

ESTUDIO Y APLICACIÓN DE SUPERFICIES CURVAS EN EL PATRIMONIO ARQUITECTÓNICO. RESEARCH AND APPLICATIONS OF CURVED SURFACES IN ARCHITECTURAL HERITAGE.

GONZÁLEZ CASARES, JOSE ANTONIO. Arquitecto y Arquitecto Técnico.
Ejercicio libre de la profesión y docente en el área de la Expresión Gráfica. jogocaar@ugr.es
Departamento de Construcciones Arquitectónicas de la Universidad de Granada.

MARTINEZ CARRILLO, MANUEL J. Arquitecto Técnico.
Funcionario de la Junta de Andalucía y docente en el área de la Construcción Arquitectónica.
manueljmartinez@ugr.es
Departamento de Construcciones Arquitectónicas de la Universidad de Granada.

RUIZ-SANCHEZ, ANTONIO. Arquitecto Técnico, Ingeniero de la Edificación, Licenciado en Bellas Artes y Licenciado en Historia del Arte.
Funcionario de la Junta de Andalucía y docente en el área de la Construcción.
antonioruiz@ugr.es
Departamento de Construcciones Arquitectónicas de la Universidad de Granada.

Resumen

a) Fondo y Objetivos: Desde hace tiempo se viene detectando la aparición de formas poco justificadas en la arquitectura contemporánea, que responden tan solo a un desmesurado avance de las técnicas CAD y a la época de bonanza económica que se ha vivido hasta fechas recientes. En este sentido se están alzando voces de reconocido prestigio, que argumentan a favor de una aplicación de la geometría en los diseños que racionalice el proceso de diseño, aprendiendo del amplio patrimonio que nos dejó el periodo de la modernidad. Este trabajo de investigación, pretende indagar en el uso y aplicaciones que ha tenido la geometría de superficies curvas en desarrollo del patrimonio arquitectónico e ingenieril (pasado y contemporáneo).

b) Métodos: Se ha comenzado estudiando las diferentes superficies curvas, y seleccionando aquellas que presenten unas mejores características constructivas y estructurales. Una vez seleccionadas las superficies, se procede a estudiar la aplicación que de las mismas se ha hecho en el patrimonio arquitectónico, seleccionándose ejemplos relevantes bien por su proyección internacional, o por la innovadora aportación que supuso su realización.

c) Resultados: Dadas sus especiales características geométricas, constructivas y estructurales, se han seleccionado las superficies regladas de doble curvatura cuádricas, tras lo cual se han analizado ejemplos relevantes como "Puente de San Petri" de E. Torroja; "Pabellón de Rayos Cósmicos" de F. Candela; "Marquesina de Músicos en Santa Fé" de F. Candela; "Laboratorios Jorba" M. Fisac; "Estación de autobuses en César" J. García; "Pabellón de cine en la Bauhaus" Jürgen Ruth y Rainer Gumpff.

d) Conclusiones: En la actualidad, el uso de las superficies laminares de doble curvatura, ha perdido popularidad comparado con los años 50 o 60, cuando los arquitectos las adoptaron como una nueva forma de expresión artística. Aunque hay signos, sin embargo, de que las superficies curvas regladas están interesando a la nueva generación de arquitectos e ingenieros. Nunca llegará a la popularidad que una vez tuvieron, pero recobrarán su antiguo prestigio al usarse convenientemente. Esperamos que trabajos como este, animen a los futuros arquitectos e ingenieros a seguir usando geometrías que dan belleza y eficiencia a la arquitectura e ingeniería.

Summary

a) Fundamentals and Objectives: It has been detected in recent times, the appearance of hardly justified forms in contemporary architecture, this is due to an uncontrolled advanced of the CAD techniques, and the recently period of economic prosperity. In this way, many prestigious voices are raising, arguing in favor of an application of geometry in design, which could rationalize the design process, learning from the wide heritage that the modernity gave us. This paper, tries to go deeply in the use and applications that curved surfaces geometry, has had in the development of architectural heritage (past and contemporary).

b) Methods: Firstly, it has been analyze the different curved surfaces, and those which presented the most suitable constructive and structural properties have been selected. Once they have been selected, we proceeded to study their application to the architectural heritage, and relevant examples have been selected, either for its international relevance, or for the innovative contribution that its construction meant.

c) Results: Given its special geometrical, constructive and structural characteristics, the ruled double curved quadric surfaces has been selected, therefore the examples chosen are the following: "San Petri Bridge" de E. Torroja; "Cosmic Rays Pavilion" de F. Candela; "Music shelter in Santa Fe" de F. Candela; "Jorba Laboratories" M. Fisac; "Bus Station in César" J. García; "Cinema pavilion in Bauhaus" Jürgen Ruth y Rainer Gumpff.

d) Conclusions: Nowadays, the use of doubly curved laminar surfaces has lost its popularity, compared with the 50's or 60's when architects adopted them as a new way of expression. Although there are signs that ruled curved surfaces, are attracting the attention of the new generation of architects and engineers. This kind of geometry will not probably get the popularity the once had, but will regain the former prestigious if they are used correctly. We hope that works like this, will encourage future architects and engineers to go on using this geometry that gives beauty and efficiency to architecture and engineering.

Introducción.

De las cosas que siempre han atraído de la geometría es su capacidad unificadora de distintas disciplinas, como la construcción, las estructuras, la acústica... y por supuesto "el arte".

Esta es, quizás, una de las labores que aún mantienen en común ingenieros y arquitectos, ya que ambos han de tener en cuenta las leyes geométricas de sus proyectos para hacerlos estables, útiles y bellos.

Como ya nos recordaba el propio Félix Candela en su "*En defensa del formalismo*", la voz griega Morphe y la latina Forma, significan "*las cualidades que hacen de cada cosa lo que es*" (Candela, 1985) parece por tanto necesario volver a reconsiderar el estudio riguroso de la forma como objeto de atención por parte del arquitecto.

Parecen **poco justificadas** algunas de las realizaciones arquitectónicas actuales, amparadas por los cálculos de potentes programas de ordenador que no responden a una **mínima lógica**, tan solo son fruto del descontrolado avance de la técnica y de la época de bonanza económica que se ha vivido a comienzos de este siglo XXI. En ese sentido, algunos autores argumentan a favor de una aplicación adecuada de la geometría en los diseños, que racionalice el proceso de generación de la arquitectura y la ingeniería (Comas; Crespo; Martínez, 2002; Bechthold, 2006).

Estas afirmaciones vienen, en parte, derivadas de la capacidad de algunos programas de ordenador de calcular representaciones matemáticas que han hecho prescindibles el conocimiento propio de las estructuras geométricas-matemáticas que las sustentan (Chiarella, s.f).

