

Nuevos cementos ternarios

New ternary cements

Miguel Ángel Sanjuán Barbudo^a, César Bartolomé Muñoz^b

^a Doctor en Ciencias Químicas. Instituto Español del Cemento y sus Aplicaciones (IECA). Jefe del Área de Cementos y Morteros. masanjuan@ieca.es

^b Ingeniero de Caminos, Canales y Puertos. Instituto Español del Cemento y sus Aplicaciones (IECA). Director de Tecnología. cbartolome@ieca.es

RESUMEN

El sector cementero, en línea con la emergencia climática europea declarada en 2019, ha desarrollado su 'hoja de ruta' para alcanzar la neutralidad climática en 2050. La segunda etapa de esta 'hoja de ruta' implica la producción y utilización de cementos con un bajo contenido de clínker. En consecuencia, la norma UNE-EN 197-5:2021 incluye a los cementos Portland compuestos CEM II/C-M y cementos compuestos CEM VI, los cuales se incorporaron en 2024 en la Instrucción para la recepción de cementos (RC-16) como cementos comunes para uso estructural. En consecuencia, es necesario que se desarrollen recomendaciones técnicas como las que se presentan en este artículo para facilitar su utilización.

ABSTRACT

The cement sector, in line with the European climate emergency declared in 2019, has developed its 'roadmap' to achieve climate neutrality by 2050. The second stage of this 'roadmap' involves the production and use of low clinker cements. Accordingly, the UNE-EN 197-5:2021 standard includes the composite Portland cements, CEM II/C-M, and the composite cements, CEM VI, both of them were incorporated in 2024 in the Spanish Code on Cement Reception (RC-16) as common cements for structural use. Therefore, it is necessary to develop a series of technical recommendations. Finally, this paper presents a few numbers of technical recommendations to ease of use.

PALABRAS CLAVE: cemento ternario, factor clínker, adiciones.

KEYWORDS: ternary cement, clinker factor, additions.

1. Introducción

La emergencia climática europea declarada el 28 de noviembre de 2019 mediante resolución del Parlamento Europeo, junto con los compromisos del 'Pacto Verde Europeo' reglamentados mediante la Ley Europea del Clima y la Ley 7/2021, de 20 de mayo, de cambio climático y transición energética, obligan a adoptar medidas urgentes para la mitigación del cambio climático.

El sector cementero, conocedor de esta emergencia, ha desarrollado su 'hoja de ruta' para alcanzar la neutralidad climática en 2050 y conseguir hacer frente al objetivo de reducción del 55% de emisiones en 2030 con relación al nivel de emisiones de 1990 (Figura 1).

La hoja de ruta mencionada hace un planteamiento holístico para lograr la descarbonización del sector del cemento y del

hormigón y cubre toda la cadena de valor del material, desde la producción de clínker hasta la (re-)carbonatación del hormigón en la etapa de servicio y fin de vida.

Para cumplir los compromisos adquiridos para el año 2030 y hasta que se desarrollen tecnologías alternativas como la captura de CO₂, la principal estrategia de descarbonización del cemento, aunque no la única, es la reducción del factor clínker del cemento, lo que tiene una triple implicación. Primero, es necesario incrementar

el contenido de adición del cemento. Segundo, es necesario encontrar nuevas adiciones sustitutivas de las clásicas: caliza, ceniza volante, escoria de horno alto y puzolana natural. Por último, hay que avanzar en el desarrollo de nuevos cementos que permitan una mayor combinación de adiciones.

Es en esta última estrategia en la que se encuadran los nuevos cementos ternarios que se abordan en este artículo.

