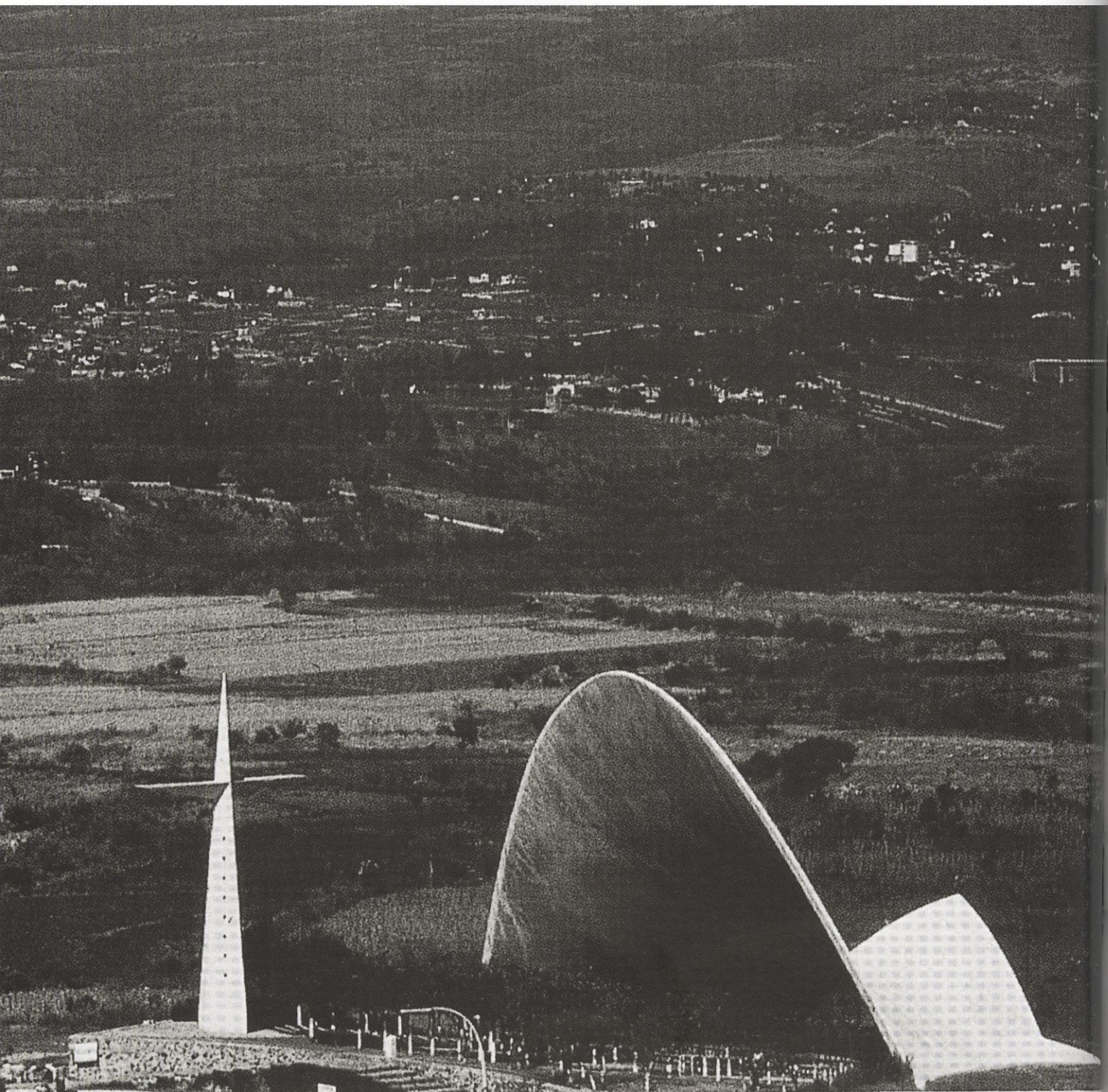


# Félix Candela y el borde libre

El caso de la capilla de Palmira en Cuernavaca /  
Alfonso Basterra Otero

Doctor en Arquitectura. Profesor de la Escuela  
de Arquitectura de Valladolid, España

Los análisis y modelos en computadora fueron realizados con la colaboración  
de los ingenieros Ángel Chamizo de la Concha y Eloy Gutiérrez Gómez.



Capilla de Palmira, Cuernavaca, 1958-59. Arquitectos: Guillermo Rosell y Manuel Larrosa.

## Los paraboloides hiperbólicos de Félix Candela dejaron profunda huella en la arquitectura mexicana de la segunda mitad del siglo xx. Alfonso Basterra, especialista en la obra del maestro hispano-mexicano, nos da un panorama general de los cascarones de borde libre y analiza uno de los más representativos: la capilla de Palmira.

En 1958, dos jóvenes arquitectos, Guillermo Rosell y Manuel Larrosa, entraron en contacto con un constructor mexicano de origen español para la construcción de una capilla destinada a servir al nuevo fraccionamiento Palmira en Cuernavaca,<sup>1</sup> la “ciudad de la eterna primavera”. El constructor era Félix Candela Outeriño, quien, al frente de su empresa Cubiertas ALA, disfrutaba por esos años de notable éxito profesional y comenzaba a ganar fama internacional como calculista y ejecutor de estructuras laminares de concreto armado, conocidas popularmente como cascarones.

Se conjuntaron entonces tres factores que posibilitaron la construcción de esta singular iglesia: por una parte, las posibilidades que se estaban abriendo en los prolegómenos del Concilio Vaticano II, no solamente en cuanto a los importantes cambios de orden litúrgico, sino también, dando entrada al arte moderno en el ámbito eclesiástico, lo cual el inteligente obispo de Cuernavaca ya había tenido ocasión de ejercitar invitando al escultor Mathias Goeritz para participar en la propia catedral. Por otro lado, se contaba con la reconcentrada fuerza económica del promotor y con el entusiasmo del equipo técnico empeñado en construir la estructura de borde libre de mayor dimensión ejecutada hasta esa fecha.

Algunos años antes, Candela ya había construido estructuras de este tipo, entre las que cabe destacar la cubierta para la Bolsa de Valores,<sup>2</sup> con Enrique de la Mora y Fernando López Carmona. Pero será especialmente en la iglesia de San Antonio de las Huertas, en 1956, y de nuevo como brillante fruto de la colaboración de los tres maestros,<sup>3</sup> donde Candela rentabiliza los razona-

mientos ya empleados en la Bolsa de Valores y propone la eliminación de los refuerzos de borde. Sólo la forma parabólica hiperbólica permitió la deducción por la cual pudo llegarse a este resultado. Dicha geometría, reglada o generada por traslación, no desarrollable y anticlástica, ha testimoniado que goza de recursos mecánicos suficientes para trabajar eficientemente como estructura, incluso —como veremos—, sin elementos de rigidización. Su trabajo en unas direcciones como arcos y en otras como cables garantiza un trasvase óptimo de la carga hacia los apoyos, al tiempo que permite reducir hasta límites insospechados los espesores.

