Análisis de emisiones de CO₂ en la producción de forjados planos *in situ* de hormigón en comportamiento unidireccional

CO₂ emissions analysis from *in situ* concrete one-way flat slabs production

O. Liébana (*), M. D. G. Pulido (**), J. Gómez-Hermoso (***)

RESUMEN

Se ha realizado un estudio de soluciones de forjado sobre un edificio de referencia con luces de cinco a diez metros en un esquema unidireccional que recoja usos frecuentes en edificación. Se ha obtenido el consumo de materiales y cuantificado el impacto medioambiental con un criterio basado en emisiones de CO₂ generadas en la etapa de producción. Una vez analizados los resultados, se han podido valorar los diferentes sistemas y concluir cómo el pretensado de armadura postesa presenta una gran optimización de recursos. El desconocimiento de las técnicas, los desarrollos de la normativa actual que inciden en mayores gastos materiales o, simplemente, las inercias de trabajo que se resisten al cambio de sistemas conocidos aparentemente satisfactorios, son factores responsables de su mínima implantación. Pero sobre todo, es necesaria la aplicación global de criterios de sostenibilidad basados en reducción de emisiones y gasto energético, así como de un consumo más responsable de materia prima.

Palabras clave: Emisiones CO₂; forjados; losas planas; *in situ*; edificación; sostenibilidad; pretensado; armadura postesa.

ABSTRACT

In this work, different one-way slab solutions have been studied for a reference building, with spans from 5 to 10 meters, based on the most frequent uses in building in terms of material quantities, and environmental criteria based on CO₂ emissions generated during production. We have been able to evaluate the different systems and how post-tensioning slabs allow for optimization of material resources. The current status of low production of post-tensioning flat slabs is actually related to a combination of reasons such as lack of technical knowledge, developments in current codes in each country resulting in higher material consumption, or inertia in the workplace with resistance to changing systems which are apparently satisfactory. But above all, it is necessary to introduce sustainability criteria in construction based on reducing CO₂ emissions and also on a more responsible consumption of raw materials.

Keywords: CO₂ emissions; concrete; flat slabs; *in situ*; buildings; sustainability; post-tensioning.

(*) Universidad Europea de Madrid, (España).

(**) Instituto de Ciencias de la Construcción Eduardo Torroja (IETcc-CSIC). Madrid (España).

(***) Universidad Politécnica de Madrid, (España).

Persona de contacto/Corresponding author: oscar.liebana@uem.es (O. Liébana).

Cómo citar este artículo/Citation: Liébana, O., G. Pulido, M.D., Gómez-Hermoso, J. (2015). Análisis de emisiones de CO₂ en la producción de forjados planos *in situ* de hormigón en comportamiento unidireccional. *Informes de la Construcción*, 67(539): e096, doi: <http://dx.doi.org/10.3989/ic.13.029>.

Licencia / License: Salvo indicación contraria, todos los contenidos de la edición electrónica de *Informes de la Construcción* se distribuyen bajo una licencia de uso y distribución Creative Commons Reconocimiento no Comercial 3.0. España (cc-by-nc).

1. INTRODUCCIÓN

Si entendemos el desarrollo sostenible como satisfacer nuestras necesidades sin sacrificar las de la próxima generación, está en nuestras manos hacer un buen uso de los recursos naturales más cercanos y no poner en peligro el sistema natural heredado con emisiones que cambien el equilibrio global. España es el segundo país, tras Japón, en compra de derechos de emisiones, y solamente invirtiendo en la eficiencia energética, reducción de emisiones y consumo racional de la materia prima, podremos asegurar la sostenibilidad del desarrollo. La Unión Europea ha decidido un futuro de emisiones cero en la edificación (1), causante de la mitad de las actuales, principalmente debidas al gasto energético. Aspectos como la producción de forjados en estructuras de hormigón pueden suponer casi un 25 % del impacto total de las emisiones de CO₂ del edificio (2) (3). El conocimiento de las soluciones, su cuantificación en el análisis del ciclo de vida y un diseño adecuado de forjados puede suponer un gran avance en los objetivos de sostenibilidad.

El concepto de forjado plano hormigonado *in situ* se aplica a los elementos horizontales de los edificios sin descuelgues que se ejecutan en obra sin elementos prefabricados y con encofrado continuo. Históricamente, el elevado precio de los materiales ha tenido una incidencia muy importante en el coste total de la ejecución de los forjados, por lo que desde el comienzo se han utilizado soluciones aligeradas en losas. Desde hace unos años existe la tendencia a soluciones de losa maciza sobre soportes aislados, especialmente debido al aumento de los costes de mano de obra y a su facilidad constructiva, con una reducción de los plazos de ejecución y aprovechamiento de la obligatoriedad (por exigencias de seguridad y salud) del encofrado continuo (4).

La máxima economía de materiales estructurales en edificación se consigue con luces cercanas a los cinco metros, aunque en la actualidad se tiende a soluciones singulares, con mayor espacio libre entre soportes que dan la entrada, todavía de manera muy lenta, a sistemas de pretensado de armadura postesa en losas. El postesado no sólo permite conseguir mayor diafanidad, también menor espesor de forjados, menor cantidad de materiales, así como las ventajas de diseño, mecánicas y económicas que permiten la competencia directa en otros países con el resto de forjados en luces convencionales, pero no en España. La introducción de criterios de sostenibilidad y mayor especialización en la construcción puede permitir a este sistema introducirse fuertemente en el mercado, con menores costes materiales, mejor rendimiento y centrarse en una construcción más sostenible.

