



**UNIVERSIDAD POLITÉCNICA DE MADRID**  
TIPOLOGÍA ESTRUCTURAL

Profesor:  
**UGO CORRES**

Estudiantes:  
**CLAUDIA LA TERRA**  
**STEFANIA MIRAVALLE**

# **IGLESIA NUESTRA SEÑORA DE GUADALUPE | MADRID, 1962-1963**

Ingenieros:  
**FÉLIX CANDELA**  
**JOSÉ ANTONIO TORROJAS**

Arquitectos:  
**ENRIQUE DE LA MORA**  
**JOSÉ RAMÓN AZPIAZU**

---

2009 – 2010



## Indice

<b>Félix Candela (1910-1997) .....</b>	<b>1</b>
Biografía .....	1
Candela: arquitecto, constructor, ingeniero y artista .....	2
Félix Candela y el Paraboloide Hiperbólico: forma estructural y forma visual.....	3
<b>Calculo de membranas .....</b>	<b>5</b>
Generalidades .....	5
Láminas y membranas.....	5
Membranas en paraboloides hiperbólicos .....	8
<b>Iglesia de Nuestra Señora de Guadalupe .....</b>	<b>10</b>
Características constructivas.....	10
El material .....	12
Encofrados y desencofrado.....	12
Antecedentes del proyecto de reacondicionamiento de la cubierta .....	13
Generalidad .....	13
Calefacción y ventilación.....	14
Estado de la estructura .....	14
<b>Estudio técnico de las láminas de Candela.....</b>	<b>16</b>
Los modelos de Candela para el cálculo estructural de paraboloides hiperbólicos....	16
Modelo de Elementos Finitos y factor de membrana.....	17
Iglesia de Nuestra Señora de Guadalupe .....	18
<b>Anejos .....</b>	<b>20</b>
<b>Bibliografía.....</b>	<b>23</b>



## Félix Candela (1910-1997)

### BIOGRAFÍA

Félix Candela Outeriño nació el 27 de enero de 1910 en Madrid. En el año 1927 ingresó en la Escuela Técnica Superior de Arquitectura de Madrid, licenciándose en el año 1935. Desde un principio gran admirador de Eduardo Torroja, demostró un especial interés por conocer las estructuras laminares de hormigón armado.

En 1936, como premio a su tesis doctoral titulada *“La influencia de las nuevas tendencias en las técnicas del hormigón armado sobre las Formas Arquitectónicas”*, se le concedió una beca, solicitada a la Real Academia Española, para ampliar sus estudios sobre estructuras laminares con Dischinger y Frinsterwalder en Alemania.

El inicio de la Guerra Civil española (1936-1939) le impidió poder realizar su viaje a Alemania. Formó parte del Ejército Popular Republicano como capitán de ingenieros. Posteriormente fue obligado a exiliarse a México, sin tiempo para recoger su título de arquitecto – que luego le constaría años convalidar, y aún más consolidar – por lo que se encontró en un país lejano, sin más armas que su propia capacidad y sus conocimientos reales. Se casó con Eladia Martín y adquirió la ciudadanía mexicana en el año 1941.

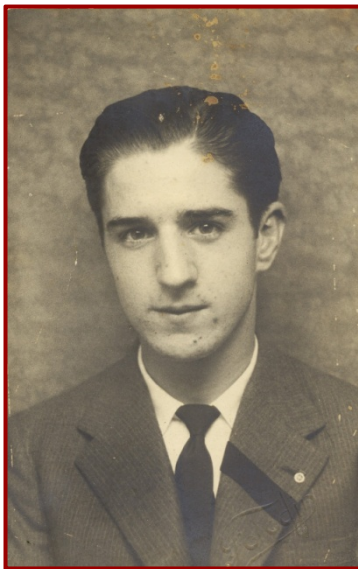


Fig. 1 – Félix Candela 1933.

En el año 1950 fundó en México la empresa “Cubiertas Ala” con su hermano Antonio Candela y los arquitectos Fernando Fernández Rangel y Raúl Fernández Rangel, pero tres años después, en 1953, los hermanos Fernández Rangel abandonaron Cubiertas Ala, que quedó a cargo de Félix Candela y su hermano Antonio. En este mismo año Félix Candela recibió una cátedra en la Facultad de Arquitectura de la Universidad Nacional Autónoma de México (UNAM), e intensificó sus relaciones con Eduardo Torroja, catedrático en aquellos momentos de la Escuela Técnica Superior de Ingenieros de Caminos, Canales y Puertos de la Universidad Politécnica de Madrid (España), así como con el Instituto Técnico de la Construcción y del Cemento (ITCC), que fundado y dirigido por Torroja (1934-1961), estaba protagonizando a nivel internacional, gran parte de los avances que paulatinamente se iban alcanzando sobre

la utilización del hormigón armado y pretensado en la construcción civil y arquitectónica.

Félix Candela dirigió “Cubiertas Ala” desde su fundación en el año 1950 hasta el año 1969, momento en el cual se hizo cargo su hermano Antonio, quien la dirigió hasta su cierre en el año 1976. En total se realizaron más de 1.400 proyectos de los que se construyeron un total de casi 900. En este periodo Félix Candela se convirtió en el más prolífero proyectista y constructor de cubiertas laminares de hormigón armado.

## CANDELA: ARQUITECTO, CONSTRUCTOR, INGENIERO Y ARTISTA

Candela fue un arquitecto atípico. Su obra más relevante fue realizada como constructor de cubiertas laminares en “Cubierta Ala” en la cual promovía, diseñaba, calculaba y se comprometía económicamente con sus propias creaciones. Su obra y sus propuestas estuvieron guiadas por requisitos funcionales y económicos, siempre con una base sólida de mecánica estructural.

*«Debo aclarar en primer lugar que, aunque soy arquitecto por educación, mi actividad profesional es la de constructor o contratista de obras, y por lo tanto mis preocupaciones sobresalientes son, por lo general, de tipo económico».*

[F. CANDELA, Encuesta en la revista *Espacios*, México, 1953].

El poder calcular la estructura y comprobar que era segura, constituía un requisito indispensable antes de comenzar su construcción; y, además, el cálculo no podía consumir un porcentaje importante de los recursos económicos de que disponía. Con la sólida formación matemática y científica, planteó la construcción de estructuras laminares, como solución práctica y económica para cubrir diversos espacios. Mientras otros se planteaban cómo comprender el funcionamiento de estructuras que estaban en los límites de la capacidad real de análisis del momento, él las realizaba explorando las posibilidades constructivas y las implicaciones de su uso en el diseño. Descubría y resolvía los problemas prácticos, tanto de definición geométrica como de ejecución, analizando de forma suficientemente rigurosa su comportamiento con unos impecables planteamientos mecánicos; empleaba el aparato matemático en la medida precisa pero sin llevar el rigor del análisis más allá de lo necesario para asegurar la correcta definición y la adecuada seguridad<sup>1</sup>.

El exilio en cierto sentido, pese a las penalidades personales, fue una bendición para Candela, que supo convertir la tragedia en oportunidad. De hecho jugaban a su favor factores como:

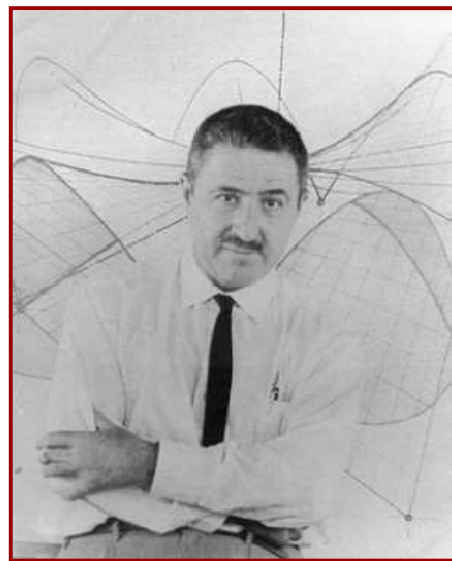
- el bajo coste de la mano de obra, que favorecía las soluciones estructurales con poco acero y hormigón, aunque requirieran encofrados complejos.
- la inexistencia de normativa, lo que dejaba amplio campo a la audacia que le permitía comprobar en modelos a tamaño real cuestiones tales como que el “paragua” de cuatro paraboloides que aparece en los textos de Flügge como inconstructible (ya que, según demuestra, la membrana no puede soportar el peso de los nervios de borde) era viable, siendo el efecto real perfectamente asumible, si se buscaba una solución de nervios de poco peso.

<sup>1</sup> R. AROCA HERNÁNDEZ-ROS, *Solemne acto académico con motivo de la investidura de doctor “honoris causa” del prof. Dr. D. Félix Candela Outeriño*, Universidad Politécnica de Madrid, 1994.

