

Edificaciones con paraboloides hiperbólicos. La obra de Félix Candela en México y de Álvaro Coto en Venezuela

Rafael Gerardo Páez

Facultad de Agronomía. Universidad Central de Venezuela

Resumen

El trabajo analiza ejemplos emblemáticos de construcciones con paraboloides hiperbólicos proyectadas por Candela en México y Coto en Venezuela agrupándolos en cinco tipos diferentes: paraguas simple, eje z en posición vertical, bóveda por arista, eje z inclinado y bordes libres. Mientras que Candela construyó el Pabellón Rayos Cósmicos (México, 1950), en Venezuela el arquitecto mexicano Álvaro Coto llegó a realizar proyectos, patentes y construcciones innovadoras mediante cubiertas de doble curvatura.

Abstract

Examples are analyzed with emblematic buildings designed by Candela hyperbolic paraboloid in Mexico and Coto in Venezuela. Grouped into five types: single umbrella, z axis vertical, groin vault, z axis tilted and free edges. Candela built the Pabellón Rayos Cósmicos (Mexico, 1950), subsequently, Álvaro Coto, Mexican architect, came to perform in Venezuela projects, patents and innovative buildings covered of double curvature.

La metodología empleada en este artículo permite la agrupación en cinco tipos estructurales diferentes: paraguas simple, en la cual quedan incluidos los paraboloides hiperbólicos de forma de paraguas invertido y paraguas normal; eje z en posición vertical, bóvedas por aristas, eje z inclinado y bordes libres. Éstas fueron cronológicamente las modalidades construidas por Félix Candela en México (Faber, 1970) y que se difundieron por todo el mundo mediante la elaboración de 1.439 proyectos, de los cuales se materializaron 896 (Tonda, 2000) como manifestación de los más altos niveles tecnológicos de edificación de sistemas de cubiertas de superficies regladas de doble curvatura. En Venezuela hubo un rezago de estas aplicaciones limitándolas principalmente a los modelos de paraguas invertidos y algunos ejemplos estructurales muy particulares de otras tipologías de paraboloides hiperbólicos. Salvo muy contados ejemplos –entre los que se cuenta la obra proyectada y construida por Coto Asenjo– los arquitectos, ingenieros, constructores e investigadores venezolanos hicieron a un lado las innovaciones de las construcciones de paraboloides hiperbólicos en concreto armado como soluciones de sistemas de cubiertas.

Antecedentes

Los estudios geométricos que inciden en los conocimientos de las superficies alabeadas de doble curvatura, entre las que se encuentran incluidos los paraboloides hiperbólicos, se remontan al siglo V a. de C, en el período

Descriptor:

Félix Candela; Álvaro Coto; paraboloides hiperbólico; cubiertas de doble curvatura.

Descriptors:

Félix Candela; Álvaro Coto; hyperbolic paraboloid; covers of double curvature.

TECNOLOGÍA Y CONSTRUCCIÓN | Vol. 27-1 | 2011 | pp. 55-70 | Recibido el 06/06/2011 | Aceptado el 01/03/12

helénico; mas no fue sino hasta el inicio del siglo XX, con la obra del arquitecto español Antonio Gaudí (figuras 1, 2 y 3) cuando se desarrollan "...las primeras bóvedas tabicadas de paraboloides hiperbólicos en la historia de la arquitectura" (Matzner, 1997). En 1933, el ingeniero francés Bernard Lafaille (figura 4) construyó en la ciudad de Dreux, Francia, a partir de una innovación desarrollada por él, la V Lafaille, un poste prefabricado que facilitó la tarea de erigir un primer paraboloide hiperbólico de concreto armado: la cubierta de doble cantiliver (figura 5) con cuatro unidades de superficies regladas (Catalano, 1962). Fue así como Lafaille publicó, dos años más tarde, las Memorias sobre el estudio general de las Superficies Alabeadas. En 1936, Fernand Aimond, ingeniero francés, publicó un primer tratado: Estudio estático de las bóvedas delgadas en paraboloide hiperbólico trabajando sin flexión (Pilarski, 1936).

Figura 1
Antonio Gaudí
(1852-1926)



Fuente:
Fotografía de Pablo Audouard

Figura 2
Cripta de la Colonia Güell
en Barcelona, España



Fuente:
<http://www.experienciasnn.com/tag/colonia-guell>.

Figura 3
Bóvedas regladas
en la Sagrada Familia
en Barcelona, España



Fuente: http://1.bp.blogspot.com/_3acmgihFAPg/TIKe9Odcqz/AAAAAAAAAHvk/Z8J65Le7hjo/s1600/Gaudia.jpg

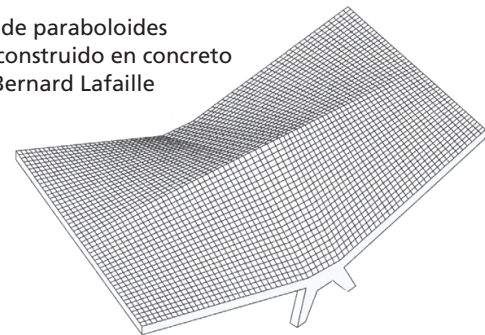
En 1966, el ingeniero André Paduart (figura 6) construyó una cubierta muy similar emulando a la de Lafaille, en la Universidad de Bruselas (figura 7), aumentando las dimensiones de los volados pero disminuyendo el espesor a 7 cm (Espion, Halleux & Sciffmann, 2003).

Figura 4
Bernard Lafaille
(1900-1955)



Fuente: <http://www.notre-dame-royan.com/expositions/notre-dame-le-symbole-de-royan/laffaille-et-sarger-ingenieurs-de-notre-dame/>

Figura 5
Primer techo de paraboloides
hiperbólicos construido en concreto
armado por Bernard Lafaille

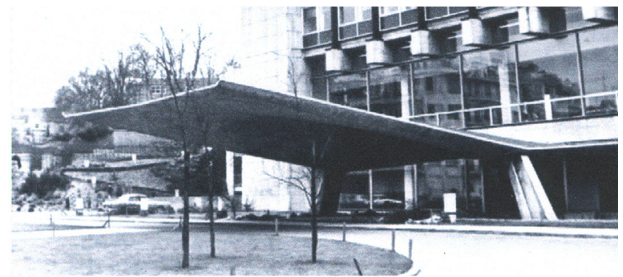


Fuente:
Elaboración propia con base en Eduardo Catalano (1962)

Figura 6
André Paduart,
(1914-1985)



Figura 7
Cubierta de concreto armado formada por cuatro unidades
de paraboloides hiperbólicos, en la Universidad de Bruselas



Fuente: http://www.ulb.ac.be/polytech/sgc/album/publicat/Espion_Paper_V4.pdf

La experiencia mexicana en la obra de Félix Candela

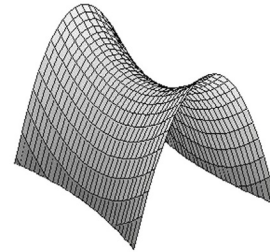
La experiencia mexicana en las obras con paraboloides hiperbólicos se inició en 1950, año en que el ingeniero español Félix Candela (figura 8) constituyó la compañía Cubiertas Ala de México junto a los hermanos arquitectos Raúl y Fernando Hernández Rangel. Esta sociedad perduró sólo tres años y el mismo Candela se separó posteriormente de la empresa en 1969, dejando a su propio hermano encargado de las contrataciones. De acuerdo con lo expresado con Juan Tonda (2000) este período, que se extendió hasta 1976, fue reconocido como la "era de oro de las estructuras de Candela".

La innovación que marcó la verdadera pauta en el inicio de construcciones con superficies alabeadas de doble curvatura fue el estudio y refinamiento de las fórmulas y ecuaciones contenidas en el trabajo de Fernand Aimond. Esto permitió que, para 1950, Candela, resolviera eficazmente –junto al Arq. J. González Reyna– el encargo de diseñar y construir el Pabellón de Rayos Cósmicos en la Ciudad Universitaria en Ciudad de México.

