

El Formalismo de Félix Candela

José María Goicolea Ruigómez (*)

Escuela de Ingenieros de Caminos, Canales y Puertos, Universidad Politécnica de Madrid

Vocal de la comisión asesora de la Fundación Juanelo Turriano

(*) *Colaboración en los cálculos de Pablo Antolín Sánchez, Alfredo Cámara Casado y Javier Oliva Quecedo, Ingenieros de Caminos y estudiantes de doctorado.*

1. Introducción

Félix Candela ha sido una figura excepcional en el ámbito general de la ciencia de la construcción, por lo que y con ocasión del centenario de su nacimiento el 27 de enero de 1910, se aporta aquí un análisis sobre algunos aspectos de su obra y de sus postulados. En primer lugar se resalta el compromiso de Candela no sólo como arquitecto sino también como constructor, ingeniero y artista. Se detallan asimismo algunos aspectos de su formación en la Escuela de Arquitectura de Madrid en los años 1930 que marcaron su carácter. A continuación se analizan algunas de las ideas principales de Candela alrededor del formalismo y del papel de la arquitectura, ingeniería y métodos de cálculo en el diseño estructural. Por último, y partiendo de los modelos de cálculo estructural de láminas empleados por Candela, se analizan algunas de sus propuestas y obras con modelos numéricos de elementos finitos.

2. Candela: ¿Arquitecto, Constructor, Ingeniero o Artista?

Candela fue un arquitecto atípico, por distintos motivos. Su obra más relevante fue realizada como constructor de cubiertas laminares en Cubiertas Ala, propiedad suya y de sus hermanos, 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. En 1955 Candela afirma [1]: *«Debo aclarar en primer lugar que, aunque soy arquitecto por educación, mi actividad profesional es la de constructor o contratista de obras, y por tanto mis preocupaciones sobresalientes son, por lo general, de tipo económico.»*

Su colaborador Colin Faber en su excelente libro [2] lo titula como *constructor de láminas*. Según Faber, *«la cuestión sobre si Candela es un arquitecto, ingeniero, matemático es más bien académica. Cuando se le pide definirse es proclive a responder “Soy un contratista, trabajando en lo que realmente me gusta, lo que es una situación muy feliz”»*. La identificación de Candela con la ingeniería proviene tanto de su capacidad matemática para el cálculo como de su compromiso con la mecánica estructural como base del diseño, además de los factores estéticos. En un reciente y muy cuidado libro Garlock y Billington [3] tras un detallado análisis de su vida y obra reivindican su calificación como *artista estructural*, concepto que definen como *«un ingeniero con todas las cualidades de un maestro de obras y que posee adicionalmente motivación estética.»*

El logro principal de Candela fue la realización de su obra arquitectónica de manera económica, funcional y al mismo tiempo bella, superando las importantes dificultades de la guerra y el exilio, con el mérito añadido de la modestia, sinceridad y honestidad [4]: *«...mi mayor satisfacción no estriba en haber ejecutado ciertas estructuras espectaculares —aunque confieso que he disfrutado mucho haciéndolas—, sino en haber contribuido, siquiera sea en forma mínima, a aliviar el ingente problema de cubrir económicamente espacios habitables, demostrando que la construcción de cascarones no constituye una hazaña extraordinaria que inmortalice a sus autores, sino un procedimiento constructivo sencillo y flexible.»*

3. La formación de Candela en la Escuela Superior de Arquitectura de Madrid

La formación recibida condiciona la trayectoria profesional o científica, permitiendo abrir algunas puertas o por contra cerrando otras. Esta reflexión nos da pie para aportar a continuación algunos datos sobre la formación recibida por Candela y de sus estudios de Resistencia de Materiales.

Félix Candela es admitido en la Escuela Superior de Arquitectura en Madrid en 1929, después de dos años de estudios previos en la facultad de ciencias de la Universidad Central de Madrid en la calle de San Bernardo. De estos primeros estudios Candela [5] destaca el curso de Geometría Analítica impartido por D. Miguel Vegas Puebla-Collado, cuya formación le allanaría el camino posteriormente para el estudio de las láminas.

Resaltemos la coincidencia de que D. Miguel Vegas fue discípulo de D. Eduardo Torroja y Caballé, renovador de la matemática Española con aportaciones importantes a la geometría y a su vez padre de D. Eduardo Torroja Miret, insigne Ingeniero de Caminos y creador de numerosas estructuras laminares de enorme mérito, que por su parte profesó un sincero aprecio y amistad por Miguel Vegas. El círculo se cierra ya que fueron precisamente las estructuras de Torroja y en concreto el frontón Recoletos la primera atracción de Candela hacia las formas laminares.

