

LAS CÚPULAS DE FÉLIX CANDELA. ANÁLISIS Y RECONSTITUCIÓN DE LAS INSTALACIONES DEPORTIVAS DE LA UNIVERSIDAD BROWN, 1965-1972

THE DOMES OF FÉLIX CANDELA. ANALYSIS AND RECONSTRUCTION OF THE SPORT FACILITIES AT BROWN UNIVERSITY, 1965-1972

Federico Luis del Blanco García, Ismael García Ríos

doi: 10.4995/ega.2017.7358

El trabajo que se expone a continuación es parte del resultado de un trabajo de investigación realizado en la Universidad Politécnica de Madrid. A lo largo de este artículo se analiza el proyecto para las instalaciones deportivas de la Universidad Brown, realizado por Félix Candela en asociación con Cutting-Praeger durante los años 1965-1972.

En el artículo se incluye la documentación original conservada en el depósito de la "Avery Architectural and Fine Arts Library", así como algunos de los planos e infografías realizados para la reconstitución gráfica del proyecto. A partir de éstos hemos podido analizar el complejo trazado geométrico de la cúpula generado a partir de una subdivisión de la esfera que determina la disposición de las bóvedas parabólico-hiperbólicas que conforman el cerramiento.

El trabajo realizado nos permite a su vez visualizar un proyecto que por diversas circunstancias no llegó a construirse nunca.

PALABRAS CLAVE: FÉLIX CANDELA. CÚPULAS. GEOMETRÍA. RECONSTITUCIÓN 3D

The work presented below is part of the results of a research project at "Universidad Politécnica de Madrid". In this paper we analyze the project of the sport facilities at Brown University, which was done by Felix Candela after forming a partnership with Cutting-Praeger, during the years 1965-1972. The original plans made by Félix Candela are included in the research paper. They are stored at Avery Architectural and Fine Arts Library. We have also added computer generated images and drawings, which allowed us to analyze the geometry of the spherical dome. It is subdivided into hyperbolic paraboloid vaults in order to generate the enclosure. The reconstruction of the project allow us to visualize a project which was never built.

KEYWORDS: FÉLIX CANDELA. DOMES. GEOMETRY. 3D RECONSTRUCTION



Durante la década de los años 50 y 60, Félix Candela obtuvo prestigio internacional gracias al desarrollo en su arquitectura de estructuras laminares generadas a partir de paraboloides hiperbólicos. Considerado como uno de los principales arquitectos en la evolución de estas estructuras y tras veinte años dedicándose casi exclusivamente a su construcción, en 1968 Félix Candela construyó una cúpula que salvaba 150 metros de luz, sorprendiendo al mundo con el Palacio de los Deportes para las Olimpiadas de México.

Mientras la arquitectura construida de Félix Candela consiste casi en su totalidad en estructuras laminares conformadas por paraboloides hiperbólicos, el estudio de la no construida desvela que el arquitecto realizó cuatro proyectos basados en grandes cúpulas con un cerramiento generado a partir de fragmentos de paraboloides hiperbólicos. En esta publicación nos centraremos en la cúpula desarrollada para las instalaciones deportivas de la Universidad Brown.

Propuestas para las instalaciones deportivas de la Universidad Brown. 1965 - 1972

Desde 1964 la construcción de estructuras laminares en México sufrió una grave depresión motivada principalmente por condicionantes económicos. En consecuencia, Félix Candela se vio obligado a explorar nuevos territorios.

Tal y como lo narra el propio Félix Candela, en 1965 recibió una llamada de Mr. Cutting ofreciéndole realizar un proyecto de instalaciones deportivas para la Universidad de Brown. La propuesta incluía asociar su nombre con el de Mr. Cutting y Praeger-Kavanagh-Waterbury para formar la nueva asociación Cutting-Praeger-Candela:

...un día me llamó por la mañana a Méjico, a las siete de la mañana o cosa así. Me dice, soy Mr Cutting un arquitecto, tengo un cliente, Mr Nicolas Brown (...) que quiere traer o a Nervi o a usted para hacer un proyecto. Me dice, y como está usted más cerca le llamo a usted, por si quiere asociarse conmigo y con una empresa de Nueva York. Y así salió la asociación. 1

1. Perspectiva exterior de la cúpula, 1968-1970. Imagen del autor

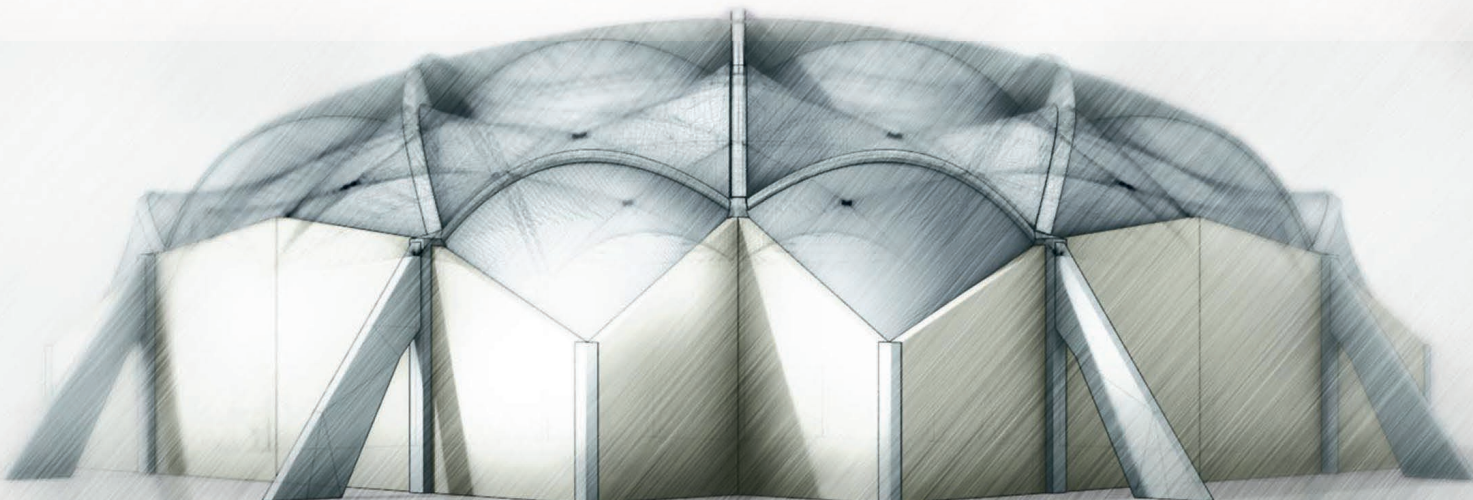
1. Exterior view of the dome, 1968-1970. Author's image

Felix Candela gained international prestige due to the development of thin concrete shell structures generated from hyperbolic paraboloids in the architecture of the 50s. Candela was considered one of the leading architects in the evolution of these structures. After twenty years devoted almost exclusively to its construction, in 1968 Félix Candela built a dome that spanned 150 meters: the Sports Palace for the Olympics in Mexico.

Felix Candela's architecture has been built almost entirely using thin concrete shells formed by hyperbolic paraboloids. The study of his unbuilt architecture has revealed that he made four projects based on large domes which enclosure was generated from fragments of hyperbolic paraboloids. In this paper we will focus on the dome designed for the sport facilities at Brown University.

Designs for the sport facilities at Brown University. 1965-1972

After 1964 the construction of thin concrete shell in Mexico suffered a severe depression motivated mainly by economic reasons, so Felix Candela was forced to explore new alternatives. According to Felix Candela, in 1965 he received a call from Mr. Cutting asking him to design the sports facilities at Brown University. The proposal included to associate his name with





Mr. Cutting and Praeger-Kavanagh-Waterbury to constitute the new Cutting-Praeger-Candela association:

(...) one day he phoned me to Mexico at seven o'clock or so in the morning. He told me: I'm Mr Cutting, an architect, I have a client, Mr Nicolas Brown (...) who wants you or Nervi to design a project. He continued: I am phoning you because you are closer. He asked me if I wanted to join him and a company in New York. And so came the association. **1**

This partnership proposal could not have come at a better time. Felix Candela was open to new architectural alternatives, and the future of the thin concrete shell was uncertain. Candela had the opportunity not only to design architecture in the United States, but also to face a new world: the study of the geometry of the sphere to design domes spanning unimaginable distances.

