

SUPERFICIES ALABEADAS DE DOBLE CURVATURA: LOS PARABOLOIDES HIPERBÓLICOS Y LAS SILLAS DE MONO. UN ANÁLISIS RETROSPECTIVO DE SUS APLICACIONES EN PROCEDIMIENTOS CONSTRUCTIVOS

Rafael Páez.

Facultad de Agronomía, Campus Maracay, Universidad Central de Venezuela, e-mail:
rafaelgerardopaez@gmail.com

RESUMEN

Los estudios de la geometría de las superficies alabeadas de doble curvatura (el paraboloides hiperbólico y la silla de mono para monos de una o más colas) se remontan al año 500 a de C., en el período helénico. Sin embargo, la Cripta de la Colonia Güell, (Gaudí, 1914), fue la primera edificación donde se emplearon techumbres tabicadas doblemente regladas; sin que quedasen planos o escritos que explicaran el modo en qué se concibió esta forma arquitectónica inusitada para su época. El objetivo general consiste en analizar retrospectivamente los procedimientos y técnicas constructivas que han conllevado a proyectar y edificar cubiertas de superficies de doble curvatura. La metodología empleada, mediante un análisis retrospectivo de sus aplicaciones, intenta responder esta interrogante: ¿Cómo una superficie de doble curvatura se convierte en una estructura construida? Entre los resultados de esta investigación se concluye que mientras las soluciones espaciales con cubiertas de paraboloides hiperbólicos se han diseminado, con variadas modalidades, por todo el mundo, hasta ahora no se conocen propuestas que hayan empleado a las sillas de mono para monos de una, dos o más colas, generando esto un vacío en procedimientos tecnológicos del campo de las innovaciones en construcción y de diseño de estructuras.

Palabras clave: Superficies, construcción, diseño, estructura.

INTRODUCCIÓN

El inicio de los estudios de los fundamentos geométricos de las superficies alabeadas de doble curvatura (el paraboloides hiperbólico y la silla de mono para monos de una o más colas, entre otras) se remontan al año 500 a de C., en el período helénico. Menaechmo, un discípulo de Platón y Eudoxo, estudió tres curvas a las que conoció con los nombres de *exceso*, *equiparable* y *deficiencia*; las cuales en el año 238 a. de C., gracias a los estudios de Apolonio de Pérgamo, pasaron a llamarse: parábola, elipse e hipérbola.

La primera aplicación de las superficies alabeadas de doble curvatura, con concreto armado, una cubierta construida en con paraboloides hiperbólicos, fue realizada por el Ing. B. Lafaille, en Dreux, Francia, en 1933. Ya antes en 1914 el arquitecto barcelonés Antonio Gaudí había edificado cubiertas tabicadas, doblemente regladas, sin dejar nada escrito de cómo había logrado concebirlas espacialmente. Lo mismo ocurrió con las estructuras de la iglesia de la Sagrada Familia donde los primeros techos de doble curvatura se observan en el interior del recinto sin que se hayan logrado encontrar siquiera planos o maquetas donde quedara plasmada la idea que dio origen a esas soluciones inusuales para la época.

Mientras que, hasta ahora, otros grafos de superficies resultantes de la configuración de sillas de monos para monos de una cola y sillas de monos para monos de dos colas no se conocen aplicaciones que arrojen, como resultado de algún proyecto constructivo, una estructura edificada donde se hayan empleado éstas como sistemas de cubiertas. Es más aún, los textos con un contenido especializado en construcciones de estructuras laminares para arquitectos e ingenieros, aunque refieren abundantemente a los paraboloides hiperbólicos, a las sillas de mono no las mencionan.

¿Cuáles son las razones por la que las sillas de monos para monos de una y de dos colas han sido omitidas en los procedimientos constructivos?

El problema planteado consiste en discutir la existencia de algunos profesionales de la construcción y diseño de estructuras que poseen poco conocimiento de los fundamentos geométricos que determinan el comportamiento, bajo condiciones de equilibrio estable, de las estructuras de las sillas de mono agrupadas en el conjunto de las superficies alabeadas de doble curvatura.

