



## **NUEVOS SISTEMAS ESTRUCTURALES, MATERIALES Y PIELES EN CUBIERTAS Y FACHADAS LIGERAS**

**José Romo Martín**

Ingeniero de Caminos, Canales y Puertos y Licenciado en Historia

Director de FHECOR Ingenieros Consultores SA y profesor de la Escuela de la Edificación (Madrid).

### **1. INTRODUCCIÓN**

La arquitectura contemporánea, gracias al impulso de la tecnología, ha superado ampliamente el corsé inherente a los sistemas estructurales en retícula. Es cada vez más frecuente en edificación la búsqueda de la planta y la forma libre, que requieren estructuras con un funcionamiento fuertemente tridimensional, cuyo comportamiento está regido por mecanismos más complejos que los simples de axil, flexión y cortante.

La estructura participa de otros fenómenos más complejos ligados a los sistemas continuos en los que el flujo de tensiones normales en tres direcciones y las tensiones tangenciales gobiernan el comportamiento global de la estructura.

Este tipo de soluciones están condicionadas fuertemente por una arquitectura, que se materializa en elementos continuos, que muchas veces se simplifican mediante estructuras de barras con una geometría tridimensional, que permiten formalizar el objeto deseado.

Si bien esta forma de entender la arquitectura supone un reto para el ingeniero estructural, que debe resolver estructuras complejas, éste ve en gran parte limitada su actuación al tener que ceñirse a la forma ideada por el arquitecto.

Por el contrario, en el proyecto de cubiertas o en las fachadas de grandes dimensiones, las condiciones habituales de ligereza, economía de recursos y en muchos casos

transparencia, permiten una mayor creatividad al ingeniero estructural, siempre dentro del concepto arquitectónico del edificio establecido por el arquitecto.

En este tipo de estructuras se están desarrollando sistemas nuevos, o bien se están recuperando soluciones del pasado pero reactualizadas con la tecnología del presente. En ellos se están incorporando nuevos materiales estructurales, y materiales de piel, que en muchos casos provienen de otras disciplinas como la náutica o la ingeniería aeroespacial.

El objeto del presente documento es establecer un breve bosquejo de la situación de la ingeniería estructural en el ámbito de las cubiertas y de las fachadas ligeras, a la luz de la propia experiencia proyectual.



*Figura (1) Cubiertas, fachadas, envoltorios, pieles, un campo apasionante para el ingeniero estructural*

## **2. MATERIALES ESTRUCTURALES Y DE PIEL EN CUBIERTAS Y FACHADAS**

Los materiales, tanto los empleados como elementos resistentes, como aquellos que constituyen los sistemas de cerramiento, son los elementos visibles en los que se materializa el concepto arquitectónico y estructural del edificio.

Existen en la práctica, un gran número de combinaciones posibles entre los materiales estructurales (acero, madera, aluminio y materiales compuestos), y los del sistema de cobertura o piel: chapas, madera, vidrio y membranas textiles con sus variedades opacas (PVC y teflón), y transparentes (ETFE). En la combinación acertada de estos materiales radica el éxito y la singularidad de la actuación.

El material estructural empleado más profusamente en este tipo de cubiertas es el acero, materializado en forma de perfiles laminados con sección en doble T o en elementos tubulares. En los casos de estructuras con comportamiento laminar, con un comportamiento estructural por forma, se consigue un gran aprovechamiento del material que conduce a soluciones muy económicas y de una gran esbeltez.

No obstante, en algunas aplicaciones, en especial cuando se trata de mover grandes cargas sobre otras estructuras esbeltas, puede resultar interesante el empleo de materiales compuestos, como la fibra de vidrio con matriz epoxídica (FRP) por su menor peso.

En otros casos, las estructuras de madera e incluso las de aluminio pueden resultar soluciones interesantes tanto bajo el punto de vista económico, como del estructural, especialmente en el rango de luces pequeñas y cuando se pretende dar una cierta impresión visual concreta al espacio construido.

