

Pontificia Universidad Católica del Perú  
Facultad de Arquitectura y Urbanismo  
Matemáticas Aplicadas a la Arquitectura 1

# CONCEPTOS MATEMÁTICOS APLICADOS A LA ARQUITECTURA

[LA ÓPERA DE SÍDNEY]

## INTEGRANTES:

CARLOS ANDRÉS DÁVILA PINEDO  
JUAN MARIO DIAZ VIDAL  
ROBERTO ENRIQUE FLORES HIDALGO  
RODRIGO RENGIFO BRICEÑO  
GUSTAVO PAÚL REYNA LAZO

## PROFESORES

FRANCISCO JAVIER UGARTE GUERRA  
HAYDÉE ZENAIDA AZABACHE CARACCILO

Noviembre, 2011

## Índice

INTRODUCCIÓN .....	3
CAPÍTULO 1: PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA .....	5
1.1 DESCRIPCIÓN DEL PROBLEMA INDICANDO SU IMPORTANCIA.....	5
1.2 CONTEXTO .....	5
CAPÍTULO 2: SOLUCIÓN MATEMÁTICA.....	8
2.1 REQUISITOS MATEMÁTICOS PARA RESOLVER EL PROBLEMA .....	8
2.2 APLICACIÓN DE LOS CONCEPTOS MATEMÁTICOS EN LA SOLUCIÓN EL PROBLEMA .....	9
2.2.1 Indefinición Geométrica.....	9
2.2.2 Superficies Curvas Tridimensionales.....	9
2.2.3 Bóveda nervada de mampostería de concreto armado prefabricado postensado .....	10
2.2.4 Compresión, Tensión y Equilibrio.....	11
2.2.5 Esfera y Sección Esférica .....	12
CAPÍTULO 3: CONCLUSIONES .....	15
3.1 EL IMPACTO EN LA ARQUITECTURA .....	15
3.2 EL USO DE LA MATEMÁTICA .....	16
3.3 IMPORTANCIA DE LAS MATEMÁTICAS EN LA FORMACIÓN DEL ARQUITECTO .....	17
BIBLIOGRAFÍA.....	18
ANEXO 1 .....	19

## INTRODUCCIÓN

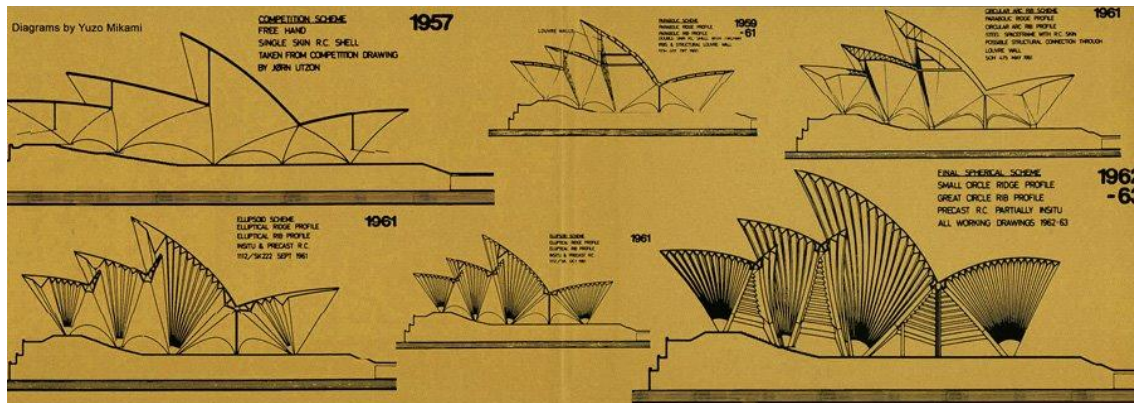


Fig. 1 [1]

La Ópera de Sídney constituye una de las obras más importantes de la arquitectura contemporánea. Supuso un desafío enorme tanto en el diseño, como en las consideraciones estructurales que esta obra acarreo.

Precisamente, fue el techo de la Ópera, una especie de agrupación de cáscaras, lo que constituyó un reto para el diseño y el cálculo estructural en aquella época. Las soluciones que se plantearon resultaron muy novedosas y de un rigor adecuado.

Es por este motivo que el tema principal que hemos visto necesario desarrollar es el problema que supuso techar esta obra y cómo el uso de las matemáticas resultó el arma fundamental para poder llegar a la solución.

A lo largo de la historia de la Arquitectura, el fundamento estructural que ésta conlleva, ha sido determinante para el desarrollo de la misma. No hay Arquitectura sin estructura, ambas se retroalimentan y resulta indivisible su relación. El diseño de un espacio arquitectónico, supone no solamente diseñar formas, consideraciones climáticas, relaciones con el entorno, etc., sino definir sistemas constructivos y estructurales.

Estos sistemas definen la Arquitectura y hacen que sea posible. Resulta muy importante resolver el problema de cómo lograr que las cargas emitidas por un techo puedan ser distribuidas sin que esto implique perjudicar la arquitectura.

Distribuir las cargas del techo hacia la superficie del suelo es uno de los temas principales en la arquitectura en la búsqueda de espacialidad. Es este tema el que se convierte en la pieza clave del desarrollo de la arquitectura y ha conllevado a diseñar y desarrollar cada vez mejores soluciones para afrontar este problema hasta llevarlo al punto de convertirlo de amenaza a potencialidad.

En resumen, toda arquitectura nace del tema de resolver constructivamente un techo, una cobertura y como llevar las cargas a la superficie. Esta obra particularmente lo hace de una manera notable, donde más bien el desarrollo del techo ha ensalzado la arquitectura. Es por este motivo fundamentalmente que consideramos muy importante esta obra y más aun, nos

[1] Fig. 1: <http://moleskinearquitectonico.blogspot.com/2008/05/la-pera-de-sdney.html>

adentramos en cómo fue el cálculo y el proceso constructivo de la misma, lo que nos servirá como ejemplo de desarrollo estructural, con el cual estamos familiarizados hasta cierto punto.

En el capítulo Contexto se muestra un poco de la historia de Jorn Utzon, ganador del concurso para construir la Ópera de Sídney, sus problemas y sus influencias que lo llevaron al diseño de esta obra. Se señala también la época por la que se estaba atravesando en ese entonces, allá por los años 1950, así como también el contexto político de unos años antes (1940) época de turbulencia mundial por la segunda guerra mundial. Es luego de ésta que Australia se ve en un auge económico que justifica la decisión de construir un monumento que refleje la identidad australiana, lo que Ópera de Sídney años más tarde consolidaría.

En la pestaña Matemática se ha definido el tema principal, el cual es cómo las matemáticas ayudaron al cálculo del techo de la Ópera de Sídney. Se ha ordenando en base a conceptos como Indefinición geométrica (Utzon no había definido completamente el diseño de la Ópera, por lo que había que terminar el diseño), Superficie curva tridimensional (se empezó con formas parabólicas), Bóveda nervada de mampostería de concreto armado prefabricado postensado (vigas postensadas que permiten unir cada concha del techo), y esfera y sección esférica (El diseño final para el techo fue una parte de una esfera) para luego desarrollarlos individualmente en una etapa posterior.

En la categoría enlaces se adjuntan los enlaces que han sido referentes a lo largo de la construcción del trabajo, desde hechos históricos y contexto, así como también enlaces que han definido los temas matemáticos como curvatura, sección esférica, tensión, etc.