En su tercer curso en la Escuela estudia el primer año de Resistencia de Materiales, que en palabras de Candela [5] consistía en un “curso estupendo de Teoría de la Elasticidad”: *«La idea de dedicar un curso entero de seis horas a la semana para estudiantes de arquitectura, a una materia, casi totalmente abstracta, que se iniciaba con el maravilloso artificio geométrico de la Teoría de Tensores, sin explicarnos de antemano para qué iba a servir, parece bastante absurda, aunque para mí fue providencial, porque, al mostrarme los ingeniosos fundamentos de los métodos de cálculo de estructuras, me proporcionó un arma muy valiosa para mis discusiones futuras con profesores e ingenieros y, también, para poder juzgar con más autoridad sobre la idoneidad, en cada caso, de tales métodos, y modificar o desarrollar algunos otros para mi propio uso.»*

Este curso estaba dictado por el catedrático D. Luis Vegas Pérez, hijo del catedrático de Geometría Analítica D. Miguel Vegas y que tuvo una influencia clave en la formación estructural de los Arquitectos de Madrid, que perduró al menos hasta finales de los años 1970. Hay que recordar que, aunque las bases de la Teoría de la Elasticidad fueron desarrolladas en el siglo XIX por A. Cauchy y otros, el empleo de la teoría de tensores en este ámbito era muy novedoso. En efecto, el cálculo tensorial fue introducido por el matemático T. Levi-Civita en 1900 y sólo se popularizó en el ámbito de la física teórica en 1916 con la teoría general de la relatividad de A. Einstein. Aunque su utilización en la mecánica de medios continuos en un espacio euclídeo no resulta estrictamente necesaria, sí supone un avance claro y una ayuda a la interpretación independiente de los sistemas de coordenadas para las tensiones y deformaciones en el medio deformable y sus relaciones elásticas o de otro tipo.

El propio Félix Candela editó un libro con los apuntes del curso de Resistencia de Materiales de Luis Vegas. También lo hizo el entonces alumno Antonio García de Arangoá cuyos libros de apuntes [6,7] perviven en la biblioteca de la Escuela Superior de Arquitectura y son un ejemplo de claridad de ideas, rigor en el desarrollo y belleza en la exposición de la Teoría de la Elasticidad, de la Resistencia de Materiales y de sus aplicaciones en la Mecánica Estructural. Estos textos incluyen un desarrollo conciso y riguroso de los conceptos, aplicaciones desarrolladas con precisión y la explicación de los conceptos de energía elástica y los teoremas consiguientes de Castigliano, Betti y Maxwell. Precisamente fue García de Arangoá quien sucedió al malogrado Luis Vegas después de la guerra civil española en la cátedra de Resistencia de Materiales, publicando un texto [8] que hereda el cuerpo teórico instituido en la Escuela para la elasticidad y las estructuras y que ha servido de libro de texto hasta los años 1970.

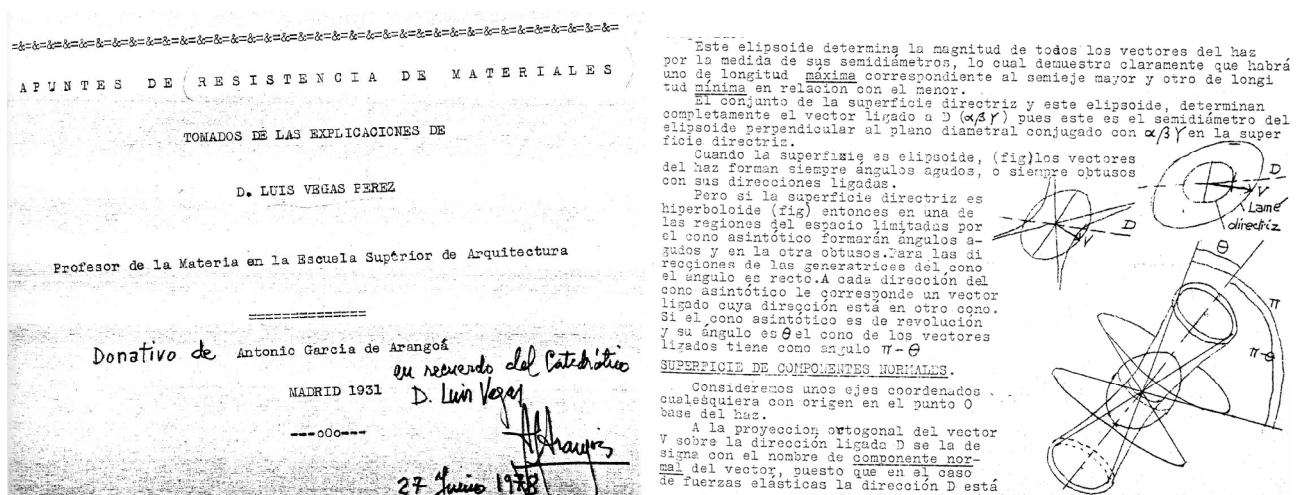


Figura 1: portada y página interior de los apuntes de Resistencia de Materiales [6] de Luis Vegas Pérez (1931) tomados por A. García de Arangoá.

