

# MIGUEL ÁNGEL

*Geometría y superficies a través de las estructuras emblemáticas*

# LEÓN

*del ingeniero Eduardo Torroja*

## ***Resumen***

Considero fundamental y totalmente necesario poseer una amplia base de conocimientos geométricos, métricos, proyectivos y de representación mediante los diferentes sistemas, tanto a la hora de proyectar como de construir en arquitectura e ingeniería.

Puede dar la sensación de cierta aridez cuando los alumnos se enfrentan por primera vez a los contenidos de estas materias, principalmente los relativos a la Geometría Proyectiva, pero esa especie de «indiferencia» inicial se transforma en una gran curiosidad e interés cuando descubren que arquitectos e ingenieros, con un pasado reciente, como Félix Candela, Antonio Gaudí, Pier Luigi Nervi, Eduardo Torroja..., y otros muchos en la actualidad, están legando una serie de obras emblemáticas en las que han aplicado esos conocimientos con profusión y exhaustividad en su diseño.

Es a partir de ese momento, una vez que han adquirido la base geométrica y percibido la generación y representación de las cónicas y superficies, principalmente las cuádricas regladas, en dos dimensiones cuando sienten la «necesidad» de trasladar esos conocimientos adquiridos al

ordenador para, a través del correspondiente software, obtener su representación en tres dimensiones.

La expresividad de las tres dimensiones y, sobre todo, de la infografía en movimiento permite plasmar de forma dinámica el proceso seguido en el análisis de la generación proyectiva de una superficie y su representación. Pero, evidentemente, para llegar a este punto es preciso e indispensable poseer la base necesaria que permita desarrollar esas imágenes y comprender lo que transmite.

En el artículo se expone la experiencia obtenida en este sentido en el Área de Expresión Gráfica en la Ingeniería de la Universidad de Granada con los alumnos de la E.T.S. de Ingenieros de Caminos. Una vez expuesta en clase la disciplina se estudia la generación proyectiva y los elementos geométricos de las superficies y curvas más significativas de determinadas obras de los autores indicados con anterioridad mediante animación tridimensional realizada por ordenador. La primera obra en la que se puso en práctica esta metodología fue la Cuba de Fedala de Eduardo Torroja, a la que más extensión se dedica en el presente artículo, continuando posteriormente con las otras realizaciones de Torroja que también se incluyen en este trabajo.

De esta forma, aprovechando esa expresividad a la que nos referíamos con anterioridad, se muestran, además de los hiperboloides, las diferentes superficies que componen la estructura de la cuba: las de revolución que han sido modeladas a través de cónicas vectorizadas y torneadas (exterior, solera y cubierta); y el helicoides de plano director y los pilares soportes que se han obtenido como superficies envolventes de polígonos variables a lo largo de una trayectoria, disponiéndose éstos de forma matricial polar.

## **1. *Introducción***

Con motivo del centenario del nacimiento del insigne Ingeniero de Caminos Eduardo Torroja Miret, surgió la idea en la asignatura Sistemas de Representación, segundo curso de la Escuela Técnica Superior de Ingenieros de Caminos de Granada durante el año académico 1999-2000, de efectuar un estudio desde la perspectiva de la geometría de su impresionante obra a través de algunas de sus realizaciones más significativas en los campos de las cubiertas laminares, viaductos, depósitos, presas, etc.

El CEHOPU, Centro de Estudios Históricos de Obras Públicas y Urbanismo, celebró en nuestra Escuela una magna exposición dedicada íntegramente a la obra de Torroja, del 1 al 13 de noviembre de 2000, y en ella se

presentó, a petición del Cehopu y del Prof. José Antonio Torroja, hijo de Eduardo Torroja, la primera fase del trabajo que habían acometido los alumnos del Área de Expresión Gráfica en la Ingeniería: La Cuba Hiperbólica de Fedala.

Es interesante comenzar por presentar de forma lo más esquemática posible, aunque sea de sobra conocida por todos, una breve semblanza del ingeniero Eduardo Torroja para conocer su personalidad: Nació en Madrid el día 27 de agosto de 1899; Ingeniero de Caminos, Canales y Puertos, 1923; Profesor de la Escuela de Ingenieros de Caminos de Madrid, 1939-1961; Profesor de las Universidades de Princeton y de Harvard, de la Escuela de Arquitectura de Raleigh y del Massachusetts Technical Institute en EE.UU. y de la Universidad de Buenos Aires; Director del Instituto Técnico de la Construcción y del Cemento; Doctor Honoris Causa de varias Universidades; Miembro de numerosas Asociaciones profesionales; Murió en Madrid el día 15 de junio de 1961.

Realizó sus obras más importantes entre 1926 y 1936, alcanzando en aquellos años un prestigio tan alto que el propio Frank Lloyd Wright llegó a decir que Torroja era el más grande ingeniero que existía, cuando aún vivían nada menos que Freyssinet, Maillart y Nervi. A partir de la época indicada Torroja dedica su mayor atención a la actividad académica e investigadora, impartiendo clases y participando en la redacción de instrucciones y reglamentos. Fue uno de los precursores del hormigón armado, material al que consideraba tan fecundo, maleable y plástico en las manos del arquitecto o ingeniero, como la porcelana en las del artista cerámico. Por el contrario, el acero no fue un elemento de su predilección al considerar que presentaba una limitación muy importante a su imaginación, puesto que no se dejaba moldear libremente por lo obligado, duro e inflexible de sus formas laminadas.

Torroja<sup>1</sup>, al igual que Maillart y Nervi, sentía verdadera predilección por el hormigón armado, ya que consideraba que con él se puede alcanzar la expresividad del fenómeno resistente, donde se funden el hecho tensional y el efecto estético, la función resistente en la expresión estética. Sólo a partir de este material descubre las estructuras laminares, *sus láminas, un velo envolvente continuo y de pequeñísimo espesor que al tiempo que cierra, envuelve y abriga este espacio, se sostiene a sí mismo. Con ellas alcanzará la gloria. Las láminas le permiten la creación de infinitos tipos posibles con espesores hasta 1/700, con la libertad y la fecundidad de su imaginación. Se siente atraído hacia la lámina cilíndrica, una bóveda desconcertante que no da empujes, un nuevo tipo estructural con el que construye su mejor obra: La cubierta del Frontón Recoletos de Madrid, que tendrá enorme resonancia internacional. La cúpula semiesférica*

<sup>1</sup> Fueron los ingenieros más populares y conocidos de la primera mitad del siglo XX, más en el terreno del diseño formal que en el propiamente técnico y estructural, donde la primacía de Freyssinet con la introducción del hormigón pretensado fue indiscutible.