- la bondad del clima, que permitía obviar el aislamiento térmico y la impermeabilización, factores ambos que impiden explotar la rotunda expresión interior y exterior de la lámina de hormigón<sup>2</sup>.

Al igual que Eduardo Torroja en España, Pier Luigi Nervi en Italia, o Antón Tedesco en Estados Unidos de América, Félix Candela adecuó, en México, la forma resistente y las características del material de sus estructuras laminares, a la disponibilidad de medios materiales y humanos de la específica zona donde iban a ser construidas. Uno de los objetivos fundamentales de todos estos grandes maestros, fue optimizar su construcción y coste. Sin esta específica racionalización del proceso de construcción, que convertía las “estructuras laminares de hormigón armado y/o pretensado”, en una opción barata para cubrir medianas y grandes luces, gran parte del más relevante legado de la Arquitectura Laminar de la Modernidad no hubiera existido nunca.

Pero Félix Candela, al igual que el resto de los grandes maestros de la Arquitectura Laminar, no se limitó a optimizar el proceso constructivo de sus estructuras laminares, sino que, dotado de una especial intuición y sensibilidad creadora, convirtió su obra en un relevante conjunto de innovadoras y audaces superficies ondulantes de aspecto escultórico, cuya esbeltez resistente optimizaba las posibilidades de ese nuevo material adecuoresistente.



### FÉLIX CANDELA Y EL PARABOLOIDE HIPERBÓLICO: FORMA ESTRUCTURAL Y FORMA VISUAL

Félix Candela utilizó para sus estructuras multitud de formas geométricas y estructurales: láminas cilíndricas cortas, largas y de directriz catenaria, conos y conoides, cúpulas esféricas y elípticas, láminas plegadas, etc.; algunas de ellas varias veces repetidas, aunque siempre adaptadas a sus requisitos funcionales. En cada una de éstas, la forma sensible viene muy marcada por la geométrica, aunque ésta no se repita nunca exactamente igual ya que si única es la forma estructural, infinitas son las formas visuales que Candela supo generar<sup>3</sup>.

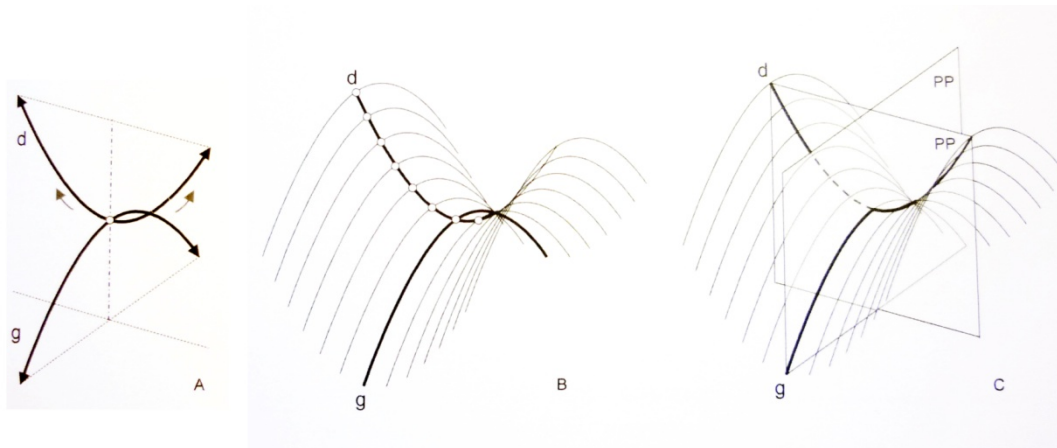
Iba buscando formas eficientes desde diferentes puntos de vista y el paraboloides hiperbólico (*hyper*) apareció a sus ojos como la forma geométrica ideal. Se trata de superficies de doble curvatura negativa, o anticlásticas, lo que confiere a su superficie una gran rigidez estructural, permitiéndola transferir cargas normales a su superficie mediante esfuerzos tangentes a ella misma, trabajando en estados de membrana o de

<sup>2</sup> R. AROCA HERNÁNDEZ-ROS, “La formación de Candela”, en *Félix Candela, Centenario 2010 – La conquista de la esbeltez*, Editora Pepa Cassinello, Madrid, 2010.

<sup>3</sup> *ibidem*.

“casarón”, como acostumbran llamar a estas formas en los países americanos de habla hispana. Su definición analítica es la función de segundo grado más simple,  $z = kxy$ , lo que simplifica no sólo los cálculos geométricos sino también los estructurales; su superficie está generada por dos directrices rectas, no complanares, lo que simplifica fuertemente su construcción frente a otras formas también de doble curvatura, pero sinclásticas, como las cúpulas.

Los paraboloides hiperbólicos se maclan, giran, se inclinan, o se desplazan, respondiendo a una sinfonía espacial cada vez diferente, como si se tratara de las mismas notas musicales que danzan sobre un pentagrama generando diferentes melodías. Las formas resistentes resultantes delimitan el espacio arquitectónico disipando, ya no la posible dicotomía entre función y forma, sino también la de su percepción más íntima, generando sentimientos propios del lugar que encierra; iglesias, fábricas, club nocturnos, restaurantes, viviendas, etc.



**Fig. 2** – **A.** Dos parábolas ortogonales; **B.** traslación de la generatriz a lo largo de la directriz; **C.** planos ortogonales que contienen a cada parábola [C. García Reig, “La geometría inteligente” en *Félix Candela, Centenario 2010 – La conquista de la esbeltez*, Editora Pepa Cassinello, Madrid, 2010.].



## Calculo de membranas<sup>4</sup>

### GENERALIDADES

De una manera general se llama *lámina* a todo cuerpo sólido de tres dimensiones definido por una superficie media, a partir de la cual se determinan dos superficies límites situados a distancias  $\pm 0.5 e$ , con la condición de que el espesor  $e$  sea muy pequeño respecto a las demás dimensiones de la estructura y respecto a los radios de curvatura de la superficie media.

Si consideramos una hoja plana de papel y la colocamos en voladizo apoyada sobre uno de sus lados, la acción de su peso propio será suficiente para doblarla, debido al efecto de flexión. Pero si a dicha hoja le damos una ligera curvatura formando una lámina cilíndrica en voladizo, se mantendrá en equilibrio, debido al efecto de membrana.

### LÁMINAS Y MEMBRANAS

El dimensionamiento de una estructura laminar requiere la determinación del *estado de tensiones* originado por las fuerzas exteriores. Para ello se han de considerar los *esfuerzos de corte* que aparecen en los bordes de un elemento de lámina determinado por normales a la superficie media.

Ahora bien, estos esfuerzos de corte serán *funciones unitarias que varían a lo largo de los bordes de las secciones consideradas y correspondientes a todo el espesor de la lámina*. Los esfuerzos de corte a considerar son los siguientes (fig. 3):

1. Los *esfuerzos de membrana*, constituidos por los normales  $N_x$ ,  $N_y$ , y los tangenciales  $T_{xy}$ ,  $T_{yx}$ . Los esfuerzos normales son tangentes a la superficie media y normales al borde. Los esfuerzos tangenciales son tangentes tanto a la superficie media como al borde.
2. Los *esfuerzos de flexión*, constituidos por los pares de flexión  $M_x$ ,  $M_y$ , aplicados en los bordes, los pares de torsión  $M_{xy}$ ,  $M_{yx}$  y los esfuerzos de corte  $Q_x$ ,  $Q_y$ .
3. Los *esfuerzos normales* a la superficie media, que son nulos o despreciables.

Para el cálculo de estas diez funciones de corte se dispone de las ecuaciones de la estática, que son seis: tres que resultan al establecer el equilibrio de las fuerzas exteriores y esfuerzos de corte, correspondientes a un elemento de lámina, en tres direcciones, y otras tres del equilibrio de momentos respecto a tres ejes.

De aquí se deduce que, en general, no es posible determinar los esfuerzos de corte y, por tanto, *el estado de tensiones de las láminas*, mediante las ecuaciones de la estática

<sup>4</sup> P. JIMÉNEZ MONTOYA, A. GARCÍA MESEGUER, F. MORÁN CABRÉ, *Hormigón Armado* – 13ª ed./actualizada, Gustavo Gili, Barcelona 1991, vol. 1, cap. 24.

solamente. Esta indeterminación que aparece en cada elemento, independientemente de la sustentación, es llamada por algunos autores *indeterminación estática interna*, y ha de resolverse mediante empleo de las ecuaciones de la elasticidad, teniendo en cuenta las deformaciones.