Candela construyó ésta, su primera cáscara reglada de doble curvatura, con forma de silla de montar sin cálculos estructurales previos. Según Colin Faber: "...la bóveda estaba a punto de ser colada, cuando un comité de supervisión pidió los cálculos. No había ningunos [sic]"

(Faber, 1970:51). La condición explícita, solicitada a Candela fue que "El techo debía ser suficientemente delgado para dar paso a los rayos cósmicos: no más grueso que 15 mm." (Faber, 1970:51). La modalidad geométrico-cartesiana construida por Candela para el Pabellón de Rayos Cósmicos (figura 9) era la de un paraboloides hiperbólico como superficie anticlastica. A continuación, mostramos la ecuación cartesiana de la superficie alabeada de doble curvatura en su forma general y representación gráfica con sus líneas de contorno:

$$\frac{y^2}{b^2} - \frac{x^2}{a^2} = \frac{z}{c}$$



Clasificación de los tipos de Paraboloides hiperbólicos construidos por Candela

Seguidamente serán analizadas las diferentes tipologías de paraboloides hiperbólicos que fueron diseñados y construidos por Félix Candela.

Paraguas invertidos

La determinación de los esfuerzos y reacciones aportadas por Aimond, en 1936, fueron perfeccionadas por Candela, entre los años 1950-1954. Esto le permitió crear cubiertas de concreto armado en forma de paraguas invertidos (ver figura 10) que, aun cuando poseían el eje z en posición vertical, podían construirse con los bordes inclinados para permitir el paso de luz y ventilación natural.

Figura 8
Félix Candela (1910-1997)



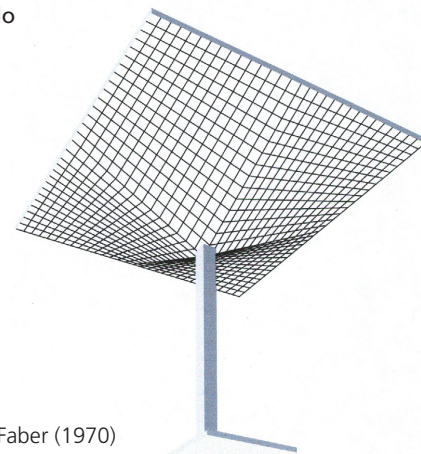
Fuente: http://www.arquitecturablanca.com/noticias/exposicion-%22felix-candela-1910-2010%22-en-el-meiac_121.html.

Figura 9
Pabellón de Rayos Cósmicos



Fuente:
Cortesía Arq. Caro Carmona

Figura 10
Paraguas invertido



Fuente:
Elaboración propia con base en Colin Faber (1970)

El primer prototipo de paraboloides hiperbólicos del tipo paraguas invertidos fue el de Tecamachalco, México, D.F., construido en 1952 (figura 11). Según lo describe Candela fueron solucionados "...con un peralte de 1 m, medía 10 x 10 m y un espesor de 4 cm. La flecha era escasa se produjeron deflexiones de cerca de 5 cm. La estructura también mostró tendencia a vibrar con el viento" (Candela mencionado por Faber, 1970:84).

Otro prototipo experimental fue el de la obra del Almacén de Las Aduanas, en la zona de Vallejo, México, D.F., "...con dimensiones de 8 X 8 m y flecha de 60 cm" (Faber, 1970:84). Fue allí donde 25 trabajadores junto a Candela posaron sobre la cubierta para demostrar la estabilidad de la misma al someterla a importantes cargas sin llegar a colapsar (figura 12).

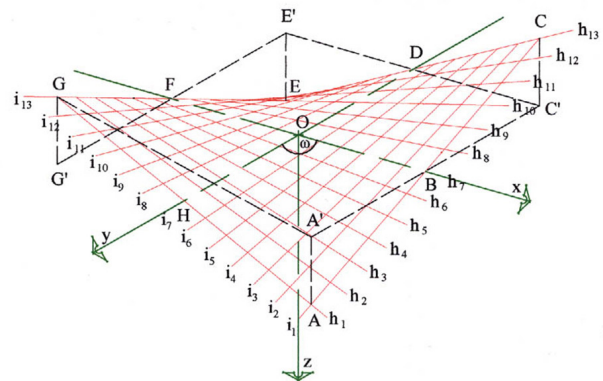
Otro ejemplo de esta tipología de paraguas invertidos es el Almacén de Río construido en 1954 en la zona de Linda Vista en México, Distrito Federal (figura 13). El Almacén de Río fue resuelto con 36 paraguas esta vez rectangulares de 10m x 15m, con la particularidad de que los paraboloides hiperbólicos tenían inclinaciones que permitían el paso de luz y ventilación natural.

Paraboloides hiperbólicos con el eje z vertical

Pero, desde una visual meramente geométrica, ¿en qué consiste el posicionamiento vertical de un eje z de un paraboloides hiperbólico?

Los paraboloides hiperbólicos se obtienen geométrica y gráficamente, según la descripción hecha por Candela, en dos modos distintos: el primero como superficie anticlástica (figura 14) a partir de "...dos sistemas de líneas rectas hn e in, cada sistema paralelo a un plano director y ambos planos formando un ángulo arbitrario" (Candela, mencionado por Faber, 1970:27).

Figura 14 Representación, según lo explica Candela, del modo de generar un paraboloides hiperbólico como superficie anticlástica mediante dos tipos de rectas generatrices, hn e in con eje z vertical



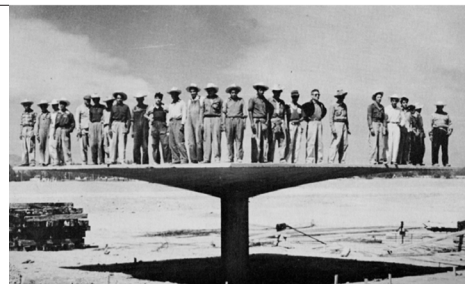
Fuente: Elaboración propia con base en Colin Faber (1970)

Figura 11 Prototipo de paraguas invertidos de Tecamachalco en México, D.F.



Fuente: Colin Faber (1970)

Figura 12 Prototipo experimental en el Almacén de Las Aduanas, Colonia Vallejo México, D.F.



Fuente: <http://www.skyscrapercity.com/showthread.php?s=8fce64dd73754ab4ba2dbb11e034de74&t=981060>

Figura 13 Almacén de Río. Construido en 1954 en Linda Vista, México, D.F.



Fuente: <http://www.frente.com.mx/2011/10/13/felix-candela-y-max-cetto-en-el-mam/>

Candela define el plano director y el primer sistema de generatrices del siguiente modo: “Las líneas rectas hn que intersecan a ambas directrices, siendo al mismo tiempo paralelas a un plano xOz llamado plano director, definen la superficie. Se les denomina el primer sistema de generatrices” (Candela, mencionado por Faber, 1970:26).

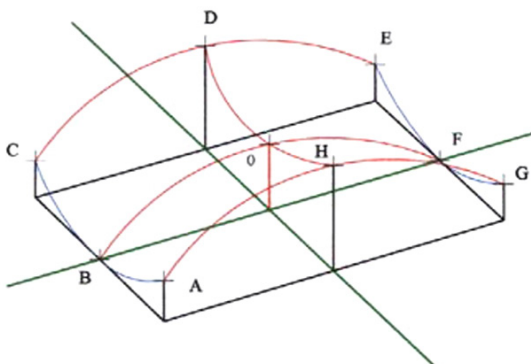
El segundo sistema de generatrices in son rectas paralelas a un segundo plano director yOz , el cual, a su vez, también es paralelo a las directrices HOD y ABC .