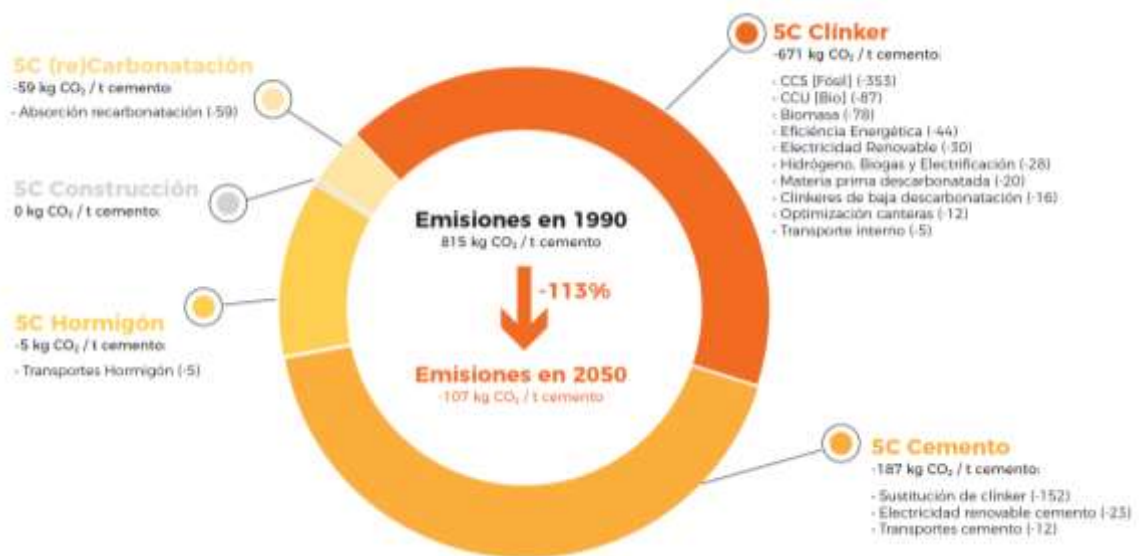


Figura 1. Hoja de ruta de la industria cementera española para alcanzar la neutralidad climática en 2050 (Edición 2024).

La industria cementera está trabajando en estos nuevos cementos y, de hecho, en julio de 2021 se publicó la norma UNE-EN 197-5 [1], que incluye a los cementos Portland compuestos CEM II/C-M y a los cementos compuestos CEM VI, los cuales se incluyeron, en abril de 2024, en la Instrucción para la recepción de cementos (RC-16) como cementos comunes para uso estructural [2].

Ahora bien, al tratarse de nuevos cementos, hay poca experiencia en España en cuanto a su empleo en aplicaciones estructurales. Por tanto, sería conveniente recabar más información en obra en cuanto al desarrollo de su evolución de resistencias mecánicas, prestaciones durables a largo plazo, tiempos de fraguado en función de los aditivos, etc. Por ello,

se considera necesario que se elaboren unas recomendaciones técnicas para el uso de estos cementos: tipologías estructurales en las que se pueden utilizar, reología de los hormigones fabricados con ellos, plazos de desencofrado y descimbrado, tiempos de curado, etc. Algunas de estas recomendaciones se incluirán en este artículo en base a los resultados de los ensayos realizados previos a su normalización.

2. Reducción del factor clínker mediante la producción de cementos ternarios

La industria cementera española ya ha ido avanzando en la mejora de la eficiencia

energética y reducción de las emisiones de dióxido de carbono y Oficemen anunció su intención de contribuir al Pacto Verde europeo trabajando por la neutralidad climática a lo largo de toda la cadena de valor del cemento y del hormigón [3, 4]. La Figura 1 presenta las cinco etapas consideradas en este enfoque denominado de las 5Cs (clínker, cemento, concreto/hormigón, construcción, carbonatación).

Una de las metas que se debería de alcanzar a nivel mundial es la reducción del factor clínker por debajo de 0,60 antes de 2050. Para ello, hay que utilizar cementos con un mayor contenido de adiciones con respecto a los que se producen actualmente, y que sean adecuados para fabricar hormigones.

