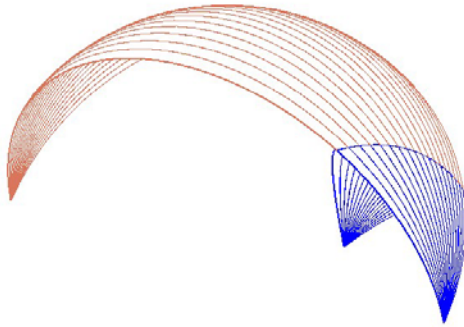


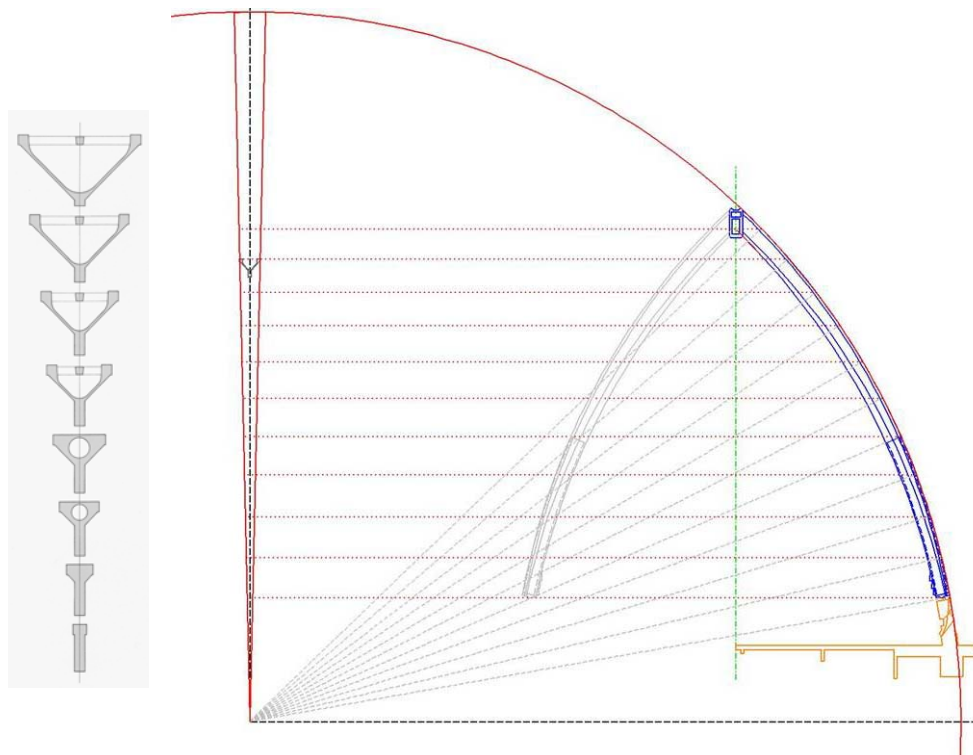
### **La forma de las costillas del intradós**

Cada costilla soporta una porción que tiene forma de gajo limitado por dos cortes meridianos de la esfera. Pero la sección transversal de estas costillas no es uniforme puesto que en el punto de apoyo es más estrecha y en la cumbrera tiene una dimensión transversal mayor.



Esquema de reparto de las costillas según meridianos. Vista de la cubierta por debajo.

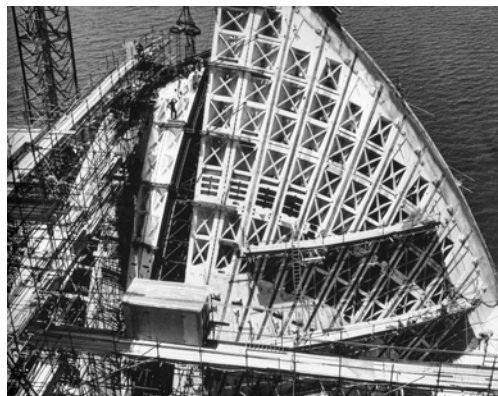
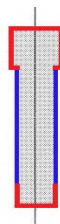
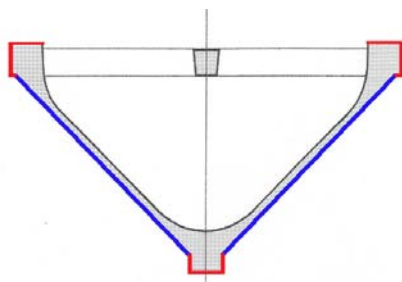
La sección en la parte baja es parecida a una "I" y la sección en la parte alta es una "Y", con lo que en la parte superior la cubierta es una lámina plegada. Cada costilla es, por lo tanto, un elemento de sección variable que resuelve la transición entre las dos figuras.



Dibujo de una costilla correspondiente a un fragmento de esfera entre dos meridianos consecutivos y las secciones transversales. En el proyecto, el dibujo de una de las parejas de costillas que forman el arco tipo se acompaña de la serie de secciones que definen la forma de cada viga en toda su longitud. El alzado de una viga no definiría la forma sin esa serie de secciones transversales.

