

Algunas palabras (y símbolos) sobre el arquitecto Félix Candela

Roberto Pichardo Mendoza

Facultad de Ciencias, Departamento de Matemáticas
Universidad Nacional Autónoma de México
rpm@ciencias.unam.mx

1. Introducción

Empecemos con las presentaciones: Félix Candela nació el 10 de enero de 1910 en Madrid y se formó como arquitecto en España. Estos estudios le valieron ser nombrado capitán de ingenieros del lado republicano durante la guerra civil española, y como corolario de esta actividad fue recluido en un campo de concentración francés, mientras esperaba asilo por parte de alguna de las naciones que aceptaban refugiados de guerra. Es así como llega a nuestro país en junio de 1939.

Candela se adapta bien a México y en 1950 funda con los hermanos Fernández Rangel la empresa Cubiertas Ala, especializada en instalar estructuras industriales. A la par de su participación en el negocio, Candela se mantiene activo enviando artículos al American Concrete Institute para dar a conocer su obra. De este modo comienza a desarrollar prestigio internacional y así es frecuentemente invitado a dar ponencias y a participar en congresos.

Tras la muerte de su esposa en 1963 y la obtención del premio Augusto Perret, finiquita el Proyecto del Palacio de los Deportes en 1971 y toma la decisión de mudarse a Estados Unidos, lugar en donde vivió hasta diciembre de 1997 cuando falleció como consecuencia de una afección cardíaca.

Se afirma en [5] que la época dorada de Candela como arquitecto abarca los cincuentas y sesentas. Además, y esto es fundamental para el presente escrito, fue la incorporación del paraboloides hiperbólico a sus construcciones lo que lo catapultó a la cúspide de su fama.

Con estos antecedentes a la mano, estamos listos para explicar la estructura y fin de este artículo: en la sección siguiente haremos una

exploración matemática de la superficie tridimensional denominada paraboloides hiperbólico, pues nos interesa explicar, en la sección 3, las ideas básicas detrás de la construcción de estas superficies empleando concreto. Finalmente, cerramos el documento con un mapa de edificaciones de Ciudad de México que involucran al paraboloides hiperbólico con la sincera intención de que el interés del lector por el tema lo motive a visitarlas.

2. Paraboloides hiperbólicos

Para esta sección fijemos una terna $a, b, c \in \mathbb{R}$ de modo que $a > 0$, $b > 0$ y $c \neq 0$. Ahora denotemos por $\mathcal{Q}$ al lugar geométrico en $\mathbb{R}^3$ dado por la ecuación cartesiana

$$\frac{x^2}{a^2} - \frac{y^2}{b^2} = cz, \quad (1)$$

esto es, $\mathcal{Q}$ es la colección de puntos (x, y, z) que satisfacen (1).

Presentamos en la figura 1 un ejemplo de este lugar geométrico. Así, no sorprende que $\mathcal{Q}$ sea llamado coloquialmente *silla de montar*, aunque el término que emplearemos nosotros será *paraboloides hiperbólico*.

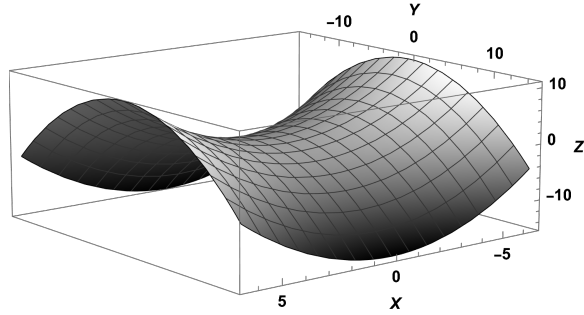


Figura 1. En la imagen hemos puesto $a = 2$, $b = \sqrt{15}$ y $c = 1$, amén de haber graficado únicamente los puntos (x, y, z) de $\mathcal{Q}$ que cumplen $|x| \leq 6.5$ y $|y| \leq 15$.

Para lo que sigue supondremos familiaridad con el material sobre planos y sus intersecciones presentado en [1, §9-3, pp. 318-323].

Con la idea en mente de mostrar que para cada $P \in \mathcal{Q}$ existe una línea recta ℓ de modo que $P \in \ell \subseteq \mathcal{Q}$ (en otras palabras, que $\mathcal{Q}$ es una *superficie reglada*), tomemos $r \in \mathbb{R}$ y denotemos por α_r y β_r a los planos dados por las ecuaciones cartesianas

$$\frac{x}{a} + \frac{y}{b} = r \quad \text{y} \quad r \left(\frac{x}{a} - \frac{y}{b} \right) = cz, \quad (2)$$

respectivamente. Así, $(1/a, 1/b, 0)$ y $(r/a, -r/b, -c)$ son normales para α_r y β_r ; más aún, como estos vectores no son paralelos, se sigue que la intersección de los planos, $\alpha_r \cap \beta_r$, es una línea recta, a la que denotaremos por ℓ_r . Comprobemos a continuación que $\ell_r \subseteq \mathcal{Q}$.

