



## XVI CONGRESO INTERNACIONAL DE INGENIERÍA GRÁFICA



### ANÁLISIS GRÁFICO DE OBRAS EMBLEMÁTICAS DE FÉLIX CANDELA

ANDRÉS MARTÍN, Francisco Ramón (1); FADÓN SALAZAR, Fernando (2)

<sup>(1)</sup>Universidad de Cantabria, España  
Escuela Técnica Superior de Ingenieros de Caminos, Canales y Puertos  
Correo electrónico:frco\_ramon@hotmail.com

<sup>(2)</sup>Universidad de Cantabria, España  
Departamento de Ingeniería Geográfica y Técnicas de Expresión Gráfica  
Correo electrónico:fernando.fadon@unican.es

#### RESUMEN

Félix Candela es considerado el gran maestro de las cubiertas o cascarones de hormigón armado. La complejidad matemática de estas estructuras laminares contrasta con la belleza y sencillez de sus formas, su economía, gran resistencia y ligereza con pequeños espesores.

La vocación científica del arquitecto Félix Candela se puso de manifiesto en su dominio de la geometría descriptiva y el cálculo de las estructuras de acero y hormigón.

En su obra se pueden apreciar todos los ejemplos de construcciones laminares: en forma de cúpula, cilíndrica, reglada e hiperbólicos o hyper. Aquí se presentan algunas de sus obras emblemáticas en las que se aprecia la riqueza de las formas y el interés gráfico con las tecnologías CAD actuales.

Se trata de realizar un análisis de las líneas metodológicas de algunas de sus obras, en un entorno de trabajo actualizado.

**Palabras clave:** Geometría, Paraboloide hiperbólico, tecnologías CAD. Félix Candela, Estructuras laminares

#### ABSTRACT

Félix Candela is considered the big master of reinforced concrete shells. The mathematical complexity of these structures contrast with the beauty and simplicity of their shapes, their economy, high strength and lightness with small thickness.

The scientific vocation of Félix Candela made clear in his control of the descriptive geometry and the calculation of steel and concrete structures.

His work has all the examples of shell constructions with several shapes. Here are presented some of his best works in which it is possible to estimate the richness of his shapes, and the application of CAD technologies.

**Key words:** Geometry, Hypar, CAD technologies, Félix Candela, Shell structures.

## 1. Introducción

Si no el inventor, Félix Candela es considerado el gran maestro de las cubiertas o cascarones de hormigón armado. La complejidad matemática de estas estructuras laminares contrasta con la belleza y sencillez de sus formas, su economía y gran resistencia y ligereza con espesores muy reducidos. En su obra podemos apreciar todos los ejemplares de construcciones laminares: en forma de cúpula, cilíndrica, reglada e hiperbólicos o hyper.

La vocación científica de Candela se puso de manifiesto en su dominio de la geometría descriptiva y el cálculo de estructuras de acero y hormigón. Ambas facetas, unidas a una gran intuición y un fuerte espíritu innovador hicieron posible el estilo característico de sus construcciones.

Una de los fundamentos de sus obras es, como se ha comentado, la geometría y es por ello por lo que se plantea este trabajo ya que mediante ideas sencillas se pueden construir estructuras muy eficaces con costes de construcción de reducidos.

### Reseña biográfica.

A Félix Candela le tocó vivir años difíciles. Como realza Aroca en sus escritos: “la Guerra Civil le obligó a exiliarse a México sin tiempo para recoger su título de arquitecto –que luego le costaría años convalidar y más aún consolidar-, por lo que se encontró en un país lejano sin más armas que su propia capacidad y conocimientos reales, sin la protección administrativa que proporciona una carrera con independencia del aprovechamiento obtenido” [8].

Nació en Madrid el 27 de enero de 1910, y después de una infancia risueña y despreocupada estudió sin sosiego. Se cuenta que no sintió una vocación tan definida como la que narran haber sentido otros arquitectos o ingenieros famosos, urgidos desde pequeños por el ansia de construir. Él escogió la carrera de arquitectura más bien por casualidad, o por consejo de algún amigo, porque ni siquiera era buen dibujante. Eso sí, lo suyo eran las matemáticas y, sobre todo, la geometría. “Más tarde –anota uno de sus biógrafos- comprendió que su verdadera vocación bien pudo haber sido la ingeniería estructural.” [1]

