

Recomendaciones para la reducción de la huella de carbono de diferentes elementos estructurales de hormigón

Reducing the carbon footprint of concrete structural elements: design recommendations

César Bartolomé Muñoz^a, Laura Orfali Soria^b

^aIngeniero de Caminos, Canales y Puertos. IECA Instituto Español del Cemento y sus Aplicaciones. Director de Tecnología.
c.bartolome@ieca.es

^bArquitecta. IECA Instituto Español del Cemento y sus Aplicaciones. Responsable de Sostenibilidad en Edificación, departamento de Tecnología. lorfali@ieca.es

^aMSc Structural Engineer. IECA Spanish Institute of Cement and its Applications. Director of Technology. c.bartolome@ieca.es

^bM.Arch. IECA Spanish Institute of Cement and its Applications. Head of Sustainability for Buildings, Department of Technology.
lorfali@ieca.es

RESUMEN

Los compromisos europeos en materia ambiental obligan a prestar especial atención a las emisiones de gases efecto invernadero generadas por la actividad de la construcción incorporando este criterio como requisito obligatorio en los proyectos. Por tanto, en este artículo se recogen las principales recomendaciones de diseño orientadas a reducir la huella de carbono embebida en los elementos constructivos de hormigón armado, tanto en proyectos de edificación como de obra civil, y que van desde la optimización de la estructura hasta la adecuada selección de materiales de menor impacto ambiental, siempre que las exigencias mecánicas y prestacionales del elemento lo permitan.

ABSTRACT

European environmental commitments require special attention to be paid to greenhouse gas emissions generated by construction activity, incorporating this criterion as a mandatory requirement in projects. Therefore, this article includes the main design recommendations aimed at reducing the carbon footprint embedded in reinforced concrete construction elements, both in building and civil works projects, ranging from the optimisation of the structure to the right selection of materials with a lower carbon impact, provided that the mechanical and performance requirements of the element allow it.

PALABRAS CLAVE: descarbonización, carbono embebido, cemento, factor clínker, prestaciones.

KEYWORDS: decarbonisation, embodied carbon, cement, clinker factor, performance requirements.

1. Introducción

Los acuerdos de París del año 2015 y la posterior declaración de emergencia climática por parte de la Unión Europea en noviembre de 2019 estableció el marco político del que se derivan los compromisos de reducción de emisiones en el entorno comunitario denominado como Pacto Verde Europeo, que establecen dos hitos

importantes: la reducción de emisiones en un 55% respecto a los niveles de 1990 para 2030 y conseguir la neutralidad climática para 2050.

Estos compromisos obligan al sector de la construcción a reducir sus emisiones de gases de efecto invernadero a lo largo del ciclo completo de los edificios e infraestructuras, con

diseños que no solo reduzcan la huella de carbono embebida, sino que también tengan en cuenta su influencia en la huella de carbono operativa, ya sea la climatización en edificios o el consumo de los vehículos en las carreteras, por ejemplo.

Por lo tanto, la aproximación a esta problemática debe ser holística, valorando la interrelación de los diferentes elementos estructurales y constructivos, pero también debe ser personalizada, siendo muy diferente el enfoque en edificación con respecto al enfoque en obra civil.

2. Reducción de la huella de carbono del ciclo de vida de los edificios

Para poder cumplir con la nueva normativa vigente y conseguir un diseño de un edificio neutro en carbono o, al menos, con una huella de carbono baja, es necesario conocer el origen de las emisiones del edificio y cuantificarlas, al menos de forma relativa, de manera que las medidas que se adopten durante su diseño sean efectivas y realmente nos permitan reducir la huella de carbono total.

Se distingue entre dos tipos de emisiones generadas a lo largo del ciclo de vida de un edificio:

- Las emisiones operativas, asociadas al consumo energético (y de agua) del edificio en su fase de uso (una vez ocupado) y a lo largo de su vida útil (50 años o 100 años para un edificio monumental).
- Las emisiones embebidas en los propios materiales del edificio a lo largo de todas las fases del ciclo de vida, desde la extracción de materia prima hasta el fin de vida incluyendo la gestión de residuos.

En el caso de edificios de nueva construcción se estima que el carbono embebido representa desde una tercera parte de la totalidad de las emisiones asociadas al sector de la edificación [1], hasta el 50% para un edificio medio de nueva construcción [2].

Independientemente de la fuente o del valor exacto de su impacto, lo cierto es que se trata de un valor relevante tanto ahora como en el futuro sobre el que es necesario actuar para alcanzar los objetivos.