La hoja de ruta del sector cementero español incluye esta vía para la descarbonización. Sin embargo, es necesario el apoyo de la Administración para implementar las medidas propuestas en línea con las recomendaciones del Panel Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático (IPCC).

En particular, los cementos ternarios son conglomerantes compuestos por clínker de cemento Portland y otros dos constituyentes, como, por ejemplo, la escoria granulada de horno alto (S), la ceniza volante sílicea (V), la puzolana natural (P) o la caliza (L o LL).

3. Norma europea de especificaciones del cemento Portland compuesto CEM II/C-M y del cemento compuesto CEM VI

El Comité Europeo de Normalización (CEN) aprobó en febrero de 2021 la nueva norma

europea de especificaciones del cemento Portland compuesto CEM II/C-M y del cemento compuesto CEM VI, y la publicó en mayo de 2021. Posteriormente, la versión española la publicó UNE en tiempo record el 9 de julio de 2021 (Figura 2), es decir, la UNE-EN 197-5 [1].



Figura 2. Plazos de publicación de la norma armonizada europea UNE-EN 197-5:2021.

Los cementos de esta norma aparecen como respuesta a la necesidad de la sociedad de actuar frente al cambio climático (Figura 3).

La escoria granulada de horno alto (S), la ceniza volante sílicea (V) y la puzolana natural (P) son materiales puzolánicos bien conocidos que forman parte de los cementos Portland europeos desde hace más de 40 años [5].

La caliza, por su parte, modifica las propiedades del hormigón como consecuencia de los efectos de dilución, relleno de poros y reacción química. Además, finamente molida, acelera la reacción de hidratación del cemento Portland a edad temprana. Por otro lado, la cantidad de caliza que puede reaccionar con el aluminato tricálcico, C_3A , es aproximadamente de un 2-6%. Con todo ello, la norma europea UNE-EN 197-5:2021 [1] limita el contenido de caliza al 20% en los cementos que recoge la norma.

Tipos principales	Designación de los productos (tipos de cemento)		Composición (% en masa ¹)											Componentes adicionales minoritarios
			Componentes principales											
			Clinker	Escoria de horno alto	Humo de sílice	Puzolana		Cenizas volantes		Esquistos calcinados	Caliza			
	Natural	Natural				Silíceas	Calcáreas							
	Denominación	Designación	K	S	D ²	P	Q	V	W	T	L ¹	LL ¹		
CEM II	Cemento pórtland compuesto ⁴	CEM II/C-M	50-64	←-----36-50-----→									0-5	
CEM VI	Cemento com- puesto	CEM VI (S-P)	35-49	31-59	—	6-20	—	—	—	—	—	—	0-5	
		CEM VI (S-V)	35-49	31-59	—	—	—	6-20	—	—	—	—	0-5	
		CEM VI (S-L)	35-49	31-59	—	—	—	—	—	—	6-20	—	0-5	
		CEM VI (S-LL)	35-49	31-59	—	—	—	—	—	—	—	6-20	0-5	

Figura 3. Composición del cemento Portland compuesto CEM II/C-M (S-V/P) y cemento compuesto CEM VI (S-V/P).

La UNE-EN 197-5 “Cemento. Parte 5: Cemento Portland compuesto CEM II/C-M y cemento compuesto CEM VI” [1], se enmarca en la estrategia de la segunda etapa de las 5Cs (Figura 4). Estos cementos contienen una elevada cantidad de adiciones en proporciones diferentes a las normalizadas en la UNE-EN 197-1:2011, tal y como se observa en la Figura 3.

En el caso de los cementos CEM II/C-M (S-V) y CEM VI (S-V) se observa que su composición se encuentra entre la de los cementos CEM II/B-S o CEM III/A y la de los CEM V/A o CEM V/B de la UNE-EN 197-1:2011, respectivamente (Figura 5). Por tanto, se puede pensar que las propiedades de los cementos CEM II/C-M (S-V) y CEM VI (S-V) serán intermedias entre las propiedades de los cementos que los rodean en la Figura 5. Por otro lado, la idoneidad para el uso previsto de estos tipos de cemento, es decir, la producción de hormigón estructural se ha evaluado experimentalmente en tres programas de ensayo evaluados por el CEN/TC 51/WG 6 (Comité Europeo de Normalización “Cemento y cales de construcción”) [6-8], y las conclusiones las aprobó el CEN/TC 51 “cementos y cales de construcción”.