Paraboloides hiperbólicos como superficies de traslación

Con eje z vertical se obtienen también paraboloides hiperbólicos como una superficie de traslación generados por una parábola principal que se mueve paralelamente a si misma a lo largo de otra parábola invertida (figuras 15, y 16): “Por consiguiente, la superficie tiene dos sistemas de generatrices parabólicas. Cada sistema está compuesto por parábolas idénticas, situadas en planos paralelos” (Candela mencionado por Faber, 1970:28).

La iglesia de La Medalla Milagrosa (figura 17), ubicada en la zona residencial de Narvarte en Ciudad de México, permitió a Candela desarrollar, entre los años 1954-55, una construcción de paraboloides hiperbólicos con mayor complejidad que los paraguas simples conservando el eje z en posición vertical. Félix Candela describió el diseño así: “Es un edificio notable. (...) La estructura es una combinación de superficies alabeadas todas ellas (excepto en la pequeña capilla lateral) paraboloides con el espesor usual de 4 cm o menos. Hasta el espigado campanario está hecho con hypes” (Faber, 1970:99).

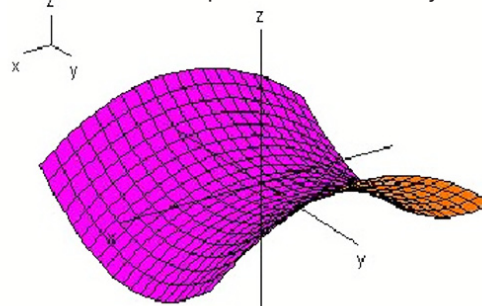
Figura 15
El paraboloides hiperbólico como superficie de traslación



Fuente: Elaboración propia con base en Colin Faber (1970)

Todo el concreto fue vaciado a mano requiriéndose gran habilidad para los encofrados y al presentarse alguna falla en determinada columna (figuras 18 y 19) la superficie alabeada permitía su corrección sin conllevar al colapso de la estructura. “El diseño fue hecho en una tarde, dibujado en una semana y calculado durante la construcción” (Candela, mencionado por Faber, 1970:102).

Figura 16
Representación de la superficie alabeada $z = y^2 - x^2$



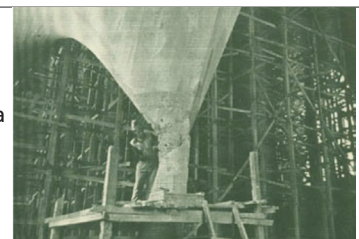
Fuente: Elaboración propia mediante el software matemático Derive®.

Figura 17
Vista exterior de la iglesia de La Medalla Milagrosa



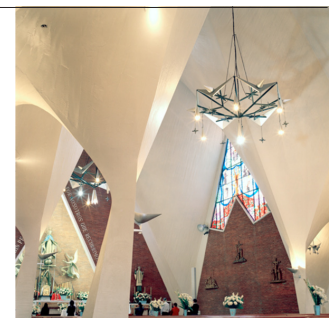
Fuente: <http://www.google.co.ve/imgres?q=iglesia+de+la+medalla+milagrosa+felix+candela>

Figura 18
Columna colapsada que debió demolerse parcialmente en la Iglesia de la Medalla Milagrosa



Fuente: Colin Faber (1970)

Figura 19
La misma columna colapsada en 1954 permanece en la actualidad en óptimas condiciones estructurales



Fuente: http://hermanmao.com/files/gimms/8_jpg-arch-candela-mexico01.jpg

Las Bóvedas por aristas una innovación constructiva que antecedió a los paraboloides hiperbólicos con bordes libres

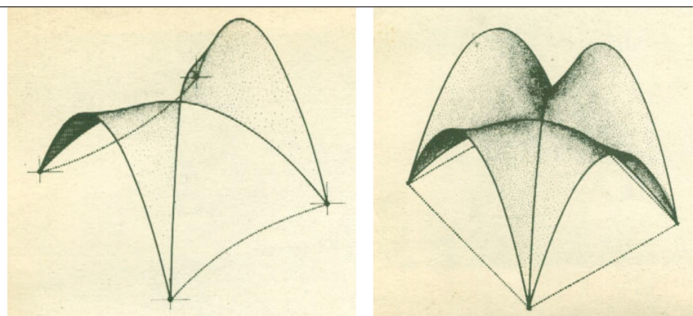
Constructivamente las bóvedas por aristas se emplearon desde el período románico y fueron el resultado de resolver geoméricamente la intersección perpendicular de dos bóvedas de cañón para cubrir espacios cuadrados o rectangulares. El término aristas se refiere a que las líneas de intersección entre las curvas diagonales de la bóveda conformaban arcos de semielipses que se unían en el vértice de la cúpula. Estas bóvedas por aristas dieron pie a una nueva particularidad que se denominó bóveda de crucería a partir de la intersección ya no de bóvedas de cañón sino de bóvedas de crucería, que se difundió en las construcciones góticas renacentistas durante la Edad Media.

La forma de interceptar dos o más paraboloides hiperbólicos en un mismo plano, aun cuando estaba geoméricamente concebida, era considerada como improbable de edificar debido a que no se lograba definir la magnitud de los esfuerzos que actuaban en las líneas de intersección de las superficies cuando estas eran doblemente regladas. Candela alcanzó a dar con la solución en términos prácticos y conceptuales.

La Sala de Remates de la Bolsa de Valores, ubicada en la calle Uruguay de la ciudad de México fue proyectada, en 1954, por los arquitectos Enrique de la Mora y Fernando López Carmona. Ambos pensaron que esta modalidad de bóvedas por aristas, propuesta por ellos, resultaba casi imposible llevarla a la práctica. Sin embargo, Candela dejó ver una opinión muy diferente en La Medalla Milagrosa señalando que el diseño era "...interesante, perfectamente lógico y no difícil de construir" (Candela mencionado por Faber, 1970:150). La bóveda de la Sala de Remates de la ciudad de México fue solucionada bajo la condición geométrica de intersectar dos paraboloides hiperbólicos (figura 20).

Figura 20
Modo de intersección de dos paraboloides hiperbólicos, empleado por Félix Candela, para responder al proyecto estructural del Edificio de la Bolsa de Valores

Fuente: Colin Faber, (1970)



Eje z no vertical

Candela desarrolló una modalidad matemáticamente interesante de concebir los paraboloides hiperbólicos: la colocación del eje z en posición oblicua. Él fue el artífice de esa innovación constructiva.

Ante el reto de diseñar y construir estructuras con paraboloides hiperbólicos con el eje z no vertical y la existencia de muy pocos ejemplos para finales de los años cincuenta, el Arq. Catalano escribió: "Quizás ello se deba a la mayor complejidad requerida en su análisis estructural y evidentemente al hecho de hallarnos en los albores de su uso como estructura" (Catalano, 1962:11).

En la solución del recinto de Nuestra Señora de La Soledad en 1955 (también conocida como Capilla del Altílo, ubicada en Coyoacán, ciudad de México), se conjugaron, además de la sencillez resultante, un empeño por afinar las técnicas constructivas que conllevaron al empleo de materiales constructivos autóctonos en combinación con el concreto a la vista sin ningún tipo de tratamiento (figuras 21 y 22).

Figura 21
Capilla del Altílo una vez vaciada la cubierta



Fuente:
Colin Faber, (1970)

Figura 22
Vista de los accesos laterales de la Capilla del Altílo



Fuente:
<http://es.wikiarquitectura.com/index.php/Archivo:CapillaSoledad.jpg>

Candela supo interpretar con certeza la simplicidad arquitectónica con la alta complejidad estructural. El eje z no vertical rompió los esquemas superando todas las expectativas que determinan las reglas del equilibrio estable de las superficies doblemente regladas.

