

- Concreto classe de resistência C30, produzido com cimento tipo CP II E 40;
- Concreto classe de resistência C40, produzido com cimento tipo CP II E 40;
- Concreto classe de resistência C50, produzido com cimento tipo CP II E 40.

Registra-se que todos os concretos foram produzidos pela mesma central dosadora, durante o mesmo período, fornecidos para uma mesma obra e controlados pelo mesmo laboratório acreditado pela Rede Brasileira de Laboratórios de Ensaio - RBLE do INMETRO.



Isto posto, apresenta-se adiante a metodologia para a determinação do coeficiente s_c dos 3 tipos de concretos listados anteriormente. Os resultados analisados foram obtidos por meio de ensaios de ruptura de corpos de prova cilíndricos (100 x 200mm), realizados de acordo com a norma ABNT NBR 5739:2018 “Concreto: Ensaio de compressão de corpos de prova cilíndricos”.

Para cada amostra analisada foram obtidos apenas 2 resultados de resistência à compressão distintos, um para cada idade: 7 e 28 dias ($f_{c(7)}$ e $f_{c(28)}$). Na sequência, esses resultados foram divididos individualmente pela resistência aos 28 dias ($f_{c(28)}$). A esses valores foi aplicado o logaritmo natural, a fim de compatibilização com a expressão linearizada (Equação 2.1).

De posse do valor do logaritmo natural e da respectiva idade t foi possível determinar os 2 pares ordenados, dados por: $(-\frac{1}{\sqrt{t}}; \ln \frac{f_{cm}(t)}{f_{cm(28)}})$ aos 7 e 28 dias.

Os pares ordenados foram então lançados em um gráfico específico, obtido de acordo com a expressão linearizada do modelo proposto pelo Eurocode 2:2023. Em seguida, por regressão linear pelo método dos mínimos quadrados, foi obtida a reta média e sua respectiva equação linear, conforme apresentado no gráfico das Figuras 3.1, 3.2 e 3.3 para os concretos de classes de resistência C30, C40 e C50, respectivamente.

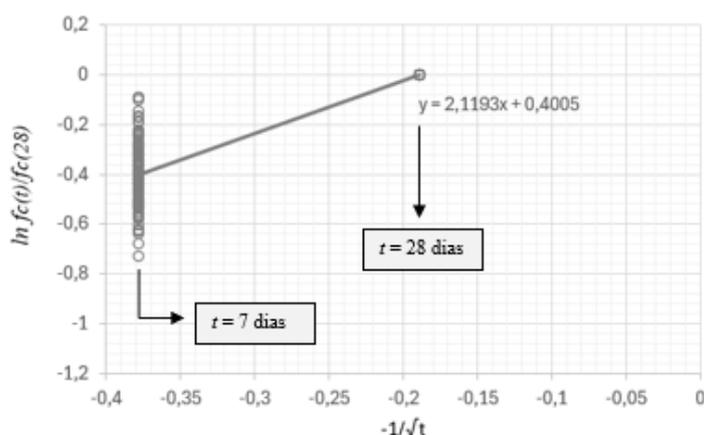


Figura 3.1. Representação linear do crescimento da resistência à compressão do concreto C30.

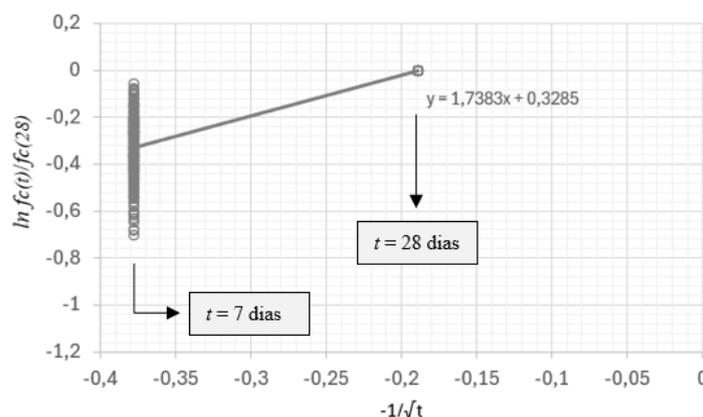


Figura 3.2. Representação linear do crescimento da resistência à compressão do concreto C40.