Norma Española
UNE-EN 197-5
Julio 2021

Cemento

Parte 5: Cemento Portland compuesto CEM II/C-M y
Cemento compuesto CEM VI

Esta norma ha sido elaborada por el comité técnico
CTN 80 Cementos y cales, cuya secretaría desempeña
OFICEMEN.



Figura 4. Portada de la UNE-EN 197-5:2021.

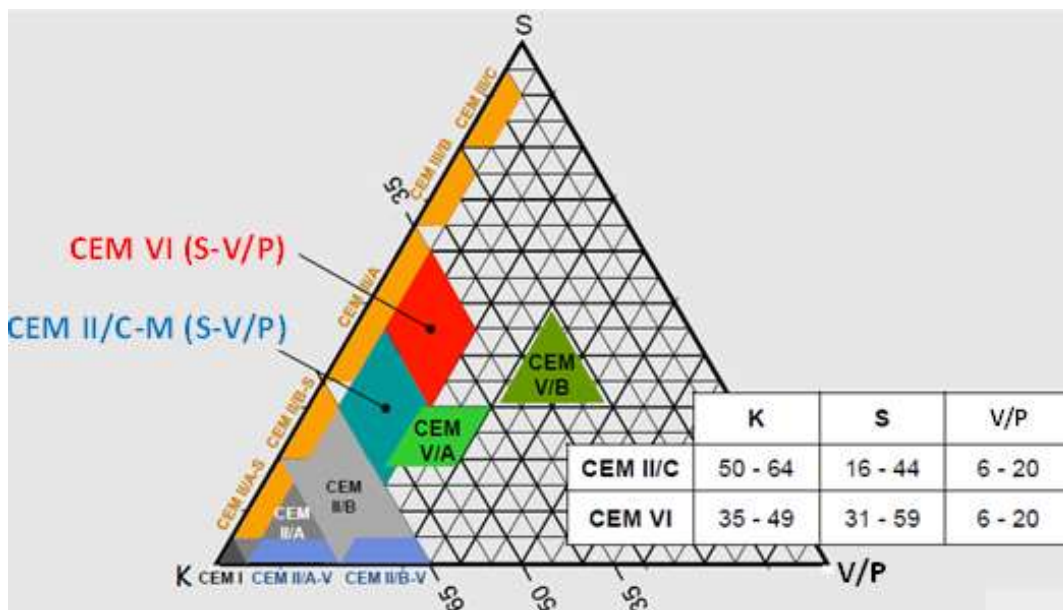


Figura 5. Composición del cemento Portland compuesto CEM II/C-M (S-V/P) y cemento compuesto CEM VI (S-V/P).

4. Características de los cementos Portland compuestos CEM II/C-M y cementos compuestos CEM VI

En el Anejo Técnico para la reglamentación de los cementos de la UNE-EN 197-5:2021 realizado por el CTN-UNE 80, y presentado por la Secretaría General Técnica del MITMA a la Comisión Permanente del Cemento para la incorporación del cemento Portland compuesto CEM II/C-M y cemento compuesto CEM VI en el RC-16 se realizó una asimilación de las propiedades de estos cementos a las de los cementos comunes de la UNE-EN 197-1:2011 [9]. A continuación, se presentan los cementos de ambas normas que pueden considerarse equivalentes en cuanto a sus propiedades mecánicas y durables.

4.1 Cemento Portland compuesto CEM II/C-M

Las propiedades del cemento Portland compuesto CEM II/C-M son similares a las del cemento de horno alto CEM III/B o a las del

cemento puzolánico CEM IV/B (V), en función de sus constituyentes, tal y como se detalla en los subapartados siguientes.