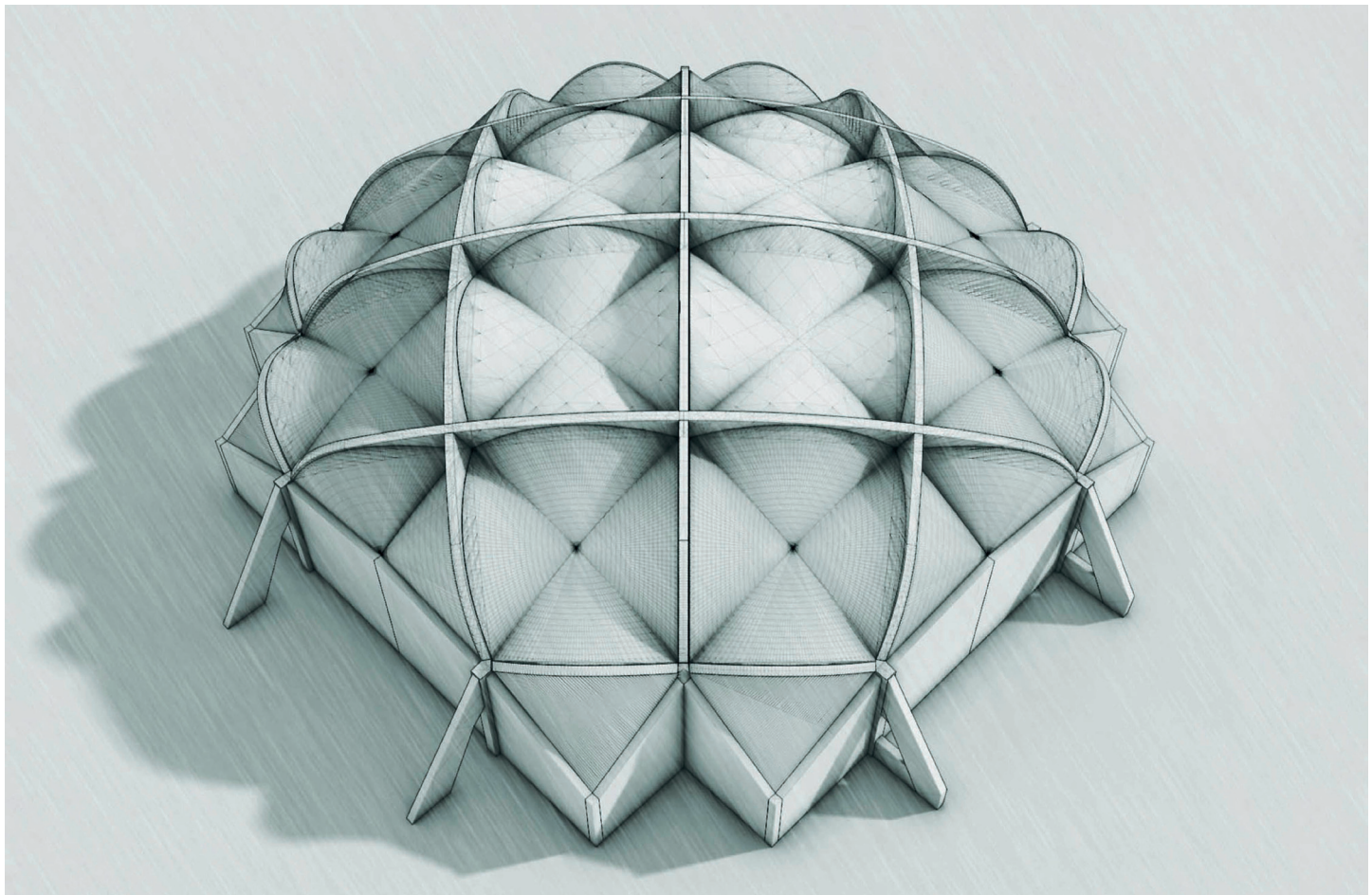
Esta propuesta de asociación no podía llegar en mejor momento, con Félix Candela abierto a nuevas alternativas de experimentación y teniendo ante sí el incierto futuro de las estructuras laminares.

Para Candela suponía la oportunidad no sólo de volver a construir en Estados Unidos, sino también de poder adentrarse en un nuevo mundo, el del estudio de la geometría de la esfera para diseñar cúpulas que salvaran luces inimaginables.

Los proyectos para las instalaciones de la universidad de Brown comenzaron en 1965 y se prolongaron hasta aproximadamente 1972, fecha

en que se disuelve la asociación; durante esos años realizaron múltiples propuestas:

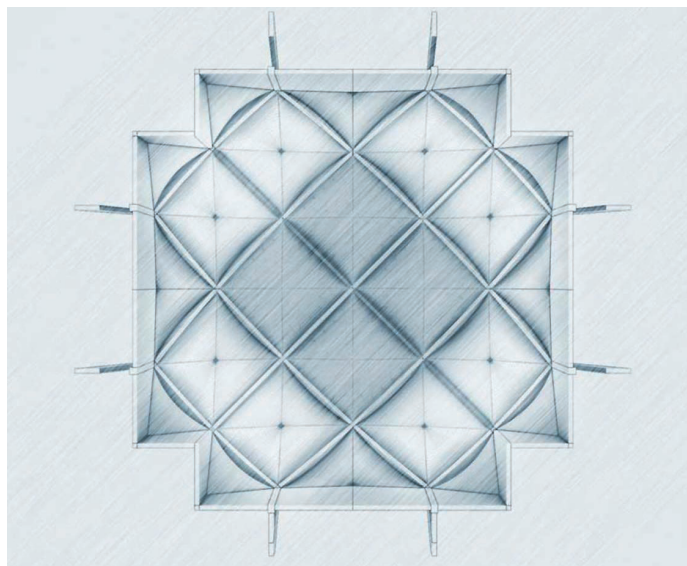
Ese proyecto duró varios años, y no se llegó a hacer nada. Porque a la vez que se terminaba el proyecto, hacíamos el presupuesto y resultaba que era demasiado dinero. Entonces decía, -hágamelo un poco más pequeño-; se lo hacíamos más pequeño, y como había subido el coste de la vida también se le salía el presupuesto. Total, no hicimos nada, pero sí estuvimos trabajando varios años con la empresa ésta de Nueva York. Y ése es uno de los motivos por los que yo salí de Méjico, porque tenía ya trabajo en Nueva York y quería ver si podía liberarme de la cosa de contratista, de los problemas económicos de la empresa... Vivir de una manera más libre. **2**



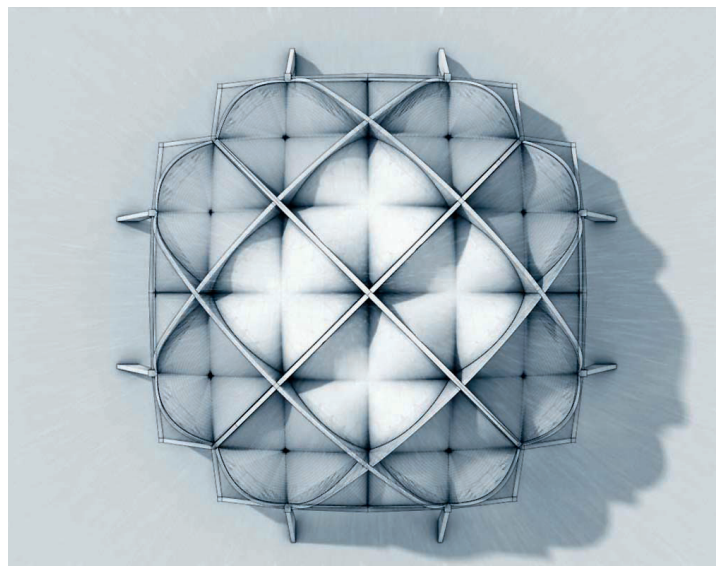


- 2. Perspectiva aérea. Imagen del autor
- 3. Planta invertida fugada. Imagen del autor
- 4. Planta de cubiertas fugada. Imagen del autor
- 5. Sección fugada. Imagen del autor