Bordes libres

Candela resolvió la implantación de un modelo de cubiertas totalmente diferente: el borde libre, que consistía en un sistema donde se proponía conservar los bajos espesores ya alcanzados, de aproximadamente 4 cm, mediante la eliminación de los refuerzos y de los elementos de rigidización rectilíneos que hasta ese entonces eran imprescindibles en todas las otras tipologías de cubiertas de paraboloides hiperbólicos, sustituyéndolos por arcos que transmitían los esfuerzos hacia los apoyos.

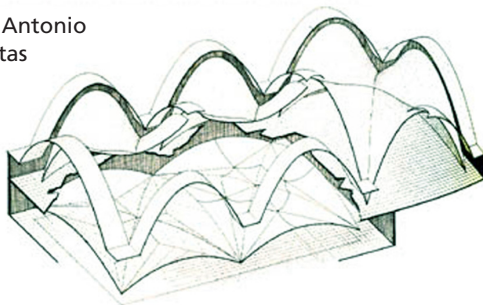
La capilla de San Antonio de las Huertas (Calzada México-Tacuba, 1956) fue un proyecto de los arquitectos Enrique de la Mora y Fernando López Carmona. Una propuesta que brindó a Candela la posibilidad de abordar constructivamente este problema geométrico que aún quedaba por resolverse, la solución de cubiertas de paraboloides hiperbólicos con los bordes libres (figuras 23 y 24).

Respecto a esta innovación constructiva Candela dijo que: "La significación real de las condiciones de borde, nunca explicitada claramente en la mayoría de los tex-

tos, fue finalmente clara para mí. (...) A pesar de que se me dio todo el tiempo necesario para hacer los cálculos, estos estaban equivocados en muchos detalles" (Candela, mencionado por Faber, 1970:198-199).

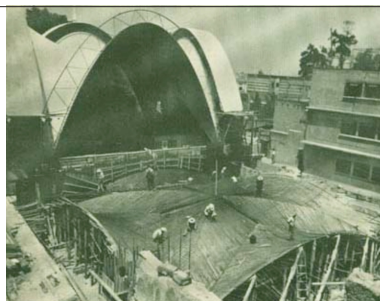
Resulta casi imposible describir la obra de Candela sin relacionarla con el restaurante Los Manantiales (ubicado en Xochimilco, México, D.F., 1958), diseño arquitectónico de Joaquín y Fernando Álvarez Ordóñez, cálculo estructural y construcción de Félix Candela. Esta nueva edificación tuvo como antecedente la iglesia de San Antonio de las Huertas. Además, todo constructor tiene una construcción que considera más emblemática y para Candela ese fue el significado que marcó el restaurante Los Manantiales: un antes y un después respecto a edificaciones con cubiertas de paraboloides hiperbólicos de concreto armado. Xochimilco es una zona de canales de agua dulce que constituyó el mejor paisaje natural para emplazar allí su obra cumbre. Respecto a este proyecto dice Faber que: "La estructura de Xochimilco es una bóveda por arista octogonal, compuesta por la intersección de cuatro hypars" (Faber, 1970:216) (figuras 25 y 26).

Figura 23
Capilla San Antonio de las Huertas



Fuente: Colin Faber, (1970)

Figura 24
Capilla de San Antonio de las Huertas. Calzada México-Tacuba D.F.1956



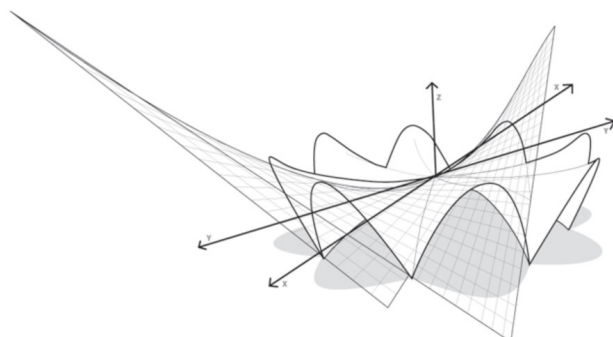
Fuente: Faber, 1970

Figura 25
Restaurante Los Manantiales



Fuente: <http://blogs.iteso.mx/arquitectura/2011/12/13/exposicion-felix-candela-1910-2010/>

Figura 26.
Esquema de intersección de los 4 paraboloides hiperbólicos que generan la cubierta de bordes libres del restaurante Los Manantiales



Fuente: www.arquitecturablanca.com/noticias/exposicion-%22felix-candela-1910-2010%22-en-el-meiac_121.html

La experiencia venezolana en la obra del arquitecto Álvaro Coto Asenjo

Según Guido Bermúdez, el arquitecto Álvaro Coto Asenjo (figura 27), venezolano de origen mexicano y José Gabriel Loperena fundaron en Venezuela, para finales de los años cincuenta, la empresa Cubiertas Ala de Venezuela S.A. filial y representante de los proyectos y contratos del ingeniero y arquitecto español Félix Candela (Bermúdez, 1993:354). Posteriormente ambos arquitectos registraron la empresa Coto & Loperena y finalmente, al romperse la sociedad Coto Asenjo, se constituyeron otras dos firmas comerciales: Constructora Orión y Cubiertas Orientales, las cuales realizaron buen número de diseños y construcciones de estructuras de paraboloides hiperbólicos de concreto armado en Venezuela, alcanzando un mayor auge en los años sesenta hasta la década de los ochenta, cuando decayó casi por completo la edificación de este tipo de techos. En Venezuela se construyeron paraboloides hiperbólicos, en concreto armado, del tipo de paraguas invertidos para sistemas de cubiertas. Algunas experiencias específicas se resolvieron bajo otras modalidades y precisamente Coto Asenjo propuso otros materiales como la fibra de vidrio forrada en resinas plásticas. La construcción de superficies alabeadas de doble curvatura de concreto armado, específicamente de estructuras con paraboloides hiperbólicos, en otros países ha sido el resultado de la aplicación de los más avanzados conocimientos edificatorios. Mientras que en Venezuela, sencillamente, son cosa del pasado. Aún más: actualmente en el país se realizan mayores propuestas para demoler cubiertas de paraboloides hiperbólicos ya existentes, que las que se efectúan para planificar y construir otras.

A continuación serán analizados algunos casos de diseño, edificaciones y patentes solucionadas con parabo-

loides hiperbólicos que fueron propuestos por el arquitecto Álvaro Coto en Venezuela. Se agruparán en dos conjuntos: los paraboloides hiperbólicos que fueron construidos en Caracas y los que planteó en la provincia venezolana.

Estos últimos incluyen las propuestas innovadoras de estanques y silos de uso agrícola. Finalmente se presenta una de las patentes desarrolladas y registradas por él relacionada con paraboloides hiperbólicos que se construirían con fibra de vidrio.

Algunas construcciones con paraboloides hiperbólicos diseñadas en Caracas por Coto

Estaciones de gasolina

Entre finales de la década de los cincuenta y durante los años setenta se construyeron en Caracas, al igual que en algunas otras ciudades de Venezuela, estaciones de gasolina¹ que emplearon cubiertas de paraboloides hiperbólicos construidos en concreto armado para el área de los surtidores del combustible. Hoy son pocas las que aún funcionan perdurando algunas a la espera de ser demolidas (figura 28).

En la Estación de Gasolina de Coche, en Caracas, actualmente sólo se hallan en pie algunos de los paraguas invertidos de paraboloides hiperbólicos del área de servicio eléctrico automotriz, y los de las oficinas administrativas (figuras 29), el resto de estos techos ubicados en la zona de surtidores de combustible después de su demo-

Figura 27
Álvaro Coto Asenjo.
(1928 -)



Fuente:
Cortesía de Arq. Carolina Coto

Figura 28
Estación de gasolina
Av. Río de Janeiro.
Caracas



Fuente:
Fotografía del Autor

Figura 29
Área de surtidores
en la estación de
gasolina de Coche,
Caracas



lición fueron sustituidos por estructuras metálicas ligeras (figuras 30, 31 y 32).