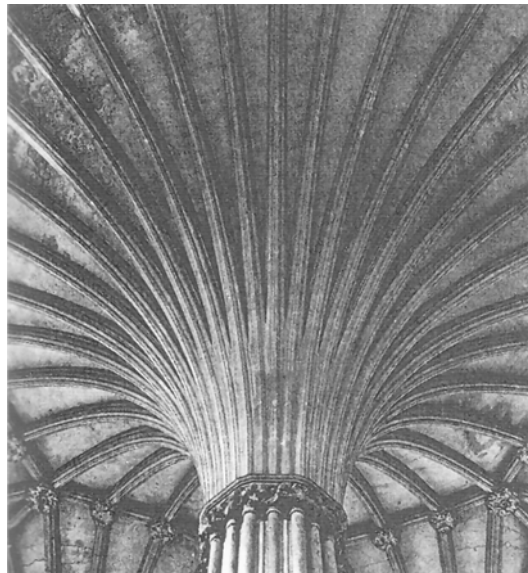
## La geometría de las costillas

Analizando en detalle cada viga se ve que esa transformación de una sección a otra se simplifica notablemente: tomando las dos siluetas extremas, hay unos segmentos del polígono de la sección que son invariables y que son el ancho de la base y el ancho de los dos laterales que deben unirse a las vigas contiguas. Esta última medida facilita la colocación de unas vigas con otras y la continuidad de los andamios.



Las secciones extremas de la costilla definen unos segmentos como invariantes y otros que se irán transformando desde uno hasta el otro siguiendo el arco de la costilla. A la derecha, un momento de la construcción donde se ven los andamios superpuestos a las costillas.

En cuanto a la medida de la base, el hecho de que sea constante desde el arranque a la cumbre ofrece una visión unitaria del intradós por parte de los visitantes y usuarios del edificio. No es de extrañar la comparación que esta imagen suscita a Yuzo Mikami con la sala capitular de la catedral de Wells, en Inglaterra, en que las nervaduras de la bóveda tienen continuidad en el pilar y esto da la imagen de abanico que tiene la cubierta de la Opera House<sup>1</sup>.



Comparación de la cubierta por debajo con la Catedral de Wells . Aquí se entiende como una losa nervada.

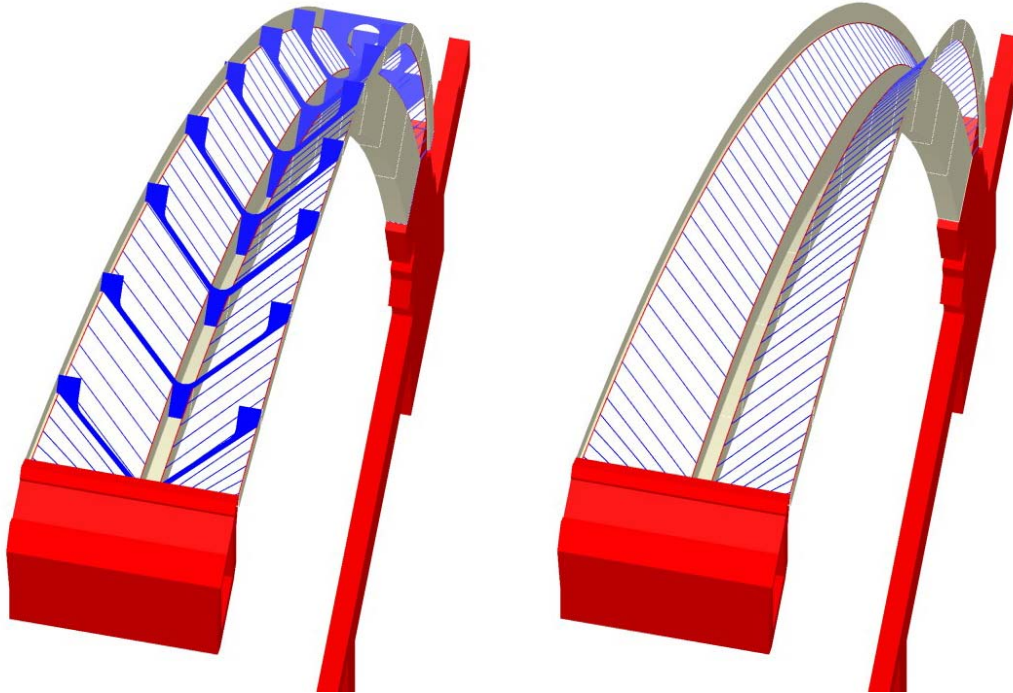
Los dos segmentos paralelos que forman el pie de la "I" inicial y de la "Y" final, forman en la viga dos caras planas paralelas entre sí. Y los dos segmentos que

<sup>1</sup> MIKAMI, Yuzo: *Utzon's Sphere. Sydney Opera House –How it was designed and built*. Ed. Shokokusha Publishing Ltd., Tokio 2001. pág.115.

corresponden al extradós forman una porción de cilindro donde se acopla el acabado exterior formando la superficie esférica.

Por último, los dos segmentos que forman los brazos de la “Y” y los dos tramos inclinados en la sección en “I” generan sendas superficies alabeadas. Se trata de dos superficies alabeadas regladas entre dos líneas curvas.

