

Disponible en www.hormigonyacero.com
Hormigón y Acero, 2025
<https://doi.org/10.33586/hya.2025.3468>

ARTÍCULO EN AVANCE ON LINE

Pilares cortos de hormigón armado diseñados según los reglamentos fib Model Code 2020, Eurocode 2:2023, ABNT NBR 6118:2014 y ABNT NBR 6118:2023: Estudio de la sostenibilidad

Ricardo Boni, Rafael Silva, & Paulo Helene

DOI: <https://doi.org/10.33586/hya.2025.3468>

Para ser publicado en: *Hormigón y Acero*

Por favor, el presente artículo debe ser citado así:

Boni, R., Silva, R., & Helene P. (2025) **Pilares cortos de hormigón armado diseñados según los reglamentos fib Model Code 2020, Eurocode 2:2023, ABNT NBR 6118:2014 y ABNT NBR 6118:2023: Estudio de la sostenibilidad**, *Hormigón y Acero*.

<https://doi.org/10.33586/hya.2025.3468>

Este es un archivo PDF de un artículo que ha sido objeto de mejoras propuestas por dos revisores después de la aceptación, como la adición de esta página de portada y metadatos, y el formato para su legibilidad, pero todavía no es la versión definitiva del artículo. Esta versión será sometida a un trabajo editorial adicional, y una revisión más antes de ser publicado en su formato final, pero presentamos esta versión para adelantar su disponibilidad.

En el proceso editorial y de producción posterior pueden producirse pequeñas modificaciones en su contenido.

© 2025 Publicado por CINTER Divulgación Técnica para la Asociación Española de Ingeniería Estructural, ACHE

**Pilares cortos de hormigón armado diseñados según los reglamentos *fib* Model Code 2020, Eurocode 2:2023, ABNT NBR 6118:2014 y ABNT NBR 6118:2023:
*Estudio de la sostenibilidad***

BONI, Ricardo¹; SILVA, Rafael¹; HELENE, Paulo¹

(1) *PhD Engenharia*

Rua Visconde de Ouro Preto, 201. Consolação. 01303-060. São Paulo. SP.

Resumen

Este trabajo tiene como objetivo presentar un estudio de la sostenibilidad, enfocado en el diseño de pilares cortos de hormigón armado respetando las premisas de cuatro reglamentos técnicos: *fib* Model Code 2020, Eurocode 2:2023, ABNT NBR 6118:2014 y ABNT NBR 6118:2023. Para el diseño del tramo de pilar, en este estudio se consideraron dos cuantías de armaduras, una mínima ($\geq 0,4\%$) y una máxima para empalmes por solapo ($< 4,0\%$); dos clases diferentes de resistencia del hormigón, C20 y C50; y, con f_{ck} referido a tres edades diferentes de 28, 56 y 91 días. El contexto proporcionó 16 posibilidades diferentes para detallar el tramo de pilar. También se consideró el hormigón mezclado con dos clases diferentes de cemento; CR con alto contenido de clínker ($> 90\%$) y CS con alrededor de 30% de clínker. El análisis comparativo abordó el tema de la sostenibilidad considerando únicamente las emisiones de CO_{2eq} y la desmaterialización. En las condiciones de este estudio, se concluye que utilizando los criterios del *Eurocode 2 (EN 1992-1-1)*, los hormigones producidos con cementos clase CS y edades de control del f_{ck} de 56 días, siempre conducen a una mayor desmaterialización y menores emisiones de gases de efecto invernadero. Este estudio también demuestra que las decisiones de diseño, combinadas inteligentemente con la tecnología del hormigón, pueden influir significativamente en la sostenibilidad de una estructura.

Palabras clave: diseño de pilares; desmaterialización; sostenibilidad; gases de efecto invernadero; Emisión de CO_{2eq} .

Abstract

This study presents an investigation into sustainability in the design of short reinforced concrete columns, following the guidelines of four technical regulations: *fib* Model Code 2020, Eurocode 2:2023, ABNT NBR 6118:2014, and ABNT NBR 6118:2023. The design considered two reinforcement ratios, with a minimum ($\geq 0.4\%$) and a maximum lap splice ($< 4.0\%$), and two strength classes, C20 and C50. The characteristic strength (f_{ck}) was referenced at three different ages: 28, 56, and 91 days, resulting in 16 possible scenarios for the column segment. The concrete mix included two types of cement: CR, with a high clinker content ($> 90\%$), and CS, with about 30% clinker. The comparative analysis focused on sustainability and dematerialization, considering only CO_{2eq} emissions. The results indicate that, according to the Eurocode 2 (EN 1992-1-1) criteria, concretes made with CS class cement and f_{ck} controlled at 56 days consistently achieve greater dematerialization and lower greenhouse gas emissions. This study demonstrates how design choices, combined with advanced concrete technology, can significantly enhance the sustainability of a structure.

Keywords: column design; dematerialization; sustainability; greenhouse gases; CO_{2eq} emission.

1. Introducción

Este trabajo presenta un estudio de la sostenibilidad considerando las emisiones de CO_{2eq} y la desmaterialización, determinadas conforme las Declaraciones Ambientales de los Productos disponibles, enfocado en el diseño de pilares cortos de hormigón armado respetando las premisas de cuatro reglamentos técnicos: *fib* Model Code 2020 [1], Eurocode 2:2023 [2], ABNT NBR 6118:2014 [3] y ABNT NBR 6118:2023 [4]. Para el diseño del tramo de pilar, se consideraron diferentes cuantías de armaduras, tipos de cementos, clases de resistencia del hormigón, con f_{ck} referido a variadas edades.

Las premisas de proyecto adoptadas en el dimensionamiento del pilar corto de hormigón armado, macizo, de sección cuadrada, se basaron en datos de un caso real de un edificio residencial¹, con 2 pisos subterráneos, planta baja, 24 plantas estándar, sala de máquinas, tanque elevado y cubierta. Se considera solamente el tramo de pilar entre el 1^{er} piso y el 2^{do} piso, con una altura de techo de 2,88 m, estando la estructura sujeta a clases de agresividad ambiental que van desde CAA I para hormigón C20 a CAA II para pilares de hormigón C50, según la ABNT NBR 12655:2022 [5].

Para las acciones de viento, se diseñó el edificio considerando la velocidad básica del viento $V_0 = 40$ m/s, factor topográfico $S_1 = 1,00$, categoría de rugosidad IV (S_2), clase de edificio C (S_2) y el factor estadístico $S_3 = 1,00$, parámetros de acuerdo con la ABNT NBR 6123:1998 [6]. Para las acciones sísmicas se cumplió con la norma ABNT 15421:2023 [7] para edificaciones ubicadas en zona sísmica 0. Para las acciones verticales, se adoptaron los valores descritos en la ABNT NBR 6120:2019 [8] para el caso de edificios residenciales. En cuanto a los requerimientos de fuego e incendio, se tomó como base lo establecido en la ABNT NBR 15200:2012 [9], considerando un TRRF de 90 minutos y sus respectivos requerimientos en cuanto al detalle de pilares. El número total de tramos de pilares de este edificio es de 1008 (mil ocho tramos) y la superficie construida estándar por piso es de 365 m².

La fuerza característica normal total (N_{Sk}) para el diseño de este tramo de pilar utilizado como ejemplo representativo fue de 4000 kN y el total de momentos característicos a los que se someterá fueron $M_x S_k = M_y S_k = 120$ kN.m. Se consideró que las acciones accidentales corresponden al 25% del total de la fuerza característica normal.

El objetivo de este estudio es demostrar cuantitativamente que las decisiones de proyecto junto con la tecnología del hormigón influyen en las emisiones de gases de efecto invernadero y en la sostenibilidad de una estructura.

2. Diseño de pilar corto

El modelo para el cálculo de la resistencia a la compresión prescrito para el diseño de un nuevo proyecto, basado en un determinado valor arbitrado de la resistencia característica a la compresión del hormigón, f_{ck} , según la nueva versión del *fib Model Code for Concrete Structures 2020* (MC 2020) [1], es:

$$f_{cd} = \alpha_{cc} \times \eta_{fc} \times \frac{f_{ck}}{\gamma_c} \quad (\text{ecuación 2.1})$$

Dónde:

f_{cd} → resistencia a compresión de diseño del hormigón;

f_{ck} → resistencia a compresión característica del hormigón, a edades que pueden variar de 28 a 91 días;

¹ Edificio del archivo de la PhD Engenharia para el cual los autores realizaron la Evaluación Técnica de Proyecto (ATP).

$\gamma_c \rightarrow$ factor de minoración de la resistencia característica del hormigón;

$\alpha_{cc} \rightarrow$ coeficiente que tiene en cuenta los efectos opuestos, por un lado, del aumento de la resistencia por la hidratación del cemento, y, por otro lado, la reducción de esta resistencia causada por una carga elevada ² mantenida a largo plazo³;

$\eta_{fc} \rightarrow$ factor de reducción de la resistencia⁴ que tiene en cuenta el aumento de la fragilidad con el aumento de la resistencia del hormigón, calculado mediante:

$$\eta_{fc} = \left(\frac{40}{f_{ck}}\right)^{1/3} \leq 1,0 \quad (f_{ck} \text{ en MPa}) \quad (\text{ecuación 2.2})$$

De acuerdo con el MC 2020 [1], en situaciones normales de diseño, se puede suponer que el aumento de la resistencia después de 28 días compensa los efectos de la carga a largo plazo, de tal manera que, para obras nuevas, cargadas a los 28 días o más, y con f_{ck} referido a 28 días, este coeficiente puede asumirse como $\alpha_{cc} = 1,0$. En este estudio $\eta_{fc} = 1,0$ para $f_{ck} = 20$ MPa y $\eta_{fc} = 0,93$ para $f_{ck} = 50$ MPa.

