

ANÁLISIS MULTIVARIANTE PARA LA ESTIMACIÓN DE LA CONTRIBUCIÓN A LA SOSTENIBILIDAD DE LOS FORJADOS RETICULARES

Mireia BALLESTER RAMOS

Ingeniera de Caminos, Canales y Puertos
BECSA S.A.U.

Técnico de Proyectos e I+D+i

mballester@becsa.es

Francisco José VEA FOLCH

Ingeniero de Caminos, Canales y Puertos
BECSA S.A.U.

Director Departamento de Proyectos e I+D+i

fivea@becsa.es

Víctor YEPES PIQUERAS

Dr. Ingeniero de Caminos, Canales y Puertos
ICITECH. Universitat Politècnica de València

Profesor Titular de Universidad

vyepesp@upv.es

RESUMEN

Se presenta una caracterización estadística de una muestra de 126 de forjados reticulares de hormigón armado empleado en edificación con objeto de establecer fórmulas de predimensionamiento económico y medioambiental de este tipo de elementos estructurales. Para ello se ha realizado un análisis exploratorio y otro multivariante de las variables geométricas determinantes, de los consumos de materiales y de los costes económicos y medioambientales. Los resultados muestran que es posible obtener beneficios medioambientales significativos sin penalizar en exceso el coste económico. Así, una reducción media del 12% en las emisiones de CO₂ conlleva una disminución media del coste del orden del 5%. De forma análoga, una contracción máxima del coste del 6% comporta un descenso en torno al 11% en la emisión de estos gases.

PALABRAS CLAVE: Forjado reticular, edificación, predimensionamiento económico, coste medioambiental, análisis multivariante, sostenibilidad.

1. Introducción

En las estructuras de edificación resulta interesante emplear forjados de losas planas por las ventajas funcionales, constructivas y económicas que presentan. Según apunta Regalado [1], la presencia de techos planos en la edificación constituye una realidad difícilmente cuestionable. Dentro de las soluciones estructurales de techo plano, los forjados reticulares con casetones de aligeramiento perdidos de hormigón o poliestireno tienen cada vez mayor presencia en el mercado como consecuencia de su adaptabilidad a geometrías en planta irregulares o complicadas, la facilidad que permiten en el replanteo de las perforaciones requeridas por las cada vez más numerosas instalaciones y su versatilidad para adecuarse a las exigencias de resistencia al fuego.

La proliferación de programas informáticos que permiten efectuar cálculos espaciales de estructuras completas ha facilitado el análisis estructural de los forjados reticulares. Aun así, la definición preliminar de la geometría y de los materiales, sigue siendo un paso previo al análisis estructural posterior. Efectivamente, el cálculo tradicional se puede entender como un proceso

iterativo donde, a partir de un predimensionamiento de la estructura, se realiza un cálculo de esfuerzos y un dimensionamiento estructural que atienda al cumplimiento de todos los estados límites y de servicio exigibles; si el resultado, aún siendo seguro y fiable, no cumple los requerimientos económicos o estéticos pretendidos, el proceso se repite hasta alcanzar una solución que se considere adecuada. Este proceder, muy influenciado por la experiencia del proyectista, conduce a diseños seguros pero no necesariamente óptimos desde el punto de vista económico o ambiental. Esta incertidumbre en los diseños justifica la necesidad de desarrollar herramientas de ayuda en la toma de decisiones. Distintos autores [2-4] han propuesto tablas, ábacos o expresiones que permiten valorar las cuantías en los consumos de materiales o los costes económicos de los forjados reticulares de hormigón. Sin embargo, estos trabajos no han abordado la estimación de alguna métrica que permita evaluar el coste medioambiental de este tipo de elementos.