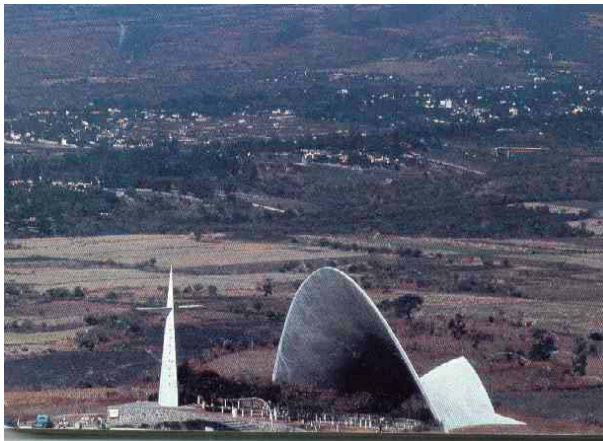
De acuerdo con otros comentaristas “Candela heredó de su maestro Eduardo Torroja algunos de los fundamentos de su obra: la idea de que el ingeniero ha de ser un poeta, la convicción de que la estructura depende de la forma más que del material empleado, y la línea de investigación sobre cubiertas ligeras de hormigón armado” [1].

## Obras características.

Fue en México donde Candela ha dejado una obra de singular originalidad que le ha valido el reconocimiento mundial y donde pudo desarrollar sus teorías de las estructuras y aplicarlas en la creación de cubiertas laminares para grandes espacios arquitectónicos.

Félix Candela ha creado estructuras tan extraordinarias como la capilla abierta de Cuernavaca, el restaurante Los Manantiales de Xochimilco y el Pabellón de Rayos Cósmicos en la Ciudad Universitaria de México, el Palacio de los Deportes y la Iglesia de la Medalla de la Virgen Milagrosa.

El Pabellón de Rayos Cósmicos, de 1951, fue el cuarto cascarón construido por Cubiertas Ala (su empresa), y el primero en que se utilizaba el hyperboloides de una sola hoja para dar mayor rigidez a una bóveda casi cilíndrica de tan escaso espesor. Fue esta estructura la primera que dio gran prestigio a Candela, tanto por la gracia de su sencillez formal, como por el alarde técnico que suponía su extrema delgadez. El espesor de este cascarón oscila entre 1,5 y 2 cm, requisito funcional para dejar pasar a través de él los rayos cósmicos que se registraban en el interior.



*Figura 1: Capilla de Lomas de Cuernavaca.*

En el cascarón de la capilla abierta de Lomas de Cuernavaca podemos encontrar el ejemplo de los tres tipos de corte que se pueden dar en la superficie del hyperboloides, en este caso equilátero (parábola, hipérbola y casi rectos –degeneraciones de la otra parábola). Esta capilla se construyó con una simple hoja de hyperboloides que se abre al frente con una luz de 30 m y una altura de 21 m, y cubre a parte de los asistentes que se acomodan bajo ella o entre los árboles cercanos.

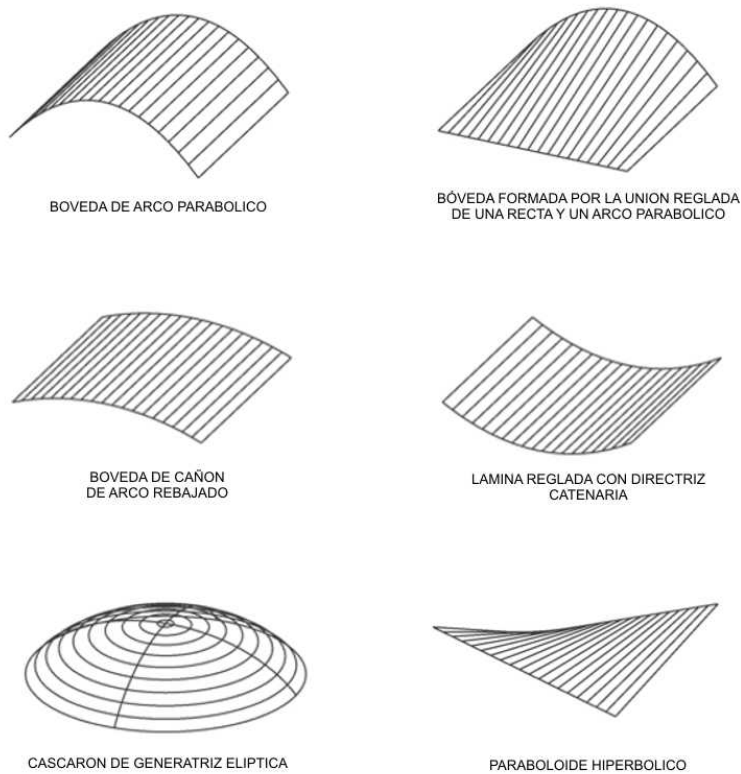
Más adelante, en esta presentación, se pretende realizar una somera incursión en una de las obras con las que el autor se sintió más satisfecho, el restaurante de Los Manantiales, y conocer con un poco más de detalle las pautas que fundamentaron su obra.