*rebajada del mercado de Algeciras es otra estructura laminar que causa admiración por la audacia de sus planteamientos técnicos. También trabaja a menudo con los hiperboloides, que conoce y maneja con soltura y elegancia, ya sea para realizar un cajón de cimentación (Puente de Sancti-Petri), un depósito de agua (Fedala) o las marquesinas del Hipódromo de la Zarzuela [1].*

Al mismo tiempo que Torroja proyecta y construye algunas de sus cubiertas más emblemáticas utilizando hiperboloides hiperbólicos, el arquitecto Félix Candela asombra al mundo, igualmente, con sus estructuras laminares usando como superficie el paraboloide hiperbólico (sus famosos «cascarones»), aunque el pionero en la creación de estas formas, cincuenta años antes, fue el arquitecto Antonio Gaudí en la Sagrada Familia de Barcelona. La diferencia radicaba en que Gaudí levanta esas superficies mediante bóvedas tabicadas cerámicas y Candela las ejecuta con hormigón armado.

La obra de Torroja ha sido muy estudiada desde diversos puntos de vista, concernientes principalmente al cálculo estructural, a los procedimientos constructivos, a la innovación tecnológica, etc., pero, entendíamos, que no se había realizado aún, con la misma profundidad, desde la perspectiva de su composición geométrica, aspecto éste específico de nuestra Área de Conocimiento y muy valorado por el propio Torroja, como se deduce de sus propios escritos.

*El nacimiento de un conjunto estructural, resultado de un proceso creador, fusión de técnica con arte, de ingenio con estudio, de imaginación con sensibilidad, escapa del puro dominio de la lógica para entrar en las secretas fronteras de la inspiración. Antes y por encima de todo cálculo está la idea, moldeadora del material en forma resistente, para cumplir su misión [2].* Estas palabras, contenidas en el prólogo del libro, expresan claramente cual era la filosofía de Torroja en este tema. Para acertar en la concepción y diseño de una estructura es preciso enfocar el problema desde una visión más general y cualitativa que la meramente de cálculo. Es necesario tener presente, además, la finalidad o función de la obra proyectada y la forma de la misma.

*Ninguna obra pasará a la posteridad por la perfección de sus cálculos, solamente la **forma** continuará impresionando,* decía Torroja, para quien una de las características de toda construcción es que debe poseer una interpretación estética, más o menos exigente. Esta característica jugó un papel primordial en la concepción de su extensa obra, como se puede deducir contemplando la amplia «colección» de formas estructurales de gran belleza que proyectó.

El diseño de formas estructurales exige un profundo conocimiento geométrico, métrico y de generación de las superficies que intervienen en su formación, con independencia del comportamiento estructural de los materiales que hacen posible su construcción. Los exhaustivos conocimientos geométricos de Torroja se ponen de manifiesto de forma patente al estudiar todos y cada uno de sus proyectos, se hayan ejecutado o hayan quedado plasmados únicamente en papel. Si se observa, por ejemplo, la Cuba de Fedala, donde participan diferentes superficies en completa armonía, la conclusión que se obtiene es que en su concepción se encierra una auténtica lección de Geometría.

## 2. *Generación proyectiva de cónicas y cuádricas regladas*

En primer lugar, a título de recordatorio, se indica de forma muy simplificada la generación geométrica y proyectiva de las cónicas y cuádricas que intervienen en la obra de Torroja. El cono de revolución se genera por el giro de una recta, generatriz, en torno a otra, eje, con la que tiene un punto propio común. El cilindro de revolución es engendrado por un recta, generatriz, que gira alrededor de otra, eje, con la que se corta en el infinito. El hiperboloide hiperbólico de revolución es generado por el giro de una recta, generatriz o directriz, alrededor de otra, eje, con la que se cruza, (Fig. 1).

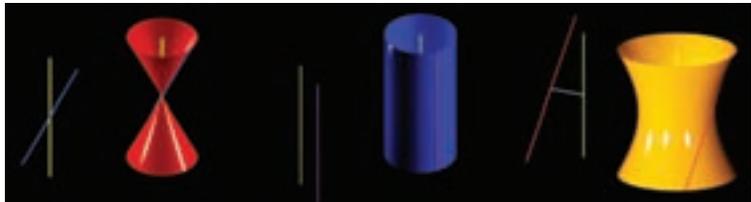


FIG. 1

Generación cono de revolución, cilindro de revolución e hiperboloide hiperbólico de revolución.

Las rectas de unión de puntos homólogos que forman parte de dos series proyectivas de bases coplanarias, no superpuestas, determinan un haz plano de segundo orden, siendo su envolvente una cónica. Si las bases no son coplanarias, se genera un haz alabeado de segundo orden. Las rectas generadoras de este haz se denominan generatrices, existiendo otro haz alabeado en el que cada recta que lo forma, directriz, se cruza con las restantes del mismo haz y corta a todas las generatrices contenidas en el primero. La superficie envolvente de este doble sistema de haces formado

por las dos familias de rectas, denominadas, indistintamente, directrices y generatrices es una cuádrica reglada, hiperboloide hiperbólico o paraboloides hiperbólico, según cumplan otras condiciones (Fig. 2).

