

Optimización de estructuras prefabricadas de hormigón para la construcción de edificios industriales, parametrizada con el programa GeoGebra

Optimization of precast concrete structures for construction of industrial buildings, through parametric analysis assisted with geogebra

Alfonso BARBA PÉREZ

MSc Ingeniero Civil

Pretersa-Prenavisa Estructuras de Hormigón

Responsable de proyectos

abarba@pretersa.com

David USERO MAINER

Doctor en Matemáticas

Facultad de Ciencias Químicas, UCM

Profesor Asociado

umdavid@mat.ucm.es

Jaime FERNÁNDEZ GÓMEZ

Doctor Ingeniero de Caminos, Canales y Puertos

ETSICCP, UPM

Catedrático de Edificación y Prefabricación

jaime.fernandez.gomez@upm.es

Paula VILLANUEVA LLAURADÓ

MSc Arquitecta

ETSICCP, UPM

Becario OTT

p.v.llaurado@gmail.com

RESUMEN

Se han analizado las estructuras prefabricadas de hormigón para edificios industriales, con el fin de determinar las variables que permitan optimizar su diseño. Se ha analizado estadísticamente una base de datos de obras reales, relacionando la longitud de viga y de correa óptimas para obtener un menor gasto; dicho gasto se ha puesto en relación a la superficie construida y al volumen construido. Posteriormente se ha desarrollado una función teórica de los mismos parámetros, y se ha complementado con una optimización con el programa GeoGebra. Con los resultados se proponen unas dimensiones de luces de vigas y correas para optimizar proyectos.

ABSTRACT

The investigation herein analyses the parameters affecting the design of precast concrete structures for industrial buildings. A statistical study was done on a database of real projects, correlating the girder and purlin lengths in order to obtain the minimum volume of concrete; the volume of concrete has been related to the built surface and built volume. Then, a theoretical function has been developed based on the same parameters, and it was complemented by a mathematical optimisation with the software GeoGebra. From the results, optimised dimensions of girder and purlin length are proposed.

PALABRAS CLAVE: estructuras prefabricadas, prefabricado, optimización estructural, GeoGebra

KEYWORDS: precast structures, precast concrete, structural optimization, GeoGebra

1. Introducción y objetivos

La construcción de edificios industriales con elementos prefabricados de hormigón ha tenido un gran desarrollo desde el último tercio del siglo XX y muy especialmente en los últimos 30 años, con fábricas cada vez más automatizadas. La industria del prefabricado ha sido pionera en la innovación dentro de la construcción con la generalización de la técnica del pretensado, que cuenta con su primera patente en 1928 por Eugène Freyssinet y que llega a España en el año 1942 de la mano de Francisco Fernández Conde [1]. El hormigón prefabricado permite soluciones

industrializadas en un amplio rango de usos, desde edificios industriales hasta viviendas, reduciendo costes y mejorando el control de calidad respecto a técnicas constructivas tradicionales [2].

En un alto porcentaje de casos, las estructuras de edificación industrial están ejecutadas con soluciones prefabricadas de cubierta ligera. En este sentido, es destacable la ausencia de bibliografía técnica para apoyar al proyectista en la fase de diseño [3][4]. Los estudios de optimización suponen una considerable ayuda al proyecto; se ha planteado una investigación para identificar y analizar los parámetros más influyentes en los proyectos de estructuras prefabricadas para cubiertas ligeras, con objeto de proponer criterios de optimización [5][6].

Las estructuras analizadas se definen como una estructura de pórticos compuesta por pilares, vigas principales de cubierta y vigas secundarias (correas o viguetas). Este tipo de solución es habitual para la cubrición de grandes luces, ya que permite reducir el número de pilares intermedios alcanzando luces en las vigas principales de hasta 50 m, y en las vigas secundarias o correas de hasta 22 m o 13 m en el caso de correas tubulares [7][8]. Estas estructuras son utilizadas para edificios de múltiples usos: almacenes, naves industriales, centros o naves logísticas, hangares, centros comerciales, polideportivos. En el marco normativo español se entiende por cubierta ligera aquella cuya carga permanente debida únicamente a su cerramiento no excede 1 kN/m^2 , según la Tabla 3.1 del CTE- DB-SE AE [9].

2. Selección de parámetros y base de datos

La primera fase del estudio consistió en la selección de obras para la construcción de una base de datos. Para ello se formularon las hipótesis para la inclusión en la base: estabilidad al fuego de 90 minutos, riesgo sísmico nulo o bajo, empotramiento de pilares con zapata cáliz, y estructuras de tipo isostático. Con respecto a los materiales y cargas, se emplearon los siguientes supuestos:

Hormigones. Se distingue entre vigas principales, con hormigón de resistencia característica HP45, vigas secundarias con hormigón HP40 y pilares con hormigón HA40.