En la elección del material de cubierta o de fachada, se presentan gran número de variables muchas de ellas contrapuestas, que deben de ser estudiadas y valoradas en

función de la localización y el uso específico arquitectónico: aislamiento del soleamiento y lluvia, luminosidad, aislamiento térmico, acústica, peso del sistema, coste de conservación y comportamiento frente al fuego. Con estas variables, las soluciones pueden ir desde las membranas textiles en PVC o teflón, hasta las cubiertas de chapa perfilada con un sistema de aislamiento o un cerramiento de vidrio, que pueden combinarse con distintas configuraciones estructurales, tal y como se muestra en los ejemplos indicados más adelante.

### **3. LA INGENIERÍA ESTRUCTURAL EN CUBIERTAS DE GRAN LUZ**

#### **3.1. Introducción**

El proyecto de una estructura de cubierta está fuertemente influenciado por los requisitos funcionales que concurren como consecuencia de los usos previstos.

Por otra parte, el espacio general generado debe ser acorde con la utilidad y el concepto general arquitectónico del edificio. De esta forma, hay usos que requieren una volumetría especial. Así mismo, el aspecto exterior de la cubierta debe referirse o al menos tener en cuenta el ambiente arquitectónico en que se encuentra integrada la obra.

Cuando se trata de cubrir edificaciones existentes, tales como plazas de toros o cubiertas de estadios, se suma a los condicionantes anteriores, la necesidad de adaptarse a una obra construida lo que supone en la práctica la reducción del número de soluciones estructurales posibles.

Dentro de las posibilidades tipológicas, se puede establecer una clasificación según el tipo de funcionamiento estructural de la cubierta: Estructuras con un comportamiento laminar y estructuras trabajando fundamentalmente a flexión.

Las cubiertas en las que es posible el trabajo por forma, aprovechando la curvatura, han sido uno de los pilares del desarrollo de la ingeniería estructural, se trata de soluciones naturales para cubrir grandes espacios con un consumo mínimo de materiales. El Panteón de Roma (siglo II), en un hormigón primitivo, constituye un ejemplo clásico de esta tipología.

Si nos ceñimos al periodo histórico que se abre en el siglo XIX en el que aparece la formulación físico-matemática fundamental de la ciencia de la ingeniería estructural, y por lo tanto aparece claramente la diferenciación entre el técnico (ingeniero) y el artista (el arquitecto), los ejemplos de tipologías y sus realizaciones son prueba de la maestría de los ingenieros estructurales.

Desde las obras relacionadas con el ferrocarril, como la Estación de Paddington en Londres de Brunel 1838, a las cubiertas relacionadas con las Exposiciones Universales, como la obra del Cristal Palace de Paxton 1851, o las realizaciones consecuencia de la aparición de otras nuevas tipologías arquitectónicas, como por ejemplo los edificios comerciales, uno de cuyos primeros ejemplos son las cubiertas de las Halles en Paris, obra de Baltard y Callet 1843.

El empleo primero del hierro y posteriormente de los aceros permitió salvar grandes luces con una prodigiosa economía de recursos, aplicando una rigurosa aproximación estructural al proyecto.

Ya en el siglo XX, con la aparición del hormigón armado, y su aplicación en cubiertas, si bien con luces más modestas que las anteriores, supusieron una revolución en el mundo de la arquitectura, las obras de Torroja, Nervi o Candela, son ejemplos de una generación que supo explotar las condiciones de este material antiguo (el *opus caementicium* romano) pero que con la ayuda del acero en barras supuso una auténtica revolución en el mundo de la construcción.

En el caso de estructuras de cubierta en las que las membranas textiles constituyen la estructura principal, las formas resultantes provienen de la doble curvatura necesaria para que la membrana no pierda la forma ante cargas de sentidos contrarios, como son la nieve y la succión producida por el viento. En ellas el conocimiento y la imaginación del proyectista son básicos en la consecución de estructuras estables y estéticamente interesantes.

En otros casos se desea realizar una cubierta formalmente plana, más acorde con otras configuraciones en planta, tales como las correspondientes a espacios para espectáculos deportivos: tenis, piscinas, etc., o con una volumetría exterior paralelepédica más al gusto actual arquitectónico. En estos casos el comportamiento estructural de la cubierta es a flexión, por lo que la estructura tendrá un canto importante.

### **3.2. Cubiertas por forma**

Las cubiertas que trabajan fundamentalmente por forma, gracias a su curvatura en una o en dos direcciones, siguen siendo una de las soluciones más atractivas bajo el punto de vista formal, resistente y económico.