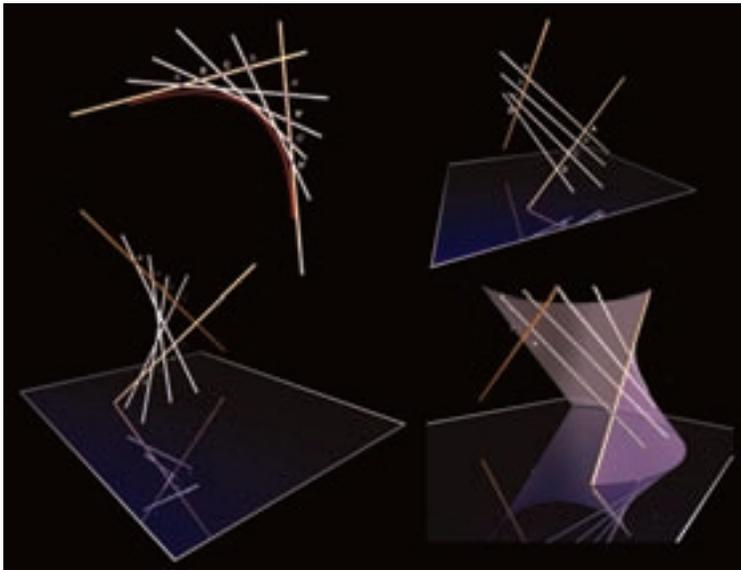


FIG. 2  
Generación proyectiva de cónicas y cuádricas regladas.

### 3. *Algunas obras representativas*

#### 3.1. *La Cuba Hiperbólica de Fedala*

La cuba hiperbólica de Fedala (Marruecos), construida en 1956, es un depósito laminar elevado de 3.500,000 m<sup>3</sup> de capacidad y ocho metros de altura máxima de lámina de agua, montada sobre un castillete circular de soportes de hormigón armado, que ya existían puesto que se había acometido la ejecución del proyecto primitivo que contemplaba la cuba en forma de tronco de cono de revolución invertido. Como el problema primordial en este tipo de obras es asegurar la impermeabilización de los alzados y solera del depósito, se optó por cambiar la tipología de las superficies que definían el contorno, sustituyendo el tronco de cono por un hiperboloide hiperbólico de revolución en el paramento lateral y un toro de revolución para la solera, (Fig. 3).

El hiperboloide hiperbólico presenta la ventaja de permitir un doble pretensado del hormigón según las direcciones de sus dos familias de



FIG. 3  
Cuba Hiperbólica de Fedala.

generatrices rectas, consiguiéndose, de este modo, para la pared un estado de bicompresión y evitando, por tanto, el peligro de fisuración bajo la acción de la presión hidrostática del agua.

La solera del depósito está compuesta por una bóveda tórica de hormigón armado que descansa en dos anillos, coincidiendo el exterior con la circunferencia de garganta de los dos hiperboloides. Este anillo, postensado mediante tensores de rosca formando un polígono estrellado para evitar tracciones, se apoya en dieciocho pilares que soportan a su vez a la superficie hiperbólica. El anillo interior transmite sus esfuerzos a tierra por medio de seis columnas.

La cubierta consta de dos bóvedas tóricas de ladrillo que se sustentan en tres anillos. El de su intersección se apoya en seis columnas de hormigón armado dispuestas de forma radial; el interior en la superficie cilíndrica que alberga la escalera y el exterior en la superficie del hiperboloide superior. El eje de las tres bóvedas tóricas de la solera y cubierta, de generatriz cónica y directriz circular, es el mismo que el de los hiperboloides y que el de la superficie cilíndrica de dos metros de diámetro donde se encuentra la escalera de acceso al interior de la cuba y a la cubierta. Esta escalera está definida por un helicoides alabeado de plano director horizontal.

La silueta campaniforme de la cuba viene determinada por dos hiperboloides reglados de revolución, de ejes superpuestos y circunferencia de garganta común, de 17'00 m de diámetro. El diámetro máximo del hiperboloide superior es 40'00 m y el inferior 19'00 m. En la figura 4 se

pueden apreciar la forma de los dos hiperboloides de manera independiente y en conjunto, así como las cuatro familias de rectas que los determinan.

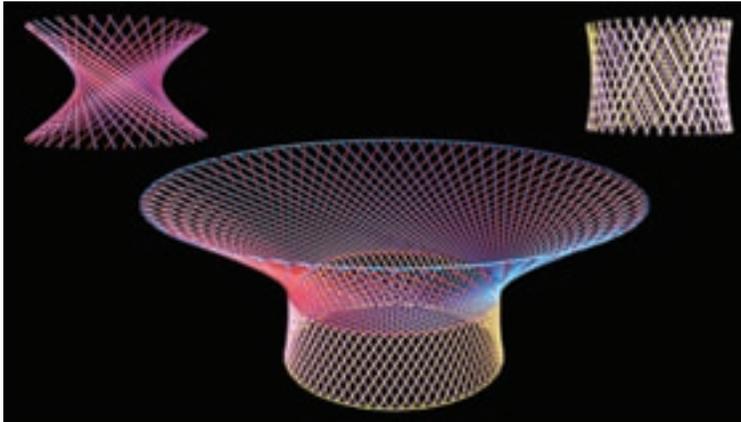


FIG. 4  
Hiperboloides hiperbólicos de la Cuba de Fedala.

### 3.1.1. MODELADO SÓLIDO

Para el estudio por ordenador se utilizaron los programas AutoCAD y 3D Studio Max, cuya combinación permite hacer uso de un tratamiento plano en el primero de mayor precisión y la manipulación de sólidos en el segundo. Así, partiendo de la documentación gráfica disponible de la obra (incluyendo fotografías), el primer proceso consistió en la proyección al ordenador de secciones de las superficies que componen la cuba mediante vectorizaciones, separando éstas en archivos de CAD 2D. Posteriormente se procedió a la clasificación de estas curvas, determinando sus elementos geométricos característicos por el uso de métodos gráficos, obteniéndose del material antiguo la base 2D precisa y necesaria para iniciar el modelado tridimensional.

En la escena (conjunto de elementos geométricos, de iluminación, de visualización y de parámetros de representación) de la Cuba de Fedala encontramos dos clases de sólidos: los objetos torneados y los sollevados, dispuestos de forma matricial polar, (Fig 5).