De la exposición anterior deseo destacar el rigor y profundidad en la formación matemática y técnica que poseían los arquitectos en Madrid, lo que ciertamente les caracteriza y les dota de una capacidad especial no sólo para el entendimiento completo de la geometría y de los fenómenos resistentes de las estructuras, sino

que muy especialmente les confiere un potencial de generación de ideas para el diseño, una “*intuición educada*” para las propuestas formales. Esta capacidad es la que en ocasiones diferencia una propuesta arquitectónica fundada sobre un boceto cuya base sea únicamente el atractivo estético del dibujo, de una propuesta cuya forma responda a una eficacia funcional y resistente, basándose en esto el mérito de su expresividad. Es a este último grupo de Arquitectos al que pertenece Candela, sin duda en gran medida gracias a su formación en la Escuela de Madrid [5]: «*¡Cuántas veces no he dado gracias a la enseñanza profundamente teórica que se me impartió en la vieja Escuela de Madrid! Lo que la mayor parte de mis compañeros consideraba absurdo e ininteligible; las abstractas teorías sobre la distribución de esfuerzos y deformaciones en el entorno de un punto situado en el interior de un cuerpo elástico sometido a ciertas cargas, tenían para mí una indiscutible belleza. ...llenaban de poesía científica las arideces de una técnica cuyo objetivo final era la prosaica determinación de la sección necesaria en una pieza estructural.*

»*Es cierto que, para la estricta satisfacción de esta necesidad, basta con aprenderse unas cuantas recetas, pero el tiempo empleado en estudiar la Teoría de la Elasticidad me ha rendido frutos inapreciables en el ejercicio ulterior de la profesión que elegí y me situó en condiciones ventajosas con relación a otros que tuvieron un aprendizaje más concreto y práctico.*»

Es interesante citar asimismo las palabras de Candela en relación a la eterna discusión entre contenidos prácticos de la formación y la base teórica y científica, que son de absoluta actualidad en el contexto de modificación de los planes de estudios en la reforma de Bolonia [5]: «*... si no hay más remedio que seleccionar lo que razonablemente se puede enseñar en tan poco tiempo, yo me inclinaría por eliminar o aligerar los estudios prácticos o puramente profesionales, dando preferencia a las materias teóricas aunque no parezcan tener una relación muy directa con la práctica del oficio. Difícilmente podrá iniciarse su estudio en épocas más tardías, mientras que el oficio se aprenderá necesariamente después, en la obra o en el taller profesional, y será en ese momento cuando tengamos que estar preparados para especializarnos y para profundizar en aquellos temas que se nos antojen necesarios para completar nuestro desarrollo como profesionales y como seres humanos.*»



Figura 2: Nombramiento de Félix Candela como Doctor Honoris Causa, Univ. Politécnica de Madrid, 1994.

4. La defensa del Formalismo

La obra de Candela estuvo centrada en el estudio, análisis, proyecto arquitectónico, cálculo estructural y construcción de las cubiertas laminares. Como conoce cualquier ingeniero estructural las láminas rinden su eficacia debido a la propia geometría, a su forma. Este hecho llevó a Candela a publicar en 1985 una selección de sus textos alrededor de esta reivindicación, la «*defensa del formalismo*» [14].

La definición de «*formalismo*» la realiza de forma concreta como [15] «*... la investigación científica de la configuración espacial, sin dejar de incluir el análisis detallado de la estructura interna.*» En este mismo escrito establece rotundamente su relación con la mecánica estructural: «*La forma no puede ser arbitraria, sino que ha de satisfacer una serie innumerable de requisitos, ... De entre todos estos requisitos, quiero destacar los dos que considero más importantes en la elaboración de la forma arquitectónica: el factor estético y el factor estructural.*»

La reivindicación de la forma cobra especial importancia en las estructuras de hormigón, donde Candela es rotundo [16]: «Nos vemos obligados, aquí, a hacer una afirmación de apariencia un tanto brutal, pero que conviene decir de una vez por todas. El concreto armado no está hecho para trabajar a flexión en secciones de gran masa; concretamente en secciones rectangulares, a pesar de ser esta la manera habitual de utilizarlo. ...aproximadamente los dos tercios de la sección pétrea se convierten en un peso muerto que no efectúa ninguna función resistente, pero que sí contribuye a aumentar la sección que es necesario dar a la propia viga —o losa, que para el caso es lo mismo, y por supuesto de los elementos que la soportan— columnas y cimentación.» La consecuencia para Candela resulta obvia [9]: «Queda así enunciado un principio económico fundamental: hay que evitar, en lo posible, los esfuerzos de flexión, mediante la elección de la forma apropiada. ... Dicho de otro modo: la función estructural depende esencialmente de la forma...»

Estos principios llevan a Candela a denunciar sin ambages la degradación del diseño arquitectónico, denunciando con crudeza escándalos como el de la ópera de Sidney [17]: «Los arquitectos, hombres al fin, no pueden escapar de este clima surrealista en el que cualquier desafortunado gesto puede producir mundial, aunque generalmente efímera, notoriedad. ¿Para qué descender a tan prosaicos detalles como el de asegurarse que una estructura tiene posibilidades de ser construida? Quédese esta tarea para ayudantes de segunda categoría, sin que haya peligro de que tales consideraciones limiten la capacidad creativa del genio. La ópera de Sidney constituye un trágico ejemplo de las catastróficas consecuencias que esta actitud de desprecio por las más obvias leyes físicas puede acarrear.»

A pesar del profundo conocimiento de Candela sobre el cálculo estructural, o precisamente por ello, formuló muy claramente importantes críticas a la obsesión por el análisis y a la no consideración de las limitaciones de la elasticidad [18]: «La consecuencia inmediata de las consideraciones anteriores es: que los métodos basados en la teoría de la elasticidad no son apropiados para el análisis de estructuras hiperestáticas de concreto 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.»