## CAPÍTULO 1: PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

### 1.1 DESCRIPCIÓN DEL PROBLEMA INDICANDO SU IMPORTANCIA

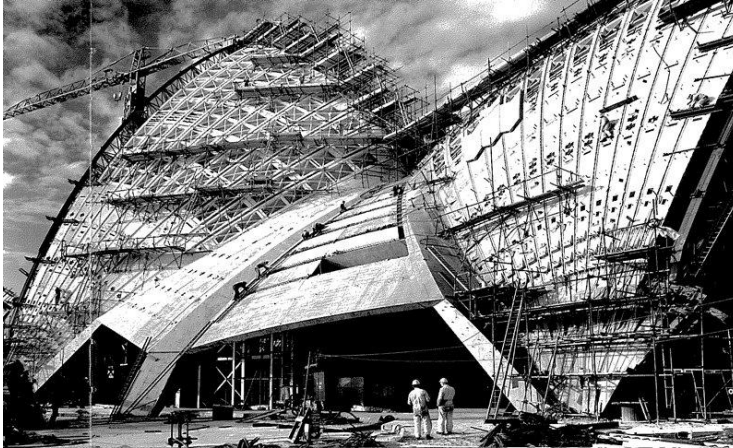


Fig. 2 [2]

Nosotros consideramos que el principal problema de la Ópera de Sídney es que debido a la envergadura del proyecto, se tenía que encontrar un sistema constructivo y estructural que fuese suficientemente sistemático para poder construirse y montarse de manera industrial, sin que ello vaya en detrimento de la calidad espacial y volumétrica del planteamiento inicial de Utzon.

La elección del edificio elegido, La Ópera de Sídney, nos pareció un tema importante ya que el diseño de este edificio fue audaz y visionario para su época por la escala tan grande del proyecto y por el complejo sistema de cubiertas. Es un edificio pionero en el manejo de superficies tan complejas. Su construcción forzó la invención de sistemas constructivos inéditos, haciendo uso de superficies regladas. Pero estas soluciones también han estado presentes en otros edificios, entre ellos el más representativo “La Iglesia de la Sagrada Familia” de Gaudí. Fue también uno de los primeros edificios en incluir en su proceso de diseño programas de computadora para el análisis estructural.

El hecho de poder encontrar en un edificio emblemático a nivel mundial, una historia llena de problemas constructivos, pero a su vez un orden lógico de soluciones, es en lo que justamente se va a basar nuestro trabajo.

### 1.2 CONTEXTO

Utzon, al ganar el concurso en 1957, no tenía totalmente resuelto el edificio. La construcción del mismo se empieza sin tener listos todos los planos, tampoco la solución de la cubierta, que era la parte más representativa del edificio. Inicialmente se planteó el diseño de las bóvedas en base a parábolas. Sin embargo estas formas resultaban muy específicas cosa que generaba dos inconvenientes: era muy difícil realizar el cálculo estructural para superficies tan diversas; el encofrado hubiera tenido que ser hecho especialmente para cada tramo de cada bóveda, cosa que sería demasiado costosa, por lo tanto se buscó una solución durante 6 años, desde

---

[2] Fig. 2: <http://moleskinearquitectonico.blogspot.com/2008/05/la-pera-de-sdney.html>

1957 hasta 1963, cuando se resolvió usar una superficie de curvatura constante en todas las direcciones, todas estas sacadas de una misma esfera.

Es importante poder entender la historia del arquitecto, para saber que aspectos lo llevaron a la realización de sus obras. Primero diremos que nació en Copenhagen, Dinamarca en 1918. Su padre era diseñador de barcos, esto fue muy importante para el desarrollo de su carrera porque gracias a él aprendió a trabajar con formas tridimensionales complejas. Siempre tuvo contacto con el mundo artístico, ya que su tío era profesor de escultura en Copenhagen [3]. Quiso ser pintor, pero su tío lo convenció de tener una profesión más técnica. Nos parece muy interesante como estas primeras experiencias nos muestran que hay 2 vertientes muy importantes en su pensamiento: el conocimiento técnico y la sensibilidad artística.

Jorn Utzon desde joven fue marcado por hechos que determinarían su vida y su modo de hacer arquitectura, en nuestra opinión es un arquitecto que vuelca en sus proyectos las experiencias, vivencias y análisis acumulados en el transcurso de su vida. Esto es evidente en su temprana inclinación por la escultura, su relación cercana al mar y a los botes, los que él consideraba sus referentes arquitectónicos (F.L. Wright y A. Aalto) y los viajes que hizo alrededor del mundo (principalmente a México). En su obra cumbre, la Ópera de Sídney, está plasmado todo esto pues vemos el desarrollo de una forma escultórica que se asemeja a las velas de un bote y que por su emplazamiento y escala monumental constituye la prueba más fiel de que es posible realizar una arquitectura tan perdurable y majestuosa como la de los antiguos templos griegos, o la de las iglesias góticas, todo esto empleando un lenguaje contemporáneo.



Fig. 3 [4]

Tuvo además, encargos de obras importantes, después del éxito que significó La Ópera. En 1972, Utzon fue invitado para diseñar una segunda obra monumental, la Asamblea Nacional de Kuwait, que fue completada en 1982. Igual que la de Sídney, muestra techos curvilíneos y empinados, aunque las curvas son cóncavas. Entre otros destacados proyectos de Jorn Utzon están el Kingo Housing Estate (1956-58), el Fredensborg Housing Estate (1959-62), la iglesia de

[3] Autor. "Jorn Utzon, Biografía y Obras". Último acceso: 19/11/11. En: <http://www.arquba.com/arquitectos/jorn-utzon-biografia-y-obras/>

[4] Fig. 3: <http://moleskinearquitectonico.blogspot.com/2008/05/la-pera-de-sdney.html>

Bagsvaerd (1973-76), y el Centro Naturalista Skagen (2001), todos en Dinamarca; y el Centro Cultural Dunkers (2002) en Halsingborg, Suecia [<sup>5</sup>].

Utzon ha creado un estilo de edificios públicos con rasgos monumentales y de edificios de vivienda adaptados al entorno. Ha sabido integrar en sus proyectos la calidad de formas de Alvar Aalto y las estructuras naturales de Frank Lloyd Wright, estos dos ya mencionados anteriormente. Utzon siempre tiene en cuenta las características del lugar en que se emplazará el edificio antes de comenzar su diseño. En sus proyectos fue más allá de la arquitectura, desarrollando formas que son consecuencia de un proceso de inspiración espiritual.

En cuanto a la historia del nacimiento del edificio mismo diremos que hacia los años 40' Nueva Gales del Sur experimentaba una serie de enormes cambios. Durante la Segunda Guerra Mundial, la amenaza de una invasión japonesa, el heroísmo de los soldados aussies en África y Nueva Guinea, y sobre todo el tener que enfrentarse a una amenaza exterior sin la ayuda de Gran Bretaña, fueron factores que moldearon la identidad nacional australiana. Después de 1945, la nación experimenta un acelerado desarrollo económico y demográfico. Mientras Europa luchaba por reconstruir sus ciudades tras la devastación de la guerra, la construcción de un gran monumento ofrecería a los australianos la oportunidad de enseñar al mundo que ya son una gran nación consolidada y no una parte más del declinante imperio británico. En el mundo se vivía una corriente modernista. Principalmente en Europa, debido a la destrucción de varias ciudades por la segunda guerra mundial, personajes como Le Corbusier o Gropius deseaban plasmar sus ideales en el planeamiento de ciudades. En Latinoamérica, varios arquitectos europeos como Sert y Wiener, refugiados en Estados Unidos, encontrarían en esta zona la oportunidad de llevar a cabo sus pensamientos, por ejemplo participarían en el plan piloto de Lima de mediados de los 50's, que al final nunca llegó a realizarse. Sin embargo, hacia los años 40 ya existía en el mundo la crítica de la posmodernidad, por lo que se superan los dogmas iniciales de la modernidad como la total racionalidad y funcionalidad para permitir la aparición de sistemas formales más emocionantes y expresivos. Toda esta historia es paralela al nacimiento y construcción de la Ópera.

La idea de construir un teatro de Ópera en Sídney comenzó a concretarse en los últimos años de la década de los 40 cuando el director del Conservatorio de Música de Sídney del estado de Nueva Gales del Sur sostuvo que la ciudad necesitaba contar con un lugar conveniente para las grandes producciones de teatro.