El objetivo de este trabajo es obtener un estudio comparativo cuantificando a partir de un criterio medioambiental, basado en emisiones de CO₂ generadas en la etapa de producción, para poder valorar los diferentes sistemas de forjado unidireccional, en especial la optimización del pretensado de armadura postesa.

2. EMISIONES, CERTIFICADOS DE SOSTENIBILIDAD Y PRETENSADO

2.1. Emisiones de CO₂

El CO₂ del proceso de fabricación del cemento se produce en la elaboración del clinker a partir del calentamiento de la caliza. La cantidad total de CO₂ producido varía dependiendo

del tipo de cemento. A nivel mundial se estima que se emiten unas 100 millones de toneladas a la atmósfera al año. El mercado futuro de emisiones, que aumentará el coste a las empresas y estados, obligará a unas reducciones sustanciales de emisiones a través de una mayor eficiencia en la producción y la optimización de ecocementos. Los materiales utilizados en el hormigón representan dos veces la producción mundial del resto de materiales constructivos. La fabricación del cemento libera aproximadamente el 5 % del total de emisiones de CO₂ a la atmósfera anualmente (5). Estas cifras destacan el uso intensivo de los recursos naturales y la emisión de gases que contribuyen significativamente al calentamiento global.

2.2. Cuantificación de la sostenibilidad

La cuantificación de la sostenibilidad tiene múltiples soluciones y dada su complejidad y los condicionantes del entorno se puede entender que existan diversos enfoques, estudiándose en la actualidad por diferentes instituciones y países, lo que confirma la importancia del trabajo aquí presentado. Por un lado están los sistemas de evaluación del impacto que persiguen el desarrollo de métodos para evaluar y presentar el potencial impacto medioambiental producido por el proyecto, antes de que llegue a producirse, para facilitar la toma de decisiones en el proceso de diseño. Por otro lado están los sistemas basados en el Análisis del Ciclo de Vida (ACV), que pretende ser un proceso objetivo para evaluar los efectos medioambientales asociados al edificio por medio de la identificación y cuantificación del uso de energía y materiales, y de la emisión de residuos, así como para evaluar y aplicar medidas de reducción de dicho impacto medioambiental (6).

Algunas de las herramientas más conocidas para la evaluación medioambiental son GBC-GBTool, VERDE (España), Promise (Finlandia), BREEAM (Reino Unido) y ESCALE (Francia), LEED (EEUU), ENVEST 2 (Reino Unido) o CASBEE (Japón). Destaca la herramienta denominada GBTool, del *Green Building Challenge (GBC)*, es un proyecto internacional, en el que España se ha incorporado en el año 2000 con la certificación Verde y forma parte de la IISBE (*International Initiative for Sustainable Built Environment*). Este método permite evaluar el rendimiento energético y medioambiental de los edificios. Presenta como característica, que lo distingue de otros sistemas de evaluación, el que se diseña desde el principio para permitir a los usuarios una mayor libertad con objeto de poder reflejar sus prioridades, tecnologías, tradiciones en la construcción e incluso los valores culturales existentes en diversas regiones o países solventando así el obstáculo principal para conseguir una herramienta global (7) (8).

2.3. Sostenibilidad y pretensado

En cuanto a la evaluación de las estructuras, es importante que las herramientas reflejen significativamente las contribuciones a la sostenibilidad real del hormigón estructural postesado. Es necesaria una importante valoración de la figura del proyectista en el diseño de la estructura y en coordinación con el resto de los agentes, recompensar la reducción de cantidad de material, asociada a su incidencia en el transporte, almacenaje, ejecución, uso y demolición (en todo el ACV). Además, es importante recompensar las consecuencias indirectas de su diseño como la reducción a largo plazo de ahorro de energía por reducción de climatización o como por ejemplo la reducción de empleo de ascensores en edificios de gran altura durante la vida útil (9).

El sistema de postesado puede reducir los elementos verticales, la menor cantidad de material disminuye el peso del edificio, reduciendo cimentación y muros, minimizando excavación. La reducción de espesores permite menores alturas, con reducción de CO₂, contaminación, ejecución y mantenimiento. Durante la vida útil, la reducción del volumen contribuye a una importante reducción de la energía necesaria de calor para acondicionar todo el espacio (10).

2.4. Índice de sostenibilidad de la EHE-o8

El índice de sostenibilidad de las estructuras de hormigón armado del código español (11) cuantifica la contribución de las estructuras a la sostenibilidad desarrollado en el proyecto o en la fase de construcción a partir de la aplicación de indicadores. Principalmente estimula el estudio del ciclo de vida completo del edificio, el uso de hormigón de árido reciclado, la reducción y mitigación del impacto por la ampliación de su vida útil. También promueve el uso de materiales reciclados y la reducción del impacto de la estructura del edificio. Sin embargo, no refleja suficientemente las soluciones que ayudan a la optimización de materiales y sólo se centra en el correcto uso de las soluciones elegidas (12).