Según las trayectorias de reducción de emisiones estimadas para 2030 se prevé una reducción significativa en las emisiones operativas debida a la electrificación de los edificios y a la descarbonización de la red de suministro eléctrico. Aunque las emisiones embebidas en los materiales también disminuirán su impacto absoluto a medida que la industria reduzca las emisiones asociadas a los procesos de producción de los materiales de construcción, las previsiones estiman que esta reducción no será tan intensa como en el caso de las emisiones operativas.

Esta futura tendencia indica que la parte proporcional de emisiones embebidas frente a las operativas será mayor por lo que es importante focalizar la atención en el impacto que suponen los materiales de la construcción y en implementar estrategias efectivas para la reducción de las emisiones embebidas en los proyectos.

Ahora bien, la huella de carbono embebida de los materiales es solo una variable más a tener en cuenta. El diseño de los edificios debe acometerse desde una perspectiva global en el que los materiales componentes se elijan no solo por sus impactos embebidos, sino por sus prestaciones técnicas y energéticas que permitan minimizar los impactos globales del edificio a lo largo de su ciclo de vida completo y no únicamente en la fase de construcción.

Centrando el foco en la huella de carbono embebido de los edificios, un estudio realizado por la Comisión Europea y que recoge los datos de Análisis de Ciclo de Vida (ACV) realizados para el sector de la edificación en Europa [3] apunta a la estructura y la envolvente de los edificios como los elementos de mayor contribución a la huella de carbono embebido

total de los edificios, como se refleja en la Figura 1 extraída de este informe.

En un análisis más detallado de los elementos que componen la estructura, se puede observar que los forjados (barras representadas en verde) tienen un impacto significativo, así como las cimentaciones (representadas en azul) aunque en menor medida. El impacto de estos elementos estructurales se debe a su carácter masivo, siendo elementos que implican la utilización de una cantidad considerable de material. En consecuencia, estos elementos presentan el mayor potencial para la reducción

de emisiones. Por lo tanto, la forma más fiable y efectiva de minimizar las emisiones de carbono embebido es reducir al mínimo la cantidad de material utilizado, sobre todo de los materiales intensivos en carbono en relación con su función constructiva. El empleo de un diseño eficiente en recursos se debe de contemplar de manera conjunta con una adecuada selección de materiales para maximizar la reducción de emisiones consiguiendo así una solución de bajo impacto ambiental.

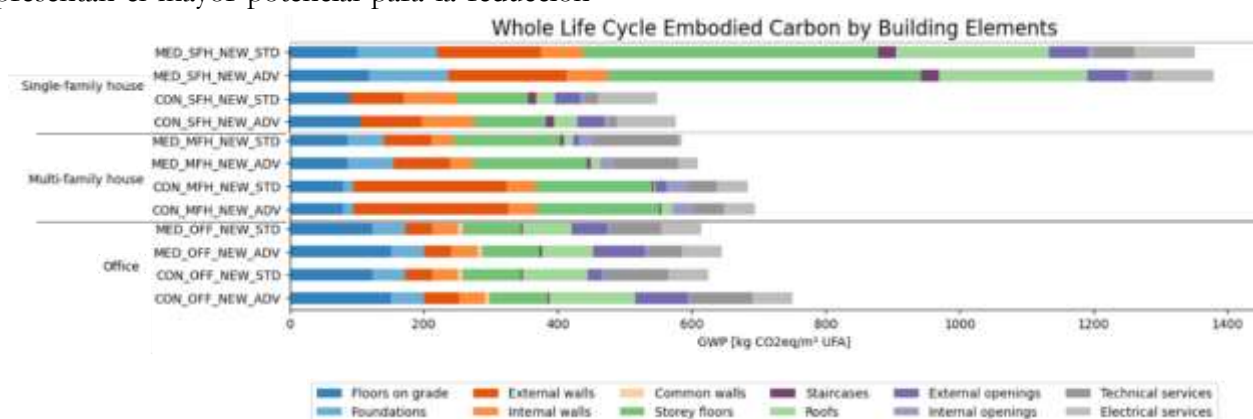


Figura 1 _ Carbono embebido de ciclo de vida por elemento constructivo en edificios de oficinas, viviendas unifamiliares y residenciales multifamiliares en climas mediterráneo y continental.

2.2 Estrategias de reducción de la huella de carbono embebida en las estructuras de hormigón y caso de estudio

Con carácter general se suele considerar el empleo de materiales de menor huella ambiental como principal estrategia para abordar la descarbonización. Bajo dicho compromiso los fabricantes de cemento en España y en Europa están desarrollando nuevos cementos con un menor factor clínker para su utilización en hormigón estructural.