Si $(x, y, z) \in \ell_r$, tenemos que las ecuaciones (2) son satisfechas y consecuentemente:

$$\frac{x^2}{a^2} - \frac{y^2}{b^2} = \left(\frac{x}{a} + \frac{y}{b}\right) \left(\frac{x}{a} - \frac{y}{b}\right) = r \left(\frac{x}{a} - \frac{y}{b}\right) = cz,$$

o sea, $(x, y, z) \in \mathcal{Q}$.

Por otro lado, dado $P = (x_0, y_0, z_0) \in \mathcal{Q}$, hagamos $s := x_0/a + y_0/b$ y notemos que esto produce la relación $P \in \alpha_s$. Además, el hecho de que las coordenadas de P satisfagan (1) nos garantiza que

$$cz_0 = \frac{x_0^2}{a^2} - \frac{y_0^2}{b^2} = \left(\frac{x_0}{a} + \frac{y_0}{b}\right) \left(\frac{x_0}{a} - \frac{y_0}{b}\right) = s \left(\frac{x_0}{a} - \frac{y_0}{b}\right)$$

y, por ende, $P \in \beta_s$. En suma, $P \in \ell_s \subseteq \mathcal{Q}$.

A las rectas de la forma ℓ_r les llamaremos *reglas de $\mathcal{Q}$* . Indaguemos un poco más de estas líneas. Primeramente, se sabe que ℓ_r tiene por vector de dirección al producto vectorial

$$\left(\frac{1}{a}, \frac{1}{b}, 0\right) \times \left(\frac{r}{a}, -\frac{r}{b}, -c\right) = \left(-\frac{c}{b}, \frac{c}{a}, -\frac{2r}{ab}\right);$$

luego, podemos multiplicar a este vector por el escalar $-ab$ para deducir que $(ac, -bc, 2r)$ también dirige a ℓ_r . En segundo lugar, el hacer $x = 0$ en (2) nos da un sistema de ecuaciones cuya solución es $y = br$ y $z = -r^2/c$; en otros términos, $(0, br, -r^2/c) \in \ell_r$.

Del párrafo previo se sigue que ℓ_r tiene ecuaciones paramétricas

$$x(t) = act, \quad y(t) = br - bct \quad y \quad z(t) = -r^2/c + 2rt. \quad (3)$$

Así, en teoría, uno puede construir $\mathcal{Q}$ usando a las rectas ℓ_r como mampuestos: para cada número real r colocamos en $\mathbb{R}^3$ a la recta descrita por las ecuaciones (3). Naturalmente, en la práctica es imposible abarcar todos los valores de r , aunque suena razonable el seleccionar una lista finita, pero suficientemente grande, de números r de modo que las correspondientes rectas ℓ_r estén lo suficientemente cercanas como para dar la ilusión de continuidad (véase la figura 2). Este último es precisamente el problema que sirve de hilo conductor a [2], un artículo cuya lectura recomendamos ampliamente.

Regresemos a hablar de la obra de Candela.

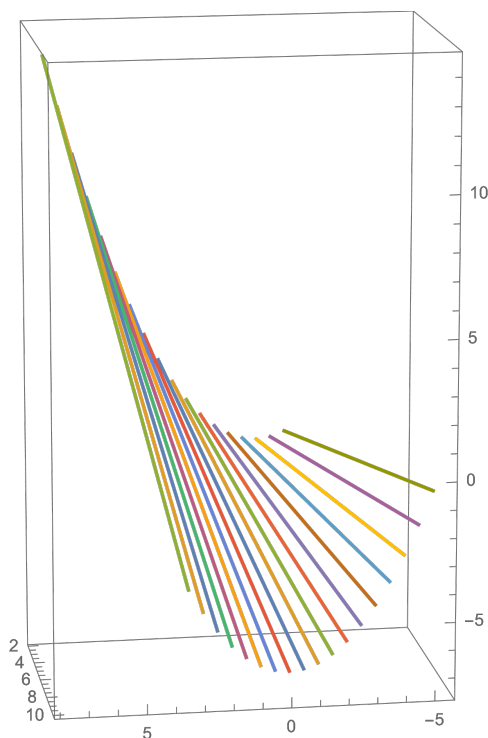


Figura 2. Igual que en la figura previa, hemos tomado $a = 2$, $b = \sqrt{15}$ y $c = 1$, pero ahora graficamos segmentos de las rectas ℓ_r , donde r es uno de los números 0.082, 0.332, 0.582, 0.832, 1.082, 1.332, 1.582, 1.832, 2.082, 2.332, 2.582, 2.832, 3.082, 3.332, 3.582, 3.832, 4.082 y 4.332 (por ejemplo, el segmento que aparece en el extremo derecho de la imagen corresponde a la recta $\ell_{0.082}$).