Centro comercial Canaima

Ubicado en la Av. Francisco de Miranda Norte, sector Los Palos Grandes, hasta su demolición con explosivos a finales de la década de los años ochenta, esta obra cedió paso a la construcción de una torre de oficinas de mediana altura con igual nombre.

La Arq. Carolina Coto (hija del arquitecto Coto Asenjo) nos informa textualmente: “El cine Canaima, el centro comercial y el Pin 5 (bowling) fue un proyecto que mi papá hizo junto a José Gabriel Loperena (Coto y Loperena Arquitectos). Luego del incendio que en los ochenta destruyó gran parte de la mampostería (sorpresivamente los paraboloides sobrevivieron), los dueños originales vendieron los “restos” a una constructora que demolió (dinamitó) el cine, cubrió el resto de los paraboloides y construyó la torre de oficinas que hoy existe” (figuras 33, 34, 35 y 36) (C. Coto, comunicación personal, correo de noviembre 29, 2010).

Figura 30
Vista del conjunto de cubiertas de paraboloides hiperbólicos en forma de paraguas invertidos ubicados en los cuales fueron demolidos en su totalidad



Fuente: Fotografías del autor

Figura 31
Paraguas invertidos de paraboloides hiperbólicos del área de servicio eléctrico automotriz, y de las oficinas de la Estación de Gasolina de Coche en Caracas.



Figura 32
Estructuras metálicas ligeras con las cuales fueron sustituidos los paraboloides de concreto armado posterior a su demolición



Fuente: Fotografías del autor

Figura 33
Centro comercial Canaima. Los Palos Grandes, Caracas

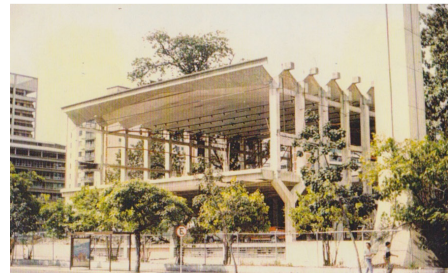


Fuente:
<http://sieim2007.blogspot.com/2010/04/caracas-hace-anos-y-urb-altamira.html>

Figuras 34, 35 y 36.
Fotografías inéditas captadas por el arquitecto Álvaro Coto Asenjo, donde se observan las condiciones de preservación de los paraboloides hiperbólicos de concreto armado después del incendio devastador que acabó con su funcionamiento y que conllevaría a su demolición total



Fuente:
Cortesía de Arq. Carolina Coto



Ejemplos de paraboloides hiperbólicos de concreto armado diseñados y construidos por Álvaro Coto en la provincia venezolana

Terminal de autobuses de Ciudad Bolívar

Por razones quizás relacionadas con el factor económico, rapidez de ejecución, ausencia de mano de obra especializada en la zona, u otras, la terminal de autobu-

ses de Ciudad Bolívar, al oriente de Venezuela, que fuera diseñada por el Arq. Coto para construirse con paraboloides hiperbólicos los cuales serían armados, encofrados y vaciados con concreto, tuvieron como resultado una estructura metálica a dos aguas, con cubierta de asbesto cemento (figura 37).

Al revisar una copia del plano estructural de este proyecto realizado por Coto Asenjo en 1969 (figura 38), perteneciente a la Dirección de Planeamiento del Ministerio de Obras Públicas de Venezuela, se observa que la idea concebida responde a andenes con una estructura de cuatro unidades de paraboloides hiperbólicos en la modalidad de paraguas invertidos rectangulares de 12m x 8m.

Un ejemplo de la solución de andenes con paraguas invertidos de paraboloides hiperbólicos en concreto armado, similar a la que fue planteada por el Arq. Coto Asenjo para la Terminal de Ciudad Bolívar, se puede observar tanto en la Terminal de Pasajeros de Barinas (figura 39) como en la Terminal de Pasajeros de San Cristóbal, estado Táchira (figura 40).

Esta última es un ejemplo superior del empleo de superficies regladas que desarrollan una doble curvatura mediante una flecha alta, un bajo espesor de losa (4 cm)

y un volado grande novedoso en construcciones para el transporte público en la provincia venezolana.

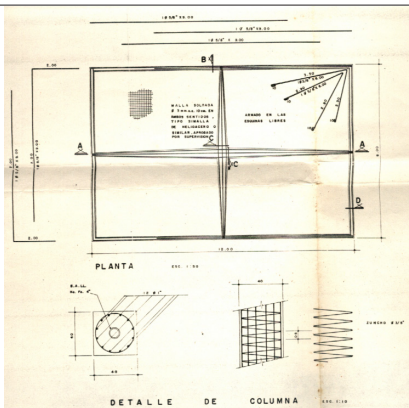
Esta terminal se caracteriza primordialmente por la limpieza en la edificación, condición que se refleja en la excelente apariencia que presenta el concreto armado de toda la estructura. Los detalles de iluminación natural fueron resueltos mediante aberturas en las cúspides de los techos donde se unen cuatro unidades de paraboloides hiperbólicos, mientras que en la parte interna cuelgan difusores metálicos con persianas, también con forma de paraboloides hiperbólicos, que permiten el paso de la luz solar, diseminándola (figuras 41, 42 y 43).

Figura 37
Terminal de pasajeros de Ciudad Bolívar



Fuente:
Fotografía del autor

Figura 38.
Detalles de armados de los paraguas invertidos para la Terminal de pasajeros de Ciudad Bolívar



Fuente: Archivo de trabajos del Arq. Coto Asenjo. Cortesía de Sra. Alicia de Coto

Figura 39
Andenes de paraboloides hiperbólicos en la Terminal de autobuses de Barinas



Fuente:
Fotografía del autor

Figura 40
Acceso al público Terminal de San Cristóbal



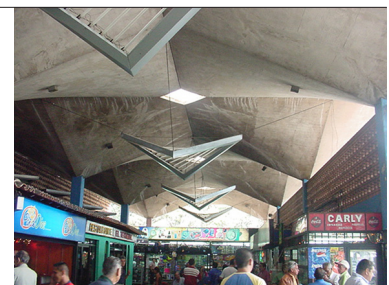
Fuente:
Fotografía del autor

Figura 41
Terminal de autobuses de San Cristóbal. Al poco tiempo de culminar la edificación Coto Asenjo captó esta imagen de la parte interna



Fuente: Cortesía Arq. Carolina Coto

Figura 42.
Se observa el estado de conservación de la estructura, lámparas y diseminadores solares



Fuente:
Fotografía del autor

Figura 43
Andenes resueltos con cubiertas de paraboloides hiperbólicos de concreto armado en la Terminal de pasajeros de San Cristóbal



Fuente: Fotografía del autor

Planta ensambladora de Volkswagen en Palma Sola

Para 1963 los arquitectos Dirk Bornhorst y Pedro Neuberger proyectaron la planta de ensamblaje de Volkswagen en Palma Sola, Morón, estado Carabobo, la cual contó con la participación para el proyecto y ejecución de los paraboloides hiperbólicos con la propuesta de Álvaro Coto en colaboración con Félix Candela (figuras 44 y 45).

La nave de montaje fue resuelta de acuerdo con el siguiente criterio: "Después de estudiar distintos tipos de estructuras industriales corrientes, como solución favorable se optó por los paraboloides hiperbólicos y estructuras de hormigón en forma de hongo con una columna central, por cuyo interior van las bajantes de aguas pluviales (...) La particularidad del diseño de Bornhorst estriba en la inclinación dada los paraboloides. (...)

Los paraboloides se han inclinado ligeramente hacia el norte para obtener una ventilación e iluminación natural tipo diente de sierra controlada por ventanales de plástico traslúcido y aluminio" (Bornhorst mencionado por Vicente, 2001:11).