Aceros. La armadura pasiva es en todos los casos B500S, y la activa Y1860.

Sobrecarga de uso. Se ha considerado igual a 0.4 kN/m^2 de carga uniforme y 1 kN/m^2 de carga concentrada en todos los casos y no concomitante con la nieve, de acuerdo con una categoría de uso G (cubiertas accesibles únicamente para conservación), subcategoría G1 (cubiertas ligeras sobre correas), según el CTE-SE AE [9].

2.1. Parámetros de estudio

Los parámetros considerados para el análisis, los cuales se muestran en la Figura 1, incluyen:

La carga sobre las correas (Q_c , en kN/m^2), la cual es la suma de las cargas de cerramiento, sobrecarga de nieve según el anejo E del CTE-DB-SE AE o de uso, instalaciones y parte proporcional de viento. La carga de viento en fachadas o paramentos verticales (Q_v , en kN/m^2) se ha definido según el anejo D del CTE-DB-SE AE [9].

Dimensiones de elementos estructurales, incluyendo las longitudes en metros de vigas principales (L_v), de vigas secundarias o correas (L_c), la separación de correas (Sep_c) y la longitud total de pilares (H_t), incluyendo el empotramiento en cimentación y bayonetas para el cerramiento.

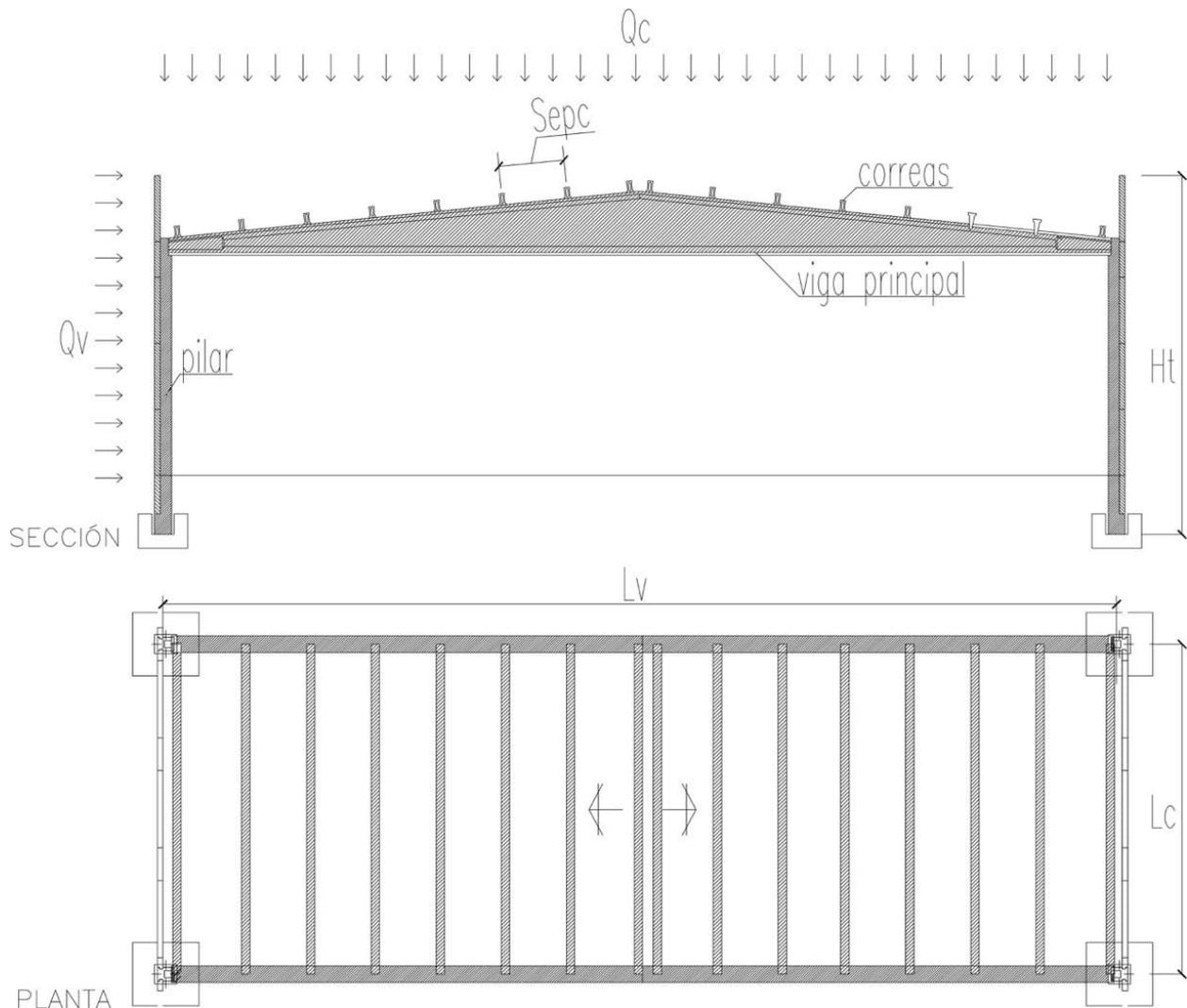


Figura 1. Parámetros de estudio en estructuras de cubiertas ligeras.

2.2. Base de datos

Se ha elaborado una base de datos con 20 casos de estructuras analizadas de cubierta, atendiendo a los parámetros considerados. Dicha base de datos incluye cuatro tipologías básicas, con objeto de estudiar las más frecuentes en proyectos reales; las tipologías atienden al tipo de viga principal de cubierta: Vigas deltas o peraltadas con pendientes del 6-10% en función del molde, vigas doble T ó Jácenas I, en la que la pendiente se da por diferencia de altura de los pilares del pórtico, vigas cortas tipo testero o hastial ($L < 13.5$ m) y Vigas V o Canal que van con chapa curva y no llevan correas.

Se ha considerado también como información adicional el uso de los edificios, que en muchas ocasiones determina las cuadrículas del proyecto; de esta forma se encuentran 14 casos de edificios de almacenes y logísticos (nº 1, 2, 4, 7, 8, 9, 10, 11, 12, 16, 17, 18, 19 y 20), 2 casos de administración (nº 3 y 6), 3 casos de automoción (nº 5, 14 y 15) y una superficie comercial (nº 13).