Para estructuras cargadas a edades mayores a 91 días y en las que la fecha de referencia y control del f_{ck} sea mayor que 28 días, pero igual o menor a 56 días, según el Eurocode 2 [2], es correcto continuar considerando $\alpha_{cc} = 1,0$, siempre que la clase de cemento sea CS.

Para edades f_{ck} superiores a 28 días en el caso de MC 2020 [1] y para edades superiores a 56 días en el caso del Eurocode 2 [2], hasta 91 días, el reglamento recomienda considerar $\alpha_{cc} = 0,85$. El Eurocode 2 [2] también permite que el valor α_{cc} varíe de 0,8 a 1,0, dependiendo de lo prescrito en el Anexo Nacional⁵ de cada país de la Comunidad Europea, y se recomienda adoptar el valor $\alpha_{cc} = 1,0$ para los casos generales.

En el caso de la norma ABNT NBR 6118:2023 [4], el coeficiente es más conservador y se fija en 0,85, recordando que el coeficiente aparece en el cálculo de la tensión máxima de diseño σ_{cd} en lugar de aparecer en el cálculo de la resistencia de diseño f_{cd} .

El texto de la norma ABNT NBR 6118:2014 [3] no consideró el coeficiente de fragilidad η_{fc} , mientras que el nuevo texto de ABNT NBR 6118:2023 [4] considera este coeficiente de fragilidad con el mismo modelo que el MC 2020 [1]. La normativa brasileña, tanto en la versión de 2014 [3] como en la actual de 2023 [4], prescribe f_{ck} referido solamente a los 28 días de edad.

Una vez definida la resistencia a la compresión de diseño del hormigón (f_{cd}), se obtiene la tensión del hormigón (σ_c) según el diagrama tensión-deformación presentado en el MC 2020 [1], ABNT NBR 6118 [4] y Eurocode 2 [2], representado en la siguiente ecuación:

$$\sigma_{cd} = f_{cd} \times \left[1 - \left(1 - \frac{\epsilon_c}{\epsilon_{c2}}\right)^n\right] \quad (\text{ecuación 2.3})$$

Para hormigones con resistencia característica de hasta 50 MPa según ABNT NBR 6118:2023 [4], y para hormigones de 12 MPa a 100 MPa, MC 2020 [1] y Eurocode 2 [2] prescriben:

- $\epsilon_{c2} = 0,20\%$, deformación específica de encortamiento del hormigón al inicio de la meseta de fluencia;
- $\epsilon_{cu} = 0,35\%$, deformación específica de encortamiento del hormigón en la ruptura;
- $n = 2$, parámetro adimensional.

² No existe una definición clara del significado de cargas altas, elevadas y duraderas. En este estudio, los autores consideran elevadas las fuerzas normales $> 0,6 * f_{cd}$ se mantienen durante más de 15 minutos, o aproximadamente $0,4 * f_{ck}$.

³ En el Eurocode 2 [2], es decir, en la norma EN 1992-1-1: nov2023, este coeficiente se denomina *k_{tc}*, según el inciso 5.1.6 «Hipótesis de diseño».

⁴ En el Eurocode 2 [2], es decir, en la norma EN 1992-1-1: nov2023, este coeficiente se denomina η_{cc} , como se muestra en el inciso 5.1.6 «Hipótesis de diseño».

⁵ Cada país de la Comunidad Europea puede modificar estos coeficientes en función de su situación social y económica, ya que el Eurocode 2 es un documento de referencia para todos los países de la CE.

Para hormigones con resistencia característica entre 55 MPa y 90 MPa, no analizados en este estudio, solo según ABNT NBR 6118:2023 [4] y su versión anterior ABNT NBR 6118:2014 [3]:

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

Las limitaciones en las deformaciones específicas reflejan la mayor fragilidad de los hormigones con resistencia a la compresión característica superior a 50 MPa. Del punto de vista de los autores, en la normativa brasileña, mientras se mantengan estas limitaciones en las deformaciones específicas, no hay razón técnica para introducir o mantener también el coeficiente de fragilidad η_{fc} . Por razones didácticas y conceptuales, es preferible mantener las limitaciones de deformación específica y eliminar el coeficiente de fragilidad η_{fc} de la norma brasileña ABNT NBR 6118:2023 [4].

Los factores parciales de seguridad, también conocidos como coeficientes de ponderación, tienen como objetivo introducir seguridad en el diseño de estructuras de hormigón armado, por un lado, aumentando los esfuerzos solicitantes y por otro reduciendo las resistencias características de los materiales a utilizar. Este procedimiento es conocido como método semiprobabilístico en Brasil y método de coeficientes parciales por el MC 2020 [1] y Eurocode 2 [2].

La definición de los valores de estos factores parciales de seguridad viene dada principalmente por el estudio probabilístico de las condiciones y riesgo de la estructura, sus usos, simplificaciones e incertidumbres del modelo de cálculo y las variaciones de estos parámetros. En la práctica, el método semiprobabilístico o de factores parciales es solo probabilístico en la consideración de la distribución de las resistencias de los materiales y las acciones, porque una vez introducidos los coeficientes de ponderación, el análisis es todo determinista [10].

En la tabla 2.1 se muestran los diferentes valores de los factores de seguridad parciales recomendados por los reglamentos en estudio.

Tabla 2.1. Coeficientes de seguridad parciales según el MC 2020 [1]; EN 1992:2023-1-1 [2], EN 1990:2002 [12], ABNT NBR 6118:2023 [4] y ABNT NBR 8681:2003 [11].

ABNT NBR 6118:2023 [4] y ABNT NBR 8681:2003 [11]		MC 2020 [1]; EN 1992:2023-1-1 [2] y EN 1990:2002 [12]	
Materiales (γ_m)	Acciones (γ_f)	Materiales (γ_m) ⁽¹⁾	Acciones (γ_f) ⁽¹⁾
γ_c (hormigón) = 1,4	γ_g (acciones permanentes) = 1,4	γ_c (hormigón) = 1,4 a 1,6	γ_g (acciones permanentes) = 1,3 a 1,4
γ_s (acero) = 1,15	γ_q (acciones variables) = 1,4	γ_s (acero) = 1,1 a 1,175	γ_q (existencias variables) = 1,3 a 1,7

(1) En este estudio, se adoptaron los siguientes valores: $\gamma_c=1,5$; $\gamma_s=1,15$; $\gamma_g=1,35$ e $\gamma_q=1,5$, que se encaja en la clase de consecuencias CC2 del MC 2020 [1].

En la tabla 2.2 se muestran las combinaciones consideradas en este estudio para el diseño de pilares cortos con 2 clases de resistencia característica del hormigón a compresión (C20 y C50).

Tabla 2.2. Combinaciones utilizadas en este estudio.

Reglamento	Clase de resistencia	η_{fc}	α_{cc}	γ_c	γ_s	γ_f Acción permanente	γ_f Acción variable	f_{cd}/f_{ck} (%)
ABNT 6118:2023 [4] 28 días	C20	1,00	0,85	1,4	1,15	1,4	1,4	61%
	C50	0,93	0,85	1,4	1,15	1,40	1,40	56%
MC 2020 [1] 28d EC 2 [2] 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%
MC 2020 [1] > 28d EC 2 [2] 57d a 91d	C20	1,00	0,85	1,5	1,15	1,35	1,5	57%
	C50	0,93	0,85	1,5	1,15	1,35	1,50	53%

Fueron seguidos los criterios clásicos de diseño y detalle de pilares, respetando las diferencias en el cálculo de deformaciones específicas según cada norma. Se adoptó un recubrimiento nominal de $c = 30$ mm para el hormigón C20 y de $c = 25$ mm para el hormigón C50.

Todas las alternativas de diseño de este tramo de pilar se consideraron pilares prismáticos, de sección cuadrada y corta ($\lambda \leq 35$) con longitud $l_e = 2,88$ m, donde de cada clase de resistencia se extrajeron 2 (dos) detalles de pilares: una alternativa con armadura mínima cercana al límite solicitado ($\geq 0,4\%$) y otra con detalles cercanos a la cuantía máxima de acero permitida en un tramo con un empalme por solapo (alrededor del 4% de A_s/A_c).

Para la carga nominal, la carga característica se definió como se muestra en la figura 2.1.