Sin embargo, la estrategia para descarbonizar una estructura no pasa únicamente por la utilización de cementos más adicionados, cuyas prestaciones además son

diferentes de las de los cementos portland tradicionales, sino que se deben combinar con otras estrategias, como puede ser el diseño de hormigones de altas prestaciones con estos nuevos cementos o los diseños estructurales ligeros y esbeltos que permitan la reducción global de la huella de carbono de la estructura y no únicamente la de uno de sus componentes¹. En efecto, la reducción de la huella de una estructura radica de la optimización de los recursos empleados, tanto en el tipo de material utilizado como, y principalmente, en su cantidad. En este sentido, este apartado explicará los factores principales que influyen en el dimensionamiento de la estructura que a su vez repercute en la huella ambiental resultante, y se reflejará de manera práctica sobre un caso de

¹ Esta estrategia se abordará con mayor detalle en el apartado dedicado a obra civil, donde los materiales tienen un mayor peso relativo que en edificación.

estudio de un forjado de hormigón siendo un elemento estructural intensivo de carbono. El análisis se ha realizado evaluando tres tipologías estructurales de forjado con el objetivo de poder realizar una mejor toma de decisiones de diseño que hacen un uso eficiente de los recursos o lo que se podría definir como un diseño “ligero e inteligente”.



Figura 2_tipos de forjados estudiados.

2.2.1 Tipología del edificio

La tipología del edificio, es decir su uso, influye en varios aspectos fundamentales que determinan el dimensionado de la estructura (especialmente los forjados), y a su vez afectan a la envolvente. Éstos se detallan a continuación:

Las cargas de diseño

El dimensionamiento de una estructura está determinado por su peso propio y las sobrecargas de uso. La optimización del peso propio se puede realizar evaluando distintas tipologías estructurales, por ejemplo, optando por forjados esbeltos y ligeros frente a forjados macizos o mediante la optimización del factor de forma del elemento estructural como podría ser en el caso de los pilares.

Las sobrecargas de uso vienen determinadas por el uso al que se destinará el edificio y, como se ha explicado previamente, determinan de forma directa la cantidad de material empleado. En este caso, los valores de la sobrecarga vienen determinados por la normativa y en principio no son modificables, si bien, dentro de un enfoque de economía circular, en el que se prioriza alargar la vida útil de los edificios, es necesario evolucionar hacia diseños capaces de adaptarse a futuros usos, por lo que se recomienda revisar las sobrecargas de uso utilizadas en proyecto para considerar posibles futuros usos sin tener que modificar la estructura, aunque esto suponga una

penalización de la huella de carbono embebida de la estructura.

Para poder evaluar el impacto que supondría realizar un diseño flexible, capaz de adaptarse a futuros usos, se han considerado las cargas de uso residencial, oficinas y comercial establecidas por el CTE, es decir 2 kN/m^2 , 3 kN/m^2 y 5 kN/m^2 respectivamente. En el análisis se ha tomado una luz media de diseño de 6.5 m y se ha considerado un hormigón HA-25 utilizando un CEM I 42.5 N/mm^2 .

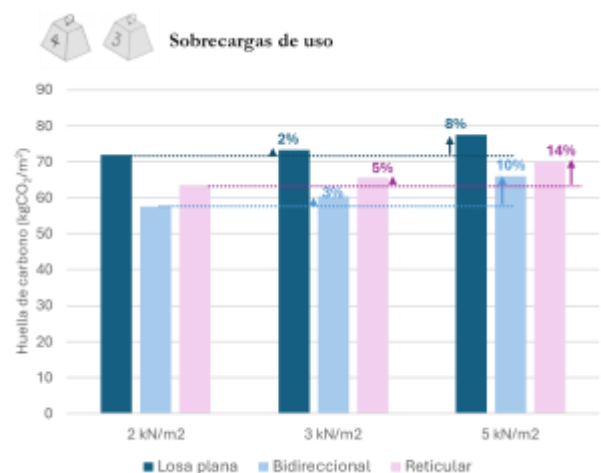


Figura 3_Relación entre las sobrecargas de uso y la huella de carbono. Elaboración de IECA

Como se puede observar en el gráfico, para luces de diseño de 6.5 m , el aumento de 1 kN/m^2 de sobrecarga de uso implica un aumento del 2% de la huella en el caso de la losa plana, un 3% en el caso del forjado bidireccional con viga de canto y un 5% para el caso del forjado reticular.