En estos comienzos del siglo XXI, sigue siendo el acero, como lo era en el siglo XIX, el material, más interesante para cubrir luces de hasta 300 m.

En muchos casos se trata de versiones actualizadas de tipologías tradicionales, como por ejemplo la cubierta de la Plaza de Toros de Pontevedra, en la que la red básica sigue la solución empleada por Schwedler en la cubierta para el parque de locomotoras de St Johann en 1863 y la cubierta del gasómetro de Fichtestrasse en Berlín de 1876.

En Pontevedra, la solución de Schwedler, ha sido adaptada a una cubierta de 80 m de luz con un gran óculo central. En esta obra, la inclusión de una viga perimetral de hormigón armado, para que sirviese de lastre al conjunto dada su liviandad (20 kg/m<sup>2</sup>), el apoyo mediante neoprenos en pilares, y el empleo de una viga en sección cajón metálica para resolver el óculo central son los aportes básicos a esta antigua tipología.

El recuperación de estas formas estructurales aplicadas a las cubiertas de recintos circulares, como las plazas de toros, en las que las luces pueden llegar a ser de hasta 120 m, permiten la realización de estructuras con esbelteces de hasta 1/300 para relaciones flecha/luz del orden de 1/7.

Estas obras presentan la armonía característica de la planta central, creando espacios serenos que no dejan de sorprender por su liviandad y eficacia estructural.

La combinación de la geometría de Schwelder con una membrana de PVC como material de cubierta se consiguió el aspecto marítimo y ligero pretendido con el diseño.



*Figura 2 Plaza de Toros de Pontevedra [1]*

En el caso de la cubierta del Delfinario de Tenerife, se ha empleado un sistema estructural formado por vigas en composite FRP, reforzadas con un doble sistema de cables de presión y succión que permite aliviar el estado tensional de las vigas.



*Figura 3 Cubierta del Delfinario de Tenerife [2]*

### **3.3. Estructuras en Tensegridad**

Las estructuras en tensegridad, así bautizadas por Buckminster Fuller (1895-1983), y ya empleadas durante el constructivismo ruso, Ioganson, en la Exposición Universal de Moscú en 1921, constituyen uno de los paradigmas de la ligereza aplicada a las estructuras de fachadas, cubiertas y torres.

Un ejemplo cercano de esta tipología es la cubierta de la piscina en el Centro Comercial Colombo en Lisboa en la que se combina una membrana de PVC con unas vigas de cables (tensegrity), a los que se aplica una pretensión inicial para evitar la pérdida brusca de la forma ante cargas alternadas de presión o succión. En este caso el elemento comprimido central se ha proyectado en FRP con el fin de realizar un fácil montaje debido a su exiguo peso.



Figura 4 Esquema estructural, cubierta de Colombo Lisboa [3]

La posibilidad de combinar esta tipología con otro tipo de membranas más transparentes, permite la resolución de grandes luces con gran ligereza. Como es el caso de la propuesta realizada para la cubierta del Claustro de San Benito en Valladolid

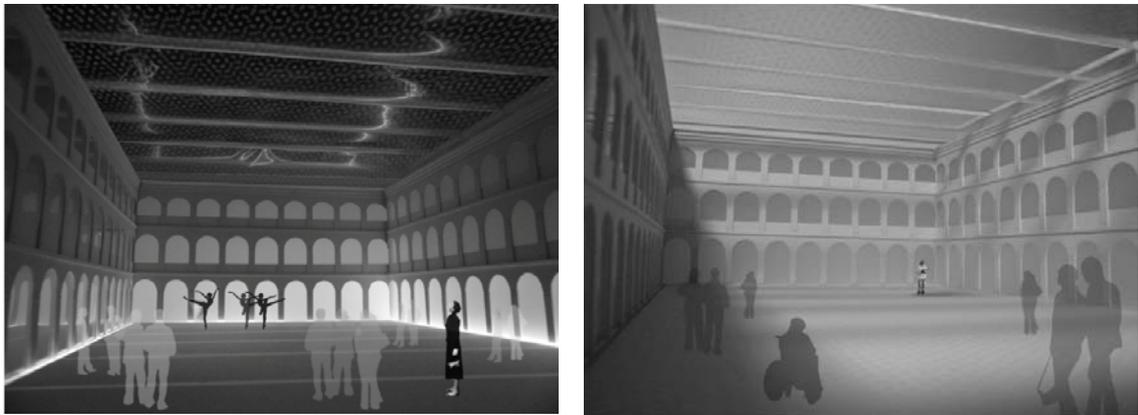


Figura 5: Propuesta de cubierta con vigas tenségrity combinadas con una membrana en doble capa de ETFE. Claustro de San Benito (Valladolid) [4]