En esta línea otros autores afirman "*el ordenador, caracterizado por una rapidez que, con muchísima frecuencia, impone su ritmo y anula, o cuando menos distorsiona, el resultado de un trabajo que debería ser en su esencia intelectual*" (Olalquiaga & Olalquiaga, 2005).

Por otro lado basta una mínima incursión en el mundo profesional para darse cuenta de las veces que hay que recurrir a la geometría en mayor o menor grado para resolver una cuestión de forma, de acústica o de estabilidad, entre otros.

Estas cuestiones, podrían englobarse en una única pregunta ¿Cuál es el papel de la geometría de superficies curvas en la arquitectura contemporánea?, que en palabras del propio Gaudí "*La geometría en la ejecución de las superficies no complica, sino que simplifica la construcción*", además el estudio de las superficies reviste especial interés, por su etiología geométrico-constructiva, determinante de la forma arquitectónica (García Reig, 1999).

Este trabajo de investigación, pretende indagar en el uso y aplicaciones de la geometría de superficies curvas en la arquitectura e ingeniería contemporáneas.

Materiales y Métodos.

Se abordará un estudio de las superficies regladas de doble curvatura, de donde se pretende dar una visión general de las mismas, revisando sus formas de generación geométricas, así como sus propiedades constructivas y estructurales, poniendo de manifiesto la utilidad y necesidad de dichas formas geométricas en la actualidad.

La metodología seguida se compondrá de dos partes:

- Análisis de la geometría de superficies curvas.

Se analizarán dichas superficies, y se seleccionarán aquellas cuyas propiedades las hagan idóneas para su aplicación constructiva, además se detallarán las condiciones geométricas, analíticas, propiedades estructurales y constructivas de dichas superficies.

Esta primera parte permitirá comprender las profundas implicaciones que existen entre la geometría y la concepción del proyecto.

- Aplicaciones en el patrimonio Arquitectónico.

Se hará una selección de aquellos proyectos de mayor relevancia, que hagan uso de las superficies estudiadas y seleccionadas. Detallando las características que dichas superficies han aportado a la obra.

Esta selección comprenderá desde obras de mitad del siglo XX, consideradas ya como "clásicas", hasta obras actuales del siglo XXI. Se atenderá con especial interés a las obras realizadas en España, o por arquitectos españoles.

Resultados.

1_ ELECCION DE SUPERFICIES A ESTUDIAR.

De todas las superficies regladas, las **cuádricas**, son las únicas que representan tres importantes ventajas (Izquierdo Asensi, 2002):

- Son las de ecuación más sencilla. *"La creación de un modelo de elementos finitos, requeriría hacer conjeturas, a menos que se usen superficies descritas matemáticamente"* (Bradshaw et al., 2002).
- Tienen dos sistemas de generatrices, que permite aplicaciones prácticas en su construcción, como la colocación de armaduras en dos direcciones, su encofrado o pretensado (García Reig, 1999).
- Admiten tres directrices rectilíneas, simplificándose así el trazado de generatrices.

En cuanto al aspecto de la economía de su construcción, se afirma que *"las superficie puede formarse por elementos rectos, que es mucho más económico que con curvas"* (Bradshaw et al., 2002). Esto ha ocasionado, que dichas superficies sean las más utilizadas en arquitectura e ingeniería (Monterde, 2004).

Además, estas superficies no son solo adecuadas al diseño, sino que también presentan grandes ventajas estructurales frente a las superficies desarrollables, siendo sus aplicaciones arquitectónicas ilimitadas (Rodríguez, 2002).

2_ PROPIEDADES GEOMETRICAS Y DE CONSTRUCCION

La facilidad de construcción de estas figuras radica en que son regladas, *"Esta propiedad es muy conveniente a la hora de realizar encofrados o ..., sencillamente darle forma a la estructura"* (Meyer, Ferrer, Velazco, Díaz, & Civil, 2008) , ciertamente, la inclusión de rectas en una superficie permite su encofrado con simples tablas y armado de redondos en el caso del hormigón armado, o la disposición de vigas rectas en dos direcciones, en el caso de estructuras espaciales, por lo que desarrollaremos, fundamentalmente, las construcciones de dichas figuras bajo esa consideración de superficie generadas por elementos rectilíneos.

Además de la inclusión de rectas, hemos de señalar, que toda sección plana de una cuádrica, es siempre una cónica, lo cual permite definir con precisión curvas iguales en diferentes cuádricas, que permita a su vez realizar la transición de una superficie a otra.

La generación de cónicas ha sido generalmente causa de problemas al intentar crearlas en sistemas CAD, ya que incluso en la actualidad muchos de los programas de diseño por ordenador no tienen implementadas herramientas que permitan diseñar una cónica a partir de 5 elementos (puntos o rectas tangentes), aunque esta cuestión está intentando corregirse

con la implementación de macros en programas de CAD basados en las propiedades de la recta de Pascal y el punto de Brianchón (Albarracín, Pérez, & Sire, 2004).

Estas implementaciones informáticas, permitirían una fácil y precisa representación de las secciones planas de la cuádricas objeto del presente estudio.

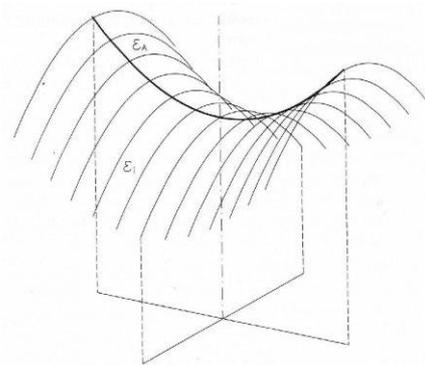
a) **Paraboloide hiperbólico:**

Es una superficie, en la que podemos localizar dos familias de rectas, cada una de estas familias es paralela a un determinado plano (plano director).

El paraboloide hiperbólico, también denominado "hypar" o de forma coloquial "silla de montar" ya que su forma recuerda a ese objeto. Es una superficie sin centro y con eje y vértice.

Generación del paraboloide hiperbólico.

- Esta forma, se puede generar como figura de traslación de una parábola ϵ_1 , paralelamente a su plano, sobre otra ϵ_2 , con concavidades opuestas, apoyando el vértice de ϵ_1 sobre ϵ_2



Generación del paraboloide hiperbólico, como traslación de una parábola ϵ_1 paralela a sí misma, sobre otra parábola ϵ_2 de concavidad opuesta. Imagen de (Gomis Martí, 1996), pag 11.16

- Según un cuadrilátero alabeado (cuatro puntos cualesquiera del espacio no coplanarios). Las generatrices de la figura se obtienen dividiendo los lados opuestos de un cuadrilátero alabeado cualquiera en partes iguales y uniéndolos.