4.1.1. Cemento Portland compuesto CEM II/C-M (S-V/P/Q) y CEM II/C-M (D-S)

Las propiedades del CEM II/C-M (S-V/P/Q) y CEM II/C-M (D-S) son similares a las del cemento de horno alto CEM III/B.

4.1.2. Cemento Portland compuesto CEM II/C-M (S-L/LL)

De igual manera que en el caso anterior, el cemento Portland compuesto CEM II/C-M (S-L/LL) se puede asimilar al cemento de horno alto CEM III/B.

4.1.3. Cemento Portland compuesto CEM II/C-M (D-V/P/Q) y CEM II/C-M (V/P/Q-L/LL)

En cuanto al cemento Portland compuesto CEM II/C-M (D-V/P/Q) y al cemento Portland compuesto CEM II/C-M (V/P/Q-L/LL), hay que destacar que sus características son más parecidas a las del cemento puzolánico CEM IV/B (V).

4.2 Cemento compuesto CEM VI

Las propiedades del cemento compuesto CEM VI, independientemente de sus constituyentes, son similares a las del cemento de horno alto CEM III/B.

5. Recomendaciones técnicas para la utilización de los cementos Portland compuestos CEM II/C-M y cementos compuestos CEM VI

Como consecuencia de las características de los cementos Portland compuestos CEM II/C-M y cementos compuestos CEM VI presentadas en el apartado anterior, las tipologías de hormigones, los tiempos de curado y descimbrado y demás aspectos técnicos serán los mismos que los de cemento de horno alto CEM III/B o a las del cemento puzolánico CEM IV/B (V).

5.1 Recubrimientos mínimos para las clases de exposición relacionadas con la corrosión y clases de exposición XF y XA

5.1.1. Recubrimientos mínimos para las clases de exposición relacionadas con la corrosión por carbonatación

Los recubrimientos mínimos (mm), $C_{\min}$, para las clases de exposición relacionadas con la corrosión por carbonatación (XC1 – XC2) serán los indicados como “Otros tipos de cementos o en el caso de empleo de adiciones al hormigón” en el Código Estructural (CodEs) que van desde los 20 mm a los 30 mm [10].

5.1.2. Recubrimientos mínimos para las clases de exposición relacionadas con la corrosión por cloruros

Los recubrimientos mínimos (mm), $C_{\min}$, para las clases de exposición relacionadas con la corrosión por cloruros (XS1, XS2, XS3, XD1, XD2, XD3) son las mismas para los CEM III/B y para los CEM IV/B y, por tanto, también son

los mismos para los cementos Portland compuestos CEM II/C-M y cementos compuestos CEM VI. Los recubrimientos mínimos (mm), $C_{\min}$, para hormigón armado van desde 25 mm a 35 mm para una vida útil de proyecto de 50 años [10]. El uso de estos cementos no está reglamentado para hormigón pretensado.

5.1.3. Recubrimientos mínimos para las clases de exposición XF

Los recubrimientos mínimos (mm), $C_{\min}$, para las clases de exposición relacionadas con el ataque al hormigón por ciclos hielo/deshielo con sales fundentes o sin ella (XF), son diferentes para los CEM III/B y para los CEM IV/B.

En función de la resistencia característica del hormigón y de la vida útil de proyecto los recubrimientos mínimos (mm), $C_{\min}$, irán de 15 mm a 50 mm para el CEM III/B, y de 10 mm a 40 mm para el CEM IV/B (otros tipos de cemento) [10].

5.1.4. Recubrimientos mínimos para las clases de exposición XA “Ataque químico al hormigón”

Los recubrimientos mínimos (mm), $C_{\min}$, para la clase de exposición XA “Ataque químico al hormigón” varía entre 40 mm y 50 mm para la clase de exposición XA1 tanto para el CEM III/B como para el CEM IV/B.