## 2. Elementos de geometría básicos en la edificación de Félix Candela

### Evolución de sus obras

Junto con estudios y proyectos para losas plegadas de hormigón, las primeras láminas con las que se experimenta son bóvedas antifuniculares, sin acero de refuerzo y con la aplicación de encofrados de tela de saco.

El primer “cascaron” que construye con su empresa Cubiertas Ala es en forma de conoide (de antecedentes franceses), con una luz de 14 m y un espesor de 3 cm.



*Figura 2: Diferentes superficies empleadas.*

Pronto se experimentan las bóvedas cilíndricas largas, con luces de unos 12 m, llegando a prescindir de las vigas de borde. Calculándolas como vigas huecas de sección cilíndrica se construyen también cubiertas de diente de sierra, utilizando estas bóvedas cilíndricas largas.

Al aumentar el vano cubierto por las bóvedas, éstas han de acortarse para evitar flexiones transversales. Aparecen así las bóvedas cilíndricas cortas. Éstas necesitan vigas de borde y tirantes que contrarresten los empujes laterales.

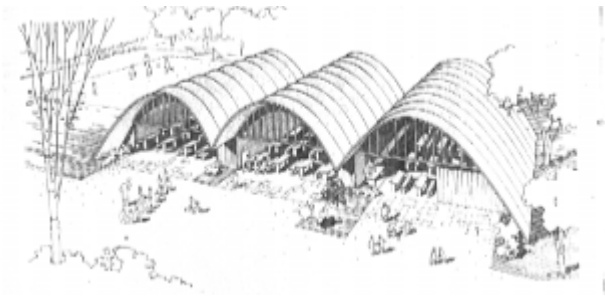


Figura 3: Ejemplo de bóvedas antifuniculares.

*Se construyen pocas cúpulas, pues el encofrado de las superficies sinclásticas es engorroso y complicado, a menos que sean muy planas.*

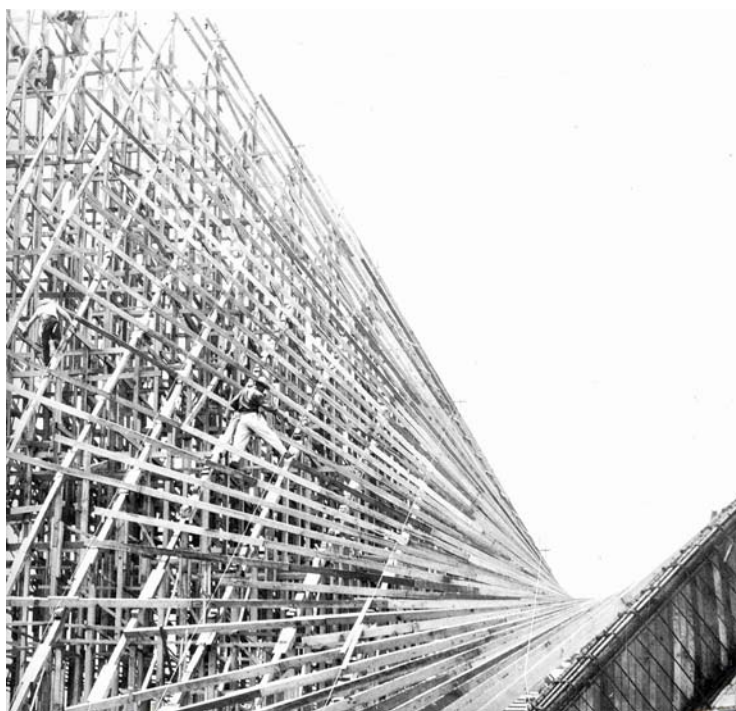
### **El paraboloides hiperbólico o hyper.**

Candela desarrolla diferentes disposiciones y combinaciones de varios hyper. Cabe destacar las bóvedas por arista. El ejemplo más sencillo de este tipo de estructuras es una bóveda creada por la intersección de dos segmentos de hyper en forma de silla de montar. Su encofrado es más simple que el de una bóveda formada por intersección de cilindros, por tener dos sistemas de generatrices rectas. Además, al estar constituida por superficies no desarrollables, es mucho más rígida y permite construirla con espesores menores.