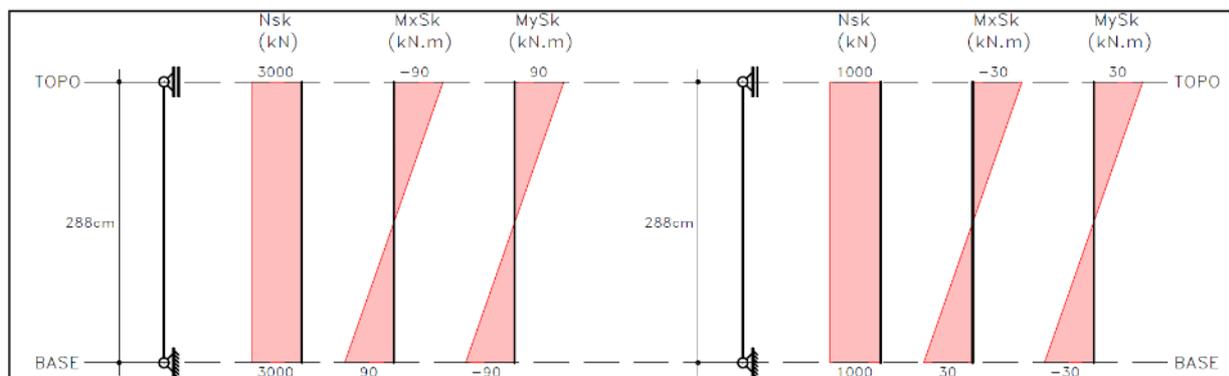


Figura 2.1. Carga nominal característica del pilar: carga permanente (lado izquierdo) y carga variable (lado derecho).

En la tabla 2.3 se muestran las dimensiones, las cuantías de armaduras y los índices de esbeltez, detallados para cada posible alternativa de diseño del tramo de pilar.

Tabla 2.3. Resumen de las alternativas para detallar el tramo de pilar.

Reglamento	Clase de resistencia	Dimensiones (cm)	Acero (cm ²)	Cuantía de acero	Índice de esbeltez λ	Volumen de hormigón (m ³)	Consumo de acero (kg)
NBR 6118:2023 [4] 28 días	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
		41 x 41	64,34	3,83%	24	0,48	160
MC 2020 [1] 28 días	C20	66 x 66	19,63	0,45%	15	1,25	80
		48 x 48	91,07	3,95%	21	0,66	235
Eurocode 2 [2] 28 hasta 56 días	C50	45 x 45	19,63	0,97%	22	0,58	55
		40 x 40	57,30	3,58%	25	0,46	144
MC 2020 [1] 29 a 91 días	C20	71 x 71	19,63	0,39%	14	1,45	82
		50 x 50	96,51	3,86%	20	0,72	236
Eurocode 2 [2] 57 a 91 días	C50	49 x 49	19,63	0,82%	20	0,69	66
		42 x 42	64,34	3,65%	24	0,51	170

A medida que aumenta la clase de resistencia del hormigón, la disminución del área del pilar desde la situación de armadura mínima para la armadura máxima, no se mantiene en la misma proporción que la reducción de área de hormigón. Esto se debe a la pérdida del brazo de palanca inicial, que cambia sutilmente del dominio 5 al dominio 4 a medida que aumenta la clase de resistencia del hormigón. El diseño de la armadura mínima de los pilares requiere que el área de acero sea al menos

el 15% de la relación N_d/f_{yd} , lo que lleva a que la armadura de los pilares para la clase de resistencia C50 tenga una cuantía mínima de alrededor del 0,90% en lugar del 0,40% de C20.

Como comparación, la figura 2.3 muestra el volumen de hormigón (V_c) de cada una de las alternativas de diseño de este tramo de pilar con armadura mínima.

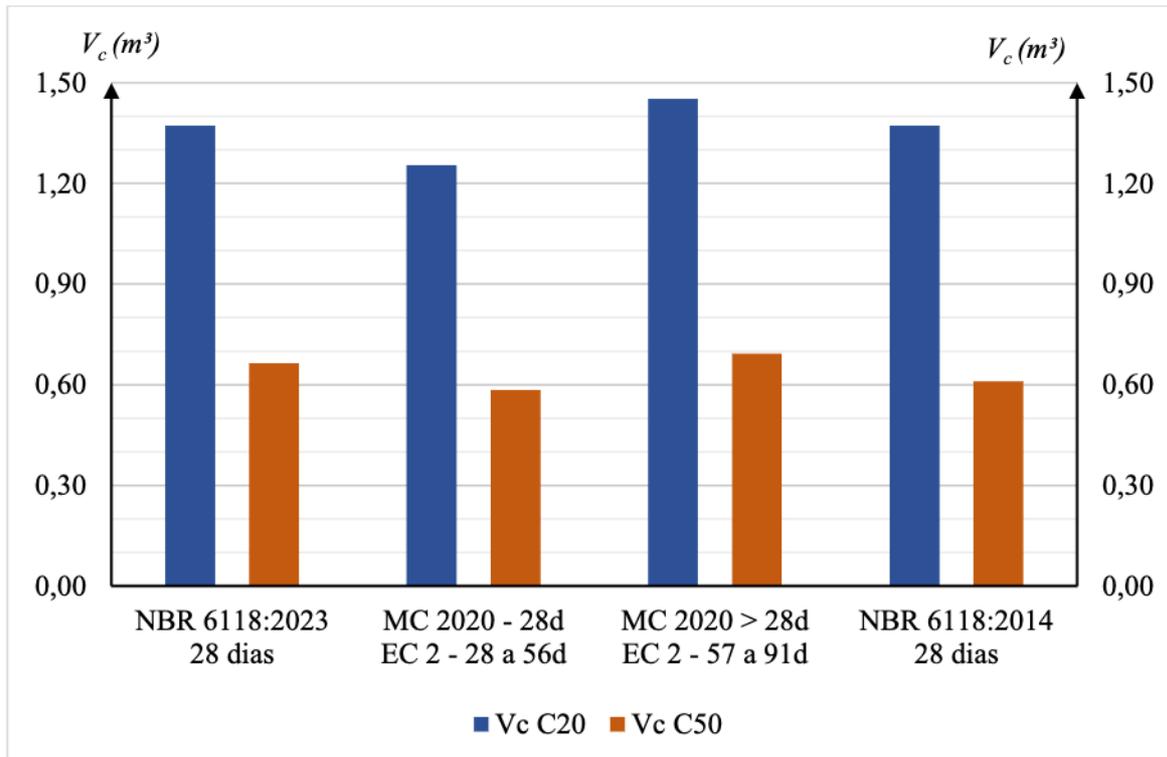


Figura 2.3. Gráfico de barras que indica el volumen de hormigón correspondiente a cada alternativa de diseño del tramo de pilar, para una cuantía mínima de armadura ($\geq 0,4\%$).

La figura 2.4 muestra el volumen de hormigón (V_c) con el máximo de armadura (alrededor del 4%), mostrando una reducción significativa en el volumen total de hormigón de cada alternativa de diseño para el tramo de pilar.

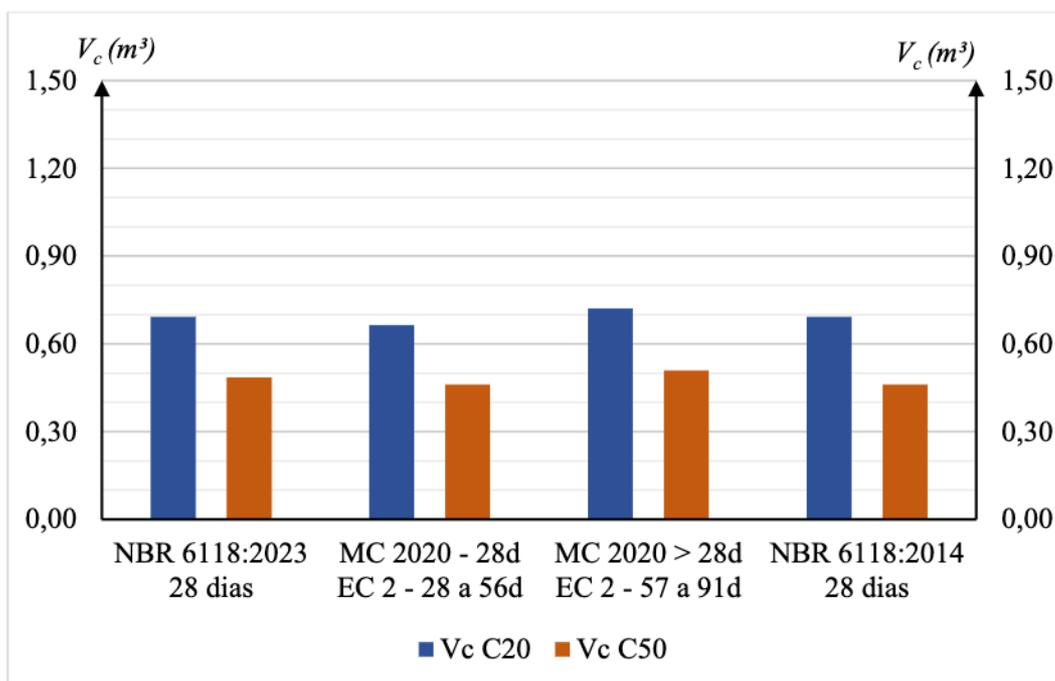


Figura 2.4. Gráfico de barras que indica el volumen de hormigón correspondiente a cada alternativa de diseño del tramo de pilar, para una cuantía máxima de armadura (alrededor del 4%).

Con el fin de mostrar la influencia de la resistencia del hormigón, C20 o C50, la figura 2.5 presenta el gráfico de barras del área acero longitudinal (A_s) para la cuantía máxima, < 4%, de armadura.

