

## STRUCTURAL ART IN AGRO-INDUSTRIAL BUILDINGS

Ferrer Gisbert, Pablo S. <sup>1</sup>; Ferrer Gisbert, Carlos M. <sup>2</sup>; Redón Santafé, Miguel <sup>2</sup>; Torregrosa Soler, Juan Bautista <sup>2</sup>; Ferrán Gozávez, José Javier <sup>2</sup>; Ferrer Gisbert, Andrés <sup>2</sup>; Sánchez Romero, Francisco Javier <sup>2</sup>; Pérez Sánchez, Modesto <sup>3</sup>  
<sup>1</sup> Dto Proyectos de Ingeniería (Universitat Politècnica de València), <sup>2</sup> Dto Ing Rural y Agroalimentaria (Universitat Politècnica de València), <sup>3</sup> Dto Ing Hidráulica y Medio Ambiente (Universitat Politècnica de València)

The idea that there is a "structural art" has been gaining popularity since the publication, in 1985, David Billington's book entitled "The tower and the bridge: the new art of structural engineering". According to the author, to be worthy of such treatment, structural creations should integrate three principles: economy, efficiency and elegance. In this paper various examples of relatively recent structures of agro-industrial constructions are analyzed. The aim is to show how this "art" is not only possible in public works or emblematic buildings like skyscrapers, but it is also in buildings which, by definition, must be primarily functional and budget.

**Keywords:** structural art; agro-industrial buildings; industrial architecture

## ARTE ESTRUCTURAL EN EDIFICIOS AGROINDUSTRIALES

La idea de que existe un "arte estructural" ha ido ganando adeptos desde la publicación, en 1985, del libro de David Billington titulado "The tower and the bridge: the new art of structural engineering". Según su autor, para ser merecedoras de dicho tratamiento, las creaciones estructurales deberán integrar tres principios: economía, eficiencia y elegancia.

En la presente ponencia se analizan diversos ejemplos de estructuras de construcciones agroindustriales, relativamente recientes, que ponen de manifiesto cómo dicho "arte" no es solo posible en obras públicas o edificios emblemáticos como los rascacielos, sino que lo es también en edificios que, por definición, deben ser primordialmente funcionales y de presupuesto ajustado.

**Palabras clave:** arte estructural; edificios agroindustriales; arquitectura industrial

## 1. Introducción y objetivos

El profesor de la Universidad de Princeton David P. Billington se enfrentó durante años al reto de enseñar estructuras a alumnos arquitectos que, mayoritariamente, encontraban aburrida dicha materia. El estudio de la vida y obra del ingeniero suizo Robert Maillart le ratificó que, muy al contrario, las estructuras podían ser apasionantes y organizó una exposición sobre el mismo a la que invitó a tres diseñadores de estructuras en los que la belleza era una constante. Los ingenieros Christian Menn (diseñador suizo de puentes) y Fazlur Kahn (diseñador de rascacielos de Chicago) y el arquitecto de nacionalidad mexicana y española Félix Candela.

En 1985 publicó el libro “The tower and the bridge: the new art of structural engineering” que dio origen a la consideración de un nuevo “arte estructural”, independiente de la escultura y la arquitectura. Éste se inició con la revolución industrial y el uso masivo del hierro en la construcción, que coincide con el nacimiento de la ingeniería moderna. El libro recoge numerosos ejemplos del trabajo de técnicos (mayoritariamente ingenieros) cuyo trabajo está enraizado en el mundo racional y numérico de la ingeniería de estructuras, a pesar de lo cual son capaces de crear objetos de gran belleza que reflejan su personalidad (y por lo tanto hacer arte).

Según su autor, para ser merecedoras de dicho tratamiento, las creaciones estructurales deberán integrar tres principios: economía, eficiencia y elegancia. Aunque este nuevo arte se pone especialmente de manifiesto en grandes obras públicas y edificios emblemáticos como puentes, rascacielos o cubiertas de grandes luces, la presente ponencia pretende revelar cómo también es posible en edificios que, por definición, deben ser primordialmente funcionales y de presupuesto ajustado, como es el caso de las construcciones agroindustriales. Para ello se analizan diversos ejemplos de estructuras en cuyo diseño han participado los autores.

