

Pilares curtos de concreto armado dimensionados de acordo com as normas **ABNT NBR 6118:2014**, **ABNT NBR 6118:2023**, *fib Model Code 2020* e **EN 1992-1-1:2023**: Estudo da sustentabilidade

RICARDO BONI - <https://orcid.org/0009-0008-3175-0660>; RAFAEL SILVA | PhD ENGENHARIA
PAULO HELENE - <https://orcid.org/0000-0001-6442-7693> | PhD ENGENHARIA

RESUMO

ESTE TRABALHO VISA APRESENTAR UM ESTUDO DE SUSTENTABILIDADE, FOCADO NO DIMENSIONAMENTO DE PILARES CURTOS DE CONCRETO ARMADO RESPEITANDO AS PREMISSAS DE QUATRO NORMAS TÉCNICAS CONSAGRADAS: NBR 6118 (ABNT, 2014); NBR 6118 (ABNT, 2023); *fib Model Code for Concrete Structures 2020* (fib, 2023) e o EN 1992-1-1:2023 (CEN, 2023). PARA O DIMENSIONAMENTO DESSE TRAMO DE PILAR, FORAM CONSIDERADOS NESTE ESTUDO DUAS TAXAS DE ARMADURA: UMA MÍNIMA (< 0,4%) E UMA MÁXIMA PARA EMENDAS POR TRASPASSE (< 4,0%); DUAS DIFERENTES CLASSES DE RESISTÊNCIA DO CONCRETO, C20 E C50; COM f_{ck} REFERIDO A TRÊS DIFERENTES IDADES DE 28, 56 E 91 DIAS. TAL CENÁRIO FORNECEU 16 DIFERENTES POSSIBILIDADES DE DETALHAMENTO DESSE TRAMO DE PILAR. CONSIDEROU-SE AINDA CONCRETOS AMASSADOS COM DUAS DIFERENTES CLASSES DE CIMENTOS: CR (CP V) COM ALTO TEOR DE CLÍNQUER (> 90%) E CS (CP III) COM CERCA DE 30% DE CLÍNQUER. A ANÁLISE COMPARATIVA ABORDOU O TEMA DA SUSTENTABILIDADE CONSIDERANDO APENAS EMISSÕES DE $C_{O_{2eq}}$ E A DESMATERIALIZAÇÃO. NAS CONDIÇÕES DESTE ESTUDO CONCLUI-SE QUE, UTILIZANDO CRITÉRIOS DO EN 1992-1-1, CONCRETOS PRODUZIDOS COM CIMENTOS DE CLASSE CS (CP III) E IDADES DE

CONTROLE DO f_{ck} DE 56 DIAS SEMPRE CONDUZEM À MAIOR DESMATERIALIZAÇÃO E MENORES EMISSÕES DE GASES TIPO ESTUFA. ESTE ESTUDO TAMBÉM DEMONSTRA QUE AS DECISÕES DE PROJETO, COMBINADAS COM UMA INTELIGENTE TECNOLOGIA DE CONCRETO, PODEM INFLUENCIAR SIGNIFICATIVAMENTE A SUSTENTABILIDADE DA ESTRUTURA ACABADA.

PALAVRAS-CHAVE: DIMENSIONAMENTO DE PILARES, DESMATERIALIZAÇÃO, SUSTENTABILIDADE, GASES TIPO ESTUFA, EMISSÃO DE CO_{2eq} .

1. CONSIDERAÇÕES PRELIMINARES

Este artigo apresenta o estudo de pilar curto de concreto armado, maciço, de seção quadrada, cujos parâmetros de projeto foram baseados em dados de um caso real de um edifício residencial¹, com 2 subsolos, térreo, 24 pavimentos tipo, casa de máquinas, reservatório superior e cobertura. Considera-se, apenas, o tramo de pilar entre o 1º pavimento e 2º pavimento, com pé direito de 2,88 m, sendo a estrutura sujeita à classe de agressividade ambiental variando de CAA I para concreto C20 e CAA II para pilar com concreto C50, segundo NBR 12655 (ABNT, 2022²). O número total de tramos de pilar nesse

edifício é de 1008 e a área do pavimento tipo é de 365 m².

A força normal total característica (N_{sk}) considerada para o dimensionamento deste tramo de pilar empregado como exemplo representativo foi de 4000 kN e os momentos totais característicos a que estará submetido foi de $M_{xSk} = M_{ySk} = 120$ kN.m. Considerou-se que as ações acidentais correspondem a 25% da força normal característica total.

2. MODELOS DE CÁLCULO DA RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO

O modelo de cálculo da resistência à compressão prescrito para fins de projeto e dimensionamento de uma obra nova, a partir de um certo valor arbitrado de resistência característica do concreto à compressão, f_{ck} , segundo a nova versão do *fib Model Code for Concrete Structures 2020* (fib, 2023), é apresentado na Equação 1:

$$[1] \quad f_{cd} = \alpha_{cc} \times \eta_{fc} \times \frac{f_{ck}}{\gamma_c}$$

Onde:

f_{cd} → resistência à compressão de

¹ Edifício do acervo da PhD Engenharia para o qual os autores realizaram a Avaliação Técnica de Projeto (ATP).

² Associação Brasileira de Normas Técnicas. ABNT NBR 12655: 2022. Concreto de cimento Portland. Preparo, controle, recebimento e aceitação- Procedimento. Rio de Janeiro, 2022. 6 p.

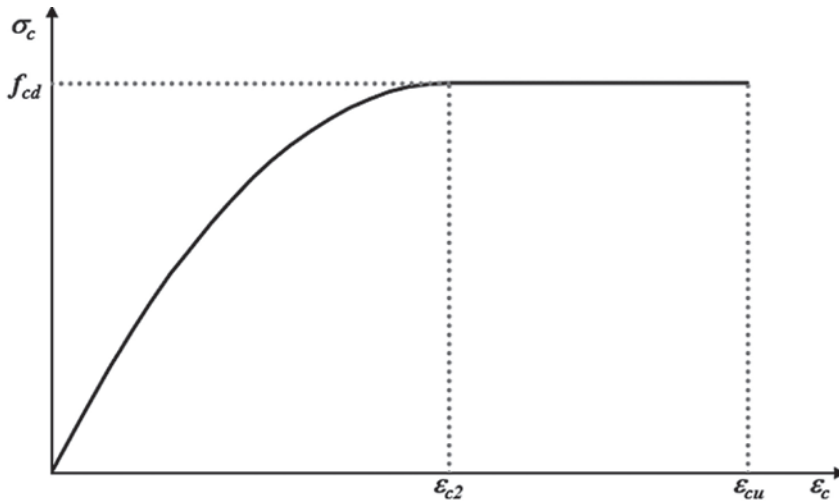


FIGURA 2.1

DIAGRAMA TENSÃO-DEFORMAÇÃO DO CONCRETO.