### 3.4. Las mega-cubiertas

A medida que aumenta la luz en las cubiertas que trabajan por forma, uno de cuyos mejores ejemplos son las cubiertas esféricas, el peso propio resulta determinante en el diseño de la estructura.

A partir de los 120 m de luz, las estructuras monocapa tipo Schwelder pierden su eficacia y son necesarias estructuras bicapa, mediante celosías tridimensionales, que no obstante siguen teniendo una geometría de tipo esférico, con el fin de conseguir el trabajo por forma.

A medida que la luz crece, la inestabilidad global del sistema se convierte en la variable condicionante del diseño, que depende además en gran medida del peso propio de la estructura.

En estos casos, la forma del hiperboloide surge como solución natural al problema. Se trata de una estructura formada por una red de cables, en los que el grado de pretensado de cada una de las curvaturas es uno de los aspectos que condiciona la estabilidad y por tanto la forma final de la cubierta.

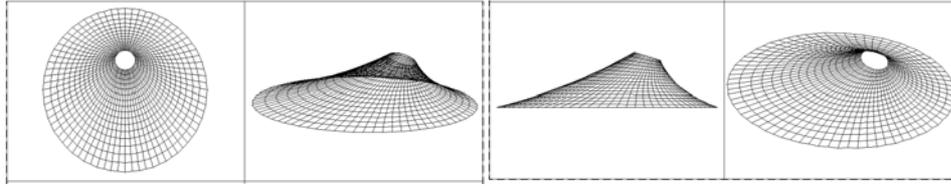


Figura 6. Estudio de una cubierta en hiperboloide con un diámetro de base de 700 m [5]

Se trata de una solución con un consumo mínimo de materiales, que podría hacer posible el cubrir espacios enormes con un coste aceptable.

## 4. LAS CUBIERTAS MÓVILES

### 4.1. Introducción

Los promotores de eventos multitudinarios, tanto públicos como privados, necesitan cada vez más edificios con un aforo importante y al mismo tiempo dotados de una gran flexibilidad. En este contexto aparecen los modernos espacios cubiertos construidos con la posibilidad de descubrirse total o parcialmente en unos pocos minutos.

### 4.2. Movimiento y propulsión

Existen distintas configuraciones geométricas para poder descubrir total o parcialmente el espacio cubierto. Las posibilidades de movimiento, dependen fuertemente de la configuración arquitectónica del conjunto del edificio y de la parte de la cubierta que permanece fija. Dos de los movimientos más frecuentes, son:

- Movimientos sobre superficies planas. En este caso son posibles las traslaciones y las rotaciones de eje horizontal o vertical, o combinaciones de traslaciones y rotaciones. Esta es la solución propuesta para la cubierta móvil del Centro Acuático en Madrid



Figura 7 Cubierta móvil: Centro Acuático[6]

- Movimientos sobre superficies esféricas. En estos casos los movimientos posibles en planta son el resultado de un giro respecto al centro de la esfera de la cubierta fija.

En cuanto a los sistemas de propulsión o empuje, éstos se pueden clasificar, en función de la forma de la aplicación de la fuerza de tiro o empuje sobre las partes móviles, en:

- Motorización. Consiste en la aplicación de un par mediante un motor acoplado a las ruedas sobre las que se apoya la parte móvil de la cubierta. En aquellos sistemas con pendientes altas el sistema de rodadura suele consistir en una cremallera dentada. En estos casos el par motor se aplica sobre una rueda dentada en la que apoya la cubierta móvil. Esta es la solución empleada en la Cubierta de la Plaza de Tarragona, y en la Cubierta de la Plaza de Aranda de Duero