En esa época las producciones teatrales se efectuaban en el edificio del Ayuntamiento de Sídney, un espacio considerado insuficiente para este tipo de producciones. En 1954, se tuvo un gran éxito al obtener el apoyo del primer ministro del estado, quien solicitó diseños para la construcción de un nuevo edificio dedicado expresamente para albergar el teatro de la Ópera. Es así como nace el concurso internacional.

---

[<sup>5</sup>] Autor. "La Ópera de Sydney en Australia". Último acceso: 15/11/11. En: <http://www.arqhys.com/opera-Sidney.html>

## CAPÍTULO 2: SOLUCIÓN MATEMÁTICA

### 2.1 REQUISITOS MATEMÁTICOS PARA RESOLVER EL PROBLEMA

El proyecto tenía una cubierta con formas curvas bastante audaces y desafiantes. Estas formas fueron hechas a mano, basadas en curvas hechas por la misma intuición proyectual del arquitecto Utzon, sin mayor estudio que el espacial y expresivo. Por tal motivo, estas no eran regidas por formulas geométricas estudiadas y conocidas.

El principal problema de esta cubierta es que, al haber sido basada en formas curvas aleatorias, no podía determinarse su viabilidad constructiva y tampoco se podía comprobar si es que esta estructura era capaz de soportar las cargas necesarias para mantenerse en pie. Por tal motivo se tuvo que buscar una superficie curva tridimensional que estuviera definida matemáticamente.

Para resolver esta incógnita, Utzon basó su cubierta en distintas áreas curvas de forma triangular, todas basadas en tramos de una misma superficie esférica de un diámetro definido. Su diseño y funcionamiento estructural es bastante semejante a una Bóveda Nervada Gótica [6], sólo que en vez de usar las piezas de albañilería de cantería que se sostenían por su propio peso, se usó mampostería de concreto armado prefabricado, sostenido por medio de un cable de acero que tensaba toda la estructura [7].

Este esqueleto de concreto armado formó una estructura basada en distintas conchas que trabajaban en conjunto para lograr mantenerse en equilibrio y en pie. Estas se encargaron de cargar el peso de las cubiertas de concreto que tenían formas curvas de formas esféricas predeterminadas, lo que permitió, no solo organizar su construcción, sino también prediseñar detalles como los azulejos que cubren toda la cubierta.

De este modo, la cubierta de la Ópera de Sídney se pudo estructurar y construir, valiéndose de distintos conceptos matemáticos como:

Indefinición Geométrica.

Superficie Curva Tridimensional Definida Matemáticamente.

Bóveda nervada de mampostería de concreto armado prefabricado postensado.

Compresión, Tensión y Equilibrio.

Esfera y Sección esférica.

---

[6] Autor. "Explicación de forma y funcionamiento de Bóveda Nervada Gótica". Último acceso: 25/10/11. En: [http://es.wikipedia.org/wiki/B%C3%B3veda\\_de\\_cruce%C3%ADa](http://es.wikipedia.org/wiki/B%C3%B3veda_de_cruce%C3%ADa)

[7] Autor. "Casa de la Ópera de Sídney, Australia ARQUBA.COM. National Geographic". Último acceso: 25/10/11. En: <http://www.youtube.com/watch?v=V1HnzAeXw0k>



## 2.2 APLICACIÓN DE LOS CONCEPTOS MATEMÁTICOS EN LA SOLUCIÓN EL PROBLEMA

### 2.2.1 Indefinición Geométrica

Uno de los grandes problemas del proyecto era la envergadura de la construcción. Por este motivo, la forma en que se tenía que construir no podía ser de manera artesanal y hecho en el lugar, se tenía que recurrir a métodos industriales. Por eso es que la mayoría de elementos son prefabricados y ensamblados en obra. Esta prefabricación necesitaba que la geometría de los elementos fuese constante, o por lo menos, sencilla de calcular [<sup>8</sup>].

Los primeros bosquejos de Utzon no tenían una geometría definida, por lo que se tuvo que rediseñar la forma de las cubiertas. Al inicio se ensayó con arcos parabólicos, que, por su forma, tienen un comportamiento estructural muy estable. Sin embargo, el cálculo de las superficies era muy complicado y la curvatura que generaba era distinta en cada tramo, lo cual iba en contra de la lógica de la prefabricación.

Finalmente se llegó a la solución de usar secciones de esfera por diversos motivos, como ser la superficie tridimensional curva más sencilla de calcular o por tener curvatura constante. Estas secciones vienen de una esfera de 460 pies de radio. Esta decisión permitió sistematizar el cálculo, la fabricación de los elementos y la construcción.

Los conceptos a los que nos hemos referido los desarrollaremos desde una perspectiva matemática a lo largo del trabajo.

### 2.2.2 Superficies Curvas Tridimensionales

Para el caso de estudio es interesante ver el abanico de posibilidades que hay en las superficies curvas tridimensionales estudiadas. De esta manera podremos compararlas y determinar porque la selección de la esfera fue la mejor para resolver el problema de las bóvedas.

Hay muchos tipos de superficies curvas. Se pueden clasificar en regladas y superficies de curvatura doble.

Las superficies regladas son generadas por una línea denominada generatriz al pasar constantemente por líneas que determinan la forma de la superficie, denominada directriz. Se pueden mencionar tres tipos: planos, superficies de curvatura simple y superficies alabeadas. El plano es una superficie cuya directriz es una línea recta. La generatriz, al desplazarse, siempre va estar en la misma dirección [<sup>9</sup>].

Las superficies de curvatura simple son aquellas en la cual cada dos posiciones adyacentes de la generatriz son coplanares [<sup>10</sup>].

---

[<sup>8</sup>] Autor. "Control gráfico de formas y superficies de transición. La Ópera House. Sídney, Australia. 1953 - 73". Último acceso: 18/10/11. En: <http://tdx.cat/bitstream/handle/10803/6559/17lcc17de39.pdf?sequence=17>

[<sup>9</sup>] Alberto M. Pérez. "Superficie Reglada (Plano)". Último acceso: 17/10/11. En: [http://webdelprofesor.ula.ve/nucleotrujillo/alperez/teoria/cap\\_01a-conceptos\\_geometricos/cap\\_01a-imagenes/superficie\\_plano.swf](http://webdelprofesor.ula.ve/nucleotrujillo/alperez/teoria/cap_01a-conceptos_geometricos/cap_01a-imagenes/superficie_plano.swf)

Superficie cilíndrica: es la superficie generada por una directriz curva, en la cual todas las generatrices son paralelas.

Pueden ser de revolución, que tienen un eje respecto al cual se mantienen equidistantes todas las posiciones de la generatriz.

Pueden ser de no revolución.

Superficie cónica: es la superficie generada por una directriz curva y un vértice común a todas las posiciones de la generatriz.

Puede ser de revolución al tener un eje que pasa por el vértice y todas las generatrices con la misma inclinación.

Puede ser de no revolución.

Las superficies alabeadas son aquellas que no tienen posiciones coplanares de generatrices [11].

Cilindroide: es la superficie generada por dos directrices curvas y teniendo las posiciones de la generatriz paralelas a un plano director.

Conoide: es la superficie generada por una directriz curva y una directriz recta teniendo las posiciones de la generatriz paralelas a un plano director.

Superficie doblemente reglada: es la superficie cuyos puntos que la definen son la intersección de dos generatrices.

Paraboloide hiperbólico: las directrices son dos rectas que se cruzan y las posiciones de la generatriz son paralelas a un plano director.

Hiperboloide de revolución: las directrices son dos circunferencias paralelas y la generatriz se desplaza con una inclinación constante.

Las superficies de curvatura doble tienen una generatriz curva que rota en torno a un eje. No tienen líneas rectas. Se pueden mencionar a las cuadráticas:

Esfera: la generatriz es una circunferencia.