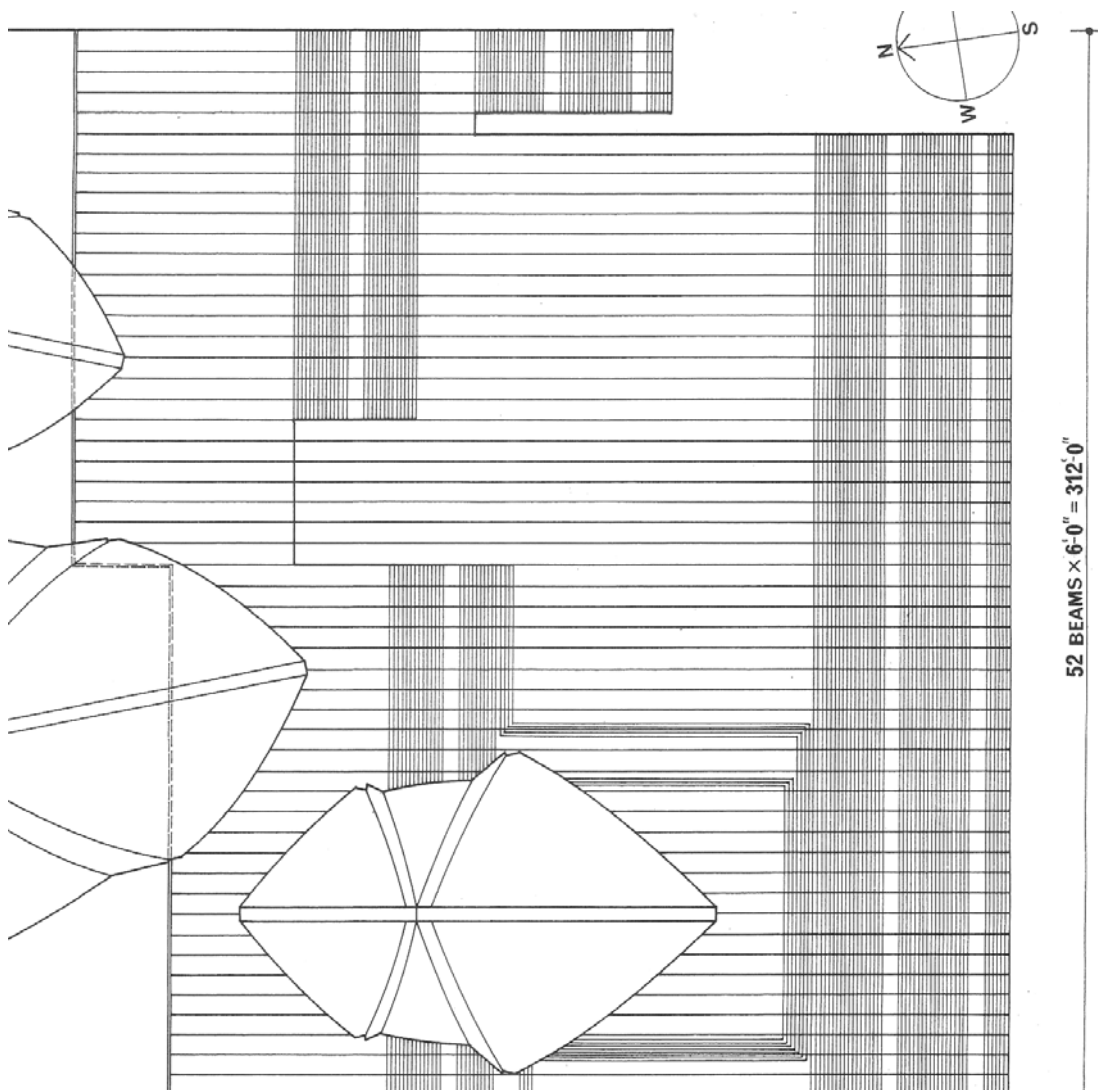
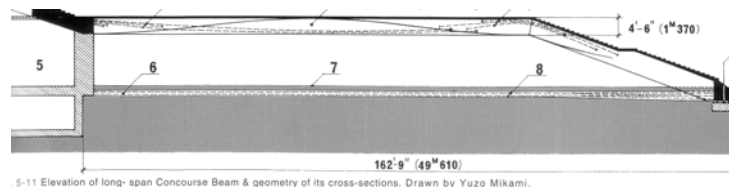
Geométricamente se puede aislar el problema de estas dos caras alabeadas. En realidad se trata de una superficie fácil de comprender si se entiende que es una reglada entre dos directrices curvas, que son de trazado elíptico, y una serie de rectas entre ambas, que serían las sucesivas secciones producidas por una familia de planos radiales a la esfera, con esas dos directrices curvas.



A partir de las secciones sucesivas se generan dos caras alabeadas regladas entre aristas longitudinales curvas.

### La forma de las vigas de la explanada

La plataforma de acceso al edificio está formada por una serie de vigas de hormigón armado de un solo trazo, sin apoyos intermedios. Esta decisión fue tomada por Utzon para reforzar la idea compositiva del proyecto. Quiso reproducir en la construcción el concepto que tenía de este podio. De manera que las vigas que forman la parte horizontal se doblan literalmente para formar las escalinatas.

