



UNIVERSITAT
POLITÈCNICA
DE VALÈNCIA



ESCUELA TÉCNICA
SUPERIOR DE
ARQUITECTURA

VIGAS GERBER:

COMPORTAMIENTO ESTRUCTURAL Y

ESTUDIO DE LA TIPOLOGÍA ARQUITECTÓNICA.

Alumno: Ana Ezquerro Eguizábal.

Tutor: José Juan Monfort Leonart.

Departamento: Mecánica de los Medios Continuos y Teoría de Estructuras.

Trabajo Final de Grado Julio 2016.

ÍNDICE

ÍNDICE	1
OBJETO DE ESTUDIO	2
RESUMEN	3
DE LA VIGA AISLADA A LA VIGA GERBER	4
ASPECTO HISTÓRICO CONSTRUCTIVO	11
CASOS DE ESTUDIO	14
THE FORTH BRIDGE	15
Proceso constructivo.....	17
Análisis estructural.....	19
MUSEO GEORGES POMPIDOU	23
Proceso constructivo.....	25
Análisis estructural.....	29
HEATHROW AIRPORT-TERMINAL 5	32
Análisis estructural.....	34
AEROPUERTO DE STANSTED	38
Análisis estructural.....	39
PALAZZETTO DELLO SPORT	43
Análisis estructural.....	45
MAGAZZINI GENERALI WAREHOUSE	48
Análisis estructural.....	49
CONCLUSIONES	51
BIBLIOGRAFÍA	52
Bibliografía.....	52
Webgrafía.....	53
Figuras.....	53
Imágenes.....	53

OBJETO DE ESTUDIO

Ciertas construcciones arquitectónicas requieren unas características especiales -ya sea por sus luces, por las cargas que deben soportar o por cualquier otra variable-. Para dar cabida a esas prescripciones de proyecto, se debe de analizar el problema y buscar y estudiar las diferentes soluciones.

El concepto de viga Gerber –así como su construcción y análisis estructural- surgió como una búsqueda por conseguir un comportamiento de la viga continua que pudiesen dar una mejor respuesta a las singularidades que algunos proyectos requerían.

Las leyes de diagramas y la capacidad portante de una viga continua depende de diversas cuestiones, entre ellas, y a las que daremos una mayor importancia: la carga que actúa sobre las vigas, las luces entre los diferentes vanos, y los posibles tipos de apoyos. Entendiendo que otras propiedades como el material, las dimensiones de la viga, así como sus inercias serán constantes en el estudio. Con estas determinaciones, se estudiarán los esfuerzos flectores de una viga aislada y una continua pasando de ella a la viga Gerber, para entender las características de ésta, que es el objeto del estudio.

El estudio del comportamiento estructural en la fase inicial de proyecto que aquí se replantea se centrará en diagramas con cargas uniformemente distribuidas, debido a que es lo más frecuente en la práctica de este tipo de vigas. Por último, se expondrán diferentes casos que incluyan esta tipología arquitectónica, que por cuestiones estéticas, funcionales o estructurales han sido importantes en la historia de la arquitectura.

RESUMEN

Heinrich Gerber aplicó en 1866 una teoría que consistía en subdividir la viga continua a través de rótulas –las cuales definen un punto de momento flector cero-. Este tipo de vigas con articulaciones intermedias es lo que ahora se conoce como Viga Gerber.

La posición donde se ubican estas rótulas permite incidir en el comportamiento de la viga; por lo que no sólo se usa de forma directa en algunas estructuras, sino que en algunos proyectos se puede idealizar una viga real asimilándola a una viga Gerber, cuyo isostatismo permite un cálculo aproximado sencillo.

Palabras clave: viga, rótula, isostático, momento, comportamiento.

In 1866 Heinrich Gerber applied a theory that consisted in a subdivision of a continuous girder by articulations - which define a point of zero bending moment. Nowadays, these kind of beams with intermediate joints are known as Gerber Beams.

The position of these articulations enables us to deal with the beam performance. It is not employed just in a straightforward way in some structures, moreover in some projects an idealisation of a simple beam could be done to simulate a Gerber beam, whose isostatism allows for a simple approximated calculation.

Keywords: beam, articulation, isostatic, moment, performance.

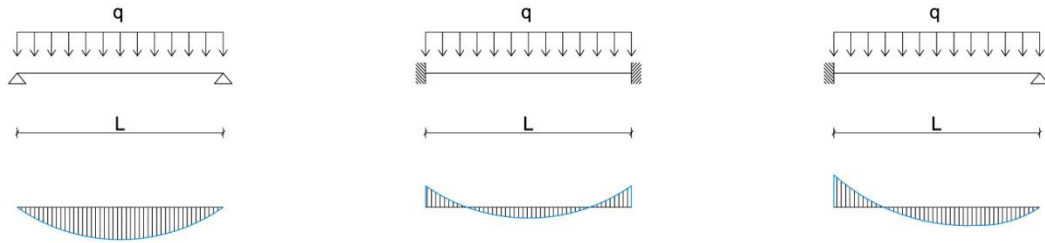
Heinrich Gerber va aplicar en 1866 una teoria que consistia en subdividir la biga continua a través de ròtules – les quals definien un punt de moment flector cero-. Aquest tipus de biga amb articulacions intermèdies és el que ara es coneix com biga Gerber.

La posició on s'ubiquen aquestes ròtules permet incidir en el comportament de la biga; per tant no sols s'utilitza de forma directa en algunes estructures, sinó que en alguns projectes es pot idealitzar una biga real assimilant-la a una biga Gerber, el isostatisme de la qual permet un càlcul aproximat senzill.

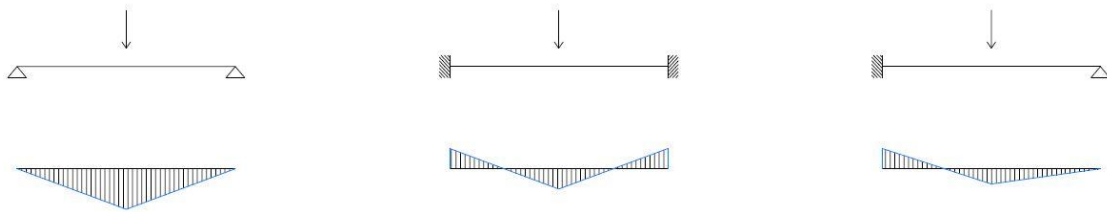
Paraules clau: biga, ròtula, isostàtic, moment, comportament.