1. ANTECEDENTES EDIFICATORIOS DE LAS SUPERFICIES ALABEADAS DE DOBLE CURVATURA

Los antecedentes de construcciones con paraboloides hiperbólicos se pueden dividir en cuatro períodos. Un primer período las bóvedas tabicadas de doble curvatura construidas por Gaudí de las cuales no quedaron planos ni escritos para la posteridad. El segundo período las cubiertas de paraboloides hiperbólicos en concreto armado a partir de 1933 hasta la segunda Guerra Mundial. Un tercer período recogería todas las innovaciones constructivas desarrolladas por el Ing. Félix Candela, en México y, finalmente, un cuarto período que corresponde a los techos de paraboloides hiperbólicos posteriores al fallecimiento de Candela hasta el presente.

1.1. Un primer período: las bóvedas doblemente regladas de Gaudí

La evolución de las aplicaciones constructivas de estas superficies geométricas tiene como punto de partida, para los años de 1889 – 1913, las bóvedas doblemente regladas de Antonio Gaudí para la Cripta de la Colonia Güell (figura 1) y luego, iniciada en 1882 y aún en construcción, para la Iglesia de la Sagrada Familia (figura 2) ambas en Barcelona, España.

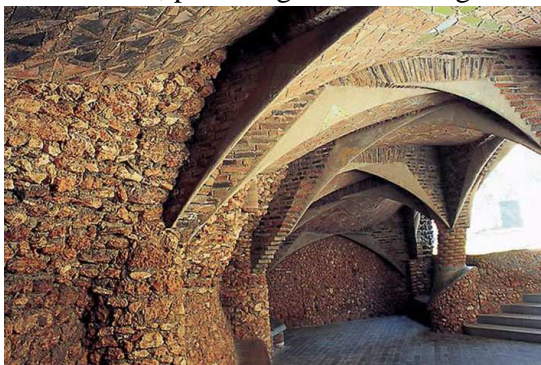


Figura 1. Techos de la Cripta de la Colonia Güell.
Fuente: <http://www.viewat.org>



Figura 2. Techos de la Sagrada Familia.
Fuente: www.skyscrapercity.com

1.2. Un segundo período: primeras cubiertas de paraboloides hiperbólicos en concreto armado

El primer techo de concreto armado fue construido por el Ingeniero francés Bernard Lafaille en la localidad de Dreux, Francia, en 1933, el cual estaba conformado por cuatro unidades de paraboloides hiperbólicos que contó además con un innovador sistema de columnas prefabricadas en forma de V (figura 3). Tal innovación conllevó al registro de la primera patente mundial para Europa. Este período queda signado además por la aparición del tratado de Fernand Aimond, y la aparición de un primer libro donde su autor Issenman Pilarski, logra determinar los esfuerzos y reacciones para generar las distintas modalidades geométricas de cubiertas de doble curvatura.

Las obras de Lafaille, con techos de paraboloides hiperbólicos, no se detuvieron allí y fue así como desarrolló otras edificaciones de mayores dimensiones tales como la cubierta para la iglesia de Notre Dame de la Paix (figura 4).



Figura 3. Cubierta de paraboloides hiperbólicos construida por Lafaille.

Fuente: elaboración propia con base en Catalano, 1962: 7



Figura 4. Cubierta de paraboloides hiperbólicos iglesia de Notre Dame de la Paix.

Fuente: notre-dame-villeparisis.ouvaton.org/architecture

Un constructor italiano, el ingeniero Giorgio Baroni, a partir de 1938, desarrolló un sistema de cubiertas de paraboloides hiperbólicos en concreto armado con apenas 3 cm de espesor que conllevaron a una segunda patente europea a la que denominó «*Método de producción de azoteas en concreto reforzado relativo*». Esta propuesta permitió construir los techos del Club de Trabajadores de la Planta de Aceros de Milán así como la cubierta de un almacén de la planta de fabricación de automóviles Alfa-Romeo, en la misma ciudad; ambas edificaciones desaparecidas durante la II guerra Mundial.

Baroni realizó la primera experiencia de paraboloides hiperbólicos en forma de paraguas, los de la localidad de Tresigallo, cerca de Ferrara, los cuales en la actualidad se han conservado en buen estado con mínimo mantenimiento (figura 5)

Las innovaciones constructivas de paraboloides hiperbólicos cesaron en los años que perduró la II Guerra Mundial. No se conoció de alguna otra experiencia hasta el inicio de los años 50, esta vez en el continente americano con el trabajo de investigación y la obra construida de Félix Candela en México y de Eduardo Catalano en Estados Unidos.