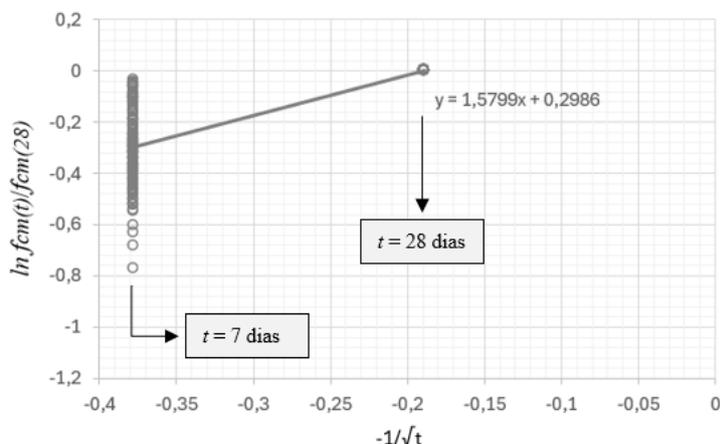


Figura 3.3. Representação linear do crescimento da resistência à compressão do concreto C50.

Sendo assim, de posse das equações linearizadas apresentadas nos gráficos anteriores, foi possível encontrar o coeficiente de crescimento s_c das 3 famílias distintas de concreto, conforme resumido na Tabela 3.1.

Tabela 3.1 – Valores de s_c obtidos das 3 famílias distintas de concreto estudadas, C30, C40 e C50.

Classe de resistência do concreto	Tipo de cimento	Equação teórica linearizada	Equação linearizada obtida por regressão linear	s_c obtido
C30	CP II E 40	$\ln \frac{f_c(t)}{f_{c(28)}} = \sqrt{28} * s_c \left(-\frac{1}{\sqrt{t}}\right) + s_c$	$\ln \frac{f_c(t)}{f_{c(28)}} = 2,12 \left(-\frac{1}{\sqrt{t}}\right) + 0,40$	0,40
C40	CP II E 40	$\ln \frac{f_c(t)}{f_{c(28)}} = \sqrt{28} * s_c \left(-\frac{1}{\sqrt{t}}\right) + s_c$	$\ln \frac{f_c(t)}{f_{c(28)}} = 1,74 \left(-\frac{1}{\sqrt{t}}\right) + 0,33$	0,33
C50	CP II E 40	$\ln \frac{f_c(t)}{f_{c(28)}} = \sqrt{28} * s_c \left(-\frac{1}{\sqrt{t}}\right) + s_c$	$\ln \frac{f_c(t)}{f_{c(28)}} = 1,58 \left(-\frac{1}{\sqrt{t}}\right) + 0,30$	0,30

Na Figura 3.4 está apresentado graficamente o desenvolvimento da resistência à compressão conforme s_c obtidos por meio da linearização (vide Tabela 3.1), para os concretos classe de resistência C30, C40 e C50 ($s_c = 0,40$, $s_c = 0,33$ e $s_c = 0,30$, respectivamente) até a idade de até 50 anos.