Se ha escrito que el establecimiento del borde libre se encuentra ya en las estructuras de paraguas. Pero dicha afirmación es, cuando menos, imprecisa, pues, en tales casos no solamente se trata de bordes rectos, primordialmente horizontales, sino que, y esto es lo importante, la ausencia de refuerzos es sólo aparente: el trabajo mecánico de la estructura requiere una considerable resistencia a tracción, encomendada a un conjunto de barras de acero que toman el esfuerzo tangencial acumulado en los bordes, aún sin manifestarse exteriormente.<sup>4</sup> Sin embargo, Candela intuye que el “hypar” (apócope inglés para paraboloides hiperbólico) podía conducir estas tensiones de borde hacia el interior, por medio del doble conjunto de generatrices trabajando respectivamente como puntales o tensores, y disponiendo los necesarios refuerzos en aristas de unión de láminas o bordes interiores más o menos ocultos:

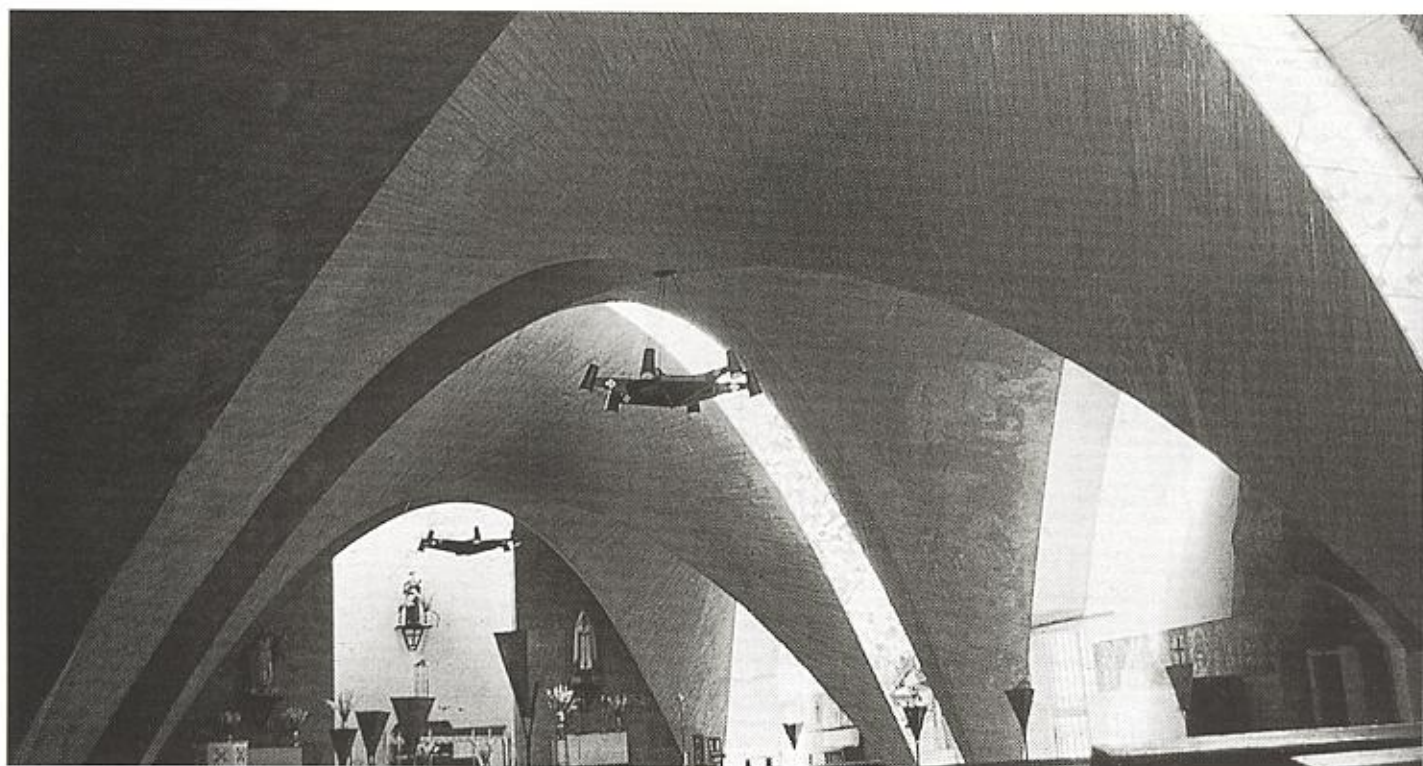
Toda esta historia puede parecer un poco ingenua, pero ilustra las limitaciones de la mente

<sup>1</sup> La entrada del fraccionamiento es una doble marquesina a base de un apuntado paraboloides hiperbólico construido por Candela con Rosell y Larrosa. Hoy ha quedado absorbido por el crecimiento turístico de Cuernavaca y no se reconoce como tal. Calzada Palmira, a la entrada desde la autopista México-Acapulco.

<sup>2</sup> En esta estructura aún se conservaban los arcos de rigidez, aunque fueron hábilmente escamoteados con la ligera inclinación de las parábolas extremas hacia el centro de la cubierta para permitir la entrada de luz superior; artificio de indudable maestría imputable al conjunto de cerebros que convergieron por primera vez en este edificio: Candela, De la Mora y López Carmona.

<sup>3</sup> Mientras Colin Faber (CECSA, 1970) cita a los dos arquitectos mexicanos como autores del proyecto, en otros textos se considera arquitecto de este templo exclusivamente a Enrique de la Mora (Ver Saito, Yutaka: *Félix Candela*. Toto Shupan. Tokio, agosto 1995. y AA. VV.: *Félix Candela*. Catálogo de la exposición. Depósito elevado del canal de Isabel II. Madrid, 1994. Comisario: Miguel Seguí).

<sup>4</sup> En los últimos paraguas, Candela —y posteriormente muchos de los que han empleado dicha tipología estructural— utilizó perimetralmente un perfil de acero laminado normalizado de sección en “U”, que servía de armadura de tracción a la vez que resolvía la flecha que aparecía en ocasiones en las esquinas de los paraguas debido a su escasa curvatura en esa zona, proporcionando al borde una mucho mejor apariencia.



humana ordinaria. Todo es tan sencillo cuando se sabe, que produce enojo no haberlo percibido al primer vistazo, en lugar de tener que realizar un trabajoso proceso de pensamiento. Sabía yo que el borde libre era una idea práctica mucho antes de que comprendiera cómo trabaja, y de que me atreviera a construirlo.<sup>5</sup>

Con las estructuras de borde libre Candela alcanza la plenitud de su carrera. Ninguno de los tipos estructurales por él manejados contienen tanto de su filosofía como los paraboloides hiperbólicos de borde libre. Como nos proponemos demostrar en este artículo, no sólo desde un punto de vista estructural, sino también estético y expresivo, ninguna de sus estructuras explica tan bien como éstas su personalidad y su particular mundo arquitectónico.