Elipsoide: la generatriz es una elipse.

Paraboloide: la generatriz es una parábola.

Hiperboloide: la generatriz es una hipérbola.

### 2.2.3 Bóveda nervada de mampostería de concreto armado prefabricado postensado

Una vez definida la forma de la cobertura, era necesario ver su funcionamiento estructural y lógica constructiva. Para solucionar este problema se optó por un sistema de bóvedas. Las bóvedas son un sistema utilizado para cubrir espacios amplios, con pequeñas piezas que se sostienen gracias a esfuerzos de compresión.

La lógica detrás de la estructura de la cubierta de la Ópera de Sídney radica en un sistema de mampostería de concreto armado prefabricado, que se mantiene unido mediante un cable de acero, que tensa toda la estructura manteniéndola unida. En este sentido, hay 2 fuerzas actuantes en este sistema, primera la compresión que es ejercida entre cada una de las piezas

---

[10] Alberto M. Pérez. "Superficie de curvatura simple". Último acceso: 17/10/11. En: [http://webdelprofesor.ula.ve/nucleotrujillo/alperez/teoria/cap\\_01a-conceptos\\_geometricos/cap\\_01a-imagenes/superficie\\_curvatura\\_simple.swf](http://webdelprofesor.ula.ve/nucleotrujillo/alperez/teoria/cap_01a-conceptos_geometricos/cap_01a-imagenes/superficie_curvatura_simple.swf)

[11] Alberto M. Pérez. "Superficie alabeada". Último acceso: 17/10/11. En: [http://webdelprofesor.ula.ve/nucleotrujillo/alperez/teoria/cap\\_01a-conceptos\\_geometricos/cap\\_01a-imagenes/superficie\\_alabeada.swf](http://webdelprofesor.ula.ve/nucleotrujillo/alperez/teoria/cap_01a-conceptos_geometricos/cap_01a-imagenes/superficie_alabeada.swf)

de mampostería de concreto armado prefabricado, y por otro la tensión que ejerce el cable de acero sobre todas las piezas de mampostería.

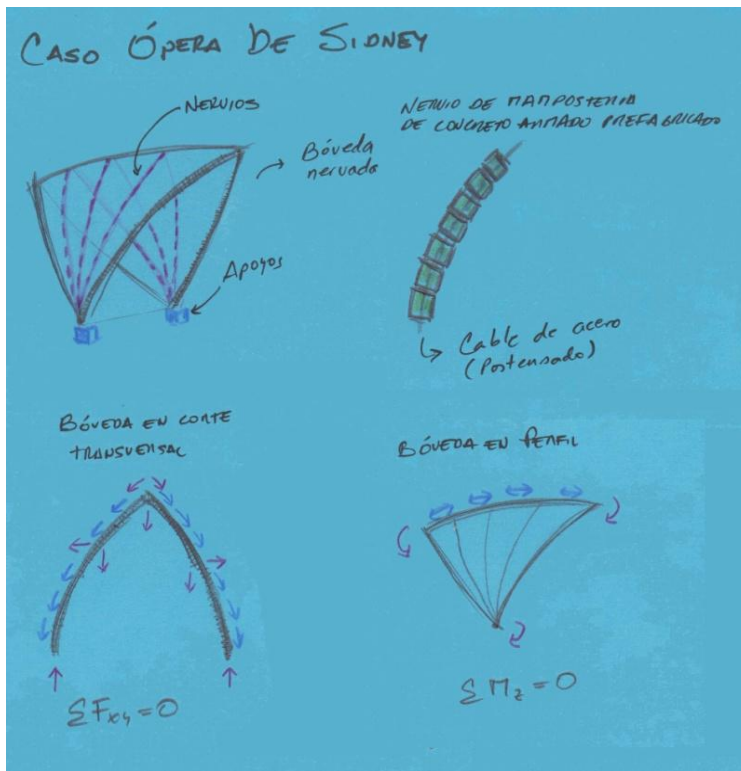


Fig. 4 [12]

#### 2.2.4 Compresión, Tensión y Equilibrio

Ahora que se entiende la naturaleza del funcionamiento de la cubierta de la Ópera de Sídney, es necesario profundizar en el significado matemático de cada uno de sus términos. Primero es importante saber que la bóveda es una estructura que funciona a compresión.

Un cuerpo se encuentra sometido a compresión si las fuerzas aplicadas tienden a aplastarlo o comprimirlo. Los pilares y columnas son ejemplo de elementos diseñados para resistir esfuerzos de compresión [13].

El esfuerzo de compresión se calcula con la siguiente fórmula:

$$e = F / A$$

Dónde:

e = Esfuerzo (Ej. Newton sobre metro cuadrado, Kilogramo fuerza sobre milímetro cuadrado, etc.)

F = Fuerza, que pasa a través de la estructura, peso que soporta una columna.

A = Área de la sección transversal al eje donde actúa la fuerza. [14]

[12] Fig. 4: Dibujo elaborado por Carlos Andrés Dávila Pinedo

[13] Arqhys.com. "Estructuras de Compresión Dominante". Último acceso: 18/10/11. En: <http://www.arqhys.com/casas/compresion-estructuras.html>

En el caso de una columna, el esfuerzo que soporta la estructura depende del peso que soporte y del espesor de la columna. Por tal motivo, mientras más peso soporta una columna, mayor tendrá que ser su espesor, ya que al aumentar el área transversal al eje donde actúa la fuerza aumenta su resistencia. El área se aumenta, disminuyendo así el esfuerzo de compresión (área y esfuerzo funcionan de manera inversamente proporcional con cargas constantes).

Como ya sabemos los grupos de estructuras laminares entrelazadas en la Ópera de Sídney, son segmentos esféricos con el mismo radio, lo que les confiere una curvatura uniforme y contribuye a simplificar la solución de las uniones y de las piezas de revestimiento. Los nervios prefabricados se van uniendo en forma radial, apoyados sobre los pedestales de la base. Los nervios que tienen sección de Y, se conectan entre sí mediante varillas de acero postensado [15].

El Postensado les permite tener una estructura más liviana y conseguir cubiertas de mayores luces. El postensado en este caso, consiste en un cable muy tensado, que une todos los bloques de mampostería de la concha, haciendo que esta no solo se mantenga unida, sino que los esfuerzos de compresión entre ellas sea mucho mayor, haciendo que alcance luces mayores y alturas más desafiantes.

Dado que las conchas que conformaban la cubierta funcionaban como bóvedas a compresión que se apoyaban al suelo en solo dos puntos, era complicado hacer que una concha por sí sola pudiera mantenerse en pie. Por tal motivo, se unieron entre sí para que funcionen como un conjunto de estructuras, que mantenía su equilibrio apoyándose en distintos puntos del piso. Esto permitió que toda la estructura pueda mantenerse en pie, sin que se corra el riesgo de que alguna concha colapse por fatiga.

### 2.2.5 Esfera y Sección Esférica

Gran parte de la solución de las bóvedas tiene que ver con las propiedades de la esfera, ya que es una superficie conocida y estudiada. Conocer las cualidades matemáticas de la esfera es una forma de acercarnos a la solución del problema inicial no tanto desde una perspectiva intuitiva, sino más real. Tan importante como conocer la esfera, es la capacidad para poder describirla en términos exactos y poder ubicar puntos, distancias y áreas en su superficie. Respecto a este tema se desarrollará el concepto de sección esférica.

Esfera:

La esfera es un cuerpo geométrico. Puede ser entendida como una superficie o un sólido de revolución. Como superficie se genera a partir de un punto, el centro de la esfera, del que equidistan todos los demás puntos que componen la superficie. Como sólido de revolución, se genera a partir de girar una semicircunferencia tomando como generatriz su diámetro [16].