ADAPTADO A PARTIR DAS EQUAÇÕES APRESENTADAS NOS TEXTOS DAS NORMAS CITADAS

projeto do concreto, nas idades de 28 dias a 91 dias;

f_{ck} → resistência à compressão característica do concreto, nas idades de 28 dias a 91 dias;

γ_c → fator de minoração da resistência do concreto;

α_{cc} → coeficiente que leva em consideração os efeitos contrários, por um lado, de aumento da resistência pela hidratação do cimento, por outro, a redução dessa resistência ocasionada por carga elevada³ de longa duração⁴;

η_{fc} → fator de redução da resistência⁵ que leva em consideração o aumento da fragilidade com o aumento da resistência do concreto, calculado como o apresentado na Equação 2:

$$[2] \quad \eta_{fc} = \left(\frac{40}{f_{ck}}\right)^{1/3} \leq 1,0 \quad (f_{ck} \text{ em MPa})$$

Segundo o *fib* MC (2020), em situações normais de projeto, pode-se assumir que o aumento de resistência após os 28 dias compensa os efeitos de carga de longa duração, de tal forma que para

obras novas, carregadas aos 28 dias ou mais, e com f_{ck} referido a 28 dias, esse coeficiente pode ser assumido como $\alpha_{cc} = 1,0$. Neste estudo $\eta_{fc} = 1,0$ para $f_{ck} = 20$ MPa e $\eta_{fc} = 0,93$ para $f_{ck} = 50$ MPa.

Para estruturas carregadas a idades superiores a 90 dias e nas quais a data de referência e controle do f_{ck} seja superior a 28 dias, porém igual ou inferior a 56 dias, segundo o EN 1992-1-1: Eurocode 2: Design of concrete structures

(CEN, 2023), é correto continuar considerando $\alpha_{cc} = 1,0$, sempre que a classe de cimento seja CS (CP III).

Para idades do f_{ck} superiores a 28 dias no caso do *fib* MC (2020), e para idades superiores a 56 dias no caso do EN 1992-1-1, até 91 dias, é recomendado considerar $\alpha_{cc} = 0,85$. No caso da norma NBR 6118 Projeto de estruturas de concreto (ABNT, 2023), esse coeficiente é mais conservador e fixo em 0,85.

O novo texto da NBR 6118 (ABNT, 2023) introduz o coeficiente de fragilidade η_{fc} de maneira igual ao modelo do *fib* MC (2020). Ambas as versões da norma brasileira estudadas neste artigo prescrevem f_{ck} referido apenas aos 28 dias de idade.

Uma vez definida a resistência à compressão de projeto do concreto (f_{cd}), a tensão no concreto (σ_c) é obtida conforme diagrama tensão-deformação apresentado no MC 2020, NBR 6118 (ABNT, versões 2014 e 2023) e EN 1992-1-1 (CEN, 2023), representado na Figura 2.1.

$$[3] \quad \sigma_{cd} = f_{cd} \times \left[1 - \left(1 - \frac{\epsilon_c}{\epsilon_{c2}} \right)^n \right]$$

Para concretos com resistência característica até 50 MPa segundo a NBR 6118 (ABNT, 2023), e para concretos de 12 MPa a 100 MPa, o *fib* MC (2020)

TABELA 2.1

COEFICIENTES DE SEGURANÇA PARCIAIS SEGUNDO *FIB* MC (2020); NBR 6118 (ABNT, 2014); NBR 8681 (ABNT, 2003); NBR 6118 (ABNT, 2023), EN 1992-1-1 (CEN, 2023) E EN 1990 (CEN, 2002)

NBR 6118 (ABNT, 2014) e NBR 6118 (ABNT, 2023)		<i>fib</i> MC (2020); EN 1992-1-1 (CEN, 2023) e EN 1990 (CEN, 2002)	
Materiais (γ_m)	Ações (γ_f)	Materiais (γ_m) ⁽¹⁾	Ações (γ_f) ⁽¹⁾
γ_c (concreto) = 1,4	γ_g (ações permanentes) = 1,4	γ_c (concreto) = 1,4 a 1,6	γ_g (ações permanentes) = 1,3 a 1,4
γ_s (aço) = 1,15	γ_q (ações variáveis) = 1,4	γ_s (aço) = 1,1 a 1,175	γ_q (ações variáveis) = 1,3 a 1,7

⁽¹⁾ NESTE ESTUDO FOI ADOTADO: $\gamma_c = 1,5$; $\gamma_s = 1,15$; $\gamma_q = 1,35$ e $\gamma_o = 1,5$, QUE SE ENQUADRA NA CLASSE DE CONSEQUÊNCIA CC2 DO *fib* MC (2020)

³ Não há uma definição clara do significado de cargas elevadas e de longa duração. Neste estudo os autores consideram cargas elevadas as forças normais $> 0,6 \cdot f_{cd}$ mantidas por mais de 15 minutos.

⁴ No EUROCODE 2, ou seja, na norma EN 1992-1-1 (CEN, 2023) este coeficiente é designado por k_{tc} , conforme apresentado no subitem 5.1.6 “Design assumptions” da referida norma.

⁵ No EUROCODE 2, ou seja, na norma EN 1992-1-1 (CEN, 2023) este coeficiente é designado por η_{cc} , conforme apresentado no subitem 5.1.6 “Design assumptions” da referida norma.