Figura 5. Estado actual de los primeros paraguas de paraboloides hiperbólicos construidos, en Europa, por el ingeniero Giorgio Baroni.

Fuente: www.area-arch.it/home.php

1.3. Tercer período: las innovaciones con estructuras de doble curvatura de Félix Candela, en México, a partir de 1950

En 1950 el ingeniero español Félix Candela una vez radicado en Ciudad de México, recibió el encargo, por parte del arquitecto J. González Reyna, de diseñar y construir la estructura para la sede del Pabellón de Rayos Cósmicos (figura 6) de la Universidad Nacional Autónoma de México (UNAM).

La condición necesaria era que la cubierta fuese lo suficientemente delgada y resistente para permitir pasar los rayos cósmicos, no debía rebasar 1,5 cm de espesor. Finalmente resultó de 4 cm de espesor (figura 7).



Figura 6. Pabellón de Rayos Cósmicos, UNAM, Ciudad de México.

Fuente: Cortesía Arq.^a C. Carmona

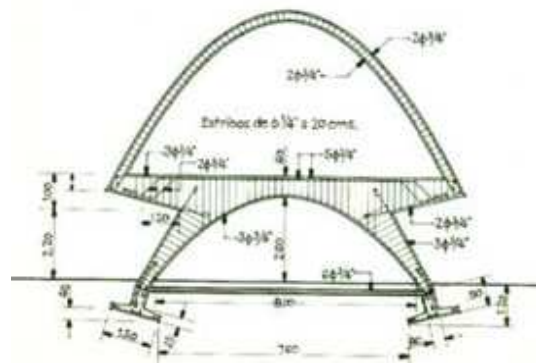


Figura 7. Detalle estructural del Pabellón de Rayos Cósmicos, UNAM, Ciudad de México.

Fuente: Faber, 1970:53.

La solución aportada por Candela fue la estructura de un paraboloides hiperbólico en forma de *silla de montar* como superficie sinclástica, construida sin planos, ni cálculos estructurales previos. Los cuales se hicieron después de concluida la obra.

De acuerdo con Colin Faber en su libro «*Estructuras de Candela*» las estructuras de paraboloides hiperbólicos propuestas por Félix Candela se clasifican en cinco modalidades diferentes:

Memorias de las XXXI Jornadas de Investigación del Instituto de Desarrollo Experimental de la Construcción, IDEC, Facultad de Arquitectura y Urbanismo, Universidad Central de Venezuela. 12, 13 y 14 de junio de 2013.

1. Paraguas simples (incluye las variantes de paraguas invertidos y cúpulas cuadrangulares)
2. Eje z vertical
3. Bóveda por arista
4. Eje z no vertical
5. Bordes libres

Seguidamente se realiza un análisis de los aportes en cada una de las agrupaciones descritas.

Paraboloides hiperbólicos configurados como paraguas simples

Fernand Aimond había propuesto, por vez primera, la configuración geométrica de unir 4 unidades de paraboloides hiperbólicos, como superficies doblemente regladas, sosteniéndolos con una sola columna central en la cual se embutía un desagüe para desalojar las aguas pluviales. No obstante, Candela, en términos prácticos, fue el innovador de la modalidad geométrica de concebir los paraboloides hiperbólicos configurados de forma de paraguas invertidos (figura 8).

El primer prototipo de paraboloides hiperbólicos del tipo paraguas invertido fue el de Tecamachalco, México, D.F., construido en 1952 (figura 9). Según lo describe Candela fue solucionado "...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).



Figura 8. Cuatro unidades de paraboloides hiperbólicos configurados espacialmente como paraguas invertidos.

Fuente: Elaboración propia con base en Faber, 1970:83.



Figura 9. Prototipo de paraguas invertidos de Tecamachalco en México, D.F.

Fuente: Faber, 1970:84.

Un 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). Quedó para la historia la imagen de 25 trabajadores que posaron junto a Candela sobre la cubierta para demostrar la alta capacidad de resistencia al someterla a importantes cargas sin que llegase a colapsar (figura 10).