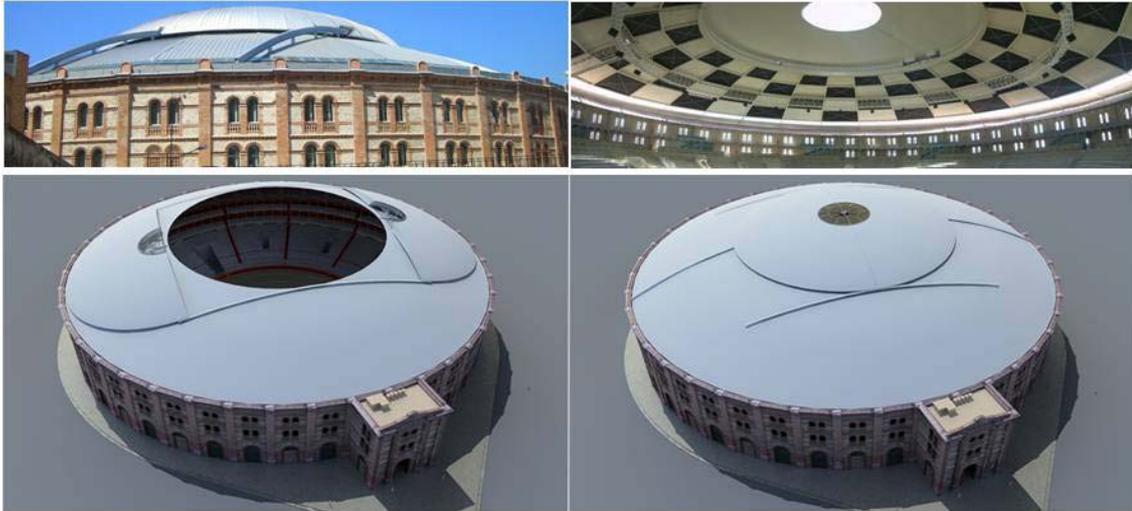


Figura8: Cubierta de la Plaza de Tarragona [7]

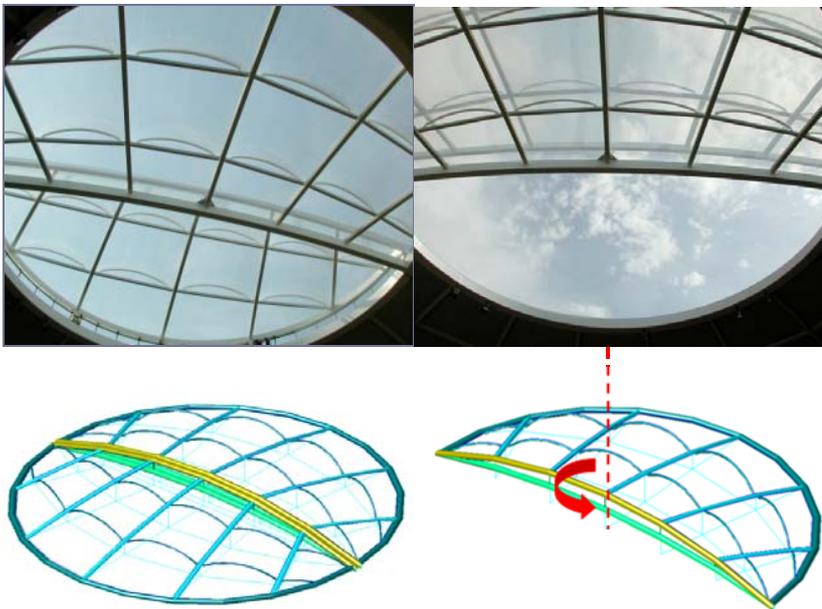


Figura 9: Cubierta de la Plaza de Aranda de Duero [8]

- Tracción con cable. En este caso, la fuerza tractora procede de un sistema de cables que se mueve mediante un polipasto motorizado, que actúa en las dos direcciones.

