

04-049

A TOOL FOR DE-CARBONISING ENGINEERING PROJECTS

Medina Martínez, Gabriel ⁽¹⁾; Fernández-Robles, Laura ⁽¹⁾; Castejón-Limas, Manuel ⁽¹⁾

⁽¹⁾ Universidad de León

The construction industry is facing the challenge of climate neutrality, which requires a coordinated approach of strategies by the different entities participating in a construction project. Engineering project sustainability is one of the strategic areas to achieve the European Union's Fit for 55 objective: "Reduce CO₂ emissions by at least 55% by 2030." In this context, and in the absence of real alternatives to cement-based materials for use in projects, strategies must be proposed through which they can be de-carbonised. Cement-based materials are responsible for 30% of the global CO₂ emissions generated throughout the useful life of infrastructures, so the search for alternative binders with a lower carbon footprint would increase the sustainability of these projects by improving the structure's sustainability contribution index (SSCI). This research work evaluates the reduced CO₂ emitted in a project in which the concrete structures are made with conventional cements compared to those that are made with new low-carbon cements.

Keywords: descarbonization; strategy; materials; sustainability; projects

UNA HERRAMIENTA HACIA LA DESCARBONIZACIÓN DE LOS PROYECTOS DE INGENIERÍA

La industria de la construcción se enfrenta al reto de la neutralidad climática, lo que requiere el planteamiento coordinado de estrategias por parte de los diferentes entes participantes en un proyecto constructivo. La sostenibilidad de los proyectos de ingeniería constituye uno de los vectores estratégicos para alcanzar el objetivo 55 de la Unión Europea "reducir al menos un 55% las emisiones de CO₂ en el 2030". En este contexto, y ante la ausencia de alternativas reales a los materiales de base cemento en la ejecución de nuestros proyectos es necesario plantear estrategias que permitan descarbonizarlos. Los materiales de base cemento son los responsables de un 30% de las emisiones globales de CO₂ generadas a lo largo de la vida útil de nuestras infraestructuras, por lo que la búsqueda de conglomerantes alternativos de reducida huella de carbono permitiría incrementar la sostenibilidad de dichos proyectos a través de una mejora del índice de contribución de la estructura a la sostenibilidad (ICES). El presente trabajo de investigación evalúa la reducción de emisiones de CO₂ que tiene lugar en un proyecto en el que las estructuras de hormigón son ejecutadas con cementos convencionales respecto a aquellas que incorporan nuevos cementos de bajo carbono.

Palabras clave: descarbonización; estrategia; materiales; sostenibilidad; proyectos



© 2023 by the authors. Licensee AEIPRO, Spain. This article is licensed under a Creative Commons Attribution-NonCommercial-NoDerivatives 4.0 International License (<https://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/4.0/>).

1. INTRODUCCIÓN

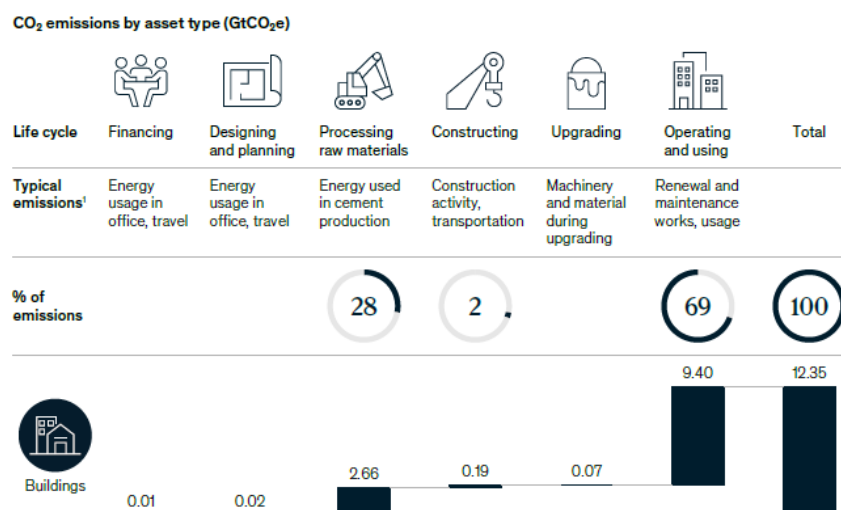
El sector de la construcción es considerado el principal consumidor de materias primas y recursos naturales (~40% del consumo anual de áridos (gravas, arena, etc.) y ~16% del consumo anual de agua), así como el responsable del ~30% de las emisiones globales del efecto invernadero (GEI) (Soliman et al. 2022). El hormigón es el material de construcción más utilizado en el mundo, con una demanda anual de $30 \cdot 10^9$ toneladas (Küpfer, Bastien-Masse y Fivet 2023). Este composite, presente en todos los proyectos de ingeniería, está constituido por un esqueleto granular (arena y grava) que es unido como resultado del proceso de hidratación que experimenta el cemento en presencia del agua de amasado dando lugar finalmente a un material monolítico en estado endurecido. A nivel composicional, el cemento representa entre un 10-15% del volumen de un hormigón (4,1 billones de toneladas consumidas en 2022, según Cembureau (2023)) siendo el responsable principal de las emisiones de CO₂ (80-90% del total de emisiones) asociadas a la fabricación de un hormigón (Plaza et al. 2021).