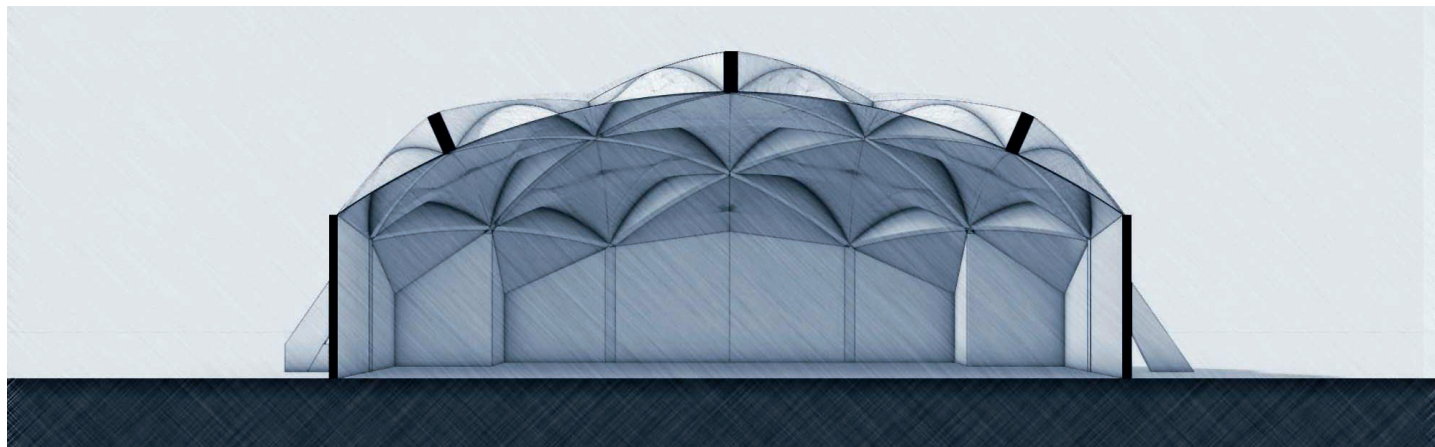
- 2. Aerial perspective. Author's image
- 3. Inverted floor plan. Author's image
- 4. Roof plan. Author's image
- 5. Section. Author's image



3



4



5

Las propuestas se centran en buscar la subdivisión más adecuada de la esfera para generar la estructura de la cúpula.

En el mismo año que Candela presenta las primeras propuestas para la universidad de Brown (1966), es invitado a participar en el concurso para la realización del Palacio de los Deportes, el estadio olímpico, en México junto a Enrique Castañeda y Antonio Peyri; concurso que ganaron y construyeron en 1968 y que fue la única cúpula de grandes dimensiones de Candela.

Primera propuesta para las instalaciones de la Universidad Brown

La solución geométrica que propone Félix Candela en 1965 para las instalaciones de la Universidad Brown supone el antecedente de su posterior y emblemática cúpula para el Palacio de los Deportes de México de 1968. La estructura de la esfera está formada por una retícula metálica conformada por cuadriláteros

The Brown University project began in 1965 and lasted until about 1972, when the partnership was dissolved; during those years numerous proposals were made:

That project lasted several years and we could not do anything. As the project was getting finished, we calculated the budget and it was too expensive. Then he said, –do it slightly smaller–. So we did, but as the cost of living had raised it was also out the budget. At the end we did nothing, but we had been working several years with this company of New York. And that's one of the reasons why I left Mexico. I was already working in New York and I wanted to see if I could get rid of the economic problems of the company... living more freely. **2**



6, 7 y 8. Plantas, alzados y perspectiva de la primera propuesta para la cúpula de la Universidad Brown. Planos originales de Candela

9. Geometría erróneamente atribuida al Palacio de los Deportes. Perteneció a la primera propuesta de las instalaciones Brown

10 y 11. Maqueta y planta estructural de las instalaciones deportivas de la Universidad Brown

The new design approaches were focused on finding the most appropriate subdivision of the sphere to generate the structure of the dome. In the same year that Candela presented the first designs for Brown University (1966), he was invited to participate in the competition for the Sports Palace—the Olympic stadium in Mexico—with Enrique Castañeda and Antonio Peyri. They won the contest and it was built in 1968. It was the only large dome that Candela built.

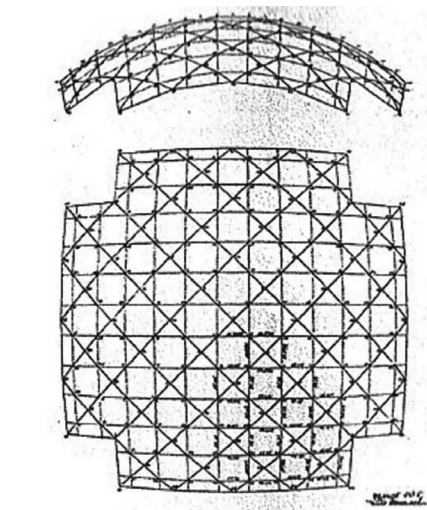
First designs for the sport facilities at Brown University

The geometric solution proposed by Felix Candela for the sport facilities at Brown University in 1965 is the antecedent of the emblematic dome for the Sports Palace in Mexico built in 1968. The structure of the sphere is a metal grid with non-planar quads that determines the perimeter of the hyperbolic paraboloids.

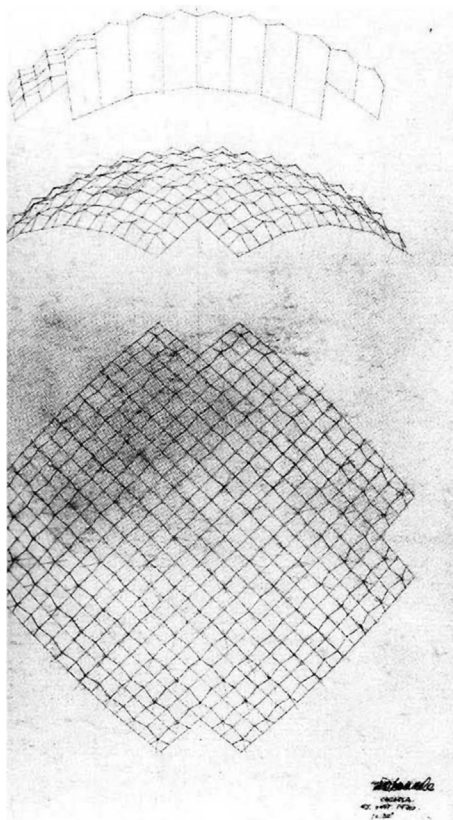
Some years later, in 1975, Candela explained how he designed the Sports Palace dome in Mexico in just one night, re-using the project designed for Brown University's dome.