No quiere decir esto que se deba despreciar el cálculo, que en paralelo a los factores estéticos, deben contribuir a la creación de la forma arquitectónica [15]: «Lo mismo pasa con el factor estructural. Los ensayos de racionalizarlo, pretendiendo que los cálculos estructurales sean capaces de darnos la forma de una estructura, olvidan también las limitaciones y la misión de la técnica analítica. Esta puede únicamente operar desmenuzando una forma y unas dimensiones previamente determinadas.»

5. Estudio técnico de algunas 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 estas 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 [9].

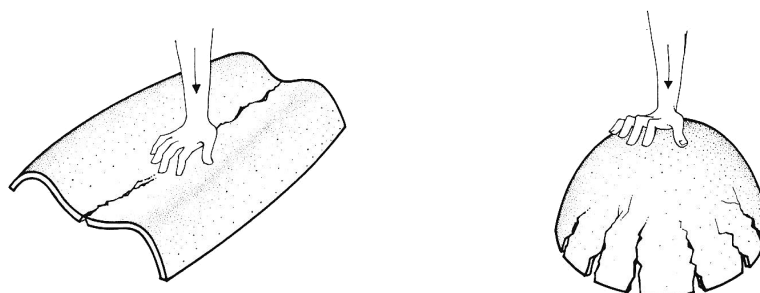


Figura 3: Efecto de la doble curvatura en las láminas que impide el desarrollo de esfuerzos de flexión [9]

Candela realizó su aportación personal al cálculo y diseño de las láminas de hormigón con forma de paraboloides hiperbólicos en una serie de artículos ([10, 11, 12]). De estos debe destacarse, además de su rigor y completitud formal, el sentido práctico de la formulación y sobre todo el enfoque dirigido a la comprensión del funcionamiento estructural y formal más que a los pormenores del cálculo, que también incluye.

La formulación empleada por Candela de las ecuaciones de membrana en coordenadas cartesianas sigue en lo principal la teoría de Pucher en 1937 [13]. 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 al 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 [11].

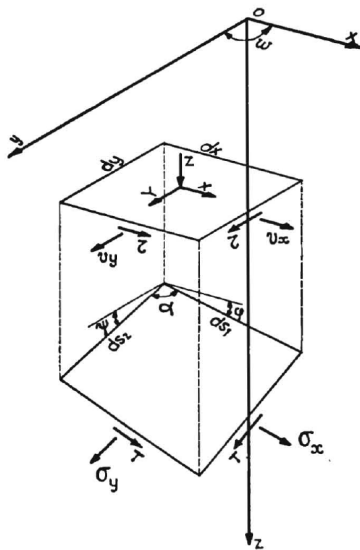


Figura 4: fuerzas y tensiones actuantes en un elemento de superficie, de [11]

Modelo de Elementos Finitos y Factor de membrana

En lo que sigue se estudian mediante modelos de elementos finitos algunas cubiertas laminares de Candela con forma de paraboloides hiperbólicos. El objeto aquí 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 en las siguientes figuras los mapas de un índice que proponemos para evaluar el comportamiento de membrana. También se muestran los mapas de tensiones principales de compresión y de tracción para entender el flujo de esfuerzos en las láminas.

Los cálculos se han realizado mediante el programa de elementos finitos ABAQUS [19] empleando elementos lámina 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 láminas tienen un espesor de 4 cm, con propiedades elásticas del hormigón $E=30$ Gpa, $\nu=0,2$, densidad 2500 kg/m^3 y 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). 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.

Paraboloides hiperbólicos básicos

Consideramos en primer lugar el clásico «paraguas» empleado profusamente por Candela, formado por cuatro cuadriláteros alabeados, cada uno de los cuales es un paraboloides hiperbólico. Es el caso denominado «A» por Candela [10]. En este análisis se plantean las ecuaciones diferenciales de equilibrio y se resuelven en función de las condiciones de contorno. Como ya se ha dicho, Candela remarca la importancia de dichas condiciones y en concreto para este paraguas determina (figura 5) que no puede existir un estado de membrana con el borde libre, ya que hay unas tensiones tangenciales no equilibradas.

El caso estudiado tiene unas dimensiones en planta de 8 m x 8 m y una profundidad de 1,6 m. En la figura 5 se muestra el mapa del índice de membrana en dos hipótesis, dejando el borde libre así como restringiendo el movimiento longitudinal en dicho borde, de forma que se transmitan las tensiones tangenciales que pida la lámina. Se comprueba que de esta manera el comportamiento de la lámina es considerablemente mejor, con índices de membrana más elevados, mejorando especialmente en los bordes y las esquinas libres. Los puntos con máxima componente de flexión son los bordes internos con forma de V, los cuales Candela efectivamente señala que deberían reforzarse como vigas de borde y armarse de manera adicional.