A San Antonio de las Huertas seguirían otras estructuras, no menos notables, durante los años más fructíferos de la breve pero explosiva carrera de Félix Candela como constructor de cascarones; al principio, no obstante, las estructuras de borde libre llevadas a cabo fueron pequeñas, aunque hermosísimas, piezas arquitectónicas. La desgraciadamente desaparecida cubierta del pequeño Cabaret La Jacaranda<sup>6</sup> en los jardines del Hotel El Presidente de Acapulco, de 1957, con proyecto del arquitecto Juan Sordo Madaleno, se forma con tres ligerísimos fragmentos de *hypar* en los que la proyección vertical de las generatrices forman triángulos equiláteros de unos dieciocho metros de lado, en un conjunto rigidizado gracias a tres costillas parabólicas radiales que fluyen suavemente hacia los puntos de apoyo. Su elegancia y privilegiada situación junto al mar, entre las rocas vivas de un frondoso y selvático jardín, debían de constituir un hermosísimo conjunto:

Desde la azotea del hotel, tiene el aspecto de una tortuga arrojada por la marea; desde el mar, de cerca, el de una vela tensa al viento.<sup>7</sup>

La Jacaranda ha sido considerada una de las estructuras más adelantadas a la época de Candela<sup>8</sup>, desapareció en los primeros años setenta. Su lugar es ocupado actualmente por otra torre del hotel, afortunadamente, de ella han quedado algunas hermosas fotografías. Aunque se aprecia con dificultad, en esta estructura Candela ubicó el vértice de los tres paraboloides por debajo del punto de encuentro de sus aristas de intersección, lo que origina que estas sean en parte cóncavas y en parte convexas.

La cubierta del restaurante Los Manantiales (1957-58), en Xochimilco, D.F., probablemente sea la más simbólica de todas las construidas por Candela y Cubiertas ALA. Con seguridad es la más difundida en las publicaciones especializadas, tanto en el momento de su construcción como posteriormente. Considerada por su autor como la más significativa, también es la más imitada.<sup>9</sup> No sólo la idea formal de la cubierta, su cálculo y su esmerada ejecución, sino muchos de los magistrales detalles del edificio, han hecho de Manantiales un hito en la historia de la arquitectura del siglo XX. La intersección de cuatro "hypars" formando una bóveda de arista octogonal genera en planta el típico motivo árabe, idea de la que, al parecer, es responsable el propio Colin Faber,<sup>10</sup> quien por aquella época se encontraba trabajan-

<sup>7</sup> Faber, Colin, Op. Cit. pág. 214.

<sup>8</sup> Quintás, Valentín. *Estructuras especiales en edificación. Análisis y cálculo*. Segunda parte. Editorial Rueda, S.L. Madrid, 1996, pág. 357.

<sup>9</sup> Resultó polémica la reinterpretación de esta estructura realizada por el ingeniero Jörg Schlaich en 1977 para la Federal Garden Fair de Stuttgart del citado año, considerada por Frei Otto un auténtico insulto. Schlaich, y su ayudante Wolfgang Menz, defendieron la idea como un tributo a las cualidades estructurales de la estructura original. Ver Holgate, Alan. *The Art of Structural Engineering. The work of Jörg Schlaich and his team*. Ed. Axel Menges. Stuttgart/London, 1997. También puede visitarse URL <http://www.sbp.de> [Consulta: 16 de enero de 2001].

<sup>10</sup> Aunque él no lo cita en su propio libro, Faber debió ser el responsable de la primera idea. El propietario original era un asturiano apodado "Pepón" y originalmente fue un restaurante muy modesto. Ver Basterra Otero, Alfonso y Valero, E., "La aventura Mexicana. Entrevista a Félix Candela", *Arquitectura Viva*. Nº 58. Madrid, enero-febrero 1998.

<sup>5</sup> Faber, Colin, *Candela, the shell builder*. Reinhold. Nueva York, 1963. En español: *Las estructuras de Candela*. Compañía Editorial Continental, S.A. México D.F., 1970, pág. 206.

<sup>6</sup> Boletín de la IASS. Nº 71-72, pág. 34.

Iglesia de San Antonio de las Huertas. México D.F., 1956. Arquitectos: Enrique de la Mora y Fernando López Carmona.

do en la oficina de Cubiertas ALA. El proyecto arquitectónico corresponde a Joaquín y Fernando Álvarez Ordóñez, pero la paternidad de Candela, por más que en su momento le molestara al primero, es evidente y se intuye en muchos de los detalles del edificio, resueltos con una maestría indudable. Candela siempre los reivindicó como uno de los mayores aciertos de esta obra; por ejemplo, las gráciles curvas que resuelven la evacuación de las aguas de la cubierta hacen que ésta parezca levitar y no apoyarse sobre el suelo. En Manantiales se manifiesta con enorme fuerza expresiva la esencia de las posibilidades arquitectónicas y estructurales de los cascarones parabólico hiperbólicos. Se adivina una meta alcanzada, un estado de desarrollo y madurez conseguido a través de un particularísimo proceso de perfeccionamiento.

Este edificio ha sufrido desde su construcción diversos avatares, frente a los que ha demostrado esmerada resistencia. Además de los diversos movimientos sísmicos acaecidos desde su edificación,<sup>11</sup> su superficie exterior fue tratada con una imprimación impermeable de color rojo y algunas ofensivas construcciones auxiliares fueron adosadas al edificio, rompiendo el original

<sup>11</sup> Desde 1960 hasta hoy la región de México D.F. ha soportado 2546 terremotos de grado superior a 4,5 en la escala de Richter, de los cuales seis fueron superiores al grado 7,5; entre ellos el trágico de septiembre de 1985. Ante éstos, las estructuras construidas por Candela han demostrado una considerable resistencia. Fuente: Servicio Sismológico Nacional, UNAM. [En línea, consulta: 16 de mayo de 1998] URL: <http://sismo1.ssn.unam.mx/~yi/ssn/datos.html>

encanto de esta singular estructura. Afortunadamente, en los últimos años se han acometido obras de restauración, en las cuales ha intervenido la arquitecta española Elisa Valero Ramos, y que han consistido, entre otras cosas, en despejar al edificio de perturbadores elementos añadidos y devolverle parte de su sugestivo aspecto.

En el jardín del Hotel Casino de la Selva, en Cuernavaca, Morelos, durante 1959-60, se construyó un auditorio, según proyecto de Jesús Martí, viejo amigo de Félix Candela, con una estructura claramente influida por la de Xochimilco. Es de dimensiones semejantes, si bien su arco de borde es ligeramente mayor que aquél y los elementos parabólico hiperbólicos que se encuentran en este caso son cinco. Desdichadamente las instalaciones hoteleras han sido cerradas y sus edificios abandonados, y han sufrido en los últimos años un acelerado deterioro.

Unas de las mayores, y más espectaculares, bóvedas por arista con borde libre construidas por Cubiertas ALA fueron las de la planta embotelladora de Bacardí (1960),<sup>12</sup> en Cuautitlán, al norte de la ciudad de México.