Las luces entre pilares

La retícula estructural también suele venir determinada por el uso del edificio ya que ciertas actividades requieren espacios más diáfanos aumentando las distancias entre apoyos. En términos de carbono, a menores luces, menor canto de forjado y, por lo tanto, reducciones significativas en la huella de carbono total de la estructura (tanto de forjados como indirectamente de las cimentaciones y la fachada). Sin embargo, siguiendo el mismo razonamiento anterior, considerando el principio de un diseño flexible a múltiples usos, se debe encontrar el equilibrio entre la huella de

carbono embebida y la funcionalidad del espacio, implementando luces suficientemente amplias. En ese sentido, las luces de 7-9m son las óptimas para equilibrar estos dos parámetros.

Para el caso de estudio se ha evaluado la relación entre las luces de diseño, el canto de forjado y huella embebida, analizando luces de 5m, 7m, y 9m. En este caso también se ha considerado un hormigón HA-25 utilizando un CEM I 42.5N/mm² como referencia para el cálculo de la huella de carbono.

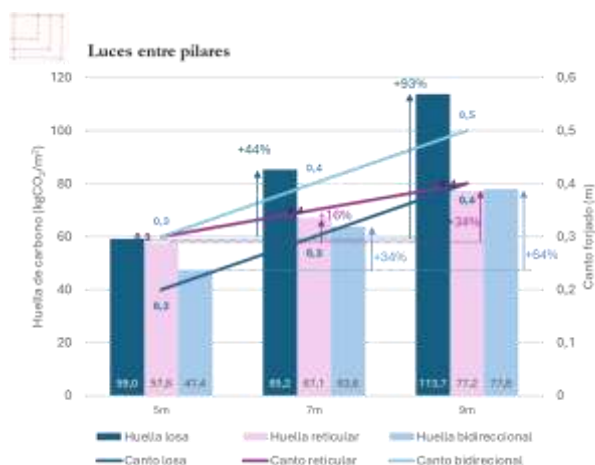


Figura 4 Relación entre las luces de diseño y el canto de forjado, así como su huella ambiental.

Elaboración de IECA

Los resultados muestran que el aumento de un metro de luz representa aproximadamente un aumento del 22%, 8% y 16% para la losa plana, el forjado reticular y el bidireccional respectivamente. A mayores luces la losa plana representa una solución poco eficiente en términos de carbono siendo soluciones más optimizadas las que aligeran el forjado (el reticular y bidireccional), pero que sin embargo requieren de un canto de forjado mayor. A menores luces, el forjado bidireccional representa la opción de menor consumo de material.

La altura entre forjados

Al igual que los parámetros anteriores, ciertos usos requieren una altura mayor entre forjados aumentando en consecuencia la superficie de fachada. Sin embargo, el aumento de altura no solo permite reconvertir un edificio de un uso a

otro, sino que también pueden reducir ciertos consumos operativos como la iluminación por ejemplo introduciendo una mayor cantidad de luz natural estrategia que por otro lado puede aumentar el consumo en climatización. Por lo que un análisis detallado es necesario para determinar en qué medida influye el aumento de altura entre los forjados sobre el carbono embebido y operativo del edificio quedando fuera del alcance de este artículo.

2.2.2 Tipología estructural

Una vez determinados el vano y las cargas de diseño, se puede proceder a la evaluación de distintas soluciones de forjado siendo preferibles las soluciones aligeradas y pretensadas frente a las macizas y armadas, por los siguientes motivos:

- Las soluciones aligeradas, por ejemplo, placas alveolares, permiten hacer un uso óptimo del hormigón y reducen el peso de este elemento estructural.
- Las soluciones pretensadas utilizan un acero de mayor calidad mecánica con una huella de carbono similar al acero utilizado en las barras corrugadas. Por lo tanto, se reduce la cuantía de acero total y la huella de carbono. Por otro lado, las soluciones pretensadas son, con carácter general, más esbeltas, reduciendo el volumen total de hormigón del forjado.

Así, una losa alveolar, una losa postesada o una losa bidireccional postesada pueden llegar a presentar ahorros de hasta el 30% de material respecto a una losa armada en aquellas luces para las que las soluciones pretensadas tienen sentido estructural (>8-10 m).