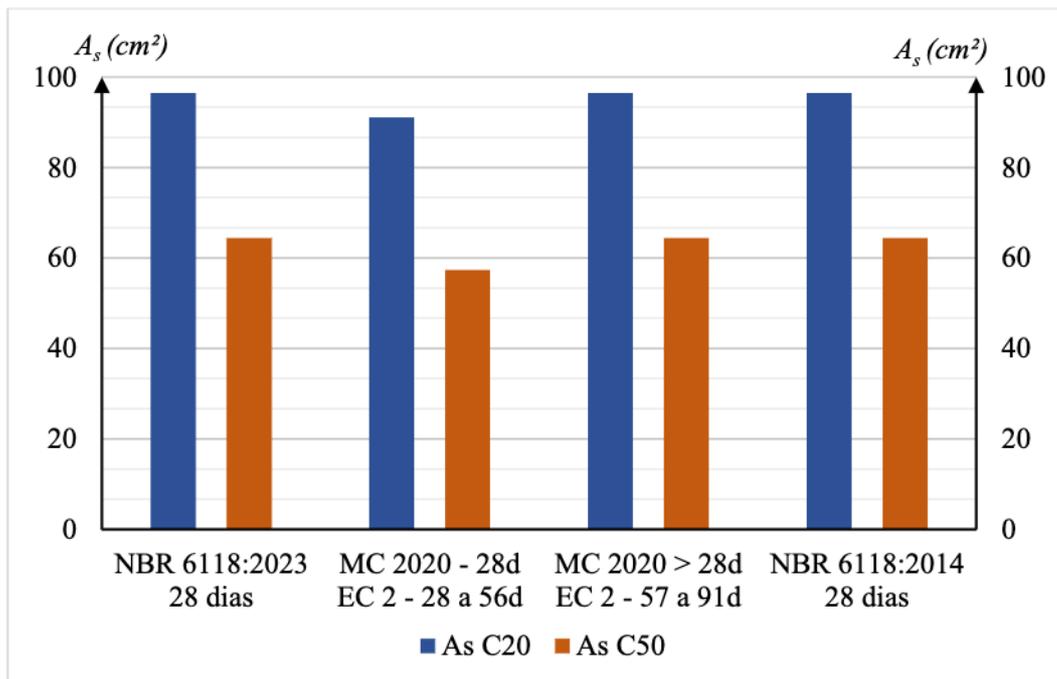


Figura 2.5. Gráfico de barras que indica el área de acero correspondiente a cada alternativa de diseño del tramo de pilar, considerando la cuantía máxima de armadura (alrededor del 4%).

Para complementar el estudio de las alternativas de diseño del tramo de pilar en base a diversos criterios normativos y clases de resistencia del hormigón, también se analizó considerar el tramo con sección cuadrada y fija de 50x50 cm para hormigón clase C20 y C50, simulando una imposición de diseño arquitectónico.

En este caso, dado que el volumen de hormigón es una constante, la figura 2.6 muestra la variación del área de acero (A_s) en función de la clase de resistencia del hormigón.

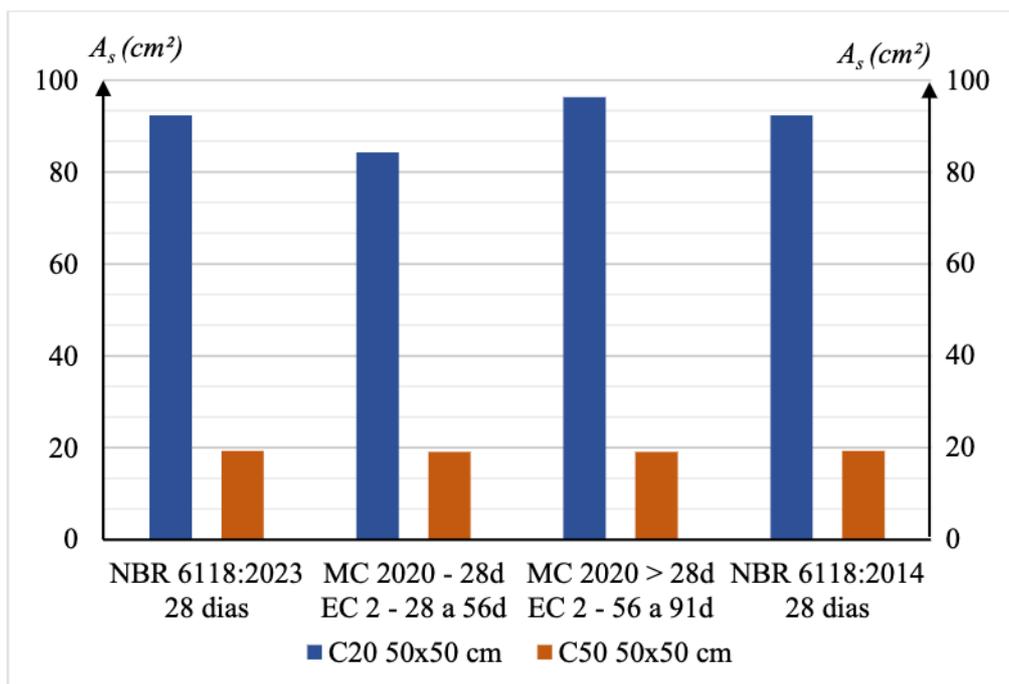


Figura 2.6. Gráfico de barras que indica la variación del área de acero (A_s) al fijar la dimensión del tramo de pilar y cambiar la clase de resistencia del hormigón.

Se observa que, para el caso en estudio, el dimensionamiento según las prescripciones del MC 2020 [1] con f_{ck} a los 28 días y Eurocode 2 [2] con f_{ck} a los 28 días o 56 días, conduce a pilares más económicos independientemente de la clase de resistencia considerada. Las prescripciones de la normativa brasileña ABNT NBR 6118:2023 [4] conducen a pilares más voluminosos, es decir, es una normativa más conservadora, lo que es incoherente con un país con índices socioeconómicos inferiores a los países europeos.

Con el objetivo de la sostenibilidad, que pretende producir más con menos, es decir, es necesario desmaterializar, es evidente, en este caso de estudio, que lo ideal es utilizar hormigón de alta resistencia.

Para la misma carga y optimizando la geometría, utilizando un hormigón de $f_{ck} = 50$ MPa en un pilar en lugar de un hormigón de $f_{ck} = 20$ MPa, se puede reducir el volumen de hormigón de 1,45 m³ en el caso de armadura mínima y C20, a solo 0,46 m³ con cuantía de armadura máxima y C50, contribuyendo significativamente a la desmaterialización.

Con el mismo razonamiento, la armadura de este tramo de pilar puede reducirse de 236 kg para el C20 a solo 55 kg en el caso del uso del C50, es decir, un ahorro significativo de acero, teniendo en cuenta la desmaterialización.

De la misma manera, considerando las mismas tensiones y fijando la geometría del tramo del pilar en (50 cm x 50 cm), utilizando un hormigón de $f_{ck} = 50$ MPa en lugar de un hormigón de $f_{ck} = 20$ MPa, se puede reducir la masa total de acero de 96 kg para C20 a solo 20 kg para C50, es decir, un enorme ahorro de acero, del orden de 4 veces menos material, para el mismo volumen de hormigón y área de encofrado.

Queda por considerar la influencia de la fecha de control o referencia del f_{ck} . Las dosificaciones de los mismos materiales, si se refieren a 56 días o 91 días, para el mismo valor f_{ck} , darán lugar a dosificaciones de hormigón con menor consumo de cemento por m³, lo que puede aportar aún mayores beneficios a la sostenibilidad, como se demuestra en la secuencia de este trabajo.

3. Consumo de materiales en función de la fecha de referencia del f_{ck}

El MC 2020 [1] en el inciso 14.6.1.6.1 "Development of strength with time", así como el Anexo B del Eurocode 2 [2] "Time dependent behaviour of materials: strength, creep, shrinkage and elastic strain of concrete and relaxation of prestressing steel", recomiendan el uso de una expresión en formato exponencial para representar el crecimiento de la resistencia a la compresión del hormigón en función del tiempo, a saber:

$$\frac{f_{c(t)}}{f_{c(t_{ref})}} = e^{\left\{s_c \cdot \left[1 - \sqrt{\frac{t_{ref}}{t}}\right] \cdot \left(\sqrt{\frac{28}{t_{ref}}}\right)\right\}} \quad (\text{ecuación 3.1})$$

Dónde:

s_c : coeficiente adimensional que oscila entre 0,1 y 0,6, como se muestra en la tabla 3.1.

Tabla 3.1. Valores de s_c según *fib (MC 2020) [1]* y *Eurocode 2 [2]*.

Resistencia del hormigón (MPa)	s_c		
	Clase CR	Clase CN	Clase 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: Las Clases CR, CN y CS se determinan en función del tipo y la clase de resistencia del cemento. Para determinar las Clases CR, CN y CS, consulte la tabla 14.6-8 "Strength development classes of concrete" del MC 2020 [1], así como las normas EN 197-1 [13] "Cement – Part 1: Composition, specifications and conformity criteria for common cements" y EN 206 [14] "Concrete – Specification, performance and conformity". Simplemente, se pueden asociar a la condición brasileña los siguientes: CR (hormigón con cemento CP V); CN (hormigón con cemento CP II) y CS (hormigón con cemento CP III o CP IV).

$f_c(t)$: resistencia a compresión a la edad t , expresada en MPa;

t : Edad del hormigón en días, calculada según la expresión:

$$t = \sum_{i=1}^n \Delta t_i e^{\left[13,65 - \frac{4000}{273+T(\Delta t_i)}\right]} \quad (\text{ecuación 3.2})$$

Dónde:

t : es la edad del hormigón ajustada en función de la temperatura, en días;

Δt_i : es el número de días en los que la temperatura T prevalece;

$T(\Delta t_i)$: es la temperatura media en °C durante el intervalo de tiempo Δt_i ;

t_{ref} : edad de control y referencia f_{ck} en días, que puede variar de 28 a 91 días;

$f_{c(t_{ref})}$: resistencia a compresión promedio a la edad t_{ref} , expresada en MPa.