<sup>12</sup> Una detallada exposición del cálculo de esta estructura puede encontrarse en un artículo publicado años después por uno de los más cercanos colaboradores de Candela. Ver Tonda, Juan A.: Bóvedas de cascarón para la planta de Bacardí en México. *Revista Inyco*, vol. Nº 60. México D.F., enero-febrero de 1973. Obsérvese que inicialmente sólo se construyeron tres bóvedas, añadiéndose, en una segunda fase, otras tres del mismo tamaño y tipología. En la misma fábrica de Bacardí, Candela también ejecutó toda una serie de edificaciones auxiliares, que han quedado un tanto ensombrecidas ante la espectacularidad de las naves de embotellado principales, pero que conforman un variado muestrario de las más características estructuras industriales de su autor.

Cubierta de la pista de baile La Jacaranda, Hotel El Presidente. Acapulco, 1957. Arquitecto: Juan Sordo Madaleno. Hoy desaparecida.





Terminal Lambert del aeropuerto de Saint Louis, 1955.  
Arquitecto: Minoru Yamasaki. Ingeniero: Anton Tedesko.



Construidas junto al edificio de oficinas, única obra de Mies van der Rohe en México, permanecen excelentemente conservadas y aún reflejan la espectacularidad propia de la maestría con la que Candela supo resolverlas. Con esta obra, el autor parece querer responder a algunas realizaciones recientes efectuadas en los Estados Unidos —especialmente la terminal Lambert del aeropuerto de Saint Louis, de Minoru Yamasaki y el ingeniero Anton Tedesko<sup>13</sup>—, mediante la extrema delgadez del borde en relación con las dimensiones de las bóvedas, del orden de treinta metros de luz. Pero, para unas dimensiones y luces semejantes, la terminal aeroportuaria norteamericana tiene una geometría cilíndrica, lo que conlleva relevantes nervaduras y un grosor de unos quince centímetros, muy lejos por lo tanto, de lo que Candela entendía como un verdadero cascarón.

De unas dimensiones antagónicas, a modo de pequeño opúsculo en el cual demostrar cómo la pericia alcanzada no consistía exclusivamente en batir anteriores logros mediante alardes estructurales de cada vez mayores dimensiones o complejidad, sino en expresar arquitectónicamente las capacidades formales y estéticas de una manera de entender la arquitectura, despojada de toda exuberancia formal, pero con una fuerza expresiva superior, se construyó en 1959-60 la pequeña oficina de ventas, en Guadalajara, Jalisco, según proyecto arquitectónico de Alfredo Terrazas de la Peña.

Volvamos a la capilla del mirador de Palmira, en Cuernavaca. Si el recóndito rincón selvático en el que se ubica Manantiales, rodeado de pequeños canales y jardines flotantes, constituye un entorno particular al que una estructura singular responde en armonioso diálogo, la privilegiada colina sobre la ciudad de la eterna primavera tiene la fuerza suficiente como para requerir una estructura igualmente potente. Así, su estructura se concibió

como un espectacular cascarón basado en un único paraboloides hiperbólico. El enorme tamaño de la boca parece absorber la atención de los espectadores que, conducidos por la geometría de la forma hacia la situación del púlpito, tienen como escenario de fondo la enorme amplitud abierta del valle de Cuernavaca. El proyecto arquitectónico, debido a los arquitectos mexicanos Guillermo Rosell y Manuel Larrosa, tiene alguna referencia a la escenografía griega clásica y contaba, en la parte superior de la boca grande, a la altura original de unos veinticuatro metros, con una serie de calados que formaban una imagen decorativa en la parte ya casi vertical del manto. Ocurrió que en el descimbrado se produjo el derrumbe de esta parte de la estructura, sin consecuencias personales pero con la consiguiente alarma de las partes implicadas. En la reunión que se verificó en el propio lugar del siniestro pocas horas después del incidente, Candela, que parecía el más tranquilo de los jóvenes técnicos, tuvo que advertir para serenar los ánimos que él “cobraba sus obras al doble porque algunas veces se caen y hay que rehacerlas”.<sup>14</sup>

Como consecuencia de este incidente, se decidió modificar el proyecto, suprimiendo cualquier discontinuidad en la lámina, rebajando unos seis metros la altura de la boca e introduciendo un regreuso rigidizante en la zona delantera que confiere al conjunto una considerable seguridad al pandeo y al viento transversal, lo cual, tras el incidente relatado, parecía más que conveniente. En el archivo Candela custodiado en la Avery Library de la Universidad de Columbia (Nueva York), se conserva el plano que incluimos y que es fiel reflejo de esta reforma.

Finalmente, en obra fue eliminada la viga de rigidización que apreciamos en el plano reformado, por problemas constructivos evidentes con la cimbra, regreusando levemente, como se ha dicho, el borde por detrás del mismo. Observemos por último los dibujos anteriores superpuestos entre sí y con una fotografía tomada de la estructura realmente construida para apre-

<sup>13</sup> Anton Tedesko (Alemania, 1933 - Seattle, EE.UU., 1994) había estudiado en el Politécnico de Viena, después trabajó durante dos años en Dyckerhoff & Widmann, en Wiesbaden, donde coincidió con Dischinger, Finsterwalder, Rüsich y Flüggé. Fue enviado por la propia empresa a los Estados Unidos con el fin de promocionar la construcción de estructuras laminares de hormigón armado, en colaboración con la empresa Roberts & Schaefer. Se convirtió así en uno de los más significativos constructores de cascarones en los EE.UU.

<sup>14</sup> Basterra Otero, L.A., “Entrevista a Manuel Larrosa”. México D.F., abril de 1998. Inédita.

Con las estructuras de borde libre Candela alcanza la plenitud de su carrera. Ninguno de los tipos estructurales por él manejados contiene tanto de su filosofía como los paraboloides hiperbólicos de borde libre; ninguna de sus estructuras explica tan bien como éstas su personalidad y su particular mundo arquitectónico.

ciar las diferencias antedichas, subrayando que ninguno de ellos corresponde con el dibujo de esta estructura más conocido hasta la fecha.<sup>15</sup>