I persuaded them and then I went home and drew the dome, almost as it is now, in one night. I already had the idea in my head; it is not that I could think like that and I was not a genius either, but simply because I already had the idea. So it was almost a matter of drawing it, nothing else. After that there was no way to change anything back. **3**

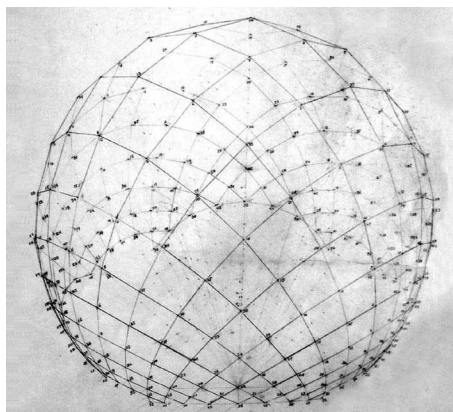
The main geometric and constructive difference between these first designs for Brown University and the Sports Palace in Mexico is that the planes that contains the arches go through the south pole of the sphere. In all domes subsequently developed by Candela (including later designs for Brown University), these planes go through the center of the sphere. Candela followed the advice that Emilio Pérez Piñero gave



6



7



8

6, 7 and 8. Floor plans, elevations and perspective of the first proposals for the dome at Brown University. Candela original plans

9. Geometry wrongly attributed to Sports Palace in Mexico. They belong to the first proposals for the sport facilities at the Brown facility

10 and 11. Model and structural level of the sport facilities at Brown University

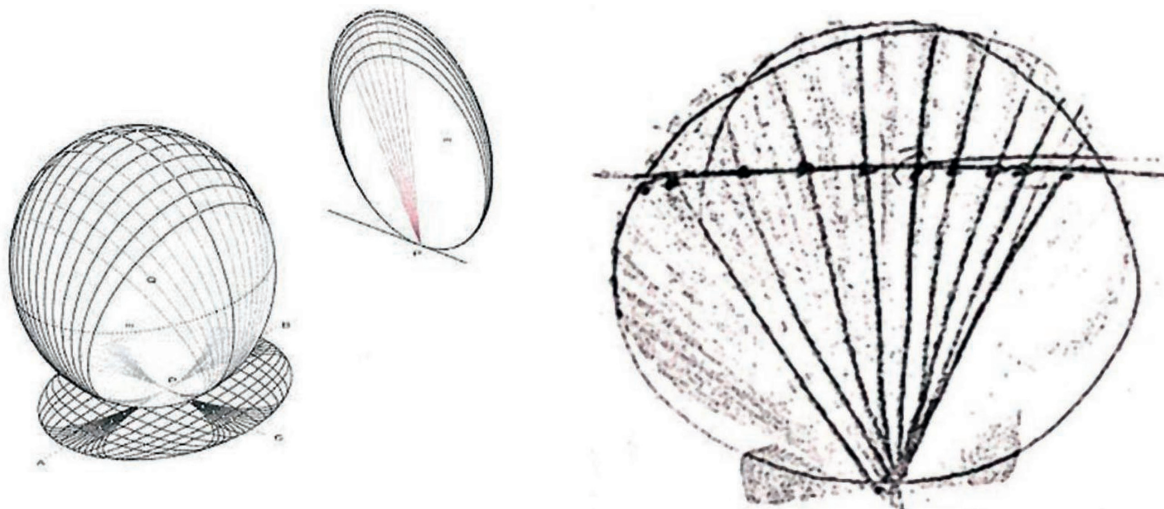
alabeados en el espacio que determinan paraboloides hiperbólicos.

Años más tarde en 1975, Candela explicaba cómo diseñó el Palacio de los Deportes en una sola noche re-aprovechando la propuesta para la cúpula de la Universidad Brown.

Les convencí y entonces me fui a casa y dibujé la cúpula, casi tal como está, en una noche. Yo ya tenía la idea en la cabeza; no es que se me ocurrieran así las cosas ni que sea un genio para eso, sino que simplemente es que ya tenía la idea, o sea que fue una cuestión casi de dibujarla, nada más. Después de eso no hubo manera de cambiar nada. **3**

La principal diferencia geométrica y constructiva entre esta primera propuesta para la Universidad Brown y el Palacio de los Deportes de México radica en que los planos contenedores de los arcos pasan por el polo sur de la esfera. En todas las cúpulas que desarrollará posteriormente, incluyendo las demás versiones para la Universidad Brown, estos planos pasarán por el centro de la esfera. Candela siguió el consejo que le dio Emilio Pérez Piñero en esta materia. La correspondencia mantenida entre ambos fue publicada por Miguel Seguí:

...en la solución del Palacio de los Deportes, al parecer intervino un consejo de Emilio Pérez Piñero, que le indicó a Candela la oportunidad de hacer pasar los planos contenedores de los arcos por el polo sur en lugar de por el centro de la esfera. De este modo, se puede plantear mayor peralte en la cúpula (optimización de



9

esta forma como estructura; minimizando la transmisión de esfuerzos horizontales al terreno o elementos intermedios)... 4

Sin embargo esta correspondencia no estaba referida al Palacio de los Deportes sino a experimentos iniciales para la cúpula de la Universidad Brown. Tras analizar la solución geométrica del Palacio de los Deportes encontramos que los planos sí pasan por el centro de la esfera.

Segunda propuesta para las instalaciones de la Universidad Brown, 1968-1970

La segunda propuesta que plantea la asociación Candela-Praeger-Kavanagh-Waterbury entre 1968-1970

se produce tras la construcción del Palacio de los Deportes de México y mantiene la subdivisión de la esfera en cuadriláteros esféricos. Sin embargo éstos serán de mayores dimensiones y los arcos estructurales serán de hormigón.

Para esta nueva propuesta Candela se sirve de los conocimientos geométricos adquiridos durante la construcción de estructuras laminares en el año 1955. Fue en ese año cuando Candela construyó por primera vez una bóveda de arista a partir de paraboloides hiperbólicos (Bolsa de valores de México). Ahora dispondrá las bóvedas de arista sobre las subdivisiones de la esfera quedando limitadas por los arcos de hormigón.

him in regard to this matter. The correspondence between them was published by Miguel Seguí:

... in the solution of the Sports Palace, apparently an advice from Emilio Pérez Piñero was taken into account: he suggested Candela the possibility to design the planes that contained the arches to go through the south pole instead of the center of the sphere. Thus, the camber in the dome can be increased (to optimize this shape as structure, to minimize the transmission of horizontal forces to the ground) ... 4

However this correspondence was not referring to the Sports Palace but to the dome for Brown University. After analyzing the geometric solution for the Sports Palace, we found that the planes go through the center of the sphere.

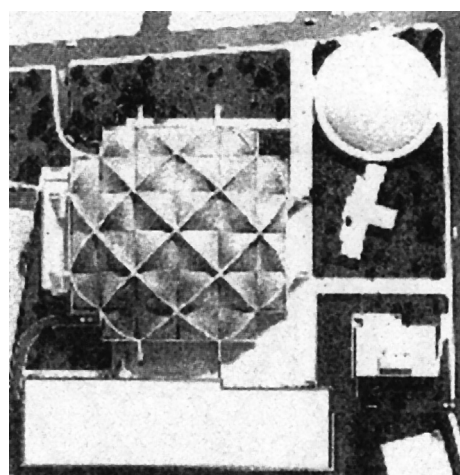
Second design proposal for the sport facilities at Brown University, 1968-1970

The second design proposed by the Candela-Praeger-Kavanagh-Waterbury partnership in 1968-1970 followed the construction of the Sports Palace in Mexico and it did not change the subdivision of the sphere in spherical quadrilaterals. However, they would be larger, and the structural arches would have been made of concrete.