DE LA VIGA AISLADA A LA VIGA GERBER

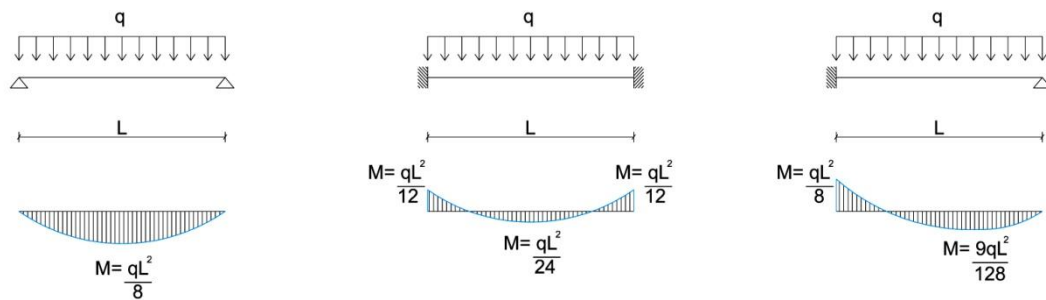
En la viga aislada puede variar la longitud, las cargas que actúan -puntual o distribuida-, y los apoyos. En este apartado, se indica la influencia del tipo de carga y de apoyo en los diagramas de flectores.



[Figura 1. Diagramas de momento flector con carga uniformemente repartida]

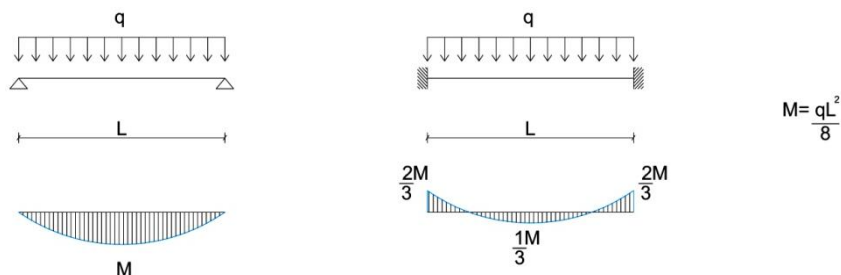


[Figura 2. Diagramas de momento flector con carga puntual]



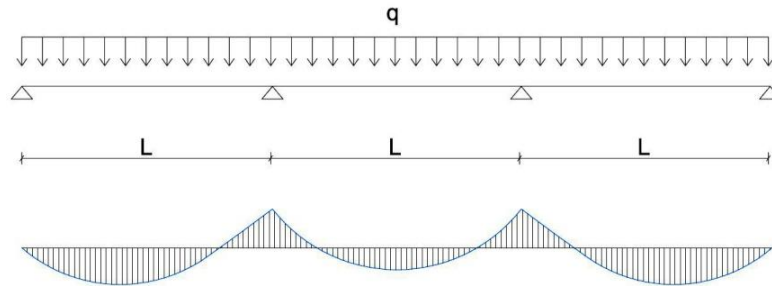
[Figura 3. Diagramas de momentos flectores]

Para carga repartida, en la Figura 3, se detallan los valores de los momentos máximos. Comparando la viga biapoyada con la biempotrada, se deduce que la segunda tiene una ventaja respecto a la primera, ya que reduce los momentos máximos que solicitan a la viga, asumiendo un valor de $2/3M$ en los extremos y $1/3M$ en el centro. [Figura 4]

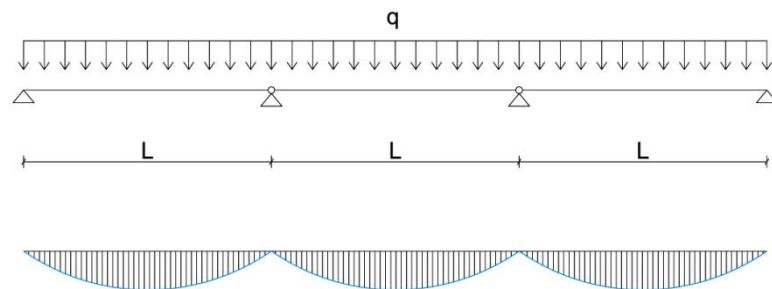


[Figura 4. Comparación de viga biapoyada y biempotrada.]

Las vigas continuas [Figura 5], -sea aquí el ejemplo de tres vanos, pero pudiéndose hacer equivaler a una viga de tantos tramos como se quiera- presenta ventajas respecto a una sucesión de vigas aisladas [Figura 6]. En las vigas aisladas la plastificación de una sección produce el colapso de toda la estructura. En cambio, en una viga continua, aunque se plastifique alguna sección, la viga en conjunto sigue presentando resistencia hasta que se convierta en mecanismo produciéndose el colapso.

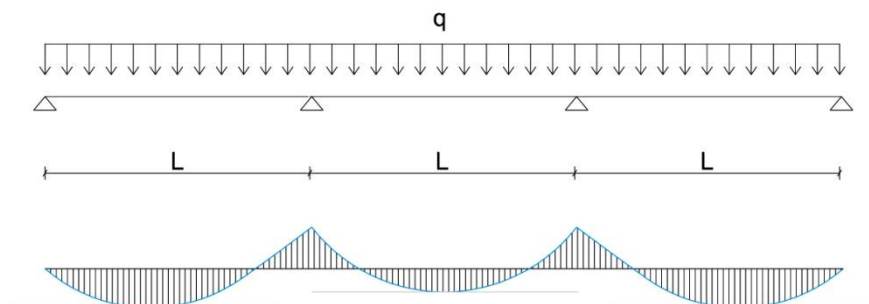


[Figura 5. Viga continua de tres vanos.]

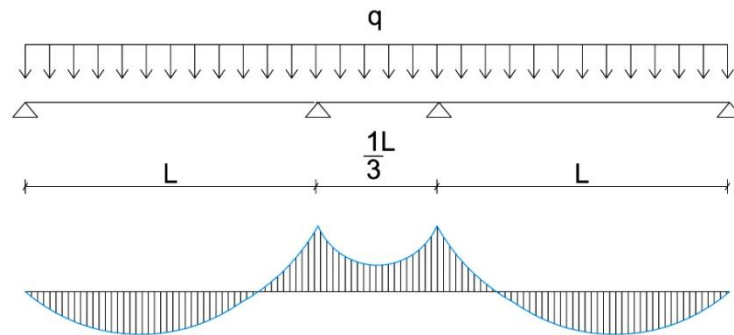


[Figura 6. Sucesión de vigas aisladas.]