Los objetos torneados son sólidos de revolución, formados a partir de las curvas planas obtenidas anteriormente. Los dos hiperboloides, las bóvedas tóricas, y la chimenea cilíndrica central de acceso, pertenecen a este grupo, y el programa los interpreta como mallas poligonales cuya densidad de

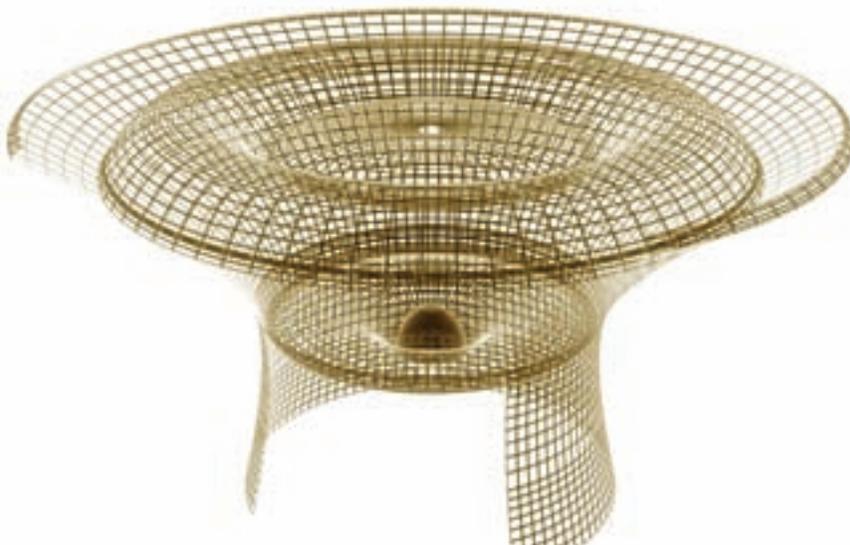


FIG. 5  
Objetos de revolución y objetos solevados.

cuadrícula es un parámetro variable según la distancia de éstas al punto de vista a representar, dotando al modelo de una simplicidad aparente que agiliza las operaciones realizadas al mismo, (Fig. 6).

Estas superficies son denominadas NURBS (Non-Uniform Rational B-Splines), y se caracterizan por estar compuestas de vértices o puntos de control con información (por ejemplo tangentes de entrada y salida a una curva entre dos segmentos de puntos de control) que permiten una aproximación más exacta a las curvas cónicas y a las superficies cuádricas, así como a otras superficies no regladas que necesitan mayor definición.

FIG. 6  
Modelo mallado de las dos superficies hiperbólicas y las tres bóvedas tóricas.



El objeto soleado es la envolvente de generatrices poligonales o curvas, variables o no, dispuestas a lo largo de una curva directriz. A diferencia de los objetos de revolución, las generatrices han de ser cerradas.

Para la Cuba Hiperbólica se modelaron como objetos soleados los soportes de la lámina exterior, los pilares que sostienen la cubierta y el fondo del depósito, y los peldaños de escalera. Para la repetición radial de estos elementos, es creada una matriz polar que los copia y reorienta con un incremento angular y en el caso de la escalera, también vertical.

Los objetos adquieren la apariencia real mediante la asignación de materiales. Éstos se componen de una serie de parámetros superficiales y texturas, o imágenes (por ejemplo fotografías de superficies reales) que se adhieren a los objetos como una piel. Es un proceso importante elegir correctamente los materiales y adecuarlos a la geometría del sólido en cuestión, (Figs. 7 y 8).

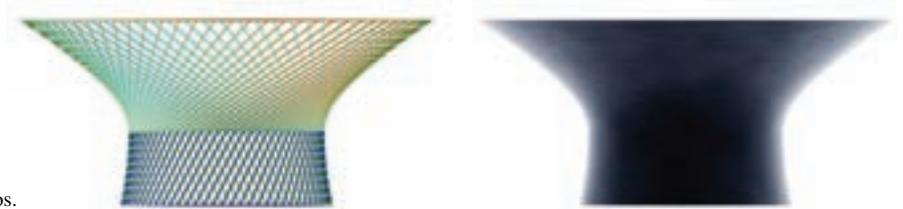


FIG. 7

Comparación modelo alámbrico de generatrices y directrices y envolvente de los haces alabeados.



FIG. 8

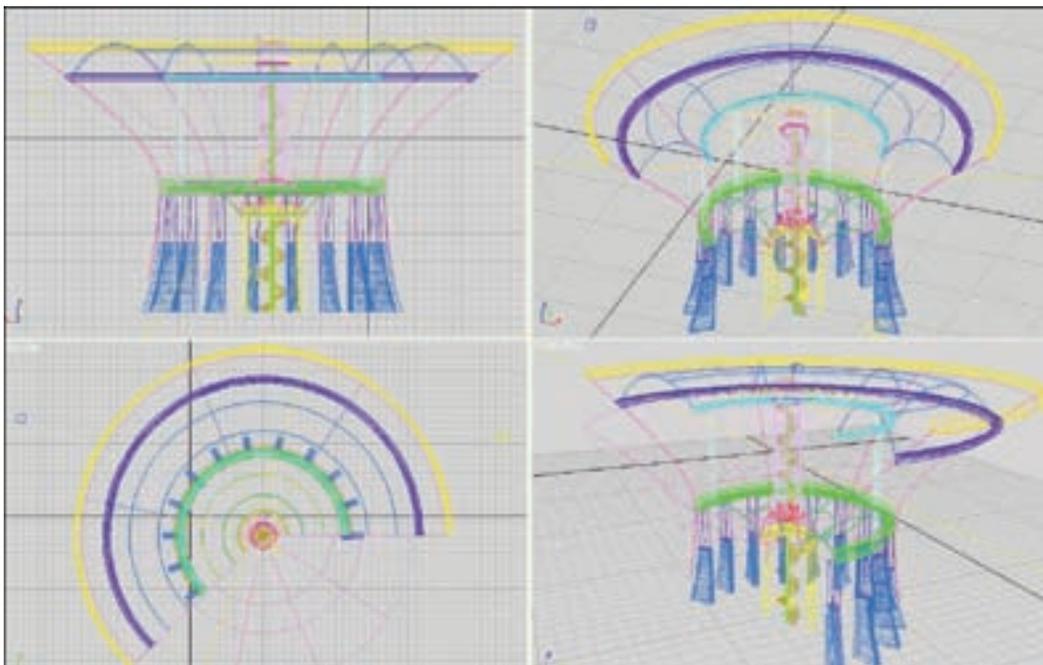
Representación de los haces alabeados de generatrices y directrices, superpuestos a sus envolventes, aplicados ya sus materiales

Se determinan sombras de «Ray Trace», o sombras lineales mediante intersecciones de los rayos luminosos con las superficies definidas. Para ello existen luces de tipo radial, focal, y direccional, y en la representación se tiene en cuenta los colores bases y la geometría de los objetos, absorbiendo y reflejando la luz éstos de forma realista. De este modo, ha de entenderse que una correcta iluminación es imprescindible para resaltar una parte de la obra, para dar una sensación de realidad, y para conseguir integrar los objetos en un entorno.

