



Escola de Camins
Escola Tècnica Superior d'Enginyeria de Camins, Canals i Ports
UPC BARCELONATECH

**ESTUDIO, EVOLUCIÓN, CRÍTICA Y
DISEÑO DE LA ÓPERA DE SÍDNEY,
DESDE LA PERSPECTIVA DEL
INGENIERO CIVIL**

Treball realitzat per:

Iago Lorenzo García

Dirigit per:

Mario Fernández González

Grau en:

Enginyeria Civil

Barcelona, 12 de juny del 2018

Departament d'Enginyeria Civil i Ambiental

TREBALL FINAL DE GRAU

ÍNDICE

1. Introducción	p. 3
2. Jørn Utzon	p. 8
3. Referencias a la obra de Utzon	p. 12
3.1. Eero Saarinen	p. 12
3.2. Sverre Fehn	p. 16
3.3. Eduardo Torroja Miret	p. 20
3.4. Félix Candela Outeriño	p. 24
3.5. Rafael Guastavino Moreno	p. 27
3.6. Otras referencias	p. 30
3.6.1. Eladio Dieste	p. 30
3.6.2. Matthew Nowicki	p. 32
3.6.3. Monte Alban	p. 34
3.6.4. Castillo de Kronborg	p. 35
3.6.5. Arquitectura oriental	p. 36
4. Construcción del Palacio	p. 37
5. Los ordenadores y la Ópera de Sídney	p. 62
6. La marcha de Utzon	p. 77
7. Inauguración y reconciliación con Utzon	p. 84
8. El Palacio de la Ópera de Sídney como referencia	p. 87
8.1.El Templo de Loto	p. 87
8.2.Santiago Calatrava	p. 90
8.3.Frank Gehry	p. 92
8.4.Norman Foster	p. 94
8.5.Zaha Hadid	p. 96
8.6.Renzo Piano	p. 98
9. Innovaciones tecnológicas	p. 100
10. Conclusión	p. 102

1. INTRODUCCIÓN



Imagen 1: Jørn Utzon, Sydney Opera House/Palacio de la Ópera de Sídney, 1973.

Fuente: (<https://www.popsugar.com.au/smart-living/Sydney-Opera-House-Photos-38822013>)

El Palacio de la Ópera de Sídney (Imagen 1), situado en susodicha ciudad australiana, capital del estado de Nueva Gales del Sur, es uno de los edificios más famosos y distintivos del siglo XX, así como la imagen de, no solo una ciudad, sino de toda una nación. Patrimonio de la Humanidad desde 2007¹, fue diseñado por el conocido arquitecto danés Jørn Utzon a raíz de un concurso creado en Sídney en el año 1956 para hacer un Palacio de la Opera, a petición del director del conservatorio de Sídney de la época Eugene Goossens (Imagen 2) (Keiding y Dirckinck-Holmfeld 2005).

La idea de construir un Palacio de la Opera empezó a finales de los años 40, cuando Eugene Goossens sostuvo que una ciudad como Sídney necesitaba de un gran espacio para las grandes actuaciones musicales y las grandes producciones



Imagen 2: Eugene Goossens.

Fuente:
(<http://www.musicsalesclassical.com/composer/short-bio/Eugene-Goossens>)

¹ Título concedido por la Unesco.

de teatro. Esta idea no obtuvo el apoyo necesario hasta 1954, cuando el primer ministro del estado de Nueva Gales del Sur, Joseph Cahill, también se unió a esta iniciativa por lo que se empezaron a solicitar diseños para este nuevo proyecto.



Imagen 3: Bennelong Point antes de la construcción del Palacio (1955).

Fuente: (<http://nla.gov.au/nla.obj-155397560/view>)

Antes de iniciar ningún concurso tuvieron que ponerse de acuerdo en el emplazamiento del edificio. Goosens era partidario de que su ubicación fuese en la península de Bennelong Point (Imagen 3), en la bahía de Sídney, mientras que Cahill apostaba más por instalarlo en las cercanías de la estación de Wynyard, facilitando así su acceso. Finalmente se optó por la opción definida por Goosens.

El día 13 de septiembre de 1955 da inicio un concurso, a nivel internacional, para la presentación y selección de proyectos para el nuevo edificio australiano. Fueron presentadas más de 233 propuestas, provenientes de más de 32 países, cuya motivación, aparte de construir un gran proyecto, era el premio metálico de 100.000 \$ otorgado al ganador. Los criterios mínimos

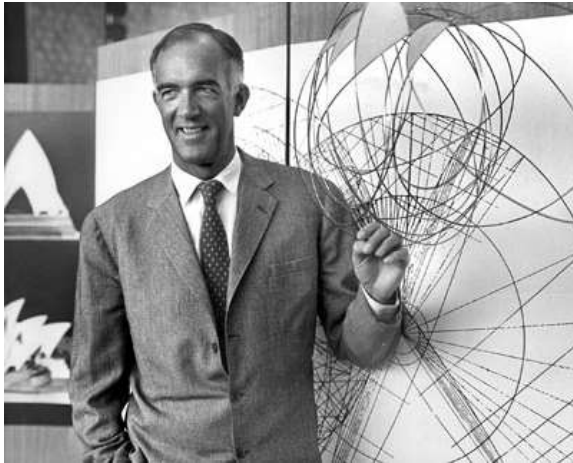


Imagen 4: Jørn Utzon.

Fuente:

(<http://catalogo.artium.org/book/export/html/7747>)

especificados que debían de contener los proyectos eran una gran sala con capacidad para 3000 butacas y una sala de menor tamaño para unas 1200 butacas, cada uno de los diseños debían de contener además espacios para grandes óperas, conciertos de orquestas, coros, conferencias, reuniones y representaciones de diferentes tipos (Watson, Anne, 2013).

Un Jørn Utzon de 38 años de edad, decidió participar en el concurso, y en su despacho de Hellebaek, Dinamarca, creó un diseño bastante similar al que conocemos hoy en día. Su propuesta consistía en 12 dibujos que envió a Sídney a finales de 1956, siendo la propuesta 218 que se presentaba al concurso. Dicha propuesta fue inicialmente rechazada por el jurado del concurso por considerarla imposible de llevar a cabo constructivamente. No fue hasta unos días después, cuando el arquitecto estadounidense de origen finlandés Eero Saarinen llegó a Sídney y, como miembro del jurado pidió ver las propuestas ya rechazadas (Drew y Browell 2002). Cuando vio la propuesta 218 no tuvo dudas en readmitirla en el concurso, y no contento con eso, acabo resultando la



Imagen 5: cartel de los JJOO de 1956 celebrados en Melbourne.

Fuente:

(https://www.ecured.cu/Juegos_Ol%C3%ADmpicos_de_Melbourne_1956)

propuesta ganadora, anunciada en 1957.

En 1956, en Melbourne, se celebraron los JJOO, situando a Australia en el mapa Mundial, ya que tras la II Guerra Mundial, el país quedó severamente castigado, y durante la década de los 50 estaba en pleno crecimiento económico, por lo que pudo permitirse, tanto la organización de los JJOO, como la creación del concurso para Sídney. A eso se sumó la masiva entrada de inmigrantes europeos al país, que cambiaron su cultura y sociedad, y también sumaron trabajadores a la ópera. A parte de los trabajadores, arquitectos europeos también comenzaron a dejarse ver por Australia, modernizando las construcciones del país.

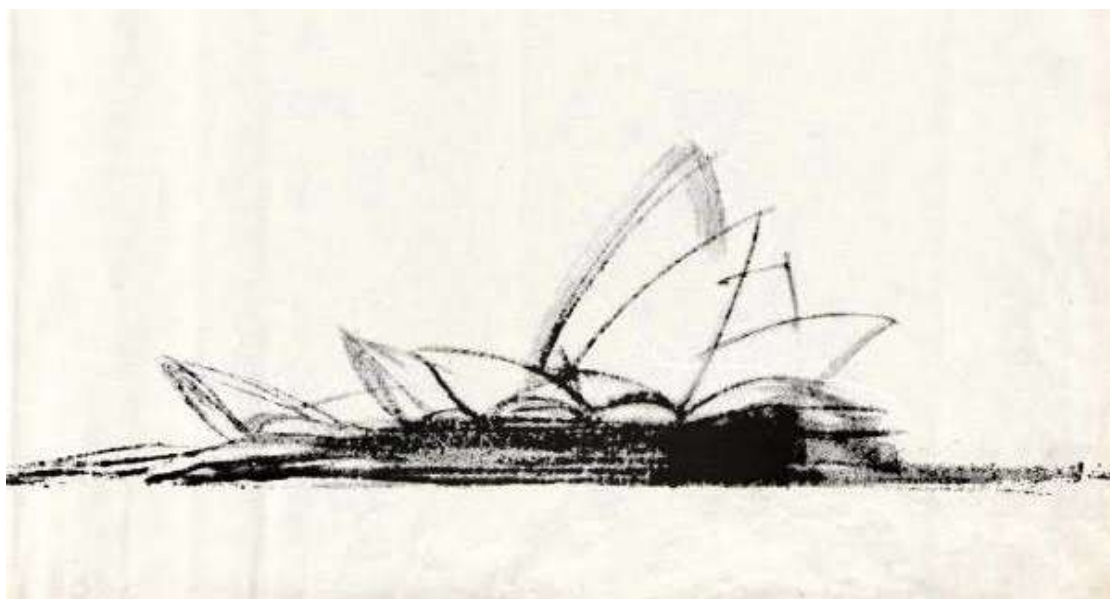


Imagen 6: boceto presentado por Utzon al concurso.

Fuente: (<https://www.pinterest.cl/pin/673780794220758666/>)

Cuando se anunció el ganador del concurso, Jørn Utzon viajó a Sídney para encargarse de la construcción del proyecto, en 1957. En el terreno escogido para la construcción del complejo, se encontraba el antiguo Fuerte Macquarie, convertido entonces en depósito de tranvías, que debió ser demolido en 1958. En 1959 se empezó con el trabajo de construcción del proyecto de Utzon.

Llegaron a Sídney muchos equipos de ingenieros e innovadores para participar en la construcción de la Ópera. La construcción del Palacio fue un proyecto de tecnologías pioneras, y de ingenieros visionarios, ya que era necesario encontrar soluciones nuevas y creativas a los problemas generados por esta construcción sin precedentes (Watson, Anne, 2013, p. 14).

La tecnología informática de la época no permitía reproducir las formas libres originalmente creadas por Utzon, por lo tanto entre él y los ingenieros tuvieron que encontrar una solución plausible para poder construir la cubierta. En 1961 se llegó a la solución de usar los cortes de una esfera para darle forma a la cubierta, lo que facilitó bastante las cosas a nivel constructivo, para hacer realidad dichas formas con hormigón prefabricado.

Las piezas de la cubierta fueron construidas por “costillas” prefabricadas unidas en el aire. Esta operación sin precedentes hizo necesarios cálculos sumamente precisos e innovadores por ordenador, los cuales llevaron a otras innovaciones tecnológicas.

2. JØRN UTZON

Jørn Utzon (9 de abril de 1918 - 29 de noviembre de 2008) fue un arquitecto danés, conocido principalmente por haber realizado el proyecto del Palacio de la Ópera de Sídney (Imagen 7), y por ser el ganador del Premio Pritzker en 2003².



Imagen 7: Jørn Utzon, Palacio de la Ópera de Sídney, Australia, 1973.

Fuente: (https://es.wikipedia.org/wiki/%C3%93pera_de_S%C3%ADdney)

Utzon nació en Copenhague, hijo de un ingeniero naval, y creció en Aalborg, Dinamarca, donde se interesó por los barcos y una posible carrera naval. Desde 1937 acudió a la Academia Real de Bellas Artes de Dinamarca donde estudió bajo las enseñanzas de Kay Fisker y Steen Eller Rasmussen (Nieto y Sobejano 1999). A partir de su graduación en 1942, se unió al estudio de Erik Gunnar Asplund en Estocolmo donde trabajó con Arne Jacobsen y Paul Henningsen. Fue entonces cuando se interesó particularmente por el trabajo del arquitecto americano Frank Lloyd Wright. Después del final de la Segunda

² Premio de mayor prestigio internacional y el principal galardón concedido para honrar a un arquitecto en el mundo, mencionado comúnmente como el «Nobel de Arquitectura».

Guerra Mundial y de la ocupación alemana de Dinamarca, regresó a Copenhague donde se asentó como arquitecto.



Imagen 8: Jørn Utzon, Iglesia Bagsvaerd, Copenhague, 1976.

Fuente: (<http://arquiscopio.com/archivo/2012/06/12/iglesia-de-bagsvaerd/>)

El estilo de Utzon era un estilo variable según las características del proyecto. A los edificios públicos siempre les otorgaba rasgos monumentales, como es el caso del Palacio de la Ópera de Sídney o la Iglesia de Bagsvaerd de Copenhague (Imagen 8). Con las viviendas particulares (Imagen 11), su

principal objetivo era adaptarlas al entorno y dar al conjunto armonía, basándose en obras de Frank Lloyd Wright, a quien usó de inspiración, como era la casa Kaufmann (Imagen 10)(Ferrer Forés 2006).



Imagen 9: Jørn Utzon, Estadio de Jeddah, Arabia Saudí, 1967.

Fuente: (<http://catalogo.artium.org/printpdf/book/export/html/7729>)

Los que podemos destacar, sobretodo de los grandes edificios de Utzon (Imagen 9), son las formas orgánicas, tratando de romper con la arquitectura racional y funcional de sus predecesores. Tratando siempre de imitar a formas naturales creando sensaciones muy distintas en las personas que están dentro de sus edificios o simplemente los miran desde fuera.

El hecho de ganar el premio Prizker en 2003 colocó a Utzon en el lugar que merecía, la lista de grandes arquitectos del siglo XX, ya que sus obras nunca pasaron desapercibidas y algunas de ellas se convirtieron en auténticos monumentos e imágenes características de grandes ciudades.



Imagen 11: Jørn Utzon, Can Lis, Mallorca, 1972.

Fuente: (<http://www.utzonphotos.com/guide-to-utzon/projects/can-lis/>)



Imagen 10: Frank Lloyd Wright, Casa Kaufmann, 1939.

Fuente: (<http://www.xtec.cat/~jarrimad/contemp/wright.html>)

3. REFERENCIAS A LA OBRA DE UTZON

3.1. EERO SAARINEN

Eero Saarinen (Imagen 12) (1910-1961) era un arquitecto estadounidense de origen finlandés conocido por su estilo neo futurista. Sus obras destacan por ser grandes construcciones con diseños orgánicos, cuya geometría es la base del proyecto. También fue conocido por ser quien reintrodujo la propuesta de Utzon al concurso para la construcción de la Ópera de Sídney una vez que esta había sido descartada.



Imagen 12: Eero Saarinen.

Muchos de los proyectos de Saarinen utilizan la catenaria como forma estructural

Fuente:
(<https://www.loc.gov/pictures/item/krb2008000003/>)



Imagen 13: Eero Saarinen, Arco Gateway, San Louis, Missouri, 1965.

Fuente: (<http://www.bistatedev.org/2017/04/28/gateway-arch-tram-rides-resume-operations/>)

para, de esta forma poder conseguir compresión pura en sus cubiertas y poder hacerlas con una capa de hormigón muy esbelta cubriendo grandes superficies. El uso más obvio de la catenaria en una obra de Saarinen se puede ver en el Arco Gateway en St. Louis, Missouri (Imagen 13). Estas construcciones fueron las que hicieron famoso a Saarinen ya que sus cubiertas representaban grandes innovaciones, tanto geométricas como tecnológicas y en el uso de materiales.



Imagen 14: Eero Saarinen, TWA Flight Center, Nueva York, 1962.

Fuente: (<https://imjustwalkin.com/2015/04/26/twa-flight-center/>)

Otras obras destacadas de Saarinen, principalmente por sus cubiertas son el TWA Flight Center (Imagen 14), donde no solo podemos ver como usa la geometría como elemento estructural, sino que también podemos ver como une tres superficies diferentes de forma magistral, lo que pudo servir de ejemplo para Utzon a la hora de diseñar las uniones entre las “conchas”³ de su proyecto. El auditorio Kresge del Instituto Tecnológico de Massachusetts (Imagen 15), donde toda la cubierta es una gran cúpula que sigue la forma de la catenaria, para trabajar únicamente a compresión y conseguir la esbelteza que se aprecia

³ Traducción del inglés, *shells*, a partir de este momento se usará la palabra “conchas” entrecomillada para hacer referencia a estos elementos.

en la imagen. Otra obra mencionable, que también pudo servir como ejemplo para Utzon es la pista de Ingalls (Imagen 16), en Yale, por el hecho de que toda la cubierta está apoyada en una costilla principal, hecho que también ocurre en la Opera de Sídney. La única diferencia es que en este caso Saarinen hace trabajar toda la cubierta a tracción, empleando la catenaria en su forma natural, con cables, unidos a la costilla que soportan la cubierta por tracción pura.



Imagen 15: Eero Saarinen, Auditorio Kresge, Massachusetts, 1955.

Fuente: (<https://es.wikiarquitectura.com/edificio/auditorio-kresge/>)

Por todo esto, no solo fue una inspiración para Utzon, sino que fue quien apostó por él en el concurso, ya que los otros jueces lo habían descartado por considerar su proyecto imposible de llevar a cabo. Pese a eso, cabe destacar que finalmente, con el Palacio de la Opera, no se consiguió la esbeltez deseada ni llegó a ser geométricamente tan magistral como debía serlo en un principio con el proyecto original de Utzon, pero aun así se consiguió un resultado magnífico que hizo de este uno de los proyectos más importantes del s. XX.



Imagen 16: Eero Saarinen, Pista Ingalls, Conecticut, 1958.

Fuente: (<https://www.archdaily.com/157708/ad-classics-david-s-ingalls-skating-rink-eero-saarinen>)

3.2. SVERRE FEHN

Sverre Fehn (Imagen 17) (1924-2009) y Utzon fueron dos arquitectos contemporáneos laboralmente y ambos eran de los países escandinavos⁴, por lo que sirvieron de referencia el uno para el otro en muchas ocasiones. Eran dos arquitectos cuyas obras tenían componentes geométricos importantísimos y al mismo tiempo buscaban romper con lo ya hecho, testado y establecido hasta la fecha por otros arquitectos, también de nivel mundial.



Imagen 17: Sverre Fehn.

Fuente: (https://nbl.snl.no/Sverre_Fehn)



Imagen 18: Sverre Fehn, Pabellón de los Países Nórdicos, Venecia, 1962.

Fuente: (<https://arquitecturiza.wordpress.com/tag/sverre-fehn/>)

⁴ Utzon era danés, y Fehn era noruego.

Basándonos en el Palacio de la Ópera de Sídney, podríamos decir que Utzon tomó como referencia una de las obras más importantes de Sverre Fehn, el Pabellón Nórdico para la Bienal de Venecia de 1962 (Imagen 18). Pese a esta propuesta ser posterior al concurso para la Opera de Sídney, pudo servir de referencia para Utzon, ya que, la propuesta de Utzon eran solo esquemas, y todavía no estaba constructivamente estudiada cuando resultó ganadora.