El paraboloides hiperbólico, o hyper, contiene dos sistemas de generatrices rectas. Cada sistema es paralelo a un plano director y ambos planos, cuya intersección define la dirección del eje Z, forman un ángulo arbitrario W. La superficie es de doble curvatura anticlástica, es decir, las dos curvaturas principales tienen su concavidad en direcciones opuestas, en oposición a las superficies sinclásticas o cupuliformes, en que las curvaturas principales van en la misma dirección. El ángulo W puede tener cualquier valor. Cuando es recto, el paraboloides se llama equilátero y los dos sistemas de parábolas principales tienen la misma curvatura. Cuando W no es recto, las parábolas contenidas en los cuadrantes agudos son más planas que las contenidas en cuadrantes obtusos. Las secciones planas paralelas al eje Z son parábolas o su degeneración en líneas rectas. Todas las demás secciones planas son hipérbolas o su degeneración en dos rectas que definen los planos tangentes (osculadores) a la superficie.

Tomando como ejes de coordenadas las dos generatrices que pasan por el centro del hyper y el eje Z, perpendicular a ellas (en lugar de los ejes reales del hyper, que son las bisectrices del ángulo W), la ecuación de la superficie,  $z = K \cdot x \cdot y$ , es la ecuación de segundo grado más simple posible, lo que facilita en grado sumo el

cálculo de tensiones o esfuerzos de membrana. El hecho de tratarse de una superficie doblemente reglada facilita la construcción del encofrado, que requiere únicamente piezas rectas y consigue, sin embargo, una forma no desarrollable o de doble curvatura.



*Figura 4: Encofrado con listones rectos en una hyper.*

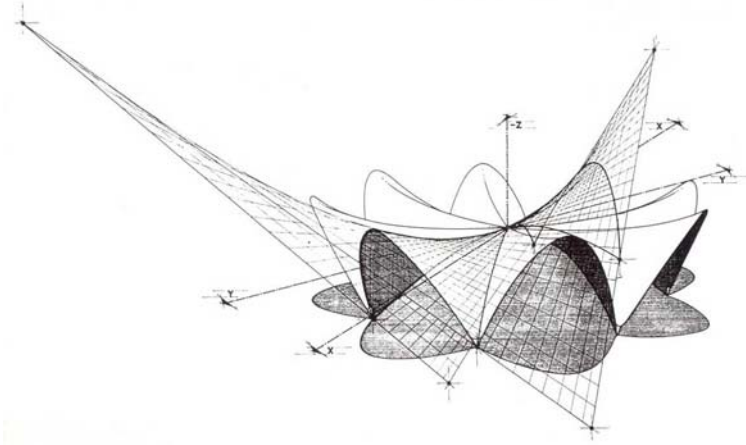
### **3. Restaurante de Los Manantiales**

Quizá la más famosa de las bóvedas por arista con hypars sea el cascarón del restaurante Los Manantiales, en Xochimilco, de planta octogonal, formada por la intersección de cuatro hypars. Esta es la estructura que Candela considera como su trabajo más significativo.

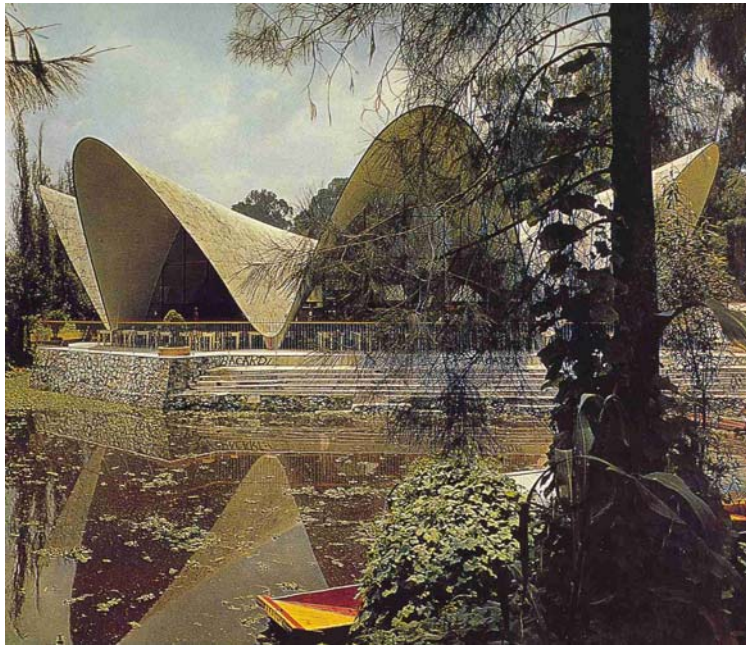
La estructura de Xochimilco es una bóveda por arista octogonal, compuesta por la intersección de cuatro hypars. Diseñado para reemplazar a un restaurante destruido por el fuego, se levanta en un pequeño promontorio en los jardines flotantes, rodeado por canales en los que brillan las chalupas adornadas con flores.