La base de datos se presenta en la Tabla 1. Se define la cuadrícula básica de la estructura C_u como la superficie cubierta por el producto de la longitud de viga principal por la longitud de correa, ambas en proyección horizontal, según se representa en la Figura 1.

nº	Tipología	Correas		Vigas	Pilares	Cuadrícula básica (m ²)
		L _c (m)	Sep _c (m)	L _v (m)	H _t (m)	
1	D	10.84	3.35	28.40	14.00	308
2	D	10.84	1.60	28.40	14.00	308
3	C	10.45	1.75	13.30	14.00	139
4	D	10.00	2.30	23.20	15.22	232
5	D	10.50	2.20	23.00	15.00	242
6	D	11.30	2.05	22.40	5.70	253
7	D	10.05	1.85	30.23	11.40	304
8	D	9.10	1.85	24.05	11.40	219
9	I	11.30	1.58	24.00	16.60	271
10	D+I	9.95	2.40	27.80	18.30	277
11	I	10.90	2.50	27.00	32.05	294
12	I	13.00	1.60	19.30	9.75	251
13	C	8.50	2.50	12.00	9.25	102
14	V	7.32	NO	26.00	7.70	190
15	V	7.20	NO	30.40	8.70	219
16	C	7.05	2.00	9.00	12.80	63
17	D	12.00	2.40	34.50	13.05	414
18	D	12.00	2.38	24.50	14.55	294
19	C	7.80	2.37	8.10	17.35	63
20	I	11.65	2.46	22.40	14.40	261

D= vigas delta; I: vigas doble T; V: vigas V canal; C: vigas cortas

Tabla 1. Base de datos de estructuras de cubierta ligera.

3. Análisis estadístico de datos

De una primera observación de la tabla 1 puede extraerse que la mayoría de los casos tienen luces de viga principal mayores de 13.5 m, resolviéndose sólo los casos 3, 13, 16 y 19 con viga cortas.

De los casos analizados se ha obtenido la media, la mediana, desviación típica y el coeficiente de variación de las cargas y de parámetros geométricos incluyendo: longitud de vigas principales, longitud de correas, separación de correas, longitud de pilares y canto de vigas principales (C_v -I, para vigas doble T, y C_v -D para vigas deltas) y de correas (C_c) en m.

En la Tabla 2 se recogen los datos del análisis estadístico realizado.

Base de datos	Q_c	Q_v	L_c	Sep_c	L_v	H_t	C_v-D	C_v-I	C_c
media	0.95	0.93	9.97	2.18	24.26	13.00	1.95	1.11	0.30
mediana	0.95	0.82	10.24	2.25	24.05	14.00	1.90	1.20	0.30
desviación típica	0.19	0.26	1.76	0.44	4.79	2.87	0.22	0.29	0.07
coef. de variación	0.20	0.28	0.18	0.20	0.20	0.22	0.11	0.26	0.23

Tabla 2. Resumen estadístico de parámetros de la base de datos.