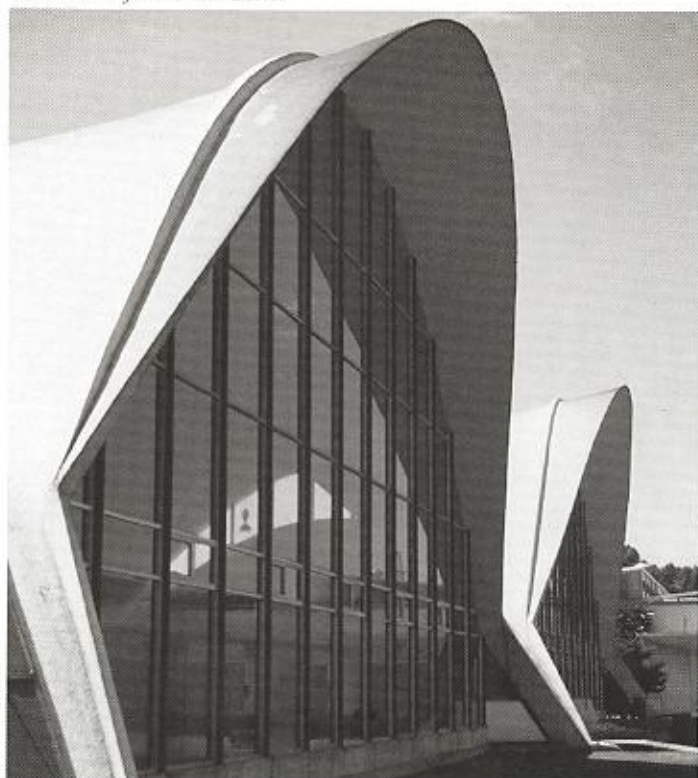
La lámina de hormigón tiene un espesor constante de cuatro centímetros y se empotra en el suelo por dos de sus lados, así como en dos rígidas vigas de borde, de sección rectangular y directriz en forma de arco quebrado, que la limitan en la parte trasera. Al contrario que la del borde delantero, estas jácenas fueron previstas desde la concepción del proyecto, y su presencia conlleva la consideración de un único borde libre —el delantero—, con el resto de la lámina empotrada en todo su perímetro. Si las suprimiéramos el problema sería, mediante la teoría de la membrana empleada por Candela, analíticamente indeterminado, dado que existirían líneas generatrices con sus dos extremos en sendos bordes libres, no existiendo condiciones suficientes para plantear el equilibrio y obtener las constantes de integración para dichos puntos.

Recordemos que para dicho análisis partimos de la consideración de que las deformaciones son suficientemente pequeñas como para poder ser despreciadas. Pero es evidente que está en la naturaleza de la resistencia de los materiales que éstos han de sufrir alguna para poder resistir tensiones generadas por sollicitaciones externas. Actualmente, el Método de los Elementos Finitos y el desarrollo de poderosas herramientas informáticas basadas en él, permiten calcular este tipo de estructuras considerando los fenómenos de deformación y de flexión. En la tesis doctoral del abajo firmante<sup>16</sup> se investigó con diferentes modelos para aproximarnos al comportamiento real de esta y otras estructuras y su comparación con los cálculos efectuados en su día por Félix Candela. Como consecuencia de dichos análisis pudimos deducir cómo el simple peso propio de las vigas de borde traseras generan una flexión en éstas que arrastra y tira de la

membrana, observándose fuertes flexiones en las zonas próximas al borde posterior. La compatibilidad de deformaciones entre lámina y vigas obliga al manto a seguir a éstas en su deformación, generándose en éste dos zonas que actúan como tirantes en tracción.

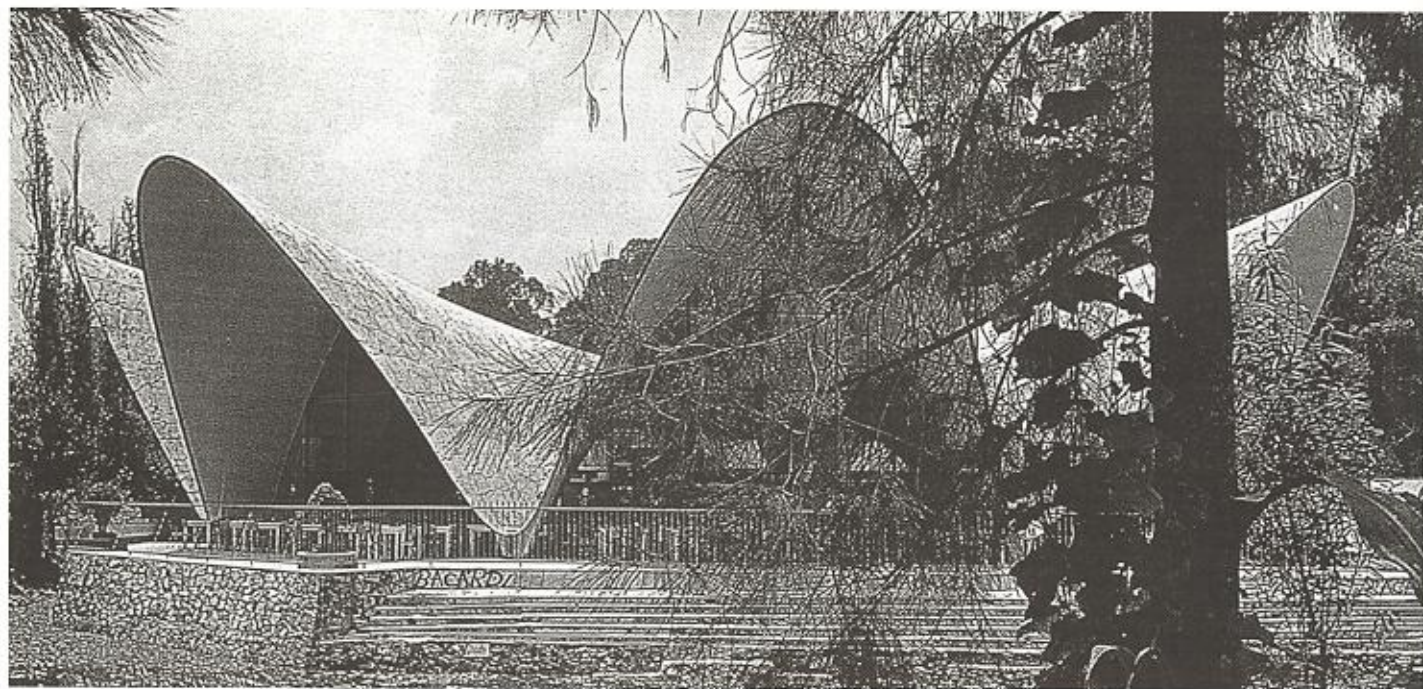
Deducimos con claridad que las vigas de borde no son tales refuerzos, sino masivos, perjudiciales e inútiles elementos que obligan a la lámina de hormigón a estirarse y fisurarse, recordándonos que la eficacia de estas estructuras viene dada no por elementos singulares sino por su propia forma que, gracias a la doble curvatura, encuentra un camino fácil por el cual transmitir las cargas, sin necesidad alguna —en este caso— de este tipo de elementos. Por otro lado, también puede apreciarse en las figuras la influencia de la viga de borde, afortunadamente no afecta a toda la estructura y en cuanto nos alejamos lo suficiente del borde trasero los resultados no difieren sustancialmente de los obtenidos con otros modelos.

Detalle de planta embotelladora Bacardí. Tultitlán, Estado de México, 1960. Foto: Juan I. del Cuelo.



<sup>15</sup> Faber, Colín, Op. Cit. En la pág. 228 se acota la altura de la boca grande como 21,90 metros.

<sup>16</sup> Basterra Otero, Alfonso: *Las estructuras arquitectónicas de Félix Candela. Una revisión actual.* Tesis doctoral inédita Universidad de Valladolid. 1998.