La construcción de los edificios de uso residencial y no residencial provoca el 40% de las emisiones de CO₂, aproximadamente un 40% de los residuos generados y 40% de consumo de recursos naturales (Martínez et al. 2022). El proceso constructivo de otro tipo de infraestructuras, tales como carreteras, también provocan efectos adversos sobre el medio ambiente asociados a su fase de construcción, especialmente vinculado al consumo elevado de recursos naturales, así como el empleo de maquinaria pesada propulsada por diésel (Martínez et al. 2022).

Dado el papel tan significativo de este sector sobre las GEI, junto con el actual contexto socio-político de la Unión Europea “reducir al menos un 55% las emisiones de CO₂ en el 2030” (objetivo 55) requiere que nuestros proyectos de ingeniería sean sostenibles priorizando aquellas alternativas que minimicen las emisiones de CO₂.

La gestión sostenible de los proyectos de ingeniería plantea la combinación de aspectos tales como, procedimientos constructivos sostenibles, uso de materiales y productos saludables y circulares..., durante las distintas fases de un proyecto constructivo (diseño y construcción), garantizando de este modo minimizar sus impactos medioambientales (descarbonizar la construcción) y maximizar su efecto positivo en la economía y sociedad (Ershadi y Goodarzi 2021).

Figura 1. Emisiones CO₂ de un edificio (Fuente: McKinsey & Company (2021))



Las emisiones de CO₂ vinculadas a un edificio (figura 1) se dividen en (McKinsey & Company 2021): i) emisiones de CO₂ embebidas (2.66 GtCO_{2e}) asociadas al procesamiento de las materias primas (especialmente la fabricación del cemento) y fase de construcción; y ii) emisiones de CO₂ operativas (9.40 GtCO_{2e}) asociadas al mantenimiento, reparación y uso (especialmente consumo energético para la climatización) a lo largo de la vida útil del edificio.

En este contexto, en los últimos años se plantea el reto de descarbonizar el sector de la construcción, y por ende nuestros proyectos de ingeniería, a través del establecimiento de estrategias tales como: i) considerar el carbono de ciclo de vida (embebido y operativo), desde la fase inicial de diseño de un proyecto hasta la finalización de su vida de servicio; ii) implementar el concepto de economía circular a través de la minimización de materiales y consumo energético a través de la reutilización de residuos o productos secundarios y reciclado de materiales de construcción; y iv) búsqueda de conglomerantes alternativos (nuevos eco-cementos) de reducida huella de carbono a través de la valorización de subproductos industriales, lo que permitiría reducir hasta un 12% la emisiones de CO₂ embebidas (McKinsey & Company 2021).

2. OBJETIVOS

El presente trabajo de investigación pretende establecer como herramienta para la descarbonización de los proyectos de ingeniería la valorización de los lodos de granitos procedentes de la industria ornamental como adición en la fabricación de cementos binarios con un menor contenido en clínker.