El programa 3D Studio Max trabaja con dos tipos de proyecciones: cilíndrica ortogonal y cónica, distinguiéndose dentro de esta última, dos clases: Perspectiva y Cámara. Para obtener los puntos de vista deseados, hemos trabajado normalmente con cámaras, definiendo punto de vista y plano del cuadro. La ventaja de este sistema es notable en el estudio realizado para la animación, pues es sencillo asignar trayectorias de desplazamiento a ambos parámetros (Fig. 9).

El último proceso, en este tipo de proyectos, es la renderización o representación. Consiste en la aplicación de todos los parámetros de una escena a los objetos contenidos en esta, es decir, la aplicación de texturas, luces y efectos de entorno, consiguiéndose el paso del modelo

FIG. 9  
Diferentes vistas de la escena  
en la interfaz del programa.



sólido a la escena realista. Se pasa de una representación alámbrica con la que se trabaja en el interfaz a la imagen definitiva resultante, (Fig. 10).



FIG. 10

Renderizado del modelo en distintos entornos.

La expresividad de la infografía en movimiento permite plasmar de forma dinámica el proceso seguido para el análisis de la obra y sirve de medio para explicar la generación proyectiva de un hiperboloide, del mismo modo que la puesta en obra de la Cuba Hiperbólica de Fedala. Sólo mediante la animación puede conseguirse el salto de una explicación plana a una tridimensional que represente una superficie en el espacio, y no mediante sus proyecciones.

Se debe destacar la importancia de este campo de la infografía, especialmente la animación por ordenador, en la descripción en ingeniería, pues permite hacer una idea más acertada de los rasgos característicos de una obra al permitir diferentes puntos de vista, (Fig. 11).

FIG. 11

Elementos del modelo desde distintas vistas.



Del mismo modo que se consigue en la explicación geométrica tridimensional del hiperboloide hiperbólico de revolución una exposición complementaria a la convencional, la información proporcionada por el estudio infográfico aporta una visión más clara y es por tanto esencial para entender hoy una obra realizada hace cincuenta años, acercando a nuestros tiempos el trabajo del insigne ingeniero español, (Fig. 12).



FIG. 12

Sección fotorrealista del modelo final del depósito lleno.

### 3.1.2. FOTOGRAMAS DE LA PELÍCULA DE VÍDEO

El resultado del estudio realizado se materializó en una película de video de diez minutos de duración, que se presentó en la exposición que sobre la obra de Torroja se celebró en la E.T.S. de Ingenieros de Caminos de Granada. Algunos fotogramas extraídos de la película, además de los contenidos en las figuras anteriores, se incluyen a continuación.



FIG. 13

Fotogramas de la película de video.

### 3.2. *Cubierta del Hipódromo de la Zarzuela. 1935*

La principal función estructural de las bóvedas diseñadas para la cubierta es que actúen como ménsulas de sección curva. Para que alcancen la necesaria resistencia es conveniente que su relación canto/ancho sea máxima sobre los soportes principales y decrezca hacia los bordes libres. De los muchos tipos básicos posibles la superficie resultante podría haber sido un conoide, pero no resultaba una solución muy atractiva. Parecía preferible buscar otra superficie de doble curvatura y ninguna parecía tan adaptable como el hiperboloide hiperbólico.

Por tanto, las bóvedas tomaron la forma de sectores de hiperboloide, con un vuelo de 12'80 m. Encima de los soportes, la flecha de la sección transversal en arco es de 1'40 m y el radio de curvatura de 2'75m, mientras que en el extremo del voladizo la flecha tiene 50 cm y el radio de curvatura 6'70m. El espesor de la bóveda varía entre 5 cm en el borde libre y 14 cm en la clave del arco, sobre la línea de soportes. Con estas proporciones se acusa perfectamente la sensación de ligereza conseguida, (Figs. 14 y 15).

La teoría de la elasticidad no había desarrollado en aquella época procesos matemáticos adecuados para el análisis de esfuerzos en