---

[14] Scribd.com. "Tracción-Compresión". Último acceso: 18/10/11. En: <http://es.scribd.com/doc/2561073/Tema4TraccionCompresion>

[15] Cumming, Robert y Stevenson Neil. "Guía visual de la pintura y arquitectura". Último acceso: 18/10/11. En: [http://cv.uoc.edu/04\\_999\\_01\\_u07/percepcions/perc126b.html](http://cv.uoc.edu/04_999_01_u07/percepcions/perc126b.html)

[16] Wikipedia. "Esfera". Último acceso: 27/09/11. En: <http://es.wikipedia.org/wiki/Esfera>

Para calcular el volumen de una esfera, se puede considerar que es  $2/3$  del cilindro que la contiene. Este cilindro tiene  $2r$  de altura y el círculo de la base tiene como radio  $r$ , siendo  $r$  el radio de la esfera. De esta manera la ecuación es:

Cilindro:

$$V = \pi r^2 \times h$$

$$V = \pi r^2 \times 2r$$

Esfera:

$$V = 2/3 (\pi r^2 \times 2r)$$

$$V = 4\pi r^3/3$$

También se puede calcular haciendo una aproximación para no usar el valor de  $\pi$ .

$$V = 11/21(2r)^3$$

Entonces:

$$V = 4\pi r^3/3 \text{ o } V = 11/21(2r)^3$$

$$4\pi/3 \text{ o } 88/21$$

$$4.18879... \text{ o } 4.19047...$$

El área, al igual que el volumen, se calcula considerando que es  $2/3$  del área del cilindro que la contiene.

Cilindro:

$$A = 2\pi r^2 + 2\pi r \times h$$

$$A = 2\pi r^2 + 2\pi r \times 2r$$

$$A = 6\pi r^2$$

Esfera:

$$A = 2/3 6\pi r^2$$

$$A = 4\pi r^2$$

Por ejemplo, una esfera de radio 2 cm tendría:

$$A = 4\pi r^2 \quad \rightarrow 4\pi (2)^2 = 50.26 \text{ cm}^2$$

$$V = 4\pi r^3/3 \quad \rightarrow 4\pi (2)^3/3 = 33.51 \text{ cm}^3$$

Una de las propiedades de la esfera es que es el cuerpo geométrico que abarca mayor volumen con la menor superficie. Por eso es que muchas formas en la naturaleza tienden a la forma esférica.

Es posible ubicar cualquier punto sobre la superficie de la esfera. Si consideramos un plano pasando por el centro de la esfera y un eje perpendicular al plano, podemos determinar un ángulo en el plano y en el eje. De esta manera se determina cualquier punto.

Este mismo sistema se usa para determinar coordenadas sobre la superficie terrestre mediante el sistema de meridianos y paralelos.

Sección esférica:

La sección de una esfera es la que se obtiene cuando se interseca una esfera con un plano. Una propiedad interesante es que la esfera es la única forma geométrica cuya intersección con un plano es siempre una circunferencia.

Cuando el plano que corta la esfera pasa por el centro, se obtiene un círculo cuyo radio es igual a de la esfera.

A medida que se aleja del centro se obtienen círculos más pequeños, hasta que el plano sea tangente a la esfera, en cuyo caso la intersección sería un punto. <sup>[17]</sup>

El plano que pasa por el centro de la esfera divide la misma en dos mitades iguales: semiesferas. Cuando no es así, los dos pedazos desiguales de esfera se denominan casquetes esféricos.

Las dimensiones del casquete esférico se expresan en base a 3 medidas: el radio de la esfera ( $r$ ), la altura, que es una línea perpendicular desde el plano de corte hasta la superficie de la esfera ( $h$ ) y el radio del círculo de la base del casquete ( $a$ ). <sup>[18]</sup>

El área de la superficie curva es:

$$A = 2\pi rh$$

También se puede calcular en función al radio y altura del casquete:

$$A = \pi (a^2 + h^2)$$

El volumen del casquete esférico es:

$$V = \pi h/6 (3a^2 + h^2)$$

Al igual que el área, también se puede calcular en función al radio y altura del casquete:

$$V = \pi h^2/3 (3r + h)$$

Por el teorema de Pitágoras se podría calcular el radio de la esfera a partir de la distancia entre el centro de la esfera y el plano de corte ( $d$ ) y el radio de de círculo de la base del casquete ( $a$ ). <sup>[19]</sup>

$$r^2 = a^2 + d^2$$

Estas propiedades son muy útiles porque en el caso de la Ópera de Sídney nos podrían ayudar a calcular el área de las cubiertas y el volumen que envuelven, ya que no están hechas por esferas completas, sino por secciones de esta.

La zona esférica es el tramo comprendido entre 2 planos paralelos que cortan la esfera. El cálculo del volumen se hace restando a la totalidad de la esfera, el volumen del casquete superior e inferior. <sup>[20]</sup>

---

<sup>[17]</sup> Tareasfácil. "Dibujar la sección de una esfera". Último acceso: 27/09/11. En: <http://www.tareasfacil.info/matematicas/geometria/Dibujar-la-seccion-de-una-esfera.html>

<sup>[18]</sup> Wikipedia. "casquete esférico". Último acceso: 27/09/11. En: [http://es.wikipedia.org/wiki/Casquete\\_esf%C3%A9rico](http://es.wikipedia.org/wiki/Casquete_esf%C3%A9rico)

<sup>[19]</sup> Vitutor. "Cálculo del radio de una esfera". Último acceso: 27/09/11. En: <http://www.vitutor.net/2/2/33.html>

<sup>[20]</sup> Aulafácil. "Zona esférica". Último acceso: 27/09/11. En: <http://www.aulafacil.com/matematicas-volumenes/curso/Lecc-19.htm>

## **CAPÍTULO 3: CONCLUSIONES**

### **3.1 EL IMPACTO EN LA ARQUITECTURA**

Para la segunda mitad del siglo XX la arquitectura orgánica se desarrollaba intensamente teniendo como base los postulados establecidos por Frank Lloyd Wright. La figura más explicativa de este organicismo es el finlandés Alvar Aalto (1898-1976). Su obra se inicia dentro del funcionalismo a partir del cual combina formas prismáticas y curvas, como se aprecia en la Universidad Técnica de Helsinki. El joven Jorn Utzon no fue ajeno y acoge como referentes a estas dos importantes figuras de la arquitectura de su época, pero sería con la construcción de la Ópera de Sídney donde dejó de ser un participante a ser un protagonista.

En la Ópera es donde Utzon establece nuevos parámetros en la arquitectura moderna, ya que hasta entonces esta tenía como postulado la contraposición a la monumentalidad de la arquitectura clásica. Es por eso que Utzon y concretamente la Ópera de Sídney marcan una diferencia y una nueva manera de entender la arquitectura moderna, pues se desarrolla utilizando formas orgánicas y como resultado de una concepción totalmente moderna, Pero a diferencia de otras obras contemporáneas a la Ópera, esta emplea dichas formas a una escala monumental con una composición magnífica, a la cual se suma la resolución formal de las cubiertas y el mismo proceso constructivo constituyendo conjuntamente un importante aporte y un nuevo punto de partida en la arquitectura.

En la actualidad es común para arquitectos de renombre mundial hacer obras de semejante magnitud pero son pocas las que alcanzan la posición de referente social y la calidad arquitectónica de la Ópera de Sídney.

También es una obra que demuestra la interacción y sinergia entre un equipo de ingenieros y arquitectos para hacer posible que una idea se transforme en un edificio. La ópera de Sídney es un gran precedente para toda la arquitectura que usa programas de computadora y sistemas de cálculo estructural para lograr edificios audaces y expresivos.