El sistema de rodadura puede ser mediante ruedas o rodos en el caso de fuertes cargas verticales. Este sistema es el empleado en la Cubierta de la Plaza de León



Figura 10: Cubierta de la Plaza de León [9]

- Sistemas hidráulicos. Una tercera posibilidad es el desplazamiento o giro mediante el empuje generado por cilindros hidráulicos telescópicos, que transmiten la carga axial necesaria para movilizar la cubierta. Este sistema ha sido empleado en la Plaza de Arroyo de la Encomienda



Figura 11: Plaza de Arroyo de la Encomienda [10]

Estos sistemas, pueden ser usados también de forma combinada. La idoneidad de uno u otro depende fundamentalmente del tipo de movimiento a efectuar, de las cargas a mover y de las pendientes a salvar por la parte móvil. Es éste un tipo de actuaciones en los que la colaboración de arquitectos, ingenieros estructurales e ingenieros mecánicos es fundamental para el adecuado desarrollo del proceso proyectual

## 5. INGENIERIA ESTRUCTURAL EN FACHADAS

La fachada es otro de los campos de actividad natural de la ingeniería estructural. La arquitectura de la mano de la corriente de la “high-tech”, incorporó en las últimas décadas del siglo XX, el vidrio combinado con la estructura como uno de los elementos distintivos del edificio. Los ejemplos son múltiples, y la importancia de nombres como Rice, Happold, Arup, o Schlaich, muestran la relevancia de los ingenieros estructurales en los proyectos de edificación ligados a esa corriente arquitectónica.

En la última década del siglo XX y en esta primera del XXI, es la introducción de otros materiales, como por el ejemplo el ETFE, o las membranas más clásicas en PVC o

PTFE que ya no sólo se emplean como elementos de cubierta, sino también como un material más de fachada, e incluso como envoltorio global fachada-cubierta.

El empleo de estos materiales como fachada, permite la investigación de nuevas formas arquitectónicas más libres, abriéndose también un gran número de posibilidades estructurales, que además permiten la integración del trabajo del ingeniero estructural desde el inicio en el concepto global arquitectónico.

Un ejemplo de estas posibilidades, es el caso de la fachada del Edificio del Aparcamiento de la Ciudad de la Justicia de Madrid, en el que se ha empleado una combinación de estructura en tensegridad, con una membrana de PTFE, que además de cumplir la función básica del control de vistas, sirve como elemento de significación de este edificio con una fuerte impronta estructural .



*Figura 12: Aparcamiento de la Ciudad de la Justicia de Madrid [11]*

En el caso del Auditorio de Cartagena, se deseaba, cubrir dos fachadas, una de 12x28 m<sup>2</sup> y otra de 6x28 m<sup>2</sup>, en dos piezas únicas, con una forma tanto interior como exterior sensiblemente plana.

Esta última condición impedía el uso del ETFE en las soluciones tradicionales de simple capa o presostáticas convencionales. Para resolver estos problemas, se ideó una solución presostática pero plana. Para ello se dispuso dos redes de cables verticales tensados, una en la membrana exterior y otra en la interior y conectados entre sí que controlaban la forma de la membrana al introducir la presión interior en el sistema.

Con el fin de evitar cualquier efecto sobre la estructura del edificio, el conjunto de membranas y cables se conecta a un bastidor metálico, que hace las veces de marco rígido. El sistema queda autoequilibrado gracias a los dos elementos verticales del marco que permiten el equilibrio de las fuerzas de anclaje de ambas caras.

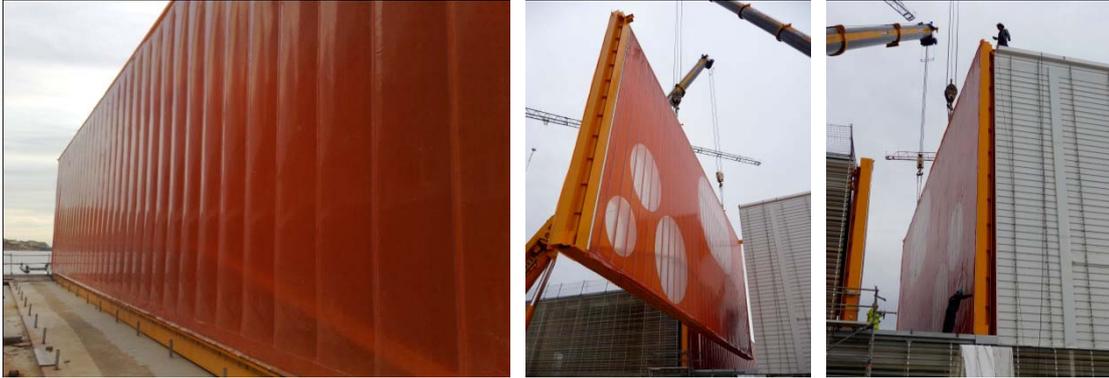


Figura 13: Fachada de Auditorio de Cartagena [12]