Restaurante Los Manantiales, Xochimilco, 1958. Arquitectos: Joaquín y Fernando Álvarez Ordoñez.

### Conclusiones

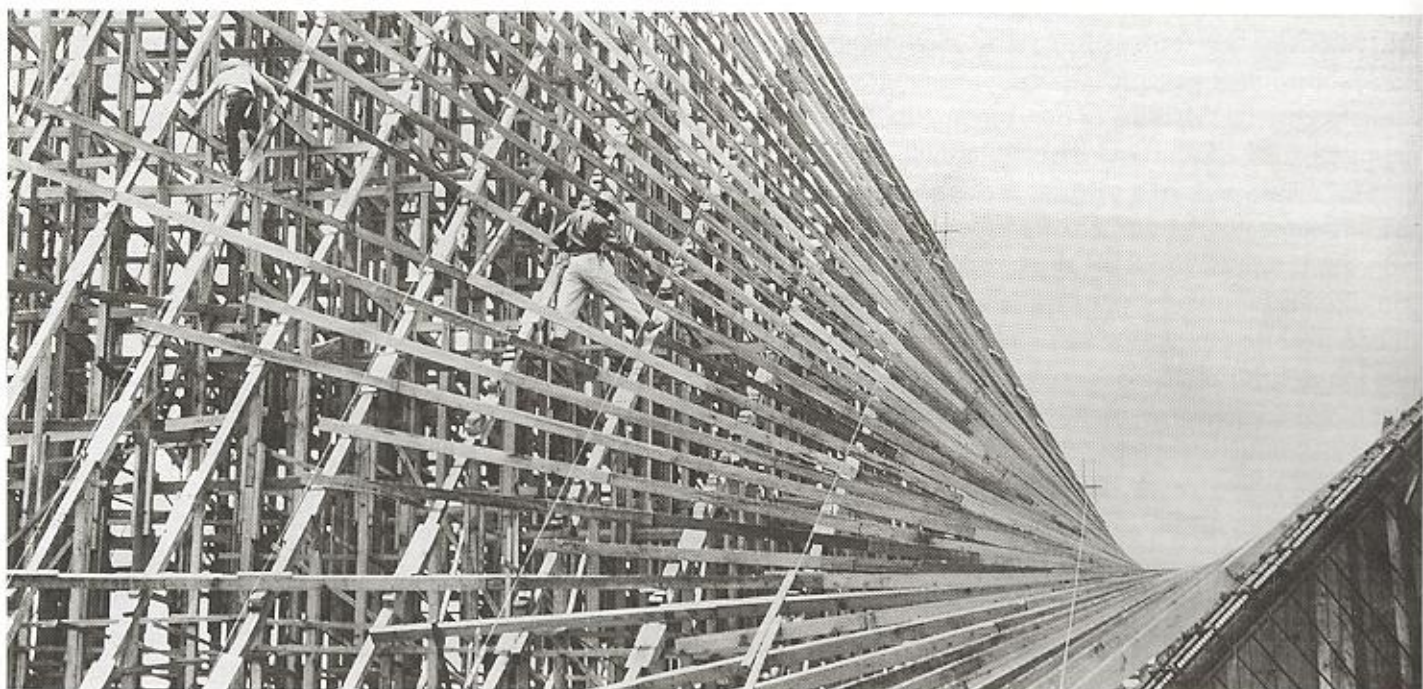
En plena madurez y tras una experiencia vital tan singular como enriquecedora, fue a partir de la fundación de la empresa constructora familiar Cubiertas ALA cuando Félix Candela, ejerciendo profesionalmente como constructor, tuvo a su disposición una poderosísima herramienta para comprobar si sus intuiciones eran ciertas mediante la prueba irrefutable de llevarlas a la práctica. La osadía con que Candela se enfrentó a sus realizaciones, apoyándose en unas bases de cálculo establecidas sólo teóricamente, resulta impresionante y constituye esa condición imprescindible para la superación de las limitaciones ideológicas, conceptuales y personales que los pioneros de cada actividad humana consiguen traspasar para avanzar un paso más en todo desarrollo.

Candela, progresivamente, va tomando conciencia de que, para estructuras de luces moderadas, los procedimientos analíticos entonces usuales admitían enfoques no convencionales. Su particular proceso de decantación de fórmulas y soluciones anteriores, aplicadas a condiciones nuevas y peculiares, entreaña de

suyo una creación, especialmente cuando, como consecuencia y con indudable maestría, se hace coincidir la realidad con las hipótesis preestablecidas, en un proceso inverso al habitual. Efectivamente, Candela no se limitaba a calcular una estructura previamente diseñada a la manera en que tantos ingenieros afrontan el problema cotidianamente, sino que su objetivo era formalizar en la realidad construida aquellos presupuestos que había precisado establecer para haberla calculado y que tenían que ver especialmente con la geometría, la escala y los elementos de borde.

Los primeros éxitos, que rápidamente recorrieron el mundo en las páginas de las revistas internacionales, le aportaron la suficiente seguridad como para revelarse abiertamente contra el corpus teórico que tanto esfuerzo le había costado dominar. Así, comenzó a defender públicamente el conjunto de las simplificaciones que permiten la aplicación de la teoría de la membrana en estructuras de forma y dimensiones adecuadas, haciéndolo siempre en términos de economía y desde la perspectiva del constructor, condición en la que gustaba

Cimbra para el cascarón de la capilla abierta de Palmira (1958).



**Félix Candela aunaba en una sola persona las cualidades de un constructor (por dedicación profesional), de un ingeniero (por estudio y desarrollo autodidáctico) y de un arquitecto (por preparación académica), a la manera ya perdida del "magister operi" clásico.**

presentarse en sus apariciones públicas, especialmente en medios académicos. El éxito le hizo ser demandado por algunos de los mejores arquitectos mexicanos e internacionales del momento, lo que le proporcionó un impresionante torrente de ideas y novedosas propuestas que Candela aprovechaba para avanzar en el desarrollo de nuevas soluciones estructurales. Así, llegó al desarrollo de uno de los elementos que caracterizan su obra: las estructuras laminares en forma de paraboloides hiperbólicos con el borde libre curvo y sin elementos de refuerzo perimetrales. Responsable en buena medida del éxito de sus obras.