### 3.2 EL USO DE LA MATEMÁTICA

En primer lugar hay un uso de las matemáticas desde el punto de vista de la geometría. La primera contribución de la matemática al proyecto es el estudio de las propiedades de diversas superficies curvas regladas, lo cual permitió tener un gran abanico de posibilidades entre las cuales se optó por la esfera, por las diversas propiedades geométricas que son objeto de estudio de la matemática. Es muy interesante este tema y que desde las matemáticas se puede encontrar un interminable repertorio formal para la arquitectura. Además, la geometría permite describir de manera precisa superficies geométricas complejas, de tal manera que el arquitecto contemporáneo asume la posibilidad de romper los esquemas cartesianos tradicionales para poder experimentar con nuevas formas.

En este sentido Utzon fue un pionero y mostró el camino para poder trabajar sistemas complejos, pero de forma precisa y técnica. La matemática es utilizada como herramienta de diseño y composición, y mientras más herramientas tenga el arquitecto, más interesante va ser su labor creativa.

Otro aporte muy interesante es el de los conceptos de tensión y compresión. Es la matemática desde su aplicación en la física. El estudio de las propiedades de los elementos físicos, desde la resistencia de materiales hasta la forma en la que se transmiten las cargas, puede ser una fuente de inspiración para la arquitectura, y no solo una exigencia técnica.

El caso de la Ópera de Sídney representa un gran ejemplo de cómo estas nociones de transmisión de cargas generaron un sistema muy interesante de nervaduras y bóvedas, desde el punto de vista estructural, pero también del punto de vista arquitectónico, ya que dotan de carácter a los espacios interiores. Es en la estructura que muchas ideas y propiedades estudiadas por la matemática adquieren una dimensión física y concreta, y se manifiestan en el edificio.



### 3.3 IMPORTANCIA DE LAS MATEMÁTICAS EN LA FORMACIÓN DEL ARQUITECTO

A veces no se vincula mucho la arquitectura con las matemáticas, ya que como se menciono anteriormente, la creación espacial es un tema importante y se puede pensar que las matemáticas no tienen mayor injerencia. Pero hasta para crear el espacio se están usando las matemáticas. Por ejemplo, un espacio se diseña para que sea habitado y tiene que estar a escala para que las personas se sientan realmente cómodas. Aquí entra el tema de la escala y la proporción, que Le Corbusier desarrollo tan genialmente con el modulos, y que permitió dimensionar más rápidamente.

Es también forma. Un espacio se define por una envolvente que posee una forma determinada. Esta forma puede ser de mil maneras. Ahí tenemos como ejemplo a Félix Candela con sus superficies alabeadas las cuales han sido regladas para poder desarrollarlas y luego llevarlas a la realidad. Sin las matemáticas hubiera sido difícil poder concretar ese tipo de formas y como esa existen hoy en día muchísimas más, gracias a muchos software que emplean las matemáticas para poder parametrizar distintas superficies.

Es Estructura y construcción. Ni la forma ni el espacio existirían sin que se desarrolle una estructura que la soporte. La estructura constituye el tema constructivo por excelencia. Se dimensionan apoyos, soportes, cubiertas, etc. para poder llevarlas a la realidad, para poder construirlas. Sin este dimensionamiento, la arquitectura no existe. Simplemente seria imaginar formas bonitas sin saber si pueden ser construidas o no.

Y como estas variables, muchas más.

Como vemos, la Arquitectura está envuelta en un sinfín de variables que la enriquecen y las cuales se retroalimentan unas de otras. Es una relación indivisible entre forma, estructura, espacialidad, etc., buscando lograr un adecuado confort para las personas. Y son justamente estas variables las que se desarrollan en bastante parte con el uso de las matemáticas.

La Ópera de Sídney es un ejemplo clarísimo, ya que la espacialidad planteada por Utzon era un tema difícil de resolver constructivamente. Es por ese motivo que se tuvo que idear muchas soluciones teniendo como arma fundamental a las matemáticas, ya que éstas están vinculadas al desarrollo de estructuras, de cálculo de esfuerzos y de dimensionamiento de la forma. Sería imposible no haber hecho uso de la aplicación matemática para resolver este problema ya que esta disciplina ayuda a parametrizar formas, estandariza conflictos, es casi como un lenguaje al que se recurre para lograr solucionar problemas de este tipo.

## BIBLIOGRAFÍA

- [<sup>1</sup>] Fig. 1: <http://moleskinearquitectonico.blogspot.com/2008/05/la-pera-de-sdney.html>
- [<sup>2</sup>] Fig. 2: <http://moleskinearquitectonico.blogspot.com/2008/05/la-pera-de-sdney.html>
- [<sup>3</sup>] Autor. "Jorn Utzon, Biografía y Obras". Último acceso: 19/11/11. En: <http://www.arquba.com/arquitectos/jorn-utzon-biografia-y-obras/>
- [<sup>4</sup>] Fig. 3: <http://moleskinearquitectonico.blogspot.com/2008/05/la-pera-de-sdney.html>
- [<sup>5</sup>] Autor. "La Ópera de Sídney en Australia". Último acceso: 15/11/11. En: <http://www.arqhys.com/Ópera-Sídney.html>
- [<sup>6</sup>] Autor. "Explicación de forma y funcionamiento de Bóveda Nervada Gótica". Último acceso: 25/10/11. En: [http://es.wikipedia.org/wiki/B%C3%B3veda\\_de\\_crucer%C3%ADa](http://es.wikipedia.org/wiki/B%C3%B3veda_de_crucer%C3%ADa)
- [<sup>7</sup>] Autor. "Casa de la Ópera de Sídney, Australia ARQUBA.COM. National Geographic". Último acceso: 25/10/11. En: <http://www.youtube.com/watch?v=V1HnzAeXwOk>
- [<sup>8</sup>] Autor. "Control gráfico de formas y superficies de transición. La Ópera House. Sídney, Australia. 1953 - 73". Último acceso: 18/10/11. En: <http://tdx.cat/bitstream/handle/10803/6559/17lcc17de39.pdf?sequence=17>
- [<sup>9</sup>] Alberto M. Pérez. "Superficie Reglada (Plano)". Último acceso: 17/10/11. En: [http://webdelprofesor.ula.ve/nucleotrujillo/alperez/teoria/cap\\_01a-conceptos\\_geometricos/cap\\_01a-imagenes/superficie\\_plano.swf](http://webdelprofesor.ula.ve/nucleotrujillo/alperez/teoria/cap_01a-conceptos_geometricos/cap_01a-imagenes/superficie_plano.swf)
- [<sup>10</sup>] Alberto M. Pérez. "Superficie de curvatura simple". Último acceso: 17/10/11. En: [http://webdelprofesor.ula.ve/nucleotrujillo/alperez/teoria/cap\\_01a-conceptos\\_geometricos/cap\\_01a-imagenes/superficie\\_curvatura\\_simple.swf](http://webdelprofesor.ula.ve/nucleotrujillo/alperez/teoria/cap_01a-conceptos_geometricos/cap_01a-imagenes/superficie_curvatura_simple.swf)
- [<sup>11</sup>] Alberto M. Pérez. "Superficie alabeada". Último acceso: 17/10/11. En: [http://webdelprofesor.ula.ve/nucleotrujillo/alperez/teoria/cap\\_01a-conceptos\\_geometricos/cap\\_01a-imagenes/superficie\\_alabeada.swf](http://webdelprofesor.ula.ve/nucleotrujillo/alperez/teoria/cap_01a-conceptos_geometricos/cap_01a-imagenes/superficie_alabeada.swf)
- [<sup>12</sup>] Fig. 4: Dibujo elaborado por Carlos Andrés Dávila Pinedo
- [<sup>13</sup>] Arqhys.com. "Estructuras de Compresión Dominante". Último acceso: 18/10/11. En: <http://www.arqhys.com/casas/compresion-estructuras.html>
- [<sup>14</sup>] Scribd.com. "Tracción-Compresión". Último acceso: 18/10/11. En: <http://es.scribd.com/doc/2561073/Tema4TraccionCompresion>
- [<sup>15</sup>] Cumming, Robert y Stevenson Neil. "Guía visual de la pintura y arquitectura". Último acceso: 18/10/11. En: [http://cv.uoc.edu/04\\_999\\_01\\_u07/percepcions/perc126b.html](http://cv.uoc.edu/04_999_01_u07/percepcions/perc126b.html)
- [<sup>16</sup>] Wikipedia. "Esfera". Último acceso: 27/09/11. En: <http://es.wikipedia.org/wiki/Esfera>
- [<sup>17</sup>] Tareasfácil. "Dibujar la sección de una esfera". Último acceso: 27/09/11. En: <http://www.tareasfacil.info/matematicas/geometria/Dibujar-la-seccion-de-una-esfera.html>
- [<sup>18</sup>] Wikipedia. "casquete esférico". Último acceso: 27/09/11. En: [http://es.wikipedia.org/wiki/Casquete\\_esf%C3%A9rico](http://es.wikipedia.org/wiki/Casquete_esf%C3%A9rico)
- [<sup>19</sup>] Vitutor. "Cálculo del radio de una esfera". Último acceso: 27/09/11. En: <http://www.vitutor.net/2/2/33.html>
- [<sup>20</sup>] Aulafácil. "Zona esférica". Último acceso: 27/09/11. En: <http://www.aulafacil.com/matematicas-volumenes/curso/Lecc-19.htm>