3. METODOLOGÍA

3.1. Caracterización de los materiales

3.1.1. Lodo granítico

El lodo granítico procede de la industria ornamental del granito de la localidad de Quintana de la Serena – Badajoz, perteneciente a la comunidad autónoma de Extremadura (España). Este subproducto industrial se genera durante el proceso de corte de los bloques de granito, de los cuales se extraen tableros laminados de espesor variable y una gran diversidad de tamaños. El agua, más el polvo granítico es recogido mediante un sistema de canaletas que desembocan en unas piscinas donde se va decantando el lodo. Una vez llenas, se vacían a través de medios mecánicos para ser depositados actualmente en escombreras/ vertederos.

Figura 2. Lodos depositados en escombrera



Este subproducto se caracteriza por estar constituido mayoritariamente por SiO_2 (~69% en peso) y Al_2O_3 (~15% en peso) así como otros óxidos en menor proporción, tales como K_2O (~4% en peso), Na_2O (~3.6% en peso), Fe_2O_3 (~2.5% en peso) y CaO (~2.4% en peso). Adicionalmente, indicar que el lodo de granito presenta un 22,4% en peso de sílice reactiva, situándose este valor próximo al 25% en peso exigido para una puzolana en la norma UNE EN 197-1 (Asociación Española de Normalización 2011). Respecto a su composición mineralógica, se trata de un residuo formado por feldespatos alcalinos, arcillas, micas, cuarzo y hematite.

3.1.2. Otros materiales

El cemento utilizado fue un cemento portland comercial CEM I 42.5 R, con al menos un 95% de clínker y un contenido de componentes minoritarios no mayor del 5%, de acuerdo con los requerimientos de la norma UNE EN 197-1 (Asociación Española de Normalización 2011).

Finalmente, para la fabricación de los morteros normalizados se ha utilizado una arena normalizada de naturaleza silíceo ($\text{SiO}_2 \geq 98\%$) y máximo tamaño de partícula menor de 2 mm.

3.2. Formulación de los cementos con menor contenido en clínker

Se diseñaron los nuevos cementos que incorporaban en su composición un 10%, 15%, 20%, 25% y 30% en peso de lodo de granito (LG) y 90, 85, 80, 75 y 70% en peso de CEM I. La designación de los mismos es 10LG, 15LG, 20LG, 25LG y 30LG, respectivamente.

En todos los casos, la preparación de la mezcla CEM I+LG se llevó a cabo en una túrbula, garantizando la homogeneización de estos cementos con menor contenido en clínker.

3.3. Caracterización de los cementos formulados

La tabla 1 muestra las propiedades físicas y mecánicas que han sido determinadas para verificar el cumplimiento de los requisitos exigidos por la norma UNE EN 197-1 para cementos comunes tipo Portland.

Tabla 1. Caracterización física y mecánica de los cementos

Propiedad	Edad de ensayo	Metodología de ensayo
Tiempo inicial de fraguado	-	UNE EN 196-3
Expansión	-	(Asociación Española de Normalización 2017)
Resistencia mecánica (compresión y flexión)	2 y 28 días	UNE EN 196-1 (Asociación Española de Normalización 2018)

Asimismo, se determinó la eficiencia de todas las mezclas binarias de cemento siendo está definida como la ratio de la resistencia y las emisiones embebidas de $\text{CO}_{2\text{eq}}$ (GWH) a los 28 días. Este parámetro, es la inversa de la intensidad de CO_2 ($\text{kgCO}_{2\text{eq}}/\text{MPa}\cdot\text{t}$ o m^3) que permite relacionar el comportamiento ecológico y el comportamiento técnico de los materiales de base cemento (Müller, Haist y Vogel 2014). Para ello se consideró que las emisiones de CO_2 de los nuevos cementos, corresponden aquellas derivadas de la propia producción del cemento CEM I (927 $\text{kgCO}_{2\text{eq}}/\text{t}$ cemento) (Braga, Silvestre y de Brito 2017), ignorando las emisiones derivadas del transporte del lodo de granito de las escombreras o industrias extractivas del granito a la planta cementera.