La Instrucción de Hormigón Estructural EHE-08 [5] define en su Anejo 13 un Índice de contribución de las estructuras a la sostenibilidad (ICES). Sin embargo, este indicador presenta ciertas limitaciones a la hora de medir determinados aspectos que inciden en la contribución a la sostenibilidad de una estructura. Así, a modo de ejemplo, no tiene en cuenta criterios como la idoneidad de la tipología estructural y el ahorro de materiales fruto de un dimensionamiento ajustado [6]. Una forma de evaluar la sostenibilidad sería definir fórmulas de predimensionamiento que permitan estimar el consumo de materiales y el coste económico y ambiental de los forjados reticulares y, al mismo tiempo, orientar al proyectista en la selección de los diseños más eficientes o con un mayor valor a efectos de la sostenibilidad. Con todo, el estudio que aquí se presenta se circunscribe a la estimación del consumo energético y de las emisiones de CO₂ resultantes, constituyendo la valoración de la contribución a la sostenibilidad una métrica de mayor complejidad que escapa a los objetivos del trabajo.

2. Modelo estructural y criterios de dimensionamiento

El modelo estructural adoptado para efectuar el análisis es el representado en la Figura 1. Se trata de una planta de geometría rectangular formada por una retícula con 5 vanos en la dirección longitudinal y 3 en la transversal, siendo las luces iguales en ambas direcciones.

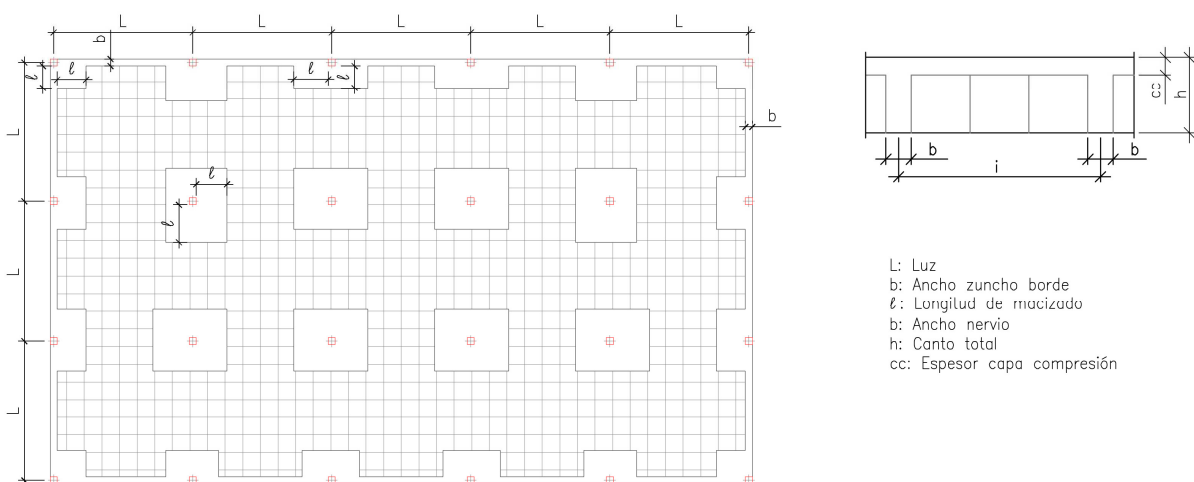


Figura 1. Planta y sección tipo del forjado reticular contemplado.

Se macizan las zonas situadas alrededor de los pilares dando lugar a los denominados ábacos. Los nervios del forjado se han configurado en sección en "T" con ancho de nervio constante de valor 0,10 m; 0,12 m; 0,14 m y 0,16 m y espesor de la capa de compresión de 0,05m y 0,07 m. Si bien existen en el mercado piezas de aligeramiento de distintos materiales y dimensiones, se han considerado únicamente, en aras de la simplificación del análisis, casetones de aligeramiento perdidos de hormigón y de poliestireno expandido de 0,60 m ancho y 0,20 m; 0,22 m y 0,25 m de altura. Se han adoptado interejos iguales en ambas direcciones. Los zunchos de borde contemplados tienen ancho de 0,30 m y el mismo canto que el forjado. En lo que se refiere a los materiales, se ha empleado hormigón HA-25/B/20/IIa y acero de calidades B500S en las barras corrugadas y B500T en las mallas electrosoldadas.