## ANEXO 1

BT/Fuente. “Ópera de Sídney (1966-1973)” En:

[http://www.bufetetecnico.es/arquitectura/proyectos5/Ópera\\_Sídney.html](http://www.bufetetecnico.es/arquitectura/proyectos5/Ópera_Sídney.html)

Ultimo acceso: 23/10/2011

Descripción: Breve reseña sobre la Ópera de Sídney y su trascendencia histórica

Wikipedia. “Jorn Utzon” En:

[http://en.wikipedia.org/wiki/J%C3%B8rn\\_Utzon](http://en.wikipedia.org/wiki/J%C3%B8rn_Utzon)

Ultimo acceso: 23/10/2011

Descripción: Este enlace contiene información sobre la vida de Jorn Utzon, su aproximación y modo de entender a la arquitectura, también hay una breve reseña sobre la Ópera de Sídney y finalmente un listado de sus obras arquitectónicas y publicaciones.

Alex – My life publishing. “La Ópera de Sídney House 1953-1975” En:

<http://alex-lifepublishing.blogspot.com/2008/09/la-Ópera-Sídney-house-1956-1973.html>

Ultimo acceso: 23/10/2011

Descripción: Este artículo hace una descripción del edificio pero se centra más en el planteamiento arquitectónico, en la forma de las cubiertas y en la resolución formal de la forma de estas.

Mi moleskine arquitectónico. “La Ópera de Sídney” En:

<http://moleskinearquitectonico.blogspot.com/2008/05/la-pera-de-sdney.html>

Ultimo acceso: 23/10/2011

Descripción: El enlace trata sobre la Ópera de Sídney, a lo largo del artículo se describen de manera cronológica y cuidadosa los puntos más resaltantes para su construcción, desde su ubicación y el concurso, pasando por la propuesta arquitectónica y fases de construcción, finalizando con el funcionamiento del edificio, críticas y premios.

Wikipedia. “La Ópera de Sídney” En:

[http://es.wikipedia.org/wiki/%C3%93pera\\_de\\_S%C3%ADdney](http://es.wikipedia.org/wiki/%C3%93pera_de_S%C3%ADdney)

Ultimo acceso: 23/10/2011

Descripción: En este artículo de Wikipedia se hace una descripción mas general de todo el proyecto, de los temas mencionados en los enlaces anteriores y paralelamente se habla de la relación que Utzon tuvo con el proyecto a lo largo del proceso constructivo.

Youtube, cuenta: cedecom. “Jorn Utzon” En:

<http://www.youtube.com/watch?v=LsO2QLZ9Sug>

Ultimo acceso: 23/10/2011

Descripción: Este video explica mucho sobre el arquitecto y ayuda a entender su formación y las experiencias personales que lo llevaron a proyectar la casa de la ópera. Me parece muy interesante por ejemplo que su padre haya sido diseñador de barcos y eso lo acerco a trabajar y diseñar con formas tridimensionales complejas.

Página oficial de la Ópera de Sídney. “Sídney Ópera House” En:

[http://www.SídneyÓperahouse.com/about/house\\_history\\_landing.aspx](http://www.SídneyÓperahouse.com/about/house_history_landing.aspx)

Ultimo acceso: 23/10/2011

Descripción: En esta página web se puede encontrar información fidedigna del edificio, su historia (cronológicamente cada 5 años) y sobre los eventos y actividades culturales que alberga.

No se hace referencia al autor. “Sídney Ópera House” En:

<http://www.gids.nl/Sídney/Ópera.html>

Ultimo acceso: 23/10/2011

Descripción: En este artículo se puede encontrar información acerca de la construcción de la ópera de Sídney, pero además hace una descripción de los principales ambientes interiores y su modo de funcionamiento.

Wikiarquitectura. “Ópera de Sídney” En:

[http://es.wikiarquitectura.com/index.php/%C3%93pera\\_de\\_Sídney](http://es.wikiarquitectura.com/index.php/%C3%93pera_de_Sídney)

Ultimo acceso: 23/10/2011

Descripción: Esta es una descripción más arquitectónica del edificio pues se centra el concepto arquitectónico del edificio para luego enfocarse en temas más prácticos como la espacialidad, la estructura y los materiales, así mismo se adjunta un CAD con planos básicos de la Ópera .

Esther Vallejo Lobete, Fernando Fadón Salazar, José Enrique Cerón Hoyos. “La geometría, soporte de la idea en el proceso de diseño” En:

[http://www.degraf.ufpr.br/artigos\\_graphica/LAGEOMETRIA.pdf](http://www.degraf.ufpr.br/artigos_graphica/LAGEOMETRIA.pdf)

Ultimo acceso: 23/10/2011

Descripción: En este artículo se trata la importancia que ha tenido y que tiene la geometría en la arquitectura y como esta relación han ido evolucionando, como en el caso particular de la Ópera de Sídney , que mediante la geometrización de una forma irregular se resolvió el proceso constructivo.

## MATEMÁTICAS

Wikipedia. “Esfera” En:

<http://es.wikipedia.org/wiki/Esfera>

Ultimo acceso: 23/10/2011

Descripción: En el enlace podemos encontrar la definición geométrica de lo que es una esfera, seguidamente podemos ver diversas fórmulas y conceptos matemáticos relacionados a ella, como el volumen, el área, su ecuación cartesiana, sus coordenadas cartesianas y algunas generalizaciones sobre ella

Wikipedia. “Superficie reglada” En:

[http://es.wikipedia.org/wiki/Superficie\\_reglada](http://es.wikipedia.org/wiki/Superficie_reglada)

Ultimo acceso: 23/10/2011

Descripción: En el artículo se aprecia la definición geométrica de lo que es una superficie reglada, los diferentes tipos de superficie y sus ecuaciones matemáticas, cabe señalar que la importancia de las superficies regladas radica en que algunas pueden ser desarrollables, en este grupo se encuentra la esfera.

Vladimir Brontis. “Forma, movimiento y estructura” En:

<http://vladimirbrontis.blogspot.com/2006/03/forma-movimiento-y-equilibrio.html>

Ultimo acceso: 23/10/2011

Descripción: el artículo trata del aporte que tiene la geometría para lograr una adecuada relación ente la forma y la estructura de un edificio y analiza el caso particular de la Ópera de Sídney.

Wikipedia. “Superficie (matemática)” En:

[http://es.wikipedia.org/wiki/Superficie\\_\(matem%C3%A1tica\)](http://es.wikipedia.org/wiki/Superficie_(matem%C3%A1tica))

Ultimo acceso: 23/10/2011

Descripción: El texto contiene una definición formal de lo que es superficie, propiedades y tipos, así como una clasificación de estas.