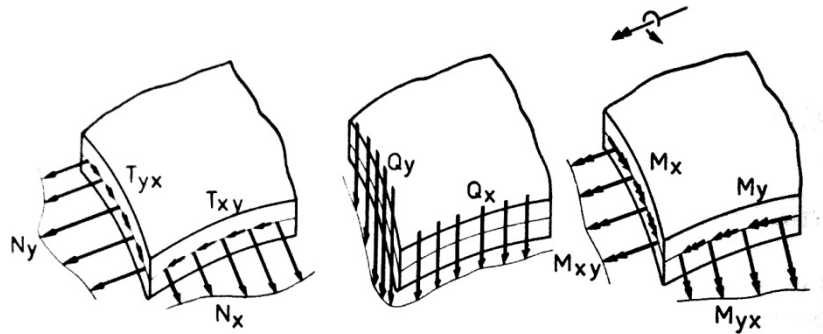


Fig. 3 – [P. JIMÉNEZ MONTOYA, A. GARCÍA MESEGUER, F. MORÁN CABRÉ, 1991].

El problema de la determinación del estado de tensiones de una lámina puede plantearse, bien por el método directo de Cauchy, o bien mediante el método indirecto de Saint-Venant; pero en el estado actual del análisis no es posible resolver, de una manera general, el sistema de ecuaciones en derivadas parciales a que da lugar, por lo que, a veces, han de adoptarse ciertas hipótesis simplificadoras que permitan obtener una solución aproximada.

Para evitar este inconveniente, o bien para comprobar los resultados obtenidos mediante las simplificaciones, cada día es más frecuente el empleo de *modelos a escala reducida*, que permiten la comprobación de láminas cuyo análisis sería imposible de abordar de otra forma.

*Afortunadamente es posible, en muchos casos, despreciar los esfuerzos de flexión, en cuyo caso el estado de tensiones puede obtenerse calculando solamente los esfuerzos de membrana  $N_x, N_y, T_{xy}, T_{yx}$  (fig. 3), mediante las ecuaciones de la estática, simplificándose el problema notablemente. De esta forma se obtiene el estado de tensiones de membrana.*

Ahora bien, para que pueda aplicarse esta simplificación del *estado de membrana* es necesario que se cumplan las siguientes condiciones:

1. *el espesor debe ser muy pequeño respecto a los radios de curvatura de la superficie media, y no debe presentar variaciones bruscas, con objeto de que tengan poca rigidez transversal y puedan despreciarse los esfuerzos de flexión;*
2. *la superficie media debe tener, generalmente, una curvatura continua;*
3. *las cargas no deben ser concentradas, sino repartidas de la manera más uniforme posible; con cargas concentradas normales a la superficie media de la lámina no es posible establecer las ecuaciones de equilibrio de la membrana ya que, considerando un elemento de superficie media lo suficientemente pequeño, que tenga el punto de aplicación de la fuerza, las proyecciones de los esfuerzos de membrana sobre dicha fuerza tienden a cero y, por tanto, no pueden equilibrar a la fuerza exterior finita. Una excepción puede encontrarse*

cuando la fuerza concentrada actúa en puntos angulosos de la superficie (fácilmente se comprende el comportamiento de estas estructuras superficiales frente a las cargas concentradas, ejerciendo una acción con un objeto adecuado sobre la superficie de un huevo, que romperá fácilmente si se trata de un objeto puntiagudo. Por el contrario, si se aplica una carga uniforme se comprueba que difícilmente se aplasta);

4. *las cargas y reacciones de los bordes deben obrar tangencialmente a la superficie media*; si se considera el borde de la lámina indicado en la fig. 4a, los esfuerzos de membrana deben ser tangentes a la superficie media, mientras que la reacción de apoyo ha de ser vertical, por lo que, en general, no será posible establecer el equilibrio; por el contrario, disponiendo el apoyo como se indica en la fig. 4b, el equilibrio de membrana puede establecerse. Pero también puede resolverse esta dificultad disponiendo un elemento de borde apropiado: por ejemplo, en las cúpulas de revolución (fig. 4c), la componente vertical del esfuerzo de membrana tangente al meridiano, es equilibrada por la reacción vertical del apoyo, mientras que la componente horizontal la absorbe un anillo que se dispone para tal efecto;

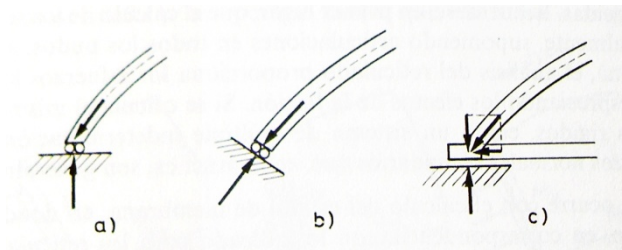


Fig. 4 – [P. JIMÉNEZ MONTOYA, A. GARCÍA MESEGUER, F. MORÁN CABRÉ, 1991].

5. *los apoyos y elementos de borde deben ser compatibles con las deformaciones de los bordes libres de la membrana*, lo que en la práctica rara vez ocurre, por lo que provocan acciones de borde que no pueden equilibrarse mediante los esfuerzos de membrana, es decir, aparecerán esfuerzos de flexión.

Es muy importante observar que, al contrario de lo que ocurre con los arcos, las condiciones de equilibrio de la membrana pueden establecerse cualquiera que sea la forma de la superficie media y para cualquier tipo de carga repartida. En los arcos sólo pueden evitarse los esfuerzos de flexión si la directriz coincide con la línea de presiones, a lo largo de la cual se canalizan los esfuerzos hasta los apoyos. Por el contrario, en las membranas, los esfuerzos pueden transmitirse a los apoyos en varias direcciones, que es lo que caracteriza a este tipo de estructuras, cuyo comportamiento resistente espacial hace que pueda aprovecharse el material en inmejorables condiciones.

*Por esta causa no tiene sentido hablar de superficie de presiones, ya que la superficie mediate cualquier estructura laminar puede considerarse como membrana para cualquier tipo de carga uniforme, con las restricciones antes impuestas.*

Como resumen de cuanto se ha expuesto conviene observar que, de una manera general, el cálculo de una estructura laminar ha de hacerse mediante la *teoría de la flexión*, es decir, considerando tanto los esfuerzos de membrana como de flexión. Pero para cargas uniformes y con ciertas condiciones de borde es posible efectuar el cálculo del *estado de membrana*, en cuyo caso el problema es estáticamente determinado, simplificándose notablemente. En este caso suele denominarse *membrana* a la estructura laminar.

### MEMBRANAS EN PARABOLOIDE HIPERBÓLICO

Recuérdese que el paraboloides hiperbólico es una superficie reglada que contiene dos sistemas de generatrices rectilíneas, cada uno de los cuales es paralelo a un plano director  $xoy$  e  $yozy$  (fig. 5), que forman entre sí un ángulo  $\omega$ . Cuando este ángulo es recto, el paraboloides se llama *equilátero*.

Por cada punto de la superficie pasan dos generatrices rectilíneas que toman parte de la misma. Si se toman como ejes coordenados  $x$  e  $y$  las dos generatrices que pasan por el vértice  $O$  del paraboloides, y como eje  $z$  el eje de dicha superficie, su ecuación puede ponerse en la forma:

$$z = k \cdot x \cdot y \cdot \sin \omega$$

Designando por  $a$ ,  $b$ ,  $c$ , a los segmentos  $OG$ ,  $OF$  y  $BB'$ , respectivamente, la constante  $k$  tiene por valor:

$$k = \frac{c}{a \cdot b \cdot \sin \omega}$$

Las secciones del paraboloides producidas por los planos  $DOB$  y  $AOC$  (bisectores del diedro formado por los planos coordenados  $zox$ ,  $zoy$ ) son parábolas de segundo grado, así como todas las secciones paralelas a dichos planos. Por cada punto del paraboloides pasan dos de estas parábolas ortogonales.