Las acciones consideradas se han establecido de acuerdo con el CTE DB SE-AE [7], adoptando como cargas permanentes 1,00 kN/ m² de tabiquería, de 1,30 kN/ m² de revestimiento techos y solados y 8,00 kN/m de carga de cerramiento aplicada en todo el perímetro del forjado. La sobrecarga de uso adoptada ha sido de 2,00 kN/m². No se han considerado acciones horizontales actuando sobre el forjado. Por otra parte, se ha exigido una resistencia al fuego de la estructura R90. La determinación de los esfuerzos en el forjado y la estimación de las secciones de armadura se han realizado con la ayuda de un programa informático de análisis espacial, adoptando los coeficientes de seguridad que define la instrucción EHE-08 [5] y verificando el cumplimiento de los estados límite recogidos en la citada norma.

Nótese que no se ha considerado la incidencia en el consumo de materiales y en los costes que podría suponer la presencia de elementos singulares en el forjado, tales como nervios reforzados, zunchos de huecos, voladizos, zonas macizadas y losas de escalera. Los precios de unitarios empleados en el análisis se han extraído de la base de datos propia de la empresa BECSA S.A.U. Los datos de coste energético y emisión de CO₂ se han tomado de la base de datos del *Institut de Tecnologia de la Construcció de Catalunya* [8].

3. Descripción estadística de las variables

Existen numerosas soluciones posibles para el forjado planteado en la Figura 1. El Departamento de Proyectos e I+D+i de BECSA aportó 126 forjados reticulares como posibles soluciones al problema, siendo esta base de datos la muestra objeto de análisis de este trabajo. De las soluciones aportadas, 72 se han resuelto con casetones de aligeramiento perdido de hormigón, mientras que los otros 54 se han diseñado con otros de poliestireno expandido. Se han analizado estas dos tipologías para estudiar la influencia del tipo de aligeramiento en los análisis económicos y ambientales. Las variables contempladas para cada solución de forjado reticular son las siguientes: (1) luz, (2) canto, (3) espesor de la capa de compresión, (4) interejo, (5) relación entre la longitud macizada y la luz, (6) tipo de aligeramiento, (7) peso propio, (8) cuantía de hormigón, (9) cuantía de armadura, (10) coste económico, (11) coste ambiental relativo a la energía consumida y (12) coste ambiental relativo a las emisiones de CO₂. El tratamiento y el análisis estadístico de los datos se ha realizado mediante el paquete informático SPSS 17.

En la Tabla 1 se recogen los estadísticos muestrales básicos: media, coeficiente de variación (relación entre la media y la desviación típica), valor mínimo y valor máximo de los consumos de materiales y de los costes. En la última columna se indica la diferencia entre el valor mínimo y la media con respecto a esta última. Esta magnitud expresa la reducción respecto al valor medio del volumen de materiales, de los costes económicos o ambientales que supone adoptar el menor

valor encontrado. Se indican los valores para el conjunto de forjados analizados y también distinguiendo según el tipo de casetón de aligeramiento empleado. Como puede comprobarse fácilmente, existen diferencias significativas en el diseño que implican diferentes costes. Se trata, por tanto, de establecer qué criterios deberíamos seguir para proyectar una buena solución al problema.

Tabla 1 Descripción de los consumos de materiales y de los costes económicos y ambientales de forjados de reticulares de hormigón, de una muestra de 126 individuos, 72 con casetones de hormigón (H) y 54 con casetones de poliestireno (PE).