3. MATERIALES Y MÉTODOS

3.1. Forjados, cargas, materiales y luces

Se ha realizado un estudio sobre un edificio tipo urbano de referencia (Tabla 1) de planta cuadrada de 40 × 40 m (Figura 1), con ocho plantas y dos sótanos, en el que no tienen incidencia especial los efectos térmicos, del viento y de resistencia al fuego sobre rasante. Existen dos núcleos de comunicación, medianeras, zonas de voladizo no singular, y se resolverá la misma superficie con diferentes luces en los ejes *x* e *y* de la planta de la figura (transversal-longitudinal). Se han contemplado tres parámetros variables: luces variando entre 5 y 10 metros, dentro de la edificación no singular; uso, con seis de los principales de una edificación según CTE (13) (Aparcamiento, Acceso, Locales, Viviendas, Cubierta y Zona de Archivo) y el tercero es el tipo de forjado, siempre *in situ* y plano, planteando losas macizas armadas y postesadas (Figura 2), losas reticulares aligeradas de casetón perdido o recuperable (Figura 3) y de nervios unidireccionales con aligeramientos recuperables, cerámicos o de hormigón (Figura 4). Las losas postesadas se han proyectado según criterios de tres códigos diferentes (EHE-o8, EC-2 y ACI-318) para apreciar las diferencias sobre las cuantías necesarias. Se puede encontrar en detalle la explicación técnica de las soluciones de forjados (Tabla 2) en la tesis de referencia (3).

Figura 1. Planta para edificio de referencia con ejes de 8 × 8 metros.

Tabla 1. Cotas y usos del edificio de referencia.

COTA	USO
+22,00	A. Cubiertas
+19,00	B. Viviendas-Oficinas
+16,00	B. Viviendas-Oficinas
+13,00	B. Viviendas-Oficinas
+10,00	B. Viviendas-Oficinas
+7,00	F. Archivos
+4,00	E. Locales, Zonas públicas, Aglomeración, etc.
+0,00	E. Locales, Zonas públicas, Aglomeración, etc.
-2,50	D. Aparcamiento vehículos ligeros
-5,00	D. Aparcamiento vehículos ligeros _Cimentación

Figura 2. Losa maciza pretensada de armadura postesada de sistema no adherente (izquierda) y adherente de vaina plana (derecha).

Figura 3. Aligeramientos perdidos de hormigón y recuperables en losa aligerada reticular.

Figura 4. Aligeramientos perdidos de bovedilla de hormigón (izquierda) y cerámica (derecha) en forjados de nervios unidireccionales.

Tabla 2. Abreviaturas de forjados en figuras.

ABREVIATURAS EN FIGURAS	FORJADO
LOSA M_PT	Losa Maciza Postesada
RET_BOV	Reticular con bovedilla o aligeramiento perdido
RET_REC	Reticular con bovedilla o aligeramiento recuperable
UNID BOV	Unidireccional bovedilla perdida
UNID BOV V(nº)	Unidireccional bovedilla perdida con Vigas de luz (m.)
LOSA M_PT_ACI	Losa Maciza Postesada según norma ACI
LOSA M_PT_EHE	Losa Maciza Postesada según norma EHE-08
UNID BOV CER	Unidireccional bovedilla perdida cerámica
UNID BOV HORM	Unidireccional bovedilla perdida de hormigón

Se ha dejado fuera del estudio la influencia de la acción del sismo. Por la altura del edificio tipo no se considera que las acciones de viento puedan afectar al dimensionado de forjados de una manera que repercuta significativamente en el estudio.

Se han proyectado las diferentes propuestas, alrededor de 200 edificios de referencia, obteniendo el consumo de materiales y se ha cuantificado el impacto medioambiental con un criterio basado en las emisiones de CO₂ generadas en la etapa de producción de los forjados. A partir de las cuantías de materiales se ha podido realizar un estudio de coste de material, en el que se incluye la repercusión de las emisiones en la ejecución.

Para el cálculo y dimensionado de forjados unidireccionales, losas macizas y reticulares se ha utilizado el programa Cypecad espacial v.2012k, de uso común en las oficinas de cálculo en España, y para losas macizas pretensadas se ha utilizado el programa CEDRUS 5.0, que es un programa del grupo CUBUS de Elementos Finitos (EF) para el análisis de cálculo lineal, estático y dinámico de placas (tanto para flexión como para cargas en el plano).

3.2. Sistema de postesado adherente

El sistema adherente tiene importantes ventajas: alta capacidad a flexión, buena distribución de la fisuración, buena protección frente a la corrosión, capacidad para realizar posteriores huecos y mayor facilidad en su demolición. Hay desventajas como una operación adicional de inyección y una ejecución más laboriosa. Pero el uso de tendones adherentes contribuye a reducir la cuantía de acero total, lo que implica en cualquier caso una solución más sostenible. Para las soluciones postesadas, se han utilizado vainas planas que maximizan la excentricidad del pretensado y minimizan el refuerzo con barras. Los tendones están formados por cordones (de 2 a 5) con un ancho de 70 mm y un espesor de tan sólo 20 mm.