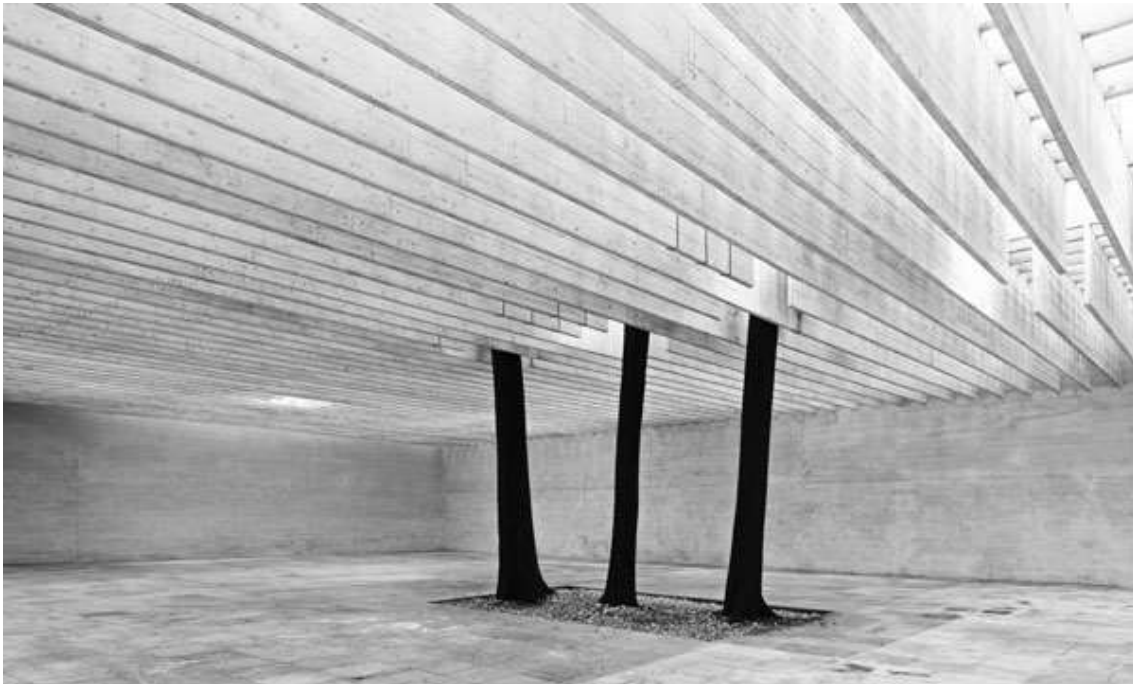


Imagen 19: Sverre Fehn, Pabellón de los Países Nórdicos, Venecia, 1962.

Fuente: (<http://arxiubak.blogspot.com.es/2013/09/pabellon-nordico-en-venecia-1962.html>)

El aspecto más representativo de dicha obra es su cubierta, consistente en dos capas de vigas de hormigón muy esbeltas superpuestas que se interrumpen puntualmente para permitir el paso de los árboles que viven en su interior (Imagen 19). Su espesor de dos metros bloquea los rayos de luz directa de forma que se genera un plano de iluminación difusa (Imagen 20). Esta configuración de la cubierta resuelve las dos condicionantes principales del proyecto: la creación de un espacio expositivo flexible y la preservación de los árboles de mayor porte. Bajo la cubierta se genera un espacio horizontal continuo y sin obstáculos estructurales salvo los árboles que ya allí vivían.



Imagen 20: Sverre Fehn, Pabellón de los Países Nórdicos, Venecia, 1962.

Fuente: (<https://www.pinterest.es/pin/356065914273748552/>)

Un hecho importante de este proyecto fue el uso de hormigón para la totalidad de la estructura, ya que en la época en la que fue construido el acero estaba en auge, lo que le hizo tener este hecho común con la Ópera de Sídney, ya que la estructura está también hecha con hormigón pretensado.

Otro factor similar entre ambas construcciones es la creación de un gran espacio horizontal y limpio con polivalencia. Este hecho se puede observar en varios sitios, tanto dentro del palacio con las grandes salas de concierto, como bajo en podio, donde podemos ver un entramado de vigas horizontalmente colocadas de hormigón (dando una imagen similar a la obra de Fehn) (Imagen 21) de longitudes muy considerables dejando un gran espacio horizontal, en este caso destinado al aparcamiento de coches, libre de obstáculos, solo soportado por las vigas.

Utzon y Fehn también eran unos enamorados de la naturaleza y siempre trataban de realizar obras que se adaptasen a su entorno, véase por ejemplo el

hecho ya mencionado de la interrupción de la estructura para la supervivencia de los árboles en la obra de Fehn, o las formas naturales, parecidas a conchas o a motivos marinos de la Ópera de Sídney.

Estos hechos no sorprenden teniendo en cuenta lo mencionado anteriormente, el hecho de ser arquitectos contemporáneos, de países cercanos y admiradores el uno del otro. De hecho ambos fueron arquitectos de talla mundial, y alcanzaron la cumbre de la misma forma, ganando un concurso de arquitectura a nivel internacional y realizando proyectos innovadores tanto a nivel tecnológico como a nivel artístico.



Imagen 21: Comparación de la estructura de la obra de Fehn y la obra de Utzon.

Fuentes: (<http://aguileraguerreroarquitectos.blogspot.com.es/2012/12/feliz-navidad-bon-nadal-merry-christmas.html>), (<https://www.pinterest.ca/pin/11259067788359055/>).

3.3. EDUARDO TORROJA MIRET

Eduardo Torroja (Imagen 22) (1899-1961) fue un ingeniero de caminos, profesor, constructor e investigador español. El régimen franquista le otorgó, a título póstumo, el título de marqués de Torroja en reconocimiento a su extraordinaria labor en el campo de la ingeniería civil (Arredondo Verdú 1977).



Imagen 22: Eduardo Torroja.

Fuente:

(<http://informesdelaconstruccion.revistas.csic.es/index.php/informesdelaconstruccion/article/view/3640/4119>)

Torroja fue quizás el máximo especialista mundial de su tiempo en construcción en hormigón. Todas las generaciones posteriores de ingenieros de caminos estudian sus planteamientos y desarrollos. Algunos de los conceptos que desarrolló fueron continuados por uno de sus alumnos, Félix Candela.

Las construcciones de Torroja se caracterizaban por su eficiencia y esbeltez estructural, usando la geometría como mecanismo para aumentar la resistencia de sus cubiertas. Como gran maestro del hormigón, Torroja fue un ejemplo y una referencia para muchos arquitectos emergentes, entre ellos, Utzon, ya que en sus obras también usaba mucho el hormigón, y trataba de darle, con geometría, eficiencia estructural.

En el Palacio de la Ópera de Sídney, en su idea original, la voluntad de Utzon era hacer unas “conchas” esbeltas, al igual que las de los proyectos de

Torroja, sin más subestructura que los apoyos de estas. Como concepto era una idea innovadora, tanto por la escala del proyecto como por la importancia de este, pero finalmente, la idea tuvo que ser cambiada, por la imposibilidad de cumplir la voluntad de Utzon en su totalidad y también por los acontecimientos que sucedieron durante la construcción de la obra (Drew y Browell 2002, p. 18).



Imagen 23: Eduardo Torroja, Hipódromo de la Zarzuela, Madrid, 1941.

Fuente: (<http://www.revistalimpiezas.es/limpieza-aplicada/espacios-abiertos/el-servicio-de-limpieza-en-el-emblematico-hipodromo-de-la-zarzuela-de-madrid>)

Por todo esto, el alumno más destacado de Torroja, Félix Candela criticó ferozmente la obra de Utzon en un artículo que tituló “El escándalo de la Ópera de Sídney” donde lo definía como “un proyecto insensato, demasiado expresivo, gestual y poco definido en los aspectos técnicos.” (Luna 2015), ya que consideraba el Palacio de la Ópera de Sídney un buen intento de utilizar las técnicas de su maestro, pero no lo consiguió, ni la habilidad geométrica, ni la esbeltez de la estructura.

Dos de las obras referentes de este ingeniero eran el Hipódromo de la Zarzuela (Imagen 23), donde se puede ver conocimiento de geometría y habilidad con el hormigón en cualquier lugar de la cubierta, cubriendo esta una luz importantísima, solo apoyada en un punto, y además en voladizo, y la otra es el mercado de Abastos de Algeciras (Imagen 24), donde una gran cúpula cubre una superficie muy considerable, teniendo en cuenta sus escasos puntos de apoyo y su esbeltez. Otra obra destacable, también para entender las críticas de Candela (Luna 2015) fue la capilla del Sancti Spirit (Imagen 25), en Lleida, ya que tiene una forma muy parecida a las “conchas” del Palacio de la Ópera, pero según Candela, con una solución más eficiente, porque en esta capilla, lo que hace la estructura es la cubierta, y no vigas que la soporten.



Imagen 24: Eduardo Torroja, Mercado de Abastos, Algeciras, 1935.

Fuente: (https://es.wikipedia.org/wiki/Mercado_de_abastos_de_Algeciras#/media/File:Mercado_torroja.jpg)

Pese a estas variaciones de pensamiento y proyecto, sí que podemos concluir que Utzon tomó como referencia a Eduardo Torroja, tanto en el dominio del hormigón como en el de la geometría para erigir su gran obra, y llevarla a cabo, mientras se lo permitieron.

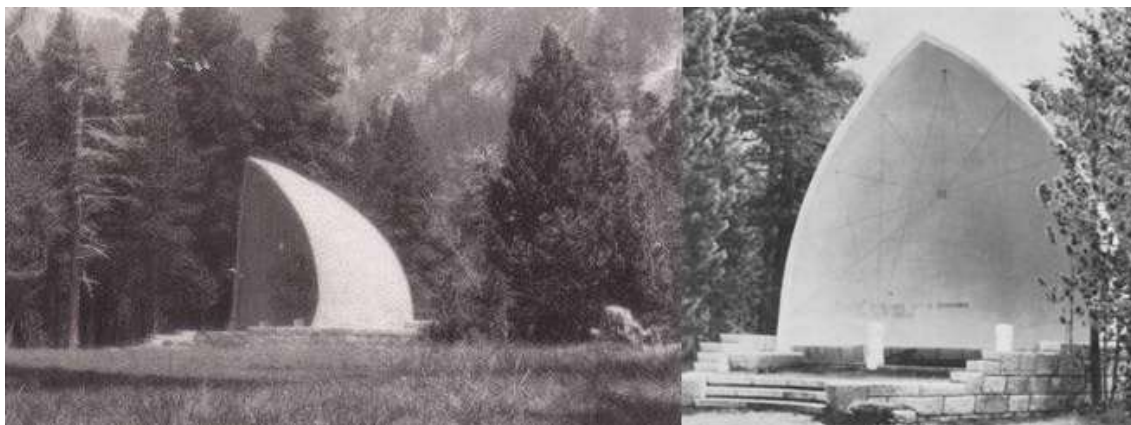


Imagen 25: Eduardo Torroja, Capilla del Sancti Spirit, Lleida, 1953.

Fuente: (<https://structurae.net/structures/chapel-of-the-holy-spirit>)

3.4. FÉLIX CANDELA OUTERIÑO

Félix Candela (Imagen 27) (1910-1997) fue un arquitecto de nacionalidad española y mexicana, famoso por la creación de estructuras basadas en el uso extensivo del paraboloides hiperbólico, forma cuadrática propuesta también, entre otras para la construcción de las

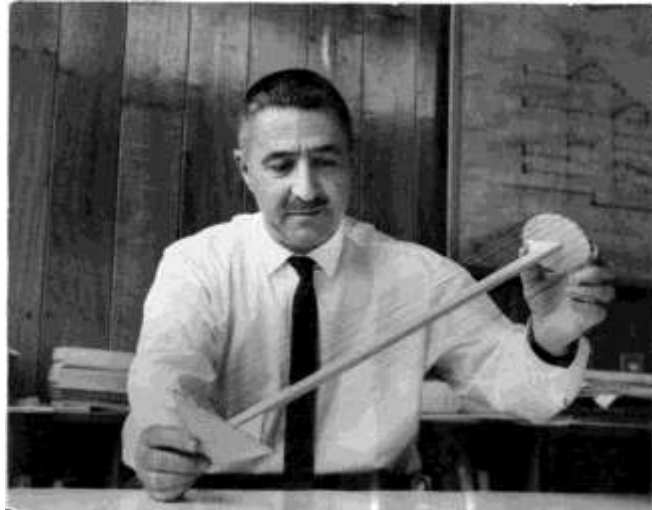


Imagen 27: Félix Candela.

Fuente: (<https://es.wikiarquitectura.com/arquitecto/candela-felix/>)

“conchas” de la Ópera de Sídney. Pese a finalmente no ser usada esta forma, no podemos pasar por alto la influencia de Candela en la arquitectura de Utzon.



Imagen 26: Félix Candela, Capilla de Lomas de Cuernavaca, 1958.

Fuente: (<http://www.diedrica.com/search/label/F%C3%A9lix%20Candela>)

Félix Candela usaba la forma de sus cubiertas como estructura, ya que por la forma de estas no necesitaba de nada más para soportarlas, consiguiendo así unas soluciones sorprendentemente esbeltas, lo que optimizaba mucho la construcción, tanto a nivel de proyecto como a nivel de materiales. Para este arquitecto geometría y estructura eran conceptos relacionados, lo que sirvió de referencia para Utzon, ya no solo en el Palacio de la Ópera, sino que también en otras de sus construcciones.



Imagen 28: Félix Candela, Restaurante Los Manantiales, Mexico DF, 1958.

Fuente: (<https://es.wikiarquitectura.com/edificio/restaurante-los-manantiales/>)

Félix Candela, al igual que Utzon, quería que sus obras fuesen naturales, y que se adaptasen al entorno, por eso esa rotura con la tradición y ese uso de formas orgánicas que podemos observar en las obras de ambos.

Pese a la posibilidad de que Utzon tomase referencia de Candela, este último nunca fue un gran admirador del danés ni de su obra, ya que decía de él que era poco sensato y definido en aspectos técnicos. Debemos recordar que Félix Candela era discípulo de Eduardo Torroja, quien en ese momento era un pionero y uno de los mayores especialistas en cubiertas de hormigón (Luna 2015). La mayor diferencia con Utzon es que estos usaban la geometría de forma

más eficiente, consiguiendo así más esbeltez. Candela fue muy crítico con la obra de Utzon, por los elevados costes que supuso y la cantidad de tiempo invertida para la construcción.



Imagen 29: Félix Candela, Iglesia de Santa Cruz, México, 1967.

Fuente:

(<https://www.tumblr.com/privacy/consent?redirect=http%3A%2F%2Funavidamoderna.tumblr.com%2Fpost%2F88207888502%2Figlesia-de-la-santa-cruz-calle-13-col-aviacion>)

Pese a este hecho, podemos concluir que podemos ver la influencia de Candela, en mayor o menor medida en la obra de Utzon, siendo ambos referentes a nivel mundial de la construcción de cubiertas de hormigón en una época en la que el acero estaba en pleno auge, ya sea por la formas orgánicas que ambos usaban o por la inicial voluntad de Utzon de usar el paraboloid hiperbólico como base para dar forma a sus “conchas”.

3.5. RAFAEL GUASTAVINO MORENO

Rafael Guastavino (Imagen 30) (1842-1908) era un maestro de obras y constructor valenciano que desarrolló la mayor parte de su obra en los Estados Unidos donde difundió su sistema de construcción de bóvedas, la bóveda tabicada de ladrillo plano.

La bóveda tabicada es un tipo de bóveda que se construye normalmente sin cimbra con ladrillos ligeros y yeso rápido, colocándose estos ladrillos pegados de canto con el yeso a la pared, formando algo de curvatura y cerrándose desde los extremos al centro de la habitación para que se vaya creando una forma abovedada que sea auto portante.



Imagen 30: Rafael Guastavino.

Fuente:
(<http://www.theglassroombcn.com/the-glassroom-caracteristicas/rafael-guastavino/>)



Imagen 31: Rafael Gustavino, Oyster Bar, Nueva York, 1913.

Fuente: (https://elpais.com/ccaa/2014/03/27/valencia/1395925234_562602.html)

Si por algo se caracterizaban las bóvedas de Guastavino era por su capacidad de cubrir grandes espacios sin la necesidad de ningún apoyo intermedio. Este hecho fue uno de los que se tomó como referencia para la construcción de la Ópera de Sídney, ya que, en mayor medida tenía que

cumplir el mismo objetivo, cubrir grandes espacios, con formas geométricas cónicas y sin apoyos intermedios que interrumpiesen la visión del público el escenario.



Imagen 32: Rafael Guastavino, Estación de metro del City Hall, Nueva York, 1904.

Fuente: (<https://magazineactivo.wordpress.com/tag/rafael-guastavino/>)

Las bóvedas de Guastavino, no solo no tenían apoyos intermedios, sino que también estaban apoyadas en muy pocos puntos, si lo comparamos con otras estructuras que cubriesen superficies similares. Este hecho también sirvió de ejemplo a Utzon en la proyección de la Ópera, ya que las “conchas” de esta estaban apoyadas en 3 puntos, dos de ellos en la plataforma, y el otro sujetado por las “conchas” contiguas.

Las bóvedas de Guastavino también sirvieron como ejemplo para estudiar la transición de una bóveda a otra, constructivamente hablando, ya que esta transición, de cambios en la dirección de la curvatura, siempre era una zona crítica, y que podría dar serios problemas al proyectista y a los ingenieros. Como podemos ver en las obras de Guastavino, esta unión aparece en incontables ocasiones, ya que va enlazando unas bóvedas con otras usando esta

técnica. Técnica que acabaría usando Utzon en la construcción del Palacio de la Ópera de Sídney.



Imagen 33: Rafael Guastavino, Basílica de la Inmaculada Concepción, Washington DC, 1961.

Fuente: (<http://www.cronoslab.com/guastavino-arquitectura-ny-boveda-history/>)

3.6. OTRAS REFERENCIAS

Pese a que los nombres mencionados anteriormente fueron las referencias más destacables, o más amplias en el trabajo de Utzon, hubo otras, que en mayor o menor medida, también influyeron en su proyecto, de una forma u otra, y también deben ser objeto de análisis.

3.6.1. Eladio Dieste

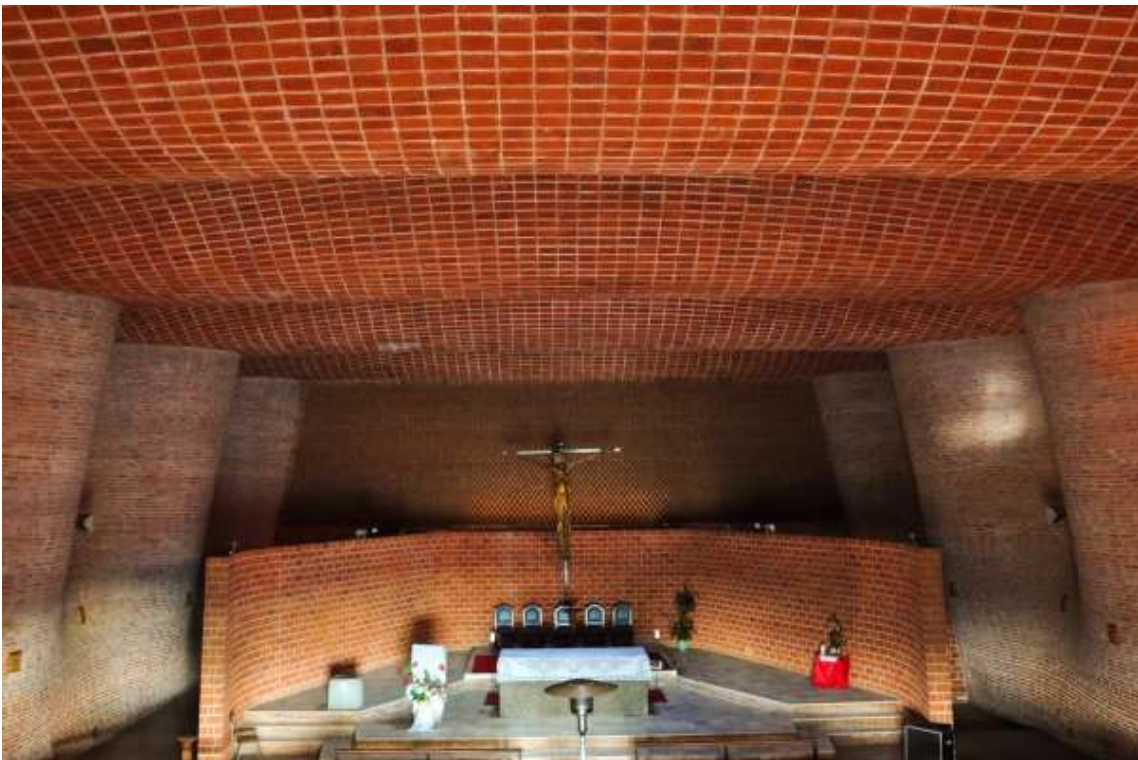


Imagen 34: Eladio Dieste, Iglesia del Cristo Obrero, Uruguay, 1960.