Teniendo en cuenta el comportamiento de las vigas continuas, y si los tramos tienen longitud similar, el momento máximo se dará en los vanos extremos [Figura 7]; si la luz en cada vano es amplia habrá momentos positivos y negativos en cada tramo, pero en cambio, si la distancia entre apoyos es corta, como ocurre en la Figura 8, todos los momentos serán negativos en ese vano de la viga.

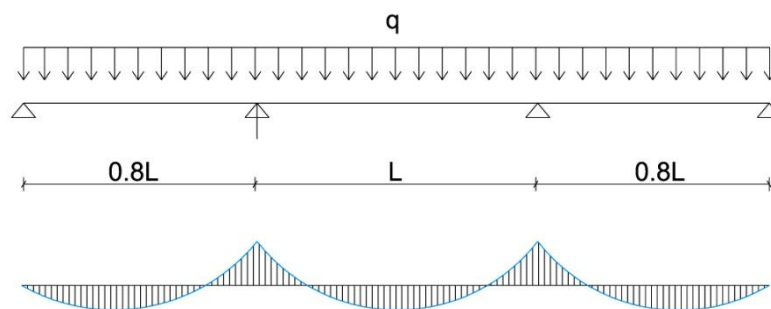


[Figura 7. Viga continua de tres vanos con luces similares.]



[Figura 8. Viga continua de tres vanos con diferentes luces.]

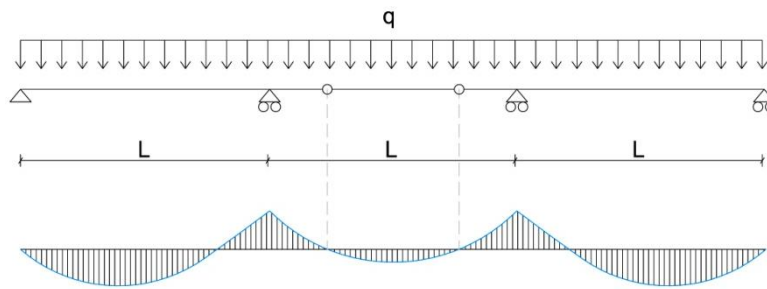
Una buena práctica sería reducir las luces en los vanos extremos, para así tener un valor de momento máximo similar en todos los tramos. [Figura 9]



[Figura 9. Viga continua reduciendo luces de vanos extremos.]

Al comparar la viga continua con una de apoyos intermedios, es digno de mencionar un inconveniente que afecta a la horizontalidad y rigidez de la viga. Con esto se quiere decir que, en una viga continua cualquier pequeño desnivel que pueda suceder en algún apoyo – algunas veces inevitable por la situación o las condiciones de cimentación del proyecto- afecta de manera significativa en las tensiones, generando grandes variaciones de éstas, y por lo tanto, teniendo gran influencia en toda la longitud de la viga. Ésta trabaja bien debido a su rigidez, pero cuando un fallo o defecto ocurre en algún apoyo, ésta experimenta un cambio en su comportamiento que generalmente resulta desfavorable. En cambio, las vigas con apoyos intermedios responden mejor a las alteraciones o desniveles que puedan darse.

Para evitar este inconveniente, Heinrich Gerber (1832-1912) aplicó en 1866 una teoría, ya usada de alguna manera en otros proyectos históricos, basada en subdividir la viga continua a través de articulaciones. Estos nuevos tramos serían como vigas que podrían estar simplemente apoyadas [Figura 10], otras apoyadas con voladizos a ambos lados, o también apoyadas únicamente sobre un extremo trabajando como ménsulas. Este tipo de vigas con articulaciones intermedias para pasar de una viga hiperestática a una isostática es lo que ahora se conoce como viga Gerber.



[Figura 10. Viga Gerber.]

Las vigas con rótulas intermedias, se usan además de para salvar desniveles en los apoyos, también para que las variaciones de temperatura, retracciones o viento, entre otras, no impliquen problemas significativos en el comportamiento de la viga –al contrario de lo que ocurre en una viga continua-. Con este nuevo sistema de viga, es obvio que una variación en el nivel de cualquier apoyo no producirá cambios significativos en las sollicitaciones de la viga [Figura 11] ⁽¹⁾.



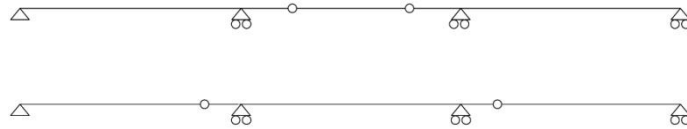
[Figura 11. Variaciones de nivel en los apoyos. Izquierda viga hiperestática, derecha viga isostática.]

Debido a que el momento en las rótulas es cero, se puede hacer variar el comportamiento de la viga situando las articulaciones en un punto o en otro. Según donde se sitúen éstas, la estructura cambia en mayor o menor medida, por lo que se debe conseguir no sólo que los diagramas sean los más convenientes, sino que la estructura y la idea proyectual lleguen a un acuerdo; ya que al fin y al cabo la estructura crea el espacio arquitectónico.

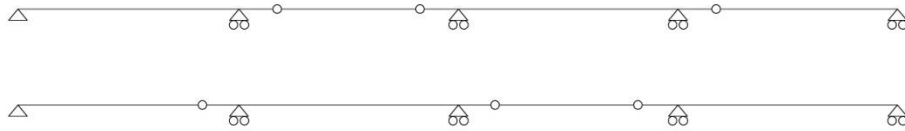
La subdivisión de la viga continua para dar lugar a una viga isostática, a través de rótulas, puede hacerse con múltiples disposiciones. Respecto a la cantidad de articulaciones a establecer; la regla general es que el número máximo de articulaciones que es posible situar en la viga siempre ha de ser el número de apoyos menos dos. De otro modo se podría decir que el número mínimo de apoyos es el número de articulaciones más dos. Además, si en el tramo exterior se desea situar alguna articulación sólo se puede incluir una.