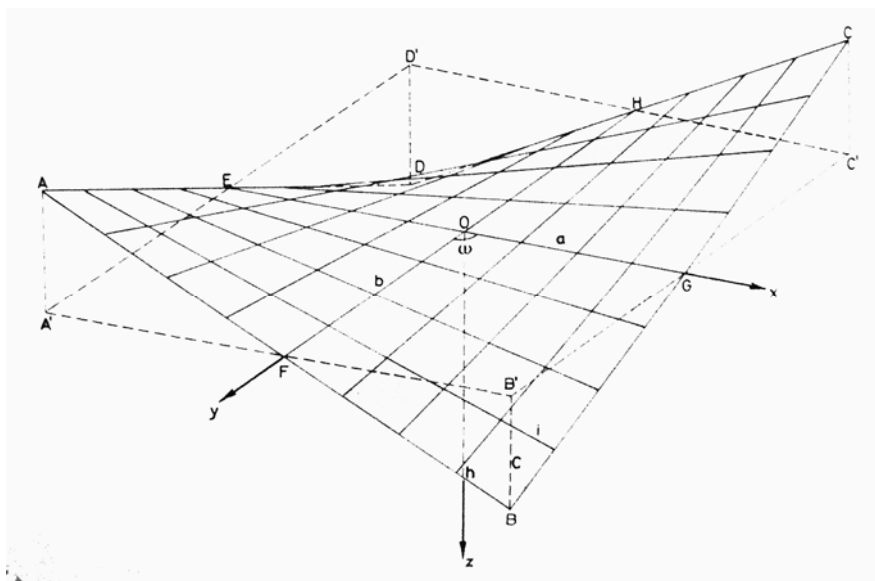


Fig. 5 – Paraboloides hiperbólico [P. JIMÉNEZ MONTOYA, A. GARCÍA MESEGUER, F. MORÁN CABRÉ, 1991].

Muchas son las ventajas que presentan las cubiertas de hormigón armado compuestas por paraboloides hiperbólico, entre las que deben citarse su ligereza, economía de materiales, su gran estabilidad, y su seguridad contra explosiones, seísmos y movimientos de apoyos. También su construcción es sencilla, debido a la facilidad de replanteo y ejecución de encofrado.

Normalmente se asocian varios elementos de paraboloides para formar los distintos tipos de cubierta, dando lugar a multitud de formas estructurales, que además de las ventajas antes enumeradas resultan de una belleza indiscutible.

Respecto a las hipótesis de carga, cuando se trata de cubiertas de pequeñas dimensiones y poca curvatura, puede suponerse una carga total uniformemente repartida en proyección horizontal, compuesta por el peso propio y la sobrecarga de viento y nieve. No obstante, se van a integrar las ecuaciones de la membrana para varias hipótesis de carga.

Los espesores de estas membranas resultan muy pequeños y prácticamente vienen limitados por los recubrimientos de las armaduras. Suelen tener de cuatro a ocho centímetros de espesor.

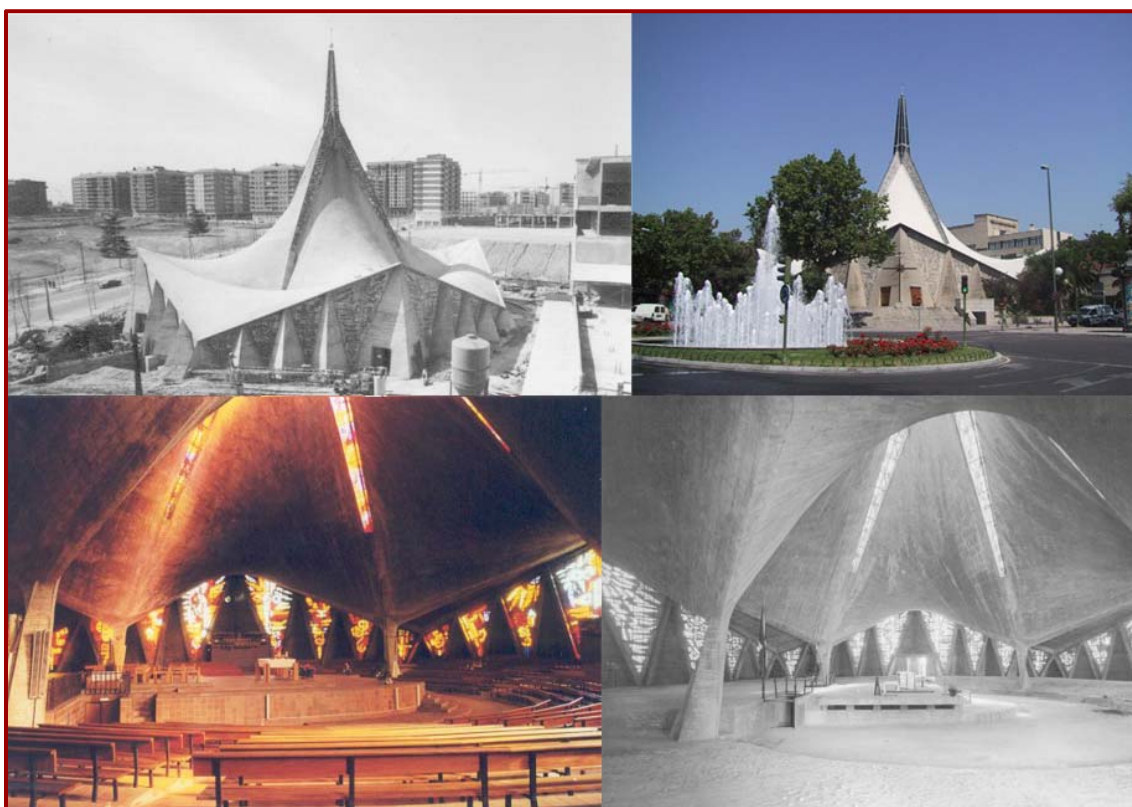
## Iglesia de Nuestra Señora de Guadalupe

Durante los años 1962 y 1963, Félix Candela fue asesor de la Iglesia de Nuestra Señora de Guadalupe de Madrid, ubicada en calle de Puerto Rico nº 1 y conocida como el *sombrero mexicano*<sup>5</sup> por la singular forma de su cubierta. En ella intervinieron como arquitectos el mexicano Enrique de la Mora y el español José Ramón Azpiazu, así como el ingeniero José Antonio Torroja.

### CARACTERÍSTICAS CONSTRUCTIVAS

La iglesia se desarrolla sobre una planta octagonal inscrita en una circunferencia de 53,74 metros de diámetro.

El altar se halla situado en el centro y los fieles dispuestos a su alrededor en graderios que forman anfiteatros. Un gran posillo a nivel superior al de las gradas facilita la circulación perimetral. La iglesia es, pues, de tipo comunitario y procesional.



**Fig. 6** – Fotos appartenientes al archivo fotográfico del actual párroco de la iglesia, padre Alfonso Rovira.

<sup>5</sup> E. DOMÍNGUEZ UCETA, *El «sombrero mexicano»*, El Mundo, Madrid, sábado 13 diciembre 1997.

La estructura del proyecto inicial (de Candela y de La Mora), era de hormigón armado pero en ella sólo la cubierta de la iglesia y el muro perimetral de la cripta eran laminares.

Utilizando la geometría básica del paraboloides hiperbólico (*hypar*), la cubierta está formada por ocho *hypar* unidos mediante unas cristaleras sujetas por elementos metálicos y realizada con una cáscara de hormigón armado de 4 centímetros de espesor. Los ocho paraboloides en que se desarrolla se unen en un vértice central dejando paso a la luz natural a través de las cerchas metálicas que los unen. Félix Candela ya había utilizado cerchas metálicas de unión entre *hypar* en otras obras como en las Capillas de San Vicente de Paúl y de San José Obrero. Al igual que en ellas, la penetración de la luz natural refuerza la percepción de la volumetría interior.

La cripta está constituida por pilares circulares interiores, muros perimetrales formados por pantallas laminares cilíndricas, y techo formado por placas aligeradas.

Al interior se hallan cuatro pilares centrales cuya forma muy esbeltas genera una continuidad espacial con los paraboloides hiperbólicos, tomando el hormigón la suave forma de una tela (fig. 6); solamente ellos absuelven al sustentamiento de la cubierta laminar.

La recidencia y el auditorium, que forman un conjunto escalonado, están constituidos por pilares interiores y vigas voladas, de las que cuelgan los muros de cerramiento formados por pantallas laminares de 12 centímetros de espesor.

Los muros laterales de cerramientos, simétricos también en cuatro cuadrantes, están formados por una lámina plegada combinada con vidrieros de 2 centímetros de espesor y nervios de hormigón armado que a la vez sirven para absorber los esfuerzos horizontales y verticales producidas por la lámina de cubierta. Los muros están realizados en:

- mampostería de hormigón con detalles de vidrio decorativos, para formar, en su conjunto, los vitrales que decoran la iglesia;
- muros de hormigón armado a la vista.

La obra se desarrolla en dos niveles: el superior, sobre rasante, que aloja la nave principal de la iglesia y otro inferior, que ocupa parcialmente la planta del primero, para alojar una capilla, salas de máquinas y dependencias generales de la iglesia. Como característica más importante de la obra puede señalarse la gran superficie salvada con sólo cuatro pilares interiores y el efecto monumental interior conseguido mediante la combinación de las láminas de hormigón y las vidrieras<sup>6</sup>.