Como premisa de este estudio, se consideró que el hormigón siempre estará a una temperatura de $T(\Delta t_i) = 20^\circ\text{C}$, durante los días hasta la edad de control, prescindiendo del uso de esta formulación.

Los autores tampoco están de acuerdo con esta formulación, ya que acelerar y mantener hormigones por encima de los 20°C conduce a resistencias finales a largo plazo más bajas que las obtenidas a partir del mismo hormigón curado a temperaturas de 20°C en las primeras edades. Los procesos de cura acelerada con un aumento de las temperaturas iniciales por encima de los 30°C conducen a mayores resistencias a edades bajas, pero a largo plazo, 28 días o más, los resultados finales terminan siendo inferiores a los hormigones mantenidos a temperaturas alrededor de 20°C a 25°C . Las altas temperaturas conducen a granos de microestructura más grandes y quebradizos en las interfaces, mientras que las temperaturas más bajas conducen a un refinamiento de los granos y, en otras palabras, por lo tanto, mayores resistencias finales.

Por simplificación en este estudio se consideran hormigones producidos con cementos CR y CS, como se muestra en la tabla 3.1. Las resistencias de $f_c(28)$, $f_c(56)$ y $f_c(91)$ también se adoptaron como referencia para la resistencia del hormigón [$f_{c(t_{ref})}$], a efectos de análisis comparativo.

Los valores de f_{ck} adoptados en este estudio fueron 20 MPa y 50 MPa. Los valores para efectos de dosificación del hormigón, f_{cm} deben ser de 26,6 MPa y 56,6 MPa, respectivamente, considerando una desviación estándar constante igual a 4 MPa. Cabe destacar que tanto el MC 2020 [1] como el Eurocode 2 [2] prescriben una desviación estándar constante igual a 4,8 MPa, es decir, consideran una mayor variabilidad en las resistencias del hormigón que la prevista en la normativa brasileña.

De esta manera, fue posible determinar la resistencia a la compresión requerida a los 28 días de edad para las diferentes clases de resistencia estudiadas (C20 y C50), para las diferentes edades de control f_{ck} (28, 56 y 91 días) y para los dos tipos de cemento considerados CR y CS, como se detalla en la tabla 3.2.

Tabla 3.2. Valores de resistencia promedio a compresión a los 28 días [$f_{cm}(28)$], calculados según la ecuación 3.1, para las clases de resistencia (C20 y C50), según la edad de control (28, 56 y 91 días), para hormigones producidos con cemento tipo CR y CS.

$t_{(t_{ref})}$ (días)	Clase de resistencia	$f_{cm(t_{ref})}$ (MPa)	Tipo de cemento	$S_c^{(1)}$	$f_{cm(28)}^{(2)}$ (MPa)
28	C20	26,6	CS	0,6	26,6
			CR	0,3	26,6
	C50	56,6	CS	0,5	56,6
			CR	0,2	56,6

$t_{(t_{ref})}$ (días)	Clase de resistencia	$f_{cm(t_{ref})}$ (MPa)	Tipo de cemento	S_c ⁽¹⁾	$f_{cm(28)}$ ⁽²⁾ (MPa)
56	C20	26,6	CS	0,6	22,3
			CR	0,3	24,4
	C50	56,6	CS	0,5	48,9
			CR	0,2	53,4
91	C20	26,6	CS	0,6	20,4
			CR	0,3	23,3
	C50	56,6	CS	0,5	45,3
			CR	0,2	51,8

Notas:

(1) Valor de S_c obtenido en la tabla 3.1.

(2) Resistencia media a los 28 días de edad obtenida mediante formulación del MC 2020 [1] y EUROCODE 2 [2] (ecuación 3.1), variando $t_{(ref)}$: 28, 56 y 91 días.

Para estimar el índice de rendimiento, expresado en kg de cemento por MPa, se adoptó la premisa de un rendimiento medio de referencia de 9/10 kg de cemento/MPa para f_{cm} de 20 a 30 MPa y de 7/7,5 kg de cemento/MPa para f_{cm} de 40 a 60 MPa, para los cementos CR y CS, respectivamente, con base en la experiencia de los autores, la literatura sobre el tema [15] y las dosificaciones comúnmente utilizadas en las plantas de hormigón. Cabe destacar que este estudio propone discutir la sostenibilidad de forma simplificada, desconsiderando los límites normativos de consumo mínimo de cemento por m^3 y relación máxima agua/cemento de las normas antes mencionadas.

Así, considerando el volumen de hormigón utilizado en cada una de las alternativas estudiadas para este tramo de pilar, dimensionado de acuerdo con los criterios de los diferentes reglamentos y el mismo índice de desempeño adoptado, se presenta un resumen del consumo de cemento obtenido en la tabla 3.3, detallando el consumo de cemento por m^3 de hormigón en cada una de las alternativas para el diseño del tramo de pilar en estudio.

Tabla 3.3. Consumo de materiales y ahorro de cemento en relación a las dosificaciones controladas a los 28 días de edad, para las diferentes alternativas de diseño.

Reglamentos edad de referencia	Clase de resistencia del hormigón	Volumen de hormigón (m^3) ⁽¹⁾	Tipo de cemento	Consumo de cemento por m^3 de hormigón (kg/ m^3)			Masa de cemento para la ejecución del pilar en kg		
				28 días kg/ m^3	edad de referencia (28, 56 o 91 días) kg/ m^3	Ahorro de cemento, 28 días ⁽²⁾ kg	28 días kg	edad de referencia (28, 56 y 91 días) kg	ahorro de cemento respecto 28 días ⁽²⁾ kg
NBR 6118:2023 [4] 28 días	C20	1,37	CS	266	266	0	364	364	0
			CR	239	239	0	328	328	0
	C50	0,69	CS	266	266	0	184	184	0
			CR	239	239	0	165	165	0
	C50	0,66	CS	425	425	0	280	280	0
			CR	396	396	0	262	262	0
C50	0,48	CS	425	425	0	204	204	0	
		CR	396	396	0	190	190	0	
MC 2020 [1] 28 días	C20	1,25	CS	266	266	0	333	333	0
			CR	239	239	0	299	299	0
	C50	0,66	CS	266	266	0	176	176	0
			CR	239	239	0	158	158	0
	C50	0,58	CS	425	425	0	246	246	0
			CR	396	396	0	230	230	0
C50	0,46	CS	425	425	0	195	195	0	
		CR	396	396	0	182	182	0	
Eurocode 2 [2] 56 días	C20	1,25	CS	266	223	43	333	279	54
			CR	239	220	19	299	275	24
	C50	0,66	CS	266	223	43	176	147	29
			CR	239	220	19	158	145	13
	C50	0,58	CS	425	367	58	246	213	33
			CR	396	374	22	230	217	13
C50	0,46	CS	425	367	58	195	169	26	
		CR	396	374	22	182	172	10	

Reglamentos edad de referencia	Clase de resistencia del hormigón	Volumen de hormigón (m ³) ⁽¹⁾	Tipo de cemento	Consumo de cemento por m ³ de hormigón (kg/m ³)			Masa de cemento para la ejecución del pilar en kg		
				28 días kg/m ³	edad de referencia (28, 56 o 91 días) kg/m ³	Ahorro de cemento, 28 días ⁽²⁾ kg	28 días kg	edad de referencia (28, 56 y 91 días) kg	ahorro de cemento respecto 28 días ⁽²⁾ kg
MC 2020 [1] 91 días y Eurocode 2 [2] 91 días	C20	1,45	CS	266	204	62	386	296	90
			CR	239	210	29	347	304	43
		0,72	CS	266	204	62	192	147	45
			CR	239	210	29	172	151	21
	C50	0,69	CS	425	340	85	293	234	59
			CR	396	363	33	273	250	23
		0,51	CS	425	340	85	217	173	44
			CR	396	363	33	202	185	17

(1) Valor obtenido considerando las dimensiones de los pilares indicados en la tabla 3.1 y altura de 2.88 m.

(2) Valor obtenido restando el consumo de cemento a los 28 días de edad – consumo de cemento a la edad de referencia (28, 56 o 91 días).

4. Emisiones e intensidad de CO_{2eq} (IC)

El objetivo de este artículo es presentar un análisis comparativo de las emisiones de CO_{2eq} para las diferentes alternativas de diseño consideradas en este estudio. Por lo tanto, para cada una de las alternativas estudiadas, se calculó la correspondiente emisión de CO_{2eq} y los indicadores de ecoeficiencia asociados en kg CO₂/MPa, estos últimos denominados intensidad CO_{2eq}. (IC).

Para la cuantificación de las emisiones de CO_{2eq}, se utilizaron los valores de las EPD's (Declaraciones Ambientales de Producto) disponibles en los "EPD documents" de la página web de www.environdec.com/home, los datos proporcionados por el "Sistema de Informação do Desempenho Ambiental da Construção – Sidac" disponibles en www.sidac.org y los datos obtenidos por la calculadora de consumo de energía y emisiones de carbono de CECarbon para edificios disponible en el sitio web de www.cecarbon.com.br.