Finalmente, se cuantificó la reducción de emisiones de CO_2 embebido asociadas al uso de un hormigón que presenta, como elemento diferenciador en su formulación respecto a los hormigones convencionales, el eco-cemento con el porcentaje óptimo de lodo de granito (CEM I + 15LG) en un proyecto de ingeniería redactado por el primer autor del presente trabajo de investigación como herramienta para la descarbonización del proyecto.

4. RESULTADOS

4.1. Caracterización física de los cementos

La tabla 2 recoge los valores del tiempo inicial de fraguado de los nuevos eco-cementos. En la misma, se pone de relieve que la incorporación parcial de lodos de granito (10-30%) provoca una aceleración de los procesos de hidratación, el cual se traduce en un pequeño acortamiento en el tiempo de principio de fraguado de los nuevos cementos. No obstante, este acortamiento no compromete el cumplimiento del requisito tiempo inicial (> 60 min) de fraguado exigido por la norma UNE EN 197-1 para la clase resistente 42.5 MPa (Medina et al. 2019).

Tabla 2. Tiempo inicial de fraguado y expansión de los cementos

Propiedad	Tiempo inicial fraguado (min)	Expansión (mm)
CEM I	198	1,0
CEM I + 10LG	138	1,0
CEM I + 15LG	150	1,0
CEM I + 20LG	168	1,0
CEM I + 25LG	183	1,0
CEM I + 30LG	186	1,0

La tabla 2 también muestra los valores de expansión de los cementos, poniéndose de manifiesto que la incorporación parcial del lodo granítico no tiene un efecto expansivo, cumpliendo en todos los casos el requisito exigido (<10 mm) por la norma UNE EN 197-1.

4.2. Caracterización mecánica de los cementos

La tabla 3 muestra los valores de la resistencia a compresión y flexión de los morteros normalizados fabricados a 2 y 28 días de curado con el cemento convencional (CEM I) y con la inclusión del lodo de granito (CEM I + X LG, donde X es el porcentaje de LG), así como la designación de los nuevos eco-cementos. En la misma, se observa que todos los morteros, independientemente del contenido de LG, tienen una resistencia a compresión superior a 20 MPa (42.5 R) a los 2 días y superior e igual a 42.5 MPa (42.5R) a los 28 días; cumpliendo de este modo con las exigencias mecánicas exigidas por la norma UNE EN 197-1 para los cementos comunes de clase resistente 42.5 MPa.

Tabla 3. Resistencia a compresión y tracción

Cemento	Resistencia a compresión (MPa)		Resistencia a flexión (MPa)		Designación según UNE EN 197-1
	2 días	28 días	2 días	28 días	
CEM I	42,25 ± 1,43	65,67 ± 1,27	7,14 ± 0,33	9,65 ± 0,18	CEM I
CEM I + 10LG	37,06 ± 1,16	58,08 ± 1,07	6,77 ± 0,28	8,68 ± 0,29	CEM II/A
CEM I + 15LG	33,45 ± 1,58	61,87 ± 1,41	6,71 ± 0,17	9,67 ± 0,17	CEM II/A
CEM I + 20LG	31,19 ± 1,36	51,12 ± 0,94	6,09 ± 0,26	7,97 ± 0,23	CEM II/A
CEM I + 25LG	29,66 ± 1,06	50,36 ± 0,87	6,02 ± 0,10	7,87 ± 0,17	CEM II/B
CEM I + 30LG	24,51 ± 0,97	48,41 ± 0,99	5,23 ± 0,09	7,54 ± 0,21	CEM II/B

También se puede observar que las prestaciones mecánicas a los 2 días de curado experimentan un descenso con el incremento del porcentaje de sustitución, alcanzando una disminución máxima para el mortero 30LG del 42% y 27% para la resistencia a compresión y flexión respecto al CEM I, respectivamente. Esta pérdida prestacional (descensos mayores que el porcentaje de incorporación), no se registra de una forma tan pronunciada a los 28 días de curado, lo que podría ser explicado por el hecho de que a cortas edades predomina principalmente el efecto de dilución debido al menor volumen de productos de hidratación como consecuencia del menor contenido de clínker, mientras que a medida que transcurre el tiempo este efecto va siendo compensado por la acción puzolánica del residuo ya que este residuo presenta una actividad puzolánica baja a corta edad y moderada a largas, tal y como se observó previamente (Medina 2017).