3. Paraboloides hiperbólicos en la arquitectura

En esta sección mostraremos algunas fotografías tomadas por el autor de una maqueta que se exhibió en la exposición «Aquella primavera creadora... cascarones de concreto armado en México» de la Facultad de Arquitectura de la UNAM en 2017.

A continuación describimos un procedimiento para construir, usando concreto, una sección de un paraboloide hiperbólico. Primeramente, emplearemos vigas de madera como base para la estructura de hormigón que deseamos. Estas deberán estar acomodadas como los segmentos de recta de la figura 2, esto es, como parte de las reglas del paraboloide que queremos obtener (véase la figura 3). Así, tendremos lo que en albañilería se conoce como *la cimbra*, o sea, la estructura de madera que sirve como soporte.

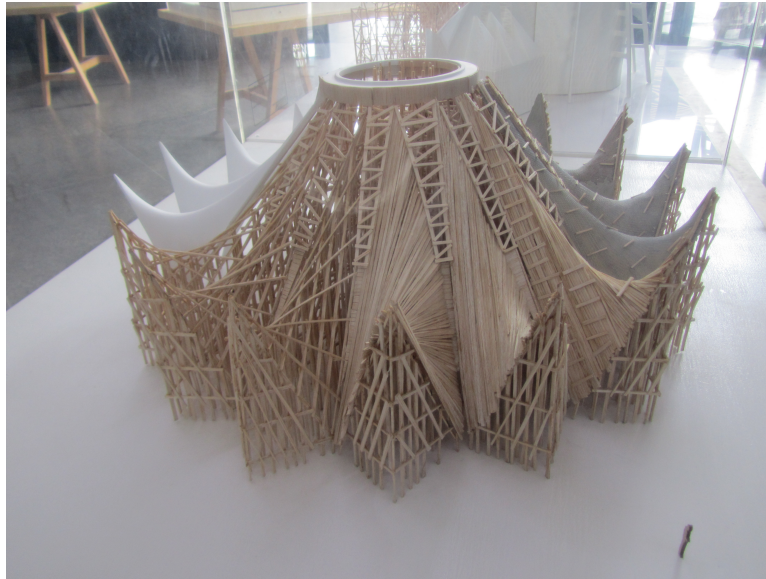


Figura 3. Note la similitud de esta imagen con la presentada en la figura 2.

En segundo término, coloquemos sobre la cimbra *el armado*, es decir, la estructura metálica que le dará resistencia y rigidez a la pieza de concreto que deseamos (véase la figura 4).

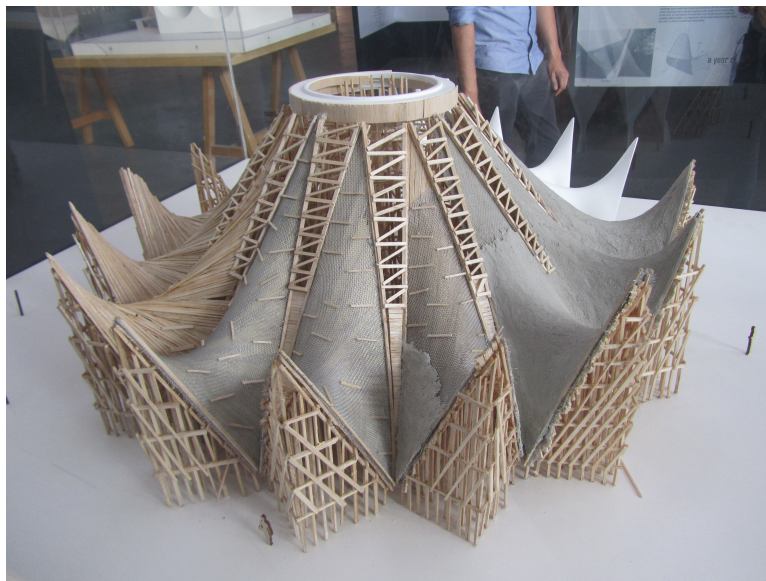


Figura 4. A la malla metálica que aparece en la parte izquierda de esta foto se le llama *el armado*.