Fuente: (<https://www.plataformaarquitectura.cl/cl/02-98249/clasicos-de-arquitectura-iglesia-del-cristo-obrero-eladio-dieste>)

Eladio Dieste (1917-2000) fue un ingeniero civil uruguayo reconocido mundialmente por el uso de lo que él denominó cerámica armada⁵. El uso de la cerámica abarataba costes en sus obras, y también le hacía ser más ingenioso con la geometría de estas.

⁵ La cerámica armada consiste en la colocación de armaduras de acero por dentro de los ladrillos uniéndolos, lo que nos da un comportamiento similar al hormigón armado.

Este último dato es el que tomó Utzon como referencia, el uso de la geometría para la solución de una estructura que tenía que cubrir una gran superficie. Uno de los mejores ejemplos de este hecho, y a la vez una de las mayores obras de Eladio Dieste es la Iglesia del Cristo Obrero (Imagen 35), situada en Uruguay, donde podemos apreciar el uso magistral de la denominada cerámica armada, junto con la habilidad geometría para conseguir formas más esbeltas, con un material teóricamente más débil que el hormigón.



Imagen 35: Eladio Dieste, Iglesia del Cristo Obrero, Uruguay, 1960.

Fuente: (<https://www.plataformaarquitectura.cl/cl/02-98249/clasicos-de-arquitectura-iglesia-del-cristo-obrero-eladio-dieste>)

3.6.2. Matthew Nowicki

Matthew Nowicki (1910-1950) fue un arquitecto polaco conocido por ser el arquitecto jefe de la ciudad india de Chandigarh. Pese a eso, el motivo, o la obra, por la que Utzon mostró interés fue otra, el Dorton Arena, de Carolina del Norte (Imagen 36). Este edificio destaca por su cubierta, ya que Nowicki usó un paraboloides hiperbólico para darle forma, consiguiendo así una estructura que trabaja con fuerzas axiales puras, permitiéndole tener una cubierta muy esbelta, soportada por cables de acero unidos a los arcos exteriores de hormigón, creando así una obra digna de ver y que a Utzon, geoméricamente hablando le pudo servir de referencia para realizar la estructura e idear la forma que iban a tener sus “conchas” en el Palacio de la Opera.

Este pabellón fue la última obra de Nowicki, inaugurado en 1952, dos años después de su muerte, y representó entre otras el inicio del cambio hacia una arquitectura más orgánica y menos racional, de la que Utzon, junto con otros terminaría por ser uno de sus grandes exponentes.



Imagen 36: Matthew Nowicki, Dorton Arena, Carolina del Norte, 1952.

Fuente: (<https://www.arquitecturayempresa.es/noticia/el-legado-arquitectonico-de-matthew-nowicki-dorton-arena>)



Imagen 37: Matthew Nowicki, Dorton Arena, Carolina del Norte, 1952.

Fuente: (<https://dome.mit.edu/handle/1721.3/32040>)

3.6.3. Monte Albán

El monte Albán (Imagen 38) es un lugar arqueológico situado a 10 km de la ciudad mexicana de Oaxaca de Juárez, capital del estado de Oaxaca. Data del preclásico medio (1500-700 a.C.) y fue la sede del poder dominante de la región en esa época.

Utzon supo de la existencia del monte Albán cuando conoció a Arne Korsmo, un arquitecto modernista noruego con quien visitó México. Cuando vio estas ruinas mayas de la península del Yucatán quedó sumamente sorprendido, sobre todo por esa sensación de encontrarse en una tierra virgen, sin aparente actividad y de repente ver esa gran construcción hecha por el hombre, en medio de esa naturaleza limpia.

Esas sensaciones fueron, en mayor o menor medida, las que Utzon quiso crear con la construcción del Palacio de la Ópera, una gran obra, que rompiese con lo que había a su alrededor, pero sin perder la armonía de la zona. De hecho, en el podio del Palacio, también podemos ver algunas similitudes de forma con estas construcciones mayas, por eso es que podemos afirmar que esta construcción hecha miles de años atrás, sirvió como referencia de una arquitectura moderna e innovadora.



Imagen 38: Monte Albán, México, 1500-700 a.C.

3.6.4. Castillo de Kronborg

El Castillo de Kronborg (Imagen 39) está situado cerca de Elsinor, Dinamarca. Es uno de los cuatro monumentos daneses declarados en 2000 Patrimonio de la Humanidad culturales, junto a la catedral de Roskilde, las runas, túmulos e iglesia de Jelling y el fiordo helado de Ilulissat.

La razón por la que este castillo entra en la lista de referencias no es su arquitectura, que poco tiene en común con la Ópera de Sídney, sino que es su situación. Este castillo está situado en la península de Elsinor de forma que puede ser visto desde casi cualquier punto de la ciudad, lo que se asemejaba a la voluntad de Utzon con su proyecto, el cual está diseñado para ser visto desde varios puntos, y varias distancias. De hecho, ambos están situados en penínsulas, lo que provoca que estén rodeados de agua, y no tengan edificios que los oculten alrededor, dando así la imagen de monumento en el conjunto urbano.



Imagen 39: Castillo de Kronborg, Dinamarca.

Fuente: (<http://footage.framepool.com/es/shot/886434716-castillo-de-kronborg-elsinor-refleccion-solar-mal-clima>)

3.6.5. Arquitectura Oriental

La arquitectura oriental, centrándonos en este caso en la china y en la japonesa, llama la atención por la gran separación que hacen, visualmente hablando entre la plataforma del suelo y las cubiertas. Se dice que esta separación simbolizaba la separación entre cielo y tierra, religiosamente hablando, marcando la altura de un edificio el rango de la persona que vivía en él, siendo más alto, por lo tanto más cercano al cielo el de personas de mayor rango.

Fuera del simbolismo religioso, Utzon tomó como ejemplo esta separación entre cubierta y plataforma. Adoptando formas diferentes, más acordes con su arquitectura, podemos apreciar esa misma diferencia, entre lo que es el podio del Palacio y lo que es la estructura de la cubierta, tanto en forma, como en color, como en estructura.



Imagen 40: Construcción oriental, Japón.

Fuente: (<https://arrarte5n.wordpress.com/asia/arquitectura-japonesa/>)

4. CONSTRUCCIÓN DEL PALACIO

“Hemos vuelto una y otra vez al estudio de estos dibujos y estamos convencidos de que presentan el concepto de un teatro de la ópera que es capaz de convertirse en uno de los grandes edificios del mundo... Por su originalidad, es claramente un diseño controvertido. Sin embargo, estamos absolutamente convencidos de sus méritos.”(Nutt, John 2013, p. 105)⁶.

Los jueces ponen su reputación en juego al seleccionar un diseño atrevido y embrionario de un arquitecto joven y desconocido. Entendieron y pronosticaron parte de la historia accidentada que experimentarían el arquitecto y él. Reconocieron que Utzon fue tocado por los dioses (Nutt, John 2013, p. 105). El legado de ese concurso todavía está con nosotros, ya que fue una lucha titánica. Es la imagen típica de Sídney y un icono muy querido por la gente.

La propuesta inicial mostraba formas de techo que eran líricas y hermosas (Nutt, John 2013, p. 105). Era un edificio escultural, elegante en apariencia y digno de contemplar. Las formas del techo se describieron en su momento como poesía, formas que nunca antes se habían construido. Rompieron todas las reglas de ingeniería del diseño de cubiertas. Ove Arup diría más tarde: *“Utzon era un genio, probablemente el mejor arquitecto con el que he trabajado”* (Nutt, John 2013, p. 105).

La arquitectura y sus componentes (arte, función y tecnología) unen al arquitecto y al ingeniero justo al comienzo de un edificio ya que, sin una estrecha relación, es imposible alcanzar la grandeza y los objetivos estipulados. El arte refleja la cultura y el alma de una sociedad y, concretamente en arquitectura se debe reforzar el propósito del edificio sin comprometerlo constructiva y estructuralmente. La tecnología es la entrega de habilidades

⁶ Jurado del concurso realizado en Sídney en 1956.

científicas que amplía los conocimientos del pasado y brinda fortaleza, seguridad y una función adecuada (Nutt, John 2013, p. 106).

En las primeras etapas de un edificio, las herramientas del arquitecto se hacen evidentes aunque estas son frágiles. El arquitecto tiene que persuadir y crear visiones, todo dentro de los límites de una función satisfactoria. El ingeniero tiene herramientas más robustas, analiza y determina (Nutt, John 2013, p. 106). Él usa la ciencia e innova basándose siempre en el juicio de experiencias pasadas. Estos dos hechos provocan la necesidad anteriormente mencionada del buen entendimiento entre arquitecto e ingeniero para llevar a cabo un proyecto exitoso y satisfactorio, y más aún cuando este tiene el nivel de dificultad y requiere un nivel de conocimiento tan considerable como el Palacio de la Opera de Sídney.

Este proyecto se pudo realizar por dos hechos fundamentales. El primero fue la temprana llegada de Utzon a Sídney tras conocer el resultado del concurso, para así defender lo máximo posible su innovadora y arriesgada idea inicial. El segundo, y no menos importante, fue el apoyo de los ingenieros y la firme creencia de que este proyecto podía ser posible constructivamente hablando, ya que si estos no hubiesen llegado a esta conclusión es muy probable que el cliente⁷ no hubiese autorizado la construcción del Palacio (Nutt, John 2013, p. 106).

En cualquier edificio, la mayor facilidad de colaboración proviene de la relación de simpatía y respeto que el arquitecto, el ingeniero y el cliente sienten por sus iguales. Pero en el Palacio de la Opera de Sídney no había tiempo político para resolver todos los problemas pendientes que pudiesen haber, debía iniciarse la construcción antes de las siguientes elecciones, se debía firmar un contrato para las cimentaciones y la subestructura, y el trabajo tenía que

⁷ El gobierno de Nueva Gales del Sur.

comenzarse para evitar que un posible cambio de gobierno retrasase todo (Nutt, John, 2013 p. 106). Arquitecto, ingeniero y cliente estaban unidos el uno al otro para comenzar cuanto antes el levantamiento de este proyecto.

La solución de Utzon rompió las reglas del concurso. La originalidad de la planificación estaba en la disposición de las dos salas en el emplazamiento. Fueron colocados una al lado de la otra para que los patrones pasaran a ambos lados del escenario para llegar a la sala de audiencias, y los vestíbulos estaban ubicados en la punta de Bennelong Point, donde el puerto se podía ver a intervalos. Esto fue brillante, pero hubo modificaciones, no hubo etapas laterales convencionales y la huella se extendió más allá del límite del emplazamiento, ya que terminó por ser más ancho de lo inicialmente estipulado (Nutt, John 2013, p. 106).

Los dibujos presentados por Utzon expresaron el techo como una escultura que refleja las funciones internas de los pasillos, las “conchas” más grandes se ubicaban sobre las torres de escenario, las “conchas” más pequeñas sobre los vestíbulos y auditorios. Fue un diseño de gran complejidad ingenieril.



Imagen 41: Ove Arup (derecha) y Jørn Utzon (izquierda).

Fuente: (<https://artsandculture.google.com/exhibit/eAJCBmWIGlz0lw>)

Utzon conoció a Ove Arup en Londres (Imagen 41) poco después de que se anunciara el resultado del concurso y en marzo de 1957 llegaron a un acuerdo de colaboración. Hasta ese momento ningún ingeniero había trabajado en el diseño de Utzon. Arup era un ingeniero de consultoría que se había convertido en el ingeniero arquitectónico más destacado de Europa. Era un ingeniero poco común porque amaba el arte, la arquitectura y la filosofía, pero era un ingeniero civil que había trabajado la mayor parte de su vida con un contratista, gran parte de él en estructuras marinas. Él entendió cómo construir esta obra nunca vista. También era danés, y su empresa tenía una reputación para el diseño de estructuras de “concha” en el que uno de los socios de Arup, Ronald Jenkins, era una autoridad mundial (Nutt, John 2013, p. 106). Juntos habían construido algunas de las “conchas” modernas más grandes de Europa, y tenían un conocimiento teórico excepcional de su comportamiento, lo cual podía resultar sumamente útil para llevar a cabo esta innovadora propuesta.

La empresa había establecido su reputación en el campo de la construcción de la construcción de “conchas” cuando, en 1947, un año después de su fundación, Ove Arup & Partners publicó en privado el libro de Jenkins, *Theory and design of cylindrical shell structures* (“Teoría y diseño de estructuras de conchas cilíndricas”). En muchos sentidos, se adelantó a su tiempo, utilizando álgebra de matrices para manejar el análisis complejo de una manera sistemática (Nutt, John 2013, p. 106). Las matemáticas matriciales subrayan todos los análisis estructurales realizados por el ordenador, sin embargo, el libro de Jenkins se adelantó un año a la invención del ordenador electrónico. La escasez de acero en la posguerra y la disponibilidad del hormigón crearon muchas oportunidades, y las estructuras de “conchas” se hicieron arquitectónicamente populares.

El análisis de las estructuras de “concha” comienza con la geometría. Las fuerzas externas son resistidas por tensiones internas dentro del grosor de la “concha”, “fuerzas de membrana” como se les llama (Nutt, John 2013, p. 106).

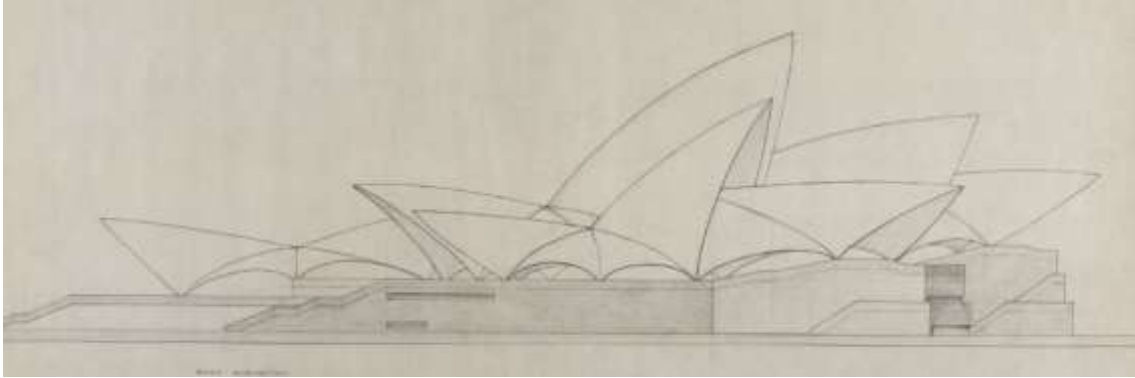


Imagen 42: dibujo de una vista general presentado a concurso por Utzon.

Fuente: (<https://www.sydneyoperahouse.com/our-story/sydney-opera-house-history/the-competition.html>)

Una definición matemática de la geometría es el primer paso en el diseño de ingeniería. Las “conchas” más simples son aquellas con curvatura uniforme, como bóvedas cilíndricas o cúpulas esféricas. Las “conchas” originales de la Ópera de Sídney no se correspondían a ninguna de estas soluciones. El esquema de Utzon (Imagen 42) presentaba enormes problemas. Se llegó a debatir la posibilidad de no conseguir construir dichas estructuras. Las “conchas” convergían a puntos en los soportes, concentrando las fuerzas de una manera indeseable. Las crestas tenían discontinuidades agudas de superficie. Las curvaturas cerca de los soportes causaban problemas enormes que no se resolvieron hasta bien avanzado el diseño. Cada “concha” tenía que estar vinculada a su vecina para lograr la estabilidad general.

Arup y Jenkins consideraron un cambio radical de forma y material. Se planteó como alternativa una estructura con armaduras de acero. Sin embargo, reconocieron que la integridad arquitectónica del diseño se habría visto comprometida y comprometieron a la empresa a tomar las valientes decisiones de hacer que el plan funcionase. Ese hecho hizo necesarios algunos cambios en lo que Utzon había dibujado. Por ejemplo, la “concha” norte de cada sala solo se

apoyaba en dos puntos, y se tuvo que detener para que no cayera hacia afuera. Se introdujeron muros de celosía estructural para conectar esta concha a otras del grupo para proporcionar estabilidad. Las curvaturas de la superficie de las “conchas” eran pequeñas, por lo que las costillas rígidas debían introducirse en el interior de las superficies (Nutt, John 2013, p. 107). Esta propuesta más tarde se convertiría en la instalación de membranas “gemelas” para proporcionar la fuerza necesaria. La verticalidad indeseable de los estrechos puntos de salto se mantuvo. Esta propuesta forzó que la línea de empuje de las fuerzas internas fuese del grosor de la “concha” y provocó enormes momentos de flexión, pero la implicación de la “concha” era demasiado grande como para contemplar la posibilidad de realizarla (Nutt, John 2013, p. 107).

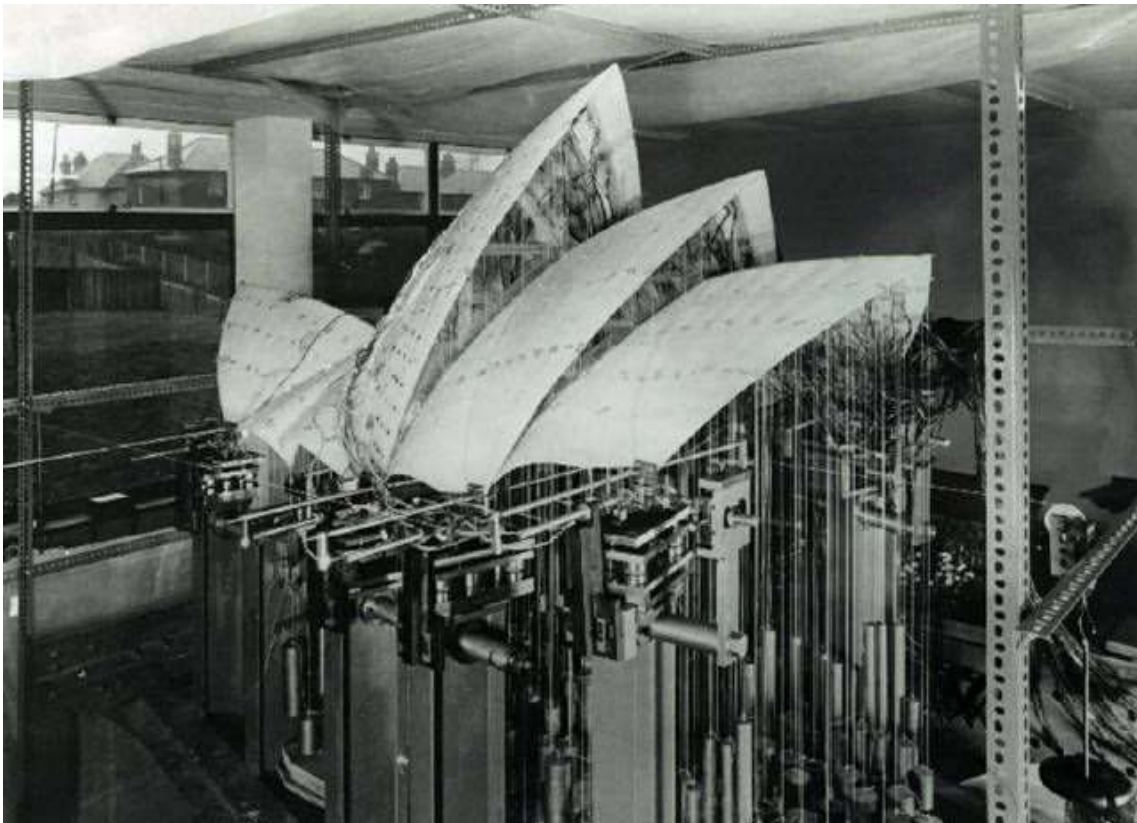


Imagen 43: prueba de carga en el modelo de plexiglás.