Los paraguas invertidos han quedado como muestra fehaciente de un proyecto arquitectónico (figuras 46 y 47) que supo conjugar los valores estéticos de la edificación con el uso de una tecnología constructiva que adaptó necesidades financieras y de producción industrial mediante el aprovechamiento espacial a cubierto resolviendo necesidades de ventilación e iluminación natural.

Figura 44.
Nave central Planta ensambladora Volkswagen



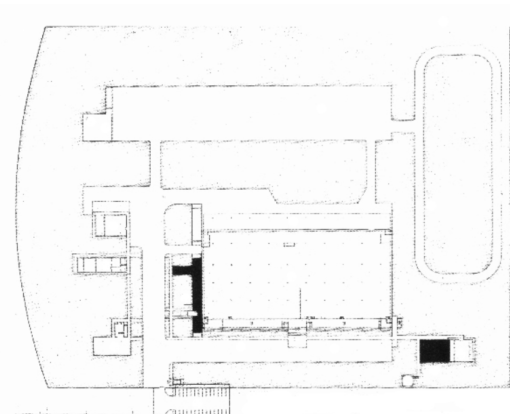
Fuente:
www.automotriz.net/articulos/entr-kozma-mayo2002.html

Figura 45
Vista de conjunto de la Planta ensambladora Volkswagen en Palma Sola, Morón, estado Carabobo



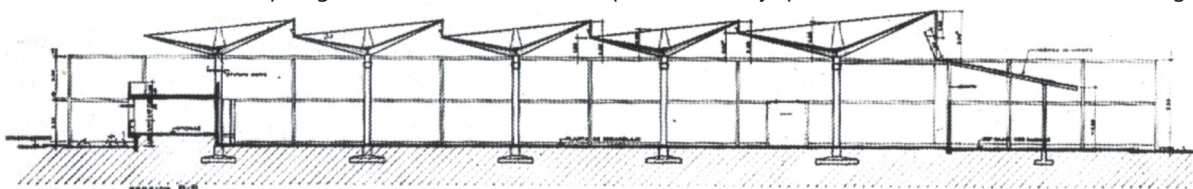
Fuente: <http://www.dirkbornhorst.com/Cont3/obra5.htm>.

Figura 46
Plano de arquitectura de la Planta ensambladora Volkswagen



Fuente: Extraída de Revista DADA (mayo-agosto, 2001)

Figura 47
Corte estructural de la propuesta de paraboloides hiperbólicos en forma de paraguas invertidos desarrollada por Coto Asenjo para la Planta ensambladora Volkswagen



Fuente: Extraída de Revista DADA (mayo-agosto, 2001)

A pesar de la importancia que tuvo la planta ensambladora de la Volkswagen de Palma Sola para la industria automotriz venezolana, la edificación fue abandonada sin que hasta el presente se perciban acciones para su recuperación.

Propuestas innovadoras de construcciones con paraboloides hiperbólicos en la obra de Álvaro Coto

Álvaro Coto caracterizó su obra por el desarrollo de nuevas aplicaciones para las estructuras de paraboloides hiperbólicos. Fue así como la empresa Cubiertas Ala de Venezuela planteó soluciones para edificaciones agroindustriales. Los primeros silos fueron concebidos para las unidades de almacenamiento de baja capacidad requeridos por Fedegro Araure y los silos de Fedegro Turén, ambos en el estado Portuguesa de Venezuela.

Sin embargo, a pesar de las ventajas que estos depósitos agroalimentarios presentaban, Coto Asenjo no alcanzó a construir ninguno de ellos.

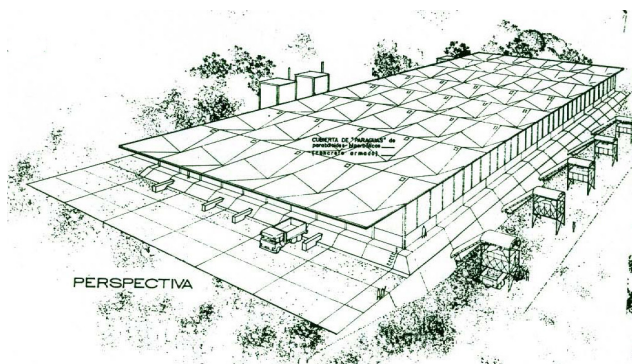
Una tipología de silos agroindustriales de gran capacidad fue diseñada en los años 1980-1990 por el Arq. Coto Asenjo para Arquitectura Orión, otra de las empresas fundadas por él (figura 48). La propuesta se caracterizaba por una estructura de 40 paraboloides hiperbólicos de cuatro unidades de paraguas invertidos de 12m x 12m, para disponer 25 silos semienterrados, los cuales podían ser visitables por operarios facilitando su limpieza y disponían mediante camiones de sistemas de alimentación y descarga a cubierto gracias a voladizos perimetrales de la misma estructura de concreto reforzado (figura 49).

Otra propuesta innovadora desarrollada por el arquitecto Álvaro Coto, para Cubiertas Orientales, C.A. la última de las empresas registradas por él en la Isla de Margarita, estado Nueva Esparta, permitió, a través del dominio geométrico y estructural de los paraboloides hiperbólicos, generar estanques de agua potable de capacidad superior a 500 mil litros que bien podían desplantarse semienterrados o elevados sobre el nivel del terreno (figura 50) según las condiciones topográficas.

La carencia de agua potable en muchos meses del año en gran parte del territorio nacional venezolano condujo a que la idea original de la propuesta convirtiera las mismas cubiertas del paraboloide hiperbólico, además de la tapa del recinto, en superficies de captación de aguas de lluvia (figura 51).

Las características geométricas de los paraboloides hiperbólicos empleados como paredes, pisos y techos de los

Figura 48
Vista de conjunto de la propuesta de silos



Fuente: Dibujos del Arq. Coto Asenjo.
Cortesía de Sra. Alicia de Coto

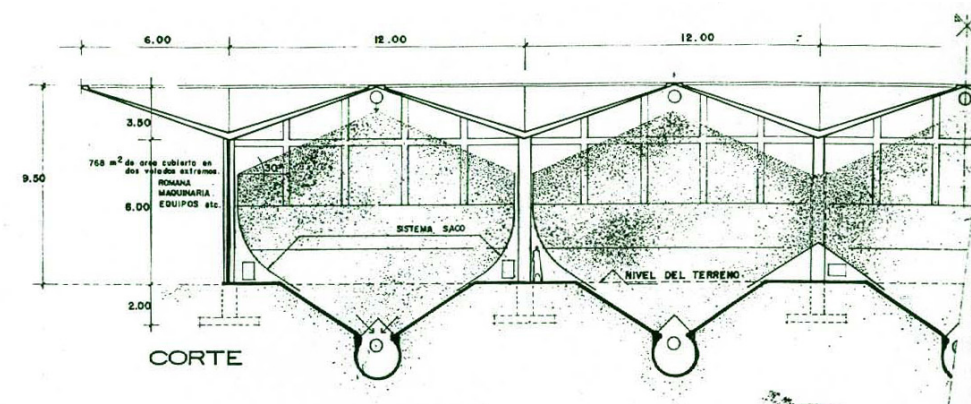


Figura 49
Detalle en corte de los silos agroindustriales para 20 mil TM de cereales diseñados por Coto con estructuras de paraboloides hiperbólicos

Fuente:
Archivo de trabajos del Arq. Coto Asenjo. Cortesía de Sra. Alicia de Coto

estanques de doble curvatura para más de 500 mil litros diseñados por Coto Asenjo (figura 52 y 53) eran determinantes para lograr condiciones favorables tales como un bajo espesor del concreto armado, poco movimiento de tierras y rapidez de ejecución, lo que representaba una eficaz solución de almacenamiento en comparación con las soluciones de depósitos esféricos y cilíndricos que aún se emplean.