---

<sup>6</sup> A. DE LA PEÑA LOPEZ, V. MARTINEZ SEGOVIA, *Proyecto de Reacondicionamiento de la cubierta de la Iglesia de Nuestra Señora de Guadalupe en la calle Puerto Rico nº1 de Madrid*, septiembre 1993.

## EL MATERIAL

Candela utiliza el hormigón para construir sus cáscaras delgadísimas. Es un hormigón con poca fluidez, pues debe ser colocado en superficies inclinadas. Cuando la inclinación es muy marcada el hormigón debe tener muy poca humedad. En estos casos, para mejorar el acabado de la superficie interior, se coloca una capa fina de mortero sobre el encofrado, inmediatamente antes del hormigonado. En general, las cáscaras de Candela llevan una malla de acero en su interior para absorber las sollicitaciones de tracción y controlar la fisuración del hormigón. Las aristas de borde o de encuentro entre láminas adyacentes suelen tener un espesor mayor, por lo que se arman como vigas, con varillas de acero longitudinales y estribos.

Las inevitables flexiones en algunas zonas de sus cáscaras, a las que el mundo académico de los 60 les dedicó atención, son sollicitaciones secundarias en el proyecto de Candela. Las fuerzas resultantes son recogidas por nervios de mayor espesor, ubicados en las aristas entre cáscaras adyacentes y dirigidas a las estructuras de sostén o son neutralizadas por tensores<sup>7</sup>.

## ENCOFRADOS Y DESENCROFADO

El proyecto de Candela es magistral, es global. En el diseño están implícitamente contemplados el proceso constructivo y la simplicidad del montaje del encofrado, que produce la compleja superficie espacial. Para replantear especialmente los paraboloides basta ubicar las dos rectas directrices en el espacio y construir una estructura que las materialice (en general dos costillones rectos de madera). Luego, se unen los puntos correspondientes de las dos directrices con un haz de hilos cercanos, que constituyen las generatrices del paraboloide. En la posición de las generatrices se montan piezas rectas (costillas de madera) sobre las que se fijan las tablas del encofrado. Si es necesario reducir la luz libre de las costillas se pueden determinar directrices auxiliares intermedias, cortando las generatrices con planos verticales. Estas directrices auxiliares no son rectas, sino curvas fácilmente determinables en el espacio, en cuyas posiciones se materializan los costillones intermedios.

No se tienen información acerca del tiempo necesario para el endurecimiento de l'hormigón de las cáscaras de Candela, previo al desencrochado. Ni de la resistencia exigida al hormigón para realizar dicha operación. Es claro que ese tiempo depende de factores como la dosificación del hormigón, la temperatura, la forma y las dimensiones de la estructura<sup>8</sup>.

---

<sup>7</sup> G. LARRAMBEERE, "Félix Candela y Eladio Dieste, dos maestros", en *Félix Candela, Centenario 2010 – La conquista de la esbeltez*, Editora Pepa Cassinello, Madrid, 2010.

<sup>8</sup> *ibidem*.





Fig. 7 – Fotos pertenientes al archivo fotográfico del actual párroco de la iglesia, padre Alfonso Rovira.

### ANTECEDENTES DEL PROYECTO DE REACONDICIONAMIENTO DE LA CUBIERTA<sup>9</sup>

La cubierta de la Iglesia presentaba una serie de problemas de conservación y funcionalidad que perturbaban sensiblemente el servicio de la iglesia, y que se resumen aquí a continuación.

**Generalidad.** Antes del proyecto de reacondicionamiento de la cubierta, obra del arquitecto Alvaro de la Peña y del ingeniero Víctor Martínez Segovia data del 1993, la cubierta presentó serios problemas de estanqueidad, con numerosos puntos de entrada de agua de lluvia, especialmente en la unión del pináculo metálico con las membranas de hormigón, pero también en puntos intermedios de estas últimas. Había algunas fisuras en zonas intermedias de la cubierta, con una concentración y agravamiento de las mismas, que se convirtieron en verdaderas grietas en torno a los vértices altos del octógono exterior.

La retícula de armaduras se acusó desde el interior, con apariencia de inicios de corrosión en alguna zona.

<sup>9</sup> A. DE LA PEÑA LOPEZ, V. MARTINEZ SEGOVIA, *Proyecto de Reacondicionamiento de la cubierta de la Iglesia de Nuestra Señora de Guadalupe en la calle Puerto Rico nº1 de Madrid*, septiembre 1993.

Se produjeron también con alguna frecuencia roturas de vidrios de los cristales de las aristas y pináculo; si bien se consideró que una gran parte se debió a vandalismo, no se podía descartar que otra parte se originaron en efectos térmicos.

**Calefacción y ventilación.** Las condiciones de aislamiento térmico que ofreció la delgada cubierta de hormigón fueron por completo insuficientes; ello supone que tanto en invierno como en verano había días en que la temperatura interior era molesta hasta el punto de condicionar los cultos.

La iglesia disponía de un sistema de ventilación y calefacción que utilizaba un cuarto de máquinas situado bajo el piso, en posición adosada a la capilla construida como cripta. El sistema tomaba aire del exterior a través de una rejilla inmediata a la fachada de hormigón visto, lo calentaba mediante un intercambiador tubular alimentado por caldera de gasóleo y lo impulsaba al interior de la iglesia mediante conductos que desembocaban en rejillas situadas encima de los tres vestíbulos de entrada a la misma. Pese a ese sistema, el ambiente interior en invierno era exageradamente húmedo, dando lugar a importantes condensaciones por el interior de la cubierta, por donde llegaba a correr el agua, y a una situación muy distante de las condiciones de confort mínimamente exigibles.

De hecho el sistema disponía de capacidad suficiente, tanto en cuanto a producción de calor como a potencia de ventiladores de impulsión que generaban un suficiente volumen de aire de renovación, pero la operatividad de los mismos se veía absolutamente limitada por la ausencia de aislamiento, así como por la falta de un sistema de regulación y control entre los volúmenes de aire que se tamaban del interior y los que se incorporaban del exterior.

**Estado de la estructura.** La presencia de fisuras en la cubierta, con una distribución y trazado relativamente uniformes alrededor de los cuatro vértices más altos del perímetro octogonal exterior, indujo al temor de que el diseño de la cubierta fuera origen de eventuales defectos estructurales que hubieran podido requerir un refuerzo o modificación especial, con independencia de que interesara en cualquier caso proceder al saneo y sellado de las fisuras existentes.

Para comprobar el estado tensional en la lámina de cubierta, se analizó su comportamiento teórico a través de un modelo de cálculo numérico por elementos finitos que reproducía la geometría de la cubierta deducida de los planos.

Los resultados fueron bastantes esclarecedores del funcionamiento estructural, comprobándose que bajo la acción de las cargas verticales, y pese al mínimo espesor de la membrana de hormigón, las tensiones eran muy reducidas, sin aparición de tracciones en la mayor parte de la cubierta, y aún estas últimas perfectamente absorbibles por la armadura prevista en el Proyecto.

En el caso en cambio de las sollicitaciones térmicas, la coacción lateral introducida por los diedros de hormigón exteriores dispuestos a lo largo de todo el perímetro exterior, y que podían considerarse como de rigidez infinita respecto de la membrana de hormigón, introdujo importantes concentraciones de tensiones en el plano de la lámina en las inmediaciones de los vértices exteriores del octógono, con una

distribución de los máximos concordante con la situación de las fisuras en forma de aureola en torno a los puntos altos del perímetro exterior observadas en el interior. Pareció en consecuencia fuera de duda que estas fisuras se originaran en invierno, cuando la contratación térmica del hormigón de cubierta se veía impedida por la gran rigidez de los muros exteriores derivada de su trazado plegado. En este sentido, es claro que la situación prevista en los planos originales de Félix Candela, con fachadas compuestas por pórticos planos de hormigón, de mucha menor rigidez frente a las fuerzas horizontales normales a su plano, hubiera presentado una susceptibilidad muy inferior a las acciones térmicas y reológicas, sin que probablemente se hubieran generados las indicadas fisuras.

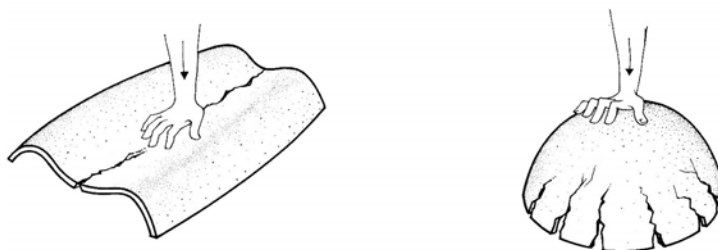
## Estudio técnico de las láminas de Candela

[J.M. GOICOLEA RUIGÓMEZ, “El formalismo de Félix Candela”, en *Félix Candela, Centenario 2010 – La conquista de la esbeltez*, Editora Pepa Cassinello, Madrid, 2010].