TABELA 2.2

PROPORÇÃO DOS MATERIAIS UTILIZADOS NOS CONCRETOS EM VOLUME

Normas	Classe de resistência	η_{fc}	α_{cc}	γ_c	γ_s	γ_f Ação permanente	γ_f Ação variável	f_{cd}/f_{ck} (%)
NBR 6118 (ABNT, 2023) 28 diaS	C20	1,00	0,85	1,4	1,15	1,40	1,40	61%
	C50	0,93	0,85	1,4	1,15	1,40	1,40	56%
fib MC (2020) 28d EN 1992-1-1 (CEN, 2023) 28d a 56d	C20	1,00	1,00	1,5	1,15	1,35	1,50	67%
	C50	0,93	1,00	1,5	1,15	1,35	1,50	62%
fib MC (2020) > 28d EN 1992-1-1 (CEN, 2023) 57d a 91d	C20	1,00	0,85	1,5	1,15	1,35	1,50	57%
	C50	0,93	0,85	1,5	1,15	1,35	1,50	53%
NBR 6118 (ABNT, 2014) 28 dias	C20	1,00	0,85	1,4	1,15	1,40	1,40	61%
	C50	1,00	0,85	1,4	1,15	1,40	1,40	61%

e o EN 1992-1-1 (CEN, 2023) prescrevem:

- ▶ $\epsilon_{c2} = 0,20\%$;
- ▶ $\epsilon_{cu} = 0,35\%$;
- ▶ $n = 2$.

Para concretos com resistência característica entre 55 MPa e 90 MPa, não analisados neste estudo, e somente segundo a NBR 6118 (ABNT, 2023) e sua versão anterior NBR 6118 (ABNT, 2014):

- ▶ $\epsilon_{c2} = 0,20\% + 0,0085\% (f_{ck} - 50)^{0,53}$;
- ▶ $\epsilon_{cu} = 0,26\% + 3,5\% [(90 - f_{ck})/100]^4$;
- ▶ $n = 1,4 + 23,4 [(90 - f_{ck})/100]^4$.

Estas limitações nas deformações específicas refletem a maior fragilidade dos concretos com resistência característica à compressão superiores a 50 MPa. Este conceito, somado ao coefi-

ciente de fragilidade η_{fc} , gera uma sobreposição de efeitos no caso da NBR 6118 (ABNT, 2023).

Os fatores de segurança parciais, também conhecidos como coeficientes de ponderação, têm o objetivo de introduzir a segurança no dimensionamento de estruturas de concreto armado, por um lado majorando os esforços solicitantes e por outro minorando as resistências características dos materiais a serem utilizados.

A definição dos valores destes fatores de segurança parciais é dada principalmente pelo estudo probabilístico das condições e risco da estrutura, suas utilizações, simplificações e incertezas do

modelo de cálculo e das variações destes parâmetros.

A Tabela 2.1 expressa os diferentes valores de fatores de segurança parciais recomendados pelas normas em estudo.

Na Tabela 2.2 apresentam-se as combinações consideradas neste estudo para dimensionamento de pilares curtos com 2 classes de resistência característica do concreto à compressão (C20 e C50).

Foram seguidos os critérios clássicos de dimensionamento e detalhamento de pilar, respeitadas as diferenças no cálculo das deformações específicas conforme cada norma. Adotou-se cobertura nominal de $c = 30$ mm para concreto C20 e de $c = 25$ mm para o concreto C50.

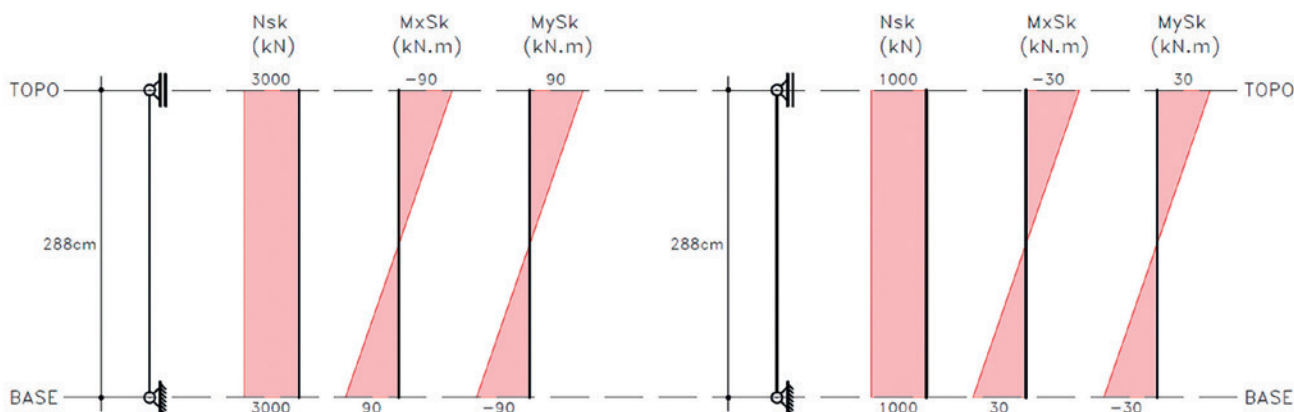


FIGURA 2.2

CARREGAMENTO NOMINAL CARACTERÍSTICO DO PILAR: CARREGAMENTO PERMANENTE (À ESQUERDA) E CARREGAMENTO VARIÁVEL (À DIREITA)

TABELA 2.3

RESUMO DAS ALTERNATIVAS DE DETALHAMENTO DESSE TRAMO DE PILAR

Normas	Classe de resistência	Dimensões (cm)	Armadura (cm ²)	Taxa de armadura	Índice de esbeltez λ	Volume de concreto (m ³)	Consumo de aço (kg)
NBR 6118 (ABNT, 2023) 28 dias	C20	69 x 69	19,63	0,41%	14	1,37	82
		49 x 49	96,51	4,02%	20	0,69	235
	C50	48 x 48	19,63	0,85%	21	0,66	65
fib MC (2020) 28 dias	C20	41 x 41	64,34	3,83%	24	0,48	160
		66 x 66	19,63	0,45%	15	1,25	80
	C50	48 x 48	91,07	3,95%	21	0,66	235
EN 1992-1-1 (CEN, 2023) até 56 dias	C20	45 x 45	19,63	0,97%	22	0,58	55
		40 x 40	57,30	3,58%	25	0,46	144
	C50	71 x 71	19,63	0,39%	14	1,45	82
fib MC (2020) 29 dias a 91 dias	C20	50 x 50	96,51	3,86%	20	0,72	236
		49 x 49	19,63	0,82%	20	0,69	66
	C50	42 x 42	64,34	3,65%	24	0,51	170
EN 1992-1-1 (CEN, 2023) 57 dias a 91 dias	C20	69 x 69	19,63	0,41%	14	1,37	82
		49 x 49	96,51	4,02%	20	0,69	235
	C50	46 x 46	19,63	0,93%	22	0,61	55
NBR 6118 (ABNT, 2014) 28 dias	C20	40 x 40	64,34	4,02%	25	0,46	160

Todas as alternativas de dimensionamento desse tramo de pilar consideraram pilar prismático, de seção quadrada e curtos ($\lambda \leq 35$) com comprimento $l_e = 2,88$ m, onde de cada classe de resistência foram extraídos 2 (dois) detalhamentos de pilar: uma alternativa com armadura mínima próximo do limite de solicitação ($\geq 0,4\%$) e outra com detalhamento próximo a taxa de aço máxima permitida em um lance com emenda por traspasse (cerca de 4% de A_s/A_c).