## 2. Método de análisis: las tres dimensiones de Billington

La historia del arte estructural ha recibido mucha menor atención que la de la arquitectura. Seguramente porque, además de encontrarse comparativamente en su infancia, el artista estructural, a diferencia del arquitectónico, suele permanecer anónimo. Sin embargo y a pesar de su interés y ya considerable tradición, actualmente siguen siendo muy pocos los investigadores e ingenieros estructurales que la estudian (Hu, Feng, Dai, 2014).

Billington (2000) postula que las obras en el arte estructural deben ser analizadas desde tres perspectivas: la científica, la social y la simbólica.

La primera constituye el criterio primordial para el ingeniero, como lo es el social para el arquitecto y el simbólico para el escultor. La dimensión científica es medida mediante la eficiencia o uso mínimo de material de manera coherente con las exigencias funcionales y de seguridad de la estructura.

Las estructuras, al igual que las máquinas, están sometidas a las leyes de la naturaleza. De manera que los mismos métodos que permiten a los científicos explicar la naturaleza, sirven a los ingenieros para explicar el comportamiento de sus creaciones artificiales. Pero mientras los científicos buscan descubrir formas preexistentes y describir sus comportamientos inventando fórmulas, los ingenieros pretenden inventar formas utilizando fórmulas preexistentes para comprobar sus diseños.

Pero las formas tecnológicas pertenecen a un mundo social; la política y la economía las condicionan. En nuestro mundo actual, aunque puedan surgir a partir de la idea de una sola persona, son siempre el resultado de esfuerzos colectivos (sociedad). De acuerdo con

Billington, la dimensión social de las estructuras es medida mediante su economía u obtención de un coste competitivo en la ejecución y el mantenimiento.

La tercera dimensión es la simbólica y es la que abre la posibilidad al nuevo arte estructural. Por desgracia, desde que, hacia finales del siglo XVIII, se produjera la distinción entre las profesiones de arquitectura e ingeniería, surgió un cierto menosprecio hacia la estética y la creatividad en la actividad de esta última (Hu & Dai, 2010).

Aunque no hay forma de medir un símbolo, lo puede reconocerse por su elegancia y poder expresivo, que se obtienen a través del énfasis en la estética sin menoscabar los dos principios anteriores. Para ello, tal y como indica Torroja (1960), el proyectista, guiado por su instinto y su educación artística, tendrá que elegir entre las soluciones posibles imaginadas o pensar, en otros casos, si, corrigiendo sus formas, puede perfeccionar la expresión estética sin forzar excesivamente el resto de condiciones funcionales, resistentes, constructivas y económicas.

Leonhardt (2000), sin embargo, ofrece una serie de características, reglas o directrices para el diseño estético de puentes que puede resultar útil para analizar la dimensión simbólica de los ejemplos estructurales escogidos. Éstas son:

- cumplimiento de su funcionalidad o propósito,
- proporción,
- orden (modularidad, ritmo, simetría...),
- refinamiento de las formas (en aras de un mayor efecto estético),
- integración con el entorno,
- texturas superficiales (materiales),
- colores,
- carácter,
- complejidad (o estimulación complementaria al orden a través de la variedad),
- incorporación de la naturaleza.

Más recientemente (Motro, 2011) se ha analizado la relación entre el diseño de estructuras y la escultura a través de los trabajos de Choukhov o Xenaquis. La arquitectura industrial en su máxima expresión (a la que contribuye el arte estructural) ha generado algunos edificios con tanto ascendente en la demarcación del siglo XX como la tuvieron en la Edad Media las construcciones eclesiales (Rambla, 2010).

### **3. Casos de estudio**

Los ejemplos más citados en los trabajos sobre arte estructural son los de puentes de grandes luces (Hu, Feng, Dai, 2014). De hecho, de los 32 ejemplos relacionados en dicho artículo como representativos del arte estructural, solo uno es un edificio industrial y se trata de un hangar. Por eso resultan especialmente interesantes las aportaciones en el ámbito de la arquitectura industrial.

Por otra parte, la mayor parte de estudios existentes se centra en el análisis de lo que podríamos denominar "obras maestras" por su especial significación y repercusión. Por lo que también queremos poner de manifiesto el interés de algunas propuestas más modestas.