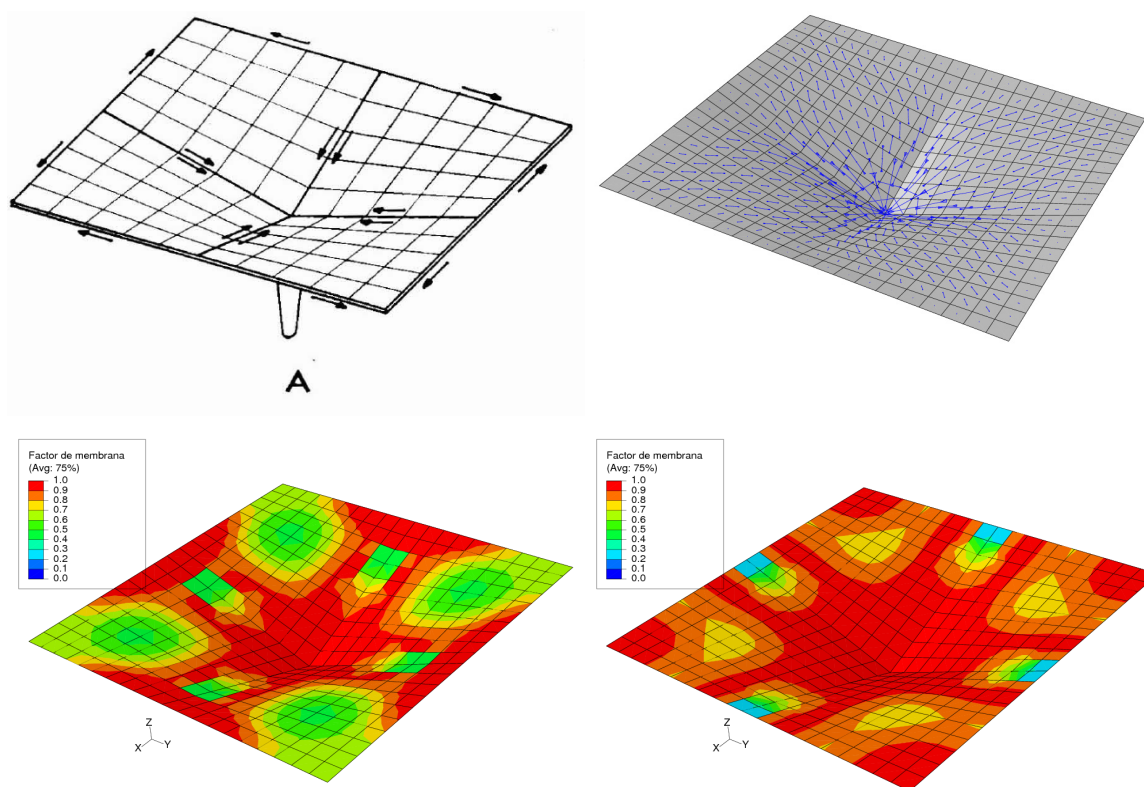


Figura 5: Cubierta tipo «A» formada por cuatro paraboloides hiperbólicos. En la fila superior, esfuerzos en los bordes libres en el análisis de Candela [10], y resultados de tensiones principales de compresión. En la inferior, índices de membrana con borde libre (izqda) y con borde restringido en dirección tangencial (dcha).

Se analiza a continuación la configuración «D» de paraboloides hiperbólicos de Candela [10]. Se trata de una cubierta con cumbreras horizontales también formada por 4 paraboloides, con las mismas dimensiones que el caso anterior (8m x 8 m y profundidad de 4 m) (Figura 6). En el análisis desarrollado [11] Candela resalta la importancia de las condiciones de borde y en particular los esfuerzos no equilibrados que aparecen en las cumbreras, por lo que o bien introducirían un comportamiento indeseado de flexión o será necesario reforzarlas con elementos de borde que transmitan las reacciones necesarias a la lámina. El análisis realizado por elementos finitos confirma este comportamiento, mostrándose el índice de membrana claramente degradado en estas zonas y en menor medida en los bordes libres con tensiones tangenciales sin equilibrar, siendo mínimo en el extremo de las cumbreras donde son mayores los esfuerzos verticales no equilibrados.

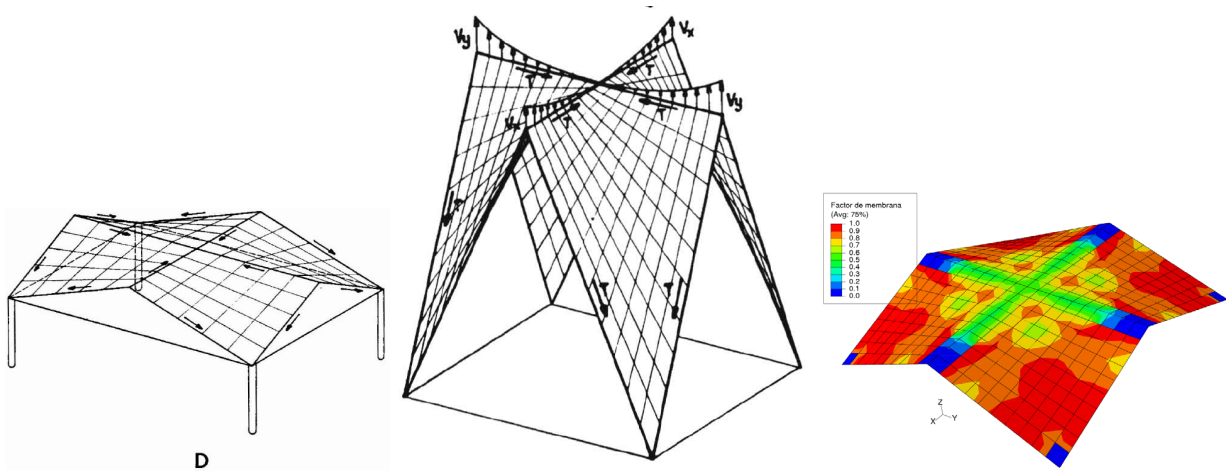


Figura 6: Cubierta tipo «D» formada por cuatro paraboloides hiperbólicos. A la izquierda, esquema de esfuerzos de Candela [10], y descripción de los esfuerzos no equilibrados en los bordes libres y en las cumbreras [11]. A la derecha, índice de membrana. De acuerdo con el análisis de Candela, en las cumbreras con esfuerzos no equilibrados se genera una flexión no deseada, siendo mínimo aquí el índice de membrana.