La mediana obtenida del análisis estadístico en términos de cargas actuantes y separación de correas permite elaborar una base para el predimensionamiento. De este modo, se ha construido la tabla 3 en la que la carga sobre las correas es igual a 0.95 kN/m^2 , la separación de correas es de 2.25 m y la longitud de correa es igual a 10.24 m , dando lugar a un peso propio de correas de 0.37 kN/m^2 , lo que lleva a una carga en vigas de 13.52 kN/m . La carga de viento se ha considerado conforme a CTE-DB-SE AE [9], para una zona A con una velocidad básica de 26 m/s , para un grado de aspereza IV (zona urbana en general, industrial o forestal); con este cálculo, se ha incluido en la tabla el predimensionamiento de pilares que da lugar a valores coherentes con las alturas y cargas de viento de la base de datos considerando un coeficiente de pandeo de 1.8 y unas cuantías máximas de 200 kg/m^3 para escuadrías de pilares definidas en cm de 40×40 y de 250 kg/m^3 para pilares iguales o superiores a 50×50 .

Correas						
L_c (m)	7.00	8.00	9.00	10.00	11.00	13.00
Tipo (canto en cm)	Tub-20	Tub-25	Tub-25	Tub-30	Tub-35	Tub-40
Vigas						
L_v (m)	12.00	16.00	20.00	24.00	28.00	32.00
Tipo D (canto en cm)	D-110	D-130	D-160	D-180	D-210	D-240
Tipo I (canto en cm)	I-60	I-80	I-100	I-120	I-140	I-160
Pilares						
H_t (m)	6.00	8.00	10.00	12.00	14.00	16.00
Q_v (kN/m ²)	0.61	0.69	0.75	0.8	0.85	0.89
Tipo (sección en cm)	40 x 40	50 x 50	50 x 60	50 x 70	50 x 80	60 x 80

Tabla 3. Predimensionamiento para valores medianos de la base de datos.

La base de datos se ha analizado también correlacionando las secciones de viga y correa con sus longitudes. Para ello se han supuesto todos los pórticos formados por vigas principales, y todas las vigas y correas de cada obra de igual longitud. Las rectas de tendencia de este análisis dan lugar a las expresiones:

$$S_v = 0.001 \cdot L_v + 0.077 \quad (1)$$

$$S_c = 0.005 \cdot L_c + 0.004 \quad (2)$$

Para los pilares la estimación se ha realizado para el mismo supuesto empleado en la tabla 3, ya que la sección de pilares depende no solo de su altura sino también de la longitud de viga y de correa. Se ha expresado la sección en función de la altura libre (H) dando lugar a:

$$S_p = 0.037 \cdot H + 0.008 \quad (3)$$

4. Análisis de regresión y optimización paramétrica

Para el análisis se han considerado las sub-tipologías de vigas delta, vigas doble T y vigas cortas, para poder estudiar una cuadrícula incluyendo todos los elementos estructurales. Se han descartado algunos casos anómalos o excepcionales: en el análisis de vigas y correas se han descartado los casos 11 y 12; el número 11 se ha descartado por incluir correas macizas estructurales unidas con nudos rígidos, necesarias debido a la altura de la estructura dejándola fuera de los rangos habituales; el número 12 se ha eliminado por estar ejecutado con vigas de carga intermedias para salvar pilares, lo que distorsiona la configuración de los pórticos según se definen en el estudio. Por su parte en el estudio unificado incluyendo los pilares se han descartado, además de los casos 11 y 12, los casos 8 y 18; en estos casos, la escasa superficie de las estructuras (880 m² y 600 m² respectivamente) y su construcción con pilares tipo testero quedando adosadas a otras estructuras mucho mayores, desvirtúa la repercusión de los pilares en el gasto por pórtico.

El análisis se ha realizado siguiendo el criterio de optimización de gasto; en todos los casos se ha utilizado un coeficiente k de ponderación de los valores de gasto, para no depender de la fluctuación de los costes y realizar un análisis porcentual. La variable de gasto para el análisis de optimización es el volumen de hormigón empleado en la estructura considerada, medido en m³.

Los análisis se han llevado a cabo siguiendo el método de ajuste por mínimos cuadrados, buscando la función $y = f(x)$ que mejor se ajusta a la base de datos. Se han realizado ajustes lineales, potenciales y logarítmicos, seleccionando los lineales y potenciales por su mejor ajuste.