Ambos cementos presentan un buen comportamiento en ambientes químicamente agresivos debido al reducido contenido de clínker [10].

5.2 Tiempos de curado

Para la estimación de la duración mínima del curado D (días) hay que considerar el ambiente al que va a estar expuesto el hormigón (K), su temperatura (L), un parámetro básico de curado (D_0) y un parámetro función del tipo de cemento (D_1) [10].

Este parámetro D_1 es 4 para el CEM III/B y 2 para el CEM IV/B. Esto indica que es

necesario un curado más prolongado en el caso de los cementos compuestos CEM VI, al igual que en los CEM III/B, y en algunos cementos Portland compuestos CEM II/C-M.

5.3 Recomendaciones para la selección del cemento de la UNE-EN 197-5:2021 a emplear en hormigones estructurales

La Instrucción para la Recepción de Cementos [2] regula las condiciones que debe cumplir el cemento para su empleo. El anejo 6 del Code [10] incluye unas recomendaciones para facilitar la selección del tipo de cemento a emplear en función de la aplicación del hormigón, de las circunstancias de hormigonado, y de las condiciones de agresividad ambiental a las que va a estar sometido el hormigón.

Al igual que los CEM III/B y CEM IV/B, los cementos Portland compuestos CEM II/C-M y cementos compuestos CEM VI son recomendables para la fabricación de hormigón en masa y hormigón armado, en general, y más concretamente son muy adecuados para la fabricación de hormigón en masa y armado en grandes volúmenes debido a su reducido calor de hidratación.

También resultan muy adecuados los cementos CEM II/C-M y CEM VI en la elaboración de hormigones con áridos potencialmente reactivos y cimentaciones de hormigón en masa, siendo adecuados en cimentaciones de hormigón armado.

Estos cementos igualmente se recomiendan para la realización obras portuarias y marítimas.

Asimismo, se recomiendan en la construcción de presas de hormigón vibrado o compactado, y de tubos de hormigón, canales y otras aplicaciones hidráulicas.

En cuanto a la selección del tipo de cemento en función de las circunstancias de hormigonado, estos cementos se pueden considerar como “fríos”, por lo que son

recomendables en el caso de hormigonado en tiempo caluroso.

Para el empleo de estos cementos en función de las clases de exposición tan sólo hay que tener en cuenta el apartado 5.1 que nos recuerda los recubrimientos mínimos para las clases de exposición relacionadas con la corrosión de las armaduras y con las clases de exposición XF y XA.

En estos casos hay que evaluar la viabilidad técnica de emplear el cemento Portland compuesto CEM II/C-M y el cemento compuesto CEM VI con el recubrimiento necesario.

Por último, indicar que, en ocasiones, algunos proyectistas evitan la prescripción de cementos altamente adicionados en clases de exposición ambiental XC con la justificación de que el menor contenido en clínker reduce la reserva alcalina del hormigón. Ahora bien, una correcta dosificación del hormigón de acuerdo con los criterios que marca el Código Estructural para este tipo de cementos unido a una correcta prescripción del recubrimiento garantiza, la durabilidad de la estructura de hormigón para la vida útil de diseño.

En resumen, la utilización de cementos ternarios CEM II/C-M y CEM VI es técnicamente viable para el diseño de estructuras de hormigón en masa y hormigón armado independientemente de la clase de exposición ambiental a la que estén sometidas, siempre y cuando se cumplan las prescripciones del Código Estructural

5. Conclusión

La norma europea de especificaciones del cemento Portland compuesto CEM II/C-M y del cemento compuesto CEM VI la publicó UNE el 9 de julio de 2021, es decir, la UNE-EN 197-5:2021. Estos cementos reflejan el compromiso del sector cementero europeo frente al cambio climático. Estos cementos

contribuirán positivamente a conseguir el objetivo de la neutralidad climática en 2050.