Los casos de estudio analizados corresponden a tipologías estructurales espaciales diseñadas por la Unidad de Construcción del Departamento de Ingeniería Rural y

Agroalimentaria, en la Universidad Politécnica de Valencia. Éstas pertenecen a edificios agroindustriales de empresas o cooperativas dedicadas a la confección de frutas pero, obviamente, son perfectamente aplicables a otro tipo de sectores.

### 3.1 Dimensión científica

Las estructuras analizadas destacan por su ligereza (0,25-0,30 kN/m<sup>2</sup>) y buen comportamiento para la cubrición de grandes superficies bajo diferentes cargas. Desde la perspectiva científica referida, las ventajas que presentan son:

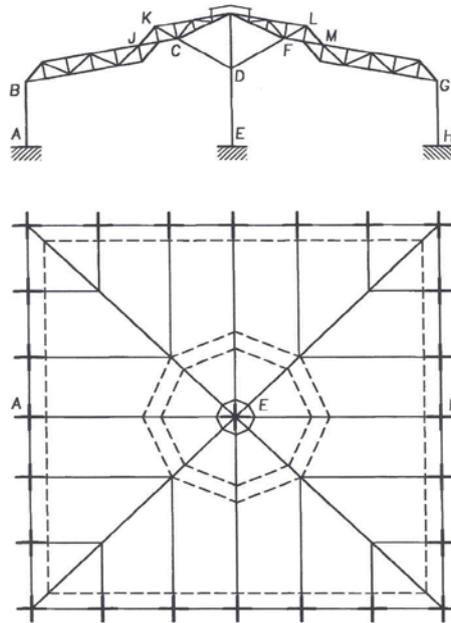
- Cubrición de grandes luces con un bajo número de pilares intermedios, lo que flexibiliza la distribución de la maquinaria y el trabajo.
- Rigidez y ligereza de las cubiertas, excelente comportamiento estructural, y alto grado de arriostramiento contra cargas laterales debidas a la armadura de barras y la disposición a cuatro aguas.
- Bajas deformaciones y deflexiones debido a la rigidez del armazón de la cubierta.
- Tamaño reducido de la cimentación; el comportamiento de la cubierta es tal que los pequeños esfuerzos de flexión se transmiten a los soportes.
- Óptima iluminación natural debido a la disposición de lucernarios.
- Óptima ventilación natural gracias a la disposición de aberturas laterales y cenitales.

Un mayor detalle en el análisis estructural de algunos de estos ejemplos puede encontrarse en Ferrer et al. (2007).

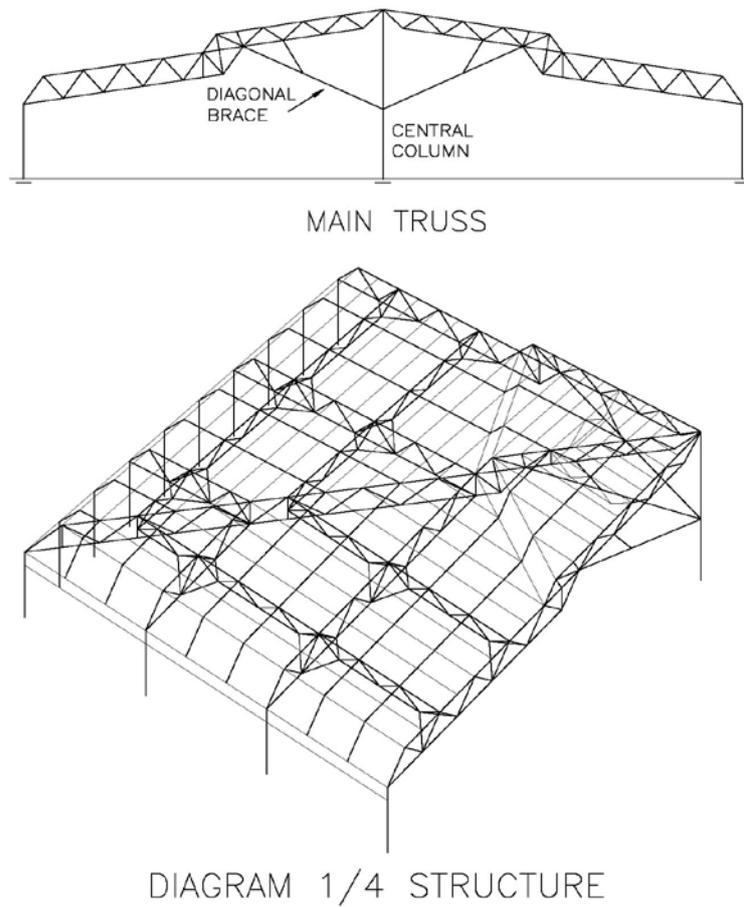
El primero de los ejemplos seleccionados (ejemplo 1) se diseñó para cubrir un edificio cuadrado de 72 m x 72 m y 7,5 m de altura libre que se utiliza para la clasificación y envasado de frutas. Consiste en una falsa cúpula octogonal que descansa sobre vigas de celosía diagonales junto con otras en una disposición transversal, lo que disminuye la deflexión por medio de tirantes diagonales concurrentes en una sola columna central (figuras 1 y 2).