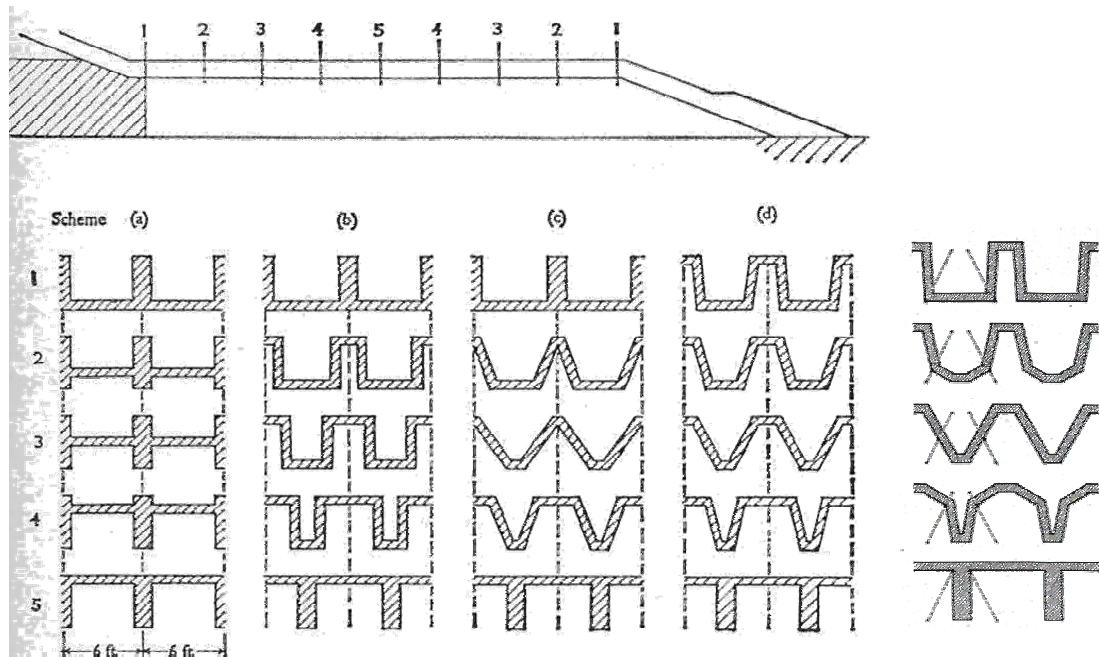


Planta y sección de la explanada.

Esta contundencia en el diseño aún fue más rotunda por la voluntad de que la superficie horizontal de la explanada superior no se viera modificada por la formación de pendientes. Utzon resolvió el problema de la evacuación del agua con la forma de las vigas: la sección en el centro del tramo horizontal es una "T" y la sección en los

extremos es una "U", con lo cual se conforma un canal de evacuación que evita los molestos desagües por debajo.

El planteamiento inicial del diseño de este forjado se hizo a partir de unas vigas de canto importante y una losa transversal que las trababa. Esta lámina se situaba arriba en el centro del vano y abajo en los extremos. El diseño se fue cambiando buscando algo más que la solución técnica a los problemas estructurales y constructivos. De este proceso quedan las sucesivas versiones que se fueron produciendo.

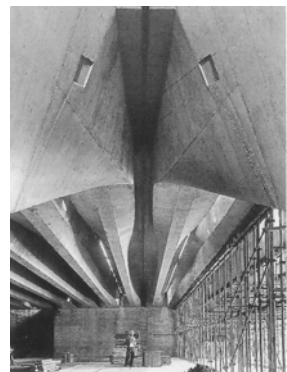
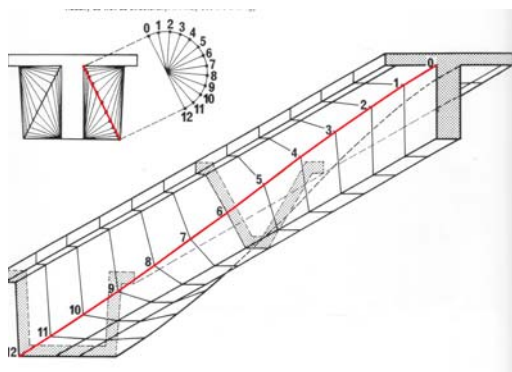


Cinco versiones del diseño del forjado de la explanada.

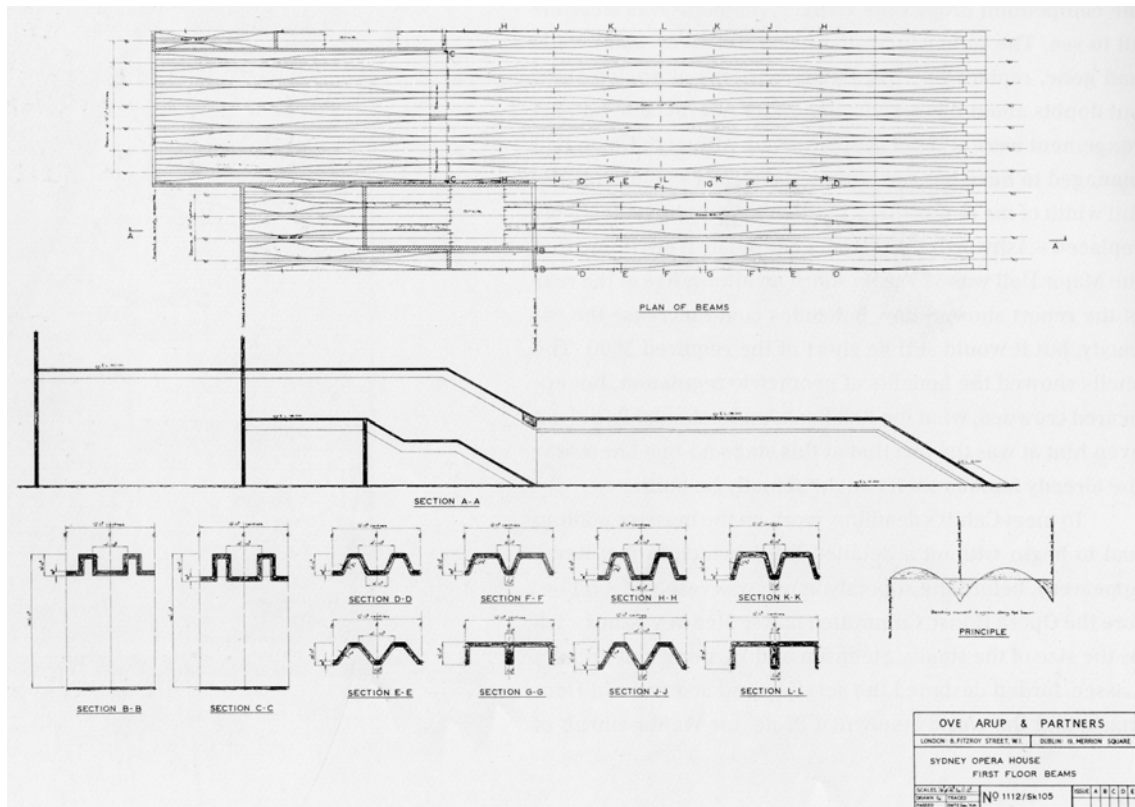
Todo el edificio muestra los elementos de hormigón armado desnudo, sin ningún tipo de acabado o recubrimiento superficial, por lo tanto era importante cuidar la forma del encofrado a la que se confiaba la cualidad plástica final.