3.3. Espesor mínimo

Para la elección del espesor de forjados, el proyectista debe tener en cuenta las deformaciones máximas, la resistencia a cortante, la resistencia a fuego (especialmente en soluciones aligeradas) y recubrimientos necesarios por durabilidad. En el estudio realizado, la selección la determina la experiencia personal o consideraciones de máximas esbelteces recomendadas en la EHE-08 y EC-2 (14), aunque la decisión a menudo viene originada por la gran influencia de las cargas de servicio

de cada forjado. En todos los casos se ha realizado la comprobación de deformaciones máximas, con gran atención a soluciones esbeltas de losas armadas fisuradas. Es especialmente sencillo el control de deformaciones de soluciones postesadas no fisuradas, tanto en la práctica como en este estudio.

Al no aplicar soluciones con ábacos descolgados en losas postesadas, los esfuerzos de punzonamiento marcan en ocasiones el espesor de losas en soluciones postesadas. Guías de diseño internacionales como *Concrete Society (CS)* (15), *Post-Tensioning Institute (PTI)* (16), *Federation International du Beton* (17) o *Cement Concrete & Aggregates Australia (CCA)* (18) recomiendan unas esbelteces dependiendo de las luces, cargas y del tipo de forjado. En el estudio realizado (Figura 5) se utilizan espesores desde los 160 mm en losas postesadas de 5 metros hasta un máximo de 500 mm como rango de utilización en edificación no singular.

3.4. Criterios de armado

3.4.1. Armadura pasiva

En cuanto a losas macizas, se ha utilizado el método más extendido de ejecución de utilizar armaduras base superior e inferior con refuerzos en malla sobre soportes. Las armaduras bases en losas macizas armadas y postesadas, según criterios de la EHE-08 y EC2, cumplirán cuantías mínimas geométricas y mecánicas de la norma. En cuanto a las losas macizas postesadas según criterios de la ACI-318, no será obligatoria la existencia de armadura pasiva según la disposición de tendones y comprobación de tensiones en servicio.

En cuanto a losas aligeradas, se han utilizado los criterios planteados por la EHE-08, con armadura continua inferior en nervios, el 100 % solapada en banda de soportes y al menos el 50 % en banda central, y con refuerzos superiores en apoyos según las longitudes simplificadas. En nervios se utilizarán como mínimo dos barras, normalmente iguales exceptuando barras mayores de 16 mm y cumpliendo cuantías mínimas por nervio.

El armado de los pórticos principales de forjados unidireccionales se ha realizado con armadura base longitudinal con estribos incorporados de redondos de 12 y 16 mm, con cercos sencillos o dobles según limitaciones de separación de estribos. Hasta los siete metros de luz se realiza con una única armadura inferior por vano y refuerzos en apoyos, a partir de esta luz se realizará con refuerzos longitudinales en vano y en apoyos.

Figura 5. Espesores utilizados en el estudio para forjados unidireccionales de 8 x 5 m.

3.4.2. Armadura activa

Según el criterio actual en los fabricantes de postesado y en la gran mayoría de proyectistas españoles, la utilización de sistemas adherentes de postesado en nuestro país es la más recomendable y el que se debe imponer dada la frecuencia de perforaciones y huecos tras la ejecución de los forjados. Se ha elegido un sistema de vaina plana que presenta grandes ventajas para la ejecución en zonas de densidad de armadura altas dado que permite agrupar hasta cinco cordones por tendón. En este estudio la geometría de los edificios es regular por lo que se ha utilizado una solución multicordón adherente de vaina plana.

3.4.3. Control de fisuración

La fisuración de forjados es inevitable y la estrategia del estado límite de fisuración es que esta situación no suponga un inconveniente en su utilización. Para los forjados armados es necesario una cuantía mínima de acero en barras por retracción y temperatura; en losas, capas de compresión y nervios, se realizará según lo establecido en el Artículo 49 de la instrucción EHE-o8 (estas cuantías son similares a otros códigos). En losas postesadas, es necesario disponer una armadura pasiva mínima que junto al pretensando permita cumplir los requisitos de Estado Límite de Servicio (ELS) y Estado Límite Último (ELU), en el momento de transferencia, en servicio y tras las pérdidas totales de de pretensado, teniendo en cuenta así mismo los criterios de durabilidad y fuego. Las cuantías geométricas mínimas de elementos parcialmente traccionados se definen para controlar la fisuración debida a deformaciones impuestas producidas por temperatura y retracción –EHEo8-42.3.5–. En los casos en los que se tiene en cuenta el control de fisuración por otros medios como el pretensado, en el que las zonas traccionadas no superen la resistencia media a tracción f_{ctm} –EC-2-732(4)–, no es necesario disponer armadura mínima para el control por fisuración.

La norma española no presenta cuantías mínimas específicamente para losas postesadas, por lo que a menudo se proyecta según los criterios de la norma americana ACI318-11 (19), que tiene unos criterios sencillos y poco restrictivos. Todas las losas deben tener un mínimo de refuerzo adherido (con barras o cordones adherentes) sobre pilares en momentos negativos que distribuya la fisuración. En zonas de momentos positivos no es necesario el refuerzo si la fibra traccionada no excede

$0,17 \cdot \sqrt{f'_c}$. De acuerdo al EC-2, en elementos pretensados no existen mínimos en secciones donde la tracción es inferior a $\sigma_{ct,p}$ bajo la combinación característica. Para elementos con tendones no adherentes se aplica la de los elementos armados.