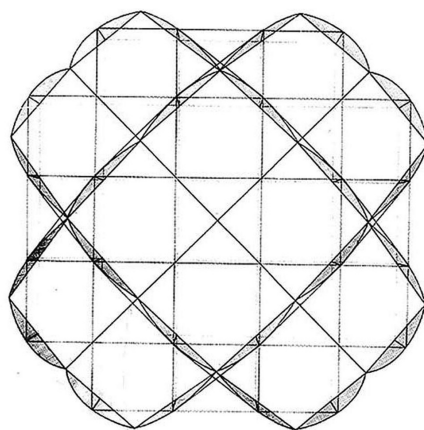
For this new design, Candela used the geometric knowledge acquired during the construction of thin concrete shells in 1955. That was the year when Candela first constructed a groin vault from hyperbolic paraboloids (Stock Exchange in Mexico). In the dome for Brown University the vaults were arranged on the subdivisions of the sphere, being limited by the concrete arches.

Case study analysis

The geometric design of the dome starts from a sphere which is trimmed by two pencil planes,

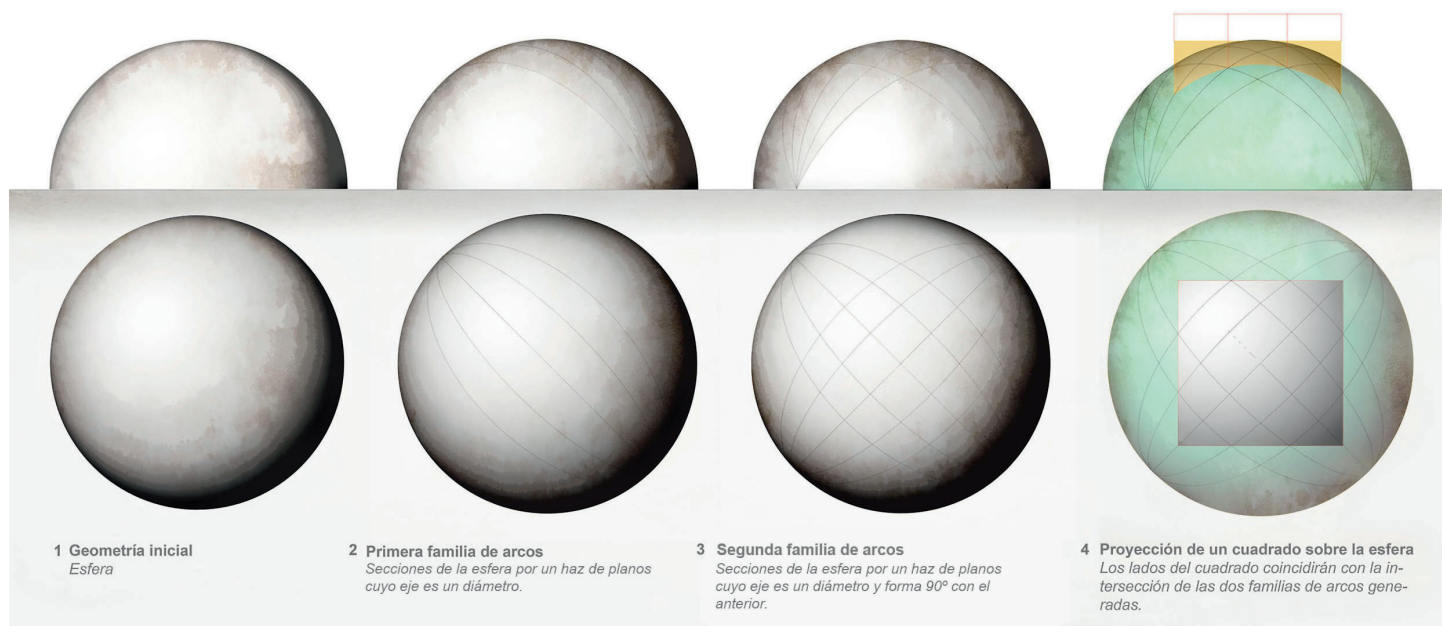


10



STRUCTURAL PLAN
SCALE 1/4" = 1'-0"

11



12

whose axes are two diameters of the sphere. As a result, we obtain two symmetrical families composed by 5 structural arches (Fig. 12). As in the case of the Sports Palace in Mexico (and in the first proposal for the dome at Brown University), the sections in the sphere generate a subdivision formed by spherical quads. However, there are significant differences over the previous designs:

Despite using a similar subdivision of the sphere, the amount of spherical quads in which the dome is subdivided is smaller than the ones used for the Sports Palace in Mexico.

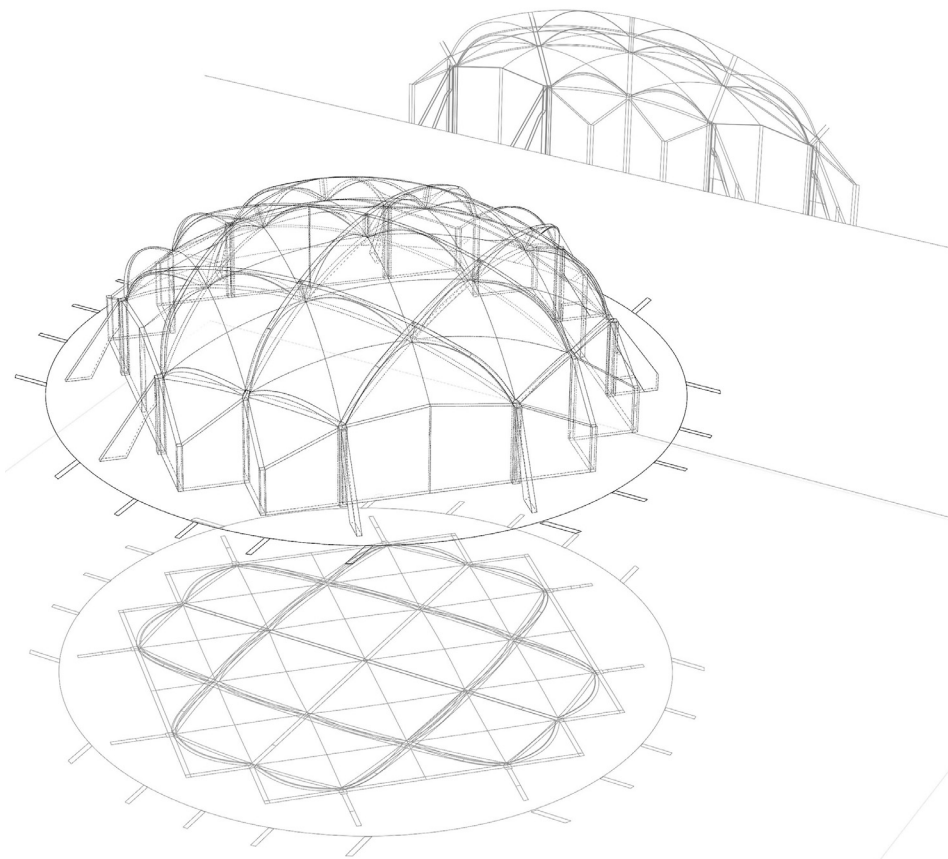
Although the enclosure modules are hyperbolic paraboloids, for the second proposal of the sport facilities at Brown University Candela chose to use groin vaults.

The resulting geometry of the dome appears when projecting on its surface a square perpendicular to the horizontal plane. The projected sides of the square go through the intersection points of the structural arches and they determine four vertical planes (the limits of the dome).

This process not only provides the characteristic geometric rigor used in Candela's projects (avoiding random forms) but allows the dome to have a coherent form with its structure. The perimeter wall that gets the combined stresses of the arches is built onto the sides of the square we described above. The mechanical stresses are transmitted to the buttresses, which are arranged perpendicularly to the perimeter and are located at the intersection points between the spherical arcs

12. Estudio de geometría. Imagen del autor
13. Perspectiva axonométrica. Imagen del autor
14. Estudio de geometría. Imagen del autor
15. Estudio de geometría. Imagen del autor
16. Estudio de geometría. Imagen del autor

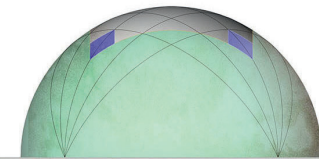
12. Study of geometry. Author's image
13. Axonometric perspective. Author's image
14. Study of geometry. Author's image
15. Study of geometry. Author's image
16. Study of geometry. Author's image



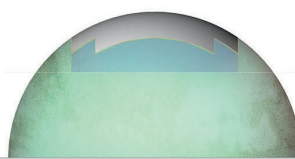
13



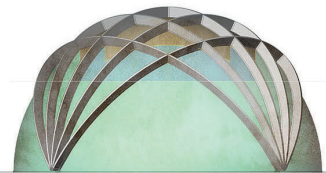
5 Recorte en la geometría del cuadrado.
Las esquinas del cuadrado se recortan, formándose cuadrados tangentes a las familias de arcos.