Fuente: (<https://www.pinterest.com/pin/507640189242321766/>)

El esquema estructural inicial de Arup y Jenkins para las “conchas”, y la geometría en la que se basaba, definían los parámetros del análisis estructural. Las cargas de viento se midieron en la prueba del túnel de viento. Las cargas y las combinaciones de cargas se calcularon para definir los parámetros de diseño: peso propio, viento, temperatura, cubiertas interiores, paredes de vidrio, etc. Se sometió a prueba un modelo de plexiglás en el laboratorio y se registró la salida de 1000 medidores de tensión para construir una imagen aproximada de las tensiones dentro de las “conchas” y las cargas sobre los cimientos (Imagen 43).

La asignación de las prioridades arquitectónicas y de ingeniería en una etapa temprana de un concepto es fundamental para el resultado y se basa en el juicio y en cualquier cálculo de ingeniería que se pueda llevar a cabo (Nutt, John 2013, p. 108). En la Ópera de Sídney, la tarea fue difícil porque ningún cálculo anteriormente realizado era apropiado. Sin embargo, demasiado análisis preliminar de alternativas retrasa el programa, cualquier pequeño cambio expone la solución elegida a grandes modificaciones posteriores. Cuanto más compleja es la solución, más difícil es formular un juicio (Nutt, John 2013, p. 108).

Durante la fase de desarrollo del diseño, el arquitecto y el ingeniero trabajan en estrecha colaboración para comprender sus problemas mutuos. La estricta adherencia a la intención e idea arquitectónicas puede resultar en una estructura “no construable”. La ingeniería más realista puede “degradar” el concepto del arquitecto, ya que sobre el papel puede haber diseños realmente muy buenos, pero al quererlos realizar resultan imposibles (Nutt, John 2013, p. 108). La dependencia y el apoyo mutuos deben ser tales que la integración del diseño haga que sea imposible separar las contribuciones de cada uno (Nutt, John 2013, p. 108). Una medida del éxito es esta colaboración y no basarse el hecho de quién hizo qué. Ahí reside el hecho fundamental en la relación entre

arquitectura e ingeniería, el conocimiento de que alcanzar el éxito por separado es tarea imposible (Nutt, John 2013, p. 108).

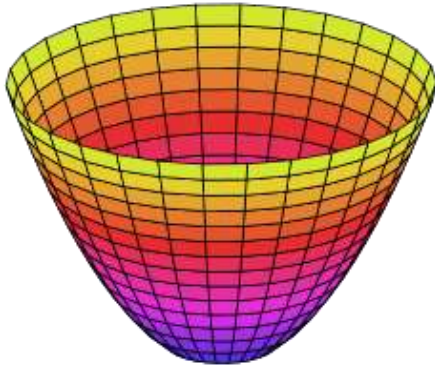


Imagen 44: paraboloides.

Para fines de diseño, las formas libres presentadas a concurso requirieron de una geometría matemática definitoria basada en los puntos clave de la estructura: la forma de las crestas, los puntos altos y cumbres, las lima hoyas de la línea del techo y las posiciones de los soportes (Nutt, John 2013, p. 108). Las curvaturas

bidireccionales requeridas para la resistencia de la “concha” condujeron a las formas basadas en superficies de revolución usando secciones cónicas, como son los paraboloides, elipsoides, hiperboloides... las cuales han sido estudiadas desde tiempos inmemoriales. Todas estas formas se basan en superficies definidas por rotación o traslación de un círculo alrededor o a lo largo de un eje. En 1958, se propuso el paraboloides (Imagen 44) como geometría inicial, ya que se percibía que proporcionaba el mejor ajuste con las formas presentadas por Utzon. En geometrías posteriores, el elipsoide (Imagen 45) se convirtió en la forma preferida, ya que a priori daba menos problemas para calcular la estructura.

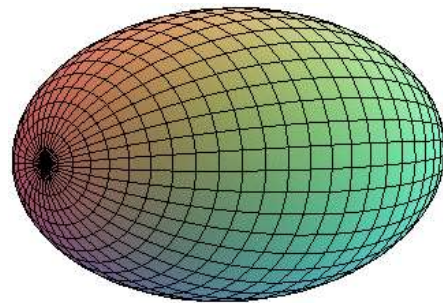


Imagen 45: elipsoide.

El análisis de la cubierta realizado durante los siguientes tres años mostró que todas las predicciones iniciales de los ingenieros eran optimistas. En la lucha por mantener la intención arquitectónica, la forma se volvió más complicada. El sistema estaba "mal condicionado", en el sentido de que un cambio introducido para fortalecer una parte exageraba de manera inesperada

las tensiones en otra. Cada cambio requirió un largo análisis. Se estudiaron unos 12 esquemas y la solución de “conchas” se desarrolló hasta cierto punto antes de que se seleccionara un concepto estructural final (Nutt, John 2013, p. 111).



Imagen 46: detalle de un punto de unión de vigas de la estructura de la cubierta.

Fuente: (<http://meteek.com/next-event-presentation-building-sydney-opera-house/>)

Mientras tanto, el arquitecto estaba desarrollando sus diseños, consultando con el cliente y los otros consultores principales (acústica, diseño de teatro, servicios de construcción, comportamiento y control del público, etc.) para definir las funciones del edificio, la planificación y el diseño arquitectónico de los componentes principales de la Ópera. El hormigón in-situ es difícil de construir con acabados de alta calidad, ya que estos dependen de la mano de obra, y los errores de textura superficial aparecen como imperfecciones significativas que no se pueden corregir. Además, las paredes de vidrio que rodeaban los extremos del techo estaban destinadas a colgarse de la parte inferior de las “conchas” (Nutt, John 2013, p. 111) . Utzon no estaba satisfecho

con este detalle, ya que la superficie lisa de la parte inferior del techo no proporcionaba un lugar lógico para el soporte y a parte se perdía la visión de la estructura, ya que era una propuesta arquitectónica muy atractiva de observar. Los últimos esquemas de la cubierta proporcionaron una solución al doblar la fina capa de hormigón en una serie de nervaduras triangulares cuyo origen estaba en los pedestales (Imagen 46), obteniendo así una mayor rigidez y capacidad de flexión.

La cuestión de la calidad de los acabados del hormigón se mantuvo, y preocupaba en gran medida a Utzon. Solo en una fábrica esa calidad podía controlarse y rechazarse si era necesario. Pero eso requería prefabricar elementos individuales y llevarlos al aire, teniendo, estas formas complicadas y en una escala nunca antes construida (Nutt, John 2013, p. 111).



Imagen 47: representación de la similitud entre la idea de Utzon y los gajos de una naranja.

Fuente: (http://www.technologystudent.com/prddes_2/nature1.html)

La producción en fábrica requería una alta repetición de elementos, y los segmentos tendrían que provenir de los mismos moldes. Mientras que la geometría elipsoidal de las “conchas”, luego bajo análisis estructural, podría haber producido tal repetición, el arquitecto cambió las formas de la estructura y desarrolló una geometría esférica para cumplir con este requerimiento (Nutt, John 2013, p. 111). La apariencia del techo de forma libre se reprodujo, pero la curvatura en toda la cubierta pasó a ser constante. Cada sección transversal de una esfera es un círculo, cuya regularidad se refleja en la apariencia y los detalles de las “conchas”. Este cambio de forma tuvo consecuencias importantes: los volúmenes internos de los auditorios se redujeron, y su ancho fue menor, lo que redujo el número de asientos en los pasillos. Solo el arquitecto pudo tomar una decisión tan arriesgada y con tantos cambios visuales y funcionales. El proceso de selección se ha relacionado muchas veces en la famosa historia de la naranja de Utzon, a quien se le ocurrió usar la forma esférica al pelar una naranja y observar sus gajos y sus uniones (Murray 2004) (Ryan 2001) (Imagen 47). Naturalmente, esta historia no tiene base científica, es solo una anécdota de un arquitecto fuera de lo común.

Los cambios de diseño arquitectónico propuestos por Utzon fueron valientemente apoyados por Ove Arup. Con esos cambios, la dirección de ingeniería del equipo de Arup cambió y Jack Zunz, un sudafricano que había establecido la oficina de Arup en Johannesburgo una década antes pasó a ocupar este puesto. Era un líder brillante y carismático con una confianza firmemente anclada en una habilidad de ingeniería innovadora fundada en un profundo conocimiento técnico y una actitud creativa (Nutt, John 2013, p. 111).

La estructura adoptada no era una “concha”, sino una estructura de costillas interconectadas, cuyos segmentos se producían en fábrica y se unían en el aire. Cada segmento era de un tamaño que solo podía manejarse con grúa. Era una solución nunca antes adoptada. Los perfiles cambiantes de las costillas,

siendo perfiles alargados en la base y convirtiéndose en perfiles triangulares a medida que se acercan a la cresta de la estructura, se convirtieron en el tema arquitectónico del techo.

El techo de cada sala está formado por la compleja interconexión de numerosas superficies, todas ellas basadas en una esfera de 75 m de radio. Cada techo consta de dos tipos de componentes principales, “conchas” principales y “conchas” laterales. Hay tres unidades estructurales principales que comprenden cada techo. Una unidad está formada por un par de capas principales y una capa lateral que encierra el espacio entre las dos capas principales. La unión entre las capas laterales y principal está formada por grandes arcos que están reforzados por las vigas de la cubierta lateral, de modo que la subestructura de la cubierta lateral se convierte en una pirámide rígida. Las “conchas” principales son soportadas por parejas en dicha pirámide estructural (Nutt, John 2013, p. 112).



Imagen 48: imagen aérea del podio cuando aún no se había comenzado la cubierta.

Fuente: (<https://archidose.blogspot.com/2008/12/today-archidose-275.html>)

La forma esférica de las “conchas” principales está formada por nervios definidos por las líneas de longitud de una esfera, todas irradiando desde un punto cerca del soporte de la “concha”. Estas nervaduras tienen secciones transversales que varían a lo largo de su longitud, pero dado que el ángulo entre vigas es constante (3,65 grados), la sección transversal de todas ellas a la misma distancia del punto de irradiación es la misma (Nutt, John 2013, p. 112).

La construcción de la estructura del podio, fue difícil debido a su inicio temprano en 1959. Hubo constantes cambios de diseño a medida que se desarrollaron las funciones del edificio y la estructura del techo. Las fundaciones y la estructura de aproximadamente 1000 salas, incluidos teatros, salas y vestíbulos públicos, se construyeron como parte de la primera etapa de construcción del edificio.



Imagen 49: detalle de las vigas que soportan el podio, donde se aprecia la forma, la luz y como estas son dobladas.

Fuente: (<https://artsandculture.google.com/asset/sydney-opera-house-construction-stage-one-2/bwFmyXiqTGi5rw>)

Visualmente, una parte importante del podio eran sus vigas de hormigón sobre la entrada de vehículos. Para los ingenieros fueron una característica notable e innovadora (Imagen 49). Se requería que cubriesen 49,4 metros y sus voladizos tenían forma y se doblaban como los cascos de los barcos. Para evitar la necesidad de columnas intermedias, se utilizó una técnica conocida como hormigón pretensado⁸ (Nutt, John 2013, p. 115).

Las vigas de la explanada fueron un ejemplo temprano del uso del hormigón pretensado en Australia e introdujeron una serie de características innovadoras, incluidos los cables de acero de alta resistencia y el uso del "arrastre de buques"⁹ para reducir los efectos de la fluencia a largo plazo¹⁰ (Nutt, John 2013, p. 115). Luego se adoptó el hormigón pretensado para el techo del Palacio de la Ópera, donde se tuvieron que desarrollar varias técnicas nuevas para resolver los complejos problemas de construcción de la estructura, la mayoría de los cuales se utilizaron posteriormente de forma notable en la construcción de puentes.

Si el podio era rutinario y convencional, el techo, construido entre 1963 y 1967, por el contrario era original e innovador. Dos de los motivos fundamentales de sus construcciones exitosas fueron el nombramiento del contratista y el tipo de contrato empleado. La firma australiana MR Honibrook fue seleccionada y nombrada con un contrato de "*cost plus fixed fee*"¹¹. El director del proyecto asignado al trabajo, Corbet Gore, era innovador y experimentado. Se convirtió en una leyenda en Arup y fue calificado por ellos como uno de los mejores ingenieros de construcción en el mundo (Nutt, John 2013, p. 115).

⁸ Técnica desarrollada por el ingeniero francés Eugene Freyssinet en la década de 1920, que consiste en traccionar las armaduras de acero del hormigón armado antes de aplicar las cargas a las que debe ser sometido, dándole así un mejor comportamiento estructural a flexión.

⁹ *Ship-jacking*.

¹⁰ Las embarcaciones se usan en la industria de construcciones marítimas para arrastrar embarcaciones fueron adaptadas en la Casa de la Ópera para mover los soportes de las vigas de la explanada al empujar contra un pilar fijo y así mantener la compresión diseñada en las vigas.

¹¹ Contrato en el que se estipulan unos honorarios fijos independientes del coste de la construcción.



Imagen 50: transporte de una de las múltiples piezas prefabricadas antes de ser colocada en la obra.

Fuente: (<https://www.businessinsider.com.au/incredible-photos-of-the-sydney-opera-house-construction-shows-australias-greatest-building-as-youve-never-seen-it-before-2013-10>)

Jack Zunz tomó dos decisiones fundamentales para asegurar el éxito de la construcción. El primero fue traer a los constructores temprano para que pudieran influir en el diseño, con los diseñadores y constructores trabajando en estrecha colaboración para desarrollar la estrategia de construcción. Por ejemplo, fue idea de Gore pegar las unidades prefabricadas, y el diseño fue adaptado para incorporarlo. Para proporcionar resistencia longitudinal a las costillas, y unir los segmentos de estas, se usaron cables post-tensionados, algunos de los cuales fueron adaptadas por Hornibrook para proporcionar la fuerza de erección temporal (Nutt, John 2013, p. 116). Fue otra demostración de la enorme contribución e ingenio del constructor, y el resultado fructífero de la estrecha cooperación entre las estrategias de diseño y construcción.

La segunda decisión de Zunz fue enviar al núcleo del equipo de diseño a Australia para que contara con ingenieros expertos que pudieran resolver los posibles problemas e imprevistos que ocurren de forma inevitable en proyectos

de ese tamaño. Sabía que era poco probable la posibilidad de que el contratista asumiera la responsabilidad de la estabilidad de la estructura en su estado parcialmente completado.

Los segmentos prefabricados fueron producidos en una fábrica en Sídney. Debido a la geometría esférica, todos los segmentos de la “concha” principal podrían tomarse del mismo molde. Cerca del resorte, cada costilla tiene una sección en forma de T de 1.200 mm de canto y 400 mm de ancho que se extiende a una sección en forma de Y de 2133 mm de canto por 3660 mm de ancho en la parte superior de la costilla más larga, con refuerzo ligero de hormigón

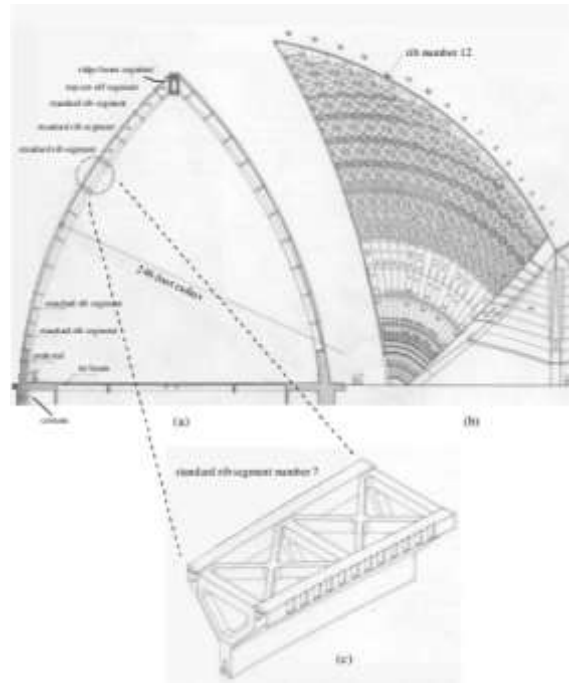


Imagen 51: detalle de una "concha" y su estructura, mostrando la idea de sección variable en sus vigas.

Fuente:

(<https://www.slideshare.net/MAAgingcunningham/jmm-mini4-sydney-opera-house-part-2>)

armado entre los brazos de la Y, y con bandas de 63 mm de espesor formando los lados (Nutt, John 2013, p. 116) (Imagen 51). Varían en detalle para reflejar el cambio de longitud, ubicación y fuerzas que se aplicaron a las costillas individuales, sin embargo, los moldes, que eran costosos, eran los mismos para todas las costillas. En las uniones irregulares entre esferas, no existía tal lógica. Cada segmento era diferente, y se idearon ingeniosos moldes para adaptarse a las variaciones sin destruir la repetición (Nutt, John 2013, p. 116). Los segmentos principales de la “concha” se fundieron con las caras correspondientes para que pudieran pegarse con resina epoxi. Esta fue una de las primeras aplicaciones de esta técnica en el mundo y tuvo que no solo ser

pionera sino que también ser aplicada in-situ (Nutt, John 2013, p. 116). Había límites en el peso de los segmentos, y las grúas más grandes del mundo se compraron para la tarea de levantarlas en su posición.



Imagen 52: estructura empleada para soportar las cubiertas durante el proceso de construcción.

Fuente: (<http://www.galvanizedrebar.com/project/sydney-opera-house/>)

Hornibrook también ideó un arco de erección móvil para que se pueda prescindir de los andamios (Imagen 52). La cimbra usada era común en la construcción de puentes, pero la complejidad de la configuración de los techos del Palacio de la Ópera requería un sistema como ningún otro. El arco de erección comprendía un entramado de celosía de acero, curvado con la misma forma que las costillas del techo, que debía ser telescópico y poder torcerse, ya que las costillas eran de longitud variable y cada mitad estaba en un plano diferente. El desarrollo del diseño llevó 18 meses y se hicieron pruebas antes de

la instalación. Se usaron cuatro al mismo tiempo, y el ahorro en costes y tiempo frente a las alternativas fue muy considerable.



Imagen 53: manipulación y transporte de una de las piezas prefabricadas de la estructura.

Fuente: (<http://davidmoorephotography.com.au/sydney-opera-house/>)

Cada segmento de costilla fue levantado por una grúa y maniobrado en posición entre el arco de erección y la costilla anterior. Se hizo hincapié en los segmentos inferiores con cables tensionados, utilizando un sistema de elevación inteligente desarrollado en Canadá específicamente para este propósito (Nutt, John 2013, p. 117). La conexión entre unidades en el aire fue difícil debido a la flexibilidad de los soportes. Se diseñó un método de control por levantamiento y medición de carga para evitar el sobreesfuerzo de las costillas. Las cargas se controlaron mediante tomas entre soportes temporales y se establecieron valores predeterminados. Una vez que se erigió una costilla individual, se introdujeron cables longitudinales adicionales en los conductos y se tensaron. Antes de desmontar, la costilla estaba atornillada a su costilla adyacente ya terminada a través de rodamientos de baja fricción (Nutt, John 2013, p. 117). En

última instancia, se introdujeron y tensaron los cables laterales para dar una fuerza bidireccional. En cada etapa de la erección, el equipo de diseño controló las fuerzas en los proyectiles parcialmente erigidos, midiendo las fuerzas en lugares críticos y levantando o soltando las fuerzas de acuerdo con cálculos predeterminados. El arco de erección, luego de todo este proceso, se movió a su posición definitiva.