#	Variables	casetón	media	C.V.	mín.	máx.	% red
(7)	Peso propio (kN/m ²)	-	4,83	13,0%	3,47	6,32	-28,2%
		H	5,18	9,5%	4,30	6,32	-16,9%
		PE	4,38	11,0%	3,47	5,52	-20,8%
(8)	Hormigón (m ³ /m ²)	-	0,17	11,1%	0,14	0,22	-21,7%
		H	0,17	11,4%	0,14	0,22	-21,0%
		PE	0,18	10,9%	0,14	0,22	-20,5%
(9)	Acero (kg/m ²)	-	9,21	16,9%	7,24	13,20	-21,3%
		H	9,45	17,8%	7,37	13,20	-22,0%
		PE	8,88	14,8%	7,24	11,82	-18,5%
(10)	Coste económico (€/m ²)	-	49,00	2,9%	45,70	52,11	-6,7%
		H	48,70	2,9%	45,70	51,61	-6,2%
		PE	49,40	2,7%	46,75	52,11	-5,4%
(11)	Coste energético (MJ/m ²)	-	910,66	8,6%	754,43	1054,01	-17,2%
		H	956,08	6,6%	857,13	1054,01	-10,3%
		PE	850,11	6,0%	754,43	940,44	-11,3%
(12)	Coste emisiones (kg CO ₂ /m ²)	-	103,55	5,6%	90,98	115,07	-12,1%
		H	104,00	5,4%	92,18	115,07	-11,4%
		PE	102,94	5,8%	90,98	114,35	-11,6%

Sería de gran interés conocer cuál es la diferencia respecto a la media del forjado con menor cuantía de hormigón respecto a los valores medios obtenidos para las cuantías de armadura y costes económicos o medioambientales. Así, el forjado que requiere menor cuantía de hormigón de los 126 analizados es un 4,7% más económico que la media y presenta un 21,7% menos de hormigón. La Tabla 2 indica, de este modo, las variaciones respecto a los valores medios de los forjados que minimizan cada una de las características indicadas en cada una de sus filas.

Tabla 2 Diferencia relativa a los valores mínimos (filas) de los consumos y de los costes de forjados de reticulares de hormigón respecto a las medias (columnas), de una muestra de 126 individuos.

		Valores medios				
		Hormigón	Acero	Coste económico	Coste energético	Coste emisiones
Valores mínimos	Hormigón	-21,7%	1,9%	-4,7%	1,6%	-6,6%
	Acero	7,2%	-21,3%	-0,4%	-10,8%	-1,8%
	Coste económico	-16,3%	-16,0%	-6,7%	-5,8%	-10,9%
	Coste energético	-9,6%	-17,4%	-4,5%	-17,2%	-12,1%
	Coste emisiones	-12,3%	-16,1%	-4,6%	-16,8%	-12,1%

3.1. Análisis del los pesos propios y de los consumos de materiales

Las zonas macizadas de los forjados analizados representan aproximadamente el 25% de la superficie total. Ello coincide con la práctica habitual y permite obtener buenas aproximaciones tanto de los consumos de hormigón como del peso propio de estas estructuras. Tras realizar la prueba t de Student, no se han podido detectar diferencias significativas en las cuantías medias de hormigón por causa de los aligeramientos, con una confiabilidad del 95%. Las diferencias detectadas se deben a que, para dar cumplimiento a las exigencias de resistencia al fuego, algunas geometrías de nervio que son válidas con aligeramientos de hormigón no lo son si se emplean aligeramientos de poliestireno.

En cuanto a la cuantía de la armadura pasiva, el efecto del tipo de aligeramiento sí es apreciable con la prueba t de Student, con una diferencia entre los valores medios del 6,2 %. Los resultados se justifican por la reducción de peso propio que conlleva el empleo de aligeramientos de poliestireno. Regalado [3] cuantifica en un 10% la reducción en el consumo de acero necesario al sustituir los casetones de aligeramiento de hormigón perdido por casetones de poliestireno, no sólo en los forjados sino en la totalidad de la estructura.

En la muestra analizada, el consumo de acero en los ábacos representa el 15% del total, en zunchos el 20% y en nervios el 65% restante. La cuantía obtenida en los ábacos es muy similar a la estimación sugerida por Regalado [3]. No obstante, este autor estima una mayor repercusión de los zunchos (entre el 30-40%) en el consumo de acero. Esta diferencia se debe a que el modelo estructural contemplado en el caso analizado (véase Figura 1) no presenta singularidades tales como escaleras, voladizos o huecos. A lo anterior se añade el hecho que se no se ha considerado la influencia de las acciones horizontales en el análisis estructural.