La tabla 4.1 muestra los valores de CO_{2eq}. por tonelada de material producido en Brasil, en el caso de acero y cemento y por m² de encofrado, considerando que este último fue producido en madera compensada de 18 mm de espesor, estructurado con madera en bruto en las dimensiones de 75 mm x 75 mm (listones) [16] cada 35 cm.

Asimismo, para la ejecución del soporte para la fijación de los encofrados de los pilares (marcos inferiores), se utilizaron listones de madera de 25 mm de espesor y 100 mm de ancho. Los trabados horizontales (guías en perfiles metálicos), amarres con barras de anclaje, plomadas, escuadras, etc., no se consideraron en este estudio ya que son componentes del sistema de encofrado que pueden ser reutilizados varias veces.

Tabla 4.1. Cantidad de CO₂ liberada en kg CO_{2eq}. en función del material adoptado, considerando las etapas del producto A1, A2 y A3.

Material	Sidac ⁽¹⁾ (kg CO _{2 eq.})	CECarbon ⁽²⁾ (kg CO _{2 eq.})	Documentos EPD		
			ArcelorMittal Piracicaba (kg CO _{2 eq.}) ⁽³⁾	Votorantim Santa Elena (kg CO _{2 eq.}) ⁽⁴⁾	Gerdau Araçariquama (kg CO _{2 eq.}) ⁽⁴⁾
Acero CA-50, en t.	425,9 – 1.061,0	-	786	-	1.070
Cemento CP III (CS), en t.	235,3 – 681,7	-	-	384	-
Cemento CP V (CR), en t.	776,4 – 994,3	-	-	852	-
Madera de pino, en m ² ⁽⁵⁾	0,3 – 0,7	-	-	-	-
Madera compensada, en m ² ⁽⁶⁾	-	6,8	-	-	-
Madera cruzada laminada (CLT), en m ² ⁽⁷⁾	-	3,1	-	-	-
Madera Laminada Encolada, en m ² . ⁽⁸⁾	-	3,3	-	-	-
Madera aserrada en bruto (plantada), en m ³ ⁽⁹⁾	-	50,6	-	-	-

(1) Fuente: www.sidac.org.br/busca

(2) Fuente: www.cecarbon.com.br

(3) Fuente: Declaración Ambiental de Producto N° EPD-ARC-20170124-CBD1-EM (válida hasta el 22/03/2023), disponible en: www.ibu-epd.com. De acuerdo con las reglas de cálculo del ACV presentadas en este documento, las emisiones de CO₂ indicadas son válidas para las plantas de ArcelorMittal en Brasil ubicadas en: Cariacica, Itaúna, João Monlevade, Juiz de Fora y Piracicaba, aunque esta DAP está con fecha vencida.

(4) Fuente: www.environdec.com/library

(5) la cantidad de CO₂ liberada se consideró un espesor de encofrado de 18 mm. Sidac indica, para la madera de pino, una liberación de CO₂ que oscila entre 19,06 kg CO₂ eq. y 39,15 kg CO₂ eq. por m³ de madera.

(6) la cantidad de CO₂ liberada consideró un espesor de encofrado de 18 mm. Para el caso de la madera compensada, CECarbon indica una liberación de CO₂ de 378 kg CO₂ eq. por m³.

(7) la cantidad de CO₂ liberada consideró un espesor de encofrado de 18 mm. En el caso de la madera cruzada laminada, CECarbon indica una liberación de CO₂ de 171,12 kg CO₂ eq. por m³.

(8) la cantidad de CO₂ liberada consideró un espesor de encofrado de 18 mm. En el caso de la madera laminada encolada, CECarbon indica una liberación de CO₂ de 183,6 kg CO₂ eq. por m³.

(9) la cantidad de CO₂ liberada consideró listones con dimensiones de 75 mm x 75 mm y madera cruda aserrada con una masa específica de 550 kg/m³ (según la tabla 1 de la ABNT NBR 6120:2019 [8] "Ações para o cálculo de estruturas de edificações, considerando madeira maciza, conífera, clase de resistencia C25"). CECarbon indica, para el caso de la madera en bruto aserrada (plantada), una liberación de CO₂ de 92 kg CO₂ eq. por tonelada.

Con base en los datos presentados, fue posible obtener el volumen promedio esperado de madera aserrada en bruto (en m³) por m² de tablero de madera compensada, de 0,025 m³/m². Por lo tanto, en este estudio se adoptó un índice de 8,0 kgCO₂eq./m² de encofrado, de acuerdo con los cálculos que se detallan a continuación:

$$\text{Emisión de CO}_{2\text{eq.}} \text{ encofrados} = [6,8 \text{ kgCO}_{2\text{eq.}}/\text{m}^2] + [(0,025 \text{ m}^3/\text{m}^2) * 50,6 \text{ kgCO}_{2\text{eq.}}/\text{m}^3]$$

$$\text{Emisión de CO}_{2\text{eq.}} \text{ encofrados} = [6,8 \text{ kgCO}_{2\text{eq.}}/\text{m}^2] + [1,2 \text{ kgCO}_{2\text{eq.}}/\text{m}^2]$$

$$\text{Emisión de CO}_{2\text{eq.}} \text{ encofrados} = 8,0 \text{ kgCO}_{2\text{eq.}}/\text{m}^2$$

A partir de los datos presentados en la tabla 4.1 y las cantidades de materiales (acero, cemento y encofrado) fue posible calcular la cantidad de CO₂eq. para cada una de las alternativas de diseño del tramo de pilar en estudio, así como el cálculo de la intensidad de CO₂eq (IC) para cada resistencia $f_{cm(t_{ref})}$ que se presenta a continuación en la tabla 4.2.

Tabla 4.2. Cantidad de CO₂eq liberada por alternativa estudiada en kg CO₂eq.

Reglamentos	Clase de resistencia	Consumo de acero (kg) ⁽¹⁾	Área de encofrado (m ²) ⁽²⁾	Masa de cemento en el pilar (kg) ⁽³⁾	Emisiones de CO ₂ por pilar (kg CO ₂ eq.)	IC por pilar (kg CO ₂ /MPa)
NBR 6118:2023 [4] 28 días	C20	82	7,95	364 kg CS	291	10,9
				328 kg CR	431	16,2
		235	5,64	184 kg CS	367	13,8
	C50	65	5,53	165 kg CR	437	16,4
				280 kg CS	221	3,9
		160	4,72	262 kg CR	337	6,0
MC 2020 [1] 28 días	C20	80	7,60	204 kg CS	287	5,1
				190 kg CR	371	6,6
		235	5,53	333 kg CS	274	10,3
	C50	55	5,18	299 kg CR	401	15,1
				176 kg CS	363	13,6
		144	4,61	158 kg CR	430	16,2
Eurocode 2 [2] 56 días	C20	80	7,60	246 kg CS	195	3,4
				230 kg CR	296	5,2
		279 kg CS	254	9,5		
	C50	55	5,18	275 kg CR	381	14,3
				147 kg CS	352	13,2
		235	5,53	145 kg CR	419	15,8
213 kg CS	182	3,2				

Reglamentos	Clase de resistencia	Consumo de acero (kg) ⁽¹⁾	Área de encofrado (m ²) ⁽²⁾	Masa de cemento en el pilar (kg) ⁽³⁾	Emisiones de CO ₂ por pilar (kg CO _{2eq.})	IC por pilar (kg CO ₂ /MPa)
		144	4,61	217 kg CR	285	5,0
				169 kg CS	256	4,5
				172 kg CR	338	6,0
MC 2020 [1] 91 días	C20	82	8,18	296 kg CS	267	10,0
				304 kg CR	412	15,5
				147 kg CS	355	13,3
				151 kg CR	427	16,1
Eurocode 2 [2] 91 días	C50	66	5,64	234 kg CS	206	3,6
				250 kg CR	329	5,8
				173 kg CS	287	5,1
				185 kg CR	378	6,7

(1) De acuerdo con el documento "Environmental Product Declaration Reinforcing Steel Bar Gerdau GG 50", **1.070 kg de CO₂ por tonelada de acero** (kg CO₂ eq.), valor obtenido sumando los valores de emisión en las etapas A1 (Raw material supply), A2 (Transportation) y A3 (Core process).

(2) Se consideró el valor de **8 kg de CO₂ por m² de encofrado**, tal y como se justifica en el texto.

(3) Según el documento "Environmental Product Declaration for Cement CP III 40 RS", **384 kg de CO₂ por tonelada de cemento** (kg CO₂ eq.), valor obtenido sumando los valores de emisión en las etapas A1 (Raw material supply), A2 (Transportation) y A3 (Core process). Según el documento "Environmental Product Declaration for Cement CP V ARI", **852 kg de CO₂ por tonelada de cemento** (kg CO₂ eq.), valor obtenido sumando los valores de emisión en las etapas A1 (Raw material supply), A2 (Transportation) y A3 (Core process).

Para una mejor visualización de las cifras presentadas en la tabla 4.2, las figuras 4.1 y 4.2 presentan gráficamente las emisiones de CO_{2eq.} por alternativa estudiada, considerando diseños con cuantía mínima y máxima de armadura, respectivamente.