En el caso del Auditorio de Plasencia, se trata de realizar un envoltorio global, tanto para la fachada como para la cubierta en ETFE en simple capa, con una estructura en tensegridad que se separa de la estructura general del edificio, creando un espacio para las circulaciones entre niveles y por tanto dando una gran visibilidad a la fachada tanto desde el exterior como desde el interior de la obra.

Todos estos ejemplos son una breve muestra de la variedad tipológica existente en las fachadas ligeras, en las que destaca la importancia del concepto estructural de las mismas.

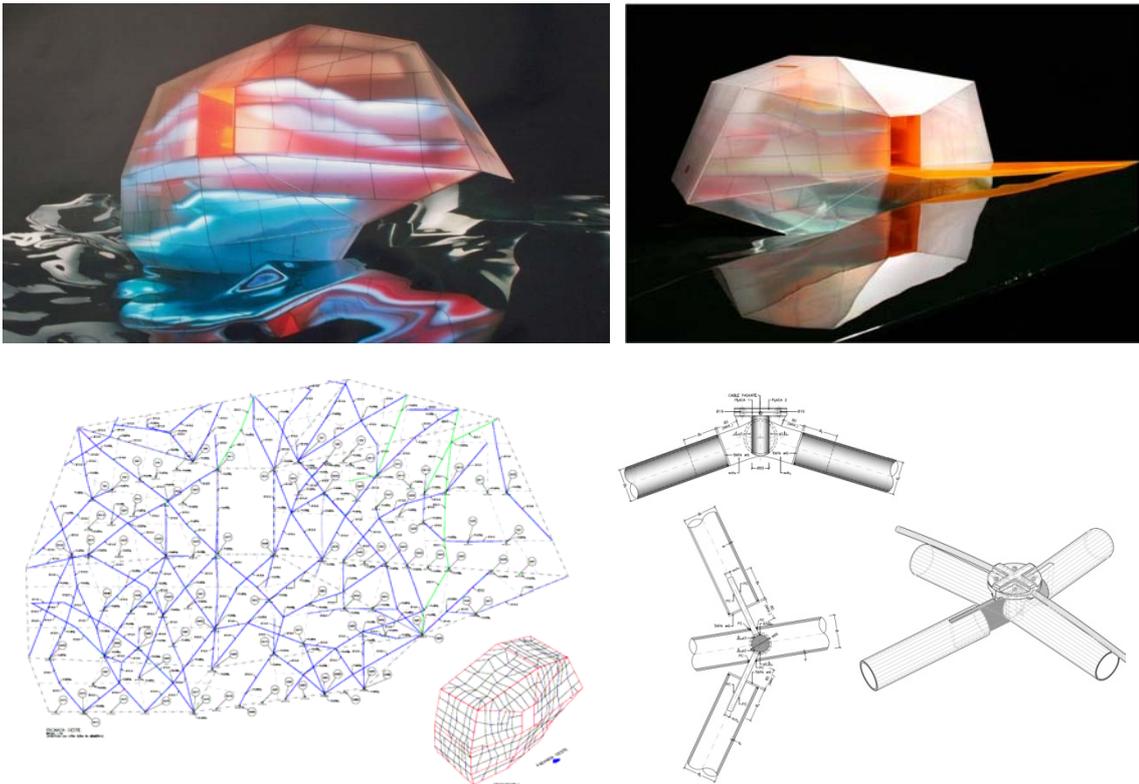


Figura 14 Fachada Auditorio de Plasencia [13]

## 6. CONCLUSIONES

Las cubiertas y las fachadas, son elementos arquitectónicos en cuyo proyecto la ingeniería estructural tiene un papel protagónico. La importancia de la estructura como elemento modelador del aspecto exterior e interior del edificio es con frecuencia aprovechado por el proyectista al configurarlo como uno de los aspectos relevantes en la expresión formal del concepto arquitectónico.