Esta ha sido una de las formas más empleadas, en la construcción de obras de arquitectura e ingeniería, siendo muchas de las obras de Félix Candela y Antonio Gaudí, claros exponentes de su uso, asociado al hormigón armado.

- Cortando con planos paralelos, un par de rectas que se crucen. Esto permite que a partir de 2 rectas (vigas), podamos buscar los puntos de igual cota (sección de esas rectas con un plano horizontal), y su unión determine un paraboloide hiperbólico

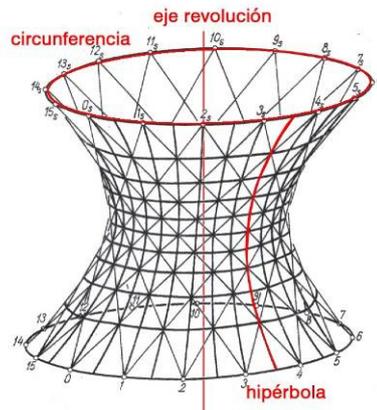
b) **Hiperboloide hiperbólico:**

Esta es una superficie de cono director (todas las generatrices son paralelas a un cono)

En esta superficie podemos encontrar todas las secciones cónicas (circunferencia, elipse, parábola e hipérbola).

Generación del hiperboloide.

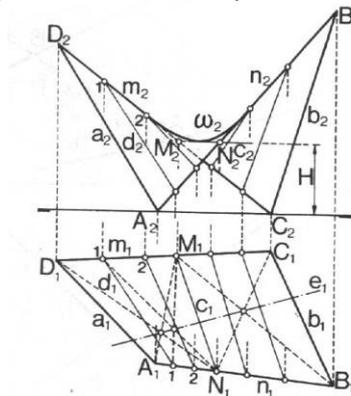
- Como figura de revolución de una hipérbola alrededor de un eje.



Hiperboloide como figura de revolución.

Imagen de (Gheorghiu & Dragomir, 1978), pag 106

- Por un cuadrilátero alabeado. Tal y como se comentó para el paraboloides, por un cuadrilátero alabeado pasan infinitos hiperboloides, necesitándose una tercera generatriz (como la C1-C2 del ejemplo) para definir uno en concreto, quedando el hiperboloide determinado por las series proyectivas A, N, B, ... y D, M, C, De bases m y n.



Hiperboloide por cuadrilátero alabeado y serie proyectiva. Imagen de (Izquierdo Asensi, 2002), pag 112

- Mediante giro de una recta con otra que se cruza, si el giro es circular, tendremos una figura de revolución. Esta forma resulta muy cómoda de generar en la mayoría de los programas de CAD, mediante operaciones de generación por revolución

3_PROPIEDADES ESTRUCTURALES

Inicialmente los diseñadores de estas estructuras tuvieron que desarrollar técnicas para la verificación de sus diseños como por ejemplo el uso de maquetas, que se probaban bajo carga para probar su seguridad.

Pero, la superficie funicular para las cargas muertas no es la misma que para determinadas cargas puntuales como la carga de viento o nieve.

Esta falta de un método realmente seguro, obligaba a los diseñadores a desarrollar una "intuición estructural" a la hora de proponer una forma inicial, esta "intuición" se basaba fundamentalmente en un amplio conocimiento de las superficies geométricas de trabajo.

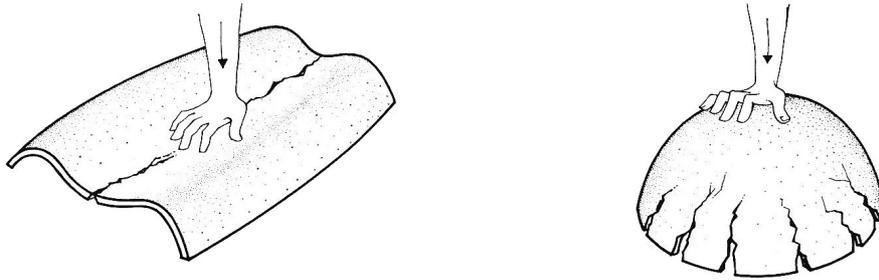
Hoy en día, los métodos de análisis por elementos finitos con la ayuda de los ordenadores, se han impuesto en el cálculo de superficies laminares.

El modelizado de las superficies de doble curvatura suele hacerse por triangulación o cuadriláteros. Con los primeros, se puede modelizar cualquier superficie ya que siempre se pueden contener 3 puntos en la superficie.

Pero la potencia de los ordenadores, no debe suplir esa mencionada "intuición" estructural, del todo necesaria para un buen diseño.

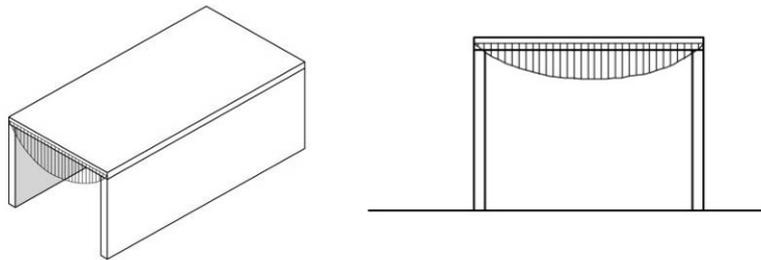
A continuación, expondremos de forma breve el funcionamiento de dichas estructuras.

Las superficies de doble curvatura negativa, sufren menos problemas de pandeo, ya que la tensión de la curvatura en la otra dirección actúa de estabilizador.



*Efecto de la doble curvatura en las láminas que impide el desarrollo de esfuerzos de flexión
imagen de (Candela, 1953)*

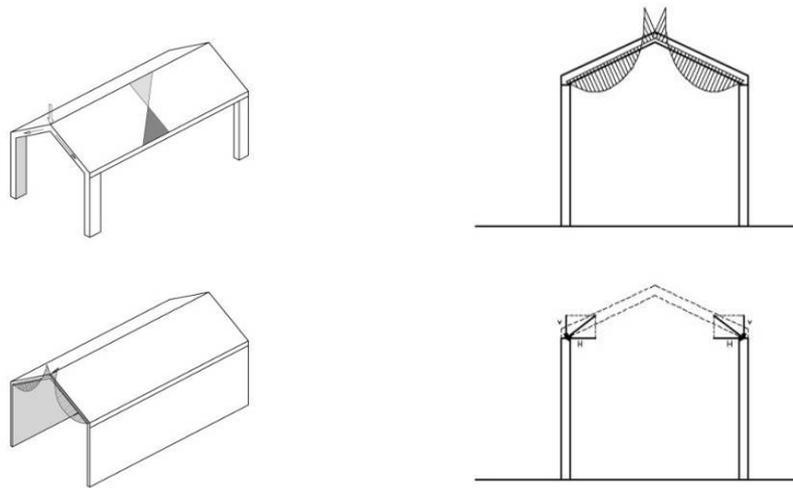
Para poder comprender bien el mecanismo de trabajo de las superficies, podemos ir conformando una superficie de forma progresiva, e ir viendo como varía su forma de trabajo: Un elemento plano biapoyado trabaja fundamentalmente a flexión (un mecanismo poco eficaz ya que no hace trabajar a todo el material por igual)