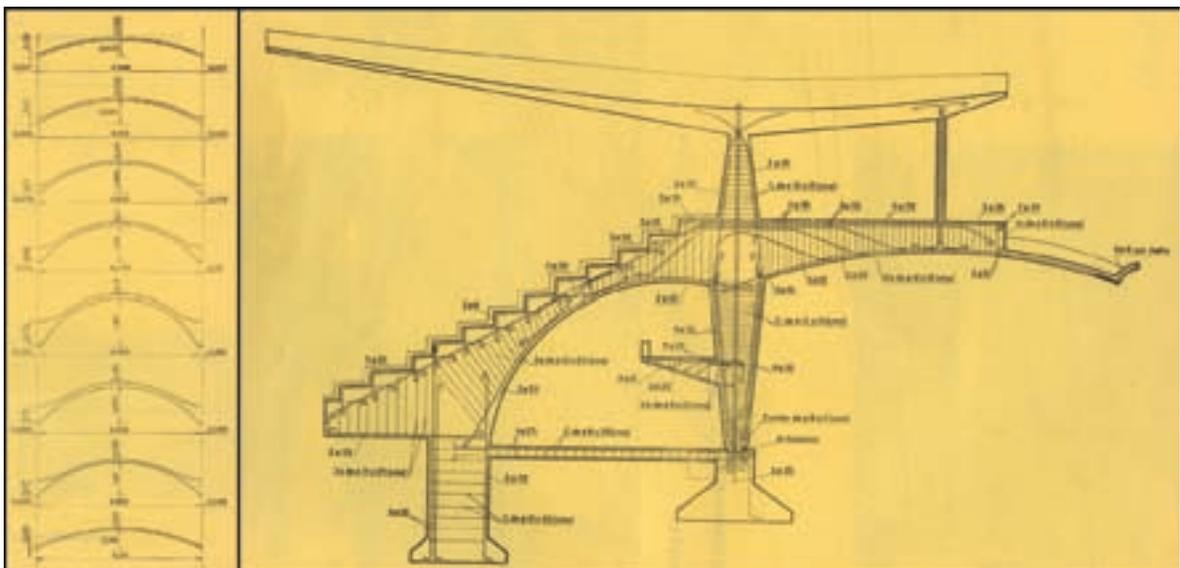


FIG. 14  
Vistas libres de la cubierta.

estructuras de este tipo (elementos finitos), por lo que Torroja decidió que lo más aconsejable era construir un modelo a escala natural, que sirviese también para fines experimentales. Al realizar los ensayos, el modelo acusó una resistencia triple de la necesaria para cumplir las condiciones normales de carga, incluyendo su propio peso y la sobrecarga de nieve.

Como ejemplo de su resistencia cabe mencionar que estas tribunas estuvieron durante varios meses cerca del frente de batalla en la guerra civil, sufriendo varios bombardeos. Como consecuencia, la cubierta fue alcanzada y perforada 26 veces, apareciendo numerosas fisuras a causa de las explosiones y vibraciones. A pesar de todo ello, la lámina resistió

FIG. 15  
Secciones transversales de la cubierta y de los pórticos.



perfectamente los daños. Todavía se encuentra en buen estado, pues al concluir la contienda fue sometida a la correspondiente reparación.

### 3.3. *Frontón Recoletos. 1935*

La cubierta estaba formada por dos sectores circulares cilíndricos unidos por una línea común, generatriz, paralela a los ejes. El radio del lóbulo cilíndrico de mayor tamaño era de 12'20 metros y de 6'40 metros el menor. La intersección de las dos superficies se producía ortogonalmente. Tenían 8 cm de espesor, excepto en las cercanías de la intersección de los dos lóbulos, donde aumentaba a 16 cm, (Fig. 16).

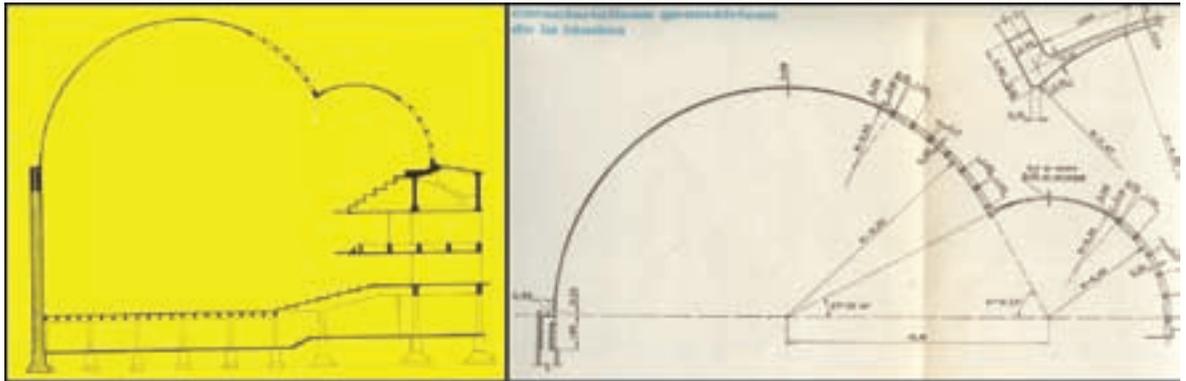


FIG. 16

Secciones transversales de la estructura y de la cubierta.

La luz transversal salvada por la lámina era de 32'50 metros y la dimensión longitudinal de la misma, en dirección de las generatrices, de 55 metros. En la zona de los lucernarios, la lámina se sustituye por una estructura triangular con el mismo perfil cilíndrico que el resto de los lóbulos. Estos triángulos, equiláteros, tenían lados de 1'40 metros, formados por piezas longitudinales de hormigón de 15 por 30 cm de sección, (Fig. 17).

La construcción del frontón se finalizó pocos meses antes del estallido de la guerra civil. En el curso de la contienda recibió diversos impactos directos, algunos de los cuales abrieron orificios de incluso varios metros cuadrados en la cubierta. Además de estos daños, los bombardeos aéreos debieron someter la estructura a fuertes vibraciones. Como consecuencia de ello, la generatriz de intersección de los dos lóbulos sufrió un corrimiento lateral de unos 60 cm, y la generatriz clave del lóbulo mayor se agrietó completamente, entrando en colapso la estructura.



FIG. 17

Vistas exterior e interior de la cubierta bicilíndrica.

#### 3.4. *Mercado de Algeciras. 1933*

Esta estructura consta de una cúpula esférica rebajada que apoya sobre ocho soportes periféricos. El diámetro de la cúpula es de 47'80 metros y su radio de curvatura de 44'10 metros. El perímetro externo del casquete esférico está seccionado en cada lado del octógono de la planta por bóvedas cilíndricas que apoyan en cada dos soportes adyacentes. Las superficies cilíndricas se prolongan hacia el exterior en voladizo, (Fig. 18).



FIG. 18

Vistas exteriores de la cubierta esférica.

El espesor de la lámina es de 9 cm, aumentando gradualmente hasta valores de 50 cm cerca de los soportes. El mercado posee un lucernario central dentro de un anillo de refuerzo. Los vidrios de cerramiento del lucernario van soportados por un sistema triangulado de elementos prefabricados de hormigón armado, (Fig. 19).