La forma de estas vigas fue objeto de estudio detenido por parte de Utzon, aunque no dio tanto trabajo como la cubierta. Una vez planteadas las secciones central y extremas había que resolver la transición entre una y otras.

Los dibujos de las diferentes versiones dan idea de que las soluciones posibles que podían haberse ajustado al requerimiento funcional de partida eran muchas. Sin embargo, Utzon buscaba poder sacar la máxima fuerza expresiva que pudiera ofrecer la forma. La solución final es una figura delimitada por aristas sinuosas que suavizan la angulosidad inicial de la pieza constructiva.

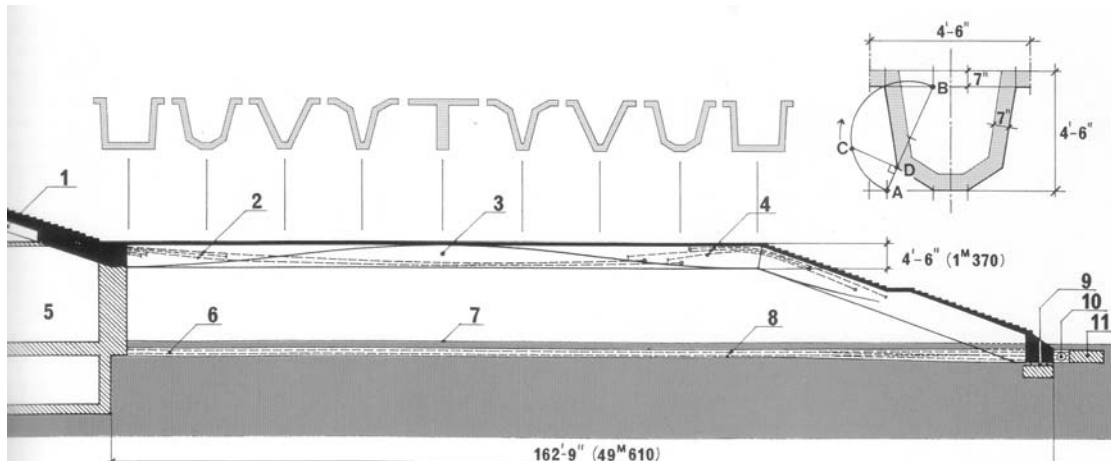


Vista del techo durante la construcción.



Plano de la versión definitiva.

### Geometría de las vigas



El trabajo de diseño de las diferentes soluciones partía de haber fijado ciertos elementos de las secciones iniciales: los segmentos laterales extremos que unen una viga con otra son iguales en toda su longitud y la distancia entre ambos lados es constante. La anchura del segmento inferior del pie de la T se mantiene también fija.



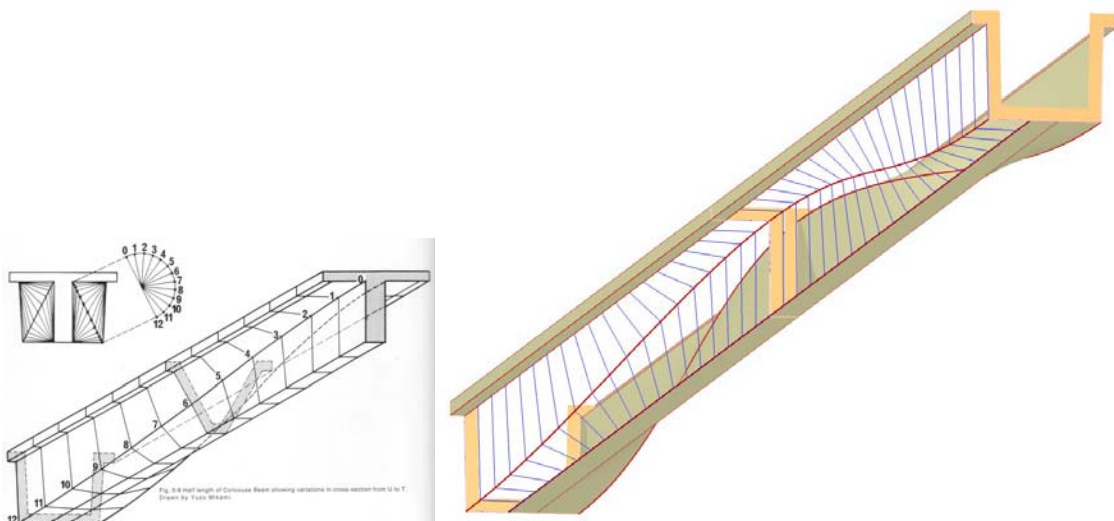
Los segmentos que quedan invariantes a lo largo de toda la biga se destacan en rojo en azul los que forman las caras alabeadas.

Los elementos variables son, pues, sólo dos segmentos a cada lado de la viga: uno vertical que se convierte en horizontal y otro horizontal que se convierte en vertical. Este desplazamiento de los segmentos genera una superficie reglada de plano director, ya que los segmentos rectos siempre se mantienen paralelos a un plano perpendicular al eje de la viga.

La relación entre la longitud de la viga y la situación del vértice móvil respecto de la sección puede dar varias soluciones, es decir, la posición de los segmentos variables de una sección concreta varía en función del punto donde se produzca esa sección.