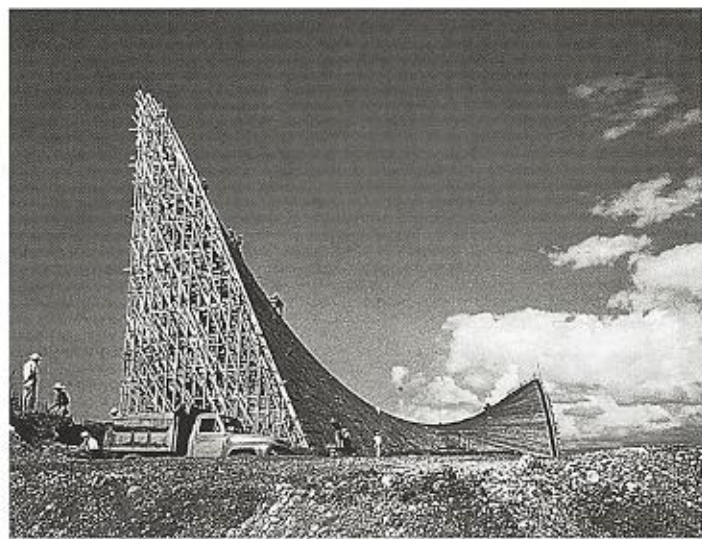
Félix Candela, efectivamente, aunaba en una sola persona las cualidades de un constructor (por dedicación profesional), de un ingeniero (por estudio y desarrollo autodidáctico) y un arquitecto (por preparación académica), a la manera ya perdida del "magister operi" clásico para construir en un complejo ejercicio intelectual que abarca todo el proceso, desde la concepción, al cálculo y la edificación, sin relación de prioridad. Demuestra así cómo en la compleja labor de la actividad arquitectónica han de convivir la creación artística con la capacidad teórica científica y el conocimiento constructivo, sin especial orden jerárquico, de manera que el resultado final no sea sino la consecuencia de una concatenación coherente de estados intermedios, todos ellos de gran valor intelectual. Parece así, inadvertidamente, respaldar la aserción de Tafuri según la cual la tarea imperativa del arquitecto consiste en dominar los medios de producción, no sólo a fin de obtener un control sobre el acto de la edificación, sino también, presumiblemente, para poder participar conscientemente en la producción del significado. Además, en una sociedad obstinada en encasillarnos como especialistas en una determinada actividad, la suya no encajaba bien en ninguna de las clasificaciones establecidas, a caballo entre las profesiones de arquitecto e ingeniero, deambulaba en altanera soledad por tierra de nadie, juzgado como extravagante "rara avis" por las huestes de algunos adocenados profesionales de ambos márgenes.

De acuerdo con sus fundamentos analíticos, el borde libre, expresivo y de fuerte simbolismo, condiciona de forma unívoca el trabajo del resto de la estructura relacionada con él. La posición del extremo de cada una de las generatrices rectas que forman la lámina y el equilibrio de tensiones que es necesario plantear para la anulación en aquel de los esfuerzos normales y tangenciales a la curva que forma el borde, conlleva una consecuencia estructural que se trasmite, constante, a lo largo de toda la recta, ya en el interior de la estructura. Cualquier plano de corte distinto conlleva unos nuevos esfuerzos y un comportamiento estructural diferente, incluso a puntos bastante alejados físicamente del citado borde. Candela no sólo lo sabía, sino que era capaz de diseñar sus estructuras aprovechándolo para conseguir una cada vez mayor eficiencia estructural que, asociada al empleo de una insignificante cantidad de material y la abundante y poco especializada, aunque extraordinariamente hábil, mano de obra mexicana conforma un auténtico funcionalismo tecnológico.

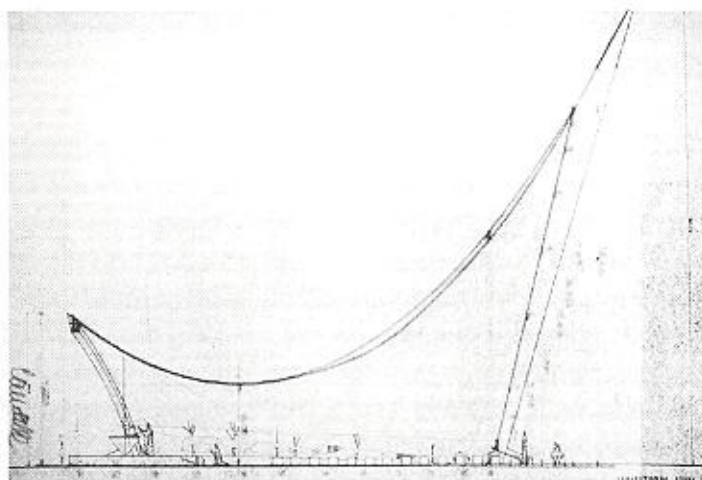
Los análisis realizados demuestran que la teoría de la membrana predice razonablemente bien el comportamiento de las estructuras en forma de paraboloides hiperbólicos, siempre que las condiciones de contorno tenidas en cuenta en los cálculos sean bien formalizadas por los apoyos reales construidos. Si estas condiciones, fundamentales para comprender el funcionamiento de las láminas, no se satisfacen adecuadamente, la teoría de la membrana falla, apareciendo líneas de distorsión en el contorno, en las discontinuidades de la propia estructura o de las cargas, como por ejemplo, en las aristas de intersección entre dos láminas parabólicas hiperbólicas. Los cambios de dirección de los esfuerzos en los encuentros de dos láminas generan también problemas locales que son difícilmente compatibles con la teoría de membrana.

A la vista de los cálculos alternativos que hemos efectuado, el accidente acaecido en la capilla de Palmira tuvo que deberse a un problema constructivo —excesiva juventud del hormigón, golpeo o descimbrado deficiente, defectos locales, entre otras posibles causas—

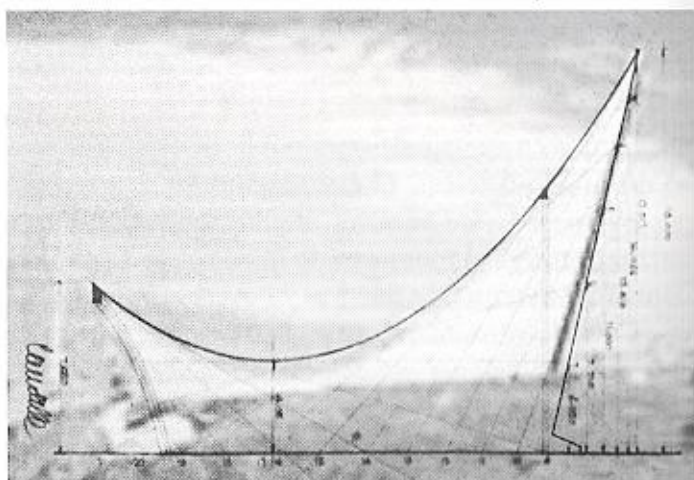




Cimbra en la ejecución original de la Capilla abierta de Palmira, Cuernavaca, Morelos, 1958-59. Arquitectos: Guillermo Rosell y Manuel Larrosa.



Proyecto reformado para la iglesia de Cuernavaca. Fechado en México D.F., febrero de 1958. Archivo Candela, Avery Library, Universidad de Columbia, Nueva York.