6 Obtención del casquete de la cúpula.
La geometría resultante de la cúpula es la proyección del cuadrado mencionado sobre la esfera

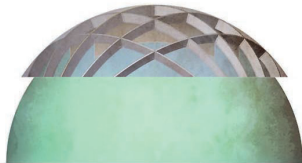


7 Altura de la cúpula.
La esfera se secciona mediante un plano horizontal que será el suelo.

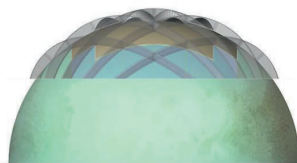


8 Estructura principal.
La estructura principal está formada por las dos familias de arcos, que se seccionarán mediante el plano horizontal del suelo

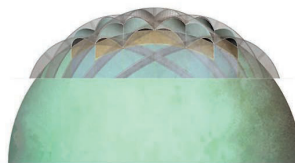
14



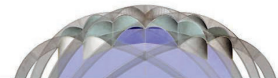
9 Sección de arcos estructurales
Los arcos se seccionan mediante un plano horizontal que será el suelo.



10 Cerramiento de bóvedas parabólico hiperbólicas (módulo 1)
En los cuadriláteros resultantes entre los arcos, se coloca un cerramiento formado por bóvedas parabólico hiperbólicas

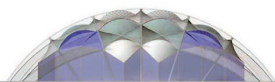


11 Bóvedas hyper (módulo 2)
Toda la superficie del casquete de la esfera se cubre mediante bóvedas parabólico - hiperbólicas.



12 Medias bóvedas hyper (módulo 3).
Los cuadriláteros que no abarcan el casquete de cúpula se cubren mediante dos fragmentos de hyper, que se corresponden con media bóveda parabólico hiperbólica.

15



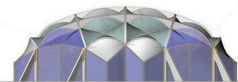
13 Geometría completa
Geometría completa de la cúpula para la universidad de Brown.



14 Cerramiento sin estructura
El cerramiento de la cubierta se conforma mediante bóvedas parabólico hiperbólicas, con muros verticales que cierran el perímetro.

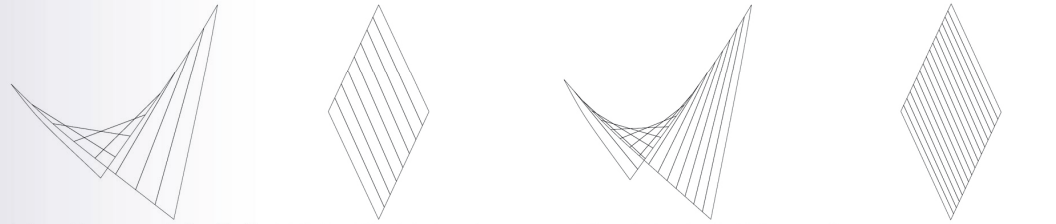
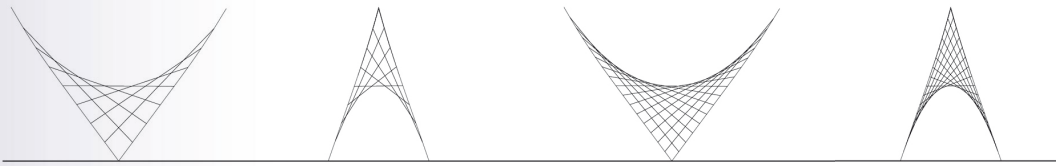


15 Contrafuertes
Los arcos estructurales transmiten sus esfuerzos a los contrafuertes. Éstos se sitúan en la intersección de las dos familias de arcos.



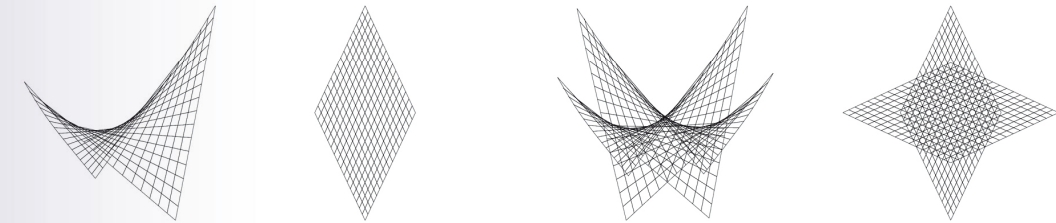
16 Vista a 45 grados
Geometría resultante vista a 45 grados.

16



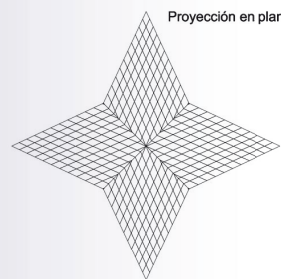
1. Generatrices en una sola dirección. Paraboloides hiperbólico de bordes rectos.

2. Aumento de la densidad de las generatrices

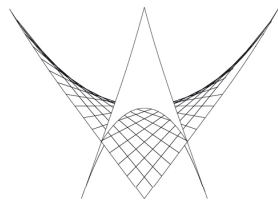


3. Generatrices en dos direcciones. Superficie doblemente reglada

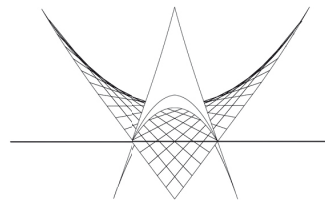
4. Generatrices de los dos paraboloides que formarán la bóveda de arista



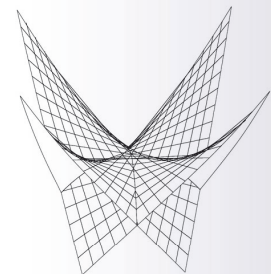
Proyección en planta



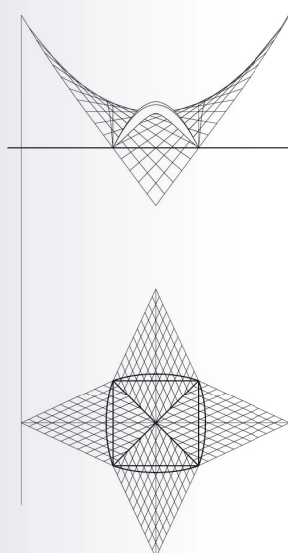
Proyección en alzado



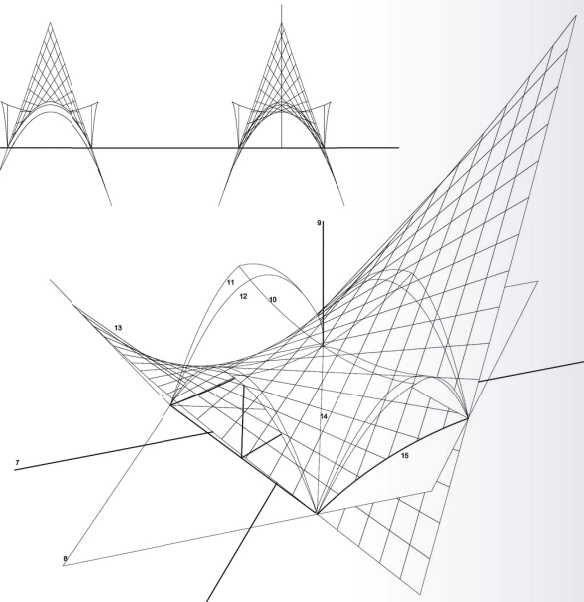
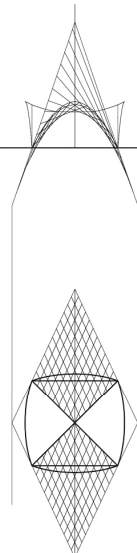
Proyección en alzado
Nivel suelo y límite bóveda



5. Intersección de los dos paraboloides que formarán la bóveda de arista



E 1:100





17. Bóvedas de arista parabólico-hiperbólicas.
Imagen del autor

17. Groin vaults (hyperbolic paraboloid).
Author's image

Estudio y análisis

La configuración geométrica de la cúpula parte de una esfera seccionada por dos haces de planos cuyos ejes son sendos diámetros de la esfera. Como resultado obtenemos dos familias simétricas de 5 arcos estructurales (Fig. 12).