Profesores en línea. “Cuerpos geométricos” En:

<http://www.profesorenlinea.cl/geometria/cuerposgeometricos.htm>

Ultimo acceso: 23/10/2011

Descripción: Definición de una figura geométrica tridimensional, los poliedros y su clasificación en regulares e irregulares.

Formularium. “Spherical cap” En:

<http://formularium.org/en/10.html?go=81.106>

Ultimo acceso: 23/10/2011

Descripción: página con una hoja de cálculo a manera de Excel, que contiene formulas aplicables a la esfera, y que puede ser editada, por ejemplo ingresando datos de radio o diámetro.

Wikipedia. “Geometría diferencial de superficies” En:

[http://es.wikipedia.org/wiki/Geometr%C3%ADa\\_diferencial\\_de\\_superficies](http://es.wikipedia.org/wiki/Geometr%C3%ADa_diferencial_de_superficies)

Ultimo acceso: 23/10/2011

Descripción: definición, ecuaciones y formas fundamentales

Scribd. “Tracción- Compresión” En:

<http://es.scribd.com/doc/2561073/Tema4TraccionCompresion?>

Ultimo acceso: 23/10/2011

Descripción: explicación matemática de la tracción y compresión, fuerzas normales y cortantes y comportamiento en caso hiper- elásticos.

Laboiteverte. “Planos de la Ópera de Sídney” En:

<http://www.laboiteverte.fr/des-plans-de-lÓpera-de-Sídney/>

Ultimo acceso: 23/10/2011

Descripción: se muestran varios planos de la obra, en los que se puede ver el desarrollo de las conchas, los sistemas acústicos y estructurales.

Wikipedia. “Casquete esférico” En:

[http://es.wikipedia.org/wiki/Casquete\\_esf%C3%A9rico](http://es.wikipedia.org/wiki/Casquete_esf%C3%A9rico)

Ultimo acceso: 23/10/2011

Descripción: se explican los conceptos geométricos asociados al casquete esférico, como área, volumen.

Wikipedia. “Spherical cap” En:

[http://es.wikipedia.org/wiki/Archivo:Spherical\\_Cap.svg](http://es.wikipedia.org/wiki/Archivo:Spherical_Cap.svg)

Ultimo acceso: 23/10/2011

Wikipedia. “Curvatura” En:

<http://es.wikipedia.org/wiki/Curvatura>

Ultimo acceso: 23/10/2011

Geoka. “Semiesfera, huso, casquete y zona esférica” En:

<http://www.geoka.net/poliedros/esferas.html>

Ultimo acceso: 23/10/2011

Tareas facil. “Dibujar la sección de una esfera” En:  
<http://www.tareasfacil.info/matematicas/geometria/Dibujar-la-seccion-de-una-esfera.html>

Ultimo acceso: 23/10/2011

Vitutor. “Esfera” En:  
<http://www.vitutor.net/2/2/33.html>

Ultimo acceso: 23/10/2011

Aula facil. “Zona esferica” En:  
<http://www.aulafacil.com/matematicas-volumenes/curso/Lecc-19.htm>

Ultimo acceso: 23/10/2011

Web del profesor. “Superficie de una plano” En:  
[http://webdelprofesor.ula.ve/nucleotrujillo/alperez/teoria/cap\\_01a-conceptos\\_geometricos/cap\\_01a-imagenes/superficie\\_plano.swf](http://webdelprofesor.ula.ve/nucleotrujillo/alperez/teoria/cap_01a-conceptos_geometricos/cap_01a-imagenes/superficie_plano.swf)

Ultimo acceso: 23/10/2011

Web del profesor. “Superficie de curvatura simple” En:  
[http://webdelprofesor.ula.ve/nucleotrujillo/alperez/teoria/cap\\_01a-conceptos\\_geometricos/cap\\_01a-imagenes/superficie\\_curvatura\\_simple.swf](http://webdelprofesor.ula.ve/nucleotrujillo/alperez/teoria/cap_01a-conceptos_geometricos/cap_01a-imagenes/superficie_curvatura_simple.swf)

Ultimo acceso: 23/10/2011

Web del profesor. “Superficie alabeada” En:  
[http://webdelprofesor.ula.ve/nucleotrujillo/alperez/teoria/cap\\_01a-conceptos\\_geometricos/cap\\_01a-imagenes/superficie\\_alabeada.swf](http://webdelprofesor.ula.ve/nucleotrujillo/alperez/teoria/cap_01a-conceptos_geometricos/cap_01a-imagenes/superficie_alabeada.swf)

Ultimo acceso: 23/10/2011

Web del profesor. “Superficie” En:  
[http://webdelprofesor.ula.ve/nucleotrujillo/alperez/teoria/cap\\_01a-conceptos\\_geometricos/05-superficie.htm](http://webdelprofesor.ula.ve/nucleotrujillo/alperez/teoria/cap_01a-conceptos_geometricos/05-superficie.htm)

Ultimo acceso: 23/10/2011

Web del profesor. “Superficie” En:  
[http://webdelprofesor.ula.ve/nucleotrujillo/alperez/teoria/cap\\_01a-conceptos\\_geometricos/05-superficie.htm](http://webdelprofesor.ula.ve/nucleotrujillo/alperez/teoria/cap_01a-conceptos_geometricos/05-superficie.htm)

Ultimo acceso: 23/10/2011

Arquimac. “Análisis estructural de cúpulas” En:  
<http://arquimac.blogspot.es/img/sanpaul1.pdf>

Ultimo acceso: 23/10/2011

Wikipedia. “Bóveda” En:  
<http://es.wikipedia.org/wiki/B%C3%B3veda>

Ultimo acceso: 23/10/2011

Filemon. “Curvaturas de una superficie” En:  
<http://filemon.upct.es/~pmira/pdf/ExpoSuperficies?.pdf>

Ultimo acceso: 23/10/2011

## EL PROBLEMA Y SU SOCLUCION MATEMATICA

No se hace referencia al autor. “Ópera House en Sídney: control gráfico de formas y superficies de transición” En:

<http://tdx.cat/bitstream/handle/10803/6559/18lcc18de39.pdf>

Ultimo acceso: 23/10/2011

Descripción: En el artículo se explican la forma, geometrización y anclaje de las vigas empleadas en la Ópera de Sídney, tanto el de las cubiertas esféricas (costillar) como en el de la base de estas, donde se usaron vigas planas. El pdf contiene gráficos explicativos que ayudan a entender mejor este proceso

PUCP. “Los secretos geométricos en diseño y arquitectura” En:

<http://textos.pucp.edu.pe/pdf/412.pdf>

Ultimo acceso: 23/10/2011

Descripción: Este artículo aborda la importancia de la geometría para la resolución de problemas en las distintas dimensiones del Diseño y de la Arquitectura que pueden ser espaciales, temporales, de luz, de acústica, de confort y de percepción.

Slideshare. “Diseño de elementos estructurales en arquitectura” En:

<http://www.slideshare.net/urio/morfologia-presentation-691780>

Ultimo acceso: 23/10/2011

Arqhys. “Estructuras de Compresión Dominante” En:

<http://www.arqhys.com/casas/compresion-estructuras.html>

Ultimo acceso: 23/10/2011

Arqhys. “Resistencia del concreto” En:

<http://www.arqhys.com/resistencia-concreto.html>

Ultimo acceso: 23/10/2011

Civilgeeks. “Hormigón pretensado: ventajas y desventajas” En:

<http://civilgeeks.com/2011/03/15/hormigon-pretensado-ventajas-y-desventajas/>

Ultimo acceso: 23/10/2011

Wikipedia. “Prestressed concrete” En:

[http://es.wikipedia.org/wiki/Archivo:Prestressed\\_concrete\\_en.svg](http://es.wikipedia.org/wiki/Archivo:Prestressed_concrete_en.svg)

Ultimo acceso: 23/10/2011