Si el proyectista utiliza los criterios de la norma española para elementos armados, la solución será más cara que en otros países, suponiendo esta decisión más de 5,5 kg/m² de acero, con el consiguiente aumento de emisiones de CO₂. Parece lógico no tener que incrementar cuantía de acero pasivo cuando se controla la fisuración por tracción con el pretensado, siempre que se tenga en cuenta el control de la retracción.

3.4.4. Requerimientos en Servicio. Durabilidad y fisuración

Según la EHE-o8, la apertura máxima de fisura debe ser menor de 0,3 mm y en ambiente IIa se requiere que esté totalmente comprimida bajo la combinación casi-permanente, lo que requiere una alta cantidad de pretensado. En el presente trabajo se ha adoptado el método simplificado del EC-2, en el que se controla mediante una separación máxima de barras y su diámetro, según su tensión máxima. Este método es de fácil utilización en los programas de cálculo actuales.

3.4.5. Emisiones de CO₂ a partir de la cantidad de material consumido

En varios trabajos se ha ido introduciendo este criterio cuantitativo de sostenibilidad ampliamente reconocido, basado en emisiones de CO₂, como el modelo de cuantificación de las emisiones producidas en edificación derivadas de los recursos materiales consumidos en su ejecución (20) para bloques residenciales. Específicamente para estructuras de edificación, las emisiones de dióxido de carbono se han calculado para diferentes tipos de forjados o en pórticos (21) a partir de sus componentes según el banco BEDEC del ITEC (22). En este estudio se han calculado las emisiones de la etapa de producción dentro del ciclo de vida, que pueden suponer hasta la mitad del total según el tipo de edificio (3), y es suficiente para el análisis entre las diferentes tipologías de forjados utilizadas, se ha utilizado BEDEC basado en ECOINVENT para la cuantificación de emisiones de forjados

Tabla 3. Emisiones de CO₂ consideradas según componentes (varias unidades utilizadas).

Unidad	Componente	Emisiones (kg CO ₂)
m ³	Hormigón HA-25 para forjados <i>in situ</i>	197
m ³	Hormigón HA-35 para forjados <i>in situ</i> pretensados	274
kg	Acero B-500 en mallazo	2,82
kg	Acero B-500 en barras de refuerzo	3,04
kg	Acero Y-1860 en cordones para forjados postesados	3,12
kg	Acero en fibras para forjados <i>in situ</i>	1,5
m	Vaina plana para tendones en forjados postesados	3,36
ud.	Tesado de tendones en forjados postesados	2,21
ud.	Inyección de tendones en forjados postesados	0,35
m ²	Encofrado continuo para forjados <i>in situ</i>	7,22
m ²	Encofrado para forjados aligerados recuperables	2,24
m ²	Bovedillas Cerámicas para forjados aligerados 150	11,7

según sus componentes (Tabla 3). La etapa de producción considera el proceso de extracción y transformación de los materiales constitutivos: extracción, transporte del origen a la fábrica y proceso de fabricación. No se incluyen en los datos el transporte a obra ni los procesos de obra que se incluirían en la fase de construcción, tampoco las fases de uso ni de fin de vida.

4. RESULTADOS

A continuación se presentan algunos de los gráficos realizados sobre los resultados obtenidos (Figuras 6, 7, 8, 9, 10, 11, 12 y 13), aunque en la tesis realizada (3) se pueden encontrar todas las posibilidades de luces, tipologías y usos descritos en el apartado 3.1.

Figura 6. Cuantías de Emisiones de CO₂ con luces de 5 × 6 m según usos y tipologías.

Figura 7. Cuantías de Emisiones de CO₂ con luces de 5 × 8 m según usos y tipologías.

Figura 8. Cuantías de Emisiones de CO₂ con luces de 5 × 10 m según usos y tipologías.

Figura 9. Toneladas de CO₂ del edificio tipo completo de 6 × 5 m según tipologías.

Figura 10. Emisiones de CO₂ en losa maciza postesada con luces de 10 m × (5 m hasta 10 m).

Figura 11. Toneladas de CO₂ del edificio tipo y su origen con losa nervada de 6 × 5 m según usos.

Figura 12. Toneladas de CO₂ del edificio tipo y su origen con forjado unidireccional de 6 × 5 m y bovedilla de hormigón.

Figura 13. Cuantías de Emisiones de CO₂ en forjados reticulares de bovedilla cerámica 9 m × (10 m hasta 5 m)

5. DISCUSIÓN DE LOS RESULTADOS

5.1. Sobre las emisiones

La solución de losa maciza pretensada según criterios de la ACI-318 es la que contribuye con menos emisiones, incluso desde luces de 5 × 6 m y hasta en un 40 % menos que las soluciones de losa maciza armada, amplificándose esta mejora según aumenta la luz y la carga. Según criterios de la EHE-08 o EC-2, y a partir de luces con ejes de 5 × 8 m, ya destacan del resto con menores cuantías. A partir de luces de 9 metros no parece acertada desde el punto de vista de las emisiones otra alternativa, especialmente con cuantías mínimas según ACI-318. Las losas nervadas presentan muy bajas cuantías de emisiones, aunque aumentan significativamente cuando se incrementa la luz en los vanos de los pórticos. A partir de luces con ejes de 7 × 8 m es la única solución unidireccional posible, además de presentar un buen comportamiento en emisiones.