Ahora bien, la ubicación de las articulaciones se puede hacer de varias formas pero consiguiendo siempre que el sistema se sostenga. Como norma general, en un vano se sitúan rótulas, y en el siguiente no; siendo el número máximo de articulaciones por vano de dos, con la excepción de que en los extremos sólo se puede situar una. En la Figura 12 se ejemplifica dos vigas Gerber de 3 vanos, cuya regla para situar las rótulas se puede equiparar a tantos vanos como se tengan. Las Figuras 13 y 14 son ejemplos de 4 y 5 vanos respectivamente

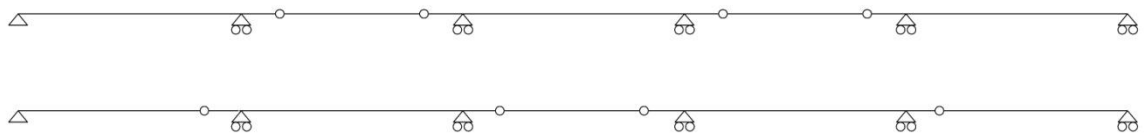
(1) Giada, Daniele 2003. *La trave Gerber*. Corso di Statica e Stabilità delle costruzioni murarie. Universidad de Catania, Italia.



[Figura 12. Viga Gerber de 3 vanos]



[Figura 13. Viga Gerber de 4 vanos]



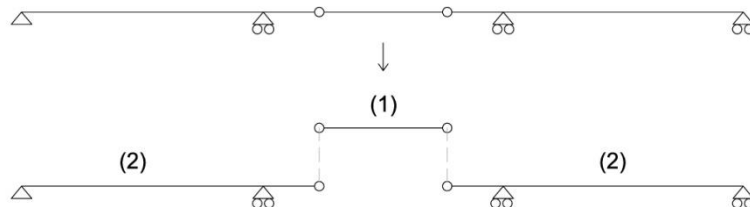
[Figura 14. Viga Gerber de 5 vanos]

Según como sea la estructura, puede ocurrir como en la Figura 15 en la que se sitúan articulaciones en dos vanos seguidos –los cuales nunca sean exteriores-, siempre y cuando se logre el equilibrio del conjunto, como en este caso que el apoyo central es fijo. Un ejemplo de este tipo es el Forth Bridge que se estudia más adelante.



[Figura 15. Viga Gerber con rótulas en dos vanos seguidos.]

En estas vigas, al introducir las rótulas, siempre se crea un sistema de vigas que dan apoyo y vigas apoyadas. Para su resolución, el desarrollo se hace en orden decreciente de dependencia estática, es decir, se debe de empezar con las que están apoyadas(1) –que también se llaman suspendidas- para así poder seguir con las que dan apoyo(2), pues son las que reciben las cargas a través de las articulaciones. [Figura 16] Mientras que el diseño se realiza en este orden, en la construcción se empieza a levantar la obra por las partes que soportan la estructura y así se crean unos puntos de sustentación de los tramos suspendidos.

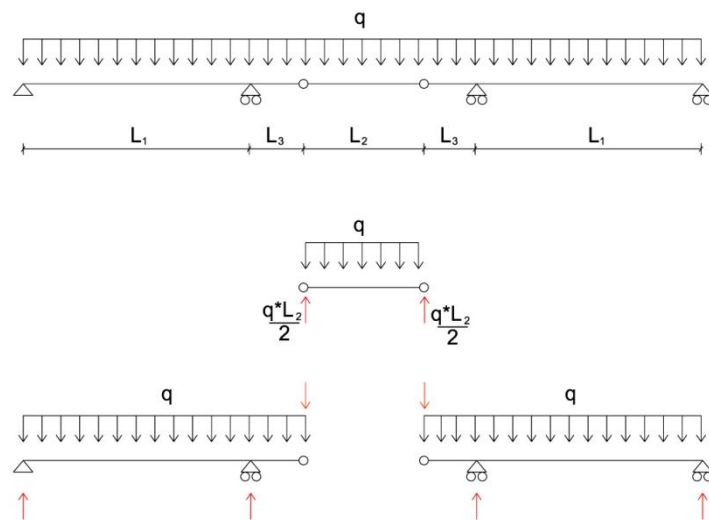


[Figura 16. Descomposición de una viga.]

La combinación de número de rótulas respecto a apoyos no es infinita, como sí pasa con la distancia entre apoyos. Ya que la posición de las articulaciones permite incidir en el comportamiento de la viga, no se debe olvidar el importante papel que

representa la situación exacta en donde se ubican las rótulas dentro del conjunto. Eso significa que según a la distancia a la que se sitúen de los apoyos, se puede lograr que los momentos máximos y mínimos sean similares -lo que es conveniente para el dimensionado de la viga y del proyecto-, o que se logre un acuerdo entre una estructura apropiada y el espacio arquitectónico que se crea.

Como se ve en la Figura 17, la distancia L_3 puede variar según donde se sitúen las articulaciones, lo que haría cambiar L_2 . Por lo tanto, según cuales sean los valores de los distintas L , la relación entre L_1/L_3 y L_2/L_3 varía, lo que lleva a la idea de que las relaciones entre las luces pueden ser infinitas. Esta relación de luces, influye en la distancia entre los apoyos, y por lo tanto también en las reacciones de los apoyos. Bajo la condición de carga uniformemente distribuida, los apoyos reciben las cargas de los tramos de viga que soportan, y además las cargas de las vigas apoyadas, que se transmiten a éstos a través de las rótulas. [Figura 18] Las reacciones de los apoyos, serán de tracción o compresión según las cargas que actúen, las luces y el tipo de apoyos en cada caso, con la finalidad de que se establezca el equilibrio del sistema.



[Figura 17. Relación de luces y reacciones.]

Si el proyecto requiere que las luces entre apoyos sean iguales, L_2+L_3 será igual a L_1 . Lo que implica que L_3 será $0.213L_2$, para así conseguir el equilibrio estático de momentos flectores. Esto significa que el tramo correspondiente a la longitud L_3 es pequeño en comparación con el tramo de la viga L_2 , lo que a la hora del proyecto constructivo puede ser un problema, por la diferencia de dimensiones, problemas de transporte u otras cuestiones. Por ese motivo, una relación buena sería aquella en la que L_1 sea mayor que L_2+L_3 . Siguiendo esta recomendación, y para conseguir que los momentos positivos y negativos sean parecidos, una buena práctica es que L_3 sea $1/3$ ó $1/4$ de L_2 .⁽²⁾

Conocido todo lo anterior, se entiende que la viga Gerber es aquella que está formada por vigas apoyadas y vigas que dan apoyo, pero todas ellas formando un conjunto a través de unas rótulas de unión. Contando con la especial característica de poder modificar una viga en isostática y además poder decidir la posición de las articulaciones para influir en el comportamiento de la viga, y que así, el conjunto se asemejen a lo deseado en la idea arquitectónica del proyecto.