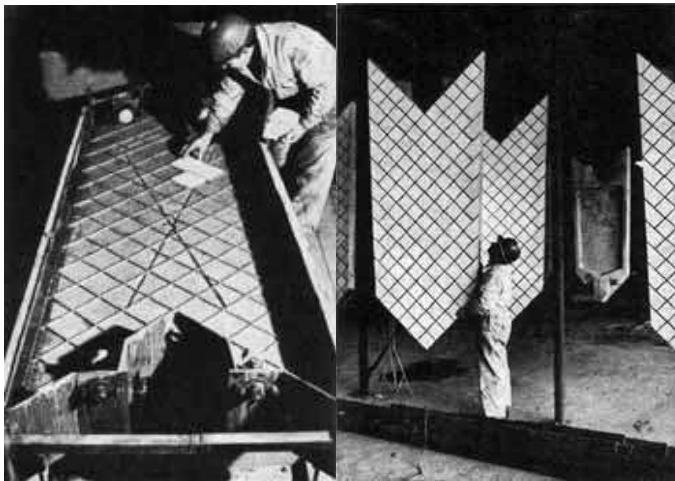


Imagen 55: construcción de las baldosas en fábrica.

Fuentes: (<https://www.sydneycloseup.com/sydney-opera-house-construction/>), (<https://www.sydneycloseup.com/sydney-opera-house-construction/>)

podrían atornillarse a la estructura (Imagen 55). Utzon pasó tres años desarrollando las baldosas con Höganäs, un fabricante sueco. Se llevaron a cabo pruebas exhaustivas para garantizar la durabilidad y la consistencia. Las baldosas estándar tienen un grosor de 120 mm por 10 mm. Se produjeron ocho tipos diferentes de baldosas de borde de forma irregular para evitar cortes in-situ. Se

Para cubrir la superficie de las “conchas” inicialmente se pensó que las baldosas se aplicarían in-situ, pero el cambio a una estructura acanalada y la dificultad de alcanzar una calidad tan alta en el aire llevaron a la adopción de “tapas” de baldosas fabricadas en fábrica que



Imagen 54: detalle de las baldosas colocadas donde se aprecia la diferencia de brillo entre las internas y las externas.

Fuente: (<https://www.sydneyoperahouse.com/our-story/sydney-opera-house-history/spherical-solution.html>)

produjeron un millón de piezas aproximadamente para cubrir todo el techo (Nutt, John 2013, p. 118).

Los arreglos de las piezas principales de las baldosas enfatizaron la geometría esférica. Hay 3646 piezas de baldosa y las baldosas están dispuestas en una cuadrícula que adapta con la forma de la cubierta, con baldosas mate en el lado exterior y baldosas acristaladas estándar en el interior de la estructura (Nutt, John 2013, p. 118) (Imagen 54). El tamaño de las baldosas variaba hasta 3500 por 3810 mm. Se usaron otras 600 baldosas de otras formas para cubrir las capas laterales y las superficies curvadas de transición en las uniones entre las cubiertas principales y laterales. Las baldosas tenían de media 44,5 mm de grosor en general, reforzadas con nervios de 150 mm. Las baldosas eran compuestas, revestidas con azulejos y respaldadas por una capa de "ferrocemento" de aproximadamente 30 mm de espesor, que se fundían en una sola pieza (Nutt, John 2013, p. 118).



Imagen 56: instalación de las baldosas sobre la cubierta.

Fuente: (<https://www.arch2o.com/sydney-opera-house-conservation-takes-a-new-turn-towards-robotics/opera-sydney-construction-01/>)

La fijación de las baldosas sobre una superficie esférica o doblada, como el techo del Palacio de la Ópera, con gran precisión, no tenía precedentes: en la mayoría de los edificios, las superficies planas o las superficies curvas simples



Imagen 57: cubierta terminada donde se puede ver el efecto de la luz sobre esta.

permiten una alineación precisa. Aquí, la solución al problema residía en el uso de sofisticadas técnicas de levantamiento diseñadas para esta tarea, junto con soportes de fijación versátiles y ajustables. Las baldosas se colocaron con una precisión de 3 mm (Imagen 56).

El resultado es deslumbrante: la precisión de las uniones, la alineación de las superficies esféricas, la fiabilidad de la impermeabilización, la unidad visual de las superficies reflectantes, crean un gran impacto visual que proporciona la visión de Utzon (Imagen 57). La excelencia sin límites de la construcción demuestra que los ingenieros y constructores buscaron y encontraron el objetivo de la perfección arquitectónica (Nutt, John 2013, p. 118).

Los conceptos y las formas de las paredes de vidrio cambiaron con el cambio de arquitectos después de la partida de Utzon. Los muros norte y sur cierran los extremos de los pasillos y se cuelgan del techo. Las partes superiores tenían que ajustarse a la parte inferior de las cubiertas del techo, y estar sostenidas por una de las costillas principales de la estructura. Los fondos tenían que apoyarse en los bordes de la estructura del podio, que se estableció en una geometría diferente. Los requisitos de seguridad exigían un vidrio que no se rompiera ni cayese bajo impacto, y las superficies debían ser impermeables (Nutt, John 2013, p. 118). Debido a la complejidad de los

problemas, no era apropiado un sistema de acristalamiento tradicional, por lo que un nuevo sistema debía diseñarse desde cero. Se inició un intenso programa de investigación, y dos jóvenes ingenieros de Arup, David Croft y John Hooper, bajo la dirección de Bob Kelman, constituyeron el equipo.



Imagen 58: muro de vidrio donde se pueden ver los parteluces a los que iban ancladas las fijaciones de las piezas de este.

Fuente:

(https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Foyer_of_Opera_Theatre,_Sydney_Opera_House,_jiron,_03.12.2010.jpg)

El principio básico era apoyar cada hoja de vidrio a lo largo de los dos lados verticales mediante barras de acristalamiento, con los extremos superior e inferior rellenos con sellador de silicona. Estas barras eran de bronce y manganeso y en su estándar consistían en una sección en T con una pieza de cobertura atornillada después del posicionamiento final del vidrio (Imagen 59). Las barras de acristalamiento se unieron a parteluces de acero mediante un soporte de fijación ajustable (Imagen 58).

El vidrio seleccionado para este proyecto fue el vidrio laminado, que en ese momento nunca se había utilizado en edificios de tal envergadura, o para tal fin. Se estableció contacto con todos los fabricantes de vidrio del mundo y se inició un intenso programa de investigación. Los principales problemas fueron la erosión y la “deslaminación”, la resistencia a la flexión de la sección laminada, la deflexión a largo plazo bajo carga sostenida y la resistencia a la fatiga (Nutt, John 2013, p. 121).



Imagen 59: detalle de las piezas de fijación del vidrio.

Fuente: (<http://www.sohglasswalls.com/hs/p35.htm>)

Para estudiar estos fenómenos se realizaron pruebas a gran escala. Boussois Souchon Neuvesal en Francia fue designado como el fabricante. El encargo consistía en una capa de vidrio transparente o flotado y una capa de 6 mm de vidrio tintado separado por una capa intermedia de 0.76 mm de polivinil butilo transparente, dando un grosor normal total de 18.8 mm o 20.8 mm donde los tramos de vidrio eran más grandes (Nutt, John 2013, p. 121).

Al mismo tiempo, Croft estaba diseñando las paredes: la estructura, la geometría, las fijaciones, los soportes y los tamaños de vidrio. Las complicaciones geométricas surgieron debido a que el vidrio estaba en ángulos constantemente variables con respecto al plano de los parteluces, y la mayoría de las láminas tuvieron que ser cortadas de espacios en blanco rectangulares a formas trapezoidales con gran precisión (Nutt, John 2013, p. 121).

Brevemente, debido a que cada pieza de vidrio tenía que ser plana y no podía retorcerse, la geometría de las paredes tenía que ser de formas cónicas. La parte superior de la pared norte refleja la proyección horizontal de la nervadura esférica y es un cilindro elíptico, mientras que las dos partes inferiores son cónicas, y tuvieron que relacionarse con el borde circular del podio de hormigón (Nutt, John 2013, p. 121). Los parteluces eran planos y se irradiaban desde un centro definido para que estuviesen en ángulo entre sí.



Imagen 60: unión entre muro de vidrio y cubierta, donde se puede apreciar la diferencia de ángulo de todas las piezas de vidrio.

Fuente: (<https://sydney-city.blogspot.com.es/2013/08/sydney-opera-house-facade.html>)

Cada hoja de vidrio tenía que ser de un tamaño que se ajustara al espacio variable entre parteluces. Normalmente, las dimensiones se medirían in-situ y las hojas se cortarían para ajustarse a las del proveedor. Sin embargo, el largo tiempo de entrega del vidrio cortado de Francia, dictó una alternativa. Se estableció una "fábrica de vidrio" en el lugar, donde se entregaron piezas en

bruto rectangulares ligeramente más grandes, todas de un tamaño calculado y cortadas con las dimensiones precisas (Nutt, John 2013, p. 121).

5. LOS ORDENADORES Y LA ÓPERA DE SÍNEY

“En retrospectiva, se cree que las “conchas” probablemente no podrían haber sido construidas sin el uso de ordenadores. No podríamos haber producido la masa de información, y mucho menos el trabajo analítico, necesario para erigir el edificio en el tiempo disponible.”¹² (Taffs, David 2013, p. 85).

Estas palabras nos hacen ver que el Palacio de la Ópera de Sídney iba a ser el proyecto constructivo con mayor aplicación de la informática hasta la fecha conocido (Taffs, David 2013, p. 85).

La empresa de ingeniería que se encargó de la construcción de la Opera fue Ove Arup & Partners (Imagen 61), presidida por Ove Arup. Inicialmente el equipo de ingenieros fue liderado por Jack Zunz hasta 1963, donde Michael Lewis tomó el mando del equipo.



Imagen 61: logo de Ove Arup & partners.

Fuente: (<https://www.yelp.com/biz/ove-arup-and-partners-los-angeles>)

Cuando la Ópera se comenzó a construir los ingenieros conocían métodos sofisticados de análisis y derivaciones. Sin embargo, diseñadores de muchos edificios usaban formulas simples, tablas y datos empíricos para evaluar el rendimiento de las estructuras (Taffs, David 2013, p. 85). Había muchos libros de referencia con dichas tablas, y cuyas ecuaciones subyacentes eran, en la mayoría de los casos, desconocidas para ellos. Los códigos de construcción, que eran los encargados de dar las directrices a los ingenieros, eran resultados de experimentos de laboratorio que determinaban los valores necesarios para un abanico de condiciones específicas. El alcance de los experimentos y el rango de valores dependían de la calidad del equipo del laboratorio donde se realizaban. El diseñador preparaba un esquema del

¹² Jack Zunz, jefe del equipo de ingenieros del Palacio de la Ópera.

proyecto, basándose sus estimaciones en la propia experiencia y en la sabiduría convencional (o sentido común), iba a las tablas y los códigos y determinaba las condiciones y los materiales necesarios para su proyecto (Taffs, David 2013, p. 85).

En aquel momento la mayoría de diseñadores hacían propuestas probadas y testadas, para reducir riesgos. Este hecho hizo de la Ópera de Sídney un diseño todavía más destacado, por su innovación y su rotura de todos los límites constructivos impuestos hasta la fecha. No había precedentes, no había tablas ni rutinas de cálculo diseñadas y no había garantías de encontrar los materiales adecuados para llevar a cabo aquel sueño (Taffs, David 2013, p. 85). Ese riesgo lo corrieron muchos “individuales” jugándose así, su dinero y su reputación. Fue con esta idea de mejorar lo presente como el equipo se fue formando.



Imagen 62: Ferranti Pegasus-1, el primer ordenador que se usó en el diseño de la obra.

Fuente: (<https://blog.sciencemuseum.org.uk/the-pegasus-computer/>)

Con la Ópera de Sídney sucedió un hecho poco habitual en construcción, se comenzaron a construir los cimientos sin tener del todo clara la superestructura, ya que esta aún tenía que ser estudiada y posiblemente modificada para ser llevada a cabo. Se comenzó, básicamente para cumplir con los plazos de obra estipulados por la normativa del concurso (Taffs, David 2013, p. 86).

La complejidad de la superestructura llevó al equipo de ingenieros a buscar los ordenadores más potentes que se pudiesen conseguir en aquella época. El coste era elevado, la amortización pequeña, los costes de funcionamiento elevados y el espacio que ocupaba un ordenador era el equivalente a la máquina de climatización de un rascacielos (Taffs, David, 2013). El ordenador que se usó tendría un coste hoy en día de aproximadamente 5 millones de dólares (\$) (Imagen 62), pese a esto, no era suficiente, este ordenador no daba respuestas con la velocidad deseada por lo ingenieros, y el equipo tuvo que crear programas software de la nada para poder llevar a cabo el proyecto a una velocidad aceptable.

Realmente nadie conocía el alcance del software empleado, excepto el equipo de ingenieros, que lidiaron con las formas de las “conchas” ideadas por Utzon. Una parte integral de las fundaciones era la explanada, dentro de la cual la estructura de soporte principal era una serie de vigas dobladas, vigas que tenían una torsión a lo largo de su longitud. Estas vigas eran analizadas mediante una serie de cálculos iterativos. Se calculó una estimación de la deformada de dichas vigas bajo carga. Se calculó el área entre la base y la viga deformada. Con estos resultados se pasaba al cálculo de la siguiente sección. Con este método se podían alcanzar soluciones aceptables, obteniendo cada vez más precisión. Los resultados mostraron que la sección de las vigas era mayor donde más resistencia se necesitaba. El equipo de ingenieros quiso crear un programa que hiciese todas estas operaciones en el menor tiempo posible.

Dicho programa daba el valor del área, el momento de inercia y la distancia del centro de gravedad de las vigas desde las líneas rectas de replanteo (Taffs, David 2013, p. 89).



Imagen 63: Jørn Utzon (izquierda) y Ove Arup (derecha) trabajando en el diseño de la estructura.

Fuente: (<https://www.vam.ac.uk/articles/computers-and-the-sydney-opera-house>)

Las “conchas” eran la imagen característica del proyecto, y fue lo que hizo del proyecto de Utzon especial y ganador (Taffs, David 2013, p. 89). Cuando Arup se unió al proyecto, la viabilidad de las conchas fue objeto de estudio por primera vez desde el punto de vista de los ingenieros. La propuesta inicial de Utzon no tenía una definición geométrica. Arup le tuvo que mostrar numéricamente la naturaleza del problema con el diseño inicial. Arup tenía un compañero, Ronald Jenkins que era un matemático y analista reputado. Publicó sus teorías sobre análisis de “conchas” cilíndricas en 1947. Considerando los efectos estructurales despreciables, obtuvo una ecuación, que serviría para resolver las “conchas” soportadas en sus extremos.

Junto con John Henderson, Jenkins desarrollo un método para el análisis estructural poco usado hasta la época, las matrices. Transformó su ecuación en

una matriz de una fila y 4 columnas para los bordes de las “conchas” donde daba constancia a los esfuerzos y las deformaciones. Para las vigas usaba matrices de 4x4. Resolver una matriz de ese tipo requeriría incluso a un operador experimentado al menos 30 minutos, por lo que el trabajo de analizar toda la “concha” iba a ser ingente (Taffs, David 2013, p. 91).

Una vez decidido el método para calcular las vigas, había que decidir la forma de transformar la visión arquitectónica de Utzon en una forma funcional. Inicialmente probaron paraboloides, pero vieron que los esfuerzos eran extremos, entonces optaron por elipsoides. El proceso de cálculo de una “concha” era enormemente lento para los ordenadores de la época, ya que podían tardar hasta 14 horas en calcular todo, y un ordenador actual lo podría hacer en menos de un minuto. Cualquier error o cualquier cambio significaban estar otras 12-14 horas trabajando ya que todo lo anterior tenía que ser desechado. Tal era el volumen y el tiempo de trabajo que se llegaron a instalar camas en la sala del ordenador (Taffs, David 2013, p. 91).

Originalmente Arup propuso construir las “conchas” con hormigón armado, bastante esbelto, encofrado in-situ. Los cálculos mostraron algunos

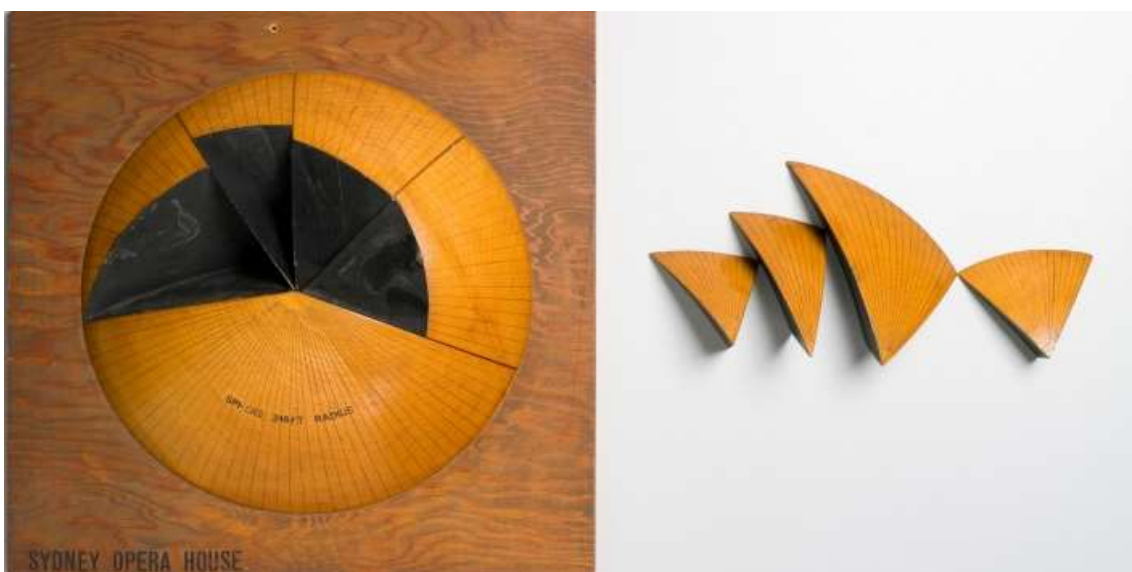


Imagen 64: detalle de la esfera de donde se han extraído todas las "conchas" de la cubierta.

Fuente: (<https://www.pinterest.cl/pin/322640760776433120/>)

problemas con esta solución, por lo que se propuso otra, que eran dos cubiertas de hormigón con una cámara de aire entre la interior y la exterior. Esta solución también era arquitectónicamente y estructuralmente problemática, por lo que se propuso una tercera opción en la que las “conchas” serían prefabricadas en una sola capa de hormigón plegada sobre una serie de costillas de sección triangular (Taffs, David 2013, p. 92). Este método dio una solución satisfactoria a los problemas previamente encontrados. Este nuevo método dio lugar a otro cambio de forma, se pasó de tener una forma elíptica a una forma esférica. Las curvas de las conchas ahora serían parte de una esfera única, una superficie que podría expresarse de forma fácil matemáticamente (Imagen 64). Las “conchas” debían ser calculadas teniendo en cuenta varios factores importantes, como son el viento, la temperatura, el peso de los revestimientos y las paredes de vidrio. Arup también tuvo en consideración a la hora de hacer los pertinentes cálculos los cambios causados por la fluencia del hormigón en las costillas. Los efectos de la temperatura provocaban tensiones longitudinales y torsionales en todas las vigas y toda la superficie (Taffs, David 2013, p. 92).