Para o carregamento nominal foi definido carregamento característico tal como o apresentado na Figura 2.2, à esquerda os esforços solicitantes característicos devido a ações permanentes definidos em força normal solicitante característica (N_{sk}) e momentos solicitantes característicos nos eixos principais do pilar M_{xsk} e M_{ysk} , e à direita também esforços solicitantes característicos, porém devido a ações variáveis.

Na Tabela 2.3 apresentam-se as dimensões, as taxas de armadura e os índices de esbeltez, detalhados para cada alternativa possível de dimensionamento desse tramo de pilar.

O dimensionamento de armadura mínima de pilares exige que a área

de aço seja pelo menos 15% da relação N_g/f_{yd} , o que conduz que a armadura de pilares para a classe de resistência C50 tenha taxa mínima em torno de 0,90% ao invés dos 0,40% do C20.

Observa-se que, para o caso em estudo, dimensionar atendendo às prescrições do fib MC (2020) com f_{ck} a 28 dias e do EN 1992-1-1 (CEN, 2023) com f_{ck} a 28 dias ou a 56 dias conduz a pilares mais econômicos qualquer que seja a classe de resistência considerada. As prescrições das normas brasileiras NBR 6118 (ABNT, 2014) e NBR 6118 (ABNT, 2023) conduzem a pilares mais volumosos, ou seja, são normas mais conservadoras, o que é incoerente com

um país com índices socioeconômicos inferiores a países europeus.

Tendo como objetivo a sustentabilidade que visa produzir mais com menos, ou seja, é preciso desmaterializar, fica evidente, neste caso em estudo, que o ideal é utilizar concretos de alta resistência, pois independente da norma avaliada ao utilizar um concreto C50 em substituição a um concreto C20, se obteve dimensionamentos com menor volume de concreto e menor consumo de aço, como pode ser observado nas colunas que descrevem o consumo de aço e concreto da Tabela 2.3.

Resta ainda considerar a influência da data de controle ou de referência do

TABELA 3.1

VALORES DE s_c SEGUNDO fib MC (2020) E EN 1992-1-1 (CEN, 2023)

Resistência do concreto (MPa)	s_c		
	Classe CR	Classe CN	Classe CS
$f_{ck} \leq 35$	0,3	0,5	0,6
$35 < f_{ck} < 60$	0,2	0,4	0,5
$f_{ck} \geq 60$	0,1	0,3	0,4

NOTA: AS CLASSES CR, CN E CS SÃO DETERMINADAS EM FUNÇÃO DO TIPO E DA CLASSE DE RESISTÊNCIA DO CIMENTO. PARA DETERMINAÇÃO DAS CLASSES CR, CN E CS CONSULTAR TABELA 14.6-8 "STRENGTH DEVELOPMENT CLASSES OF CONCRETE" DO MC 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)

f_{ck} . Os traços de mesmos materiais, se referidos a 56 dias ou a 91 dias, para um mesmo valor de f_{ck} , conduzirão a traços de concreto com menor consumo de cimento por m^3 , o que pode trazer ainda maiores benefícios à sustentabilidade, conforme demonstrado na sequência deste trabalho.

3. CONSUMO DE MATERIAIS EM FUNÇÃO DA DATA DE REFERÊNCIA DO f_{ck}

O *fib* MC (2020) e o EN 1992-1-1 (CEN, 2023) recomendam a utilização de uma expressão em formato exponencial para representar o crescimento da resistência à compressão do concreto em função do tempo, tal como o apresentado na Equação 4:

$$[4] \frac{f_{c(t)}}{f_{c(t_{ref})}} = e^{\left\{ s_c \cdot \left[1 - \sqrt{\frac{t_{ref}}{t}} \right] + \left(\sqrt{\frac{28}{t_{ref}}} \right) \right\}}$$

Onde:

s_c : coeficiente adimensional que varia de 0,1 a 0,6, conforme apresentado na Tabela 3.1.

$f_{c(t)}$: resistência à compressão na idade t , dada em MPa;

t : idade do concreto em dias;

t_{ref} : idade de controle e referência do f_{ck} em dias, variando de 28 a 91 dias;

$f_{c(t_{ref})}$: resistência média à compressão na idade t_{ref} , dada em MPa.

Como premissa deste estudo, considerou-se que o concreto sempre estará a uma temperatura de $T(\Delta t_i) = 20^\circ C$. Ainda, por simplificação neste estudo considera-se concretos produzidos com cimentos CR (CP V) e CS (CP III) conforme o apresentado na Tabela 3.1. Adotou-se, também, como referência para a resistência do concreto [$f_{c(ref)}$], para efeito de análise comparativa, as resistências de $f_{c(28)}$, $f_{c(56)}$ e $f_{c(91)}$.

Os valores de f_{ck} adotados neste estudo foram de 20 MPa e 50 MPa. Os valores para fins de dosagem dos concretos, f_{cm} , devem ser 26,6 MPa e 56,6 MPa, respectivamente, considerando condição “A” de preparo do concreto, que prescreve desvio padrão constante e igual a 4 MPa, tal como apresenta a NBR 12655 (ABNT, 2022).

Sendo assim, foi possível determinar a resistência à compressão requerida aos 28 dias de idade para as diferentes classes de resistência estudadas (C20 e C50), para as diferentes idades de controle do f_{ck} (28, 56 e 91 dias) e para os dois tipos de

cimento considerados CR (CP V) e CS (CP III), conforme detalhado na Tabela 3.2.

Para estimativa do índice de desempenho, dado em kg de cimento por MPa, foi adotada a premissa de um desempenho médio de referência de 9/10 kg de cimento/MPa para f_{cm} de 20 a 30 MPa e 7/7,5 kg de cimento/MPa para f_{cm} de 40 a 60 MPa, para os cimentos CR (CP V) e CS (CP III), respectivamente, tendo como base a experiência dos autores e traços comumente utilizados em centrais de concreto.