Se puede entender que hasta ejes de luces de 6 × 7 m no existen soluciones especialmente diferentes, exceptuando la losa maciza que siempre tiene mayores emisiones. Para cargas importantes, claramente la solución postesada destaca sobre el resto por presentar menos emisiones.

5.2. Origen de las emisiones por tipología

En las *losas macizas armadas*, el origen de la mitad de las emisiones proviene de los mallazos de acero pasivo, debido a la poca optimización del acero en losas que apuestan por la facilidad de ejecución. Para luces mínimas y cargas ligeras, la importancia de mallazos se reduce y aumenta la importancia del cemento y refuerzos como origen de las emisiones.

En la *solución pretensada de losa maciza*, la mitad de las emisiones proviene del cemento del hormigón. Tan sólo la quinta parte del origen de emisiones es debida a los elementos propios del pretensado y otra quinta parte es debido a la suma de mallazos y barras de acero. Esta situación refleja el buen aprovechamiento del pretensado que repercute en una baja importante en la armadura pasiva para su actuación frente a la fisuración por retracción en las losas macizas. Estas proporciones son constantes para cualquier luz.

En la *solución pretensada según EHE-08* se duplican las emisiones debidas a la armadura pasiva, confirmando la fuerte importancia de los criterios de cuantías mínimas por retracción en las cuantías de emisiones de losas pretensadas de armadura postesada.

En las *soluciones aligeradas* de casetón perdido destaca la proporción en el origen de la cuarta parte de las emisiones debida a los aligeramientos de las bovedillas de hormigón respecto a la media de un 15 % de las soluciones cerámicas, manteniéndose estables estas proporciones en cualquier luz. Las soluciones aligeradas de casetón perdido, además, están realizadas con elementos difícilmente separables, mediante capas adheridas que penaliza la demolición, y aumenta el gasto energético en esta última fase del ciclo de vida. En las soluciones aligeradas de casetón recuperable, que evita las emisiones de las bovedillas, la repercusión mayor del origen de las emisiones es el cemento, debido al mayor volumen de hormigón, especialmente causado por los importantes requerimientos de fuego.

5.3. Por tipos de forjado

Las *losas pretensadas de armadura postesada*, además de ser la solución con menos emisiones, presenta un comportamiento lineal entre emisiones y luz. Al contrario ocurre con las *soluciones macizas armadas*, que además de ser las que producen mayores emisiones, a partir de los 8 metros presentan aumentos parabólicos con fuertes aumentos de cuantías, debido a la elevada cantidad de acero, especialmente por el sobredimensionado que produce la simplificación de la ejecución con mallazos para armadura base. Esa situación se complica en diseños unidireccionales si no se recurre a mallazos con separaciones de barras diferentes en cada dirección. Sin embargo, la distribución del pretensado según la luz en cada eje permite una clara optimización del forjado para la solución pretensada.

Las soluciones unidireccionales con pórticos y aligeramientos perdidos de bovedillas cerámicas contribuyen con menores emisiones que la solución con bovedillas de hormigón. La proporción de las emisiones debidas a los aligeramientos dentro del total suele ser muy constante en el forjado para cualquier luz. Las losas nervadas tienen

un mayor rango de utilización, y sin duda son la solución más adecuada frente a las emisiones para luces pequeñas de viga y medias-altas en la dirección de los nervios de forjado.

5.4. Coste de las emisiones

Se ha realizado un análisis orientativo con datos del valor de la tonelada de emisiones de CO₂ actual en el mercado de emisiones y con datos futuros a medio plazo que sugieren los expertos. El coste actual de los derechos de emisiones de CO₂ dentro de la producción de los forjados sería alrededor de un 2 % del coste material total de la estructura, algo más en las macizas armadas (2,3 %) y algo menos en las pretensadas (1,8 %) del coste total de la estructura, pudiendo llegar en un futuro a medio plazo a un 10 % en las macizas armadas según los valores esperados, y alrededor de un 8,2 % en las pretensadas.

5.5. Elección de tipologías

Los forjados unidireccionales *in situ* de aligeramiento perdido deberían recoger el mercado actual de los forjados de viguetas prefabricadas, que previsiblemente reducirá su empleo en los próximos años, al menos en las zonas urbanas más desarrolladas. Los forjados *in situ* permiten mayor flexibilidad que los de viguetas prefabricadas a bajo coste, una vez que el encofrado es el mismo en las dos soluciones, aunque siempre en un ámbito reducido con luces menores de 7 metros y espesores por debajo de 350 mm. Es interesante tener en cuenta la utilización inteligente de los forjados planos de losa nervada. Estas losas han obtenido en la investigación realizada resultados óptimos y sostenibles, siempre que el diseño incida en luces de viga mínimas y mayores luces en la dirección de los vanos de los nervios.