En cuanto a los resultados obtenidos a 28 días, se puede observar que los descensos experimentados se sitúan para el CEM I + 10LG, CEM I + 15LG, CEM I + 20LG, CEM I + 25LG y CEM I + 30LG en un 12%, 6%, 22%, 23% y 26% respecto al CEM I, respectivamente. Por lo tanto, con 15% de incorporación de LG (porcentaje óptimo) el efecto de dilución se ve compensado en una mayor medida por los productos de hidratación resultantes de la reacción puzolánica entre el lodo de granito (LG) y portlandita (CaOH_2).

Respecto a la resistencia a flexión a tres puntos de los morteros normalizados ensayados, se observa una tendencia similar a la de la resistencia a compresión, registrándose igualmente que para los morteros fabricados con los cementos CEM I + 10LG, CEM I + 15LG, CEM I + 20LG, CEM I + 25LG y CEM I + 30LG se registra un descenso que varía entre un 10% y un 21% respecto al CEM I a los 28 días de curado. Sin embargo, para el porcentaje óptimo de sustitución (15LG) no existe un descenso de esta prestación respecto al cemento convencional (CEM I).

4.3. Emisiones de CO₂ y eco-eficiencia de los cementos

La eco-eficiencia de estos nuevos cementos irá asociada a una reducción de las emisiones de CO₂ embebido en el proceso de fabricación de los mismos, cuya reducción en este caso es igual al porcentaje de sustitución, al no requerir ninguna operación de pretratamiento (reducción de tamaño de partícula, proceso de tamizado...) a diferencia de otras posibles adiciones procedentes tales como escoria de acero (Carvalho et al. 2018) y estériles de carbón calcinadas a 600°C (Arribas et al. 2018) para su activación cuya incorporación en un 10% y 20% en peso provocan descensos en las emisiones de CO₂ de un 9,5% y 12% respecto a un CEM I, respectivamente. La tabla 4, muestra las emisiones de CO₂ embebidas expresadas en kg CO_{2eq}/ t de cemento. Estos valores son similares al CO₂ embebido en los cementos tipo CEM II/A con caliza (LL o L) o ceniza volante (V) y CEM II/B con ceniza volante (V) o escoria de horno alto (S); cuyos valores se sitúan en el rango de 859-745 kg CO_{2eq}/ t y 722-615 kg CO_{2eq}/t, respectivamente (MPA 2014).

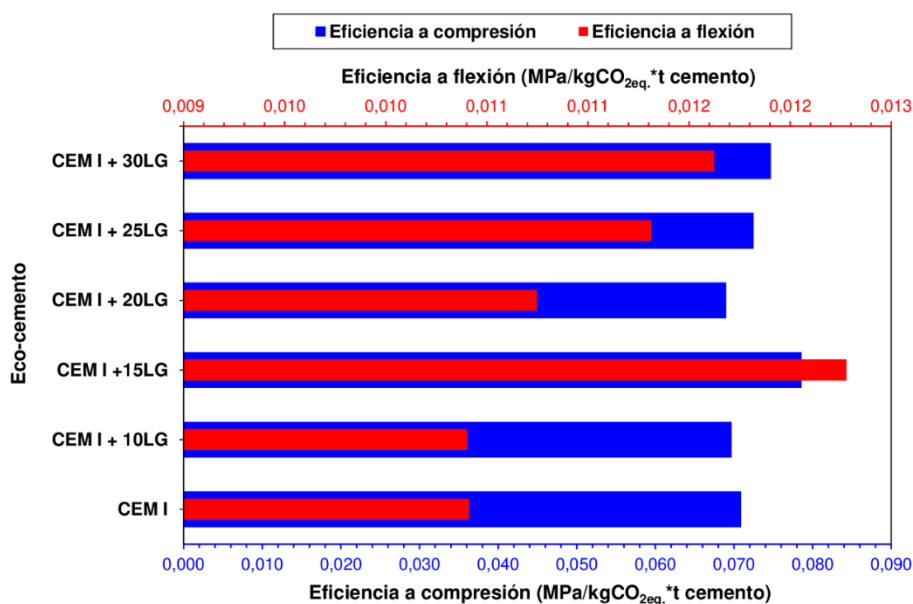
Tabla 4. CO₂ embebido/ tonelada (GWH) de cemento