Para comparar los consumos de acero obtenidos con los que se desprenden de otras investigaciones [2,3], es necesario tener en cuenta que los primeros no incluyen la cuantía correspondiente a la armadura de la capa de compresión. Esto es así, porque se ha dispuesto la cuantía mínima geométrica impuesta por la EHE-08 [5] para losas superiores de forjados unidireccionales en forma de malla electrosoldada de acero B500T en todos los casos.

3.2. Análisis de los costes económico y ambientales

La Tabla 1 permite observar un mayor rango de variación para los forjados analizados en los costes ambientales que en los económicos. Este hecho permite pensar que es posible encontrar soluciones que, con una pequeña variación en su coste económico, permita disminuir claramente los impactos ambientales ocasionados, lo cual es una buena noticia. En efecto, la Tabla 2 muestra que es posible obtener importantes beneficios medioambientales sin penalizar en exceso el coste económico. Si se adopta el diseño de forjado que conlleva las emisiones mínimas de CO₂ se consigue una disminución de estas emisiones del orden del 12% respecto a la media y, al mismo tiempo, una reducción del coste económico, aunque esta reducción es un 2% inferior al ahorro máximo. De forma análoga, una rebaja máxima del coste económico del 6% conllevan ahorros de CO₂ entorno al 11%, todo ello referido a valores medios.

Por otra parte, resulta habitual asimilar la optimización del coste económico del forjado a un problema de optimización de cuantías de armadura. En la Tabla 2 se observa cómo la reducción máxima del consumo de armaduras no se traduce necesariamente en ahorros significativos en términos económicos o ambientales. Por lo tanto, si el problema de optimización de forjados

reticulares se simplifica a un análisis de cuantías de armaduras, los beneficios económicos y ambientales quedan mermados.

Además, de la Tabla 1 se deduce que los forjados con casetones de hormigón son, de media, un 1,4% más económicos que los ejecutados con casetones de poliestireno, siendo esta diferencia significativa desde el punto de vista estadístico. La diferencia también es significativa si atendemos al consumo energético, sin embargo, en lo que se refiere a las emisiones de CO₂, la prueba de *t* Student no aporta motivos para rechazar la hipótesis nula de que las medias de las emisiones para cada tipo de aligeramiento son iguales.

4. Análisis multivariante de las variables

A continuación se realiza un análisis multivariante de las relaciones simultáneas entre las variables estudiadas para cada una de las muestras de forjados reticulares. Para ello se estudian, en primer lugar, las correlaciones lineales entre las variables y, en segundo lugar, se efectúa una regresión lineal múltiple para explicar las variables de respuesta más importantes.

4.1. Correlación entre las variables

Para medir el grado de relación lineal entre cualesquiera dos variables de las analizadas se utiliza el coeficiente de correlación de Pearson R [8], que oscila entre -1 y 1, indicando un valor 0 cuando no existe tal relación. En la Figura 2 se han representado las relaciones entre variables con R superior a 0,500 en valor absoluto, siempre y cuando su significación bilateral hubiese sido, al menos de 0,05. Se observa la fuerte correspondencia entre los costes económicos y las emisiones de CO₂ y de éstos con la luz y la cuantía de armaduras. A su vez, existe un vínculo muy fuerte entre la luz y la cuantía de armadura.