Sendo assim, considerando o volume de concreto utilizado em cada uma das alternativas estudadas para esse tramo de pilar, dimensionadas de acordo com critérios das diferentes normas e o índice de desempenho adotado, apresenta-se na Tabela 3.3 um resumo dos consumos de cimentos obtidos, detalhando o consumo de cimento por m^3 de concreto por cada uma das alternativas de dimensionamento do tramo de pilar em estudo.

4. EMISSÕES E INTENSIDADE DE CO_{2EQ} (IC)

Este item tem como objetivo apresentar uma análise comparativa das emissões de CO_{2eq} para as diferentes alternativas de dimensionamento consideradas neste estudo. Assim sendo, para cada uma das alternativas estudadas, foi calculada a emissão de CO_{2eq} correspondente e os indicadores de eco-eficiência em kg CO_2 /MPa associados, estes últimos chamados de intensidade de CO_{2eq} (IC).

Na Tabela 4.1 estão apresentados os valores de CO_{2eq} por tonelada de material produzido no Brasil, para o caso do aço e dos cimentos e por m^2 de fôrma, considerando que esta última foi produzida em madeira compensada com 18 mm de espessura, estruturada com madeira bruta serrada (plantada) nas dimensões de 75 mm x 75 mm (pontaltes) a cada 35 cm.

Com base nos dados apresentados na Tabela 4.1 e nas quantidades de materiais (aço, cimento e fôrmas), foi possível calcular a quantidade de CO_{2eq} liberada para cada uma das alternativas de dimensionamento do tramo de pilar em estudo, bem

TABELA 3.2

VALORES DE RESISTÊNCIA MÉDIA À COMPRESSÃO AOS 28 DIAS [$f_{cm(28)}$], CALCULADOS CONFORME EQUAÇÃO 4, PARA AS CLASSES DE RESISTÊNCIA (C20 E C50), DE ACORDO COM A IDADE DE CONTROLE (28, 56 E 91 DIAS), PARA CONCRETOS PRODUZIDOS COM CIMENTO TIPO CR (CP V) E CS (CP III)

$t_{(ref)}$ (dias)	Classe de resistência	$f_{cm(t_{ref})}$ (MPa)	Tipo de cimento	s_c ⁽¹⁾	$f_{cm(28)}$ ⁽²⁾ (MPa)
28	C20	26,6	CP III	0,6	26,6
			CP V	0,3	26,6
	C50	56,6	CP III	0,5	56,6
			CP V	0,2	56,6
56	C20	26,6	CP III	0,6	22,3
			CP V	0,3	24,4
	C50	56,6	CP III	0,5	48,9
			CP V	0,2	53,4
91	C20	26,6	CP III	0,6	20,4
			CP V	0,3	23,3
	C50	56,6	CP III	0,5	45,3
			CP V	0,2	51,8

Notas:

⁽¹⁾ VALOR DE s_c OBTIDO NA TABELA 3.1.

⁽²⁾ RESISTÊNCIA MÉDIA AOS 28 DIAS DE IDADE OBTIDA UTILIZANDO FORMULAÇÃO DO MC 2020 E EN 1992-1-1 (EQUAÇÃO 4), MEDIANTE VARIACÃO DO

$t_{(ref)}$: 28, 56 E 91 DIAS.

TABELA 3.3

CONSUMO DE MATERIAIS E ECONOMIA DE CIMENTO EM RELAÇÃO AOS TRAÇOS CONTROLADOS AOS 28 DIAS DE IDADE, PARA AS DIFERENTES ALTERNATIVAS DE DIMENSIONAMENTO

Normas	Classe de resistência do concreto (idade de controle)	Volume de concreto (m ³) ⁽¹⁾	Tipo de cimento	Consumo de cimento por m ³ de concreto (kg/m ³)			Massa de cimento para execução do pilar em kg		
				Traço 28 dias kg/m ³	Traço na idade de referência (28, 56 ou 91 dias) kg/m ³	Economia, em kg de cimento em relação ao traço de 28 dias ⁽²⁾	Massa 28 dias kg	Massa na idade de referência (28, 56 e 91 dias) kg	Economia de cimento em relação a 28 dias ⁽²⁾ kg
NBR 6118 (ABNT, 2023) 28 dias	C20	1,37	CP III	266	266	0	364	364	0
			CP V	239	239	0	328	328	0
	C50	0,69	CP III	266	266	0	184	184	0
			CP V	239	239	0	165	165	0
		0,66	CP III	425	425	0	280	280	0
			CP V	396	396	0	262	262	0
fib MC (2020) 28 dias	C20	1,25	CP III	266	266	0	333	333	0
			CP V	239	239	0	299	299	0
	C50	0,66	CP III	266	266	0	176	176	0
			CP V	239	239	0	158	158	0
		0,58	CP III	425	425	0	246	246	0
			CP V	396	396	0	230	230	0
EN 1992-1-1 56 dias	C20	1,25	CP III	266	223	43	333	279	54
			CP V	239	220	19	299	275	24
	C50	0,66	CP III	266	223	43	176	147	29
			CP V	239	220	19	158	145	13
		0,58	CP III	425	367	58	246	213	33
			CP V	396	374	22	230	217	13
fib MC (2020) 91 dias e EN 1992-1-1 (CEN, 2023) 91 dias	C20	1,45	CP III	266	204	62	386	296	90
			CP V	239	210	29	347	304	43
	C50	0,72	CP III	266	204	62	192	147	45
			CP V	239	210	29	172	151	21
		0,69	CP III	425	340	85	293	234	59
			CP V	396	363	33	273	250	23
NBR 6118 (ABNT, 2014) 28 dias	C20	1,37	CP III	266	266	0	364	364	0
			CP V	239	239	0	328	328	0
	C50	0,69	CP III	266	266	0	183	183	0
			CP V	239	239	0	165	165	0
		0,61	CP III	425	425	0	259	259	0
			CP V	396	396	0	242	242	0
		0,46	CP III	425	425	0	195	195	0
			CP V	396	396	0	182	182	0

⁽¹⁾ VALOR OBTIDO CONSIDERANDO AS DIMENSÕES DOS PILARES INDICADAS NA TABELA 3.1 E ALTURA DE 2,88 M.