Las recomendaciones para su uso son similares a las que se aplican a los cementos Portland comunes CEM III/B y CEM IV/B de la UNE-EN 197-1:2011.

En el informe realizado por el CTN-UNE 80 y evaluado por la Comisión Permanente del Cemento para la incorporación del cemento Portland compuesto CEM II/C-M y cemento compuesto CEM VI en el RC-16 se realizó una asimilación de las propiedades de estos cementos a las del cemento de horno alto CEM III/B o a las del cemento puzolánico CEM IV/B (V), en función de sus constituyentes. Por tanto, las tipologías de hormigones, tiempos de curado y descimbrado, recubrimientos de la armadura y demás aspectos técnicos serán los mismos que los de estos cementos.

Referencias

- [1] UNE-EN 197-5:2021 “Cemento. Parte 5: Cemento Portland compuesto CEM II/C-M y cemento compuesto CEM VI”.
- [2] Real Decreto 256/2016, de 10 de junio, por el que se aprueba la Instrucción para la recepción de cementos (RC-16). «BOE» núm. 153, de 25 de junio de 2016, páginas 45755 a 45824 (70 págs.). <https://www.boe.es/eli/es/rd/2016/06/10/256>
- [3] Hoja de ruta de la industria cementera española para alcanzar la neutralidad climática en 2050. Agrupación de Fabricantes de Cemento de España, Oficemen, 2024.
- [4] Sanjuán, M.A.; Argiz, C.; Mora, P.; Zaragoza, A. Carbon Dioxide Uptake in the Roadmap 2050 of the Spanish Cement Industry. *Energies* 2020, 13, 3452. <https://doi.org/10.3390/en13133452>
- [5] H F W Taylor. Cement Chemistry. Thomas Telford Ltd; Second Edition, 1 de enero de 1997. 480 pp. ISBN-10 : 0727725920.
- [6] Olivier Germain (CRIC), Eric Brouard (Lafarge LCR), Christian Pierre (CRIC), Alain Chonier (Lafarge LCR). Joint report CRIC – Lafarge, Development of new ternary Cements with reduced Clinker content. LAFARGE RESEARCH CENTER 95 rue du Montmurier, 38291 Saint Quentin Fallavier, France & CENTRE DE RECHERCHE DE L’INDUSTRIE CIMENTIERE (C.R.I.C.), Etablissement reconnu par application de l’Arrêté-Loi du 30 janvier 1947, RESEARCH DEPARTMENT, Avenue Ad. Buyllaan, 87, 1050 BRUSSELS, Belgium. Diciembre 2011. 71 pp. (Documento CEN/TC 51/WG 6 N 333).
- [7] Reiner Haerdtl. Assessment of the “fitness for use” for cements of the composition K-S-V to be included in EN 197-1 as cement type CEM II/C-M (S-V) and CEM VI (S-V). Heidelberg Technology Center (HTC). Julio, 2014. 32 pp. (Documento CEN/TC 51 N 1232).
- [8] C.R.I.C. Assessment of the fitness for the use to produce structural concrete of new cement compositions K-S-P with the scope of their standardization as common cements. CENTRE DE RECHERCHE DE L’INDUSTRIE CIMENTIERE (C.R.I.C.), Etablissement reconnu par application de l’Arrêté-Loi du 30 janvier 1947, RESEARCH DEPARTMENT, Avenue Ad. Buyllaan, 87, 1050 BRUSSELS, Belgium. Marzo, 2018, 81 pp. (Documento CEN/TC 51 N 1382).
- [9] CTN-UNE 80. Anejo Técnico para la reglamentación de los cementos de la UNE-EN 197-5:2021. 34 pp.
- [10] Real Decreto 470/2021, de 29 de junio, por el que se aprueba el Código Estructural (CodEs). «BOE» núm. 190, de 10 de agosto de 2021, páginas 97664 a 99452 (1789 págs.). <https://www.boe.es/eli/es/rd/2021/06/29/470>