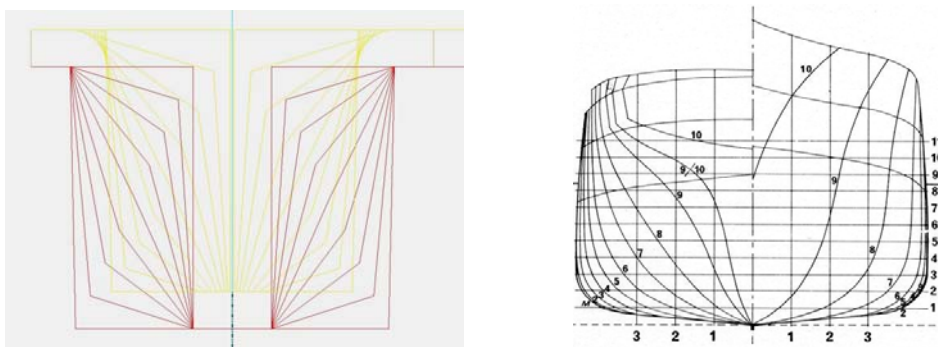
Si el vértice de inflexión entre los dos tramos rectos va variando de manera lineal, en relación con la longitud de la viga, entonces la superficie que resulta es un paraboloides hiperbólico; y en consecuencia la arista longitudinal que se forma es una línea recta.

Pero si el movimiento de este desplazamiento desde una posición a otra, sigue la proyección de un movimiento circular (tal como se explica en el dibujo final), entonces se trata de una superficie conoide ya que se trata de una superficie reglada entre una directriz curva, que es senoide, y una recta. Y más concretamente sería un conoide recto puesto que las generatrices se producen por la familia de planos paralelos cuya orientación es perpendicular a la directriz recta.



El primer dibujo procede del proyecto y el segundo es el modelo que se hizo para su análisis y representa la viga completa con la sección T en el centro y la sección en U en los extremos.

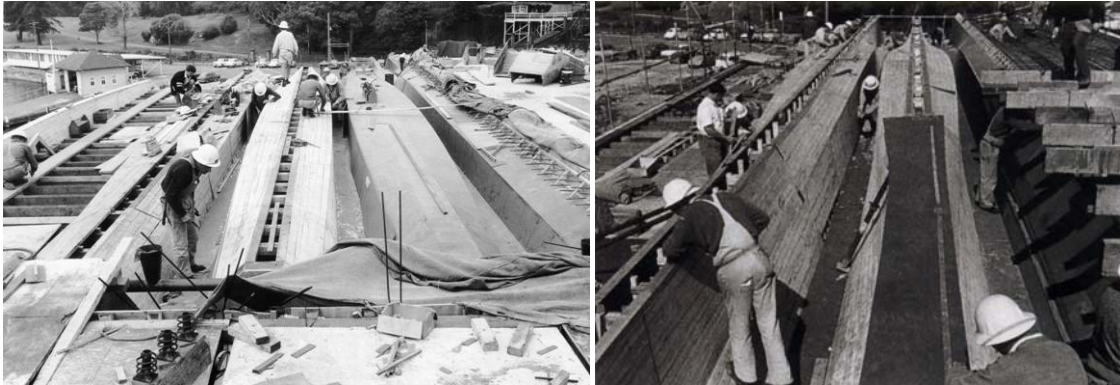
El diseño de estas vigas se resolvió, desde el inicio, en el dibujo de su sección transversal, no únicamente de las dos secciones extremas superpuestas sino de todas las secciones parciales equidistantes, igual que el plano de formas del casco de los barcos.



Comparación del dibujo de las secciones sucesivas de la viga con el plano de formas de un buque.

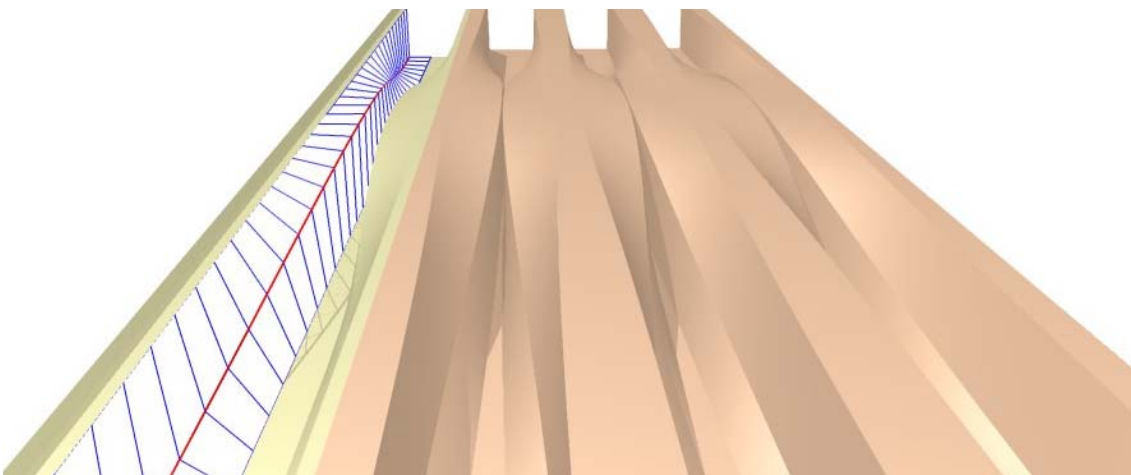
Es curioso notar esta similitud de la mano de una persona que estuvo muy relacionada con la construcción de barcos. Utzon trabajó en los astilleros de su padre en Dinamarca, y es fácil suponer que la traducción de la forma tridimensional de estas vigas se estudiara y se resolviera en la superposición de secciones transversales a la manera en que se diseñan los cascos de barco.