Restaurante Los Manantiales en Xochimilco

Hemos aplicado el mismo tipo de análisis a una de las obras maestras de Candela, el restaurante Los Manantiales en Xochimilco, México. Se trata de cuatro paraboloides hiperbólicos con bordes curvos, en los que Candela ya había estudiado y experimentado que los efectos no equilibrados en los bordes tienen menor importancia que en los de borde recto, pudiéndose obtener formas espectaculares al no precisarse vigas de borde.

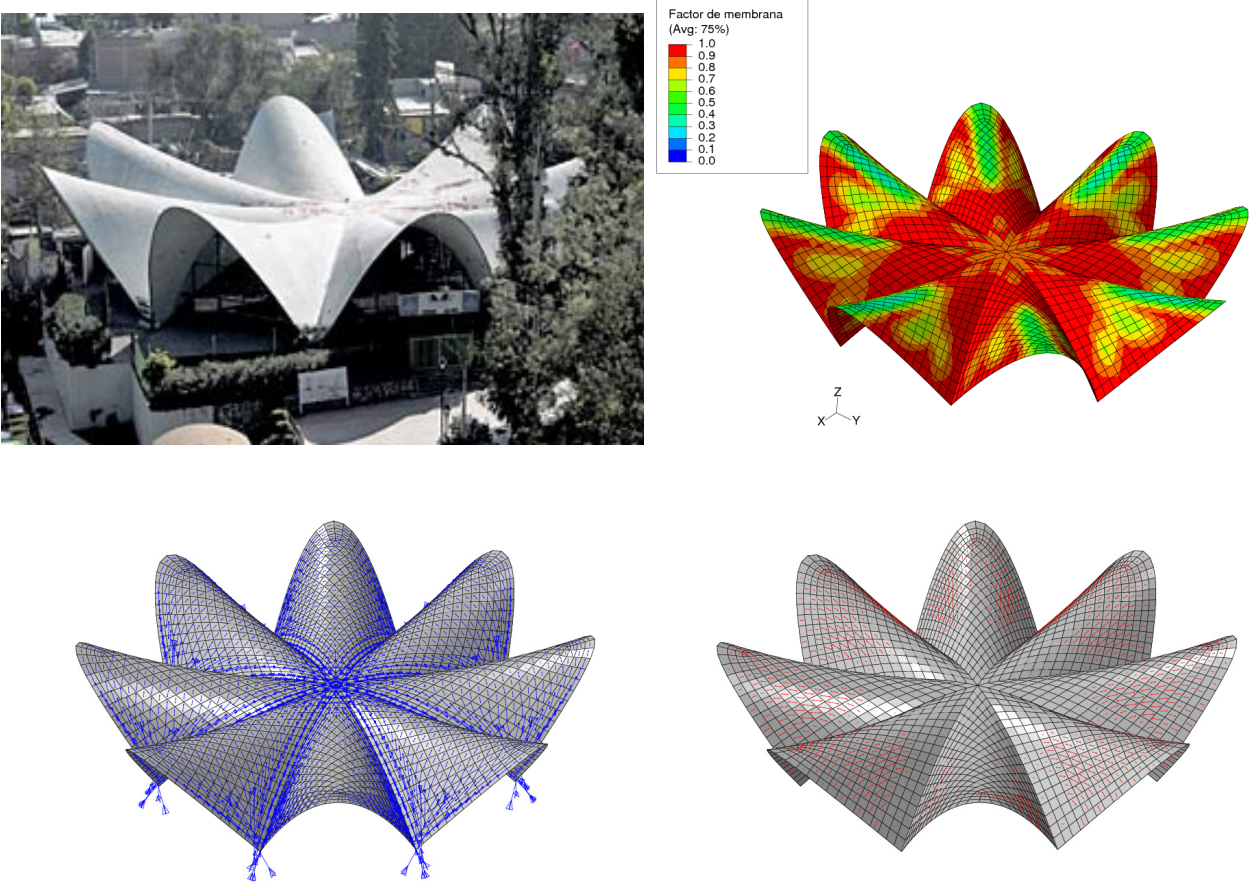


Figura 7: Cubierta del restaurante Los Manantiales en Xochimilco. En la fila superior fotografía de la obra y mapa del índice de membrana. En la fila inferior, mapa de tensiones principales de compresión y tracción.

Los datos geométricos para el modelo (figura 7) se han tomado del libro de Faber [2]. Los apoyos de las láminas son puntuales, zunchados mediante unas barras de acero en la cimentación, formando un octógono con un diámetro de su circunferencia inscrita de 30 m, y una altura del punto central de 5,84 m. Es de destacar que una copia de esta cubierta es la obra póstuma de Candela, el restaurante del Oceanogràfic en Valencia, España, terminado en 2002 por Santiago Calatrava con el cual colaboró, después del fallecimiento de Candela en 1997.