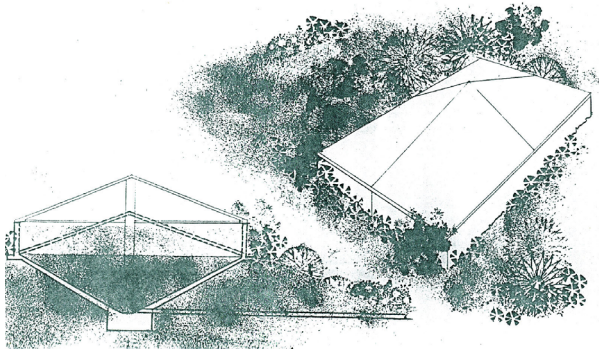
Solicitud de registro de Patente de Álvaro Coto con propuestas inéditas para generar paraboloides hiperbólicos con fibra de vidrio y resinas plásticas.

Álvaro Coto, como investigador independiente, formuló innovaciones estructurales y aplicaciones de nuevas técnicas y materiales constructivos. Fue así como para el

año 1994 solicitó el registro de una patente para fabricar cubiertas de paraboloides hiperbólicos (figura 54) que respondía a la siguiente denominación: "Pieza reversible, prefabricada en forma de dos sectores de paraboloides hiperbólicos, usable en repetición ensamblada en la ejecución de cubiertas".

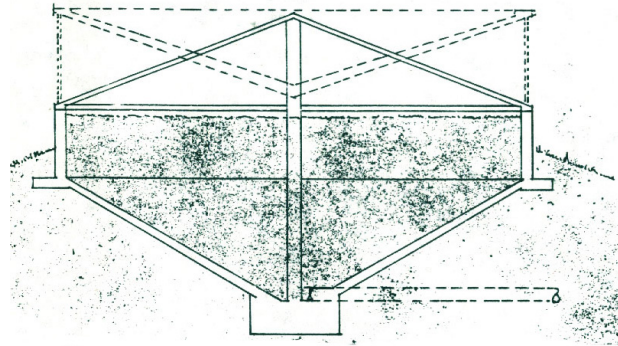
En la memoria preliminar de la solicitud de registro de la patente N° 1994-00417 el sistema estructural desarrollado por Coto Asenjo se mencionan las siguientes características: "...un elemento formado por una superficie desarrollada en doble curvatura anticlástica en forma de un paralelogramo alabeado en dimensiones de 2,5m x 2,5m perfectamente cuadradas en proyección horizontal para efecto de ensamblaje, y con una flecha de alabeo de 0,80m.

Figura 50
Estanques de agua potable



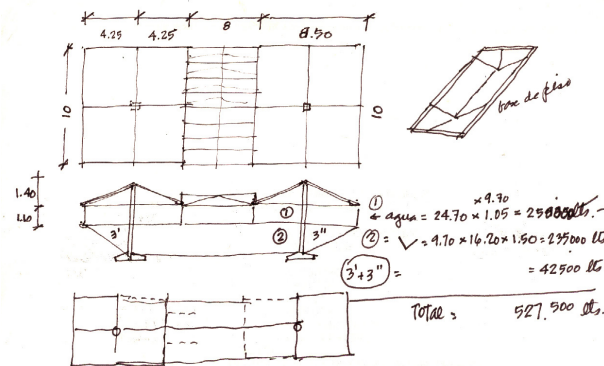
Fuente: Dibujos del Arq. Coto Asenjo. Cortesía de Sra. Alicia de Coto

Figuras 53
Detalle del corte estructural del estanque para depósito de agua

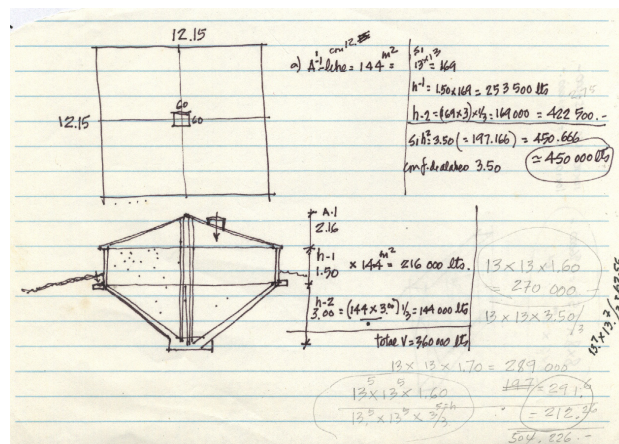


Fuente: Archivo de trabajos del Arq. Álvaro Coto Asenjo. Cortesía de Sra. Alicia de Coto

Figuras 51 y 52
Croquis realizados por Coto Asenjo para concebir la idea original y cálculo del proyecto de los estanques de agua potable con solución estructural de paraboloides hiperbólicos



Fuente: Archivo de trabajos del Arq. Álvaro Coto Asenjo. Cortesía de Sra. Alicia de Coto



La superficie estará formada por una capa de un espesor máximo de 1,5 mm, reforzada con bordes de 12cm de altura por 8mm de espesor" (A. Coto, comunicación escrita enviada a la empresa Fibro Productos CCB, noviembre 11, 1994, requiriendo el presupuesto para la fabricación de los prototipos).

Como detalle interesante que denota el nivel tecnológico de esta innovación se halla el sistema de ensamblaje de las piezas de paraboloides hiperbólicos con el poste estructural (figura 55 y 56), descrito así: "En una de las esquinas la pieza llevará un corte en sección de un cuarto de círculo para formar un círculo completo formado por 4 de un tubo de hierro de tres pulgadas (3"); este corte deberá tener una prolongación de 13cm angulada, en el caso de tener que colocar bridas, abrazaderas, etc., si se unieran unas con otras" (A. Coto, s/f. descripción del modelo

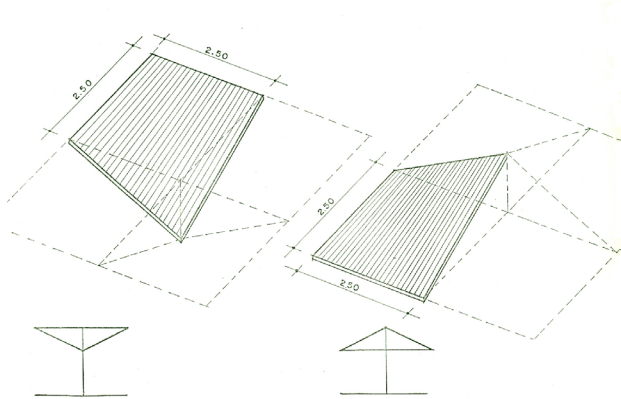
de sujeción para la solicitud de patente No 1994-00417, información suministrada por la Sra. Alicia de Coto).

Sede del Colegio de Médicos del estado Zulia

El Colegio de Médicos del estado Zulia (Maracaibo, 1964) fue un proyecto del Arq. Casas Armengol y la solución estructural de los paraboloides hiperbólicos quedó a cargo del Arq. Coto Asenjo (C. Coto, comunicación personal, correo-e, noviembre, 30, 2010).