Esfuerzos de flexión en plano horizontal. (imagen del autor realizada con Autocad ®)

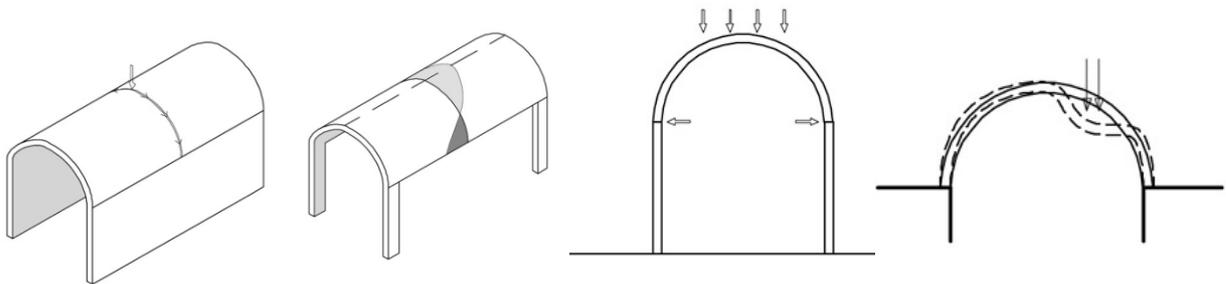
Si el elemento lo inclinamos, formando dos vertientes, parte de la componente de la acción genera compresión, el vértice superior actúa a modo de apoyo y se reducen las flexiones aumentando la efectividad del sistema. La misma componente que genera la compresión en la dirección del plano, genera empujes en los apoyos que habrá que contrarrestar.

Si analizamos el comportamiento de la placa inclinada en su conjunto, veremos que actúa como viga de gran canto con zona superior a compresión e inferior a tracción, esto nos permitiría poder alejar los apoyos incluso a los extremos, dejando a los tímpanos la función de contrarrestar los empujes.



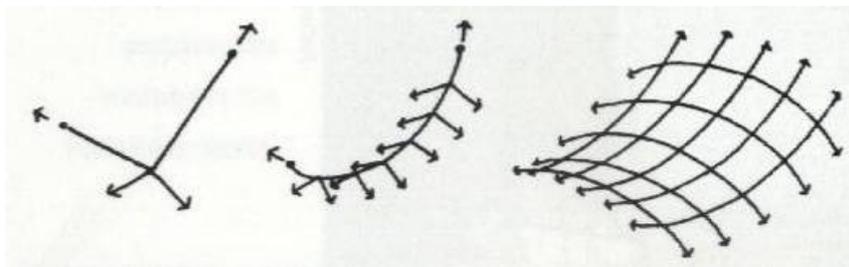
Cubierta de planos inclinados, tensión en la membrana y acciones en los apoyos (imagen del autor realizada con Autocad ®)

Una forma de trabajo parecida, pero más eficaz, habría sido con una sección curva, ya que aumenta el trabajo a compresión, y reduciendo la flexión. Pero se sigue manteniendo el trabajo de viga biapoyada, con las ventajas de poder separar los apoyos, comentadas para el caso anterior. Pero la simple curvatura de la forma de cilindro, podría generar problemas de pandeo local, ya que la figura "tiende" a desplegarse ante la acción de cargas.



Cubierta cilíndrica, con tensiones de compresión tracción, deformaciones y reacciones en los apoyos (imagen del autor realizada con Autocad ®)

El haber añadido curvatura en un sentido, ha aumentado la rigidez en el mismo. Si hacemos lo mismo con una segunda dirección de curvatura, la estructura será más indeformable, al no poder desarrollarse en un plano. "Se introduce una familia de cables en lugar de generatrices rectas, equilibrando la familia de arcos" (Araujo, 2008).

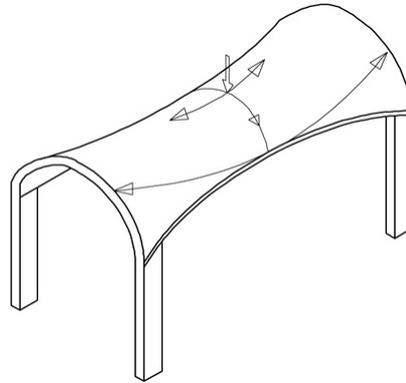


Estabilización en el plano perpendicular

Familia de cables estabilizadores

Doble familia de cables estabilizadores

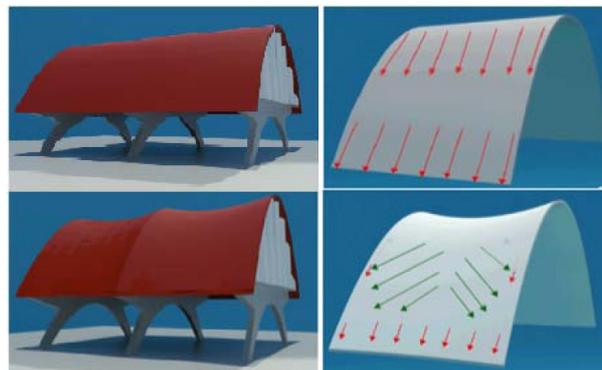
En el ejemplo siguiente tenemos que la bóveda cilíndrica, se habría transformado en un hiperboloide de revolución reglado, transmitiéndose las cargas según dos direcciones (las direcciones principales de curvatura) por compresión o tracción. Podemos observar, como el borde libre, recoge las tracciones y compresiones, y si se rigidiza, podría transmitir las hasta los apoyos.



Cubierta de hiperboloide hiperbólico, con distribución de esfuerzos de tracción y compresión. (imagen del autor realizada con Autocad ®)

Las superficies anticlásticas tienen su superficie trabajando en las direcciones de las curvaturas, realizándose compresión en la dirección de la superficie convexa (actuando como un arco) y con tracción en la curvatura cóncava (actuando en suspensión) (García Sologaistoa, 2005).