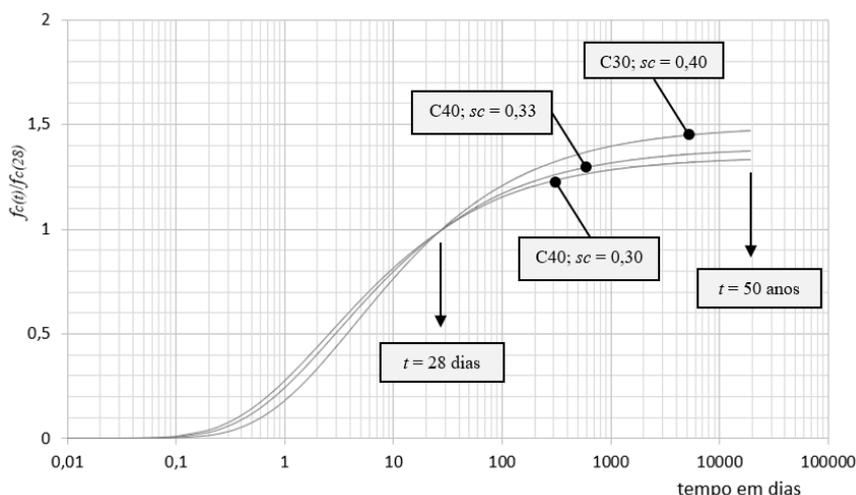


Figura 3.4. Desenvolvimento da resistência à compressão dos concretos classes de resistência C30, C40 e C50, conforme apresentado na Tabela 3.1.



4. Considerações finais

Os coeficientes s_c obtidos neste estudo e apresentados na Tabela 3.1 podem ser comparados com os preconizados pelas normas Eurocode 2:2023 e ABNT NBR 6118:2023. A Tabela 3.2 apresenta o resumo desta análise comparativa.

Tabela 3.2 – Análise comparativa dos valores de s_c obtidos das 3 famílias distintas de concreto estudadas: C30, C40 e C50.

Classe de resistência do concreto	Tipo de cimento	s_c obtido por meio da equação linearizada ^a	s_c teórico	
			Eurocode 2:2023 ^b	ABNT NBR 6118:2023 ^c
C30	CP II E 40	0,40	0,5	0,25
C40	CP II E 40	0,33	0,4	0,25
C50	CP II E 40	0,30	0,4	0,25

Notas:

(a): conforme valores obtidos e apresentados na Tabela 3.1.

(b): Para determinação do s_c teórico devem ser consideradas as classes CR, CN e CS que são determinadas em função do tipo de cimento e da classe de resistência do concreto. Por sua vez, para determinação das classes CR, CN e CS, deve-se consultar Tabela 14.6-8 “Strength development classes of concrete” do *fib Model Code 2020*, bem como as normas EN 197-1 “Cement – Part 1: Composition, specifications and conformity criteria for common cements” e EN 206 “Concrete – Specification, performance and conformity”. Simplificadamente, pode-se associar à condição brasileira: CR (concreto com cimento CP V); CN (concreto com cimento CP II) e CS (concreto com cimento CP III ou CP IV).

(c): Para determinação do s_c teórico consultar item 12 “Resistências” da ABNT NBR 6118:2023.

Nota-se que os coeficientes s_c obtidos variaram de acordo com a classe de resistência do concreto. Considerando que os concretos estudados foram todos produzidos com o mesmo tipo de cimento (CP II E 40), quanto maior é a classe de resistência, menor é o parâmetro s_c , indicando que, nestes casos, a resistência cresce mais rapidamente nas primeiras idades.

Para melhor visualização e análise comparativa, os valores apresentados na tabela anterior estão plotados nas Figuras 4.1, 4.2 e 4.3 para a idade de até 28 dias ($t_{ref} = 28$ dias), conforme validade do modelo proposto nos subitens 8.2.4 “Resistência à compressão” e 12.3.3 “Resistência de cálculo do concreto” da ABNT NBR 6118:2023 e B4 “Development of concrete strength and stiffness with time” do Eurocode 2:2023.