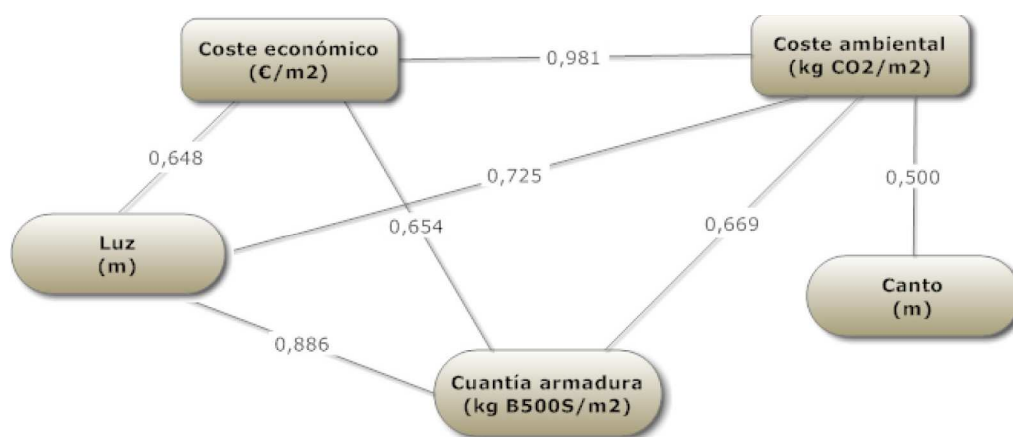


Figura 2. Agrupamiento de variables de un forjado reticular con $R > 0,500$ en valor absoluto a un nivel de significación bilateral de 0,05.

4.2. Modelos de regresión múltiple

En este apartado se realiza un análisis de regresión lineal múltiple entre las variables que intervienen en la definición de los forjados reticulares. La bondad del ajuste se evalúa mediante el coeficiente de determinación R^2 , que se interpreta como la proporción de variación de la variable de respuesta explicada en el modelo de regresión lineal [9]. Para ello se procede mediante el método *stepwise* de pasos sucesivos [10], consistente en introducir las variables una por una y comprobar si la variable permanece o sale del modelo. Se toma como criterio de inclusión un

incremento en la varianza explicada significativo al 5% ($F=0,05$), mientras que para excluir una variable se considera un decremento del 10% ($F=0,10$).

4.2.1. Análisis del peso propio

En la Tabla 3 se resumen los modelos de regresión resultantes para la estimación del peso propio del forjado reticular según se empleen casetones de hormigón o de poliestireno. En los forjados con casetones perdidos de hormigón, sólo el canto explica el 80,4 % de la variabilidad detectada. Si se emplean aligeramientos de poliestireno, es necesario considerar la longitud del macizado en relación a la luz, además del canto, para explicar el 81,4% de la variabilidad mostrada.

La estimación del peso propio del forjado resulta útil para extraer información respecto al consumo de hormigón por unidad de superficie de forjado. En efecto, habida cuenta del peso despreciable de los casetones de poliestireno, el peso propio de los forjados reticulares con este tipo de aligeramientos es proporcional a la cuantía de hormigón, siendo la razón de proporcionalidad la densidad del hormigón armado considerada: 25,00 kN/m². Por otra parte, se ha justificado en apartados anteriores que no existen diferencias significativas entre los consumos de hormigón en relación al tipo de aligeramiento.

Tabla 3 Modelos de regresión lineal para el peso propio en forjados reticulares.

	VARIABLES	Casetón	Coeficientes	R²
1	Constante	Hormigón	-0,252	0,804
	Canto (m)		19,157	
	Constante	Poliestireno	-0,460	0,674
	Canto (m)		17,073	
2	Constante	Hormigón	-4,701	0,882
	Canto (m)		19,157	
	Intereje (m)		6,094	
	Constante	Poliestireno	-2,296	0,814
	Canto (m)		13,843	
	Longitud macizado/Luz		16,561	
3	Constante	Hormigón	-5,980	0,946
	Canto (m)		16,906	
	Intereje (m)		6,094	
	Longitud macizado/Luz		11,539	
	Constante	Poliestireno	-8,843	0,906
	Canto (m)		13,843	
	Longitud macizado/Luz		16,561	
	Intereje (m)		8,847	

4.2.2. Análisis de la cuantía de armadura

La Tabla 4 indica que la luz explica por sí sola el 78,5 % de la variabilidad detectada en las cuantías de armaduras de forjados con casetones de hormigón y el 69,6% en forjados con casetones de poliestireno.