Candela realizó su aportación personal al cálculo y diseño de las láminas de hormigón con forma de paraboloides hiperbólicos en una serie de artículos (Candela, 1955; Candela, 1960; Faber, 1963). De estos debe destacarse, además de su rigor y completitud formal, el sentido práctico de la formulación y sobre todo el enfoque dirigido a la comprensión del funcionamiento estructural y formal más que a los pormenores del cálculo, que también incluye

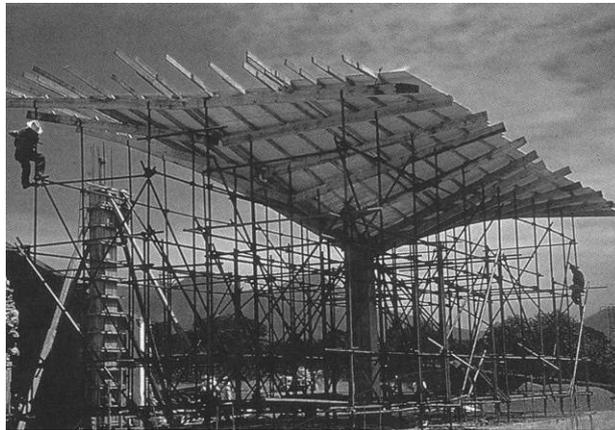


Diferentes formas de trabajo de bóveda cilíndrica y bóveda hiperbólica, en el Laboratorio de rayos cósmicos. Imagen de (Villanueva, 2009)

4_ASPECTOS CONSTRUCTIVOS

El encofrado y el moldeo, ha sido siempre una unidad de obra de alto coste. Algunos métodos, como el prefabricado, el proyectado de hormigón sobre elementos hinchables o jaulas de acero reforzado, se han utilizado para minimizar este inconveniente. El hecho de

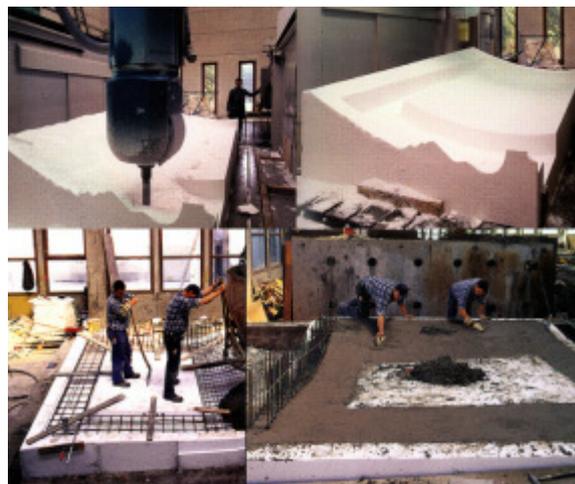
que las superficies tratadas en esta investigación sean regladas, ayuda a rebajar el coste, con respecto a otras superficies doblemente curvadas, además ofrece la posibilidad de un doble pretensado de las armaduras en las direcciones de las familias de rectas, ventaja esta, que ha sido utilizada con frecuencia para lograr la estanqueidad en los depósitos, como el de Eduardo Torroja en Marruecos en 1956 (García Reig, 1999).



Encofrado de uno de los famosos “paraguas” de Félix Candela. Donde el entablado sigue la dirección de las rectas generadoras de la superficie

Encofrados y moldeo del hormigón.

Estas superficies, tal y se comentaba con anterioridad, tiene la dificultad de su moldeo y conformación cuando son construidas con hormigón armado. Esta dificultad, podría ser solventada con las nuevas técnicas de producción de elementos por control numérico (Kolarevic, 2003). Ejemplo del uso de esta tecnología en la fabricación de elementos de hormigón con doble curvatura, lo tenemos en el edificio de oficinas de Gehry en Dusseldorf, Alemania.



Conformación de un molde de espuma de poliestireno para creación de paneles de hormigón armado. Imagen de (Kolarevic, 2003) pag 121

Pero estos intentos de mejora, parecen no haber encontrado su aplicación en los grandes edificios, teniendo por ejemplo el caso del Edificio de Santiago Calatrava que realizó junto

con Félix Candela para el Oceanográfico de Valencia, en donde se puede apreciar la similitud del proceso encofrado edificios por candela años antes.



de con otros realizados cincuenta

Vista general de la estructura de andamios. El andamio alcanzó una altura de hasta 13,70 m.



Encofrados de Capilla de Lomas de Cuernavaca. Imagen en (Holzer, Garlock, & Prevost, 2008)

5_EJEMPLOS DE APLICACION

Dentro de los ejemplos seleccionados, se ha comenzado eligiendo algunas de las obras que han pasado a la historia, por suponer un avance en el desarrollo de las estructuras laminares de doble curvatura, y se ha terminado con algunos ejemplos contemporáneos, que nos demuestran la actualidad y necesidad que de estas superficies existe hoy en día.

El abanico de posibles ejemplos es tan amplio, que siempre supone un esfuerzo y una renuncia decidir cuáles han de dejarse fuera y cuáles han de incluirse.

La muestra que aquí se presenta, no pretende abarcar todos los ejemplos existentes (algo que sería casi imposible), pero aspira a ser, al menos, una variada recopilación de las distintas posibilidades que estas superficies ofrecen a la arquitectura e ingeniería, animando al lector, a seguir abundando en el estudio que posibilita la amplia bibliografía de referencia.

a) PUENTE SAN PETRI.



E. Torroja. 1926

A continuación analizaremos la ejecución de la cimentación del puente San Petri. Una de las

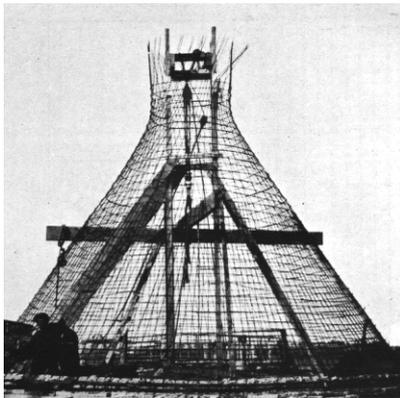
obras iniciales de Eduardo Torroja, tan solo tres años después de terminar la carrera, mientras trabajaba en la empresa Construcciones Hidráulicas Civiles, dirigida por el que fuera su profesor en la Escuela de Caminos José Eugenio Ribera.

Lo ingenioso del sistema, aventuraba la brillante carrera de este ingeniero.

Cada unidad, estaba formada por dos hiperboloides hiperbólicos concéntricos de eje vertical, con un diámetro exterior máximo de 7 metros en la parte superior y 7,5 metros en la inferior.