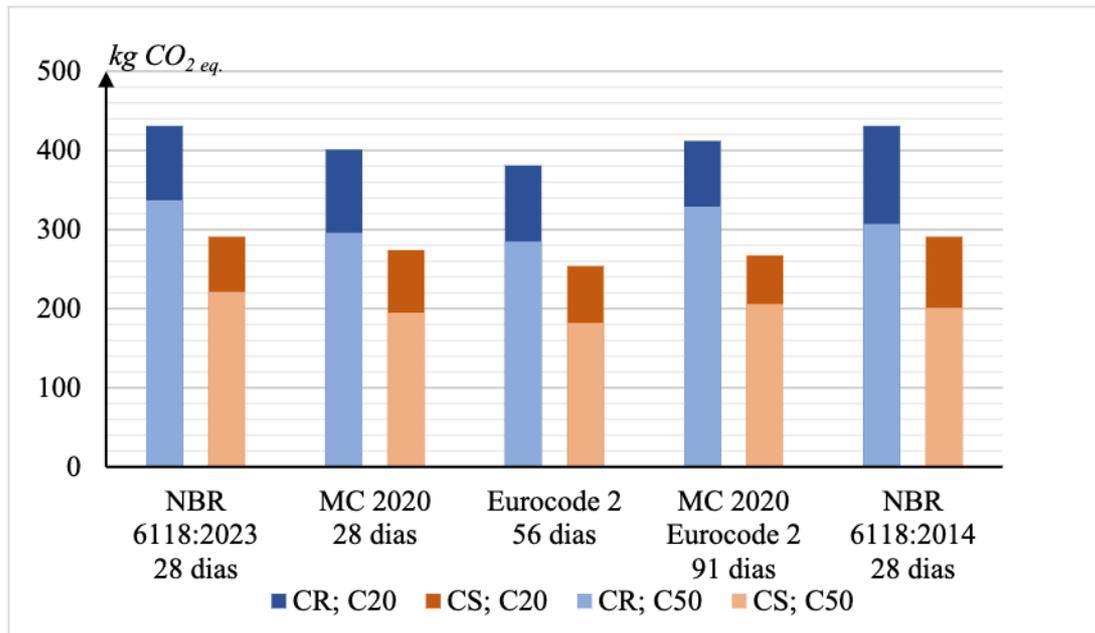


Figura 4.1. Gráfico de barras que muestra la emisión de CO₂ en kg CO_{2eq.} por diseño alternativo del pilar con mínima cuantía de acero.

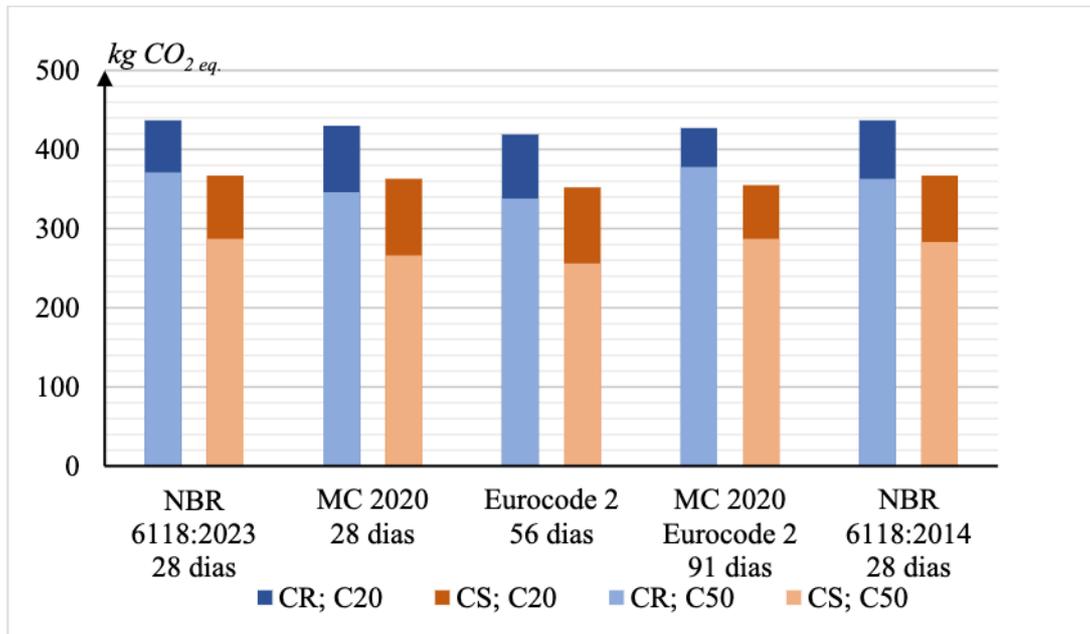


Figura 4.2. Gráfico de barras que muestra la emisión de CO₂ en kg CO_{2eq.} por diseño alternativo del pilar con la máxima cuantía de acero.

Como se muestra, un tramo de pilar destinado a la misma función, para la misma carga, puede emitir desde 182 kg CO_{2eq.} (IC = 3,2 kgCO₂/MPa), a 437 kg CO_{2eq.} (IC = 16,4 kgCO₂/MPa), de acuerdo con una decisión de diseño adoptada por el proyectista estructural en la fase de diseño combinada con tecnología de hormigón en la optimización de mezclas y diferentes cementos. En números relativos, puede ir de 1 a 2,4 veces, lo cual es muy expresivo.

La figura 4.3 presenta esquemáticamente las dos alternativas para calcular los tramos de pilares de este estudio que presentan mayor y menor emisión de CO_{2eq.}. Esta figura también contiene las emisiones detalladas por insumo utilizado, así como el resto de la información que caracteriza a cada una de las alternativas para dimensionar y ejecutar el mismo pilar.

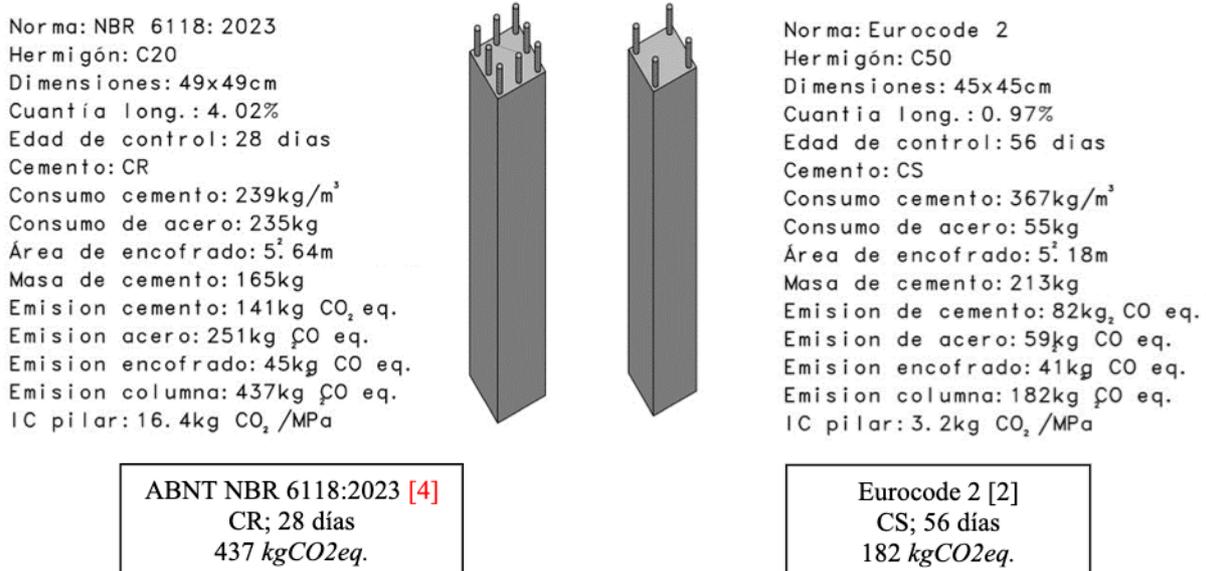


Figura 4.3. Alternativas para el cálculo de tramos de pilares en este estudio que presentan mayores y menores emisiones de CO_{2eq.}

Esta enorme ventaja solo puede lograrse en condiciones ideales de libertad de diseño. En condiciones normales, con limitaciones arquitectónicas y de ejecución, los beneficios pueden ser más reducidos.

En cualquier caso, se puede decir que utilizando cemento CS en lugar de cemento CR, para cualquier situación e incluso teniendo en cuenta que se necesita de 0,5 a 1kg de cemento CS más por MPa, la estructura emitirá menos gases de efecto invernadero.

También se observó que los pilares diseñados con una cuantía mínima de armadura emiten menos gases de efecto invernadero.

La adopción de una edad de referencia del f_{ck} de 56 días en lugar de 28 días en este estudio siempre condujo a una reducción de las emisiones de gases de efecto invernadero.

También es posible realizar un análisis análogo de las emisiones de CO₂ fijando las dimensiones de este tramo de pilar y variando el área de acero (A_s), el tipo de cemento, así como la clase de resistencia del hormigón (C20 o C50).

En la tabla 4.3 se muestran las emisiones de CO_{2eq}, fijando las dimensiones del tramo del pilar en 50 x 50 cm y una altura de techo de 2,88 m, simulando las limitaciones arquitectónicas.

Tabla 4.3. Cantidad de CO₂ liberada por cada alternativa estudiada, considerando dimensiones fijas (50 x 50 x 288 cm³), en kg CO_{2eq}.