Como segundo ejemplo (ejemplo 2) citaremos la estructura desarrollada para una empresa citrícola en Beniflá (Valencia), cuya primera fase data de 1979 y fue merecedora de un premio nacional y es citada en el libro "Arquitectura industrial en España, 1830-1990" (Sobrino, 1996) (figura 3).

**Figura 1: esquema estructural del ejemplo 1**



**Figura 2: sección y perspectiva estructural del ejemplo 1**



La estructura primigenia surgió como solución eficiente y original a las necesidades de diafanidad e iluminación y ventilación naturales del proceso, mediante una estructura en pseudolámina plegada, en módulos de 50x50 m (figura 4). En las siguientes referencias se realiza un análisis y justificación más exhaustivo de dicha tipología (Ferrán et al., 2007 y 2009) destacándose aquí los aspectos más relevantes.

Cada módulo posee la limatesa coincidiendo con las aristas que unen la mitad de los lados del cuadrado, y las limahoyas con las diagonales. En los centros de cada módulo se disponen los pilares a los que hay que añadir otro más corto en el centro de la nave. La altura máxima de la edificación es de 14,5 m y la mínima de fachada, coincidente con las esquinas y el centro de los lados, es de 8,30 m. Así se organiza un juego de cubiertas cuya pendiente, constante en todos los faldones, es del 25%.

Las correas llevan las cargas verticales a los pares cuya misión es doble: por un lado rigidizan los grandes planos de cubierta y por otro impiden la flexión de las barras de cumbrera y de las diagonales; es decir, transforman las cargas verticales en acciones tangenciales según los planos de cubierta.

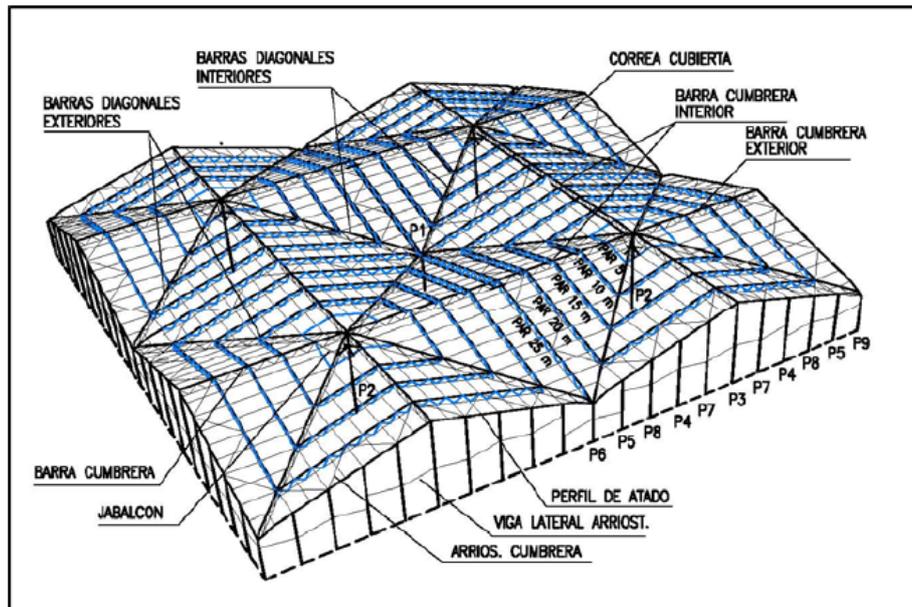
Todos los elementos trabajan fundamentalmente a esfuerzos axiles y la relativa rigidez proporcionada a los mismos es para limitar al máximo los puntales provisionales de montaje. Dada la configuración geométrica de la lámina, los mayores esfuerzos que soportan estos elementos los proporcionan los pares principales de 25 m y las vigas de atado de fachada.