Se encuentra situado al sur de la ciudad de México, en el Distrito Federal de Xochimilco, y fue construido en 1958.

El cascarón presenta un diámetro máximo de 42,7 m con los apoyos inscritos en un cuadrado de 30 m de lado. La altura en el centro de la construcción es de 5,8396 m mientras que en los puntos más altos alcanza los 9,9332 m.



*Figura 5: Hypars en el restaurante Los Manantiales.*

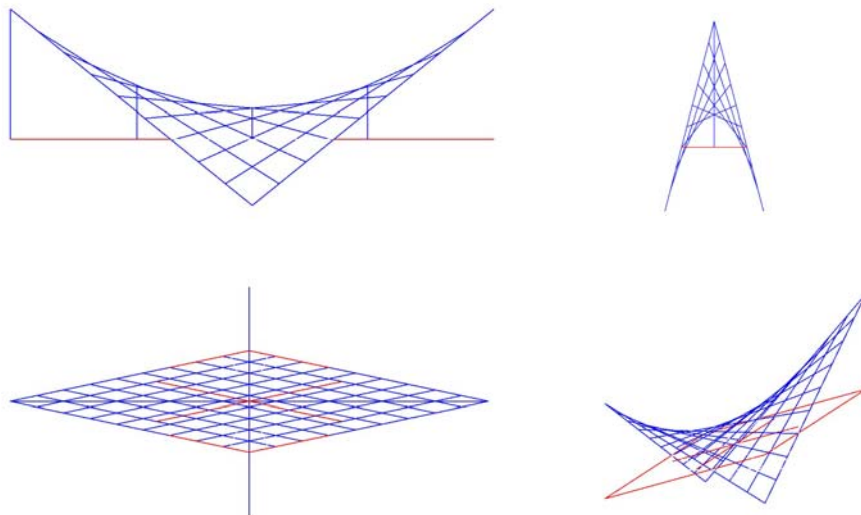


*Figura 6: Imagen del restaurante Los Manantiales.*

#### **4. Modelado**

Como aplicación de la geometría digital se ha modelado la cubierta del restaurante de “Los Manantiales”.

Para ello se ha empleado el programa informático Micro-Station.



*Figura 7: Proceso de obtención de la geometría.*

Como punto de partida para la obtención de la geometría se han empleado: el lado del cuadrado en que se inscriben los apoyos, que es de 30 m; la altura del cascarón en el centro: 5,8336 m; la altura en los extremos superiores de los arcos exteriores: 9,9332 m; y, finalmente, el ángulo entre los dos ejes principales de cada paraboloides hiperbólico.

Para el modelado del hyper mediante ordenador es necesario obtener las cuatro rectas extremas que lo encierran. Deben pasar por los puntos de apoyo y además en planta son paralelas a los ejes principales de la superficie. Falta un único dato para definir las completamente en el espacio que se obtiene a partir de las alturas que se han aportado como dato. Su cálculo se realiza apoyándose en la propiedad del paraboloides según la cual todas sus intersecciones según planos verticales son parábolas. En este caso se conocen dos puntos de la parábola, siendo uno de ellos el vértice, con lo que al conocer la situación en planta de uno de los extremos de las rectas buscadas se puede obtener su altura.