Propiedad	Eco-cemento					
	CEM I	CEM I+10LG	CEM I+15LG	CEM I+20LG	CEM I+25LG	CEM I+30LG
kg CO _{2eq} / t cemento	927,0	834,3	787,9	741,6	695,3	648,9

La figura 3 muestra la eficiencia de los cementos con menor contenido en clínker (eco-cementos) formulados, siendo definida la eco-eficiencia como la ratio de la resistencia (compresión o flexión) y las emisiones de CO_{2-eq}. (GWH) a los 28 días. Este parámetro, es la inversa de la intensidad de CO₂ (kgCO_{2eq}/ MPa*t cemento) que permite relacionar el comportamiento ecológico y el comportamiento técnico desde un punto de vista mecánico de

los nuevos eco-cementos. En la misma, se observa que los eco-cementos que incorporan en un 10% y 20% de LG tienen una peor eficiencia a compresión respecto al CEM I, experimentando un descenso de un ~2% y ~3% respecto al CEM I, respectivamente. Sin embargo, para los cementos con un 15%, 20% y 25% de LG se registra una mayor eficiencia a compresión que el CEM I, registrándose incrementos de un 11%, 2% y 5% respecto al CEM I, respectivamente. Este incremento pone de manifiesto que el efecto medioambiental que tiene la incorporación de lodo de granito es capaz de contrarrestar la pérdida de resistencia a compresión (véase punto 4.2).

Figura 3. Eficiencia de los hormigones con respecto a la resistencia (compresión y flexión) y emisiones CO₂



Asimismo, estos eco-cementos formulado con lodo de granito, tienen una eficiencia igual (CEM I+10LG) o mayor en la resistencia a flexión que el CEM I, experimentado un incremento máximo de un 18% respecto al CEM I en el eco-cemento CEM I+15LG.

4.4. Emisiones de CO₂ en la ejecución de los elementos de hormigón

La tabla 5 muestra la tipología, volumen y dosificación de los hormigones recogidos en el proyecto de ejecución de una estación de bombeo. En la misma, se considera que los nuevos hormigones que incorporan en su composición el eco-cemento con un 15% de lodo de granito (CEM I+15LG) requiere incrementar en un 2,5% en contenido de cemento para compensar la pérdida de un 6% de resistencia a compresión a los 28 días. No obstante, dicho descenso, se encuentra dentro de los límites admisibles que garantizan el cumplimiento de los requisitos de resistencia característica a compresión de diseño definida en el proyecto.

Tabla 5. Tipología, volumen y dosificación de los hormigones. CO₂ embebido en los componentes del hormigón