4.1. Análisis de regresión para vigas principales y secundarias

El primer análisis consiste en la evaluación del volumen de hormigón empleado en la construcción de vigas principales y secundarias, en función de la superficie de cuadrícula ($L_v \times L_c$). Las líneas de regresión y ecuaciones correspondientes al primer análisis se muestran en la Figura 2.

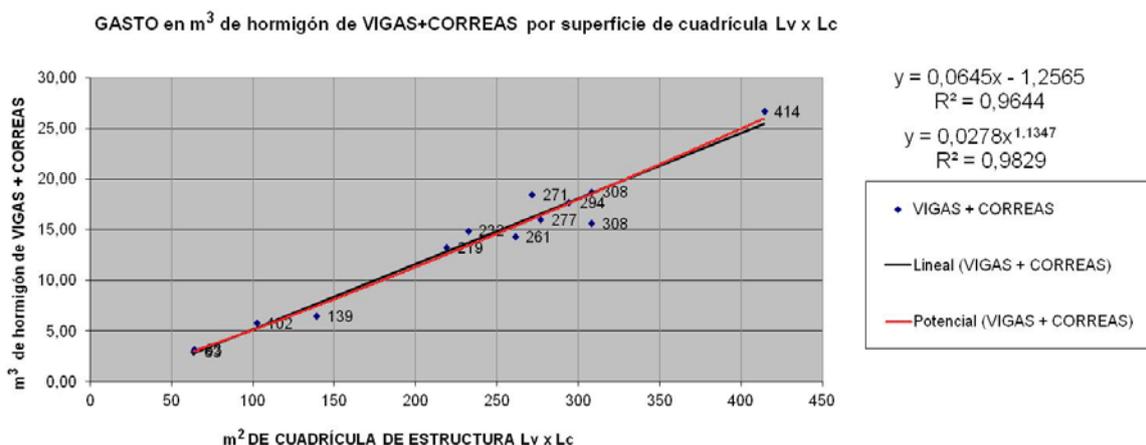


Figura 2. Regresión de volumen de hormigón en vigas y correas por cuadrícula construida.

Las estructuras optimizadas corresponden a los puntos que quedan por debajo de la línea de tendencia. El punto óptimo es el caso nº 1, con una cuadrícula de 308 m², $L_v = 28,4$ m, $L_c = 10,84$ m y $Sep_c = 3,35$ m; esta solución representa un ahorro de un 15.8% respecto a la línea de tendencia. El segundo punto más optimizado corresponde al caso nº 3, con una cuadrícula de 139 m² y que supone un ahorro del 14.0%. Los casos 20, 19 y 10 también quedan por debajo de la línea de tendencia, con optimizaciones de 6.8%, 4.7% y 2.2%, respectivamente; cabe señalar, sin

embargo, que los casos 3 y 19 son poco representativos a nivel de la estructura completa por pertenecer a la tipología de vigas cortas, en las que se da una alta repercusión de pilares.

4.2. Análisis de regresión de vigas principales, secundarias y pilares

El segundo análisis tiene en cuenta la estructura completa, incluyendo la repercusión de los pilares en términos de volumen de hormigón consumido en toda la estructura (vigas, correas y parte proporcional de pilares) respecto al volumen construido ($L_v \times L_c \times H_t$). Las líneas de regresión y expresiones de ajuste correspondientes al segundo análisis se presentan en la Figura 3.

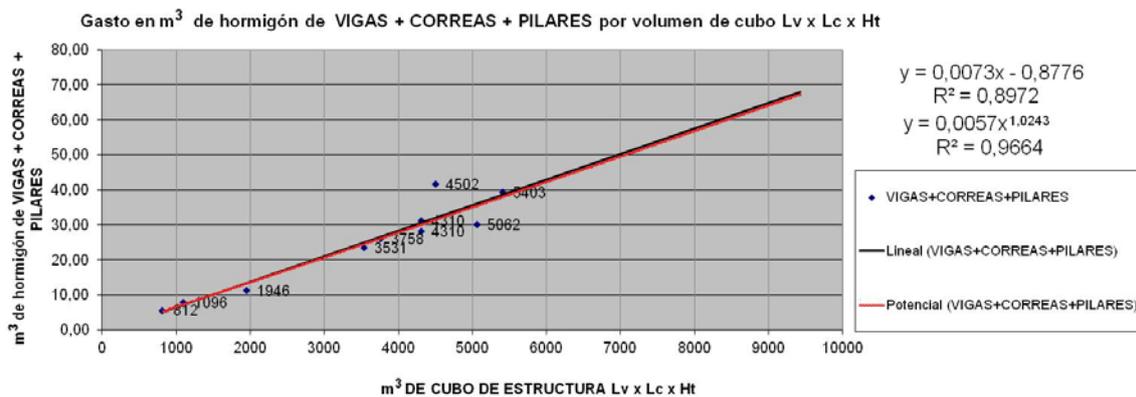


Figura 3. Regresión de volumen de hormigón en la estructura por volumen construido.