Para el estudio del comportamiento de la estructura en análisis nos ha resultado esencial la lectura de los estudios conducidos por el Dr. Ingeniero José María Goicolea Ruigónmez, Catedrático de la Escuela de Ingenieros de Caminos, Caneles y Puertos de Madrid, y por su grupo de Mecánica Computacional (<http://w3.mecanica.upm.es>), que con gran pasión trabaja en el Departamento de Mecánica de la misma Escuela. Estimamos muy útil traer a colación su reciente publicación en la que se resumen en forma clara y eficaz el enorme trabajo de análisis y estudio técnico de las láminas de Candela.

### LOS MODELOS DE CANDELA PARA EL CÁLCULO ESTRUCTURAL DE PARABOLOIDES HIPERBÓLICOS

Como ha quedado patente, Candela era un buen conocedor de las teorías de la mecánica estructural y, en particular, de las láminas. En éstas, el principio que les confiere mayor eficacia mecánica es el funcionamiento mediante esfuerzos de membrana, admitiéndose que debido a la forma y otros condicionantes se pueden despreciar los efectos de flexión (fig. 8).



**Fig. 8** – Efecto de la doble curvatura en las láminas que impide el desarrollo de esfuerzos de flexión: la curvatura simple implica un fallo por flexión, la curvatura doble un fallo por tracción [F. CANDELA, “Estereoestructuras”, *Espacios N. 17*, México, 1953].

Candela realizó su aportación personal al cálculo y diseño de las láminas de hormigón con forma de paraboloides hiperbólicos en una serie de artículos<sup>10</sup>. De éstos debe destacarse que se basan exclusivamente en las ecuaciones de equilibrio y en las condiciones de borde, sin que el comportamiento del material ni la elasticidad jueguen ningún papel, lo que resulta coherente con las ideas de Candela:

*«[...] los métodos basados en la Teoría de la Elasticidad no son apropiados para el análisis de estructuras hiperstáticas de concreto*

<sup>10</sup> F. CANDELA, “Structural Applications of Hyperbolic Paraboloidal Shells”, *ACI Journal, Proceedings*, vol. 51, enero 1955 – F. CANDELA, “General Formulas for Membrane Stresses in Hyperbolic Paraboloidal Shells”, *ACI Journal, Proceedings*, vol. 57, oct. 1960 – F. CANDELA, “The hyperbolic paraboloid”, en C. FABER, *Candela: The Shell Builder*, Reinhold, New York, 1963.

*armado, y como estos métodos son los únicos admitidos por la mayoría de los Reglamentos, nos encontramos con el hecho insólito de que no podemos aplicar para el cálculo de estructuras de concreto armado – casi el único material estructural – métodos que estén de acuerdo con sus características. Se ha llegado a la aberración de crear artificialmente – y, en muchos casos, con enormes dificultades de ejecución – condiciones de isostatismo, mediante articulaciones de las estructuras, con evidente menoscabo de la estabilidad definitiva de las mismas, y sin otra justificación constructiva que la de facilitar el planteamiento analítico del problema».*

[F. CANDELA, *Hacia una nueva filosofía de las estructuras*, Student Publications of the School of Design, North Carolina State College, Raleigh NC, 1955].

La formulación empleada por Candela de las ecuaciones de membrana en coordenadas cartesianas sigue en lo principal la Teoría de Pucher de 1937<sup>11</sup>. Más allá de las ecuaciones diferenciales del equilibrio, Candela pone especial énfasis en la importancia de las condiciones de contorno para su integración. Estudia los casos básicos fundamentales, especialmente el caso de peso propio en distintas orientaciones, y resalta que en general, para que sea posible el funcionamiento de membrana, es imprescindible la colocación de elementos que en los bordes libres sean capaces de imponer las tensiones tangenciales y normales necesarias, ya que de otra forma se introducirán el menos localmente flexiones no deseadas. En los paraboloides con borde curvo, por el contrario, es posible en ocasiones mantener el funcionamiento de membrana con borde libre.

## MODELO DE ELEMENTOS FINIDOS Y FACTOR DE MEMBRANA

El ingeniero Goicolea y su equipo han estudiado mediante modelos de elementos finitos algunas cubiertas laminares de Candela con forma de paraboloide hiperbólicos. El objeto no ha sido tanto calcular las tensiones o el factor de seguridad de la cubierta, sino de ayudar a interpretar cualitativamente el funcionamiento de la lámina. En concreto se muestran los mapas de un índice que se propone para evaluar el comportamiento de membrana (fig. 9). También se muestran los mapas de tensiones principales de tracción y de compresión para entender el flujo de esfuerzos en las láminas.

Los cálculos se han realizados mediante el programa de elementos finitos ABAQUS<sup>12</sup> empleando elementos láminas cuadriláteros SR4, que incluyen deformación por cortante y disponen de una técnica especial de integración reducida para evitar el bloqueo en láminas delgadas como las que nos ocupan. Se trata de cálculos estáticos, suponiendo comportamiento elástico lineal y pequeñas deformaciones. Todas las

---

<sup>11</sup> A. PUCHER, "Die berechnung von doppelt gekrummten schalen mittels Diferenzer gleichungen", *Der Bauingenieur*, vol. 18, Nos. 9-10, Berlín, 1937.

<sup>12</sup> Simulia inc., ABAQUS v6.8 Finite Element Analysis Program, [www.abaqus.com](http://www.abaqus.com), 2008.

láminas tienen un espesor de 4 cm, con propiedades elásticas del hormigón  $E = 30\text{GPa}$ ,  $\nu = 0,2$  y densidad  $2500\text{ kg/m}^3$ ; además están sometidas a su peso propio multiplicado por dos.

Para evaluar de manera sencilla el comportamiento de membrana o de flexión de la lámina, se propone un índice (escalar) cuyo valor en cada punto está entre cero – flexión pura – y uno – membrana pura (fig. 9). Representa la fracción de la densidad de energía elástica total que corresponde a los esfuerzos de membrana:

$$W_{memb} = \frac{1}{2}(N_1 E_1, N_2 E_2, 2N_3 E_3); \quad W_{flex} = \frac{1}{2}(SM_1 SK_1 + SM_2 SK_2);$$

$$F_{memb} = \frac{W_{memb}}{W_{memb} + W_{flex}} \quad 0 \leq F_{memb} \leq 1$$

Donde  $(N_1, N_2, N_3)$  son los esfuerzos (axiales, cortante) de membrana,  $(E_1, E_2, E_3)$  las deformaciones asociadas,  $(SM_1, SM_2)$  los momentos flectores y  $(SK_1, SK_2)$  sus curvaturas asociadas, estando todos ellos expresados por unidad de longitud de la lámina. No se considera el torsor en la lámina.

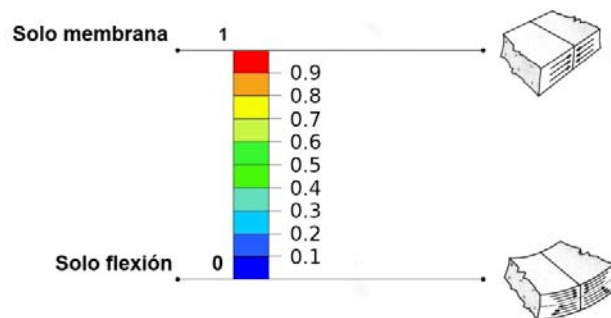


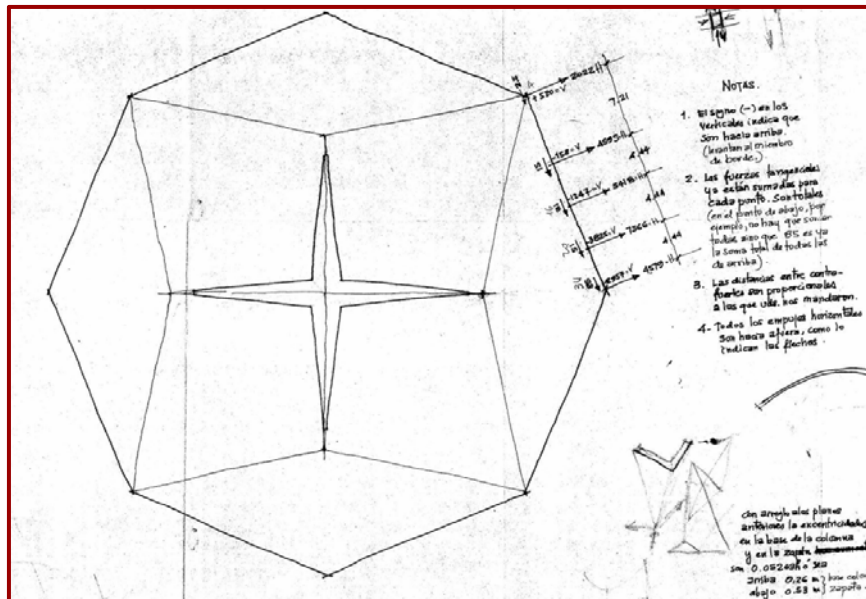
Fig. 9 – Factor de membrana [J.M. GOICOLEA, 2010].