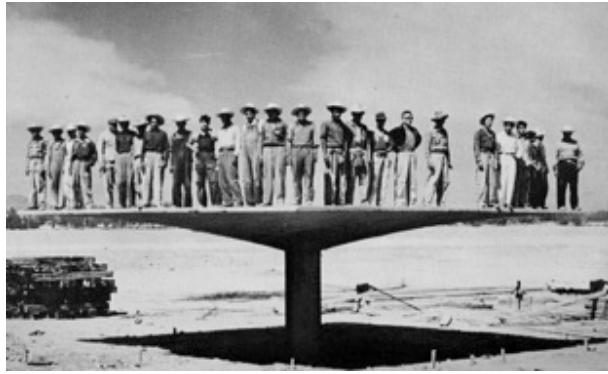


Figura 10. Prototipo experimental en el almacén de Las Aduanas, Colonia Vallejo México, D.F.
Fuente: <http://www.skyscrapercity.com>

Las cúpulas cuadrangulares fueron construidas en concreto armado demostrando que esbeltas columnas podían sostener cuatro unidades de paraboloides hiperbólicos doblemente reglados, con dos tipologías diferentes: la primera en la cual los paraboloides hiperbólicos conformaban cumbreras horizontales (figura 11) y otra en la que las líneas de parteaguas eran inclinadas (figura 12) generando bordes horizontales.

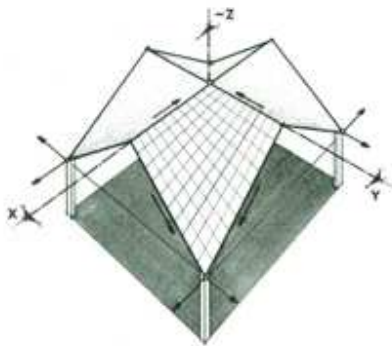


Figura 11. Cúpula cuadrada con cuatro unidades de paraboloides hiperbólicos que generan cumbreras horizontales.

Fuente: Faber, 1970:117.

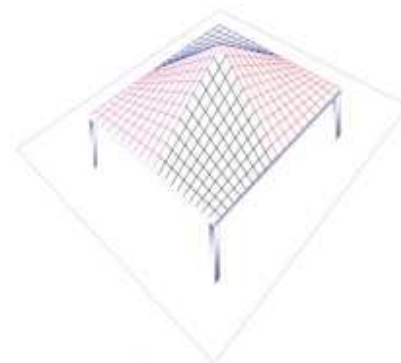


Figura 12. Cúpula cuadrangular con cuatro unidades de paraboloides hiperbólicos con bordes horizontales rectos.

Fuente: Elaboración propia.

Sistemas de cubiertas de paraboloides hiperbólicos con el eje z vertical

La iglesia de la Medalla Milagrosa, 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. Dijo Candela: “El diseño fue hecho en una tarde, dibujado en una semana y calculado durante la construcción.” (Candela, mencionado por Faber, 1970:102)

Todo el concreto fue vaciado a mano requiriéndose mucha destreza para los encofrados y al presentarse alguna falla en determinada columna (figura13) la superficie alabeada permitía su corrección sin conllevar al colapso de la estructura (figura 14).

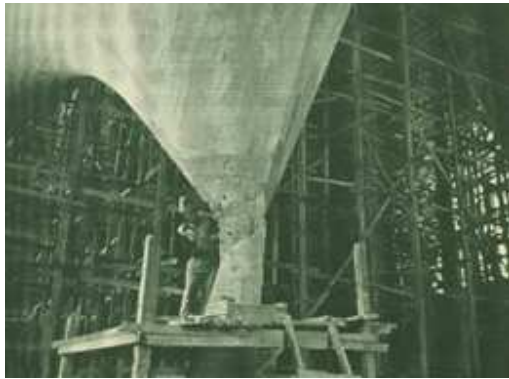


Figura 13. Columna colapsada en la Iglesia de la Medalla Milagrosa
Fuente: Faber, 1970:107.



Figura 14. La misma columna ya recuperada.
Fuente:docomomo.com.

Bóvedas por aristas

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 resultaría casi imposible llevar a la práctica la intersección de dos o más paraboloides hiperbólicos en un mismo plano (figuras 15 y 16) aun cuando estaba geoméricamente concebida desde el siglo XVII. Sin embargo, Candela alcanzó a dar con la solución en términos prácticos y conceptuales y expresó una opinión muy diferente señalando que el diseño era "...interesante, perfectamente lógico y no difícil de construir." (Candela mencionado por Faber, 1970:150).