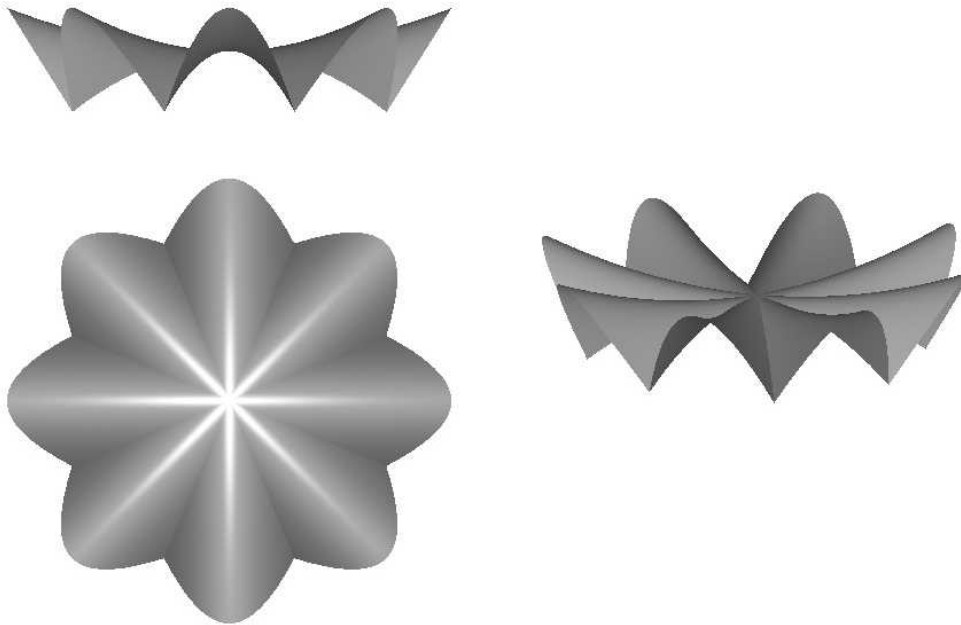
Posteriormente se genera un hyper como una superficie reglada inscrita en las cuatro rectas anteriores.

El caso de la cubierta de Los Manantiales está formada por cuatro de estas superficies entrelazadas. Por ello es necesario cortar el hyper obtenido por varios planos: dos verticales en las zonas donde se unirá posteriormente con los paraboloides adyacentes y otro plano inclinado que definirá el arco exterior y que se define mediante los dos puntos de apoyo y el punto que constituye la clave del arco, que es uno de los datos.



De este modo ya se ha obtenido un módulo de los ocho con los que está formada la cubierta completa. El resto se obtienen a partir de él generados como una matriz polar.

Finalmente se renderiza para aportarle un aspecto similar al que tiene en la realidad.



*Figura 8: Modelo de la cubierta del restaurante “Los Manantiales” con Micro-Station.*

El modelado con ordenador de estas superficies puede ser empleado posteriormente para diversas tareas. Se puede realizar un análisis estructural mediante el método de los elementos finitos o se puede dimensionar el encofrado necesario para su construcción.

## **5. Conclusiones**

A lo largo de este trabajo se ha podido apreciar la importancia que tiene la geometría en algunos elementos resistentes de la arquitectura y, por lo tanto, las ventajas que puede aportar la aplicación de herramientas gráficas digitales. De este modo se aprecia lo útil que puede resultar conjugar diversas disciplinas como son la arquitectura, la ingeniería mecánica y la ingeniería gráfica.

## 6. Referencias

[1] SEGUÍ BUENAVENTURA, Miguel. *Félix Candela. Arquitecto*. Ministerio de Obras Públicas, Transportes y Medio Ambiente, 1994.

[2] CANDELA, Félix. *En defensa del formalismo y otros escritos*. Xarait Ediciones, 1985.

[3] FABER, Colin. *Las estructuras de Candela*. Compañía Editorial Continental, S. A., 1970.

[4] SAITO, Yutaka. *Félix Candela*. TOTO shuppan, 1995.

[5] [www.felixcandela.com](http://www.felixcandela.com).

[6] [www.geocities.com/SoHo/Gallery/1608/arqframe.html](http://www.geocities.com/SoHo/Gallery/1608/arqframe.html)

[7] [www.soloarquitectura.com/arquitectos/candelaouterinofelix.html](http://www.soloarquitectura.com/arquitectos/candelaouterinofelix.html)

[8] [maria.aq.upm.es/of/epa/alumnos2002/trabajos/epa95/F%C9LIX%20CANDEL A2.doc](http://maria.aq.upm.es/of/epa/alumnos2002/trabajos/epa95/F%C9LIX%20CANDEL A2.doc)

[9] [www.imcyc.com/cyt/diciembre03/luz.htm](http://www.imcyc.com/cyt/diciembre03/luz.htm)