Se trata quizás de uno de los campos, en los que las posibilidades creativas del ingeniero pueden desarrollarse con mayor libertad. Las posibilidades son muy amplias y por lo tanto el ingeniero debe desenvolverse con comodidad en una serie de registros distintos, que incorporan tanto nuevos materiales estructurales como nuevos elementos de piel.

El proyecto de cubiertas y fachadas ligeras es un entorno altamente flexible, en el que la interpretación y la relación con el cliente y el arquitecto, además de la pericia técnica se configuran en los factores determinantes de la calidad del producto final. Se trata de un ámbito ambiguo y tremendamente apasionante para el ingeniero estructural amante de la arquitectura.

## 7. FICHAS DE LAS OBRAS MENCIONADAS

- [1] **Cubierta de la Plaza de Toros de Pontevedra.** Arquitectura e ingeniería estructural: José Romo FHECOR Ingenieros, constructor: FAMECA + Lastra y Zorrilla Arquitectura Textil. Propiedad: Victoriano del Río.
- [2] **Cubierta Delfinario de Tenerife.** Arquitectura e ingeniería estructural: José Romo FHECOR Ingenieros, constructor: Lastra y Zorrilla Arquitectura Textil. Propiedad: Octopus Park.
- [3] **Cubierta Piscina Centro Comercial Colombo (Lisboa).** Arquitectura: SONAE, ingeniería estructural: José Romo FHECOR Ingenieros, constructor: Lastra y Zorrilla Arquitectura Textil. Propiedad: Sonae.
- [4] **Propuesta Cubierta Claustro de San Benito Valladolid.** Arquitectura: Rodrigo Almonacid, ingeniería estructural: José Romo FHECOR Ingenieros. Propiedad: Ayuntamiento de Valladolid.
- [5] **Estudio de una cubierta de gran luz.** Ingeniería Estructural: José Romo, Sebastián Dieste, Niklas Johanson FHECOR Ingenieros.
- [6] **Cubierta Móvil Centro Acuático Madrid.** Arquitectura: Juan José Medina, ingeniería estructural: José Romo, Sebastián Dieste FHECOR Ingenieros, constructor: Dragados. Propiedad: Ayuntamiento de Madrid
- [7] **Cubierta Plaza de Tarragona.** Arquitectura: Xavier Romani y Montserrat Gine, ingeniería estructural: José Romo, Francisco Prieto, Javier León FHECOR Ingenieros, constructor: Acciona. Propiedad: Diputación de Tarragona.

- [8] **Cubierta Plaza de Aranda de Duero.** Arquitectura e ingeniería estructural: José Romo, Laura Granda, Julio Sanchez FHECOR Ingenieros, constructor: Fameca + Lastra y Zorrilla Arquitectura Textil. Propiedad: Victoriano del Río.
- [9] **Cubierta Plaza de León.** Arquitectura e ingeniería estructural: José Romo, Laura Granda, Julio Sanchez FHECOR Ingenieros, constructor: Fameca. Propiedad: Ayuntamiento de León.
- [10] **Cubierta Plaza Arroyo de la Encomienda, Valladolid.** Arquitectura e ingeniería estructural: José Romo, Niklas Johansson y Horacio Pieroni, FHECOR Ingenieros, constructor: Collosa. Propiedad: Ayuntamiento de Arroyo de la Encomienda.
- [11] **Fachada Edificio Aparcamiento de la Ciudad de la Justicia, Madrid.** Arquitectura: Richard Rogers Partnership y Vidal y Asociados. Ingeniería Estructural: José Romo, Alberto Brusa, Niklas Johansson, constructor: Isolux-Corsán. Propiedad: Comunidad de Madrid.
- [12] **Fachada Auditorio de Cartagena.** Arquitectura: Selgas-Cano. Ingeniería Estructural: José Romo y Juan José Jorquera, FHECOR Ingenieros, constructor: Dragados + Lastra y Zorrilla Arquitectura Textil. Propiedad: Ayuntamiento de Cartagena.
- [13] **Fachada Auditorio de Plasencia.** Arquitectura: Selgas-Cano. Ingeniería Estructural: José Romo y Ignacio Fernández y Juan M. Vidal, FHECOR Ingenieros, constructor: Ute Joca, S.A. - Placonsa. Propiedad: Junta de Extremadura.