No obstante, es importante entender que no existe una única solución óptima para todos los casos y cada tipología de forjado presenta ventajas y desventajas que las hacen más o menos adecuadas para determinados usos. Por lo tanto, cada proyecto requiere de un análisis individual en el que además de buscar la solución de menor huella de carbono se tengan en cuenta los siguientes condicionantes:

- En primer lugar, se debe de asegurar el cumplimiento con los requisitos prestacionales del proyecto: arquitectura, adecuación estructural, soluciones eficientes en las instalaciones, requisitos de protección contra incendios, etc.
- Se debe de considerar las implicaciones en la ejecución: facilidad, tiempos de ejecución, tradición constructiva de cada zona, disponibilidad de mano de obra cualificada, etc.

Optimización de la resistencia mecánica del hormigón

En un edificio de hormigón, la elección de los diferentes hormigones que deben formar parte de la estructura es un aspecto esencial en la reducción de la huella de carbono. Cada elemento estructural exige al material una resistencia característica mínima y está sometido a una clase de exposición ambiental diferente por lo que requiere de un tipo de hormigón específico. Esto presenta una oportunidad para optimizar el material elegido en función de los requisitos individuales de cada elemento estructural.

Los hormigones de alta resistencia suelen tener una huella de carbono mayor, por lo que como norma general se recomienda no incrementar la resistencia característica del hormigón para lograr una seguridad superior a la reglamentariamente establecida.

Sin embargo, en algunos casos aumentar el nivel de resistencia daría como resultado grandes ahorros en material reduciendo en consecuencia el impacto ambiental total. Así, en determinados elementos estructurales de un edificio muy solicitados a compresión (pilares y muros de carga), la utilización de un hormigón de alta resistencia redundaría en una menor huella de carbono para el elemento estructural, puesto que permiten un diseño más esbelto con un menor consumo de materiales (tanto del hormigón como de las cuantías de armado). Por el contrario, para elementos solicitados a flexión como es el caso de los forjados, se debería prescribir la mínima resistencia exigida.

2.2.3 Selección del material: empleo de hormigones adecuados con menor huella ambiental

Entre el 80 y el 90 % de la huella de carbono de un hormigón proviene del cemento utilizado en su fabricación. Por lo tanto, la reducción de la huella de carbono de un hormigón pasa necesariamente por dos estrategias:

- Elegir un tipo de cemento que satisfaga los requisitos prestacionales del hormigón y, a la vez, tenga la menor huella de carbono posible.
- Optimizar el contenido de cemento de la mezcla siempre y cuando se satisfagan los requisitos de resistencia y de durabilidad del material.

Como criterio general, un cemento tiene una menor huella ambiental cuanto menor sea su factor clínker, es decir, su relación clínker/cemento. La reducción del factor clínker y, por lo tanto, de la huella ambiental se consigue mediante la introducción de adiciones en la composición del cemento.

Ahora bien, esta incorporación de adiciones supone un cambio en las prestaciones del cemento. En general, un cemento altamente adicionado tiene una evolución más lenta de sus resistencias, mientras que un cemento portland desarrolla su capacidad mecánica de manera más rápida.

En lo referente a su durabilidad, un cemento con adiciones reactivas (escorias de horno alto, cenizas volantes o puzolanas naturales) presenta una reacción secundaria en la que la adición activa se combina con la portlandita que libera el clínker en su proceso de hidratación, generando geles C-S-H secundarios que rellenan los poros y producen un hormigón más compacto y con un mejor comportamiento frente ataques químicos (sulfatos) y por cloruros.

La elección de un tipo de cemento u otro dependerá, primero, de las exigencias mecánicas para el hormigón y de la clase de exposición ambiental al a que va a estar sometido. A continuación, debería elegirse el tipo de cemento más adicionado posible que cumple con dichos

requisitos técnicos y optimizar la dosificación de hormigón con este cemento seleccionado.

En el siguiente gráfico, se refleja la reducción de la huella de carbono de los forjados evaluados en el caso de estudio correspondiente a la utilización de cementos adicionados frente a un CEM I 42.5. Para este análisis se ha considerado una carga de uso de 2kN/m^2 y luces de diseño de 6.5m.

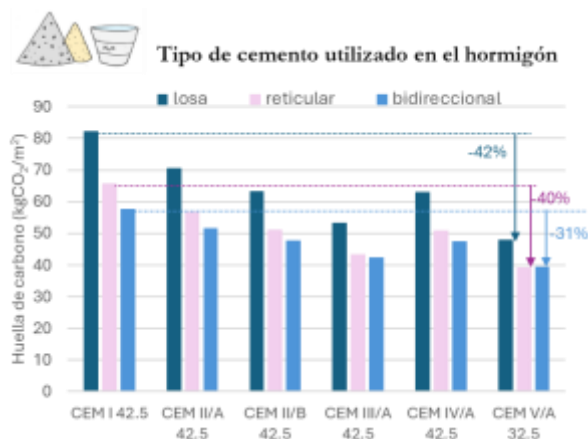


Figura 5_ Relación entre el tipo de cemento seleccionado y huella de carbono embebida.