#### 3.5. *Viaducto del Aire. Ciudad Universitaria de Madrid. 1933*

El viaducto del Aire, con sus arcos gemelos de 36 metros de luz, constituye un claro ejemplo de las posibilidades técnicas y plásticas que ofrece el empleo de elementos longitudinales de gran esbeltez, propios

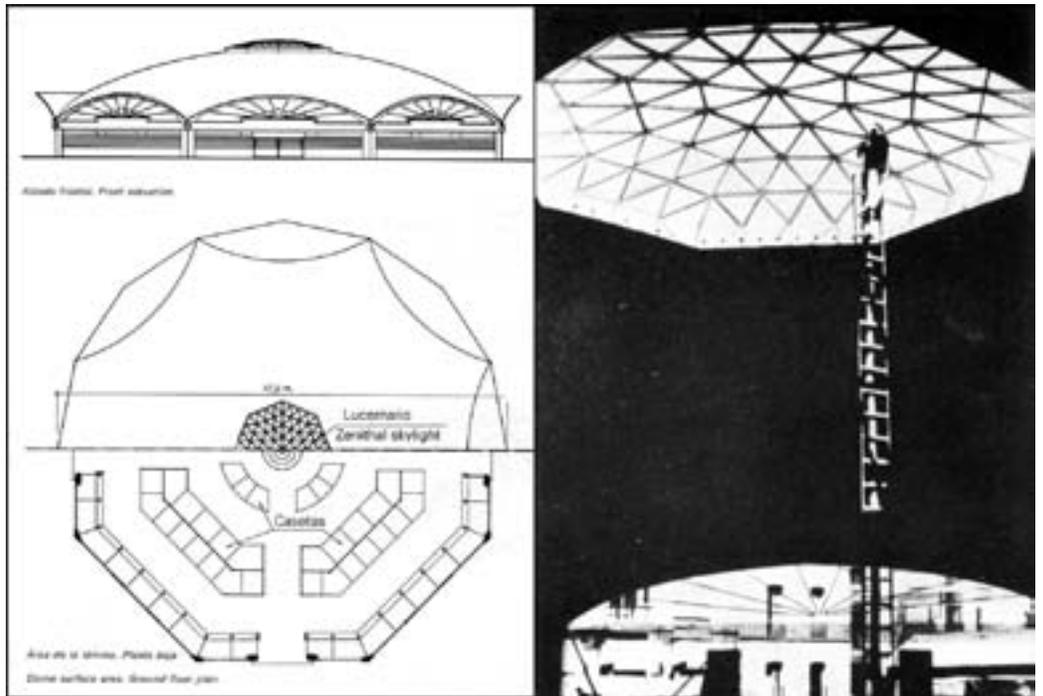


FIG. 19

Alzado, planta y vista interior del lucernario.

de una estética lineal y geométrica (directrices circulares, parabólicas, elípticas e hiperbólicas), (Fig. 20).

Los montantes, dada su gran esbeltez, pueden soportar sin problemas las deformaciones transversales causadas por la dilatación del tablero. Su

FIG. 20

Vista libre del frontal del viaducto.



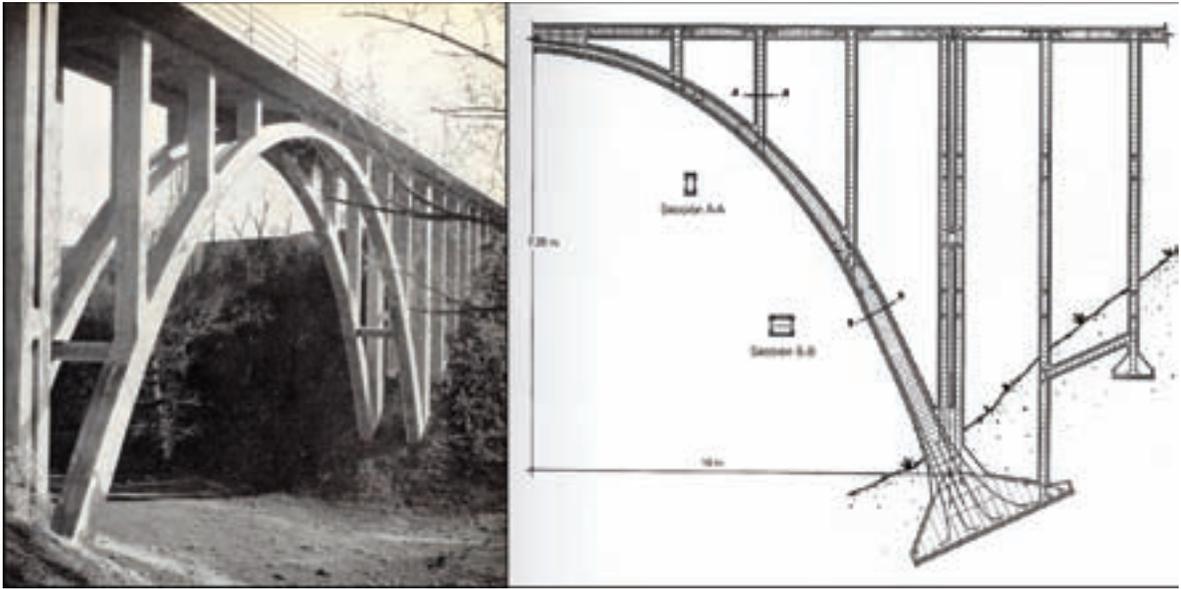


FIG. 21  
Vista libre y sección transversal del alzado.

separación no es constante, sino que va disminuyendo hacia la clave del arco para mejorar el efecto óptico de las proporciones, (Fig. 21).

### 3.6. *El Arco del Viaducto Francisco Martín Gil. 1939*

El trazado de la línea del ferrocarril entre Zamora y La Coruña cruza la zona de embalse que en el río Esla forma la presa de Ricobayo. El arco, de directriz cónica, tiene una luz de 209 metros, una flecha de 64'75 metros sobre el nivel máximo de embalse y una altura en clave de 110 metros sobre el lecho del río. Poseyó el record mundial de luz para arcos de hormigón hasta la década de los sesenta, (Fig. 22).

FIG. 22  
Vistas libres del viaducto.