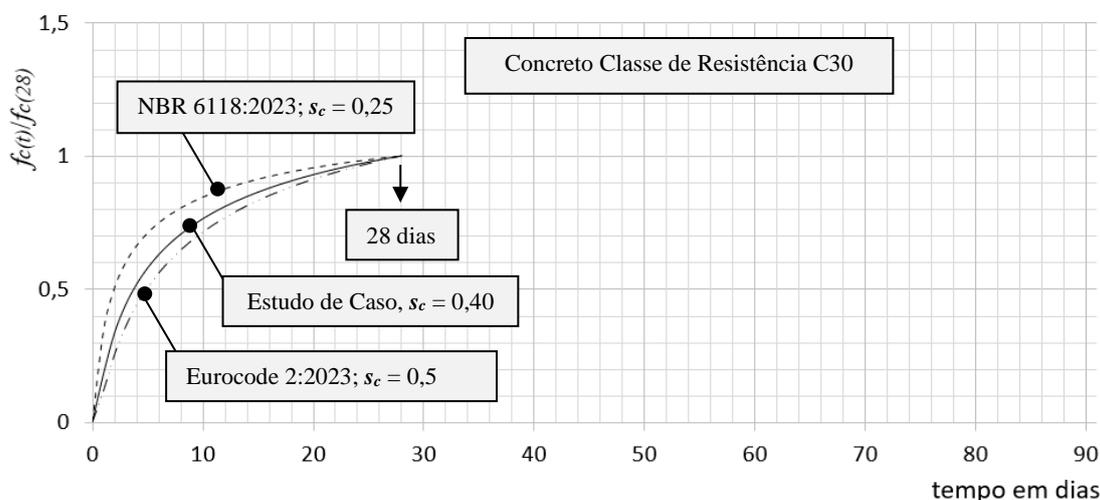


Figura 4.1. Representação gráfica do desenvolvimento da resistência do concreto classe C30 estudado em comparação com as curvas propostas pelo Eurocode 2:2023 e ABNT NBR 6118:2023 para este concreto.

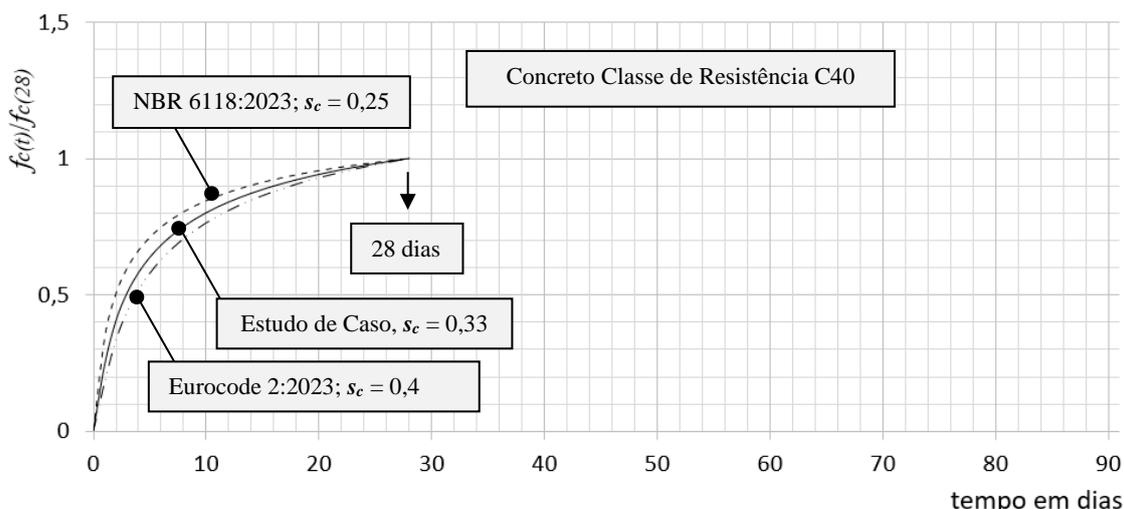


Figura 4.2. Representação gráfica do desenvolvimento da resistência do concreto classe C40 estudado em comparação com as curvas propostas pelo Eurocode 2:2023 e ABNT NBR 6118:2023 para este concreto.