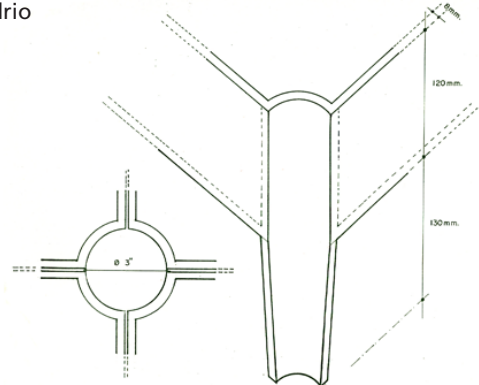
Constituye una muestra de las cubiertas de paraboloides hiperbólicos que con mayor audacia geométrica y estructural se han construido en Venezuela (figura 57), a la vez que guarda semejanza formal con las propuestas realizadas en los cursos de diseño del Massachusetts Insti-

Figura 54
Descripción de las modalidades de cubiertas propuestas por Coto Asenjo para ser fabricadas en plástico



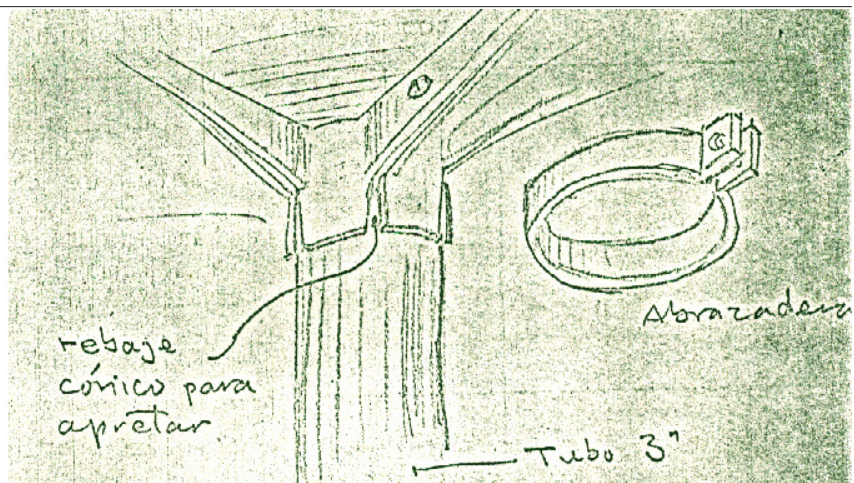
Fuente: Archivo de trabajos del Arq. Álvaro Coto Asenjo. Cortesía de Sra. Alicia de Coto

Figura 55
Detalles del sistema de ensamblado para las cubiertas de paraboloides hiperbólicos patentado por el arquitecto Álvaro Coto, los cuales serían fabricados en capas de resina y fibra de vidrio



Fuente: Archivo de trabajos del Arq. Álvaro Coto Asenjo. Cortesía de Sra. Alicia de Coto

Figura 56
Boceto tomado de los apuntes originales que permitieron al Arq. Coto concebir esta innovación



tute of Technology (MIT-EEUU) bajo la dirección del arquitecto argentino Eduardo Catalano, trabajos que quedaron registrados en el texto Estructuras de superficies alabeadas. Combinaciones de paraboloides hiperbólicos, donde el autor describe que el "...paraboloide hiperbólico se ha hecho presente en los últimos diez años como leitmotiv de un vasto número de estructuras" (Catalano, 1962:7).

Además de la ubicación de un conjunto de paraguas invertidos, el auditorio es una cubierta simétrica de ocho unidades de paraboloides hiperbólicos sobre cuatro apoyos oblicuos (figura 58).

En esta obra Coto Asenjo explota con originalidad la inclinación de las columnas que más que apoyos semejan la continuidad de los pliegues de la misma cubierta hacia el piso.

La edificación se halla hoy día en excelentes condiciones de mantenimiento (figura 59).

Conclusiones

En la empresa Cubiertas Ala de México, fundada por Candela, se realizaron 1.439 proyectos. Entre los 543 que dejó sin construir Candela realizó dos para Venezuela, la sede para el Edificio de Cartografía de Caracas y el Auditorio para la ciudad de Maracaibo (Tonda, 2000).

El legado constructivo de Candela ha sido catalogado, registrado y transmitido a nuevas generaciones mediante investigaciones y publicaciones traducidas a distintos idiomas. Su obra es conservada y en casos de demolición se aplican penalizaciones y cuantiosas multas.

Mientras tanto, la obra de Coto Asenjo ha pasado desapercibida en los medios de investigación. Las edificaciones con cubiertas de paraboloides hiperbólicos, diseñadas, calculadas, patentadas y construidas por él en Venezuela, además de las otras edificaciones importantes realizadas con otros sistemas constructivos tradicionales, hasta ahora han sido ignoradas. En las instituciones públicas así como en los centros de investigación y documentación no se encuentran los planos, memorias descriptivas, fechas de inicio y culminación de obras, presupuestos de ejecución, ni referencias de los clientes originales. Este artículo es un primer intento por dejar un registro de su trabajo.

Los paraboloides hiperbólicos construidos en concreto armado y resinas de plástico por Coto Asenjo en

Venezuela son cosa del pasado. Su obra, sus proyectos y patentes no han tenido ninguna continuidad.

Algunas de las edificaciones proyectadas por él con cubiertas de paraboloides hiperbólicos yacen expectantes a la espera de su demolición, para dar paso a construcciones de mayor envergadura.

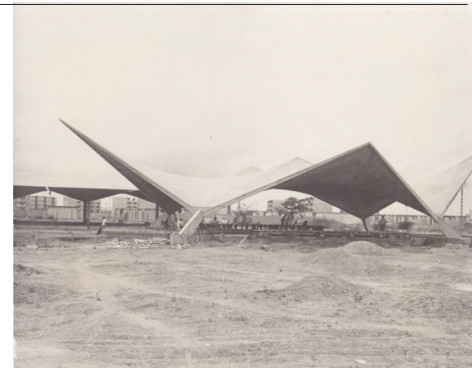
El Arq. Coto Asenjo, en este momento de su vida se halla alejado de la actividad creadora que ha sido plasmada en proyectos, cálculos, empresas y solicitudes de patentes industriales. No sabemos hasta cuándo, pero su obra innovadora se ha extinguido quizás para siempre dejando paso a la investigación que deberá develar el misterio que el paso del tiempo y el desconocimiento se empeñan en mantener.

Figura 57
Colegio de
Médicos del
estado Zulia



Fuente: www.comezu.com/instalaciones.html

Figura 58
Paraboloides
hiperbólicos
del Colegio
de Médicos
del Zulia



Fuente:
Archivo del Arq. Coto Asenjo. Cortesía de Arq. Carolina Coto

Figura 59
Cubierta
del Colegio
de Médicos
del Zulia



Fuente: www.comezu.com/instalaciones.html

Nota

- 1 No se consiguen planos, cálculos, ni memorias descriptivas que demuestren con total certeza que estos paraguas de paraboloides hiperbólicos de las estaciones de gasolina aquí relacionadas fueran diseñados por el Arq. Coto Asenjo. Sin embargo, la Arq. Alicia de Coto, en conversación personal (31/octubre/2010), nos aseguró que se trata de proyectos de su autoría.

Referencias bibliográficas

- Bermúdez, G. (1993). Diccionario del arquitecto. Caracas: Editorial. M.A. García e hijos.
- Catalano, E. (1962). Estructuras de superficies alabeadas. Combinaciones de paraboloides hiperbólicos. Buenos Aires: Editorial Universitaria.
- Espion, B.; Halleux, P. & Sciffmann, J. (1993). Contributions of Andre Paduart to the art of thin concrete shell vaulting. Proceeding of the first Congress on Construction History, Madrid, 20-24 January 2003. Madrid: Instituto Juan de Herrera, Escuela Técnica Superior de Arquitectura.
- Faber, C. (1970). Estructuras de Candela. 1ra ed. Ciudad de México: Editorial Continental.
- Matzner, C. (octubre, 1997). La Arquitectura de la naturaleza. En: La Época. Santiago de Chile.
- Pilarski, I. (1936). Calcul des voiles minces en beton armé. Paris: Dunod.
- Tonda, J. (2000). Félix Candela. Ciudad de México: Consejo Nacional para la Cultura y las Artes, Dirección General de Publicaciones.
- Vicente, H. (mayo-agosto de 2001). "El destino de los objetos. La arquitectura de Dirk Bornhorst en el programa de modernización nacional" En: DADA. Año 2, No 3, pp. 4-13. Relámpago. Caracas.