Elaboración de IECA.

En resumen, las clases de exposición ambiental y exigencias mecánicas del hormigón determinarán si la utilización de los cementos adicionados es más o menos adecuada para el elemento estructural en cuestión y, por tanto, se puede incluir el tipo de cemento dentro de la estrategia de reducción de emisiones.

3. Obra civil

En materia de impacto ambiental a lo largo del ciclo de vida completo, la obra civil difiere de la edificación en los siguientes puntos:

- Las decisiones en fase de diseño que se adoptan en relación con los materiales que se utilizan en la obra civil no presentan una relación tan directa con las emisiones operativas como en el caso de la edificación. Aunque el sector del transporte, por ejemplo, representa una parte relevante de las emisiones procedentes de los sectores difusos, el impacto que tienen los materiales de una infraestructura portuaria sobre el consumo de los barcos o de los materiales de

una vía férrea sobre los trenes es difuso. En el caso de las carreteras, la rigidez del firme o sus características superficiales sí que tiene un impacto directo sobre el consumo de los turismos y camiones, pero se trata de un caso aislado.

- El peso relativo que adquieren el hormigón y el acero en las emisiones embebidas totales es muy elevado frente al mismo peso en edificación, en el que estos materiales comparten protagonismo con los aislamientos térmicos, con los productos cerámicos o con otros elementos metálicos.
- En el coste final del producto, los materiales tienen un mayor peso que en el caso de la edificación, donde la repercusión del coste del suelo es muy elevada y la carga fiscal también. Esta circunstancia ha derivado en dimensionamientos más precisos en el caso de la obra civil con el objetivo de un mayor ahorro económico, y unas secciones estructurales con un mayor grado de optimización.

Por lo tanto, las estrategias de descarbonización en obra civil deben centrarse en la reducción de la huella de carbono del material, siempre con la precaución de mantener o mejorar sus prestaciones mecánicas y de durabilidad.

Aunque, al igual que en el caso de los edificios, cada obra requiere un estudio específico, a continuación, se aportan algunas recomendaciones concretas en función del tipo de estructura al que nos enfrentemos.

3.1 Cimentaciones, muros de contención y muros pantalla

En general, se trata de elementos de hormigón armado sometidos a esfuerzos de flexión en los que el hormigón no está especialmente solicitado desde un punto de vista estructural y en los que los plazos de desencofrado bien no existen (en el caso de los muros pantalla) o no son limitantes (muros de contención). En estos casos, el rango de hormigones más utilizado es el HA-25 y el

HA-30, sin ningún requisito específico de resistencia a 48 horas o 7 días. Es, por lo tanto, una resistencia perfectamente alcanzable con un cemento altamente adicionado, ya sea un CEM II/B, un CEM III, un CEM IV o un CEM V.

Además, se trata de elementos masivos, en los que la utilización de cementos adicionados de bajo calor de hidratación es un factor positivo en el diseño del material.

Por último, se trata de elementos en contacto con el terreno, por lo que existe la posibilidad de que estén sometidos a ataques químicos, una clase de exposición XA, situación frente a la cual los hormigones fabricados con un cemento altamente adicionado se comportan mejor.

3.2 Pilas de puentes y viaductos

Las pilas de los viaductos son elementos sometidos a esfuerzos de flexocompresión muy elevados. En estos casos, el hormigón sí está muy solicitado y, con criterio general, se prescriben hormigones de resistencias características de 40 MPa o superiores.

Por otro lado, el procedimiento constructivo tipo en estos casos es el encofrado trepante, que exige resistencias del hormigón altas a edades tempranas.

Estos requisitos dejan poco margen para el diseño del material y prácticamente en todos los casos obliga a diseñar de un hormigón rico en un cemento tipo I ó II con un contenido de adiciones bajo o nulo, lo que podría hacernos pensar que es prácticamente imposible reducir la huella de carbono de estos elementos estructurales. A este respecto, indicar que se ha comprobado que un incremento de la resistencia característica del hormigón por encima de estos 40 MPa que se consideran una referencia supone, con criterio general, una reducción de la sección de la pila y una menor cuantía de armado, lo que permite compensar el incremento de huella de carbono que supone la utilización de cementos Portland en gran

cantidad a través de una reducción en el volumen total de hormigón que se utiliza.