⁽²⁾ VALOR OBTIDO POR MEIO DA SUBTRAÇÃO ENTRE O CONSUMO DE CIMENTO NA IDADE DE 28 DIAS - CONSUMO DE CIMENTO NA IDADE REFERÊNCIA (28, 56 OU 91 DIAS)

TABELA 4.1

QUANTIDADE DE CO₂ LIBERADA EM KG CO_{2eq.} EM FUNÇÃO DO MATERIAL CONSIDERADO, CONSIDERANDO ETAPAS DO PRODUTO A1, A2 E A3

Material	Sidac ⁽¹⁾ (kg CO ₂ eq.)	CECarbon ⁽²⁾ (kg CO ₂ eq.)	EPD documents		
			ArcelorMittal Piracicaba (kg CO ₂ eq.) ⁽³⁾	Votorantim Santa Helena (kg CO ₂ eq.) ⁽⁴⁾	Gerdau Araçariguama (kg CO ₂ eq.) ⁽⁴⁾
Aço CA-50, em t.	425,9 - 1.061,0	—	786	—	1.070
Cimento CP III, em t.	235,3 - 681,7	—	—	384	—
Cimento CP V, em t.	776,4 - 994,3	—	—	852	—
Madeira Pinus, em m ² ⁽⁵⁾	0,3 - 0,7	—	—	—	—
Compensado de madeira, em m ² ⁽⁶⁾	—	6,8	—	—	—
Madeira cruzada laminada (CLT), em m ² ⁽⁷⁾	—	3,1	—	—	—
Madeira laminada colada, em m ² ⁽⁸⁾	—	3,3	—	—	—
Madeira bruta serrada (plantada), em m ³ ⁽⁹⁾	—	50,6	—	—	—

⁽¹⁾ FONTE: www.sidac.org.br/busca

⁽²⁾ FONTE: www.cecarbon.com.br

⁽³⁾ FONTE: DECLARAÇÃO AMBIENTAL DO PRODUTO N. EPD-ARC-20170124-CBD1-EM (VÁLIDA ATÉ 22/03/2023), DISPONÍVEL EM: WWW.IBU-EPD.COM. DE ACORDO COM AS REGRAS DE CÁLCULO DE ACV APRESENTADA NESTE DOCUMENTO AS EMISSÕES DE CO₂ INDICADAS SÃO VÁLIDAS PARA AS FÁBRICAS DA ARCELORMITTAL NO BRASIL LOCALIZADAS EM: CARIACICA, ITAÚNA, JOÃO MONLEVADE, JUIZ DE FORA E PIRACICABA, PORÉM ESTA EPD ESTÁ COM DATA VENCIDA.

⁽⁴⁾ FONTE: www.environmentaldec.com/library

⁽⁵⁾ A QUANTIDADE DE CO₂ LIBERADA CONSIDEROU UMA ESPESSURA DE FÔRMA DE 18 MM. O SIDAC INDICA, PARA O CASO DA MADEIRA PINUS, UMA LIBERAÇÃO DE CO₂ VARIANDO DE 19,06 KG CO₂ EQ. A 39,15 KG CO₂ EQ. POR M² DE MADEIRA.

⁽⁶⁾ A QUANTIDADE DE CO₂ LIBERADA CONSIDEROU UMA ESPESSURA DE FÔRMA DE 18 MM. O CECARBON INDICA, PARA O CASO DO COMPENSADO DE MADEIRA, UMA LIBERAÇÃO DE CO₂ DE 378 KG CO₂ EQ. POR M³.

⁽⁷⁾ A QUANTIDADE DE CO₂ LIBERADA CONSIDEROU UMA ESPESSURA DE FÔRMA DE 18 MM. O CECARBON INDICA, PARA O CASO DA MADEIRA CRUZADA LAMINADA, UMA LIBERAÇÃO DE CO₂ DE 171,12 KG CO₂ EQ. POR M³.

⁽⁸⁾ A QUANTIDADE DE CO₂ LIBERADA CONSIDEROU UMA ESPESSURA DE FÔRMA DE 18 MM. O CECARBON INDICA, PARA O CASO DA MADEIRA LAMINADA COLADA, UMA LIBERAÇÃO DE CO₂ DE 183,6 KG CO₂ EQ. POR M².

⁽⁹⁾ A QUANTIDADE DE CO₂ LIBERADA CONSIDEROU PONTALETES COM DIMENSÕES DE 75 MM X 75 MM E MADEIRA BRUTA SERRADA COM MASSA ESPECÍFICA DE 550 KG/M³ (CONFORME TABELA 1 DA ABNT NBR 6120:2019 "AÇÕES PARA O CÁLCULO DE ESTRUTURAS DE EDIFICAÇÕES, CONSIDERANDO MADEIRA MACIÇA, CONÍFERA, CLASSE DE RESISTÊNCIA C25). O CECARBON INDICA, PARA O CASO DA MADEIRA BRUTA SERRADA (PLANTADA), UMA LIBERAÇÃO DE CO₂ DE 92 KG CO₂ EQ. POR TONELADA.

como calcular a intensidade de CO₂ (IC) para cada resistência apresentados na Tabela 4.2.

Para melhor visualização dos números apresentados na Tabela 4.2, as Figuras 4.1 e 4.2 apresentam graficamente as emissões de CO_{2eq.} por alternativa estudada, considerando dimensionamento com taxa mínima e máxima de armadura, respectivamente.

Conforme demonstrado, um tramo de pilar destinado à mesma função, para uma mesma carga, pode emitir desde 182 kg CO_{2eq.} (IC = 3,2 kgCO₂/MPa) a 437 kg CO_{2eq.} (IC = 16,4 kgCO₂/MPa), segundo uma decisão de projeto, adotada pelo projetista estrutural na fase de dimensionamento combinada com tecnologia de concreto na otimização do traço

e diferentes cimentos. Em números relativos pode passar de 1 a 2,4 vezes, o que é muito expressivo.

Pode-se afirmar que usar cimento CP III em substituição ao cimento CP V, para qualquer situação e mesmo considerando que se necessita de 0,5 a 1kg de cimento CP III a mais por MPa, a estrutura vai emitir menos gases estufa.