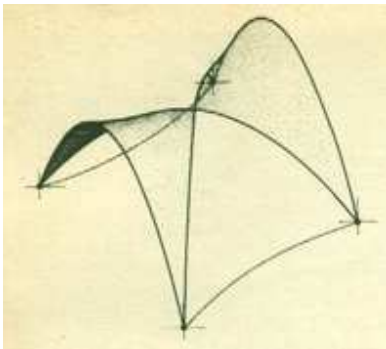


Figura 15. Intersección de dos paraboloides hiperbólicos para cubrir una planta rectangular.
Fuente: Colin Faber, (1970:150).

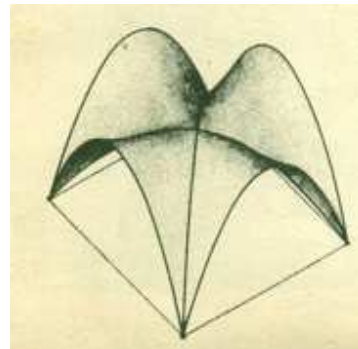


Figura 16. Intersección de cuatro paraboloides hiperbólicos, para cubrir una planta cuadrada.
Fuente: Colin Faber, (1970:150).

Paraboloides hiperbólicos con el eje z no vertical

Construir techos de paraboloides hiperbólicos con el eje z inclinado significó un reto constructivo inigualable. Candela fue el creador de esta innovación que rompió los esquemas superando todas las expectativas que determinan las reglas del equilibrio estable de las superficies doblemente regladas.

La iglesia Nuestra Señora de La Soledad – 1955 (figura 17), ubicada en Coyoacán, ciudad de México; allí se conjugan, además de la sencillez resultante, un empeño por mejorar las técnicas constructivas de construcción con paraboloides hiperbólicos (figura 18).



Figura 17. Capilla del Altillo una vez vaciada la cubierta.

Fuente: Colin Faber, (1970:161).



Figura 18. Accesos laterales de la Capilla del Altillo.

Fuente: <http://es.wikiarquitectura.com>

La innovación geométrico – constructiva del borde libre

Si la construcción de cubiertas doblemente regladas con un bajo espesor de 4 cm, constituyó un salto cualitativo en los procedimientos constructivos del siglo XX, fue aún mayor el hecho de eliminar los refuerzos y 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

Félix Candela calculó y construyó el restaurante Los Manantiales (figura 19), ubicado en Xochimilco, México, D.F.-1958, el cual significó un antes y un después respecto a edificaciones con cubiertas de paraboloides hiperbólicos de concreto armado. El diseño arquitectónico fue de Joaquín y Fernando Álvarez Ordóñez. Respecto a esta singular edificación (figura 20) dice Faber que: “La estructura de Xochimilco es una bóveda por arista octogonal, compuesta por la intersección de cuatro hyperps” (Faber, 1970:216).



Figura 19. Restaurante Los Manantiales.

Fuente: blogs.iteso.mx/arquitectura/

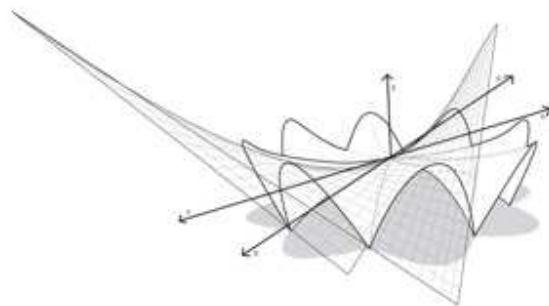


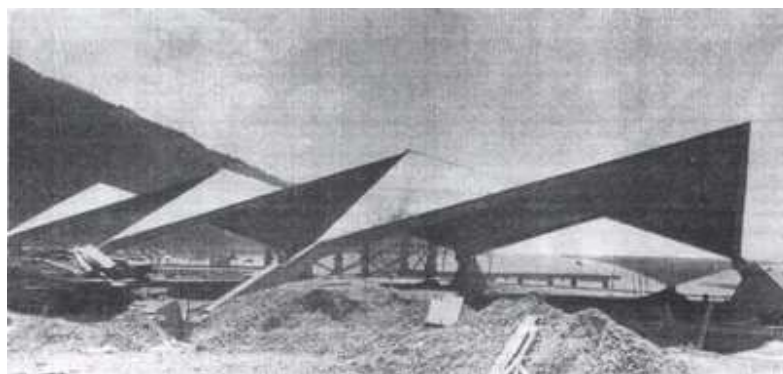
Figura 20. Esquema geométrico del restaurante Los Manantiales.