Las paredes se construyeron con doble tabique de ladrillo fino, de 7 cm de ancho, con armadura en la cara inferior y enfoscado a las dos caras.

Los cajones flotantes, se construyeron en un embarcadero y se transportaron sobre una batea flotante hasta su emplazamiento donde fueron hundidos, dicho hundimiento fue posible rellenando de hormigón entre las dos láminas.



Armado de la superficie hiperboloide de revolución.

b) PABELLÓN DE RAYOS CÓSMICOS

Félix Candela y José González Reina. 1951

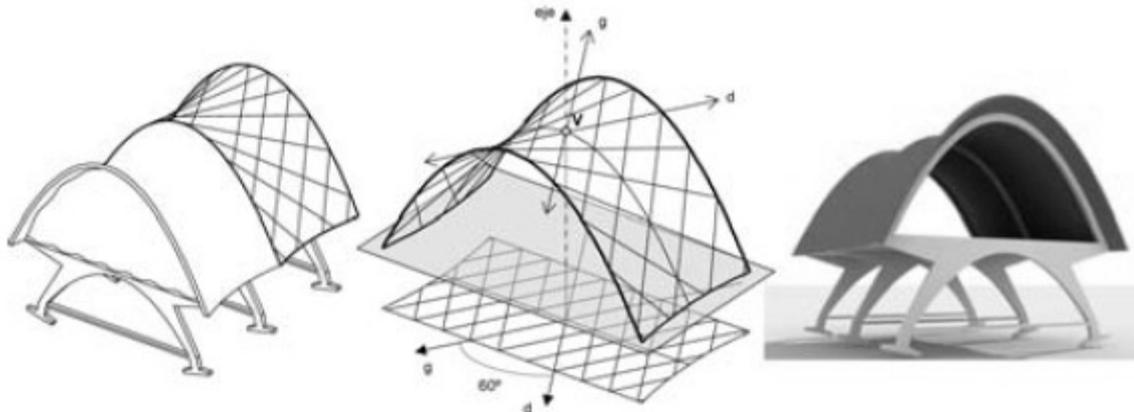
El pabellón de Rayos Cósmicos, es un pequeño edificio (132m²) de la Universidad de México, que contrasta con el resto de grandes edificios que forman la ciudad universitaria.

Esta obra, daría fama mundial a Félix Candela, siendo pionera en el uso estructural del paraboloide, con espesores que llegan a ser de 2 cm en su parte más estrecha (aunque el promotor demandaba inicialmente 1 cm), logrando un hito en la construcción de cascarones de hormigón.



Vistas del pabellón. Imagen de (Vila Pérez & Gardeñes Gómez, 2009)

La geometría que compone la cubierta son paraboloides hiperbólicos, limitados por arcos parabólicos (ver apartado 2.5.2 Propiedades geométricas y construcción)
La parte alta de los arcos parabólicos, con salientes en ménsula, son los que aguantan la parte de la cubierta del edificio.

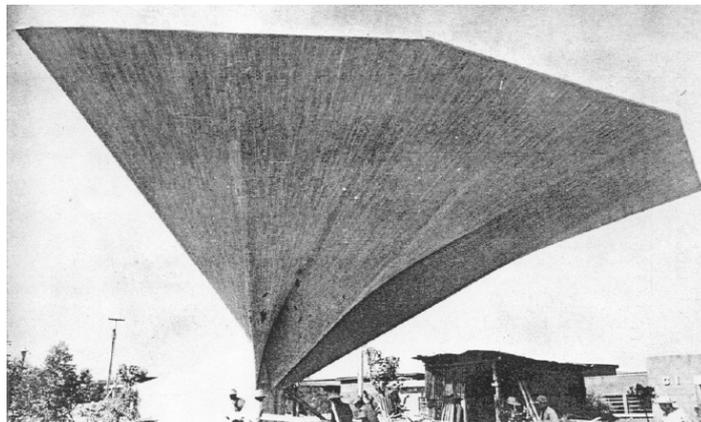


Geometría de la bóveda, con indicación de los ejes del paraboloides y de sus planos directores. Imagen de (Casinello, P. 2010)

Esta obra del periodo inicial de Candela viene a demostrar, con sus más de 60 años de antigüedad, la genial intuición de este maestro de la arquitectura y la geometría a la hora de crear estructuras perdurables y resistentes.

c) MARQUESINA DE MUSICOS EN SANTA FE

Félix Candela y
1953-57



Aldo Pani.

Vista general. Imagen de (Cabillo, 2005)

Esta construcción tiene como función cubrir un pequeño escenario exterior para músicos en una urbanización en Santa Fe, México. Está planteada como un voladizo sujeto por un único punto y abierto hacia la parte del público, con una planta de esquema triangular. La cubierta

está formada por tres piezas iguales, cada una de las cuales cubre un área triangular con el vértice en el apoyo y la base a una distancia de (12 metros). La envergadura total de la marquesina es de 12,50 metros. La estabilidad al vuelco se consigue por dos pequeños muros de hormigón anclados al suelo.

Se trata de un elemento sencillo con un principio estructural tan claro que se cita a menudo tanto en lecciones sobre estructuras en voladizo, como sobre superficies alabeadas. En la obra de Félix Candela abundan ejemplos parecidos a esta marquesina. Todos ellos son variaciones sobre el mismo tema: el paraboloide hiperbólico. Sin embargo este caso particular sería el caso más simple y, por lo tanto, el más emblemático.

La forma de la cubierta.

Esta cubierta se puede entender, tal como se ha explicado, como formada por tres elementos iguales. Pero también se puede entender como una lámina plegada que consigue con esa operación de plegado, la estabilidad que necesita para mantenerse en voladizo. Al plegar la superficie se consigue que el material se coloque en la posición de mejor aprovechamiento por tener el momento de inercia mayor en la zona donde el momento flector es mayor: el apoyo. En el extremo del voladizo, sin embargo, donde el momento flector es nulo, el material se puede colocar horizontalmente, lo que reduce el peso total.

Se trata en definitiva de una línea quebrada en un extremo y una recta en el otro, entre ellas se crea una forma de transición que es una superficie reglada, y las caras alabeadas de la superficie son paraboloides hiperbólicos.

d) LABORATORIOS JORBA

Miguel Fisac. 1968



El conjunto industrial de los laboratorios Jorba está situado en Madrid, concretamente en la carretera Nacional II, se trata de una serie de edificios con diferentes alzados, situados en una zona muy visible, ya que la empresa buscaba con el edificio dar una imagen de marca.

El edificio de oficinas, que nos ocupa en este trabajo, tiene un diseño espectacular, tratándose de una construcción de 6 plantas cuadradas de 17 metros de lado, estando cada planta girada 45 grados respecto a la anterior.