A pesar de las recomendaciones, en la práctica, muchas obras arquitectónicas no siguen las sugerencias que se han prescrito para el diseño de este tipo de vigas desde la historia de la arquitectura, y por eso mismo muchas han marcado un nuevo camino o un hito –como el Museo Georges Pompidou al salvar una distancia de 48 metros libre de estructura. Sin olvidar también, aquellas obras que son trascendentes por introducir nuevos materiales en su tiempo con el que construir obras características de viga Gerber –como el puente Forth Bridge-, o por versionar este tipo de viga según cada idea de proyecto –el aeropuerto de Heathrow hace variaciones estructurales que luego se estudian-.

Este tipo de viga además, ha influido en proyectos en los que no existe una viga Gerber, pero en los que el cálculo se puede aproximar mediante este concepto; puesto que saber que hay un punto donde el momento es cero, permite calcular la estructura como si tuviese rótulas –aunque en verdad no existan- para diseñarla como si fuese isostática y facilitar el diseño –como el Palazzetto dello Sport de Roma-.

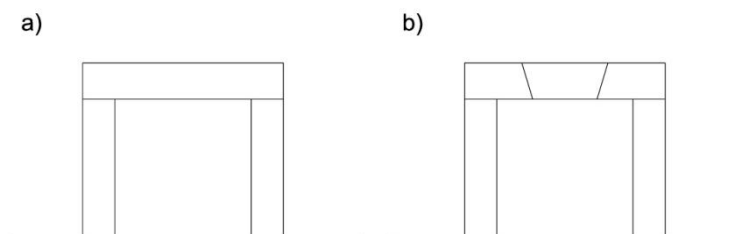
(2) Pizzettu, Giulio y Zorgno Triscioglio, Anna Maria 1980. *Principi Statici e forme Strutturali*. Torino, Unione Tipografico-Editrice Torinese (UTET)

ASPECTO HISTÓRICO CONSTRUCTIVO

La viga Gerber no se puede decir que fuese un nuevo tipo de viga que Heinrich Gerber estableciese en 1866, sino que gracias a los conocimientos y a las teorías que se entendían en esa época se pudo llegar a este modelo.

En la antigüedad, los maestros de obra empleaban en sus pórticos, en sus dovelas o en sus foros, entre otros levantamientos, un sistema cuyo esquema es un precedente constructivo a la viga estudiada. La relación entre ambos métodos es apreciable visualmente, aunque el problema que se trataba de resolver no llegase a situarse en el mismo punto.

En su época, la cuestión que se daba en este tipo de construcciones era la de salvar luces largas con piezas cortas; y se resolvía con el posicionamiento de unos elementos cuneiformes unos sobre otros. En aquel entonces posiblemente no conocieran sobre tensiones, reacciones internas o nudos de conexiones como ahora se domina sobre esta materia; pero de igual modo, encontraron en este procedimiento la solución constructiva. La Figura 18.a muestra un sistema en el que con una sólo pieza se logra salvar una luz, mientras que la figura 18.b muestra las piezas que se usaban para conseguir la distancia deseada entre soportes.



[Figura 18. a) Dintel biapoyado b) Nuevo sistema constructivo.]

La forma de cuña que adaptaban las piezas no era producto de un estudio estructural ni estético, sino simplemente geométrico pero que resolvía el problema. Y a partir de esta solución, se jugaba con los colores, los materiales o la forma del conjunto para darle, ahora sí, una visión más decorativa y arquitectónica. El conjunto como se puede apreciar en diferentes obras, podía tener una configuración rectilínea como en el Foro de Pompeya, un diseño curvo en el plano frontal como el Arco de Cabanes en la provincia de Castellón, o formando un pórtico curvo como el Teatro Marítimo de la Villa Adriana.

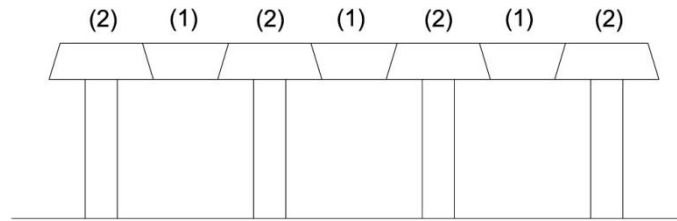


[Imagen 1. Foto de Pompeya.]

[Imagen 2. Arco de Cabanes]

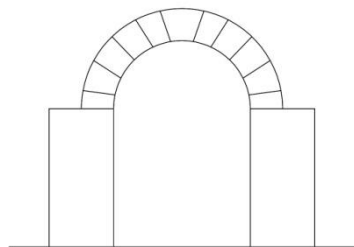
[Imagen 3. Teatro Marítimo]

De las tres obras recién mencionadas, el Foro de Pompeya y el Teatro Marítimo funcionan con el mismo esquema [Figura 19], lo único que cambia es que pórtico del Teatro Marítimo es circular, pero la configuración es similar. Las piezas centrales situadas entre los soportes son las piezas apoyadas (1) mientras que los bloques encima de las columnas son las que dan apoyo (2); por lo que las piezas centrales acaban apoyando sobre las piezas situadas en los soportes, logrando la estabilidad gracias a la pendiente de la pieza cuneiforme. Este sistema constructivo, como anteriormente se ha explicado, permite resolver largas distancias a través de varios elementos.



[Figura 19. Teatro Marítimo.]

El arco de Cabanes tiene un esquema diferente, pero la idea es equivalente. En este caso, el arco está formado por más elementos, y todos acaban conformando la curva. [Figura 20] Al tener una sección semicircular, las piezas van apoyando de la parte central del arco hasta la parte lateral que apoya sobre los macizos –que pueden entenderse como un tipo de soporte-; es decir, se crea en esta obra un sistema de dependencia en cadena de unas piezas a otras.