Del análisis realizado con elementos finitos (figura 7) se observa que, sin necesidad de ningún tratamiento especial en los bordes libres, se desarrolla un comportamiento de membrana bastante satisfactorio. En los bordes de intersección inferiores en V se han regruesado las filas de elementos adyacentes a 12 cm con objeto de conformar un elemento más rígido que funcione como viga arco y recoja las cargas de la lámina.

Iglesia de Nuestra Señora de Guadalupe en Madrid

En el año 1963 se construye la denominada popularmente “Iglesia de los Mexicanos” en Madrid, con proyecto de Enrique de la Mora y cálculos estructurales de Félix Candela. Colabora asimismo en la obra Jose A. Torroja Cabanillas, que amablemente nos ha proporcionado acceso a los planos y documentos originales de cálculo del proyecto. La cubierta (Figura 8) está formada por ocho paraboloides hiperbólicos, con un vértice central más elevado a semejanza de un sombrero mexicano. La base forma un octógono con círculo circunscrito de diámetro 53,74 m. Los paraboloides centrales están unidos mediante unas cristaleras sujetas por elementos metálicos.

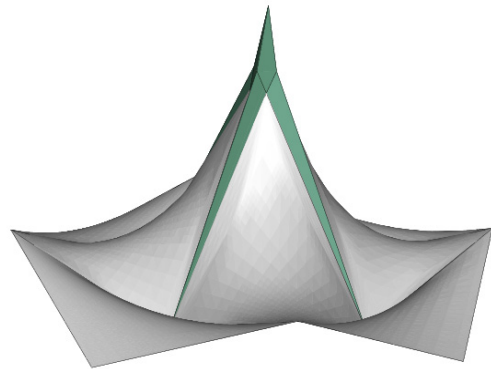


Figura 8: La iglesia de Nuestra Señora de Guadalupe en Madrid: fotografía y modelo de la cubierta.

En la figura 9 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 finitos los bordes exteriores se han considerado fijos de manera continua. Asimismo, las líneas de unión interiores entre los paraboloides centrales y los exteriores están regruesadas (a 12 cm) para formar vigas en V que recojan la carga de las láminas. En la figura 10 se muestra el mapa del índice de membrana, comprobándose su valor elevado en general con excepción de las zonas alrededor de las citadas líneas interiores en V.

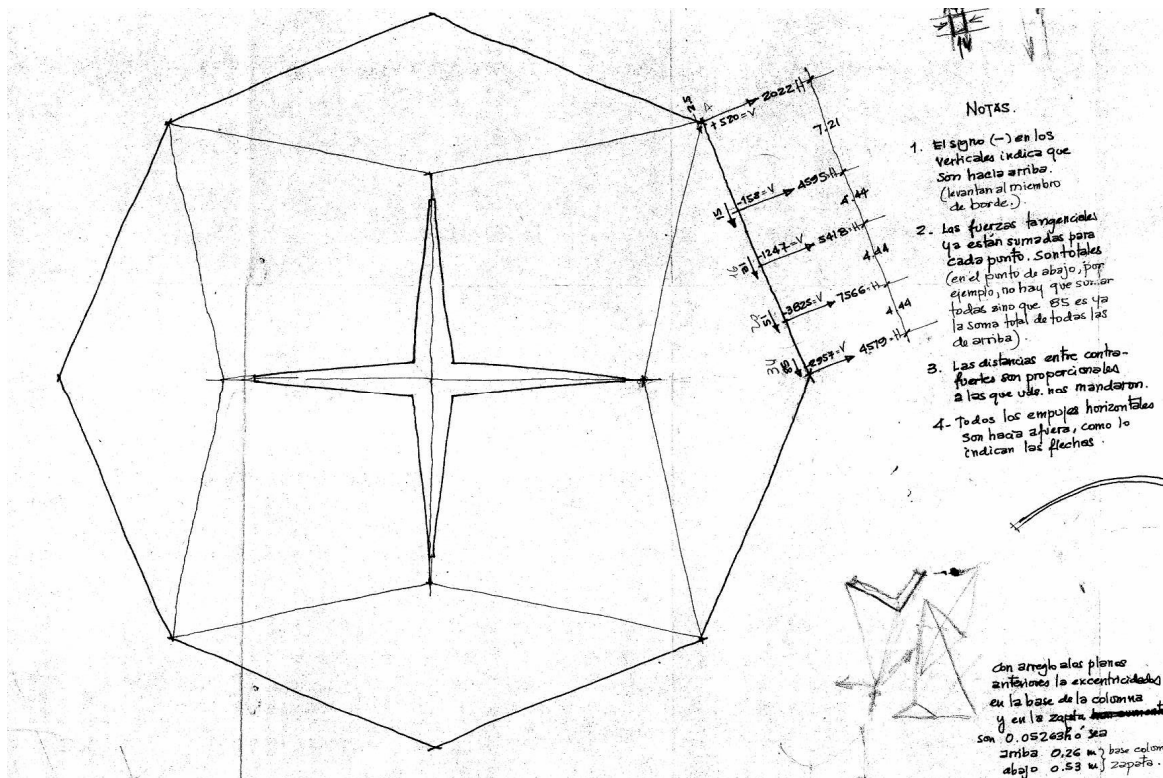


Figura 9: Cálculos de Candela para el proyecto de la iglesia de Ntra. Sra. de Guadalupe en Madrid, relacionados con las reacciones de borde (Cortesía de J.A. Torroja).