Al igual que en el Palacio de los Deportes de México (y que en la primera propuesta para la cúpula de la Universidad Brown) estas secciones en la esfera generan una subdivisión en cuadriláteros esféricos. Sin embargo aparecen diferencias importantes con respecto a los diseños anteriores:

- Vuelve a emplear una subdivisión similar de la esfera, sin embargo, la cantidad de cuadriláteros esféricos en los que se subdivide la cúpula es menor que en el Palacio de los Deportes de México. Como consecuencia de ello éstos son de mayores dimensiones.
- Aunque los módulos de cerramiento sigan siendo paraboloides hiperbólicos, para la segunda propuesta de las instalaciones deportivas de la Universidad Brown Candela opta por emplear bóvedas de arista parabólico-hiperbólicas.

La solución geométrica resultante de la cúpula surge al proyectar perpendicularmente respecto del plano horizontal un cuadrado sobre ella. Los lados proyectados del cuadrado pasan por los puntos de intersección de los arcos estructurales y determinan cuatro planos verticales que serán los límites de la cúpula.

Este proceso no sólo aporta el rigor geométrico característico en las obras de Candela –evitando formas aleatorias– sino que dota a la cúpula de una forma coherente con su estructura. El muro perimetral que recoge

los esfuerzos de los arcos se construye sobre los lados del cuadrado antes descrito. Posteriormente los esfuerzos se transmiten a los contrafuertes dispuestos perpendicularmente al muro de carga y situados en los puntos de intersección entre los arcos esféricos y el lado del cuadrado para permitir así una distribución simétrica de las cargas (Fig. 14).

La diferencia de altura que proporciona el canto de los arcos estructurales posibilita la inserción de una bóveda de arista parabólico-hiperbólica en cada cuadrilátero esférico.

Módulos de cerramiento: las bóvedas de arista parabólico-hiperbólicas

Mientras que en la primera propuesta para las instalaciones deportivas de la Universidad Brown y el Palacio de los Deportes de México Félix Candela opta por generar un cerramiento a partir de cuatro fragmentos de paraboloides hiperbólicos con bordes rectos –cuadriláteros alabeados– y simétricos entre sí, en esta segunda opción para la universidad Brown Candela emplea bóvedas de arista parabólico-hiperbólicas con bordes curvos que son parábolas.

Como se ha señalado anteriormente, los módulos de cerramiento están formados por bóvedas de aristas generadas a partir de la intersección de dos paraboloides hiperbólicos (Fig. 17).

La separación máxima entre los arcos de la cúpula es 30 metros, de manera que cada bóveda de arista ha de salvar dicha luz. Esta dimensión no es aleatoria pues había sido establecida años atrás por Candela como la máxima luz eficiente para las estructuras laminares de este tipo.

and the side of the square. Thus it allows a symmetric stress transmission (Fig. 14). The height difference that provides the arch thickness enables the insertion of a groin vault in each quad.

Enclosure modules: the groin vaults

In the first proposal for the sports facilities at Brown University and the Sports Palace in Mexico, Felix Candela chose to create an enclosure from four fragments of hyperbolic paraboloids with straight edges (warped quads symmetrical to each other). In this second option for Brown University, Candela used groin vaults generated from hyperbolic paraboloid with curved edges.

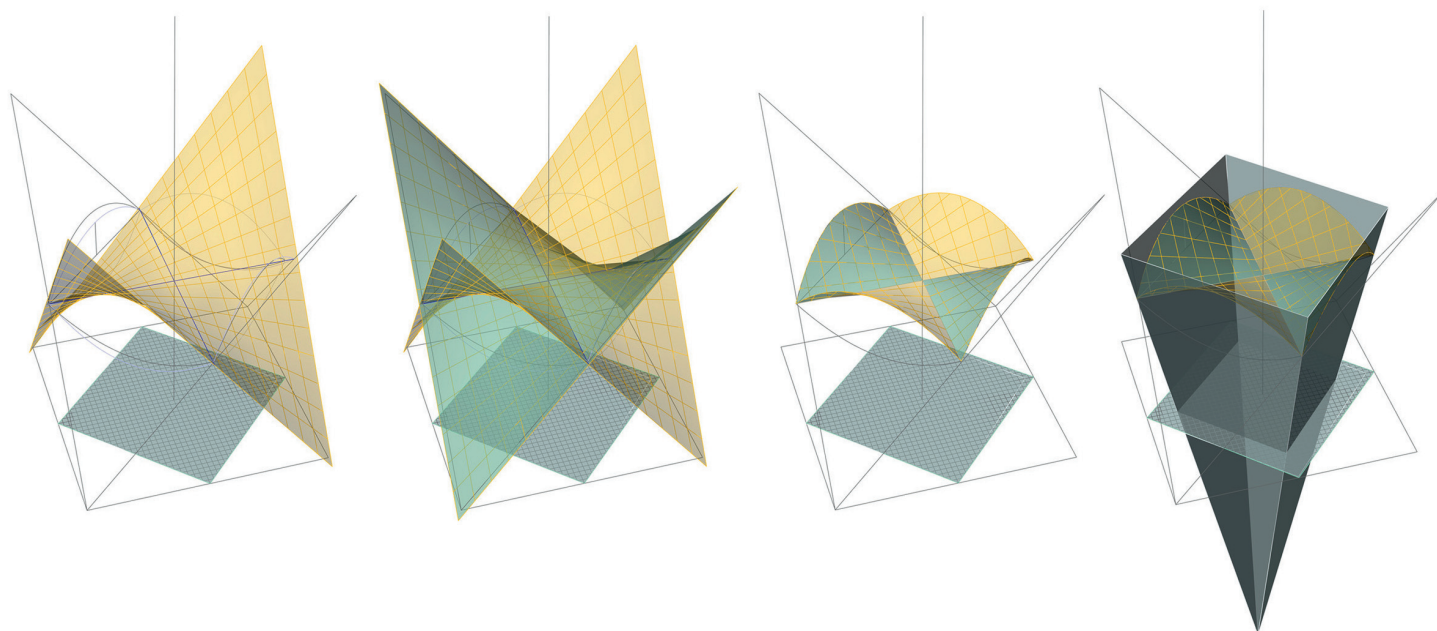
As noted above, the enclosure modules are formed by groin vaults generated from the intersection of two hyperbolic paraboloids (Fig. 17).

The maximum separation between the arches of the dome was 30 meters, so that each groin vault needed to span that distance. This dimension was not random, as it had been established years ago by Candela as the maximum efficient span for this type of thin concrete shells.