Alan Baker, un joven graduado de Arup, creó un código computacional para el análisis de estructuras como parte de su tesis doctoral (Taffs, David 2013, p. 92). Originalmente escrito para manejar una estructura con 18 o menos nodos o uniones, el programa se amplió luego mediante un dispositivo matemático conocido como partición para hacer frente a estructuras más grandes. Aunque el programa se limitó a manejar un modelo compuesto por una red de elementos finitos lineales, podía ser usado para calcular y representar superficies continuas (Taffs, David 2013, p. 92). Los ingenieros le dieron datos al programa para intentar adaptar el comportamiento de la estructura a los elementos que analizaba el programa. Debían introducirse muchos datos para poder hacer un análisis aceptable de la estructura, ya que, por ejemplo, la “concha” principal tenía sobre 136 uniones, lo que les llevaba a

tener aproximadamente 800 ecuaciones por resolver y esto tardaba aproximadamente 4 horas en analizar solo 5 casos de cargas repartidas (Taffs, David 2013, p. 92). El cálculo y la preparación de los datos a introducir al ordenador sobre esta “concha” principal llevo aproximadamente tres semanas. Esto nos hace tener una idea de la cantidad de trabajo y tiempo que tuvieron que invertir para calcular toda la estructura de esta construcción, avanzada a su época.



Imagen 65: modelo usado para estudiar la distribución de fuerzas en la cubierta.

Fuente: (<https://www.pinterest.es/pin/323203710751721738/>)

Las “conchas” principales tuvieron que analizarse para la etapa de montaje y las condiciones finales ensambladas. Para el primero, el trabajador de Arup, Peter Rice y sus colegas escribieron una serie de programas, empleando el método de flexibilidad y una rutina de utilidad de la matriz Pegasus¹³. Se eligió la flexibilidad sobre el método de rigidez porque no había disponible un programa de rigidez lo suficientemente

grande. La mayor matriz de flexibilidad invertida fue de la 98ª orden. Desde el inicio hasta la impresión de los momentos flectores estos programas tardaron tres horas. Sin embargo, el control de los esfuerzos principales siempre se hizo a mano. Este hecho se debió a que las mayores tracciones y tensiones de corte

¹³ Matriz empleada para el estudio de la flexibilidad de materiales y estructuras.

podrían localizarse rápidamente mediante inspección. Mediante el uso de gráficos que mostraban la relación entre el esfuerzo cortante, el esfuerzo de compresión y las tensiones principales, estas últimas se encontraban fácilmente (Taffs, David 2013, p. 92). Para las torsiones de la sección transversal más solicitada se diseñó un nuevo programa, a través de cuyos resultados se podía diseñar la sección transversal de las costillas y derivar los esfuerzos de torsión de cualquier punto.

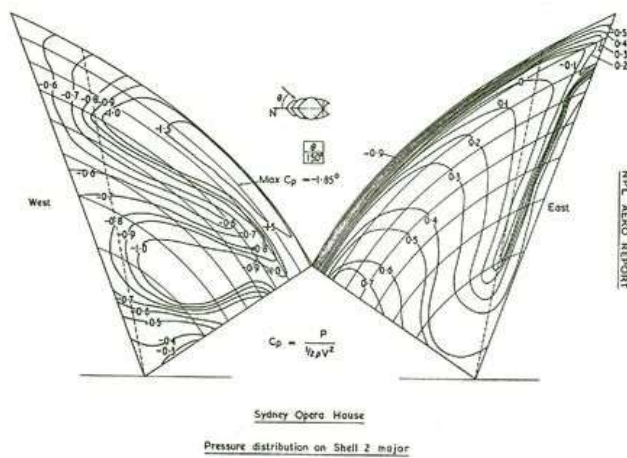


Imagen 66: diagrama resultante del estudio de distribución de presiones tras introducir el modelo en el túnel de viento.

Fuente: (<http://www.laboiteverte.fr/des-plans-de-lopera-de-sydney/>)

Se hicieron muchos cálculos aproximados de la superestructura, pero con los ordenadores de la época era imposible alcanzar el rigor matemático deseado por los ingenieros, y el equipo debía estar seguro sobre los resultados obtenidos y la veracidad de estos. Se construyeron varios

modelos a escala para hacer estudios experimentales a la par que los estudios con métodos numéricos. Un modelo se usó para determinar la distribución de fuerzas y tensiones (Imagen 65), otro se introdujo en un túnel de viento y se experimentó con varias velocidades para observar las reacciones de la estructura (Imagen 66). Arup envió un equipo de ingenieros a hacer estos estudios, y estuvieron aproximadamente nueve meses trabajando para llegar a una solución aceptable a nivel de seguridad y construcción de la estructura (Taffs, David 2013, p. 92). Cuando los estudios terminaron, era el turno de procesar los resultados y convertirlos en una realidad. Así fue como la forma

final de la superestructura era ligeramente diferente a la de los modelos de estudio, ya que se trata de una estructura interconectada, por lo que se tuvieron que realizar algunos cambios a la hora de hacerla realidad.

Se estimó que el trabajo computacional realizado en todos los aspectos del Palacio de la Ópera, hasta 1962, habría ocupado aproximadamente 100 millones de horas-hombre si se hubiese hecho manualmente (Taffs, David 2013, p. 94). En marzo de 1967, el personal de Arup estimó que habían utilizado 2000 horas de computación. Si se hubiera tenido acceso a ordenadores más grandes y más potentes, habrían podido realizar análisis más exhaustivos en busca de mejoras en los materiales y en el peso. Sus esfuerzos también se vieron obstaculizados por la acción industrial que paralizó al Reino Unido a principios de los años sesenta¹⁴. Las empresas se vieron obligadas a adoptar una semana laboral más corta debido a la falla regular de los suministros de energía y las largas tiradas de trabajo computacional siempre fueron vulnerables.

Cuando se trató del programa de construcción se consideró inicialmente el uso del software para todas las fases de la construcción. Sin embargo, pronto se abandonó esa idea porque se requería de demasiada flexibilidad debido a los continuos cambios y actualizaciones del diseño (Taffs, David 2013, p. 96). Con el tiempo y los recursos disponibles las hojas de cálculo de los programas y las acciones fueron producidas a mano con más precisión y regularidad de lo que era posible desde un ordenador, ya que cada cambio obligaba a empezar de nuevo el cálculo, y a mano se podía corregir durante el proceso.

Sin embargo, a medida que avanzaba el trabajo, la construcción del techo, cuya forma altamente compleja, exigió un amplio uso de la tecnología informática. El arco de soporte temporal del techo se deformó y tuvo que

¹⁴ En los años 60 en el Reino Unido, muchas industrias dejaron de ser rentables con lo que llevó al despido de mucha gente que podía llegar a estar trabajando en esas industrias desde hacía generaciones. Este hecho desencadenó un sinnúmero de huelgas para protestar contra estos despidos.

ajustarse para mantener la alineación a medida que el ensamblaje del techo tomaba forma. Tras dos semanas de trabajo con calculadoras se pudieron obtener las distancias de ajuste necesarias para tan solo seis u ocho puntos de la superficie de la cubierta (Taffs, David 2013, p. 97). Tras observar este hecho Peter Rice, de Arup, sugirió que Michael Elphick, contratado como topógrafo para monitorizar las desviaciones de la cubierta, escribiese un programa de ordenador para ubicar las posiciones requeridas para las costillas en el complejo espacio tridimensional de las “conchas”. Ninguna de las personas que hizo estos programas era matemática, por lo que Elphick trajo a Tony Cramm, un ingeniero civil especializado en software y entre los dos redactaron un programa para el cálculo de la superestructura. Cuando se colocaba un segmento de “concha” en posición, las lecturas se harían de cuatro posiciones básicas y características alrededor de un punto concreto (Taffs, David 2013, p. 97). Estas lecturas fueron estudiadas y los resultados serían llevados a los ingenieros, quienes podrían hacer ajustes segmento a segmento, viga a viga. El programa se ejecutó alrededor de 900 veces durante la construcción. Un refinamiento de este programa permitió incluso estudiar los extremos y apoyos de estas vigas. El resultado fue, en efecto, una lista que le dijo al equipo de montaje qué clase de soporte y qué piezas de embalaje debía extraer de la tienda de herrajes de bronce para la superficie de la cubierta y las uniones de la estructura, respectivamente¹⁵.

También fue necesario desarrollar una serie de recursos informáticos nunca antes utilizados. Por ejemplo, las piezas de la superficie de los techos solo se podían ubicar con precisión con la ayuda de un ordenador que procesase la geometría y los datos topográficos. Se hizo un mayor uso de los ordenadores para el diseño de los arcos de montaje de las “conchas”, el control estadístico de las resistencias del hormigón, los costos del trabajo y la nómina. En el Concert

¹⁵ El programa proporcionó los números de código de cada pieza.

Hall y el Opera Theater, se requería más uso de ordenadores para programar la dimensión precisa de los paneles del techo de madera contrachapada (Taffs, David 2013, p. 97). Todo el software creado para el estudio del Palacio causó cierta conmoción en IBM, ya que era demasiado grande para que los ordenadores de Sídney pudieran lidiar con él. Ciertos programas tuvieron que ser ejecutados en un ordenador más grande, el de Investigación de Armas en Adelaide (Taffs, David 2013, p. 97).

Los resultados obtenidos con los softwares creados, estos mismos softwares y los estudios topográficos, estructurales y de materiales realizados en esta construcción fueron, en muchos casos pioneros, y abrieron muchas puertas a las empresas dedicadas a la construcción a lo largo y ancho del mundo.



Imagen 67: Elliot 803.

Fuente: (<http://www.computerconservationsociety.org/lectures/2007-08/20080515.htm>)

A medida que el Palacio de la Ópera tomó forma, la atención se dirigió a los rellenos de la fachada de vidrio. John Hooper de Arup y David Croft trabajaron en el diseño en Londres. Arup fueron los primeros ingenieros

consultores del Reino Unido en instalar su propio ordenador interno, un Elliott803 (Imagen 67).

El departamento de informática de Arup, formado en 1964, había desarrollado un software de análisis de elementos finitos rectangulares. Las áreas críticas alrededor de las placas de vidrio se modelaron superponiendo una malla de pequeños rectángulos. Cuanto más rápido era el cambio de esfuerzos en la placa, más pequeños y más numerosos eran los rectángulos (Taffs, David 2013, p. 97). Arup invirtió en el desarrollo de un paquete de software de aplicación, que incluía una salida gráfica sofisticada y un software de diseño interactivo que se ejecutaba desde la consola del ordenador. Esta tecnología y estos métodos estaban muy adelantados a su tiempo.

El 14 de enero de 1971, a causa de un cigarro mal apagado, la sala del ordenador se incendió, causándole a este daños, que pese a ser reparados provocaron que el ordenador nunca volviese a funcionar correctamente (Taffs,

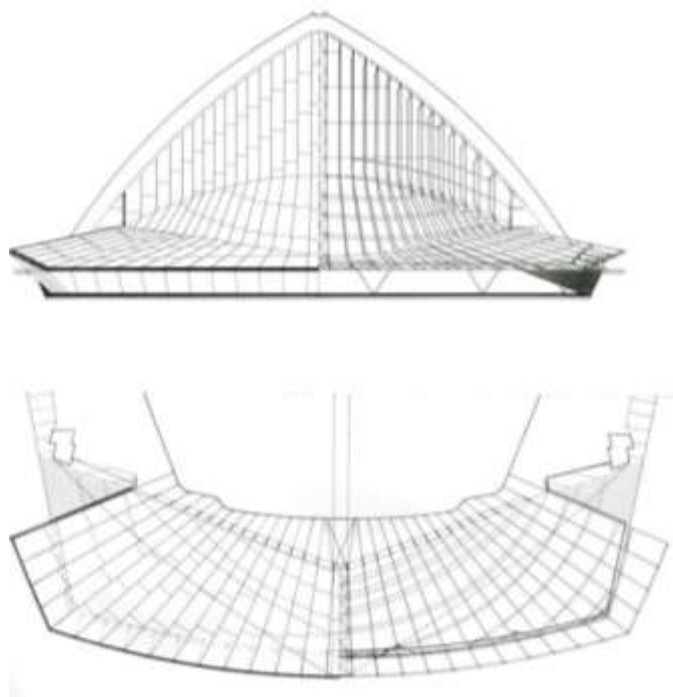


Imagen 68: diseño de los muros de vidrio, donde se aprecian todas sus irregularidades.

Fuente: (<http://www.sohglasswalls.com/aj/fig3.htm>)

David 2013, p. 97). En Arup tuvieron que reaccionar rápidamente para encontrar lo más rápido posible un ordenador para poder continuar con su trabajo. De las pocas opciones que tenían de ordenadores similares al suyo optaron por el IBM 1130, que podía ser instalado en aproximadamente dos semanas. El inconveniente

era que ese ordenador trabajaba con otro lenguaje informático, lo que significaba desechar todo el trabajo hecho previamente con el anterior, con la inversión temporal y económica que esto conllevaba (Taffs, David 2013, p. 97).

Croft y Hooper se pusieron a escribir el nuevo software, codificando las definiciones geométricas de los alrededores y las paredes de vidrio. Las unidades utilizadas fueron pies y se generaron con tres decimales (Taffs, David 2013, p. 97). En general, se escribieron dos programas para cada pared, una de las bandas y ménsulas continuas y otra para el resto de la pared.

La geometría esférica de la superestructura y el podio dictaba una geometría basada en cilindros y conos para las paredes de vidrio. Quedaba por relacionar todas estas superficies matemáticamente para que se pudiesen hacer cálculos para cada punto de intersección. Así, la longitud de cada miembro de soporte, el ángulo de corte en sus extremos, la posición de los pernos, la forma de cada conexión a la costilla de la estructura de la cubierta, el tamaño y la forma de cada lámina de vidrio, junto con las fuerzas sobre ellos, podrían ser calculados. Pequeños cambios en los requisitos significaban que todo el programa se ejecutase nuevamente a través del ordenador. El choque de la estética con las formas matemáticas a menudo dio lugar a cambios y la reprogramación completa (Taffs, David 2013, p. 98). Esto forzó la tolerancia y la comprensión tanto de los arquitectos como de los ingenieros y su capacidad para trabajar juntos de forma óptima.

A partir de la salida de resultados, la pared de vidrio podría dibujarse a pequeña escala, mientras que varias vistas de un detalle crítico podrían dibujarse a tamaño completo. Los detalles de las paredes de vidrio se desarrollaron en paralelo con el programa informático y la geometría. Esto era esencial, ya que la geometría general determinaba el tamaño de los miembros y

la forma de las conexiones, lo que a su vez influía en la forma de las mismas paredes.

La flexibilidad necesaria se logró fácilmente en el programa informático mediante la configuración de una serie de constantes en las que estas dimensiones podrían leerse como datos (Taffs, David 2013, p. 98). A medida que se desarrolló el diseño, se incorporaron nuevas constantes en el programa. Para cuando se completaron los programas para la pared frontal de Concert Hall, había 60 constantes, desde las coordenadas del origen del parteluz y los ápices del cono hasta el ancho de las juntas de goma de silicona y el diámetro de las barras de refuerzo de la ménsula. Los programas fueron mejorados para producir las dimensiones para prefabricar el encofrado, el refuerzo y la fabricación del acero.



Imagen 69: Torre BT Telecom.

Fuente:
(<http://www.constructionphotography.com/Details.aspx?ID=19091&TypeID=1>)

Arup en Londres sufrió otra interrupción mientras trabajaba en las paredes de vidrio. En las primeras horas del 31 de octubre de 1971, estalló una bomba en el piso 31 de la Torre BT Telecom (Imagen 69) adyacente, el edificio más alto de Londres¹⁶. Bloques de hormigón cayeron en cascada sobre el edificio de oficinas de Arup, perforando el techo. Algunos de los bloques de hormigón golpearon la calle tan fuerte que explotaron directamente en la sala

¹⁶ Nadie se atribuyó la responsabilidad de este acto.

de ordenadores. Afortunadamente, nadie resultó herido y el ordenador estaba funcionando ese mismo mediodía.

Las otras aplicaciones que se le dieron a los ordenadores fueron mayormente centradas en la acústica y los equipos de sonido usados. Muchas de las innovaciones a nivel computacional que se usaron en el Palacio de la Ópera fueron usadas en varios proyectos posteriores.

6. LA MARCHA DE UTZON

Utzon era un arquitecto con una personalidad bastante fuerte, y no era muy bueno encajando críticas, ni siquiera las que provenían de su cliente. Era muy reticente a mostrar sus ideas y sus dibujos, cuando los hacía, porque en algunas ocasiones, cuando explicaba alguna solución a algún problema de la obra y le pedían la documentación para poder observar y entender mejor la idea, él siempre respondía que estaba todo en su cabeza (Watson, Anne 2013, p. 153). Estos hechos, sumados al alto coste que estaba suponiendo la obra, mucho más elevado de lo que teóricamente tenía que ser, provocaron un poco de tensiones entre el estado de Nueva Gales del Sur y Utzon.

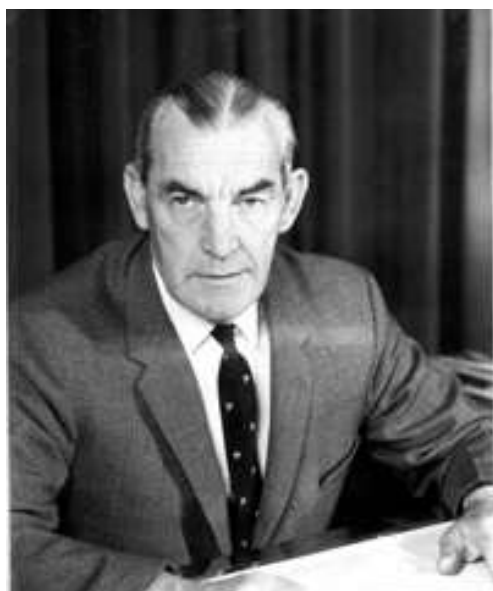


Imagen 70: Davis Hughes.

Fuente:

(<https://www.parliament.nsw.gov.au/members/Pages/member-details.aspx?pk=1713>)

El 1 de mayo de 1965 se produjo, tras 24 años un cambio de gobierno en Nueva Gales del Sur. Este nuevo gobierno quiso ver que era lo que estaba sucediendo con la construcción del palacio, ya que iban muy retrasados de tiempo y los costes no hacían más que aumentar. El nuevo primer ministro Sir Robert William Askin nombró a Sir William Davis Hughes (Imagen 70) ministro de obras públicas, y este, en su campaña electoral prometió nuevas carreteras y conexiones con las zonas más rurales del estado, lo que conllevaba un gasto de dinero público importante, dinero que, por otra parte se estaba invirtiendo en la construcción de la Ópera.