La unión de los bordes de las plantas, va generando una serie de paraboloides hiperbólicos definidos por cuadriláteros alabeados.

Resulta magistral, el juego de luces que ofrecen las formas curvas, en contraste con la geometría ortogonal de las plantas.

Cuando en 1999 el Ayuntamiento de Madrid permitió la demolición del emblemático edificio ubicado en la autopista de entrada a Madrid desde Zaragoza; se produjo una ruidosa polémica acerca de la necesidad de conservación del patrimonio arquitectónico español, desgraciadamente, tal y como vemos en la imagen inferior, el edificio fue finalmente demolido.



Vista del derribo de los forjados.

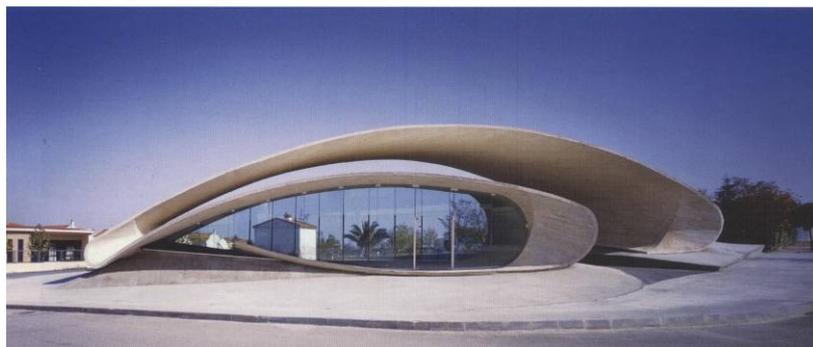
Los propietarios deseaban construir en su lugar un edificio mucho mayor, aprovechando su privilegiada situación, resulta inaudito constatar que su derribo se posibilitó por un inexplicable olvido de incluirlo en el catálogo de edificios protegidos.

Ese inexplicable olvido permitió que sus propietarios obtuvieran grandes beneficios económicos, privando a la ciudad de uno de los mejores edificios de arquitectura del siglo XX, por lo que el Ayuntamiento ofreció reconstruirlo en otro lugar, lo que el arquitecto desechó.

e) ESTACION DE AUTOBUSES EN CASAR DE CACERES

Justo García. 2005

La presente obra, de fuerte carácter escultórico, se enmarca en un solar de reducidas dimensiones, siendo su forma lo que le confiere un carácter casi monumental.



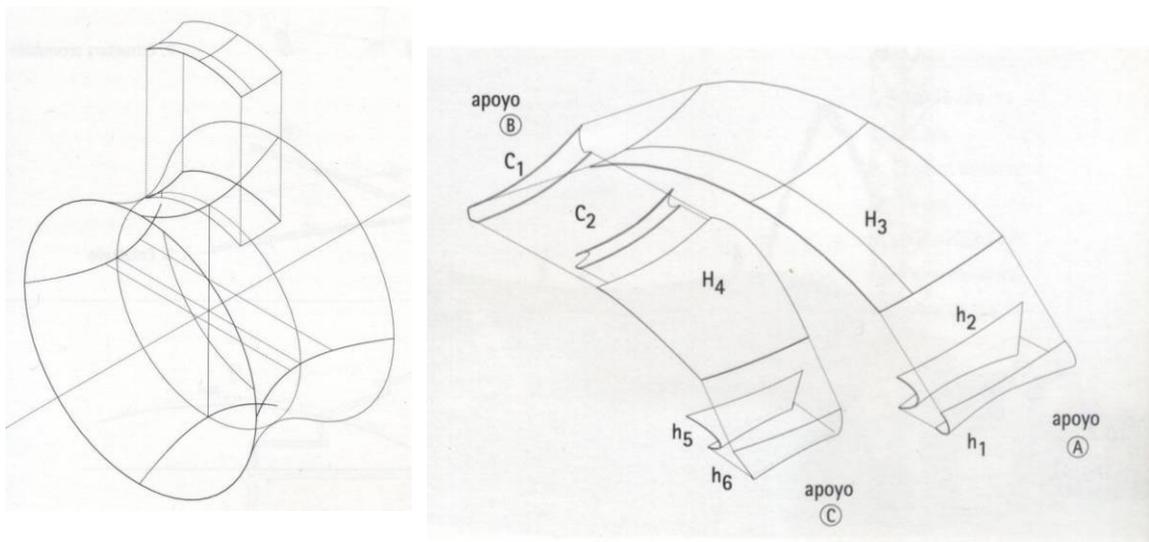
Vista general de la obra. Imagen de (Jurado Egea & Suzuki, 2004)

La estructura es básicamente, una cinta hormigón, que en dos pliegues diferencia los distintos volúmenes.

La cinta se pliega primero para cobijar los andenes, salvando una luz de 34 m después se vuelve a doblar de manera oblicua, para salvar un arco de 20 m que cubre el vestíbulo de la estación.

El proyecto recupera y reinterpreta la tradición de las láminas de hormigón de los años cincuenta y sesenta en los que la vanguardia de ingenieros y arquitectos formalizaron las estructuras resistentes más espectaculares y , en algunos casos, más eficientes. Eficiencia que se concreta en un estudio geométrico de la forma que permite una optimización del trabajo estructural y que en términos de economía se fundamenta , no en el abaratamiento del material y medios o reducción de recursos, sino en la concentración conceptual para dar una respuesta global y única, tanto en forma, material y técnica.

Geoméricamente, la cinta se compone de un hiperboloide reglado de revolución, una cuádrlica que aporta la ventaja de ser reglada, lo que permite, en términos constructivos por un lado generar un encofrado con barras rectas (generatrices),y por otro permite plantearlas en obra sobre tres semicírculos reales o virtuales (directrices).



*Diferentes superficies que componen la cubierta H-Hiperboloide, C – Cono
Imagen de (Jurado Egea & Suzuki, 2004)*

De los distintos hiperboloides que componen la superficie de la cinta, sólo dos, el H3 y el H4, tienen función estructural, ya que los dos de los apoyos no trabajan y esconden una serie de costillas en su interior.



Imagen del encofrado y armado de la cubierta superior. Imagen de (Jurado Egea & Suzuki, 2004)

f) PABELLON DE CINE EN UNIVERSIDAD BAUHAUS DE WEIMAR

Profesores Jürgen Ruth y Rainer Gump, junto con los estudiantes de la universidad. 2009 El proyecto resuelve el diseño de una carpa temporal para la organización de proyecciones cinematográficas y otras actividades culturales al aire libre.