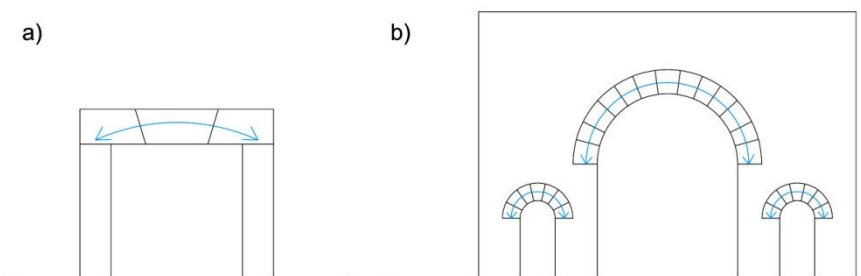


[Figura 20. Arco de Cabanes.]

Además, es digno de mención el ingenio con el que se sacaba partido a este sistema; ya que debido a estar formado por diferentes piezas, se podía jugar con los materiales y los acabados para darle una cualidad arquitectónica propia a cada obra. Por ejemplo, en el Teatro Marítimo, el dintel que apoya sobre las columnatas es de piedra, mientras que el tramo intermedio está construido por ladrillo, estos mismos materiales son usados en el Foro de Pompeya, pero en esta obra incluso parte de los soportes están constituidos por ladrillo.

Los esquemas superiores, funcionan porque el sistema no entra en carga y no se tienen que absorber empujes. En la figura 21.a se muestra que la dirección que toman las fuerzas internas es curva, pero que al no cargar al conjunto, éste no colapsa.

Por aquel entonces, si el arco entraba en carga como por ejemplo en el Arco Romano de Medinaceli, los empujes eran absorbidos por los elementos laterales de la obra – los muros- que hacían a su vez función de contrafuerte. [Figura 21.b]



[Figura 21.a) Tensiones internas b) Arco Romano de Medinaceli.]

Este procedimiento constructivo varía según la distancia que se quiera salvar, la geometría que se le quiera dar al conjunto, o en la habilidad del arquitecto o constructor. En *Las siete lámparas de la arquitectura*, Ruskin dice, concretamente en *La lámpara de la verdad*:

“Tampoco es preciso siempre la exhibición; así el espectador lo entenderá como una ayuda admitida; además, ninguna de las piedras maestras debería estar colocada en una posición manifiestamente imposible de guardar, si bien un enigma aquí y allá, en caracteres sin importancia, puede servir a veces para atraer la mirada hacia la mampostería y hacerla interesante, así como dar una impresión encantadora de una especie de poder nigromántico del arquitecto.”⁽³⁾

Ruskin con esto hace referencia a la puerta lateral del Duomo di Prato, en el que la visión frontal que se obtiene de piezas separadas alternando mármol y serpentina⁽³⁾, y su equilibrio y continuidad no se entiende si no se aprecia la sección transversal en el que cada bloque tiene la forma mostrada en la Imagen 6. Debe entenderse y recordarse, que no se busca la dificultad ni se crea un rompecabezas para resolver la firmeza requerida en este conjunto, sino que se crea un claro e ingenioso sistema de composición y construcción arquitectónica.



[Imagen 4, 5 y 6. Puerta del Duomo di Prato . Figura IV de *Las siete lámparas de la arquitectura*.]

El método histórico constructivo no funciona de la misma manera que la viga Gerber, sino que simplemente es un procedimiento que entonces se usaba para resolver el problema de salvar grandes luces con pequeñas piezas.

(3) Ruskin, John. 1987, *Las siete lámparas de la arquitectura*. Barcelona: Alta Fulla.

CASOS DE ESTUDIO

La elección de los siguientes casos de estudio viene motivada por lo siguiente:

- El Forth Bridge es uno de los puentes en voladizo más famosos del mundo, además de una obra cumbre del estudio de las vigas Gerber, como muestra el modelo de ménsula humano de Baker.
- El Museo Georges Pompidou es una obra contemporánea en la que la arquitectura se mezcla con la ingeniería, en la cual gracias a las vigas Gerber el edificio toma el diseño y el perfil actual, dejando todas las plantas libres de estructura y llevando la circulación y las infraestructuras a las fachadas longitudinales.
- El aeropuerto de Heathrow es un proyecto en el que la viga estudiada forma los pórticos unidireccionales, y en el que la estructura está formada en conjunto por una viga continua, soportes y cerramiento.
- El aeropuerto de Stansted consta de una cubierta reticular cuadrada, en el que la viga Gerber está proyectada en ambas direcciones ortogonales.
- El Palazzetto dello Sport es un sistema radial de elementos planos en el que la viga Gerber es utilizada como concepto para facilitar cálculos en la fase inicial.
- El almacén de aduanas de Chiasso es una obra de pórticos unidireccionales que además tiene una relación visual con los diagramas de momentos flectores.

THE FORTH BRIDGE



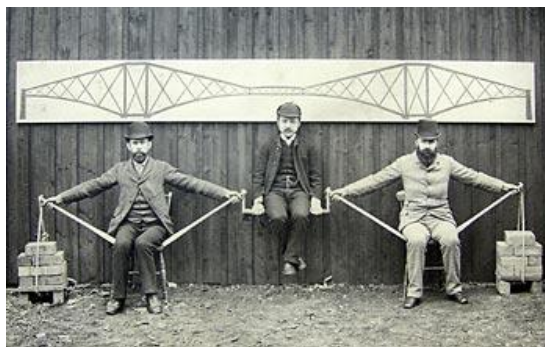
[Imagen 7. Forth Bridge]

El Forth Rail Bridge es uno de los puentes cantiléver más famosos del mundo, y el primero construido con acero en su totalidad. Además, es el puente suspendido más largo del mundo en lo referente al transporte, y el segundo más largo según su estructura después del puente de Quebec (1917). Fue abierto en 1890 bajo el diseño de Benjamin Baker, Allan Stewart y John Fowler. Su función era conectar Edimburgo con Fife, contando con aproximadamente un paso de 200 trenes diarios que van de North a South Queensferry. ⁽⁴⁾

Este puente es conocido universalmente por hacer posible la unión de la ingeniería con la arquitectura, compatibilizando la visión más estructural con la estética y funcional, ya que gracias a los avances que se dieron en el siglo XIX de tecnología y materiales, este histórico puente sigue dando respuesta a las necesidades actuales. ⁽⁵⁾

El diseño del proyecto se basa en unos principios similares con los que trabaja la viga Gerber, pero en esa época era novedoso debido a sus grandes dimensiones, el material empleado y que además incluía cálculos para incidencias contra levantamientos, colapsos, además de otros para las previsiones del viento o el efecto de las variaciones de la temperatura en la estructura.