Como criterio general, la solución de losa maciza pretensada de armadura postesa con sistema adherente de vaina plana es el que proporciona mayores esbelteces, menores consumos de acero, un consumo de hormigón razonable y, en todos los casos, menores cuantías de emisiones de CO₂ en la producción de forjados de edificación desde luces mínimas de edificios como ya se ha cuantificado en el análisis de resultados y anteriores conclusiones. Las diferencias con otras soluciones en luces de hasta seis metros no son excesivas y la complejidad del sistema puede hacer desestimar la elección del postesado de la losa. Por encima de los seis metros no está justificada la utilización de la losa maciza armada desde el punto de vista de consumo de material y de la sostenibilidad, dado que el gasto energético, y las emisiones se duplican e incluso se triplican frente a una solución postesada, como se ha podido ver en el análisis comparativo de la investigación y en las conclusiones anteriores.

5.6. Sobre la entrada del postesado en edificación en España

En la actualidad, para luces entre 6 y 9 metros, la solución pretensada de armadura postesa con sistema adherente realizada en la investigación no es la más utilizada a pesar de sus beneficios anteriormente presentados, ni siquiera tiene un mercado en competencia con el resto de soluciones armadas. Del estado del conocimiento y de la investigación realizada se pueden establecer varios factores de influencia:

Costes y plazos competitivos de las soluciones aligeradas. Aunque en un principio las soluciones aligeradas puedan suponer menor rendimiento de ejecución, un gran conocimiento y experiencia en este tipo de forjados aligerados permite plazos y costes óptimos. Según lo estudiado, los costes de las soluciones aligeradas unidireccionales de hasta 7 metros y bidireccionales de hasta 9 metros son muy competitivos. Por lo tanto, los criterios de cuantías mínimas de la EHE-08, que implican un encarecimiento por mayor cantidad de acero en las pretensadas, son claves a la hora de conseguir el diseño de una solución más económica en luces habituales entre 7 y 8 metros.

Técnica insuficientemente extendida. En la actualidad existe un insuficiente número de técnicos habituados a estas técnicas específicas de pretensado de armadura postesa en edificación. Estos técnicos, proyectistas y constructores que recogen el conocimiento de este tipo de sistemas en España son los que realizan la totalidad de los proyectos con un alto nivel de especialización. Por el contrario, el sector más amplio de proyectistas y clientes, optan por realizar soluciones conocidas de anteriores edificios. Una de las razones que impide la difusión de la técnica es que no existe bibliografía actual en España con ejemplos realizados y recomendaciones técnicas actualizadas.

Mayor complejidad y detalle en proyecto. Para el proyecto de lasas pretensadas de armadura postesa se requiere mayor tiempo y esfuerzo de cálculo, delineación y control de proyecto, lo que supone mayores gastos de ingeniería y por tanto mayores honorarios. Este encarecimiento, que puede parecer mínimo en comparación con los costes de ejecución, puede ser importante para proyectos que en las primeras etapas de desarrollo no tengan una suficiente inversión del cliente. También es importante tener en cuenta desde la primera etapa el proyecto de instalaciones, coordinado con el proyecto de arquitectura que impida las incertidumbres de huecos y cargas. Esta coordinación requiere un gran esfuerzo en la coordinación de todo el proyecto y los errores o modificaciones provocan mayores gastos en soluciones de lasas pretensadas.

Dificultades para elección de códigos. Como se ha estudiado en el presente trabajo, algunos puntos de la normativa española suponen un exceso de cuantía mínima pasiva por fisuración respecto a otras normativas, y esto hace que encarezca la solución. Este punto junto con otros ya mencionados como las bases de cálculo o el punzonamiento, supone que algunos proyectistas elijan otros códigos y tengan mayores dificultades para la aprobación de los proyectos que optan por otros criterios de diseño. Una revisión de la normativa en este capítulo adaptada a la realidad de las nuevas técnicas de postesado en edificación y acorde a otros códigos podría mejorar su aplicación.

Criterios de sostenibilidad basados en gasto energético y emisiones. Por último, y como tema fundamental de la investigación presentada, en el aspecto de la sostenibilidad, todavía no existen límites en los requerimientos de la construcción de estructuras sobre gastos energéticos o emisiones de CO₂, como ocurre en otros aspectos del proyecto. Estos criterios son utilizados actualmente para la eficiencia energética y también podrían ser asimilados para el resto del análisis del ciclo de vida del edificio. Pueden ser incluidos como criterio de primer orden para la certificación de

proyectos de estructuras como ocurre en proyectos de instalaciones de edificios. El consumo de material y la optimización, relacionados directamente con las emisiones de CO₂, podría ser un criterio fundamental en la elección del tipo de forjado.

Por otro lado, no aplicar técnicas de aprovechamiento y optimización de la industria de la edificación en todo su ciclo de vida de una manera extendida, como metodologías *Building Information Modelling (BIM)*, *Lean Construction*, etc., tal y como se empieza a realizar en algunos países avanzados, hace muy complicado que se aprecien las grandes ventajas de ahorro material de la técnica de pretensado de armadura postesa.

6. CONCLUSIONES FINALES

Según este análisis cuantitativo basado en emisiones de CO₂, la solución con mayor optimización medioambiental es la introducción del sistema de pretensado de armadura postesa en losas de hormigón. Es un sistema poco utilizado, principalmente por desconocimiento de la técnica y una incidencia negativa de la actual normativa. La introducción de criterios medioambientales basados en reducción de emisiones y consumo responsable de materia prima puede permitir una mayor utilización en el futuro. Un diseño con las tipologías adecuadas, especialmente con forjados aligerados y en luces pequeñas también llevan a importantes ahorros en emisiones de CO₂.