En términos del ahorro, se han obtenido cinco casos que quedan por debajo de las líneas de tendencia. El caso óptimo es el nº 10, con un volumen construido en la cuadrícula de 5062 m² y un ahorro de 15.4%; cabe destacar la influencia de la altura de pilar, poco representativa por lo elevada en este caso y que da lugar a un menor gasto en volumen que en superficie. El caso nº 3 es el segundo más optimizado, con un ahorro de 14.9%; sin embargo, esta estimación de ahorro viene dada por la consideración del volumen proporcional de pilares ya que se trata de una nave con dos forjados intermedios en la que la repercusión de los pilares se ve muy reducida respecto a los casos más generales sin forjados intermedios.

El siguiente caso es el nº 1, que logra un 6.6% de ahorro. En este caso se registró la máxima optimización de vigas y correas. Un análisis detallado de los planos revela que la optimización en volumen también es mayor si no se tiene en cuenta el exceso de pilares debido a testeros interiores y huecos de puerta en fachadas, que no responden a las necesidades estructurales de la cubierta; teniendo esto en cuenta, se obtendría un ahorro de un 16.7%. Junto con estos casos óptimos, quedan también del lado del ahorro los casos 4 y 20 con ahorros de un 4.7% y un 0.2% respectivamente.

4.3. Desarrollo de la ecuación general

El objetivo en esta etapa es desarrollar una ecuación relacionando los principales parámetros con el gasto de hormigón. Para ello se ha partido de un esquema básico de la estructura a optimizar, en el que se denomina pórtico a cada conjunto de vigas paralelas y fila a cada línea de pilares perpendicular al pórtico; se denomina vano al conjunto de elementos entre dos pórticos.

La superficie total de la estructura en m² (ST) es el producto de $L \times A$ siendo L y A , respectivamente, el largo total de la estructura de cubierta (en el sentido de los pórticos) y el ancho de la estructura de cubierta perpendicular al pórtico; dicha superficie puede calcularse con:

$$ST = L \cdot A = (N_{vp} \cdot L_v) \cdot (N_{vc} \cdot L_c) = N_{cu} \cdot Cu \quad (4)$$

donde N_{vp} es el número de vigas por pórtico, N_{vc} es el número de vanos de correas y N_{cu} es el número de cuadrículas. Por su parte, el volumen de hormigón gastado en construir la estructura depende del volumen de vigas (V_v), del volumen de correas (V_c), y del volumen de pilares (V_p). El número de vigas, correas y pilares puede calcularse con:

$$N_v = N_{cu} + N_{vp} \quad (5)$$

$$N_c = \left(\frac{L_v}{Sep_c} + 1\right) \cdot N_{cu} \quad (6)$$

$$N_p = (N_{vp} + 1) \cdot \left(\frac{N_{cu}}{N_{vp}} + 1\right) \quad (7)$$

Una vez obtenido el número correas, vigas y pilares, el volumen de elementos constructivos se expresa como:

$$V_c = N_c \cdot S_c \cdot L_c = \left(\frac{L_v}{Sep_c} + 1\right) \cdot N_{cu} \cdot S_c \cdot L_c \quad (8)$$

$$V_v = N_v \cdot S_v \cdot L_v = \left(\frac{N_{cu}}{N_{vp}} + 1\right) \cdot S_v \cdot L_v \quad (9)$$

$$V_p = \left[(N_{vp} + 1) \cdot \left(\frac{N_{cu}}{N_{vp}} + 1\right)\right] \cdot S_p \cdot H \quad (10)$$

De esta forma el volumen total puede expresarse como:

$$V_t = [(N_{cu} + N_{vp}) \cdot S_v \cdot L_v] + \left[\left(\frac{L_v}{Sep_c} + 1\right) \cdot N_{cu} \cdot S_c \cdot L_c\right] + \left\{\left[(N_{vp} + 1) \cdot \left(\frac{N_{cu}}{N_{vp}} + 1\right)\right] \cdot S_p \cdot H\right\} \quad (11)$$