Forth Bridge es un símbolo de las famosas vigas Gerber, como mostraron sus diseñadores en su “modelo de ménsula humano”. Aunque en la realidad el puente consta de tres torres, el principio explicado por Baker puede ser aplicado a esta tercera torre.



[Imagen 8. Modelo de ménsula humano por Baker.]

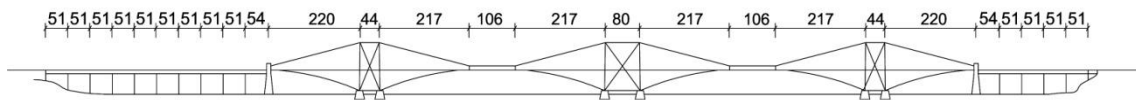
(4) Silver, Pete. McLean Will & Evans, Peter. 2013. *Structural Engineering for Architects: A Handbook*. Laurence King Publishing.

(5) *The Forth Bridge. Nomination for Inclusion in the World Heritage List*. 2014. Historic Scotland.

En la Real Sociedad de Londres en 1887, Baker describió el principio de cantiléver de esta manera:

“Dos hombres sentados en sus sillas y con los brazos extendidos, sostienen unos palos que están sujetos a tope contra sus sillas. De este modo, hay dos torres, como se muestra en el dibujo que hay sobre sus cabezas. El tramo central está representado por un palo suspendido de las manos interiores, mientras que el anclaje proporcionado por el contrapeso de los brazos en voladizo y de las torres está representado en el modelo humano por un bloque de ladrillos en cada extremo. Cuando una carga se sitúa en el tramo central, en este caso con una persona sentada sobre él, los brazos de los hombres y las cuerdas de los anclajes (contrapesos) entrar en tensión (tracción). Las sillas representan los pilotes circulares de granito. Imagínense las sillas de un tercio de una milla de distancia, las cabezas de los hombres tan altas como la cruz de St. Paul’s, sus brazos representando grandes vigas de acero en celosía, y los palos como tubos de 12 pies de diámetro en la base, y así se puede tener una buena noción de la estructura.”⁽⁶⁾

La idea principal de este puente era el diseño de dos líneas férreas sobre el río, salvando una distancia de 2.460 metros. Estas vías de ferrocarril se sitúan a 47.8 metros sobre la altura del agua en marea alta, y están situadas sobre un viaducto interior constante en toda su longitud.



[Figura 22. Sección Forth Bridge.]⁽⁷⁾

La sección central de este puente consiste en tres torres principales, de las cuales se sustentan dos brazos en voladizo a cada lado. De este modo, hay un total de 6 brazos cantiléver, de los cuales 4 son libres, y los otros dos están fijos –unidos de forma rígida a los dos contrafuertes exteriores-. Las dos torres exteriores –con sus respectivos brazos- se unen a la central a través de dos tramos suspendidos de unos 106 metros de largo. Por cada extremo, un viaducto antecede a esta sección principal para dar acceso a las vías férreas. La gran estructura de este puente trabaja con simples principios, como una cercha, con unos elementos siempre trabajando en tracción y otros a compresión.⁽⁷⁾

Cabe decir, que la obra ascendió a un coste total de 120.000.000 libras, lo que equivale a unos 155 millones de euros; debido principalmente al empleo de 54.000 toneladas de acero y contando con unos 4000 trabajadores, de los cuales 450 fueron heridos y 98 perdieron sus vidas.⁽⁸⁾

(6) Web: http://www.engineering-imagelines.com/why/forthRailBridge/forthRailBridge_02.asp

(7) Baker, B. 1884. *The Forth Bridge*. Read at the British Association. Montreal.

(8) Web: <http://www.benjaminbaker.org.uk/life-and-times-of-benjamin-baker.html>

Proceso constructivo

La construcción del puente se llevó a cabo durante 8 años, y aunque parece demasiado tiempo no hay que olvidar que en esa época no se contaba con los avances tecnológicos ni de maquinaria existentes.

Como se ha explicado en la primera parte del estudio, unos elementos apoyan sobre otros, y por tanto la construcción se realiza empezando por las partes que dan apoyo, para así ir avanzando hacia las partes apoyadas. En este primer caso de estudio se explica el proceso de construcción como ejemplo, cuyo proceso puede equipararse a el resto de obras respecto a la secuencia de dependencia estática.

Lo primero que se construyó fueron las cimentaciones, las cuales dan apoyo a las torres y por lo tanto al conjunto de la estructura. Cada torre está apoyada sobre 4 pilotes de cimentaciones separadas, con un total de 12 pilotes. [Figura 23]



[Figura 23.Cimentaciones.]



[Figura 24.Viaductos y contrafuertes.]

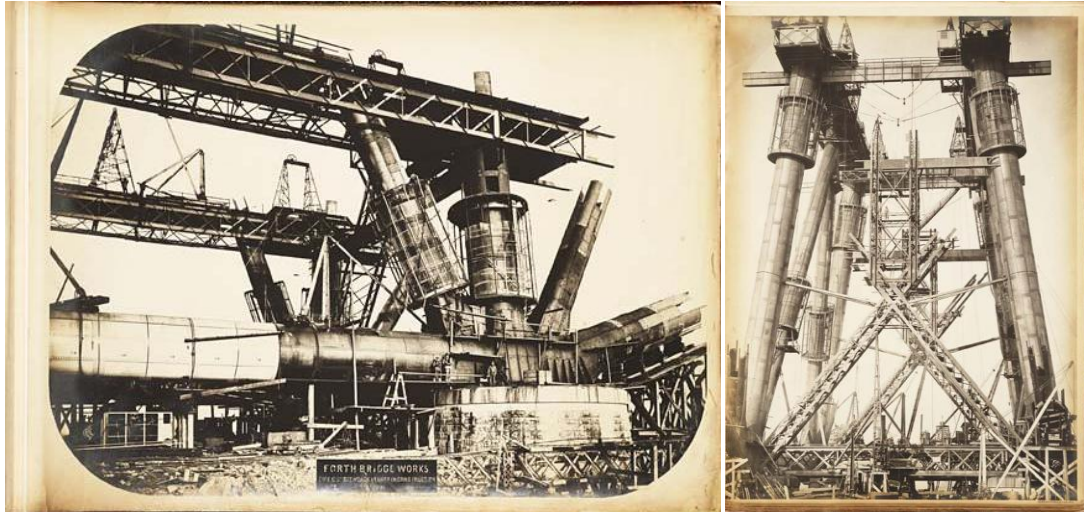
Siguiendo con la construcción, a la vez que se avanzaba con las cimentaciones se empezó a trabajar en los viaductos laterales [figura 24]; los cuales están formados por dos vigas en celosías paralelas entre ellas unos 4,88 metros que apoyan sobre unos soportes de mampostería cada 51 metros,⁽⁹⁾ logrando la cercha a través de unos cordones superior e inferior. Ambos accesos laterales son iguales y la única diferencia es que el viaducto orientado a sur es el doble de largo que el otro.