Las barras de cumbrera soportan pequeños esfuerzos cuando actúan sólo las cargas verticales simétricas. Se han dimensionado con una mayor rigidez de la estrictamente necesaria, por las mismas consideraciones expuestas para las diagonales, así como para proporcionar una suficiente estabilidad de la lámina cuando estuviere sometida a las acciones horizontales de viento y a las muy poco probables cargas asimétricas de nieve.

**Figura 3: primera fase, en construcción, del ejemplo 2.**



Figura 4: esquema estructural del edificio original



El edificio ha sido objeto de sucesivas ampliaciones, la última de las cuales fue descrita en la edición XVI del presente Congreso (Ferrer et al., 2012).

Como tercer ejemplo (ejemplo 3) hemos seleccionado una nave una construida para una empresa de confección de cítricos en la provincia de Valencia, de 100 m de longitud por 44 m de anchura y 7'5 m de altura libre.

Los elementos más significativos de la estructura, en orden a la transmisión de cargas verticales, son (figuras 5 y 6):

- Correas:
  - Correas de celosía de 10 m de luz y 1'5 m de canto que se apoyan en los pórticos principales.
  - Correas de 5 m de luz que apoyan alternativamente en pórticos principales y vigas de reparto de carga.
- Pórticos principales transversales en celosía triangulada de 44 m de luz y 1'5 m de canto, separados entre sí 10 m, que se apoyan en tres puntos en los pilares laterales y en una celosía central transversal.
- Pórticos intermedios secundarios, entre los principales (5 m), que constituyen el apoyo de las correas simples de un único perfil y se apoyan a su vez en las correas en celosía, terminando longitudinalmente en la celosía transversal.
- Celosía transversal triangulada espacial de sección trapezoidal, de base mayor (inferior) 6 m, base menor (superior) 1'38 m y 4 m de canto. La triangulación se efectúa en los planos que forman los lados oblicuos del trapecio y está constituida por montantes y diagonales. Tiene 80 m de longitud total y se encuentra dividida en dos vanos.

**Figura 5: fachada principal del edificio correspondiente al ejemplo 3**



### **3.2 Dimensión social**

Todos los ejemplos expuestos se ejecutaron con costes competitivos y no han supuesto costes de mantenimiento diferentes a los que requeriría cualquier otra tipología estructural convencional.

El peso de estas tipologías estructurales y otras que se vienen desarrollando oscila entre los 0,25 y 0,40 kN/m<sup>2</sup>. Es generalmente parecido al resultante con pórticos y cerchas convencionales, pero con menores cimentaciones. Por otra parte, en la concepción de los edificios presentados y sus estructuras, la consideración de aspectos como la iluminación o la ventilación naturales ha sido una constante. Aunque existen precursores al respecto, como por ejemplo el arquitecto Albert Kahn (1869-1942), si bien desde una perspectiva mucho más mecanicista que medioambiental (Pancorbo & Martín, 2014), el interés por la consideración de los mismos solo ha sido valorado en su justa medida recientemente.

Cabe destacar que algunas, como es el caso del ejemplo 1, han sido empleadas en cooperativas agrícolas (figura 7) que son por lo general entidades con recursos financieros limitados.

**Figura 6: estructura correspondiente al ejemplo 3**



**Figura 7: Cooperativa Betxí-Export (Castellón)**



### 3.3 Dimensión simbólica

Aunque el edificio y su estructura pueden contribuir significativamente a la imagen de la empresa que alojan, el cuidado de la estética estructural en los edificios industriales no es una práctica frecuente. Ni siquiera lo es en muchos casos de edificios más representativos como pueden ser los pabellones polideportivos de multitud de municipios.

Si se consigue cubrir espacios amplios con muy pocos pilares intermedios y la estética está presente en el diseño de la estructura, el resultado es bastante espectacular como refleja la figura 8.

Entroncando con aspectos propios de la arquitectura industrial, la figura 9 refleja cómo, en el ejemplo 2, también se ha tenido en cuenta en el diseño la integración del conjunto formado por edificios representativos, marquesinas, muelles y cubiertas.