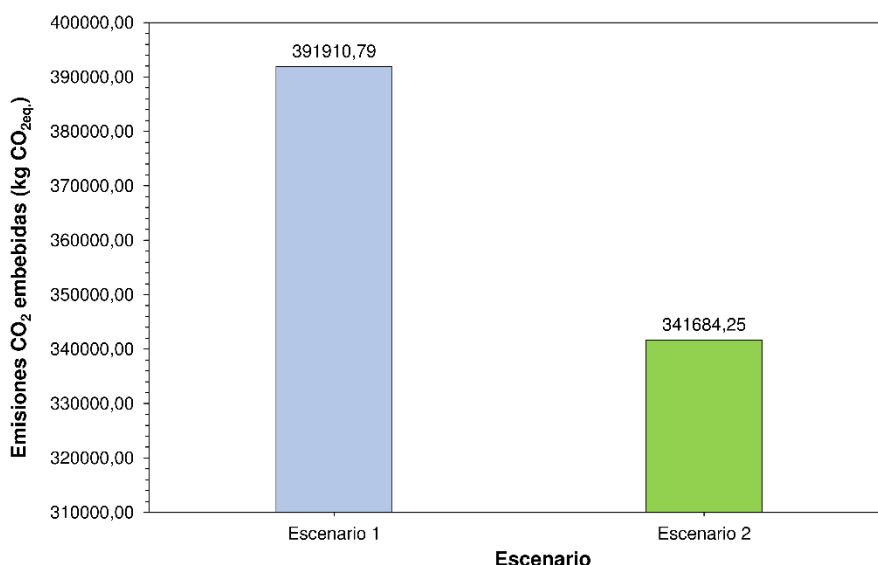
Componente (kg/m ³)	HM-20/SP/20	HM-20/SP/40	HL-150/SP/20	HA-25/SP/20	HA-35/SP/20	Emisiones (kg CO _{2eq.} /kg)
Arena	350	375	325	362	320	0,003*
Grava	468	425	530	338	355	0,008*
CEM I	182	200	150	300	325	0,927

CEM I+15LG	186	205	154	307	333	0,788
Volumen (m ³)	15,78	148,52	0,19	1197,91	76,24	-

Nota: HM: hormigón en masa; HL: hormigón de limpieza; HA: hormigón armado; *Valores según Fib (2012)

La figura 4 muestra el CO₂ embebido asociado al hormigón necesario para la ejecución de este proyecto, contemplando dos escenarios: i) escenario 1: hormigón con CEM I; y ii) escenario 2: hormigón con CEM I+15LG. En la misma puede observarse que el uso de estos nuevos eco-cementos supondría un descenso de ~13% de emisiones de CO₂ (50.226,54 kg CO_{2eq.}) respecto al uso de CEM I lo que contribuiría a la descarbonización de este proyecto, así como aumentar la sustentabilidad del mismo a través de un incremento del índice de contribución de la estructura a la sostenibilidad (ICES) propuesto por el Código Estructura (Gobierno de España 2022).

Figura 4. CO₂ embebido asociado al hormigón en función del escenario considerado



Finalmente, este descenso se encuentra dentro del rango de valores (9,7-19,4%) registrado por Song et al. (2019) en hormigones que contenían entre un 10-25% de escoria granulada de horno alto.

5. CONCLUSIONES

Las principales conclusiones obtenidas en el presente trabajo de investigación son las siguientes:

- Los cementos con menor contenido en clínker (eco-cemento) que incorporan parcialmente lodos de granito (LG) cumplen con los requisitos físicos exigidos por la normativa EN 197-1, para el tiempo mínimo inicial de fraguado (> 60 min) y estabilidad de volumen (<10 mm).
- Las prestaciones mecánicas (resistencia a compresión y flexión) disminuyen con el porcentaje de incorporación LG, correspondiendo el menor (6% respecto al CEM I) y el mayor (26% respecto al CEM I) descenso para el CEM I+10LG y CEM I+30GS, respectivamente. Los eco-cementos pueden ser clasificados como clase resistente 42.5R.
- La incorporación de lodos de granito como adición en la industria cementera provoca un descenso de las emisiones de CO₂ embebido en el material igual al porcentaje de incorporación.
- La eco-eficiencia a compresión, expresada como MPa/ kg CO_{2eq.} * tonelada cemento, es mayor en los CEM I+15LG, CEM I+20LG y CEM I+25LG que en el CEM I.

- El porcentaje óptimo de incorporación, desde un punto de vista ecológico – mecánico es un 15%.
- El uso de nuevo eco-cemento CEM I+15LG en la ejecución de las estructuras de hormigón de un proyecto correspondiente a una estación de bombeo provoca un descenso del CO₂ embebido de un 12%.
- El uso de cementos con menor contenido en clínker constituye por lo tanto una herramienta útil en la descarbonización de los proyectos de ingeniería y a incrementar la sustentabilidad de nuestras estructuras de hormigón.