Las relaciones de Utzon con el anterior gobierno eran, para muchos, demasiado informales, y su voluntad era continuar de la misma forma, lo que provocó desencuentros con los nuevos gobernantes (Universidade do Vale do Rio dos Sinos 2017). Hughes quería ver cuantos aliados tenía para ir contra Utzon, y sorprendentemente encontró un poderoso aliado que no esperaba, el presidente de la cámara de Nueva Gales del Sur. En octubre de ese año se tomaron las primeras medidas, quitándole a Utzon la autoridad sobre los pagos e inversiones y dándoselas al comité de construcción del palacio y suprimiendo los pagos regulares al equipo. Utzon estaba sin dinero, ya que no recibió los honorarios acordados en un principio, con muchas deudas que pagar y sin poder ni siquiera pagarle a su propio personal los sueldos. Se impuso una comisión de seguimiento del proyecto, lo que dejó casi sin autonomía al

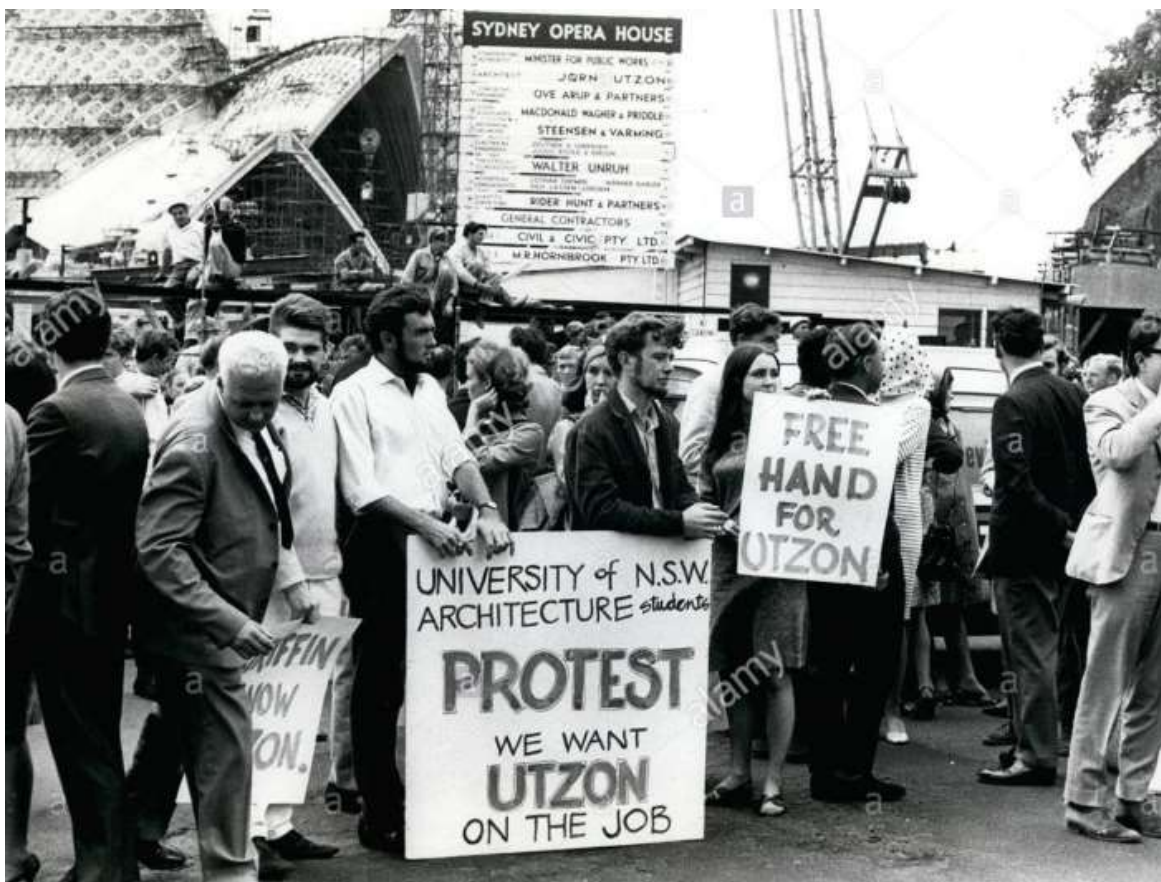


Imagen 71: protestas ante las obras del Palacio de la Opera contra la marcha de Utzon.

Fuente: (<http://sharpbuild.blogspot.com.es/>)

arquitecto, y obligaron a Utzon a elegir a los contratistas de interiores mediante concurso público. Tras ver el poco apoyo de su cliente y la reticencia de este a la hora de pagarle, este le escribió una carta al ministro, el día 28 de febrero de 1966 anunciando su retirada temporal del proyecto con una frase que pasó a la historia de este proyecto “*you have forced me to leave the job*” (me habéis forzado a abandonar el proyecto) (Drew y Browell 2002, p. 18).

Este conflicto dividió Sídney en dos. El ministro Hughes temía no encontrar un arquitecto para finalizar la obra. Muchos de los arquitectos que trabajaban para él se negaron a seguir con el trabajo de otro y se unieron a las protestas contra la marcha de Utzon¹⁷ (Watson, Anne 2013, p. 155) (Imagen 71) (Imagen 73).



Imagen 72: Peter Hall.

Fuente: (<http://www.abc.net.au/news/2016-01-31/peter-hall-architect-who-fixed-opera-house-after-utzon-departed/7127160>)

¹⁷ Estas protestas incluyeron tanto manifestaciones, en las que participaban todo tipo de personas, incluyendo arquitectos, y recogidas de firmas contra el gobierno y el trato dado a Utzon por parte de este, en las cuales también obtuvieron apoyo de arquitectos internacionales.

Tras la marcha de Utzon, su puesto fue ocupado por Peter Hall (Imagen 72), con los mismos poderes que tenía Utzon dentro de la obra, en definitiva, solo cambiaba el nombre.

El motivo real de este boicot contra Utzon era sobretodo político, ya que fueron los rivales del recién nombrado gobierno quienes idearon e iniciaron este proyecto. Durante el debate del Palacio de la Ópera en el Parlamento, más tarde ese año el anterior ministro de obras públicas, el Sr. Ryan resumió las tácticas de David Hughes: "la retirada de Utzon del Palacio de la Ópera no fue por casualidad o accidente sino el resultado de una campaña deliberadamente embarcada por el ministro ... Sugiero a la cámara que ocurrió por una razón política, y en el proceso, el consultor (Ove Arup & Partners) y el Instituto de Arquitectos fueron traídos para reforzar el caso ... " (Drew y Browell 2002, p. 18).

Este hecho quedó reflejado en que los 18 millones de dólares ya invertidos en la época de Utzon resultaron ser solo el 17.6% de lo que se acabaría invirtiendo finalmente, 102 millones de dólares (Drew y Browell 2002, p. 18). También cabe destacar que si aquel gobierno es recordado hoy día no es por la construcción del Palacio de la Ópera, sino por la elevada corrupción que hubo y en la que estuvieron envueltos, con negocios ilegales, blanqueo de dinero... (Drew y Browell 2002, p. 18). Todo el proceso de echar a Utzon lo único que hizo fue ser una cortina de humo para ocultar estas actividades irregulares.

De hecho, Utzon había visto en su primera reunión en 1965 lo que pretendía el nuevo ministro de obras públicas: "... había decidido hacerse cargo y convertirse en el hombre más estrechamente asociado con la Ópera" (Watson, Anne 2013, p. 159). Davis Hughes ansiaba la atención y la atención política

a escondidas, para evitar en la medida de lo posible todo el boom mediático de su marcha. Este nuevo equipo se encontró unos interiores por hacer casi por completo, lo que requería estudiar los espacios interiores, para cumplir los requisitos exigidos por el cliente, a nivel de capacidad y acceso, los materiales y la forma interior para tener el control acústico de las salas, ya que para un edificio dedicado mayormente a espectáculos musicales el tiempo de reverberación no podía superar los 2 segundos (Drew y Browell 2002, p. 18).

Con todos estos cambios y la crisis que creó la marcha de Utzon, el Palacio de la Ópera no llegó a ser la obra maestra perfecta que se proyectó, no obstante, pese a no perder la condición de obra maestra, tenía defectos provocados por los vaivenes de su proceso constructivo, pese a que Peter Hall y su equipo hicieron lo que pudieron de la mejor forma posible, ya que con aquellas circunstancias era difícil alcanzar la grandeza proyectada por Utzon.

Los cuatro cambios más significativos al diseño después de la salida de Utzon del proyecto fueron, el revestimiento del podio y el pavimento ya que el podio no debía ser originalmente una llanura abierta al mar, pero se hizo abierta. La construcción de las cristaleras fue diferente ya que se había planificado usar un sistema de parteluces contrachapados, pero diseñando un sistema diferente para tratar el cristal. El uso de las salas también sufrió variaciones, puesto que la sala principal, que había sido diseñada como sala polivalente para óperas y conciertos, se destinó finalmente a sala exclusiva de conciertos. La sala menor, diseñada inicialmente sólo para producciones teatrales, en el proyecto final quedó destinada tanto para la representación de ópera como de teatro. También fueron agregados dos teatros más. En el diseño del interior, la acústica y el diseño de los asientos hechos por Utzon, fueron desechados totalmente. Su diseño para el salón de conciertos también fue desechado debido a que solamente daba cabida a 2000 butacas, lo que se consideró insuficiente.

La crisis del Palacio de la Ópera devastó a Utzon. El proyecto había significado mucho para él. Además, la prensa falló en su trabajo ya que nunca investigaron seriamente las afirmaciones de David Hughes sobre Utzon, ni tampoco verificaron los hechos (Drew y Browell 2002, p. 18). Si hubiera sido así, habría ocurrido una historia muy diferente.

Hoy, la posición de Utzon como uno de los diseñadores más originales e importantes del siglo XX está asegurada. Se salió de los esquemas funcionalistas para mostrar que los edificios podían ser románticos y expresivos; y replanteó la prefabricación industrial de elementos estándar para producir formas complejas que se apartan del estricto orden rectangular de Mies Van der Rohe y su generación de grandes maestros.

7. INAUGURACIÓN Y RECONCILIACIÓN CON UTZON



Imagen 74: inauguración del Palacio de la Ópera de Sídney, con la Reina Isabel II dando el discurso.

Fuente: (<https://www.pinterest.com/pin/567594359266665810/>)

El 20 de octubre de 1973, tras 16 años de obra, la Reina Isabel II, en su condición de Reina de Australia, junto a su marido, el Duque de Edimburgo y con la presencia de miles de personas, ofició la inauguración del Palacio de la Ópera de Sídney (Imagen 74). La ceremonia de inauguración estuvo compuesta por fuegos artificiales y una representación de la Sinfonía N^o 9 de Ludvig van Beethoven (Imagen 75) (Murray 2004). En la velada inaugural participó la Orquesta Sinfónica de Sídney bajo la dirección de Willem van



Imagen 75: Ludvig van Beethoven.

Fuente:
(https://es.wikipedia.org/wiki/Ludwig_van_Beethoven)

Otterloo, el "Sídney Philharmonia Choir" y el "Sídney Philharmonía Motet Choor", interpretando "Jubugalee" (de John Antil) (Tomás 2012). Al día siguiente la Reina y el Duque de Edimburgo realizaron una visita protocolaria a las instalaciones y a todo el complejo. Cabe estacar que en ningún momento de la inauguración se pronunció el nombre del creador de aquel magnífico edificio, Jørn Utzon.

Antes de la inauguración en 1973 ya se habían realizado otras representaciones, ya fuese para amenizar el trabajo de los obreros en plena construcción, o representaciones de prueba dentro del edificio ya construido, asegurándose así, que el día de la inauguración, con todas esas personas presentes, y con la presencia de la Reina no hubiese el más mínimo fallo. Dentro de la gente que actuó antes de la inauguración se encontraban los máximos exponentes de la música australiana, como eran la Orquesta Sinfónica de Sídney o la National Training Orchestra.



Imagen 76: Sala Utzon.

Fuente: (<https://www.svdnevoperahouse.com/general/venue-hire/utzon-room.html>)

La primera representación pública se realizó el 28 de septiembre de 1973, con la presentación de la ópera *La Guerra y la Paz* de Serguéi Prokófiev en el Teatro de la Ópera. Al día siguiente, el 29 de septiembre, se realizó el primer concierto público en la Sala de Conciertos, realizado por la Orquesta Sinfónica de Sídney, dirigida por Charles Mackerras y la soprano sueca Birgit Nilsson, como solista (Fromonot 1998).

A finales de la década de los 90, el Patronato de la Casa de Ópera de Sídney inició un acercamiento a Jørn Utzon con el fin de producir una reconciliación y asegurar su implicación en una futura remodelación del edificio.

Poco después, en 1999, el Patronato lo designó como consultor del diseño para el futuro trabajo. En 2004, se abrió el primer espacio interior reconstruido para restablecer el diseño original de Utzon, rebautizándose como "Sala Utzon" (Imagen 76) en su honor. En abril de 2007, Utzon propuso una importante remodelación del edificio de la Ópera. Utzon, pese a esto, nunca volvió a Sídney a ver su obra terminada, ya que las relaciones con el gobierno acabaron de forma fatídica, pero, según palabras de su hijo Jan Utzon, este nunca dejó de trabajar en la Ópera de Sídney, estudiando mejoras y cambiando cosas que él mismo hizo (Benns 2007).

8. EL PALACIO DE LA OPERA DE SYDNEY COMO REFERENCIA

8.1. EL TEMPLO DE LOTO

Desde su inauguración, el 20 de octubre de 1973, el Palacio de la Ópera de Sídney ha sido una obra referente a nivel mundial, ya sea por su arquitectura, por su innovación ingenieril, por el uso de los materiales, o por su magistral uso de la geometría (Taffs, David, 2013). Sea como fuere, es indudable su aportación al desarrollo de la arquitectura del siglo XX abandonando la arquitectura racional y “cuadrada” de los grandes maestros hacia una arquitectura orgánica con formas libres.

Muchos arquitectos modernos le intentan imprimir a sus obras la esencia de la obra de Utzon y utilizan tecnologías y técnicas constructivas que se usaron en Sídney por primera vez en construcción (Nutt, John 2013, p. 121). De hecho, si observamos las grandes obras de algunos de los grandes arquitectos de los últimos años, vemos que la obra de Utzon no desentonaría nada y, siendo esta muy anterior, hace de este hecho algo muy mencionable y meritorio, convirtiendo a Utzon en un gran visionario.

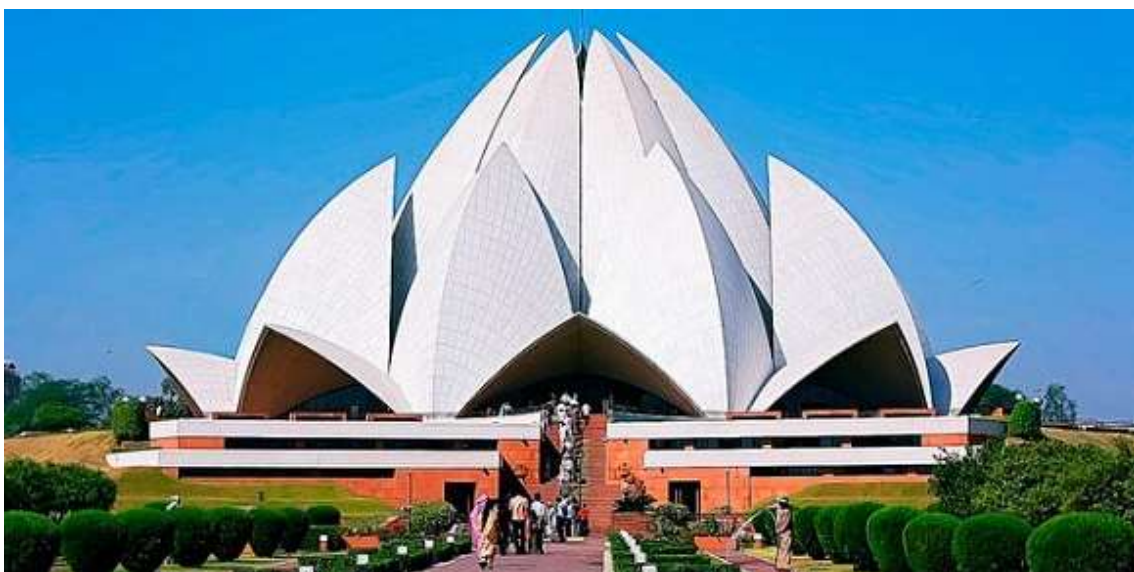


Imagen 77: Fariborz Sahba, Templo de Loto, 1986, Dehli, India.

Fuente: (<http://viajerosblog.com/templo-de-loto-de-nueva-delhi-un-santuario-en-honor-al-bahaismo.html>)

La primera obra que podemos mencionar como consecuencia del Palacio de la Ópera de Sídney es el Templo de Loto (o Casa de adoración Bahá'í) (Imagen 77), de Nueva Delhi (Fedele 2014). El templo de Loto es un edificio que cuenta con 27 pétalos de mármol revestidos que se agrupan para formar una estructura de nueve lados convirtiéndose así en un reflejo de la flor de loto (la que le da nombre al templo) (Fedele 2014). El edificio fue completado en 1986 y sirve de templo madre en el subcontinente Indio. Ha ganado numerosos premios arquitectónicos y ha sido tema de cientos de artículos de periódicos y revistas.

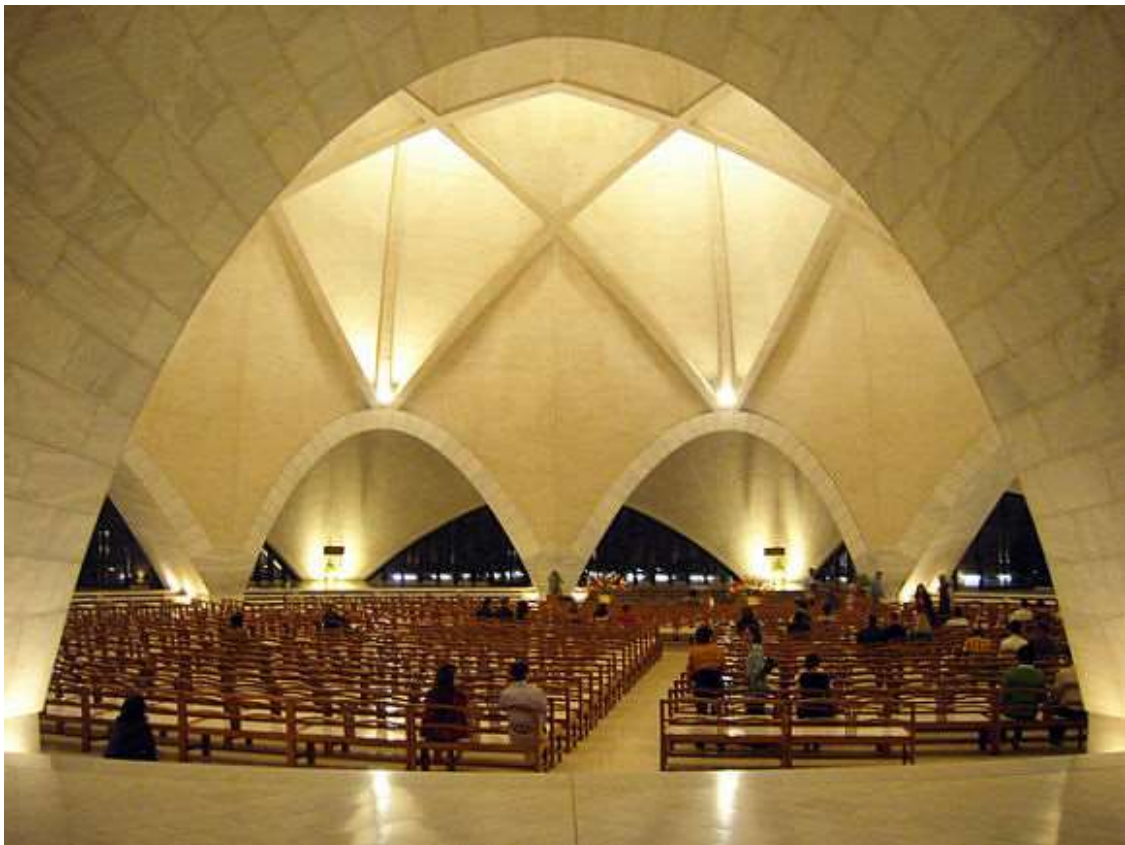


Imagen 78: Fariborz Sahba, Templo de Loto (interior), 1986, Dehli, India.

Fuente: (<http://viajerosblog.com/templo-de-loto-de-nueva-delhi-un-santuario-en-honor-al-bahaismo.html>)

Desde su inauguración al público en diciembre de 1986 hasta el 2002, ha atraído a más de 50 millones de visitantes. Actualmente supera en cantidad de visitas al afamado Taj Mahal, ubicándose en el lugar 50 entre los destinos

turísticos más visitados del mundo. Este hecho lo convierte, al igual que la Ópera de Sídney en imagen de su ciudad y país.