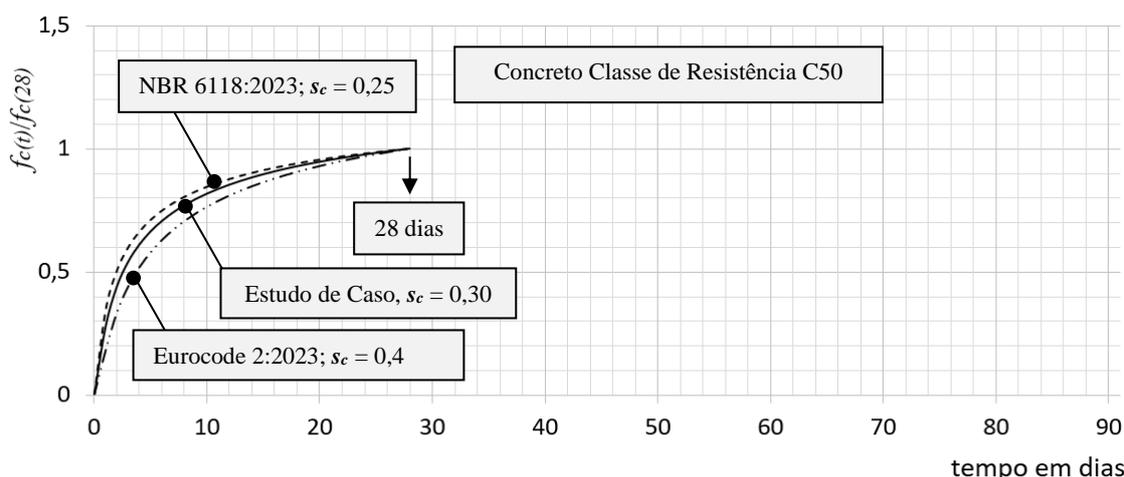


Figura 4.3. Representação gráfica do desenvolvimento da resistência do concreto classe C50 estudado em comparação com as curvas propostas pelo Eurocode 2:2023 e ABNT NBR 6118:2023 para este concreto.

Nota-se que para as 3 diferentes classes de resistência (C30, C40 e C50) as curvas obtidas no estudo de caso se desenvolveram entre os limites estabelecidos pela ABNT NBR 6118:2023 e Eurocode 2:2023.

Observou-se que o coeficiente s_c de crescimento da resistência à compressão do concreto, além de variar com o tipo de cimento utilizado, também varia de acordo com a classe de resistência do concreto e, conseqüentemente, com a relação água/cimento (a/c) do traço. A atual norma brasileira ABNT NBR 6118:2023, ao tratar do assunto, considera de maneira incipiente a influência destas variáveis.

Sendo assim, com a ressalva de que este artigo é parte de um trabalho mais amplo e abrangente, os autores sugerem flexibilizar as limitações impostas pela expressão atualmente adotada pela ABNT NBR 6118:2023 com o objetivo de alcançar maior abrangência, mais liberdade aos projetistas para que possam, com responsabilidade e conhecimento, tornar as estruturas nacionais de concreto mais econômicas, mais sustentáveis e seguras.



6. Referências

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 6118**: Projeto de Estruturas de Concreto. Rio de Janeiro 2023. 242 p.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 5739**: Concreto – Ensaio de compressão de corpos de prova cilíndricos. Rio de Janeiro 2018. 9 p.

EUROPEAN STANDARDS. **EN 1992-1-1**: Eurocode 2. Design of concrete structures. General rules and rules for buildings, bridges and civil engineering structures. Pilsen 2023. 408 p.

CEB-FIP. **fib** Model Code for Concrete Structures 2010. Lausanne 2013. 402 p.

CEB-FIP. **fib** Model Code for Concrete Structures 2020. Lausanne 2023. 780 p.