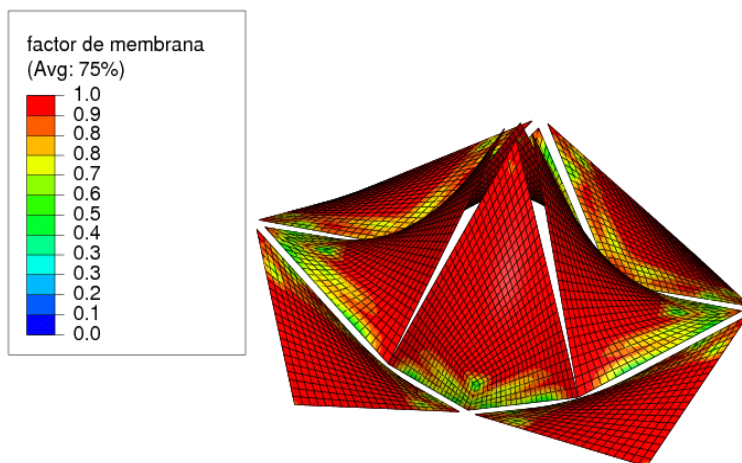


Figura 10: Factor de membrana de la iglesia de Nuestra Señora de Guadalupe en Madrid. Se observa un comportamiento muy bueno en general, siendo más bajo en los bordes de intersección inferiores.

6. Observaciones finales

Como colofón me sumo a las certeras palabras del Prof. D. Ricardo Aroca en 1994 [5], concluyendo que Candela es «...un genio real, no producto del despilfarro y de la moda, sino de la sencillez y de la economía, un constante cultivador del sentido común, un creador sin alardes y con un juicio certero sobre lo útil y lo posible.» Lo expuesto en este trabajo espero que sirva por una parte para reivindicar la formación científica y rigurosa como la base principal de un creador, en tanto que le permite una intuición educada, capaz de dominar los modelos matemáticos y emplearlos en sus justos términos conociendo sus limitaciones. Por último, los cálculos mediante modelos avanzados de elementos finitos 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.

7. Referencias

- [1] Félix Candela, Encuesta en la revista «Espacios.» México, 1955.
- [2] Colin Faber, «Candela: The Shell Builder.» Reinhold pub. Corp. New York, 1963
- [3] Maria Garlock y David Billington, «Félix Candela. Engineer, Builder, Structural Artist.» Yale University Press, New Haven CT, 2008.
- [4] Félix Candela, «Arquitectura y estructuralismo.» Ponencia en el Congreso de la Unión Internacional de Arquitectos, México, 1963.
- [5] Universidad Politécnica de Madrid, «Acto de investidura como Dr. Honoris Causa de D. Félix Candela Outeriño.» 10 de mayo de 1994.
- [6] Luis Vegas Pérez, «Apuntes de Resistencia de Materiales.» Tomados por D. Antonio García de Arangoá, Escuela Superior de Arquitectura de Madrid. 1931.
- [7] Luis Vegas Pérez. «Apuntes de Hormigón Armado.» Tomados por D. Antonio García de Arangoá, Escuela Superior de Arquitectura de Madrid. 1932.
- [8] Antonio García de Arangoá, «Elasticidad Teórica.» Escuela Superior de Arquitectura, 1944.
- [9] Félix Candela. «Estereoestructuras.» Espacios, N.º 17, México 1953.
- [10] Félix Candela. «Structural Applications of Hyperbolic Paraboloidal Shells.» ACI Journal, Proceedings, Vol 51, ene. 1955.
- [11] Félix Candela. «General Formulas for Membrane Stresses in Hyperbolic Paraboloidal Shells.» ACI Journal, Proceedings, Vol 57, oct. 1960.
- [12] Félix Candela, «The hyperbolic paraboloid.» en Colin Faber, «Candela: The Shell Builder.» Reinhold pub. Corp. New York, 1963.
- [13] A. Pucher. «Die berechnung von doppelt gekrummten schalen mittels Diferenzer gleichungen.» Der Bauingenieur, Vol. 18, N.ºs 9-10, Berlin, 1937.
- [14] Félix Candela. «En defensa del formalismo y otros escritos.» Xarait ediciones, Bilbao, 1985.
- [15] Félix Candela, «Dos nuevas iglesias en México.», conferencia en la Casa del Arquitecto, México abril 1956.
- [16] Félix Candela, «Divagaciones estructurales en torno al estilo.» Espacios, México, 1953.
- [17] Félix Candela, «El escándalo de la ópera de Sidney.» Arquitectura, Madrid, 1968.
- [18] Félix Candela, «Hacia una nueva filosofía de las estructuras.» Student Publications of the School of Design, North Carolina State College, Raleigh NC 1955.
- [19] Simulia inc., ABAQUS v6.8 Finite Element Analysis Program, www.abaqus.com, 2008.