3.3 Tableros de puentes y viaductos

La mayor parte de los tableros de puentes y viaductos están pretensados, por lo que exigen un hormigón con una resistencia característica superior a los 40 MPa y unas resistencias elevadas a 48 horas, que es la edad típica a la que se tesan los cables.

Por otro lado, la sección de los tableros suele ser una sección muy optimizada, ya sea mediante tableros cajón, vigas artesa o losas aligeradas.

Así pues, el potencial de reducción en estos elementos estructurales es, a priori, escaso, más teniendo en cuenta que el Código Estructural limita el tipo de cementos que se pueden utilizar a los cementos CEM I, CEM II/A-D (que no se fabrica en España actualmente), CEM II/A-V y CEM II/A-P. Cualquier otro tipo de cemento no es utilizable y las adiciones caliza (L y LL) y siderúrgica (S) tampoco están permitidas.

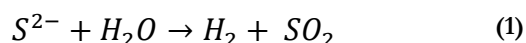
Con estos condicionantes, la recomendación natural es diseñar un hormigón con la resistencia característica mínima que se exige por cálculo y utilizar en su diseño un cemento CEM II/A 52.5 R, que permite alcanzar prácticamente las mismas prestaciones que un cemento CEM I y reduce su huella de carbono en aproximadamente un 12%.

Ahora bien, llegados a este punto, merece la pena analizar el motivo por el que el Código Estructural limita el tipo de cementos utilizable en estructuras pretensadas.

- Con criterio general, los cementos CEM III, CEM IV y CEM V no se permiten en estructuras pretensadas porque la evolución de su resistencia es lenta y, a priori, no es posible alcanzar resistencias elevadas a edades tempranas, lo que puede suponer un riesgo en las obras en las que de forma generalizada se tesa en un plazo máximo de 72 horas desde la puesta en obra del

hormigón. Por este motivo, únicamente se permite la utilización de cementos portland (CEM I y CEM II).

- Dentro de los diferentes tipos de adiciones, se excluye la posibilidad de utilizar adición caliza o escoria granulada de horno alto por motivos de durabilidad. En el caso de estructuras pretensadas, la corrosión de la armadura puede dar lugar a roturas frágiles en el conocido efecto “corrosión bajo tensión”, lo que obliga a una mayor precaución que en el caso de estructuras de hormigón armado. Por este motivo, no se permite la adición caliza, porque se trata de una adición inerte no reactiva que puede derivar en un hormigón con mayor índice de poros. Este no es el caso de la adición siderúrgica, que permite el diseño de hormigones muy compactos. En este caso, el motivo de la exclusión es la posibilidad de que se produzca el fenómeno conocido como fragilización por hidrógeno de la armadura activa, lo que puede derivar en una microfisuración del acero que degenera en una rotura también frágil. En el caso de los cementos con adición siderúrgica, este hidrógeno proviene de la reacción de los iones sulfuro (S^{2-}) presentes en la escoria con el agua de hidratación del cemento, lo que liberaría hidrógeno de acuerdo con la siguiente reacción química:



Sin embargo, este último punto es controvertido por varios motivos.

- Los aceros que se utilizan actualmente como armadura activa son muy poco susceptibles de sufrir este fenómeno, aun cuando estén sometidos a la presencia de hidrógeno.
- En las estructuras postesadas de hormigón, la armadura activa está protegida por la inyección de la vaina con lechada fabricada con cemento CEM I, que impide el contacto del cemento siderúrgico con la armadura activa.
- Otras normativas de referencia a nivel mundial, como el código ACI, no solo no prohíben este tipo de cementos en las estructuras pretensadas, sino que los

promueven porque permiten utilizar hormigones más compactos.

4. Diseño de hormigones de alta resistencia con cementos altamente adicionados

Llegados a este punto, se puede concluir que, tanto para estructuras de edificación como de obra civil, la clave para minimizar su huella de carbono es, por un lado, un diseño optimizado y esbelto, para lo que es necesario utilizar hormigones de altas prestaciones; y, por otro, fabricar estos hormigones con cementos altamente adicionados que permitan reducir su huella de carbono.