## IGLESIA DE NUESTRA SEÑORA DE GUADALUPE

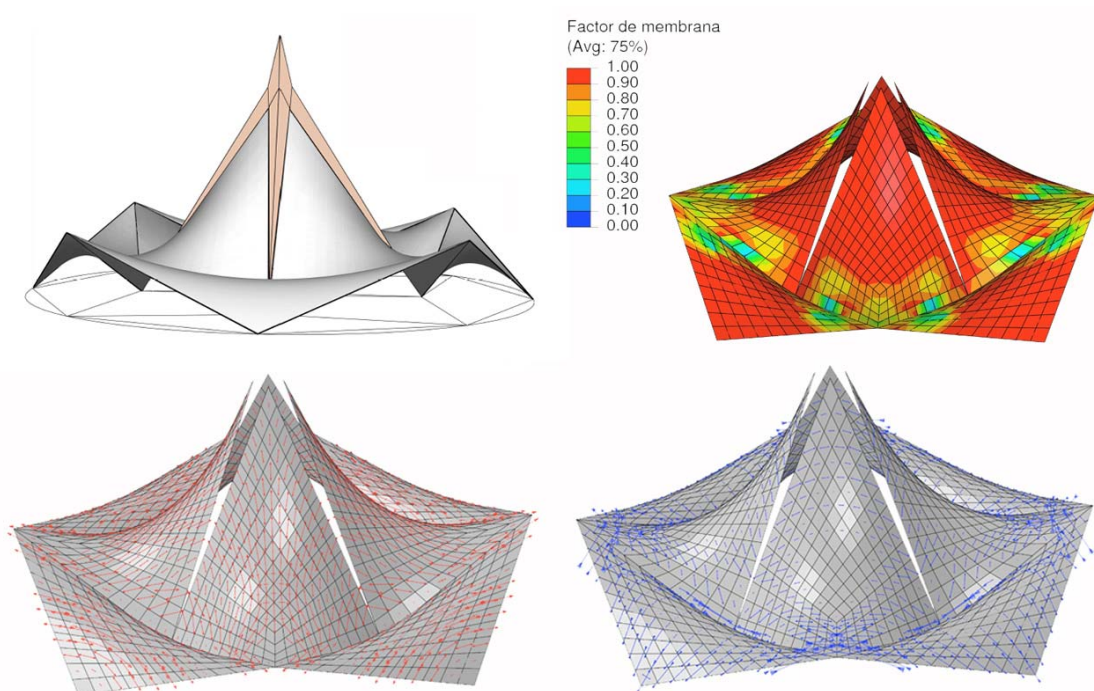
En la fig. 10 se muestra parte de uno de los cálculos de Candela en los que proporciona los valores de fuerzas necesarias en los apoyos del borde exterior; aspecto que ya se ha comentado antes que resulta esencial para garantizar el funcionamiento como membrana, y al que como vemos Candela dedica su atención preferente.

En el modelo de elementos finidos los bordes exteriores se han considerado fijos de manera continua. Asimismo, las líneas de unión interiores entre los paraboloides centrales y los exteriores están regresadas (a 12 cm) para formar vigas en V que recojan la carga de las láminas. En la fig. 11 se muestra el mapa del índice de membrana, comprobándose su valor elevado en general con excepción de las zonas alrededor de las citadas líneas interior en V.

Los cálculos mediante modelos avanzado de elementos finidos nos permiten estudiar con detalle las hipótesis de funcionamiento estructural y corroborar – de forma innecesaria ya que la realidad de sus construcciones es la mejor prueba – la base técnica del formalismo de Candela.



**Fig. 10** – Cálculo de Candela para el proyecto de la Iglesia de Nuestra Señora de Guadalupe, relacionados con las reacciones de borde [cortesía de J.M. GOICOLEA RUIGÓMEZ].



**Fig. 11** – En la fila superior modelo de la cubierta y mapa del índice de membrana. En la fila inferior, mapa de tensiones principales de tracción y compresión. Se observa un comportamiento muy bueno en general, siendo el factor de membrana más bajo en los bordes de intersección inferiores [cortesía de J.M. GOICOLEA RUIGÓMEZ].

## Anejos

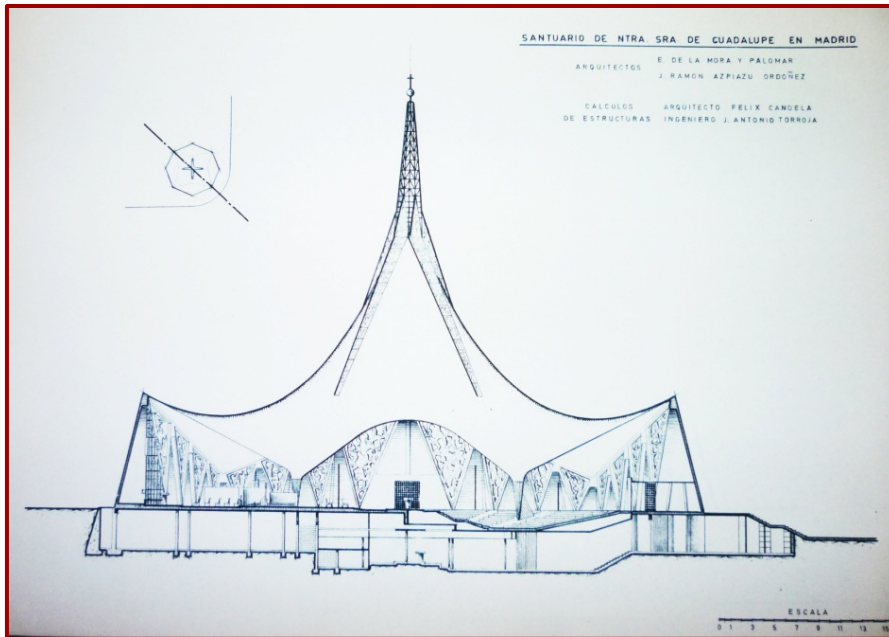


Fig. 12 – Archivo del actual párroco de la iglesia, padre Alfonso Rovira.

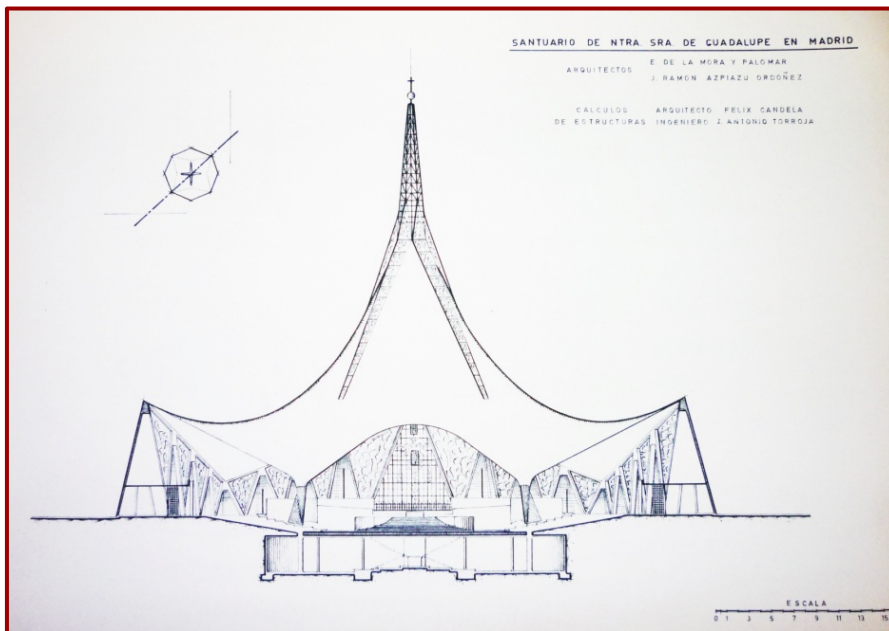


Fig. 13 – Archivo del actual párroco de la iglesia, padre Alfonso Rovira.