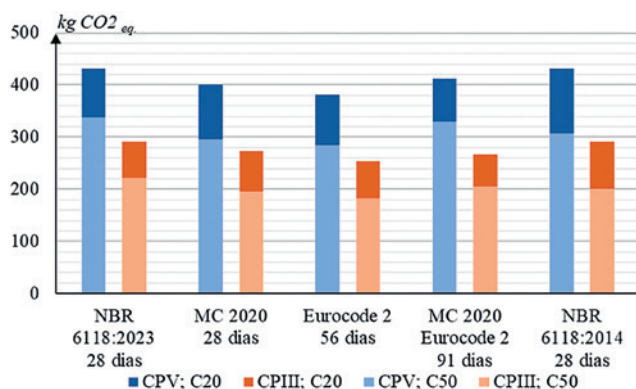


FIGURA 4.1

GRÁFICO DE BARRAS INDICANDO A EMISSÃO DE CO₂ EM KG CO_{2eq.} POR ALTERNATIVA DE DIMENSIONAMENTO DO PILAR COM TAXA MÍNIMA DE ARMADURA

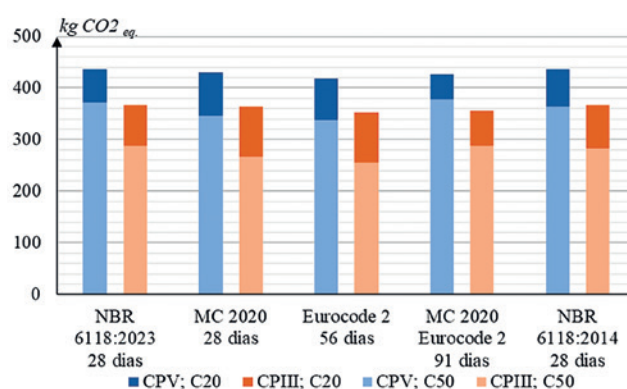


FIGURA 4.2

GRÁFICO DE BARRAS INDICANDO A EMISSÃO DE CO₂ EM KG CO_{2eq.} POR ALTERNATIVA DE DIMENSIONAMENTO DO PILAR COM TAXA MÁXIMA DE ARMADURA

Observou-se também que pilares dimensionados com taxa de armadura mínima emitem menos gases estufa.

Adotar idade de referência de controle do f_{ck} de 56 dias, ao invés de 28 dias, neste estudo, sempre conduziu

a menores emissões de gases estufa.

Essa enorme vantagem obtida em apenas um tramo de pilar se extrapolada,

TABELA 4.2

QUANTIDADE DE CO₂ LIBERADA POR ALTERNATIVA ESTUDADA EM KG CO_{2eq}

Normas	Classe de resistência	Consumo de aço (kg) ⁽¹⁾	Área de fôrma (m ²) ⁽²⁾	Massa de cimento no pilar (kg) ⁽³⁾	Emissão de CO ₂ por pilar (kg CO _{2eq.})	IC por pilar (kg CO ₂ /MPa)
NBR 6118 (ABNT, 2023) 28 dias	C20	82	7,95	364 kg de CP III 328 kg de CP V	291 431	10,9 16,2
		235	5,64	184 kg de CP III 165 kg de CP V	367 437	13,8 16,4
		65	5,53	280 kg de CP III 262 kg de CP V	221 337	3,9 6,0
	C50	160	4,72	204 kg de CP III 190 kg de CP V	287 371	5,1 6,6
		80	7,60	333 kg de CP III 299 kg de CP V	274 401	10,3 15,1
		235	5,53	176 kg de CP III 158 kg de CP V	363 430	13,6 16,2
fib MC (2020) 28 dias	C20	55	5,18	246 kg de CP III 230 kg de CP V	195 296	3,4 5,2
		144	4,61	195 kg de CP III 182 kg de CP V	266 346	4,7 6,1
		80	7,60	279 kg de CP III 275 kg de CP V	254 381	9,5 14,3
	C50	235	5,53	147 kg de CP III 145 kg de CP V	352 419	13,2 15,8
		55	5,18	213 kg de CP III 217 kg de CP V	182 285	3,2 5,0
		144	4,61	169 kg de CP III 172 kg de CP V	256 338	4,5 6,0
fib MC (2020) 91 dias e EN 1992-1-1 (CEN, 2023) 91 dias	C20	82	8,18	296 kg de CP III 304 kg de CP V	267 412	10,0 15,5
		236	5,76	147 kg de CP III 151 kg de CP V	355 427	13,3 16,1
		66	5,64	234 kg de CP III 250 kg de CP V	206 329	3,6 5,8
	C50	170	4,84	173 kg de CP III 185 kg de CP V	287 378	5,1 6,7
		82	7,95	364 kg de CP III 328 kg de CP V	291 431	10,9 16,2
		235	5,64	183 kg de CP III 165 kg de CP V	367 437	13,8 16,4
NBR 6118 (ABNT, 2014) 28 dias	C50	55	5,30	259 kg de CP III 242 kg de CP V	201 307	3,5 5,4
		160	4,61	195 kg de CP III 182 kg de CP V	283 363	5,0 6,4

⁽¹⁾ DE ACORDO COM DOCUMENTO "ENVIRONMENTAL PRODUCT DECLARATION REINFORCING STEEL BAR GERDAU GG 50", 1.070 KG DE CO₂ POR TONELADA DE AÇO (KG CO₂ EQ.), VALOR OBTIDO POR MEIO DA SOMATÓRIA DOS VALORES DE EMISSÃO NAS ETAPAS A1 (RAW MATERIAL SUPPLY), A2 (TRANSPORTATION) E A3 (CORE PROCESS).

⁽²⁾ CONSIDEROU-SE O VALOR DE 8 KG DE CO₂ POR M² DE FÔRMA, JUSTIFICADO NO TEXTO.

⁽³⁾ DE ACORDO COM DOCUMENTO "ENVIRONMENTAL PRODUCT DECLARATION FOR CEMENT CP III 40 RS", 384 KG DE CO₂ POR TONELADA DE CIMENTO (KG CO₂ EQ.), VALOR OBTIDO POR MEIO DA SOMATÓRIA DOS VALORES DE EMISSÃO NAS ETAPAS A1 (RAW MATERIAL SUPPLY), A2 (TRANSPORTATION) E A3 (CORE PROCESS). DE ACORDO COM DOCUMENTO "ENVIRONMENTAL PRODUCT DECLARATION FOR CEMENT CP V AR", 852 KG DE CO₂ POR TONELADA DE CIMENTO (KG CO₂ EQ.), VALOR OBTIDO POR MEIO DA SOMATÓRIA DOS VALORES DE EMISSÃO NAS ETAPAS A1 (RAW MATERIAL SUPPLY), A2 (TRANSPORTATION) E A3 (CORE PROCESS).

simplificadamente, pelo total de 1008 tramos de pilar dessa estrutura, poderia economizar 240 t de CO_{2eq} . Em outras palavras, sendo conservador, se uma análise cuidadosa de pilares conseguir reduzir apenas, por exemplo, 30 kg CO_{2eq} por tramo, a redução de gases de efeito estufa nessa estrutura poderá ser de 30 toneladas de CO_{2eq} , somente em pilares.