Sin embargo, los hormigones de altas prestaciones (y alta resistencia) se han fabricado tradicionalmente con cementos portland CEM I y clase resistente 52,5 R, que son los cementos con una mayor huella de carbono. El reto, pues, es mantener estas altas prestaciones con un cambio en el tipo cemento, para lo que hay que adoptar ciertas medidas en el diseño de la mezcla que básicamente son:

- Elección de un tipo de cemento altamente adicionado que tenga la mayor clase resistente posible.
- Reducción de la relación agua/cemento.
- Optimización del volumen de pasta en el hormigón.

Como criterio general, cuanto mayor es el contenido de adición, menor es la categoría resistente del cemento, si bien, existen numerosos cementos adicionados de categoría resistente 42,5 e incluso, aunque en menor medida, 52,5. Para el propósito que nos ocupa hay que elegir el cemento con una mayor categoría resistente posible.

Por otro lado, se debe reducir la relación agua/cemento al máximo a la vez que se mantiene la trabajabilidad del hormigón. En este sentido, la utilización de superfluidificantes es imprescindible y conviene indicar que las cenizas volantes es una adición muy agradecida, puesto

que mejora la trabajabilidad del hormigón en el caso de relaciones agua/cemento bajas.

Por último, en este objetivo de reducir la relación agua/cemento, un aspecto clave es la optimización de la pasta de cemento, cuyo volumen debe ser suficiente para mantener la trabajabilidad. La pasta también es importante para aumentar la compacidad del hormigón. En el diseño es importante conocer la granulometría y la forma del filler. La utilización de una granulometría continua en el propio filler e intentar que su geometría sea lo más esférica posible, mejorará la trabajabilidad del hormigón a la vez que aumenta su compacidad y, por lo tanto, su resistencia.

5. Conclusiones

Dada la importancia que las emisiones embebidas tienen en el carbono de ciclo de vida de los edificios e infraestructuras resulta importante focalizar los esfuerzos en la reducción del impacto asociado a los materiales de la construcción. Para ello, se tienen que identificar los elementos y materiales más intensivos en carbono del proyecto. Tanto en edificios como en obra civil el hormigón y el acero tienen un impacto significativo en el total de las emisiones del proyecto (aunque en menor medida en el caso de la edificación, ya que los edificios se componen de una mayor variedad de elementos y materiales).

Las principales conclusiones derivadas de las recomendaciones de diseño para la reducción de la huella de carbono de los elementos estructurales de hormigón, incluidas en este artículo, se resumen a continuación:

La reducción de la huella ambiental se debe conseguir empleando de manera conjunta estrategias de diseño que permiten optimizar las secciones estructurales con una adecuada prescripción de hormigones de menor huella de carbono que utilizan cementos más adicionados, siempre que las exigencias mecánicas y prestacionales del elemento lo permitan.

La prescripción de hormigones que utilizan cementos más adicionados es una estrategia adecuada para aquellos elementos estructurales sometidos a esfuerzos de flexión en los que el hormigón no está especialmente solicitado, siendo muy adecuados para cimentaciones y muros de contención por su mejor comportamiento frente a ataques químicos, pero igualmente viables para forjados.

Para aquellos elementos sometidos a esfuerzos de flexocompresión muy elevados (pilares en edificación o pilas de puentes y viaductos en obra civil), un incremento de la resistencia característica del hormigón por encima de la estrictamente exigida puede redundar en una reducción de la sección del elemento y una menor cuantía de armado, lo que permite compensar el incremento de huella de carbono que supone la utilización de cementos Portland en gran cantidad a través de una reducción en el volumen total de hormigón que se utiliza.

Los elementos pretensados exigen hormigones con altas resistencias características conseguidas a edades tempranas por lo que el Código Estructural limita los tipos de cementos utilizables en esta aplicación a los CEM I y CEM II principalmente. Dada esta limitación, en este caso se recomienda utilizar un CEM II/A 52.5 R que permite conseguir una reducción de aproximadamente un 12%.

La optimización de los parámetros de diseño de los forjados en edificación (que suponen el elemento de mayor impacto dentro de una estructura) deben considerar la tipología del edificio y futuros usos que se le quiera dar encontrando un equilibrio entre la funcionalidad del espacio y la huella de carbono.

Referencias

- [1] ECTP, WGBC, proposal for a European Partnership under Horizon Europe.
- [2] WGBC, ARUP, Net-zero buildings Where do we stand?, 2021.

- [3] X. Le Den, J. Steinmann, A. Kovacs, J. Kockat, Z. Toth, M. Röck, K. Allacker, Supporting the development of a roadmap for the reduction of whole life carbon of buildings final report for the, EU Publications, EU Commission.