Sobre el mismo ejemplo, en la figura 10 puede observarse como las diferentes ampliaciones de la industria han respetado la tipología y modularidad originales para resaltando la estética del conjunto.

**Figura 8: Efecto estético de la estructura “ejemplo 1”**



**Figura 9: fachada principal correspondiente al “ejemplo 2”.**



El color también ha sido estudiado para resaltar el impacto estético de la estructura (figura 11). Como anécdota que corrobora la dimensión simbólica de la misma, cabe mencionar que fue seleccionada para rodar algunas escenas de la película “Celos” de Vicente Aranda.

**Figura 10: vista aérea del ejemplo 2 tras sucesivas ampliaciones**



**Figura 11: Efecto del color sobre la dimensión simbólica (frutasbollo.es)**



#### **4. Resultados y conclusiones**

A través de tres ejemplos escogidos se ha querido poner de relevancia como el ya comúnmente aceptado “arte estructural” es posible en estructuras de edificios industriales de empresas de nuestro entorno. Para ello, se han analizado las tres dimensiones identificadas por Billington (dimensión científica, social y simbólica) a través, respectivamente, de la eficiencia o uso mínimo de material, el coste y la estética.

Con este trabajo se pretende contribuir a la difusión de una parcela de la ingeniería estructural apasionante y creativa, aunque todavía escasamente atendida. “Memoria, experimentación, cultura, imaginación y creatividad son los prerrequisitos de este arte” (Motro, 2011).

## Referencias

- Billington, D.P. (1985). *The tower and the bridge: the new art of structural engineering*. Princeton University Press.
- Billington, D.P., Gottemoeller, F. (2000). Bridge aesthetics – structural art. En Chen, W.F., Duan, L. *Bridge engineering handbook* (pp. 68-86). CRC Press.
- Ferrán Gozávez, J.J. (p); Ferrer Gisbert, C.; Ferrer Ferrer, C; Torregrosa Soler, J.B. (2007) Example of development of a modular structure in pseudo folded sheet applied to a warehouse of architecture and industrial engineering. *International Symposium on New Olympics New Shell and Spatial Structures*. IASS-APCS.
- Ferrán Gozávez, J.J.; Torregrosa Soler, J.B; Ferrer Gisbert, C.; Ferrer Ferrer, C; Redón Santafé, Miguel; Sánchez Romero, Francisco J.(2009). Modular spatial structure applied to a single-story industrial building. *International Journal of Space Structures*, 24, 37-44.
- Ferrer F, C.M., Ferrán, J.J., Torregrosa, J.B., Ferrer G, C.M., Sánchez, F.J., Redón, M., Vallés, J.J. (2007). Light structure examples for industrial architecture. *Journal of the International Association for Shell and Spatial Structures*, 48, 119-129.
- Ferrer C.M., Ferrer P.S., Ferrán, J.J., Redón, M., Sánchez, F.J., Torregrosa, J.B. (2012). Ampliación de edificación singular para central hortofrutícola: aspectos proyectuales y de ejecución. *Actas del XVI Congreso Internacional de Ingeniería de Proyectos*. Valencia, pp 579-589.
- Hu N, Dai GL. (2010). From separate to combine-the ever-changing borderline between architectural art and structural art. *1st international conference on structures and architecture, ICSA*. CRC Press; p. 1989–97.
- Hu N., Feng, P., Dai G.L. (2014). Structural art: Past, present and future. *Engineering Structures*, 79, 407-416.
- Motro, R. (2011). Art and Structural Engineering-Art of Structural Engineering. *SEWC 2011 Proceedings*, Côme, Italy. 8 p.
- Pancorbo L, Martín I. (2014). La arquitectura como objeto técnico. La arquitectura industrial de Albert Kahn. *VLC arquitectura* Vol. 1(2): 1-31.
- Rambla, W. (2010). La estética fabril. Receptora de influencias e inspiradora de otros géneros arquitectónicos. *Ars Longa*, nº19, 211-221.
- Sobrino, J., (1996). *Arquitectura industrial en España, 1830-1990*. Cátedra (Cuadernos Arte).
- Torroja, E, (1960). *Razón y ser de los tipos estructurales*. CESIC.