La construcción de los encofrados de este forjado es muy parecida a la construcción de cascos de canoas unidos entre sí. Basta ver las fotografías de este estadio de la obra para darse cuenta de esta analogía: el armazón que daba forma al encofrado era como las cuadernas de un casco.



Dos vistas de la construcción de los encofrados de las vigas.

La diferencia con los barcos es que hay una ley geométrica que define la forma de la arista sinusoide. Esta ley está descrita en esa vista transversal de la figura y es crucial para comprender cómo es la transformación de una sección en otra. Los barcos parten de una figura tridimensional dada y las diferentes secciones la describen; en el caso de estas vigas la forma es la consecuencia de unas figuras de partida y una ley geométrica de transición. El trabajo que Utzon realizó para encontrar una forma que la satisficiera estuvo recompensado por el resultado que se puede apreciar en el techo del acceso de vehículos.

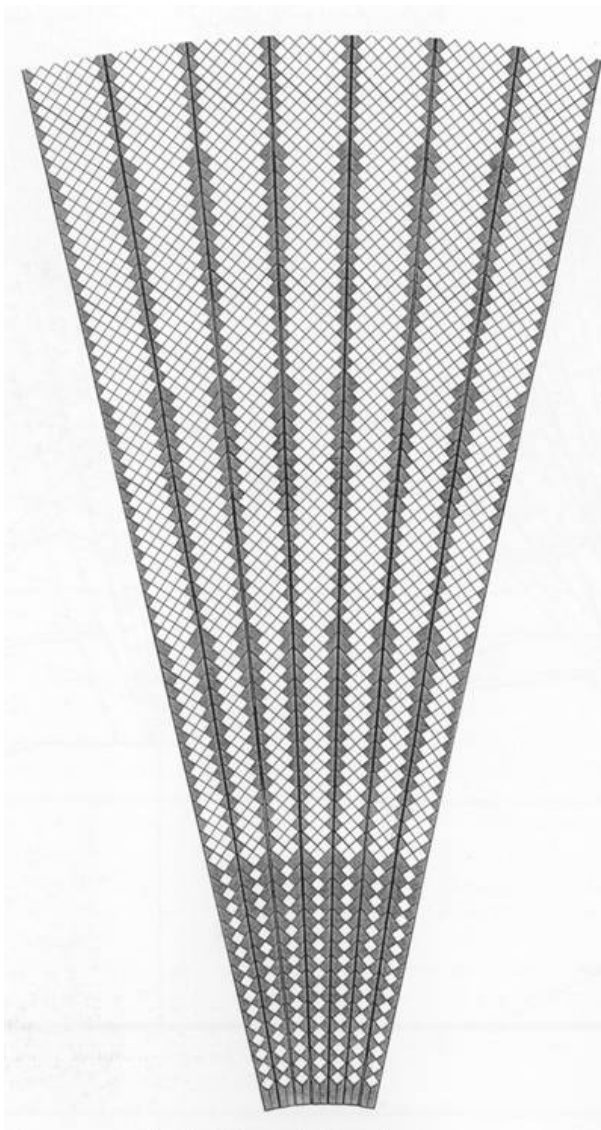


Vista del modelo virtual.



### **El recubrimiento de cerámica de la cubierta**

Para seguir con la idea de cubiertas ligeras, Utzon quiso recubrir las superficies curvas de las conchas como los jarros de cerámica china. La dificultad que imponía la magnitud de la cubierta se convertiría en ventaja al escoger un tamaño de pieza lo suficientemente pequeño. Los patrones de despiece quedaron reducidos a uno desde el momento en que se adoptó la forma esférica para el diseño de las conchas. Asimismo se pudo recubrir toda la superficie con dos tipos de baldosa.



La pieza escogida fue una baldosa cuadrada blanca, extrusionada, fabricada en Suecia, cuya cara vista tiene un acabado vidriado brillante pero con una textura con un cierto relieve, de manera que no refleja la luz como un espejo sino que ofrece un brillo tintineante no muy lejano al brillo de la piel<sup>2</sup>. La pieza trapezoidal que resuelve el ajuste con la línea meridiana del gajo de cada costilla es completamente lisa pero mate en lugar de brillante.

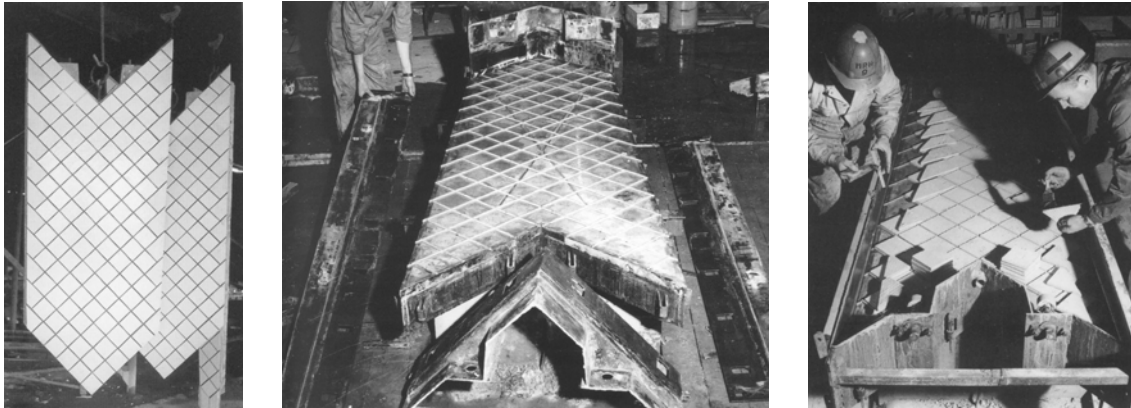
La colocación de las baldosas es a 45° respecto a la línea meridional de simetría de cada gajo. Una tira central de piezas da la pauta al despiece y se sigue la cubrición lateralmente a esta primera tira mientras cabe la pieza entera. Los márgenes laterales restantes se completan con las piezas trapezoidales. El juego de dos brillos distintos va formando un dibujo en zigzag que permite tener una idea de dimensión de las diferentes cubiertas. La construcción se resolvió mediante unas placas prefabricadas, de manera que las baldosas se colocaron en el fondo, a modo de encofrado perdido. Una vez acabadas, las placas se colocaban en su lugar con la ayuda de grúas. El tamaño de estas placas debía ajustarse a un peso razonable, por esto, las más bajas son más largas y estrechas y las superiores son anchas y cortas. La junta entre ellas se hizo en forma de V de manera que las piezas del embaldosado quedaran enteras. Esta línea quebrada hace un dibujo en zigzag transversal a los meridianos.