Fuente: www.arquitecturablanca.com

2. EXPERIENCIA VENEZOLANA DE CONSTRUCCIONES CON PARABOLOIDES HIPERBÓLICOS

2.1. Club Playa Azul primera edificación con cubiertas de paraboloides hiperbólicos en Venezuela

En Venezuela, se inicia la construcción de edificaciones con paraboloides hiperbólicos bajo la influencia de Félix Candela. Fue así como para el año 1958 quedó construida, en concreto armado (figura 21), una edificación original desde el punto de vista estético y estructural a la cual no se hallaban acostumbrados los diseñadores ni los obreros venezolanos. El Club Playa Azul, en el litoral central del hoy estado Vargas, contó con el diseño arquitectónico de Guillermo Shelley y José Chávez.



Figuras 21. Vista de la construcción de las cubiertas de paraboloides hiperbólicos del Club Playa Azul. Naiguatá, estado Vargas.

Fuente: extraída de Faber, 1970:180.

2.2. Paraguas invertidos. Almacenes del IPSFA – Paseo Los Precursores

La cubierta de los almacenes del Instituto de Previsión Social de las Fuerzas Armadas, en Caracas (figuras 22 y 23) son la clara manifestación de lo que ocurre con unos sistemas rectangulares de paraguas invertidos de paraboloides hiperbólicos construidos en 1963, y que en el presente están en muy buen estado de conservación. No se ha identificado aun al autor del diseño arquitectónico, pero los planos originales del proyecto estructural fueron firmados por el Ing. Omar Sotillo Parilli.



Figura 22. Paraboloides hiperbólicos de los Almacenes militares del IPSFA en Caracas.



Figura 23. Almacenes militares del IPSFA en Caracas.
Fuente: imágenes del autor.

Fuente: imágenes del autor.
Memorias de la XXXI Jornada de Investigación del Instituto de Desarrollo Experimental de la Construcción, IDEC, Facultad de Arquitectura y Urbanismo, Universidad Central de Venezuela. 12, 13 y 14 de junio de 2013.

2.3. Cúpulas cuadrangulares. La casa del arquitecto Julio Coll Rojas

La construcción de la casa Coll – construida en 1963 (figuras 24 y 25) denota un resultado que pareciera sumamente sencillo; sin embargo, para el momento de su edificación se contaba con una mano de obra preparada, por la fuerza de la costumbre, a responder eficientemente sólo a trabajos de edificación con encofrados, armados de acero y colocación de mampuestos (bloques de arcilla o de concreto) para la fabricación de estructuras rectilíneas y, en algún caso excepcional, alguna superficie curva de una sola curvatura, principalmente estructuras abovedadas.



Figura 24. Techos de paraboloides hiperbólicos de la casa de la familia Coll para el año 1963.

Fuente: Cortesía Sr. C. Coll.



Figura 25. Casa de la familia Coll, en Caracas, para el año 2007.

Fuente: imágenes del autor.

2.4. Cubiertas de paraboloides hiperbólicos del Cine Canaima

El centro comercial El Parque y el Cine Canaima (figura 26) fueron diseñados, calculados y construidos por el Arq. Álvaro Coto. Estaban ubicados en la Av. Francisco de Miranda, sector Los Palos Grandes, hasta su demolición con explosivos a finales de la década de los años 80, (figura 27) luego de un devastador incendio. Esta obra cedió paso a la construcción de una torre de oficinas de mediana altura que está enclavada con igual nombre en el mismo predio.



Figura 26. Techos de paraboloides hiperbólicos del Cine Canaima.

Fuente: Cortesía Arq. C. Coto.



Figura 27. Estructura de paraboloides hiperbólicos del Cine Canaima posterior al incendio.

Fuente: Cortesía Arq. C. Coto.

2.5. Sede del Colegio de Médicos del Zulia

La propuesta para la sede del Colegio de Médicos (figuras 28 y 29) muestra una de las cubiertas de paraboloides hiperbólicos con mayor audacia geométrica y estructural que se

han construido en Venezuela. Fue un proyecto del Arq. Casas Armengol y la solución estructural de los paraboloides hiperbólicos quedó a cargo del Arq. Coto Asenjo.



Figura 28. Construcción de paraboloides hiperbólicos del Colegio de Médicos del Zulia.
Fuente: Archivo del Arq. Coto Asenjo.
Cortesía de Arq^a Carolina Coto.