8.2. SANTIAGO CALATRAVA

Santiago Calatrava, arquitecto, ingeniero civil y escultor español, es uno de los nombres que más se asocian con Utzon, ya sea por la complejidad de las formas geométricas de sus obras, o por sus estructuras espectaculares, difíciles de calcular y de resultados tan sorprendentes. Calatrava al igual que Utzon, también trata de introducir formas orgánicas a sus proyectos, realizando así grandes construcciones alrededor del mundo, convirtiéndolo así en uno de los arquitectos más influyentes y famosos de nuestra época.



Imagen 79: Santiago Calatrava, Auditorio de Tenerife, España, 2003.

Fuente: (<http://delso.photo/>)

Su lista de obras es muy extensa y se expande alrededor del mundo, pero en este caso, tomando como referencia a Utzon, nos centramos en grandes auditorios, concretamente en el Auditorio de Tenerife (Imagen 79), el cual se ha asociado desde un principio con la Ópera de Sídney, por compartir función y por tener formas relativamente similares a esta. Su ubicación frente al mar y las

similitudes arquitectónicas con la Ópera de Sídney han llevado a apodarlo en muchos lugares como "el Sídney del Atlántico" (Fedele 2014).



Imagen 80: Santiago Calatrava, Auditorio de Tenerife, España, 2003.

Fuente: (<https://www.peri.es/proyectos/cultural-buildings/auditorio-de-tenerife.html>)

Al igual que Utzon, Calatrava también ha tenido problemas con clientes por su forma de trabajar y por el elevado coste de sus proyectos. La diferencia con Utzon es que los proyectos de Calatrava han presentado en algunos casos problemas constructivos a muy corto plazo, ya sean caídas de escombros, o falta de practicidad en sus proyectos, hecho que con Utzon no ha sucedido.

8.3. FRANK GEHRY

Otro nombre destacable como “discípulo” de Utzon puede ser Frank Gehry, arquitecto canadiense, ganador del premio Prizker, cuyos proyectos se caracterizan por sus formas innovadoras, peculiares y orgánicas, perteneciente a la corriente del deconstructivismo¹⁸ (Rattenbury y Rattenbury 2002). Centrándonos en una de sus obras más representativas, el museo Guggenheim de Bilbao (Imagen 81), España, podemos apreciar lo anteriormente mencionado, la libertad de las formas y la complejidad de la estructura para ser construida.



Imagen 81: Frank Gehry, Museo Guggenheim, Bilbao, 1997.

Fuente: (<http://www.lavanguardia.com/local/paisvasco/20171018/432139283278/guggenheim-bilbao-aniversario.html>)

Como también podemos ver, Gehry utiliza unas formas más libres y anárquicas que las que usaba Utzon en su proyecto, pero también cabe destacar el hecho de que Gehry disponía de más tecnología, mejores técnicas de construcción y más programas de cálculo de estructuras, muchos de estos,

¹⁸ El deconstructivismo es un movimiento arquitectónico que nació a finales de la década de 1980. Se caracteriza por la fragmentación, el proceso de diseño no lineal, el interés por la manipulación de las ideas de la superficie de las estructuras y, en apariencia, de la geometría no euclidiana (por ejemplo, formas no rectilíneas) que se emplean para distorsionar y dislocar algunos de los principios elementales de la arquitectura, como la estructura y la envolvente del edificio.

resultado de las innovaciones del Palacio de la Ópera de Sídney, por lo que podríamos aventurarnos a decir que algunas de las obras de Gehry son consecuencia de la visión de Utzon.



Imagen 82: Frank Gehry, Museo Guggenheim, Bilbao, 1997.

Fuente: (<https://www.guggenheim-bilbao.eus/pt-pt/informacao-util/horarios-e-tarifas/>)

8.4. NORMAN FOSTER

Norman Foster, arquitecto inglés, es otro de los nombres destacables que podemos añadir a esta lista de arquitectos que tomaron a Utzon de referencia. Foster ha desarrollado una carrera extremadamente prolífica a lo largo de cuatro décadas. Ha sido galardonado con el premio Pritzker en 1999 y el Premio Príncipe de Asturias de las Artes en 2009 (Ortiz Monsalve y Apex, 2012). Sus obras se expanden a lo largo y ancho del globo, haciendo de este uno de los arquitectos más importantes e influyentes del mundo.



Imagen 83: Norman Foster, Auditorio Clyde, Glasgow, 1997.

Fuente: (<http://arquitecturaespectacular.blogspot.com.es/2010/03/auditorio-clyde.html>)

Sus obras en gran parte se han acabado convirtiendo en las imágenes de grandes ciudades. La lista de proyectos realizados por Foster es tan extensa que es imposible analizarla en su totalidad, por lo que centraremos nuestra atención en la que posiblemente sea la obra que más podamos asociar con la Ópera de Sídney, el auditorio Clyde (Imagen 83), situado en Glasgow, Escocia. Se ha comparado muchas veces con la Ópera de Sídney, aunque los arquitectos dicen

que no se inspiraron en ella para el diseño, que en realidad pretendía ser una serie de cascos de barcos entrelazados, en referencia a la tradición naval del Clyde. Pese a esto, es difícil evitar ver grandes similitudes entre ambos edificios, teniendo en cuenta también que los motivos marinos también fueron inspiración para la obra de Utzon.



Imagen 84: Norman Foster, Auditorio Clyde, Glasgow, 1997.

Fuente: (<http://arquitecturaespectacular.blogspot.com.es/2010/03/auditorio-clyde.html>)

8.5. ZAHA HADID

Si hablamos de formas orgánicas y de proyectos cuya dificultad de construcción es mayúscula, no podemos evitar hablar de la arquitecta anglo-iraquí Zaha Hadid. Procedente, al igual que el ya mencionado Frank Gehry de la corriente del deconstructivismo, fue la primera mujer galardonada con el premio Pritzker en 2004.



Imagen 85: Zaha Hadid, Pabellón Puente de Zaragoza, 2008.

Fuente:

(https://www.heraldo.es/noticias/aragon/zaragoza_provincia/zaragoza/2013/03/22/el_pabellon_puente_reabre_durante_fines_semana_227510_301.html)

Gran parte del trabajo de Hadid fue conceptual (Jodidio y Kobler 2012), solo un porcentaje de sus obras se pudieron llevar a cabo por la complejidad de estas, hecho que nos recuerda al proceso de construcción de la cubierta de la Ópera de Sídney, donde se llegó a debatir la posibilidad de que no se pudiese realizar (Nutt, John, 2013). Las obras de Hadid, al igual que la de Utzon en otra época destacan por sus formas orgánicas, y su complejidad estructural, siendo esta una figura muy importante en la arquitectura mundial. Al igual que Utzon,

muchas de sus construcciones fueron de carácter mayúsculo, tanto por tamaño como por importancia. Dos ejemplos representativos de la obra de Hadid son el Pabellón Puente de Zaragoza (Imagen 85), en el que podemos ver este uso de la geometría orgánica añadiéndole la dificultad de estar situado sobre un río, y el centro acuático de Londres (Imagen 86), construido para los juegos olímpicos, donde podemos apreciar la complejidad de las formas de la cubierta, lo que nos lleva a pensar en la cubierta de la Ópera de Sídney.



Imagen 86: Zaha Hadid, Centro Acuático de Londres, 2012.

Fuente: (https://es.wikipedia.org/wiki/Centro_Acu%C3%A1tico_de_Londres)

8.6. RENZO PIANO

Renzo Piano, otro gran nombre dentro de la arquitectura contemporánea, es un arquitecto italiano, también ganador del premio Pritzker en 1998. Renzo Piano se ha declarado admirador de Utzon algún vez y ha reconocido fijarse en su obra para sus proyectos (Hill 2018). Los trabajos de Piano se basaban en estructuras ligeras (Jodidio, 2005), consiguiendo grandes espacios limpios de apoyos, como hizo Utzon en Sídney.



Imagen 87: Renzo Piano, Centro Paul Klee, Berna, 2005.

Fuente: (<https://www.sbb.ch/en/leisure-holidays/ideas/offer.html/veranstaltungen/zentrum-paul-klee>)

Según palabras de Piano, lo que más admiraba de Utzon era su capacidad de trabajar simultáneamente las ideas racionales, ya sea geometría, estructura, las fuerzas a soportar por el edificio, como las ideas menos racionales, llamadas por este magia o fantasía (Hill 2018). Piano consideraba que Utzon encontraba siempre un equilibrio entre estas dos ideas, consiguiendo esa calidad en sus obras conocida por todos, lo que le sirvió como referencia en proyectos propios. Véase, por ejemplo el centro Paul Klee (Imagen 87), donde no solo usa de forma sorprendente estructura y geometría, sino que también le introduce la componente “mágica” haciendo pasar las estructura bajo tierra, dando esa imagen de edificio medio enterrado. Otra de las obras más famosas

de Piano está situada en Nueva Caledonia, y no es otra que el centro cultural Jean-Marie Tjibaou (Imagen 88), donde podemos también apreciar este equilibrio entre estructura y fantasía, consiguiendo estas formas tan características de este proyecto.



Imagen 88: Renzo Piano, Jean-Maria Tjibaou Cultural Center, Nueva Caledonia, 1998.

Recuperada de: (<https://inhabitat.com/jean-marie-tjibaou-cultural-center-inspired-by-native-architecture/>)

9. INNOVACIONES TECNOLÓGICAS

El Palacio de la Ópera de Sídney comprendía muchas innovaciones tecnológicas que señalaban el camino hacia la introducción del diseño y análisis computacional, y las matemáticas asociadas con el diseño de ordenadores. Fue el primer edificio de escala significativa diseñado por ordenador y que no podría haber sido construido sin el uso de ellos. Hoy en día, casi no se concibe un cálculo de cualquier estructura medianamente compleja sin el uso de software de ordenadores.

El diseño fue innovador y de gran complejidad. Ninguno de los detalles tradicionales de las construcciones de edificios o puentes funcionó, y todos, desde los pequeños detalles de impermeabilización hasta la construcción a gran escala, tuvieron que ser investigados y desarrollados desde el principio (Nutt, John 2013, p. 121). Este hecho hizo de la obra pionera en muchos aspectos, ya que los avances que se consiguieron no fueron en vano, ya que muchos de estos han sido tomados como ejemplo en obras futuras de otros grandes arquitectos.

Fue el primer ejemplo de fabricación y montaje en fábrica de grandes unidades de hormigón prefabricado basadas en una geometría tan compleja, y el cálculo previo de todas las dimensiones, hasta de las posiciones del último tornillo y orificio en dicha escala fue único, lo que potenció el uso del hormigón prefabricado, ya que se vio que era posible hacer grandes construcciones con esta técnica poco usada hasta la fecha.

Fue una obra referente en el uso del hormigón pretensado, siendo este poco usado en una época donde la construcción predominante era la construcción con acero, y hoy en día siendo una de las técnicas más importantes en la construcción de estructuras en puentes y edificios.

La unión con epoxi del segmento de hormigón combinado fue el primer ejemplo de este tipo en el mundo y sin duda el más grande durante muchos

años (Nutt, John 2013, p. 121). Desde entonces, estos métodos han encontrado su camino y aceptación en la práctica de la ingeniería de puentes y estructuras.

El arco de montaje diseñado por los constructores, que fue capaz de alargarse y asentarse en una gran cantidad de posiciones diferentes, es sin duda la pieza de andamio más compleja utilizada en la industria de puentes, edificios y construcción en Australia (Nutt, John 2013, p. 121).

Finalmente, también cabe destacar que fue el primer uso a gran escala de paredes y techos con vidrio laminado. Usándose aún hoy en día algunas de las técnicas empleadas en la obra del Palacio.

10. CONCLUSIÓN

El Palacio de la Ópera de Sídney es una de las obras más importantes de la arquitectura, no solo del siglo XX, sino que de toda la historia. Marcó un antes y un después en la arquitectura mundial y en las técnicas de construcción y cálculo de estructuras usadas hasta la fecha. Gracias a esta obra, su arquitecto, Jørn Utzon pasó a ser un referente para los arquitectos e ingenieros de cualquier país del mundo, haciendo de su obra una de las más influyentes en la arquitectura mundial.

Viniendo de una época de grandes maestros de la arquitectura como podían ser Frank Lloyd Wright, Le Corbusier o Alvar Aalto, cuyas obras habían creado un estilo racional y funcional, repentinamente podemos decir que apareció una generación de valerosos visionarios que quisieron romper con el orden establecido por las generaciones anteriores. Estos hombres vinieron decididos a romper con el uso de las formas “cuadradas” de las obras que veían a su alrededor, y comenzar a usar formas orgánicas en sus obras. Jørn Utzon fue uno de esos hombres. Pionero en muchos aspectos, Utzon tuvo que dar muestras de extraordinario valor en la construcción de su obra, desde un inicio, cuando envió a un concurso, hecho en una ciudad de un país donde nunca había estado, unos esbozos con una propuesta que rompía totalmente con las normas establecidas por el concurso y por las leyes de la arquitectura actual, hasta un final, donde abandonó la construcción de una obra a medio terminar al ver que el actual gobierno del estado no le permitía continuar con su trabajo del modo que él quería.

Este valor y capacidad de visión de futuro se vio reflejada en muchas de las decisiones tomadas durante el proyecto, ya que, por ejemplo, el hecho de comenzar a construir la base sin tener clara la cubierta no era algo muy común en cualquier construcción del mundo, ni lo es hoy en día.

Cabe destacar también la importancia del buen entendimiento entre arquitectos e ingenieros civiles, ya que, como ha sido el caso, de no existir este buen entendimiento y esa relación profesional con cordialidad es muy probable que tanto esta, como otras grandes construcciones no se hubiesen llevado a cabo con éxito.

Observando los hechos sucedidos durante la construcción del Palacio, podemos remarcar la necesidad de los ingenieros y arquitectos e ser visionarios, y de intentar ir siempre un paso por delante para encontrar nuevas soluciones más eficientes y efectivas a problemas clásicos y la capacidad de reacción ante los imprevistos que surgen durante la erección de una obra, ya sea grande, como es nuestro caso, o algo más pequeña. Debemos estar siempre preparados para todo lo que pueda suceder y tener la capacidad de reaccionar de la mejor forma posible.

Como ha quedado reflejado, en cualquier proyecto tenemos que pelear para hacer posibles nuestras ideas, dentro de los límites de la realidad y de la posibilidad de llevarlas a cabo, pero seguramente de no ser por ese afán de conseguir realizar el proyecto original de Utzon, pese a las consecuencias burocráticas y económicas que eso podía traer, no se habría logrado este espectacular resultado patrimonio de la humanidad y pieza importantísima dentro de la historia de la arquitectura y de la ingeniería.

Como hemos podido observar, los ordenadores son una herramienta sumamente útil a la hora de hacer grandes cálculos, o de manejar cantidades considerables de datos, pero también hemos visto casos en que los ordenadores no han alcanzado el nivel de análisis al que una persona consigue llegar, lo que nos lleva a plantearnos nuestra relación con la informática y a ser críticos con ella, con los resultados que nos da y con la eficiencia que nos ofrece, siendo en

algunos casos mucho más eficiente una persona con una calculadora y un bolígrafo que el software más potente del mundo.

La historia de este proyecto refleja la necesidad de mirar por el bien general para llegar a resultados satisfactorios, por encima del bien particular, ya que eso puede entorpecer el proceso de creación de cualquier proyecto en cualquier campo. Véase por ejemplo la situación política creada tras el cambio de gobierno del estado, donde el nuevo ministro boicoteó a Utzon basándose en sus propios intereses políticos, y sin tener en cuenta lo que significaba la obra de Utzon para su ciudad. Este hecho, por ejemplo pudo llevar a la pérdida del proyecto, pero fue gracias al magistral trabajo hecho previamente por Utzon y Arup y al trabajo continuista del nuevo equipo de arquitectos e ingenieros que se consiguió un resultado sumamente correcto, con algunas variaciones al proyecto original, pero un gran resultado en esencia.

Pese a todos estos acontecimientos, afortunadamente llegamos a un resultado que marcó un antes y un después en la historia, ya que son muchos los arquitectos actuales los que han tomado a Utzon como ejemplo, y también son muchos ingenieros los que han tomado a Ove Arup como referencia y han usado software y técnicas de cálculo de estructuras empleadas por primera vez en la Ópera de Sídney.

Finalmente destacar el hecho de que, por muy innovadora que sea una idea, o por muy visionaria que una persona sea, siempre existen referentes previos, ya sean más o menos importantes. Para cualquier cosa que hagamos, y para cualquier idea que tengamos, siempre va a haber alguien que previamente haya hecho algo similar. Pese a esto, en nuestra mano está mejorar lo presente, añadiéndole a las ideas del pasado la tecnología y el conocimiento del futuro, siendo así capaces de realizar grandes creaciones novedosas y dignas de mención.

11. BIBLIOGRAFÍA

ARREDONDO VERDÚ, F., 1977. *La Obra de Eduardo Torroja*. S.l.: Instituto de España.

BENNS, M., 2007. Utzon wants to tear up floor of the Opera House - Arts - Entertainment.

DREW, P. y BROWELL, A., 2002. *Sydney Opera House : Jørn Utzon*. S.l.: Phaidon.

FEDELE, A., 2014. Proposed Perth Concert Hall Looks Sydney Opera House-
Esque.

FERRER FORÉS, J.J., 2006. *Jorn Utzon : obra y proyectos = works and projects*. S.l.: Editorial Gustavo Gili.

FROMONOT, F., 1998. *Jørn Utzon : architetto della Sydney Opera House*. Milano: Electa.

HILL, J., 2018. Renzo Piano, Bjarke Ingels, and Others «On Jørn Utzon» -. [en línea]. Disponible en: https://www.world-architects.com/en/architecture-news/film/renzo-piano-bjarke-ingels-and-others-on-jorn-utzon?utm_source=newsletter&utm_medium=email&utm_campaign=1135.

JODIDIO, P. y KOBLER, F., 2012. *Zaha Hadid 1950 : the explosion reforming space*. Köln: Taschen.

KEIDING, M. y DIRCKINCK-HOLMFELD, K., 2005. *Utzon and the new tradition*. Copenhagen: Danish Architectural Press.

LUNA, J.M., 2015. “El escándalo de la opera de Sidney” -Felix candela vs Jørn Utzon-. [en línea]. Disponible en: <http://architecture--news.blogspot.pt/2015/01/el-escandalo-de-la-opera-de-sidney.html>.

MURRAY, P., 2004. *The saga of the Sydney Opera House : the dramatic story of the*

- design and construction of the icon of modern Australia*. New York: Spon Press.
- NIETO, F. y SOBEJANO, E., 1999. *Jørn Utzon*. S.l.: Pustet.
- ORTIZ MONSALVE, V. y APEX (FIRMA), 2012. *Norman Foster : arquitectura para el mundo*. Madrid: Tikal.
- PIANO, R. y JODIDIO, P., 2005. *Piano : Renzo Piano Building Workshop ; 1966-2005*. Kln: Taschen.
- RATTENBURY, K. y RATTENBURY, K., 2002. *This is not architecture : media constructions*. S.l.: Routledge.
- RYAN, V., 2001. SYDNEY OPERA HOUSE- INSPIRED BY NATURE. [en línea].
Disponible en: http://www.technologystudent.com/prddes_2/nature1.html.
- TOMÁS, A., 2012. Historia de la Ópera de Sídney | 21 Wonders. [en línea].
Disponible en: <https://www.21wonders.es/historia/historia-de-la-opera-de-sidney/>.
- UNIVERSIDADE DO VALE DO RIO DOS SINOS, G., 2017. *Arquiteturarevista*.
S.l.: s.n.
- WATSON, ANNE. WESTON, RICHARD. GEDDES, ROBERT. DREW, PHILIP.
TAFFS, DAVID. NUTT, JOHN. GREGSON, SARAH. NOBIS, PHILIP.
HANNA, BRONWYN & HALE, P., 2013. *Building a masterpiece: the Sydney Opera House*. 40th anniv. S.l.: Powerhouse Publishing.