Referencias

- Arribas, I., Vegas, I., García, V., Vigil de la Villa, R., Martínez-Ramírez, S. & Frías, M. (2018). The deterioration and environmental impact of binary cements containing thermally activated coal mining waste due to calcium leaching, *Journal of Cleaner Production*, 183, 887-897
- Asociación Española de Normalización (2011). UNE EN 197-1. Cemento. Parte 1: Composición, especificaciones y criterios de conformidad de los cementos comunes
- Asociación Española de Normalización (2017). UNE EN 196-3. Métodos de ensayo de cementos. Parte 3: Determinación del tiempo de fraguado y de la estabilidad de volumen
- Asociación Española de Normalización (2018). UNE EN 196-1. Métodos de ensayo de cementos. Parte 1: Determinación de resistencias
- Braga, A.M., Silvestre, J.D., de Brito, J. (2017) Compared environmental and economic impact from cradle to gate of concrete with natural and recycled coarse aggregates. *Journal of Cleaner Production*, 162, 529-543
- Carvalho, S.Z., Vernilli, F., Almeida, B., Oliveira, M.D. & Silva, S.N. (2018). Reducing environmental impacts: The use of basic oxygen furnace slag in portland cement, *Journal of Cleaner Production*, 172, 385-390
- Cembureau (2023). World cement production in 2022. <https://www.cembureau.eu/about-our-industry/key-facts-figures/> (Fecha de acceso: 15/04/2023)
- Ershadi, M. & Goodarzi, F. (2021). Core capabilities for achieving sustainable construction project management. *Sustainable Production and Consumption*, 28, 1396-1410
- Fib (2012). Guidelines for green concrete structures. FIB Bulletin fib CEB-FIP Guide to Good Practice 67, 1-67. Fédération Internationale du Béton
- Gobierno de España (2022). Código Estructural. Real Decreto y Articulado. Volumen I. p. 552.
- Küpfer, C., Bastien-Masse, M. & Fivet, C. (2023) Reuse of concrete components in new construction projects: Critical review of 77 circular precedents. *Journal of Cleaner Production*, 383, 135235
- Martínez, S., del Mar, M., Martínez, R., Marchamalo, M. & Álvarez, S. (2022). Pre-construction quantification of embodied environmental impacts to promote sustainable construction projects: the case study of a diversion dam. *Journal of Environmental Management*, 314, 115061
- Medina, G., Sáez del Bosque, I.F., Frías, M., Sánchez de Rojas, M.I. & Medina, C. (2017). Mineralogical study of granite waste in a pozzolan/Ca(OH)₂ system: influence of the activation process. *Applied Clay Science*, 135, 362-371

- Medina, G., Sáez del Bosque, I.F., Frías, M., Sánchez de Rojas, M.I. & Medina, C. (2019). Energy performance and calorimetric behaviour of cements bearing granite sludge. *Powder Technology*, 356, 517-527
- MPA (2014). Specifying sustainable concrete. Understanding the role of constituent materials. p. 24
- Müller, H.S., Haist, M. & Vogel, M. (2014). Assessment of the sustainability potential of concrete and concrete structures considering their environmental impact, performance and lifetime. *Construction and Building Materials*, 67, 321-337
- McKinsey & Company. (2021). Call for action: Seizing the decarbonization opportunity in construction. p. 12
- Plaza, P., Sáez del Bosque, I.F., Frías, M., Sánchez de Rojas, M.I., Medina, C. (2021). Use of recycled coarse and fine aggregates in structural eco-concretes. Physical and mechanical properties and CO₂ emissions. *Construction and Building Materials*, 285, 122926
- Soliman, A., Hafeez, G., Erkmen, E., Ganesan, R., Ouf, M., Hammad, A., Eicker, U. & Moselhi, O. (2022) Innovative construction material technologies for sustainable and resilient civil infrastructure. *Materials Today: Proceeding*, 60, 365-372
- Song, W., Yi, J., Wu, H., He, X., Song, Q. & Yin, J. Effect of carbon fiber on mechanical properties and dimensional stability of concrete incorporated with granulated – blast furnace slag. *Journal of Cleaner Production*, 238, 117819

**Comunicación alineada con los
Objetivos de Desarrollo Sostenible**