Superposición de los dibujos originales y la estructura construida.

dado que el cálculo para las dimensiones originales ha arrojado resultados satisfactorios. La estructura podría haberse construido igualmente; abundando un paso más: podría haberse construido incluso sin sus dos vigas de borde trasero. Efectivamente, estos elementos de borde trabajan predominantemente por flexión, y podrían haberse suprimido. Sus mecanismos resistentes, muy diferentes del de la membrana con la que se solidarizan por la continuidad del hormigón, introducen en aquella distorsiones considerables, no previstas en la analítica empleada por Félix Candela. Su justificación de entonces —que las estructuras se dejaran calcular— no se sostiene hoy, aunque, en otras ocasiones, su introducción pueda justificarse para contribuir a fenómenos relacionados con el pandeo, que, gracias a la doble curvatura de las láminas, sólo en casos extremos aparece y para los cuales un tan pertinente como delicado reglamento es más que suficiente.

Mediante el adecuado diseño, las tensiones resultantes en estas láminas son extraordinariamente pequeñas y ello condujo a Candela al empleo de un espesor habitual y una cuantía de armado general, de dimensionado estricto, excesivamente escasos para garantizar una adecuada durabilidad de sus estructuras.

El breve, aunque extraordinariamente prolífico, período de constructor de cascarones, que alumbró un conjunto arquitectónico asombrosamente variado y extenso, declinaría cuando Candela comenzó a repartir

sus energías en varios frentes, sin excluir el enfrentamiento directo con el poder establecido, fuera este profesional, político o científico. Por estas y otras múltiples causas circunstanciales y coyunturales, Candela padeció el fracaso empresarial, abandonando Cubiertas ALA en los primeros años sesenta, la cual desaparecería pocos años después. Su salida de México, con el brillante epílogo que implicó el Palacio de los Deportes para la Olimpiada celebrada en México en 1968, supone prácticamente el abandono de la actividad constructora. Suele decirse que es difícil reponerse de un fracaso, pero de un éxito puede resultar imposible. Candela sufrió mucho de éxito, y no se recuperó.

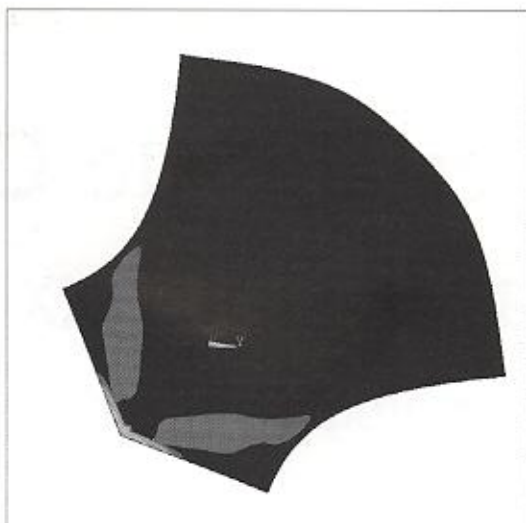
A partir de 1970, coincidiendo aproximadamente con su rehabilitada condición de arquitecto, parece abandonar sus propios fundamentos y su línea evolutiva, trabaja intensamente en proyectos que generalmente no fueron llevados a cabo. No quiso —o no pudo— acompañar el desarrollo de su obra con el progreso de la técnica, asumiendo consideraciones proyectuales al margen de aquellas en las que había demostrado considerable maestría y siempre refugiado en el anonimato. Con ello, perdimos la oportunidad de comprobar a qué nivel de desarrollo —su inteligencia y experiencia, de la mano de las nuevas tecnologías y las herramientas de análisis desarrolladas febrilmente en los años de su madurez—, hubieran podido aupar a las cubiertas laminares, al concreto armado y a las estructuras arquitectónicas. ⊗



Fibra superior

ANSYS 5.3  
 MAY 12 1998  
 09:01:11  
 NODAL SOLUTION  
 STEP=1  
 SUB =1  
 TIME=1  
 S1 (AVG)  
 PowerGraphics  
 EFACET=1  
 AVRES=Mat  
 DMX =.009076  
 SMN =-.128386  
 SMX =537.498

TRACCIONES



Fibra inferior

ANSYS 5.3  
 MAY 12 1998  
 09:01:29  
 NODAL SOLUTION  
 STEP=1  
 SUB =1  
 TIME=1  
 S1 (AVG)  
 PowerGraphics  
 EFACET=1  
 AVRES=Mat  
 DMX =.009076  
 SMN =-.128386  
 SMX =537.498

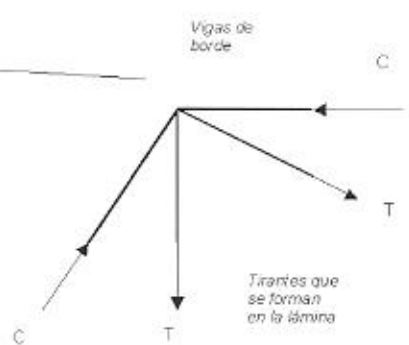
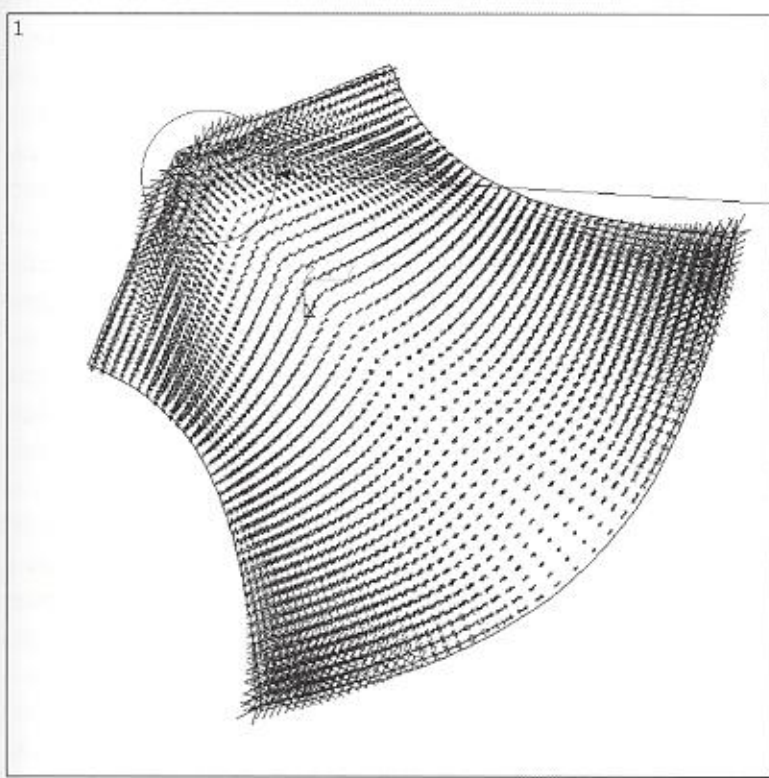


UZ

DESPLAZAMIENTOS



$USUM = \sqrt{ux^2 + uy^2 + uz^2}$



CUERNAVACA MOD. 3

Fig. 14. Direcciones principales

Imágenes del modelo experimental de la capilla de Palmira, realizado en computadora. Los análisis demostraron que el fallo al descimbrar se debió a un problema constructivo y no de cálculo.