Finalmente, llegó el momento de *la colada*, esto es, de verter el concreto sobre la cimbra de modo que cubra completamente al armado

(de este modo, el armado será el esqueleto de nuestra estructura). Tras aplanar la revoltura para darle una textura homogénea (véase la figura 5) y esperar a que el concreto se seque, pasamos a remover la cimbra.

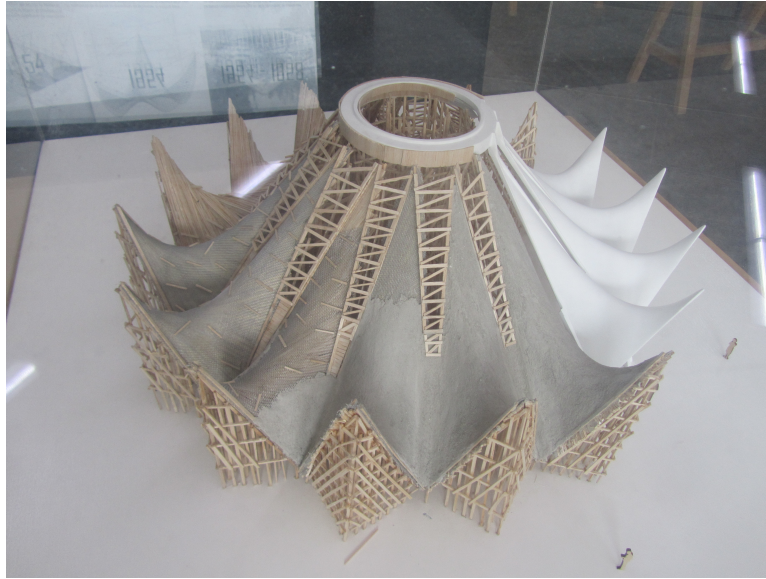


Figura 5

Un ejemplo donde este procedimiento fue aplicado exitosamente es la Parroquia de la Virgen de la Medalla Milagrosa, cuya fotografía aparece en la figura 6.

Aunque es natural pensar que el empleo de secciones del paraboloides hiperbólico en la construcción de edificios obedece puramente a fines estéticos, resulta que este no siempre es el caso. Por ejemplo, de acuerdo a [4], se requería que el Instituto de Física Nuclear de la Ciudad Universitaria de la UNAM contará con un pabellón en cuyo interior se instalarían instrumentos para captar y medir rayos cósmicos. Debido a esto, el grosor de la cubierta del edificio en cuestión no debería exceder los 1.5 cm, pero sí tendría que ser lo suficientemente amplio como para albergar el equipo científico correspondiente. La solución hallada e implementada por Candela fue construir el pabellón empleando un par de paraboloides hiperbólicos (véase la figura 7).

Dados los cálculos estructurales que Candela llevó a cabo para confirmar que su solución al problema del pabellón funcionaría, uno se inclina a pensar en él como un ingeniero más que como un arquitecto y resulta que no estamos solos, pues, tal y como se explica en [5], una cantidad considerable de arquitectos que le fueron contemporáneos no lo consideraba como colega. Paradójicamente, el mismo fenómeno sucedía con los ingenieros.



Figura 6. Este edificio fue proyectado por los arquitectos Félix Candela y José Luis Benlliure.



Figura 7. Esta edificación, originalmente conocida como el Pabellón de Rayos Cósmicos, actualmente funciona como ludoteca.

4. Invitación

Como se muestra en [3] (un muy buen catálogo de la obra de Candela en nuestro país), no todos los edificios del arquitecto tienen que ver con el paraboloides hiperbólico y por eso creo conveniente poner en

la figura 8 un código QR con el enlace a un mapa en donde están marcadas las construcciones de Ciudad de México que satisfacen dos requerimientos: fueron diseñados por Candela e incorporan partes del paraboloide hiperbólico en su diseño.



Figura 8

Espero que se animen, como lo hice yo, a echarse una «candelada».

Bibliografía

- [1] E. F. Beckenbauch, F. J. Fleming y W. Wooton, *Geometría analítica moderna*, 2.^a ed., Publicaciones Cultural S. A. de C. V., 1985.
- [2] R. Carrillo Catalán, J. L. Cisneros Molina y N. Santana Medina, «Construyendo una silla de montar», *Arenario*, vol. 1, núm. 1, mayo 2001, 24–38.
- [3] J. I. del Cueto Ruiz-Funes, *Cascarones de Candela*, 1.^a ed., UNAM, 2016.
- [4] ———, «Instituto de Física Nuclear», en *Guía de la arquitectura de la Ciudad Universitaria de 1952*, ed. L. Noelle, UNAM, 1.^a ed., 2019.
- [5] J. A. Tonda, *Félix Candela*, 1.^a ed., Consejo Nacional para la Cultura y las Artes, 2000.