Reglamento	Clase de resistencia	Consumo de acero (kg)	Área de encofrado (m ²)	Masa de cemento por pilar (kg)	Emisiones de CO ₂ por pilar (kg CO _{2 eq.})	IC (kg CO ₂ /MPa) por pilar
NBR 6118:2023 [4] 28 días	C20	230	5,76	192 kg CS	366	13,8
				172 kg CR	439	16,5
	C50	58		306 kg CS	226	4,0
				285 kg CR	351	6,2
MC 2020 [1] 28 días	C20	228	5,76	192 kg CS	364	13,7
				172 kg CR	437	16,4
	C50	50		306 kg CS	217	3,8
				285 kg CR	342	6,0
Eurocode 2 [2] 56 días	C20	228	5,76	161 kg CS	352	13,2
				158 kg CR	425	16,0
	C50	50		264 kg CS	201	3,6
				269 kg CR	329	5,8
MC 2020 [1] 91 días	C20	236	5,76	147 kg CS	355	13,3
				151 kg CR	427	16,1
Eurocode 2 [2] 91 días	C50	60		245 kg CS	204	3,6
				261 kg CR	333	5,9

Como se muestra en la tabla 4.3, un pilar destinado a la misma función, para la misma carga, con la misma geometría y sección transversal cuadrada, puede emitir desde 201 kg CO_{2eq}. (IC = 3,6 kgCO₂/MPa), hasta 439 kg CO_{2eq}. (IC = 16,5 kgCO₂/MPa), según una decisión de diseño, adoptada por el proyectista estructural en la fase de diseño y combinada con la tecnología del hormigón en la optimización de la mezcla y diferentes cementos. En números relativos puede ir de 1 a 2,2 veces, lo cual es muy expresivo.

Esta enorme ventaja obtenida en un solo tramo de pilar si extrapolada simplificada, y multiplicada por el total de 1008 tramos de pilar de esta estructura, podría ahorrar 240 t de CO_{2eq}. En otras palabras, de manera conservadora, si un análisis cuidadoso de los pilares lograra reducir, por ejemplo, apenas 30 kg de CO_{2eq} por tramo, la reducción de gases de efecto invernadero en esta estructura podría ser del orden de 30 toneladas de CO_{2eq}, solo en pilares.

5. Conclusiones

El texto de las normas MC 2020 [1] y Eurocode 2 [2] conducen a pilares con un menor volumen de hormigón, acero y encofrado, ya que prescriben el coeficiente $\alpha_{cc} = 1,0$, para f_{ck} a los 28 días, siendo que el Eurocode 2 [2] prescribe $\alpha_{cc} = 1,0$ hasta con f_{ck} a los 56 días. Por otro lado, la ABNT NBR 6118 de 2023 [4], que adoptan un valor fijo de $\alpha_{cc} = 0,85$, dio lugar a un detallado con mayor consumo de material.

En este estudio, para $f_{ck} = 50$ MPa a los 56 días, 0,9% cuantía de armadura, Eurocode 2 [2], dio como resultado el tramo del pilar con un volumen de hormigón de $0,58 \text{ m}^3$, 55 kg de acero y $5,2 \text{ m}^2$ de encofrado, mientras que para $f_{ck} = 20$ MPa a los 28 días, 0,4% de cuantía de armadura, ABNT NBR 6118 [3] [4], dio como resultado el tramo del pilar con $1,37 \text{ m}^3$ de hormigón, 82 kg de acero y $7,95 \text{ m}^2$ de encofrado. Extrapolando groseramente al total de 1008 tramos de pilares, la elección inteligente de las opciones de dimensionamiento en este edificio podría suponer una desmaterialización, es decir, dejar de utilizar 796 m^3 de hormigón, 27 t de acero y 2.772 m^2 de encofrado.

En general, las alternativas de diseño del tramo de pilar con una cuantía de armadura mínima, independientemente de las normas utilizadas, dieron como resultado valores de emisión de CO_{2eq} más bajos. En concreto el Eurocode 2 [2], que considera $\alpha_{cc} = 1,0$, con f_{ck} a los 56 días, conduce a mejores indicadores de ecoeficiencia (IC), para cualquier detallado en comparación con las otras normas.

El diseño realizado por la actual norma brasileña ABNT NBR 6118:2023 [4] presentó los peores índices de IC, es decir, en este estudio, en particular, fue la norma que menos contribuye a la sostenibilidad de los pilares cortos.

En este estudio, para $f_{ck} = 50$ MPa a los 56 días, 0,9% de cuantía de armadura, Eurocode 2 [2], dio como resultado el tramo de pilar con una emisión de $182 \text{ kg } CO_{2eq}$. (IC = $3,2 \text{ kgCO}_2/\text{MPa}$), mientras que para $f_{ck} = 20$ MPa a los 28 días, 4% de cuantía de armadura, ABNT NBR 6118 [3] [4], para la misma carga, función y seguridad, resultó en una emisión de $437 \text{ kg } CO_{2eq}$. (IC = $16,4 \text{ kgCO}_2/\text{MPa}$) de gases de efecto invernadero. Extrapolando de manera grosera al total de 1008 tramos de pilares de este edificio podría suponer una reducción de las emisiones de gases de efecto invernadero de hasta 257 toneladas de CO_{2eq} .

Este estudio también demostró que el uso de cemento CS, independientemente de las diferentes normas consideradas aquí, resultó en menores emisiones de CO_{2eq} en comparación con el cemento de alta resistencia inicial CR, a pesar de que fue necesario consumir más cemento CS para la misma resistencia y edad.

De hecho, en un proyecto estructural destinado a un proyecto arquitectónico definido, no hay tanta libertad como la considerada en este estudio, porque a menudo las limitaciones arquitectónicas y funcionales no permiten las dimensiones óptimas desde el punto de vista estructural. Ciertamente, en casos reales, las ganancias serán menores, pero no se pueden desconsiderar ni omitir en los estudios para verificar la seguridad y optimización del proyecto en la fase de diseño.

Este estudio buscó demostrar que las decisiones de diseño, combinadas inteligentemente con la tecnología del hormigón, pueden influir significativamente en la sostenibilidad, es decir, pueden contribuir efectivamente a la desmaterialización y reducción de las emisiones de gases de efecto invernadero de la estructura terminada.

Finalmente, tomando como referencia los resultados obtenidos en este estudio, los autores entienden que para obtener menores emisiones de gases de efecto invernadero se deben seguir las premisas de cálculo de resistencia de diseño establecidos en el Eurocode 2:2023 [2], utilizando las mayores clases de resistencia de hormigón (permitiendo así menores consumos de material) y controles a una edad de referencia de 56 días conducen a resultados más sostenibles.

A modo de sugerencia, se entiende que los estudios que incluyan, además de pilares cortos, otro tipo de elementos estructurales (vigas, losas, cimentaciones, entre otros) pueden ser objeto de estudios similares, con el fin de comprobar las conclusiones aquí mencionadas.

6. Referencias

- [1] Fédération Internationale du Béton – fib (CEB-FIP). **fib Model Code for Concrete Structures 2020**. Lausanne, Switzerland, 2023. 1256 p.
- [2] EUROPEAN COMMITTEE FOR STANDARDIZATION. **EN 1992-1-1**: Eurocode 2: Design of concrete structures - Part 1-1: General rules and rules for buildings, bridges and civil engineering structures. Brussels, 2023. 402 p.
- [3] ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS **ABNT NBR 6118:2014**. Projeto de Estruturas de Concreto - Procedimento. 3 ed. Rio de Janeiro, 2014. 238 p.
- [4] ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS **ABNT NBR 6118:2023**. Projeto de Estruturas de Concreto. Rio de Janeiro, 2023. 242 p.
- [5] 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.
- [6] ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS **ABNT NBR 6123:1998**. Forças devidas ao vento em edificações. Rio de Janeiro, 1998. 110 p.
- [7] ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS **ABNT NBR 15421:2023**. Projeto de estruturas resistentes a sismos. Rio de Janeiro, 2023. 27 p.
- [8] ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS **ABNT NBR 6120:2019**. Ações para o cálculo de estruturas de edificações. Rio de Janeiro, 2019.
- [9] ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS **ABNT NBR 15200:2012**. Projeto de estruturas de concreto em situação de incêndio. 2 ed. Rio de Janeiro, 2012. 48 p.
- [10] HELENE, Paulo. **Contribuição ao Estabelecimento de Parâmetros para Dosagem e Controle dos Concretos de Cimento Portland**. São Paulo, Universidade de São Paulo, Escola Politécnica, Programa de Pós-graduação em Engenharia Civil, Departamento de Engenharia de Construção Civil, 1987. 278 p. (Tese de Doutorado)
- [11] ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS **ABNT NBR 8681:2003**. Ações e segurança nas estruturas - Procedimento. Rio de Janeiro, 2003. 18 p.
- [12] EUROPEAN COMMITTEE FOR STANDARDIZATION. **EN 1990:2002+A1:2005**: Eurocode - Basis of structural design. Brussels, 2002. 116 p.
- [13] EUROPEAN COMMITTEE FOR STANDARDIZATION. **EN 197-1:2011**: Cement – Part 1: Composition, specifications and conformity criteria for common cements. Brussels, 2011. 38 p.
- [14] EUROPEAN COMMITTEE FOR STANDARDIZATION. **EN 206:2013+A2:2021**: Concrete - Specification, performance, production and conformity. Brussels, 2013. 92 p.
- [15] DAMINELLI, B.L.; PILEGGI, R. G.; JUAN, 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.
- [16] 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.
- [17] 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.