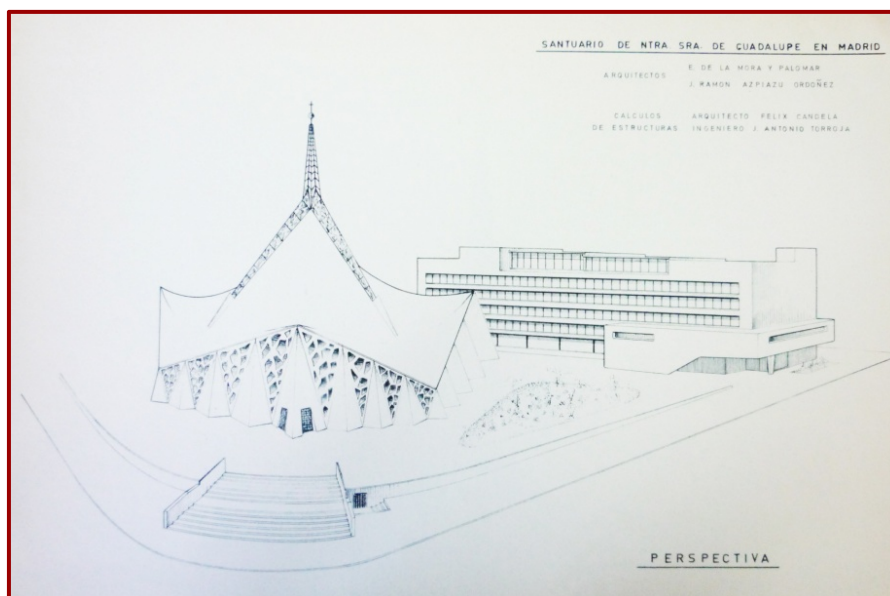


Fig. 14 – Archivo del actual párroco de la iglesia, padre Alfonso Rovira.

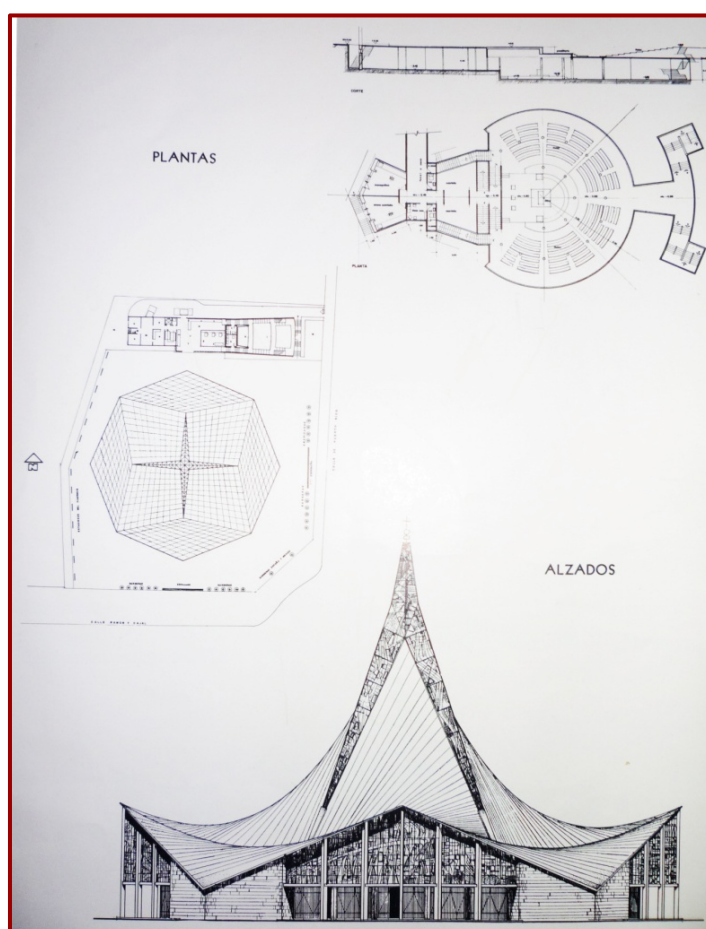
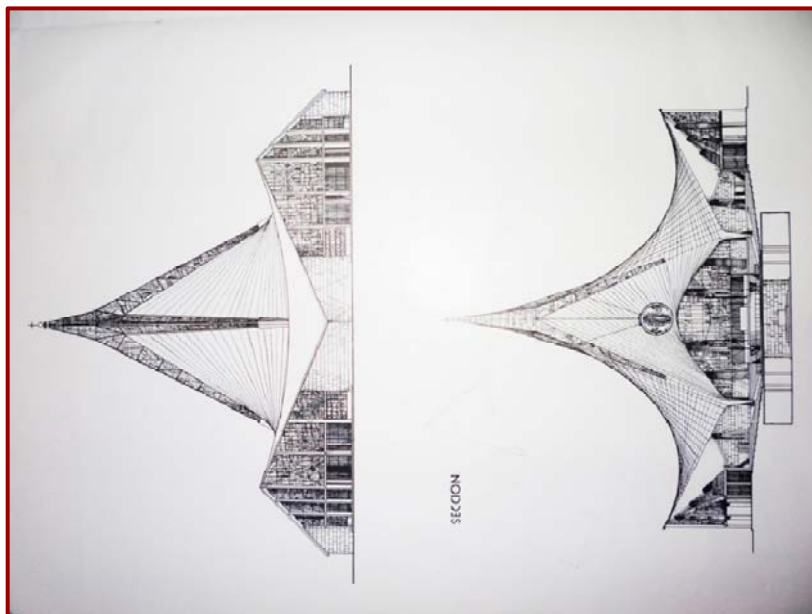
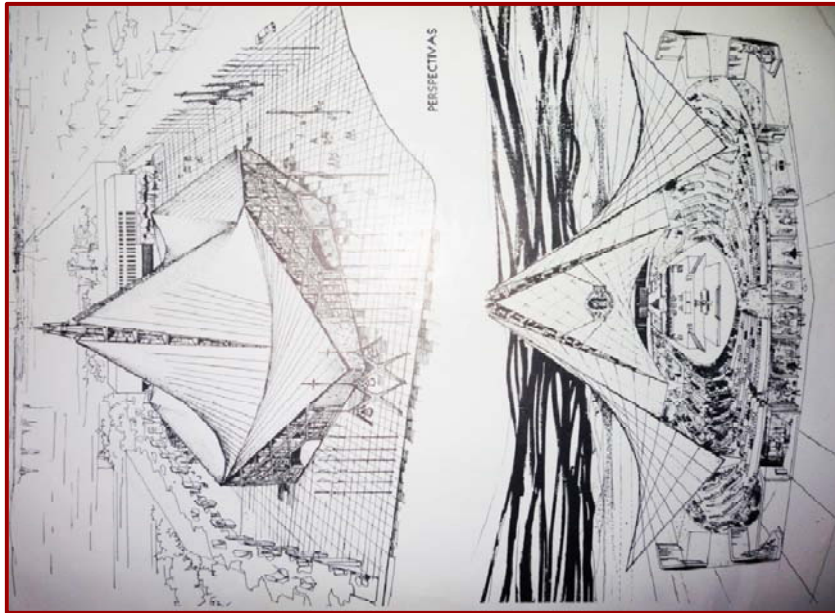


Fig. 15 – Archivo del actual párroco de la iglesia, padre Alfonso Rovira.



## Bibliografía

E. DOMÍNGUEZ UCETA, *El «sombrero mexicano»*, El Mundo, Madrid, sábado 13 diciembre 1997.

J.M. GOICOLEA RUIGÓMEZ, “El formalismo de Félix Candela”, en *Félix Candela, Centenario 2010 – La conquista de la esbeltez*, Editora Pepa Cassinello, Madrid, 2010.

P. JIMÉNEZ MONTOYA, A. GARCÍA MESEGUER, F. MORÁN CABRÉ, *Hormigón Armado – 13ª ed./actualizada*, Gustavo Gili, Barcelona 1991, vol. 1, cap. 24.

G. LARRAMBEBERE, “Félix Candela y Eladio Dieste, dos maestros”, en *Félix Candela, Centenario 2010 – La conquista de la esbeltez*, Editora Pepa Cassinello, Madrid, 2010.

A. DE LA PEÑA LOPEZ, V. MARTINEZ SEGOVIA, *Proyecto de Reacondicionamiento de la cubierta de la Iglesia de Nuestra Señora de Guadalupe en la calle Puerto Rico nº1 de Madrid*, septiembre 1993.

R. AROCA HERNÁNDEZ-ROS, “La formación de Candela”, en *Félix Candela, Centenario 2010 – La conquista de la esbeltez*, Editora Pepa Cassinello, Madrid, 2010.

R. AROCA HERNÁNDEZ-ROS, Solemne acto académico con motivo de la investidura de doctor “honoris causa” del prof. Dr. D. Félix Candela Outeriño, Universidad Politécnica de Madrid, 1994.