Tabla 4 Modelos de regresión lineal para la cuantía de armadura en forjados reticulares.

	Variables	Casetón	Coefficientes	R²
1	Constante	Hormigón	0,403	0,785
	Luz (m)		1,809	
	Constante	Poliestireno	2,216	0,696
	Luz (m)		1,334	
2	Constante	Hormigón	5,925	0,856
	Luz (m)		1,809	
	Canto (m)		-19,488	
	Constante	Poliestireno	6,549	0,768
	Luz (m)		1,334	
	Canto (m)		-15,292	
3	Constante	Hormigón	-2,427	0,916
	Luz (m)		2,298	
	Canto (m)		-29,884	
	Longitud macizado/Luz		53,303	
	Constante	Poliestireno	-2,356	0,880
	Luz (m)		1,855	
	Canto (m)		-26,377	
	Longitud macizado/Luz		56,834	

Tabla 5 Modelos de regresión lineal para el coste económico en forjados reticulares.

	Variables	casetón	Coefficientes	R²
1	Constante	Hormigón	43,127	0,420
	Luz (m)		1,114	
	Constante	Poliestireno	38,663	0,422
	Canto (m)		37,900	
2	Constante	Hormigón	26,134	0,678
	Luz (m)		1,849	
	Longitud macizado/Luz		80,177	
	Constante	Poliestireno	34,645	0,665
	Canto (m)		37,900	
	Luz (m)		0,804	
3	Constante	Hormigón	9,845	0,804
	Luz (m)		1,849	
	Longitud macizado/Luz		80,177	
	Intereje (m)		22,314	
	Constante	Poliestireno	25,407	0,780
	Canto (m)		26,401	
	Luz (m)		1,344	
	Longitud macizado/Luz		58,957	

4.2.3. Análisis del coste económico

Según se comprueba en la Tabla 5, es necesario emplear tres variables para explicar entorno al 80% de la variabilidad detectada en el coste por unidad de superficie del forjado reticular.

4.2.4. Análisis de las emisiones de CO₂

En la Tabla 6 se han recogido los modelos más simples de regresión para las emisiones de CO₂. Nótese que la luz y el canto pueden explicar entorno al 80% de la variabilidad detectada.

Tabla 6 Modelos de regresión lineal para las emisiones de CO₂ en forjados reticulares.

	Variables	casetón	Coefficientes	R²
1	Constante	Hormigón	79,167	0,525
	Luz (m)		4,968	
	Constante	Poliestireno	47,401	0,580
	Canto (m)		196,038	
2	Constante	Hormigón	44,480	0,775
	Luz (m)		4,968	
	Canto (m)		122,424	
	Constante	Poliestireno	29,517	0,827
	Canto (m)		196,884	
	Luz (m)		3,577	
3	Constante	Hormigón	13,631	0,849
	Luz (m)		6,772	
	Canto (m)		84,024	
	Longitud macizado/Luz		196,884	
	Constante	Poliestireno	-2,018	0,896
	Canto (m)		156,784	
	Luz (m)		5,422	
	Longitud macizado/Luz		201,267	

5. Evaluación del coste ambiental de forjados

Los modelos de regresión lineal reflejados en las Tablas 3-6 ofrecen criterios de dimensionamiento previo de forjados empleando el mínimo número de variables necesario para obtener la máxima información posible. Por otra parte, las expresiones obtenidas constituyen una herramienta sencilla para evaluar la sostenibilidad de un diseño de forjado reticular con respecto a las emisiones de CO₂ que generan los materiales empleados para su ejecución.