Figura 29. Paraboloides hiperbólicos del Colegio de Médicos del Zulia.
Fuente: www.comezu.com/

2.6. Planta ensambladora de Volkswagen

Para 1963 los arquitectos Dirk Bornhorst y Pedro Neuberger proyectaron la Planta de ensamblaje de la Volkswagen (figuras 30 y 31).en Palma Sola - Morón, estado Carabobo, la cual contó con la propuesta para el proyecto y ejecución de los paraboloides hiperbólicos (paraguas invertidos) de Álvaro Coto en colaboración con Félix Candela.



Figura 30. Nave central Planta ensambladora Volkswagen.
Fuente: www.automotriz.net



Figura 31. Paraguas invertidos de la Planta ensambladora Volkswagen.
Fuente: ebay-venezuela.tumblr.com

3. LAS SILLAS DE MONOS PARA MONOS DE UNA Y DOS COLAS

Las construcciones de paraboloides hiperbólicos se diseminaron por todo el mundo gracias a la obra de Félix Candela. Venezuela no fue la excepción. Sin embargo, obras cuya concepción de diseño este fundamentada con base en las sillas de mono para monos de una o más colas (figuras 32 y 33) no han sido ejecutadas. ¿Qué es una silla de mono y como se genera espacialmente? En respuesta a esto se presentan dos representaciones gráficas de estas superficies alabeadas de doble curvatura cuyas modalidades hasta ahora no han sido empleadas en procedimientos constructivos

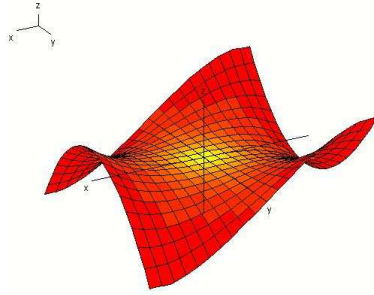


Figura 32. Silla de mono ordinaria para monos de una cola.

Fuente: elaboración propia

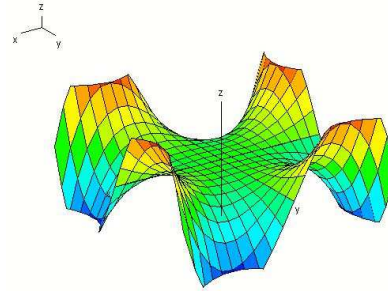


Figura 33. Silla de mono para monos de dos colas.

Fuente: elaboración propia

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

Félix Candela falleció a los 88 años. Una vida profesional plena de aportes en cuanto a diseños, cálculo y construcción de estructuras de doble curvatura en todo el mundo (más de 1400 proyectos). Le tocó a su vez vivir no sólo el auge de construcciones con paraboloides hiperbólicos, sino también el declive en las edificaciones de este tipo de cubiertas. Sin embargo, hasta donde se conoce, jamás incorporó a sus innovaciones constructivas los otros grafos de superficies alabeadas conformadas por las sillas de mono. Ello a pesar de las altas cualidades estéticas que determinan sus condiciones estructurales para responder a esfuerzos de carga bajo condiciones de equilibrio estable. Igual ha ocurrido con los otros profesionales del diseño que han signado su obra bajo la implantación de sistemas de cubiertas doblemente regladas. Las razones que han conllevado a esto están aún por discernirse.

La posibilidad de construir sistemas de cubiertas con los otros grafos de las superficies alabeadas de doble curvatura conformadas espacialmente por las sillas de mono ordinarias para monos de una cola y las de dos colas abren toda una gama de posibilidades arquitectónicas que hasta ahora han sido pasadas por alto por investigadores del campo de innovaciones tecnológicas de la construcción.

AGRADECIMIENTOS

El autor desea agradecer a las siguientes personas:

Arq.^a Carolina Coto, hija del Arq. Álvaro Coto Asenjo, por facilitar material gráfico e información que ha sido incorporado a esta ponencia.

Sr. Calos Coll por ceder el material gráfico de la Casa Coll, diseño de su padre el Arq. Julio Coll Rojas.

Arq.^a Caro Carmona por ceder la fotografía del Pabellon de Rayos Cósmicos.

BIBLIOGRAFÍA

FABER, C. (1970). *Estructuras de Candela*. Editorial Continental. México.