5. CONCLUSÕES

O texto das normas *fib Model Code for Concrete Structures* (2020) (*fib*, 2023) e EN 1992-1-1 (CEN, 2023) permitiu um detalhamento com menor volume de concreto, aço e fôrma, pois prescreve o coeficiente $a_{cc} = 1,0$, para f_{ck} a 28 dias, sendo que o EN 1992-1-1 (CEN, 2023) prescreve $a_{cc} = 1,0$ até com f_{ck} a 56 dias. Por outro lado, a NBR 6118 (ABNT, versões 2014 e 2023), que adota valor fixo de $a_{cc} = 0,85$, levou a um detalhamento com maior consumo de materiais.

Neste estudo, para $f_{ck} = 50$ MPa a 56 dias, 0,9% taxa de armadura, EN 1992-1-1 (CEN, 2023), resultou o tramo de pilar com um volume de concreto de 0,58 m³, 55 kg de aço e 5,2 m² de fôrma, enquanto para $f_{ck} = 20$ MPa a 28 dias, 0,4% taxa armadura, NBR 6118 (ABNT, 2023), resultou o tramo de pilar com 1,37 m³ de concreto, 82 kg de aço e 7,95 m² de fôrma. Extrapolando grosseiramente ao total de 1008 tramos de pilar, escolher inte-

ligentemente as opções de dimensionamento nesse edifício poderia significar uma desmaterialização, ou seja, deixar de usar, 796 m³ de concreto, 27 t de aço e 2.772 m² de fôrma.

De maneira geral, as alternativas de dimensionamento desse tramo de pilar com taxa mínima de armadura, independente das normas utilizadas, resultaram em menores valores de emissão de CO_{2eq} . Especificamente o EN 1992-1-1 (CEN, 2023), que considera $a_{cc} = 1,0$, com f_{ck} a 56 dias, conduz a melhores indicadores de eco-eficiência (IC), para qualquer detalhamento comparado às outras normas.

O dimensionamento realizado pela atual norma brasileira NBR 6118 (ABNT, 2023) apresentou os piores índices IC, ou seja, neste estudo particular, foi a norma que menos contribuiu à sustentabilidade de pilares curtos, até comparativamente ao texto anterior da mesma norma, a NBR 6118 (ABNT, 2014).

Neste estudo, para $f_{ck} = 50$ MPa a 56 dias, 0,9% de taxa de armadura, EN 1992-1-1 (CEN, 2023), resultou o tramo de pilar com uma emissão de 182 kg CO_{2eq} (IC = 3,2 kg CO_2 /MPa), enquanto para $f_{ck} = 20$ MPa a 28 dias, 4% de taxa de armadura, NBR 6118 (ABNT, versões 2014 e 2023), para mesma carga, função e segurança, resultou com emissão de 437 kg CO_{2eq} (IC = 16,4 kg CO_2 /MPa) de gases de efeito estufa. Extrapolando grosseiramente ao

total de 1008 tramos de pilar nesse edifício poderia significar uma redução na emissão de gases estufa de até 257 toneladas de CO_{2eq} .

Este estudo também demonstrou que a utilização de cimento de alto-forno tipo CP III, independente das diferentes normas aqui consideradas, resultou em menores emissões de CO_{2eq} , quando comparado ao cimento de alta resistência inicial CP V, mesmo sendo necessário consumir mais cimento CP III para uma mesma resistência e idade.

Na realidade, em um projeto estrutural destinado a um projeto arquitetônico definido, não há tanta liberdade como a considerada neste estudo, pois muitas vezes as restrições arquitetônicas e funcionais não permitem as dimensões ótimas do ponto de vista estrutural. Com certeza nos casos reais os ganhos serão menores, mas não podem ser desprezados nem omitidos nos estudos de verificação da segurança e otimização do projeto na fase de dimensionamento.

Este estudo procurou demonstrar que as decisões de projeto, combinadas inteligentemente com a tecnologia de concreto, podem influenciar significativamente a sustentabilidade, ou seja podem contribuir efetivamente para a desmaterialização e para a redução de emissão de gases estufa da estrutura acabada. ☹

▶ REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. ABNT NBR 6118:2014. Projeto de Estruturas de Concreto-Procedimento. 3 ed. Rio de Janeiro, 2014. 238 p.
- [2] --- ABNT NBR 6118:2023. Projeto de Estruturas de Concreto. Rio de Janeiro, 2023. 242 p.
- [3] BENTO, Ricardo C. Análise do desempenho ambiental de estruturas de concreto armado: uso da avaliação do ciclo de vida (ACV) no processo decisório do dimensionamento. 2016. Tese (Doutorado em Arquitetura, Urbanismo e Tecnologia) – Instituto de Arquitetura e Urbanismo, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2016.
- [4] *fib Model Code for Concrete Structures 2020 – Final Draft*. Lausanne, Switzerland, 2023. 1256 p.
- [5] EUROPEAN COMMITTEE FOR STANDARDIZATION. EN 1992-1-1: EN 1992-1-1: Design of concrete structures – Part 1-1: General rules and rules for buildings, bridges and civil engineering structures. Brussels, 2023. 402 p.
- [6] ZORZI, Antonio C. Sistemas de Fôrmas para Edifícios: recomendações para a melhoria da qualidade e da produtividade com redução de custos. 2. ed. São Paulo: Ibracon, 2015. 195 p.
- [7] DAMINELLI, B.L.; PILEGGI, R. G.; JOHN, V. M. Eco eficiência do uso de cimento em concreto: estado atual, possibilidades e tendências. 54º Congresso Brasileiro do Concreto 54CBC2012. Maceió. Instituto Brasileiro do Concreto IBRACON, 2012.
- [8] SIDAC. Disponível em: <http://www.sidac.org.br/busca>. Acesso em: nov. 2023.
- [9] CECARBON. Disponível em: <http://www.cecarbon.com.br>. Acesso em: nov. 2023.
- [10] INSTITUT Bauen und Umwelt e.V. | Das Detail im Fokus. Das Ganze im Blick. Disponível em: <http://www.ibu-epd.com>. Acesso em: nov. 2023.
- [11] EPD LIBRARY | EPD International. Disponível em: <http://www.environdec.com/library>. Acesso em: nov. 2023.