Geometrical analysis of the groin vaults

The property of being a ruled surface allows the hyperbolic paraboloid to generate a groin vault from two families of straight generatrices. If we trim the hyperbolic paraboloid by planes that are parallel to its axis, the intersection are straight lines –if the planes are parallel to the plane director–, or parabolas –if the plane has any other orientation–. If the sector planes are not parallel to the axis we get hyperbolas, if the plane is perpendicular to the axis and goes through the vertex of the paraboloid, the section is formed by a pair of straight lines, a particular case of degenerated hyperbola.

In order to adapt the geometry of the domes to the curvature of the sphere, the axes of the paraboloids go through the center of the sphere. The planes containing the structural arches limit the different vaults (these planes are containing the diameter of the sphere, and consequently they go through the center of it). Therefore the



18

axes of the hyperbolic paraboloids and the planes that are defining their perimeter are not parallel and go through the center of the sphere.

The edge of the vaults is embedded in the arches of the spherical dome, unlike the vaults that Candela used to do in the past.

Conclusion

The Sports Palace for the Olympics in Mexico '68 was not the only large dome Felix Candela projected, although it was the only one that was built. Between 1965 and 1972 Candela projects evolved from its famous thin concrete shells to domes based on the geometry of spheres with a parabolic-hyperbolic enclosure.

The analyzed project marks the beginning of a new phase in the work of Felix Candela, characterized by the design of large domes—whose main structure consists of spherical arches—, with an enclosure generated from fragments of hyperbolic paraboloids. Candela will experiment with different geometric solutions for the domes as well as different possibilities of combination for the hyperbolic paraboloids.

After this project, Candela will make use of domes in the projects for the competition of the Sports City in Kuwait (1969) and the Anoeta Velodrome (1972), the latter with Emilio Pérez Piñero. ■

Análisis geométrico de los módulos de cerramiento

La condición de superficie reglada del paraboloides hiperbólico permite generar las bóvedas de arista parabólico-hiperbólicas a partir de dos familias de generatrices rectas. Si seccionamos los paraboloides hiperbólicos por planos paralelos a su eje obtenemos rectas—en caso de que los planos sean paralelos al plano director— o parábolas—si el plano tiene cualquier otra orientación—. Si los planos sectores no son paralelos al eje obtenemos hipérbolas—si el plano es perpendicular al eje y pasa por el vértice del paraboloides, la sección está formada por un par de rectas, caso particular de hipérbola degenerada—.

Para adaptar la geometría de las bóvedas a la curvatura de la esfera, los ejes de los paraboloides que forman cada una de las bóvedas pasan por el centro de la esfera.

Los planos que contienen los arcos estructurales limitan las distintas bóvedas—recordamos que estos planos contienen al diámetro de la esfera, y como consecuencia pasan por el centro de la misma—. Por tanto los ejes de los paraboloides hiperbólicos que

conforman las bóvedas y los planos que delimitan el perímetro de las mismas no son paralelos y pasan por el centro de la esfera.

El borde de las bóvedas de arista, a diferencia de los de las bóvedas que Candela realizó mediante estructuras laminares, no es libre sino que se empotra en los arcos esféricos de la cúpula.

Conclusión

El Palacio de los Deportes para las olimpiadas de México 68 no fue la única cúpula de grandes dimensiones que Félix Candela proyectó, aunque sí la única que se llegó a construir. Entre los años 1965 y 1972 los proyectos de Candela evolucionaron desde sus famosas estructuras laminares hacia cúpulas basadas en la geometría de la esfera con cerramiento parabólico-hiperbólico.

El proyecto analizado marca el comienzo de una nueva etapa en la obra de Félix Candela caracterizada por el diseño cúpulas de grandes dimensiones—cuya estructura principal está formada por arcos esféricos—, con un cerramiento generado a partir de fragmentos de paraboloides hiperbólicos.

Notes

12 / De Garay, Graciela. August 1994. Interview to the architect Felix Candela at his home in Riley, North Carolina. Sound file.



18. Cerramiento parabólico-hiperbólico.
Imagen del autor
19. Perspectiva exterior. Imagen del autor

18. Hyperbolic-paraboloid enclosure. Author's image
19. Exterior view of the dome, 1968-1970. Author's image

Candela experimentará tanto con las distintas soluciones geométricas de las cúpulas como con las variadas posibilidades de combinar los paraboloides hiperbólicos.

En años posteriores Candela volverá a utilizar cúpulas en los proyectos del concurso para la ciudad deportiva de Kuwait (1969) y de la cubierta para el velódromo de Anoeta (1972), éste último junto a Emilio Pérez Piñero. ■

Notas

1,2/ De Garay, Graciela. 9 agosto 1994. Entrevista al arquitecto Félix Candela realizada en su domicilio en Riley, North Carolina. Archivo de sonido.

3 / Baldellou, Miguel Ángel; Candela, Félix; otros. Noviembre 1995. "La experiencia del exilio. Un encuentro en Santiago. 1975" *Revista Nacional de Arquitectura*, 43-60. 1975. Madrid.

4 / Seguí Buenaventura, Miguel. 2005. Félix Candela y Emilio Pérez Piñero: un diálogo imaginal. Ministerio de vivienda.

Referencias

- BASTERRA OTERO, Luis Alfonso. 1998. Las estructuras arquitectónicas de Félix Candela: Una revisión actual. Tesis doctoral, ETSAV, departamento de construcción. Valladolid.
- CANDELA, Félix. Noviembre 1963 *Arquitectura y estructuralismo*. *Arquitectura*, nº 59. Madrid.
- CANDELA, Félix. 1969. Proyecto de centro de deportes en Kuwait. *Arquitectura* nº 132. Madrid.
- CANDELA, Félix. 1985. En defensa del Formalismo y otros escritos. Xarait Ediciones. Bilbao.
- CASSINELLO, Pepa. 2010. Félix Candela centenario 1910-2010. Fundación Juanelo Turriano. Madrid.
- CASSINELLO, Pepa. 2010. Félix Candela, la conquista de la esbeltez. Ayuntamiento de Madrid. Madrid.
- CUETO, José Ignacio del. 2010. Félix Candela 1910-2010. IVAM, SECC.
- FABER, Colin. 1963. Candela, the Shell builder. Architectural Press. London.
- SEGUÍ BUENAVENTURA, Miguel. 1994. Félix Candela arquitecto: exposición, depósito Elevado del Canal de Isabel II. MOPTMA, Instituto Juan de Herrera. Madrid.

3 / Baldellou, Miguel Ángel; Candela, Félix; others. November 1995. "La experiencia del exilio. Un encuentro en Santiago. 1975" *Revista Nacional de Arquitectura*, 43-60. Madrid

4 / Seguí Buenaventura, Miguel. 2005. Félix Candela y Emilio Pérez Piñero: un diálogo imaginal. Ministerio de vivienda.

References

- BASTERRA OTERO, Luis Alfonso. 1998. Las estructuras arquitectónicas de Félix Candela: Una revisión actual. Tesis doctoral, ETSAV, departamento de construcción. Valladolid.
- CANDELA, Félix. Noviembre 1963 *Arquitectura y estructuralismo*. *Arquitectura*, nº 59. Madrid.
- CANDELA, Félix. 1969. Proyecto de centro de deportes en Kuwait. *Arquitectura* nº 132. Madrid.
- CANDELA, Félix. 1985. En defensa del Formalismo y otros escritos. Xarait Ediciones. Bilbao.
- CASSINELLO, Pepa. 2010. Félix Candela centenario 1910-2010. Fundación Juanelo Turriano. Madrid.
- CASSINELLO, Pepa. 2010. Félix Candela, la conquista de la esbeltez. Ayuntamiento de Madrid. Madrid.
- CUETO, José Ignacio del. 2010. Félix Candela 1910-2010. IVAM, SECC.
- FABER, Colin. 1963. Candela, the Shell builder. Architectural Press. London.
- SEGUÍ BUENAVENTURA, Miguel. 1994. Félix Candela arquitecto: exposición, depósito Elevado del Canal de Isabel II. MOPTMA, Instituto Juan de Herrera. Madrid.