A continuación se ilustra mediante un ejemplo la utilidad de emplear las fórmulas de predimensionamiento para comparar desde el punto de vista de la sostenibilidad dos soluciones alternativas de forjados. Si la distribución arquitectónica del edificio obliga a luces de 5,00m y se adoptan longitudes de macizado de 1/6 de la luz, resulta más ventajoso desde el punto de vista medioambiental recurrir a cantos de 0,25 m que a otros superiores: las emisiones de CO₂ se reducen del orden del 5% al pasar de canto 0,30 m a 0,25 m y el coste económico disminuye del orden del 1,4%. Por otra parte, para el canto de 0,25 m, las emisiones de CO₂ estimadas si se

emplean casetones de poliestireno ($94,77 \text{ kg CO}_2/\text{m}^2$) son del orden de un 5% inferiores a las que se producirían si se empleasen casetones de hormigón ($98,99 \text{ kg CO}_2/\text{m}^2$), mientras que su coste económico ($47,44 \text{ €/m}^2$) es superior en menos de un 1% al del mismo forjado con casetones de hormigón ($47,54 \text{ €/m}^2$). Nótese que, fijando el valor medio de las emisiones de CO_2 en un forjado reticular en $103,55 \text{ kg CO}_2/\text{m}^2$ (Tabla 1) y bajo la hipótesis que cada año se construyen 500.000 viviendas nuevas en España, una reducción del 5% en estas emisiones supondría un ahorro de 210.000 t de CO_2 anuales, cifra que equivale aproximadamente a las emisiones anuales que generan 75.000 vehículos.

6. Conclusiones

El trabajo presenta un análisis multivariante de 126 forjados reticulares de hormigón armado en edificación. Los resultados muestran que es posible obtener considerables beneficios medioambientales sin penalizar en exceso el coste económico. Además, se ha comprobado que existen diferencias, estadísticamente significativas, en relación al tipo de aligeramiento empleado. En una segunda etapa, se han desarrollado modelos de regresión múltiple obteniendo fórmulas explicativas de los consumos de materiales y de los costes económicos y ambientales a partir de un número reducido de variables geométricas que intervienen en su diseño. Las relaciones prácticas detectadas entre las emisiones de CO_2 de un forjado reticular con la luz, el canto y el tipo de aligeramiento permiten evaluar la sostenibilidad de un diseño y comparar las alternativas de diseño en relación a este aspecto.

Agradecimientos

Los autores agradecen el apoyo de la Generalitat Valenciana a través del IMPIVA (Proyecto de Investigación y Desarrollo Tecnológico IMIDTF/2009/23 y IMIDTF/2010/69).

Referencias

- [1] REGALADO, F. *Investigación y revisión crítica del conocimiento y uso de los forjados reticulares en España, con propuestas de nuevos criterios para su diseño, análisis y construcción*, Tesis Doctoral, Departamento de Ingeniería de la Construcción, Universitat Politècnica de València, Valencia, 2001.
- [2] CALAVERA, J; GONZÁLEZ, E. "Estimación de cuantías en forjados de edificación". *Cuadernos Intemac*, nº 51, 2003.
- [3] REGALADO, F. *Los forjados de los edificios: pasado, presente y futuro*, Biblioteca Técnica de CYPE Ingenieros, Alicante, 1999.
- [4] FANELLA, D.A. *Concrete Floor Systems. Guide to Estimating and Economizing*, Portland Cement Association, Illinois, 2000.
- [5] MINISTERIO DE FOMENTO. *Instrucción de Hormigón Estructural, EHE-08*, Madrid, 2008.
- [6] DEL CAÑO, A.; DE LA CRUZ, M.P. "Bases y criterios para el establecimiento de un modelo de evaluación de la sostenibilidad en estructuras de hormigón". *Cemento Hormigón*, nº 913, 2008, pp. 8-16.
- [7] MINISTERIO DE VIVIENDA. *Código Técnico de la Edificación, CTE*, Madrid, 2006.
- [8] INSTITUT DE TECNOLOGIA DE LA CONSTRUCCIÒ DE CATALUNYA, *BEDEC PR/PCT ITEC*, disponible en: <http://www.itec.es/nouBedec.es/presentaciobedec.aspx>
- [9] DRAPER N., and SMITH H., *Applied Regression Analysis*, 3th edition, Wiley, New York, 1999.
- [10] HOCKING R., "The Analysis and Selection of Variables in Linear Regression", *Biometrics*, Vol. 32, No.1, 1976, pp. 1-49.