### 3.7. *Puente del Pedrido. Ría de Betanzos. La Coruña. 1940*

El puente posee trece arcos de hormigón de 32'00 metros de luz cada uno, (Fig. 23). El tramo central es un arco atirantado de hormigón armado, de directriz parabólica, de 75'00 metros de luz entre apoyos y 12'50 metros de flecha. Posee un apoyo fijo articulado y el otro móvil. El tablero inferior está suspendido mediante péndolas espaciadas a 3'65 metros, (Figs. 24 y 25).



FIG. 23  
Vista general del puente.

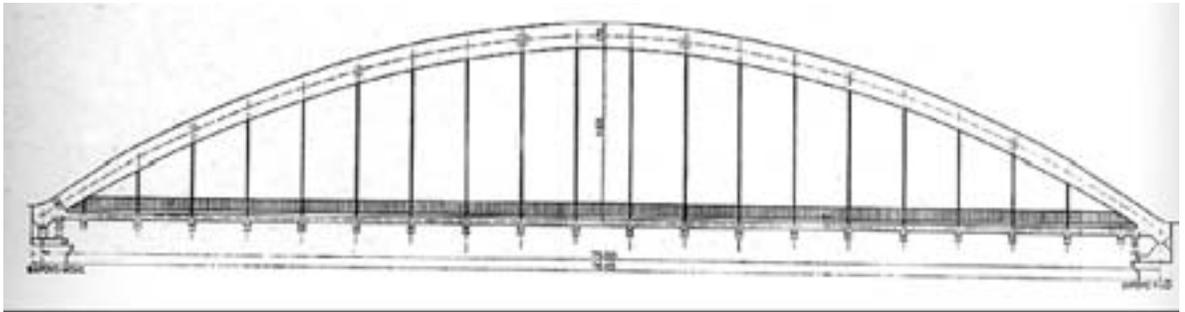


FIG. 24  
Alzado arco superior.

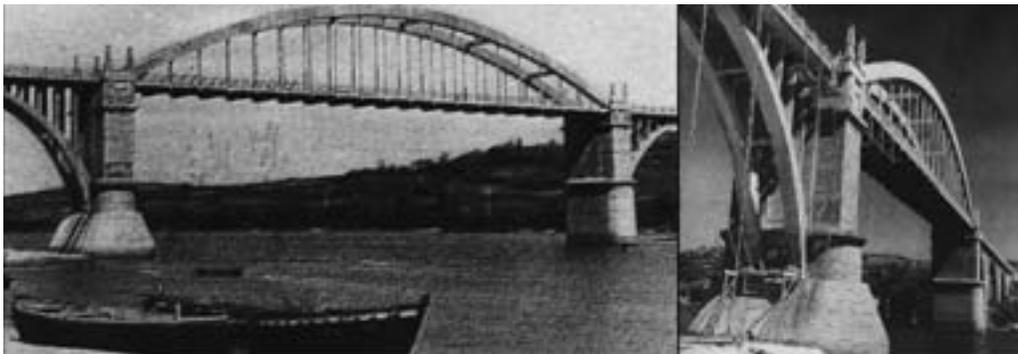


FIG. 25  
Vistas libres del arco superior.

#### **4. Conclusiones**

Los alumnos sienten una especial atracción por las cónicas y superficies al descubrir que tienen una importante aplicación en la ingeniería. Ese interés aumenta cuando estudian la generación proyectiva de determinadas cuádricas, hiperboloides y paraboloides principalmente, y se expone en clase las realizaciones de ingenieros y arquitectos tan significativos como Antonio Gaudí, Eduardo Torroja, Pier Luigi Nervi, Félix Candela, Santiago Calatrava, Norman Foster, etc.

Es a partir de ese momento, una vez que han percibido la representación de esas superficies en dos dimensiones, Sistemas de Representación, y cuando ya poseen un profundo conocimiento geométrico, Métrica y Proyectividad, cuando sienten la «necesidad» de trasladar esos conocimientos adquiridos al ordenador para, a través del correspondiente software, obtener su representación en tres dimensiones.

La expresividad de las tres dimensiones y, sobre todo, de la infografía en movimiento permite plasmar de forma dinámica el proceso seguido en el análisis de la generación proyectiva de una superficie y su representación. Pero, evidentemente, para llegar a este punto es preciso e indispensable poseer la base necesaria que permita desarrollar esas imágenes y comprender lo que transmite.

#### **Bibliografía**

Alarcón, E. *et al.* DE LA CONSTRUCCIÓN A LA CIENCIA. AYER Y HOY DE EDUARDO TORROJA. Academia de Ingeniería. Madrid, 2000, ISBN.: 84-923406-6-5.

Fernández Ordóñez, José Antonio; Navarro Vera, José Ramón. EDUARDO TORROJA, INGENIERO. Madrid, Pronaos S.A., 1999, ISBN.: 84-85941-40-3.

Moran, F. y otros. EDUARDO TORROJA, SU OBRA CIENTÍFICA. Ministerio de Fomento. Madrid, 1999, ISBN.: 84-498-0430-2.

Tarragó, Salvador. LA MODERNIDAD EN LA OBRA DE EDUARDO TORROJA. Colegio de Ingenieros de Caminos, Canales y Puertos. Madrid, Turner, 1979, ISBN: 84-85137-99-X.

Torroja, Eduardo. LAS ESTRUCTURAS DE EDUARDO TORRIJA. Madrid, 1958-1.º, 1999-2.º; Ministerio de Fomento, ISBN.: 84-498-0430-2.

«Informes de la construcción». REVISTA DE INFORMACIÓN TÉCNICA. Año XIV, enero-febrero 1962. Instituto Eduardo Torroja de la Construcción y del Cemento. Madrid.

## ***Referencias bibliográficas***

[1] Fernández Ordoñez, José Antonio. LA MODERNIDAD EN LA OBRA DE EDUARDO TORROJA. Madrid, Colegio de Ingenieros de Caminos, Canales y Puertos, 1979, ISBN 84-85137-99-X.

[2] Torroja Miret, Eduardo. RAZÓN Y SER DE LOS TIPOS ESTRUCTURALES. Madrid, Consejo Superior de Investigaciones Científicas, 1998, ISBN 84-00-07749-0.