REFERENCIAS

- (1) Parlamento Europeo/Consejo de la Unión Europea. (2010, 19 de mayo). Directiva 2010/31/UE relativa a la Eficiencia Energética de los Edificios. *Diario Oficial de la Unión Europea*. L 153/13.
- (2) Zabalza, I. (2011). Adaptación de la metodología del análisis de ciclo de vida para la evaluación y la mejora del impacto energético y ambiental de la edificación en España (Tesis Doctoral). Zaragoza: Universidad Zaragoza.
- (3) Liebana, O. (2012). Evaluación y análisis de las emisiones de CO₂ de la producción de forjados planos hormigonados *in situ* en el análisis de ciclo de vida (Tesis Doctoral). Madrid: Universidad San Pablo CEU.
- (4) Marí, A., Ortega, H., Pérez, G., Sáiz, S. (2002, febrero). *Recomendaciones para el proyecto y construcción de placas macizas de hormigón in situ para forjados*. Universidad Politécnica de Catalunya UPC - Grupo Celsa.
- (5) Worrel, E., Price, L., Martin, N., Hendricks, C., Meida, L.O. (2001). Carbon dioxide emissions from the global cement industry. *Annu Rev. Energy Environ*, 26:303-329, doi: <http://dx.doi.org/10.1146/annurev.energy.26.1.303>.
- (6) Liebana, O. (2013). Certificados de sostenibilidad y hormigón. En *Blog: SBIM & Sustainability in building structures*. <http://oliebana.com/2013/03/31/certificados-de-sostenibilidad-y-hormigon/>.
- (7) Macías, M., García-Navarro, J. (2010). Metodología y herramienta VERDE para la evaluación de la sostenibilidad en edificios. *Informes de la Construcción*, 62(517): 87-100, doi: <http://dx.doi.org/10.3989/ic.08.056>.
- (8) Macías, M., Álvarez-Ude, L. (2007, 7 de junio). Evaluación de la sostenibilidad en la edificación. En *Jornadas de Innovación en las técnicas, los sistemas y los materiales de construcción*. Madrid.
- (9) Post-Tensioning Institute. (2009). 41 Sustainability and Post-Tensioned Concrete: PT-Gray is the new Green. *PTI Journal*, 7(1).
- (10) Liebana, O. (2013). LEED y postesado en edificación. En *Blog: SBIM & Sustainability in building structures*. <http://oliebana.com/2013/02/03/leed-y-postesado-en-edificacion/>.
- (11) Ministerio de Fomento. (2008). *EHE-08. Instrucción de Hormigón Estructural* (1ª edición revisada). Madrid: Comisión Permanente del Hormigón.
- (12) Liebana, O., G. Pulido, M.D., Gomez-Hermoso J. (2010, octubre). Evolution and sustainability of in-situ concrete flat slabs in office buildings. En *XXVII IAHS World Congress on housing, Design for sustainability and refurbishment*. Santander.
- (13) Ministerio de Fomento - CTE. (2009). *DB-SE-AE. Seguridad Estructural. Acciones en Edificación*. Revisión Abril 2009.
- (14) CEN. (2002). *EC-2. Eurocode 2: Design of concrete structures-Part 1: General rules and rules for buildings*. European Committee for Standardization. Brussels.
- (15) Concrete Society. (2005). *Post-tensioned concrete floors, Design Handbook*. Technical Report nº43. 2ªed. UK: Concrete Society.
- (16) Post-Tensioning Institute. (2006). *PTI: Post-Tensioning Manual* (6th Edition).
- (17) FIB (CEB-FIP). (1998). *Recommendations for the Design of Post-tensioned Slabs and Foundation Rafts, FIP Recommendations*. FIP Commission on practical design-Federation International Du Beton
- (18) CCA. (2003). *Guide to Long-Span Concrete Floors, CCA T36-2003*. Australia: Cement Concrete & Aggregates Australia.
- (19) ACI. (2011). *Building Code Requirements for Structural Concrete (ACI 318-11) and Commentary*. Reported by ACI Committee 318. Structural Building Code. USA: American Concrete Institute.
- (20) Mercader, M.P., Ramírez De Arellano, A., Olivares, M. (2012). Modelo de cuantificación de las emisiones de CO₂ producidas en edificación derivadas de los recursos materiales consumidos en su ejecución. *Informes de la Construcción*, 64(527): 401-414, doi: <http://dx.doi.org/10.3989/ic.10.082>.
- (21) Payá-Zaforteza I., Yepes, V., Hospitaller, A., González-Vidosa, F. (2009). CO₂-optimization of reinforced concrete frames by simulated annealing. *Engineering Structures*, 31(7): 1501-1508, doi: <http://dx.doi.org/10.1016/j.engstruct.2009.02.034>.
- (22) ITEC. (2011). Banco estructurado de elementos constructivos BEDEC 2011. <http://www.itec.es/noubedec.e/bedec.aspx>. Institut de Tecnologia de la Construcció de Catalunya.

* * *