El análisis se ha realizado para una estructura básica mínima, determinada por una cuadrícula de estructura según la Figura 1; de esta forma, se adoptan los valores: $N_{vp} = 1$, $N_{cu} = 1$, $N_v = 2$ y $N_p = 4$. De esta forma se llega a una expresión del volumen:

$$V_{cu} = (2 \cdot S_v \cdot L_v) + \left[\left(\frac{L_v}{Sep_c} + 1\right) \cdot S_c \cdot L_c\right] + (4 \cdot S_p \cdot L_p) \quad (12)$$

Se han expresado las secciones de todos los elementos estructurales en función de sus longitudes, con las relaciones lineales (1), (2) y (3). Con ello, se ha desarrollado la ecuación para el gasto de volumen de hormigón por m² de superficie de estructura analizada, V_{cu}/S_{cu} :

$$\frac{V_{cu}}{S_{cu}} = \frac{(0.02 \cdot L_v + 0.1548)}{L_c} + \frac{(0.0052 \cdot L_c + 0.0039)}{L_v} + \frac{(0.0052 \cdot L_c) + (0.0039)}{Sep_c} + \frac{(0.146 \cdot H^2) + (0.236 \cdot H)}{L_v \cdot L_c} \quad (13)$$

5. Optimización paramétrica con GeoGebra

Geogebra es un programa de análisis dinámico de funciones, que dispone de gráficas y análisis estadístico para optimización matemática entre otras funcionalidades.

5.1. Primer análisis

Se ha realizado un primer análisis buscando la solución óptima, definida como el mínimo de la función de gasto (13). Se ha aceptado la hipótesis de una separación de correas y altura de pilares constantes e iguales a la mediana de la base de datos. En este análisis, que se presenta en la Figura 4, se obtiene el punto C (29.37 m, 21.19 m) de solución óptima de L_v y L_c , para obtener el gasto mínimo, definida como la intersección de la derivada parcial respecto a la longitud de viga y de la derivada parcial respecto a la longitud de correa; dichas derivadas se han obtenido a partir de la expresión (13) derivando e igualando a cero.

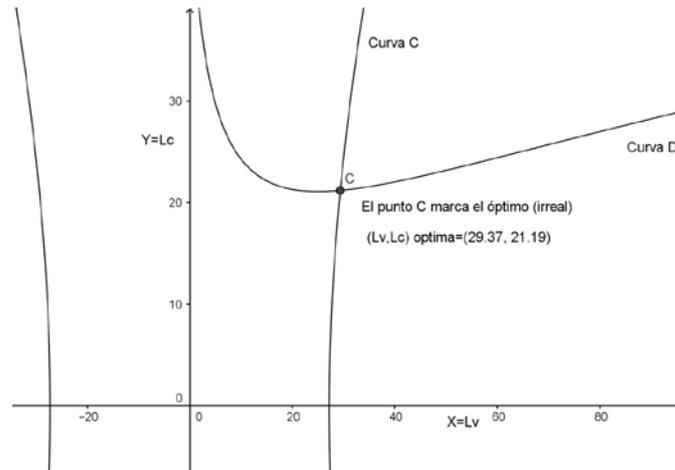


Figura 4. Regresión de volumen de hormigón en la estructura por volumen construido.

5.2. Segundo análisis

Los valores óptimos obtenidos en el primer análisis no son aplicables a casos reales ya que superan las dimensiones disponibles de correas tubulares. Por ello, se procedió a una acotación (en metros) de la longitud de vigas principales y secundarias dentro de los parámetros habituales de ejecución, tal que $L_c \leq L_v \leq 50$ y $L_c \leq 13$. El análisis acotado se ha realizado con deslizadores que permiten variar la altura libre de la nave (H), longitud de correa (L_c) y separación de correas (Sep).

En la figura 5 se representa el punto óptimo del segundo análisis, definido en Geogebra como el mínimo de la función $Acota(x, L_c)$, correspondiente a una altura libre de 10 m, una longitud de correas de 10.84 m y una separación de correas de 3.35 m. Se han fijado estos puntos para simular la optimización del caso número 1 de la base de datos, tomado de referencia, ya que esta obra había presentado el máximo ahorro respecto a la cuadrícula básica y una apropiada optimización en términos de gasto total, según los análisis de regresión realizados. Se observa que para esta combinación de dimensiones de correas y pilares, el mínimo de la función $Acota(x, L_c)$ da como resultado una longitud de vigas óptima es 27.87 m, valor cercano al del proyecto de referencia.