Este proyecto, se ha seleccionado, por representar la plasmación de la idea subyacente en esta investigación – que la geometría ha de estar presente en la formación de todo arquitecto o ingeniero-, sirviendo como disciplina organizadora y articuladora de procesos creativos.



Vista general del proyecto

Con este trabajo arquitectónico, se pretende demostrar como la arquitectura y la ingeniería civil pueden interactuar con las energías renovables y ofrecer funcionalidad, y soluciones sostenibles.

Uno de los condicionantes de la estructura, era que tenía que ser resistente y fácil de montar con una longitud de 13 metros, por lo que se escogió una geometría de superficie cuádrlica reglada, fácil de generar y de construir..

La estructura toma la forma de un "paraboloides hiperbólico" construido con listones de madera y estabilizada con tensores de acero.

Esta cáscara estructural queda revestida interiormente por una membrana impermeable de color rojo. El pavimento está compuesto por una tarima de madera y el suministro de la energía eléctrica necesaria se obtiene mediante la instalación de paneles fotovoltaicos flexibles dispuestos en la cara exterior.



Estructura casi acabada.

En este caso, el uso de la geometría de superficies de doble curvatura, no solo no ha encarecido el proyecto, sino que lo ha abaratado y simplificado en su ejecución, aportándole belleza y resistencia.

Una de las cosas que más impresionan de este proyecto, es que se consiguen dimensiones relativamente grandes casi sin necesidad de una estructura auxiliar, ya que los operarios pueden ir fijando las líneas de la madera usando la propia estructura.



Operario fijando los rastreles entre sí, montado sobre la propia estructura.

Discusión

En la actualidad, el uso de las superficies laminares de doble curvatura, ha perdido popularidad comparado con los años 50 o 60, cuando los arquitectos las adoptaron como una nueva forma de expresión artística. El uso como cascarones de hormigón armado, fue casi abandonado, a favor del uso en membranas a tensión, dado su menor costo para cubrir grandes superficies, aunque esta situación parece estar cambiando. *“Hay signos, sin embargo, de que los cascarones están interesando a la nueva generación de arquitectos e ingenieros. Nunca llegará a la popularidad que una vez tuvieron, pero recobrarán su antiguo prestigio al usarse convenientemente”* (Bradshaw et al., 2002).

Es probable, que estas formas pasen a formar parte del repertorio normal del diseño arquitectónico, ya que en la ingeniería nunca han dejado de estar en uso.

El empleo de estas superficies vendrá, probablemente, ligado al desarrollo de nuevos materiales como los composites o el hormigón reforzado con fibra de vidrio. Ya se está investigando en nuevas formas de encofrados que eliminen, o por lo menos minimicen, el inconveniente del costo económico, y lo laborioso de la formación del molde del hormigón. Probablemente, **el profundo cambio que está experimentando la digitalización de la arquitectura**, permita unir diseño, análisis, manufactura y construcción, reintegrando las tradicionalmente separadas disciplinas de arquitecto e ingeniero (Kolarevic, 2003) facilitando así la producción de superficies curvas con las nuevas herramientas disponibles, como las de fabricación de control numérico que posibilitan la generación de forma con asombrosa facilidad.

Esperamos que trabajos como este, animen a los futuros arquitectos e ingenieros a seguir usando geometrías que dan **belleza y eficiencia** a la arquitectura

Referencias

- Albarracín, E. P., Pérez, J. L., & Sire, J. C. (2004). Análisis de la posibilidad de implementación informática del método de los números característicos de una familia uniparamétrica de cónicas: Aplicación a series y haces.
- Bechthold, M. (2006). Sobre cáscaras y blobs: Superficies estructurales de la era digital. *Arq* (Santiago), 30-35.
- Bradshaw, R., Campbell, D., Gargari, M., Mirmiran, A., & Tripeny, P. (2002). Special structures: Past, present, and future. *Journal of Structural Engineering*, 128, 691.
- Cabillo, C. (2005). Control gráfico de formas y superficies de transición. Universitat Politècnica de Catalunya.
- Candela, F. (1953). Estereoestructuras. *Espacios*, 17
- Candela, F. (1955). Structural applications of hyperbolic paraboloidal shells. *ACI Journal Proceedings*, 51(1)
- Candela, F. (1985). En defensa del formalismo y otros escritos. Xarait Ediciones.
- Casinello, P. (2010). Félix Candela, la conquista de la esbeltez. Madrid.
- Cavanillas, T., & Antonio, J. (2007). Eduardo torroja. *Ingeniería y Territorio*, (79), 98.
- Chiarella, M. Superficies paramétricas y arquitectura: Conceptos, ideación y desarrollo.
- Faber, C. (1963). Candela, the shell builder. Reinhold Pub. Corp.
- García Reig, C. (1999). La geometría en la obra de Eduardo Torroja. *Revista de obras públicas*, 15.
- García Sologastoa, A. B. (2005). Consideraciones generales sobre concreto reforzado. (Universidad de San Carlos de Guatemala).
- Gheorghiu, A., & Dragomir, V. (1978). *Geometry of structural forms*. London: Applied Science.
- Goicolea, J. M. (2009). El formalismo de Félix Candela.
- Gomis Martí, J. M. (1996). *Curvas y superficies en diseño de ingeniería*. Valencia: Universidad Politécnica de Valencia.
- Izquierdo Asensi, F. (2002). *Geometría descriptiva superior y aplicada*
- Kolarevic, B. (2003). *Architecture in the digital age: Design and manufacturing*.
- Meyer, L. F., Ferrer, J. R., Velazco, F. M., Díaz, S. D. T., & Civil, I. (2008). Zapatas circulares de hormigón armado en hiperboloide de revolución de una hoja.
- Monterde, J. *Arquitectura y matemáticas. la geometría al servicio del arte: De gaudí a Gehry*.

- Olalquiaga, P., & Olalquiaga, A. (2005). El libro de las curvas (1{487} ed.). Madrid: Fundación Esteyco.
- Rodríguez, A. (2002). La enseñanza de las superficies regladas alabeadas.
- Ruiz, I. R. Análisis de tipologías estructurales: Bóveda, lámina, cúpula y paraboloides.
- Sánchez, M. R. (2005). La forma de las cubiertas de membranas. parte 1: De las tiendas a las membranas pretensadas. Docencia,
- Sánchez, M. R. (2006). La forma de las cubiertas de membranas. parte 2: Arquitectura y estructura. Docencia.
- Torroja y Caballé, E. (1904). Teoría geométrica de las líneas alabeadas y de las superficies desarrollables. Madrid: Impr. de Fortanet.
- Villanueva, P. J. (2009). Comportamiento estructural del laboratorio de rayos cósmicos.
- Villoria San Miguel, V. (1992). Representación de curvas y superficies : Geometría