Dibujo esquemático del despiece para todas las conchas.

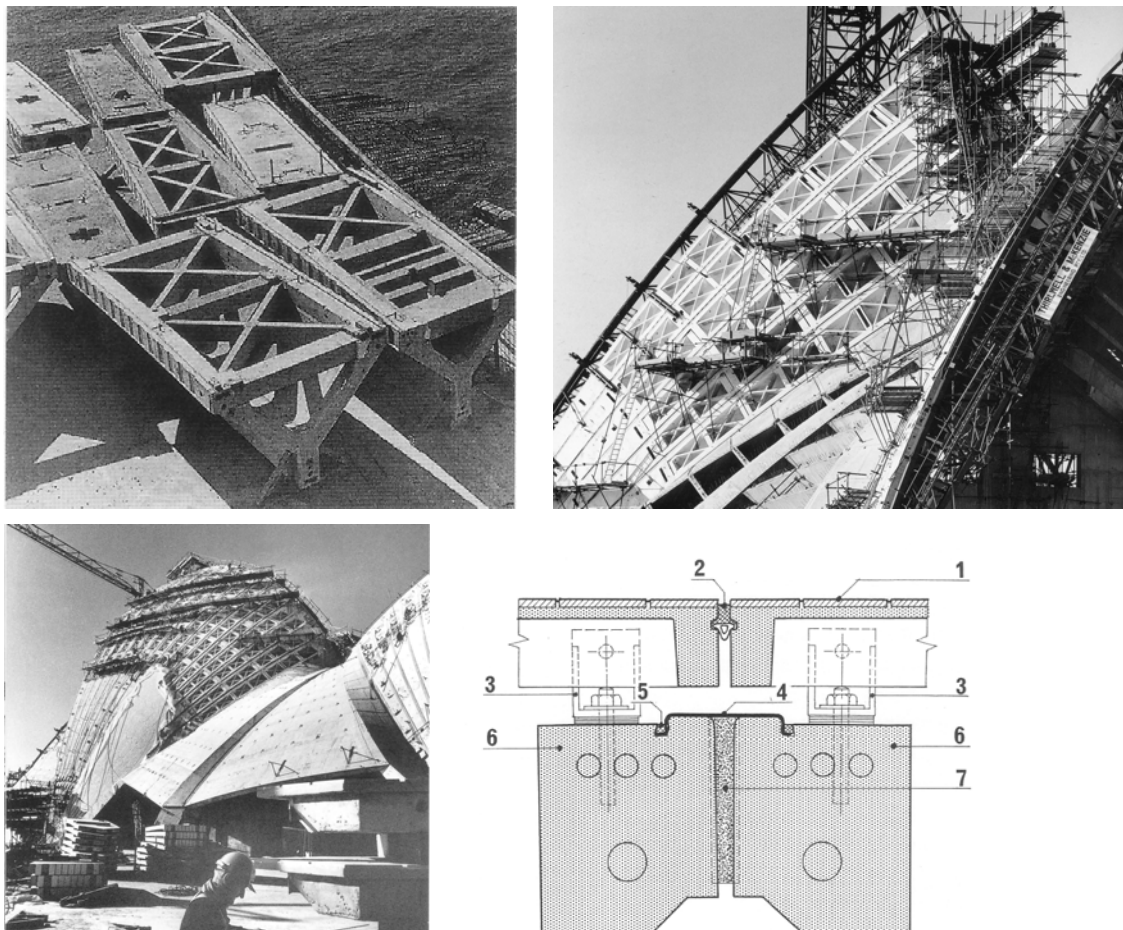
Este sistema de prefabricación en taller evitaba tener que colocar el

<sup>2</sup> MIKAMI, Yuzo: *Utzon's Sphere. Sydney Opera House –How it was designed and built*. Ed. Shokokusha Publishing Ltd., Tokio 2001. pág.82.

recubrimiento in situ, cosa que habría sido muy dificultosa para los operarios y aseguraba un acabado perfecto tanto en la precisión de la colocación como en la sujeción fiable de cada baldosa al soporte<sup>3</sup>.



Construcción en taller de los paneles prefabricados del recubrimiento.



Los fragmentos de costillas construidos a pie de obra se colocaron en su lugar y sobre ellos se fueron montando las placas del recubrimiento totalmente acabadas. El detalle constructivo adjunto explica la unión de las placas (1) con las costillas (6).

<sup>3</sup> Este procedimiento había sido usado por Gaudí en los recubrimientos de los techos de la sala hipóstila del Parque Güell de Barcelona, como en otros lugares en que la colocación manual habría requerido andamios difíciles de montar. También es comparable por el hecho de haber escogido una pieza pequeña para la cubrición de superficies no planas.