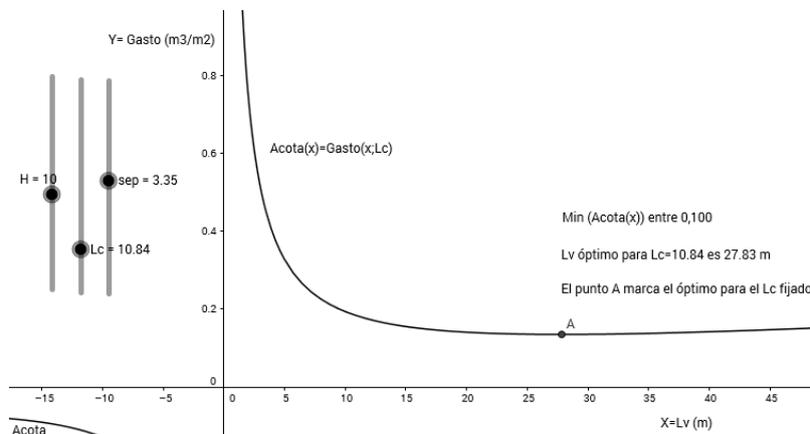


Figura 5. Longitud de viga óptima para las dimensiones de referencia.

6. Conclusiones

En este trabajo se han obtenido herramientas de predimensionado y modelos optimizados, para ayudar al proyectista en la fase de diseño. La metodología propuesta podría aplicarse a otros

estudios similares de optimización de soluciones estructurales en edificación y obra civil. El estudio es parte de un proyecto más amplio para obtener modelos de optimización basados en matemática aplicada y tratamiento masivo de datos.

Mediante los análisis de regresión se han obtenido datos de ahorro de la base de datos, destacando una optimización respecto a la línea de regresión de un 15.8% en términos de estructura de cubierta sin pilares del caso nº 1 y de un 15.4% para estructuras con pilares del caso número 10. Además, considerando una estructura básica para el caso nº 1 (eliminando el exceso de pilares por puertas de fachada y testeros interiores) se obtiene para este caso una optimización de la estructura completa de un 16.7%; se ha tomado el caso nº 1 como referencia de la máxima optimización de la base de datos, y se ha comparado con el modelo matemático.

La programación de la ecuación de gasto en el programa GeoGebra ha permitido obtener un modelo ideal de máxima optimización así como la relación de luz de viga óptima para distintas combinaciones de longitud de correa y altura libre. Comparando el modelo con el caso nº 1 de referencia, se ha comprobado la bondad de este tipo estructural.

En el histórico del sector de la prefabricación para edificios industriales se proponen habitualmente vigas de 25 m y correas de 10 m, como solución tradicional óptima [7]. Se ha encontrado que la solución óptima se da para cuadrículas de 29.37x21.19. Para la longitud y separación de correa que dieron lugar al caso más optimizado de la base de datos (10.84 y 3.35 m respectivamente), el análisis con GeoGebra ha optimizado la solución a una longitud de viga de 27.87 m; esto da lugar a cuadrículas un 20-25% superiores a las soluciones tradicionalmente aceptadas como óptimas.

Agradecimientos

Los autores desean agradecer a Pretersa-Prenavisa, Prefabricados Castelo y Prainsa la aportación de documentación para la construcción de la base de datos.

Referencias

- [1] Fernández Ordoñez, J.O. 1978. Eugène Freyssinet. 2c Ediciones.
- [2] Fernández-Ordóñez, D., Fernández Gómez, J. 2009. Industrialización para la construcción de viviendas. Viviendas asequibles realizadas con prefabricados de hormigón. Informes de la Construcción 61,514,71-79
- [3] FIB. 2014. Planning and design handbook on precast building structures.
- [4] Calavera, J. 1999. Proyecto y Cálculo de estructuras de Hormigón. INTEMAC
- [5] Señas, R., Sastre, R., Brufau, R., Carbajal, E.C. 2014. Estudio para la optimización de mallas estructurales de acero envolventes de edificios en altura según sus solicitaciones, en base al análisis de sus líneas isostáticas. Informes de la Construcción 66
- [6] Gómez Hermoso, J., Fernández Gómez, J. 1999. Influencia del tipo de hormigón y de acero, y de las características geométricas de la estructura, en los costes de los materiales y en la superficie ocupada por los pilares en estructuras de edificios de hormigón armado con forjado unidireccional. Informes de la Construcción 51,464.
- [7] Calavera, J.; Fernández Gómez, J. 1999. Monografías nº4. Prefabricación de edificios y naves industriales.
- [8] Aquero, J.; Castro, T.; Condejo, F.; González J.C.; Lleida J.L., Valle J. 1996. Edificación con Prefabricados de Hormigón. IECA Y ANDECE
- [9] Ministerio de Fomento. 2010 Código Técnico de la Edificación. CTE