A medida que se progresaba en el proceso constructivo, se iba levantando los contrafuertes, los cuales hacen de conexión/unión entre los brazos exteriores y los viaductos. Estos contrafuertes, actúan como pesos –de unas 1.000 toneladas- para contrarrestar la mitad de los vanos suspendidos que actúan por el otro lado de la torre.

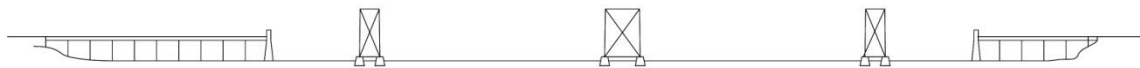
Una vez acabados los cimientos, se podía empezar con la construcción de las grandes torres, formadas por cuatro grandes soportes [Figura 25]. Las tensiones a las que los elementos del conjunto están sometidos en el puente tienen que ser transmitidas a las cimentaciones a través de unas conexiones importantes. Estas conexiones son conocidas como “skewbacks”⁽¹⁰⁾ que viene a ser un tipo de chapados de arranque-.

(9) *The Forth Bridge. Nomination for Inclusion in the World Heritage List.* 2014. Historic Scotland.

(10) Magee, A.D. 2007. *A critical analysis of The Forth Bridge.* University of Bath, Bath, UK.



[Imagen 9. Detalle “skewbacks”.] [Imagen 10. Construcción torres]



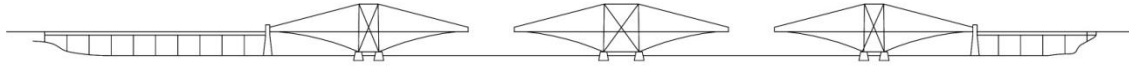
[Figura 25. Torres.]

Por otra parte, los pilares que componen la torre están inclinadas hacia el interior del eje en la sección transversal del puente; lo que permite que en la parte superior estas columnas estén más juntas que en la base de las cimentaciones. Este estrechamiento ayuda a que se genere un mejor atado y a la vez se cree una articulación más firme.

Una vez las torres se acabaron de construir, se empezó con la construcción de los brazos en ménsula [Figura 26]. El proceso se realizó de manera equitativa y progresiva a ambos lados de la torre, para que el sistema siempre estuviese en equilibrio. Cada brazo tiene la misma longitud y los mismos componentes estructurales; por lo que los brazos de la torre central se equilibran con su propio peso; mientras que los brazos exteriores encuentran el equilibrio a través de los contrafuertes –como se explica luego en el análisis estructural-. Cada brazo cuenta con dos miembros inferiores siempre en compresión, y los dos superiores siempre en tracción. Además, tanto brazos superiores como brazos inferiores están arriostrados entre ellos horizontalmente.



[Imagen 11. Construcción de los brazos.] [Imagen 12. Construcción del tramos suspendido.]



[Figura 26. Brazos.]

A medida que los brazos en voladizo se iban construyendo, se iba avanzando en el viaducto interior que contiene las vías. Éste está soportado por una estructura de elementos diagonales conectados al miembro inferior del brazo en ménsula. El progreso en la construcción del viaducto interior siempre iba un tramo más retrasado que los brazos, pues necesitaba de éstos para mantenerse.

Los dos tramos centrales [Figura 27] que unen los tres conjuntos de torres –con sus respectivos brazos- fueron las últimas secciones en ser construidas. El proceso de construcción iba avanzando de manera simétrica desde el final de los brazos cantiléver hasta unirse a mitad de camino para manteniendo el equilibrio; dando lugar así a lo que ahora llamamos *tramo suspendido*. Éstos trabajan como un atado simple, con la parte superior a compresión y el miembro inferior soportando las tensiones de tracción.

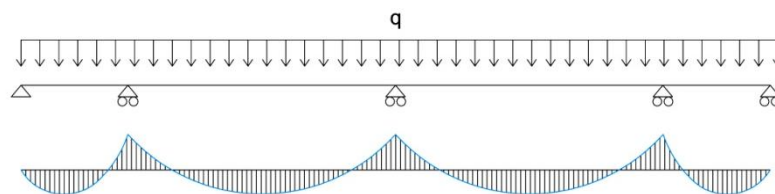


[Figura 27. Tramos centrales y conjunto.]

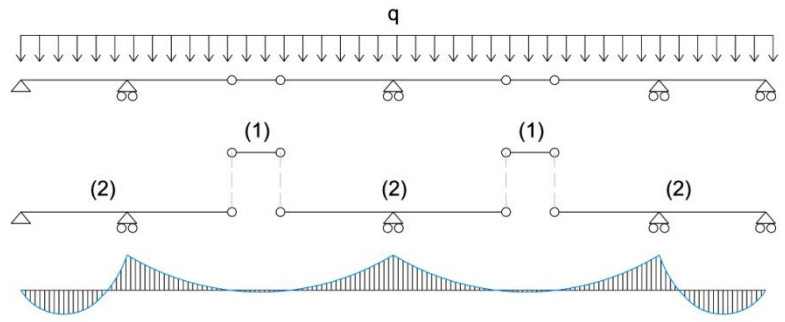
Análisis estructural.

El puente trabaja con unos principios simples, como se ha mencionado al principio de la obra; y por ello es una magnífica referencia para el estudio de las vigas Gerber. Se va a idealizar la viga con esquemas y diagramas simples, representándolo luego con los elementos estructurales reales y cargas.

Este ejemplo parte de una viga continua que descansa sobre 5 apoyos, es decir, que está dividida en 4 vanos cuyas luces no son todas iguales [Figura 28]. Al añadir las rótulas para pasar de una viga hiperestática a una viga isostática, se crea un sistema que consiste en tres tramos que dan apoyo (2), y dos tramos apoyados (1), con su respectivo diagrama de momentos flectores. [Figura 29]



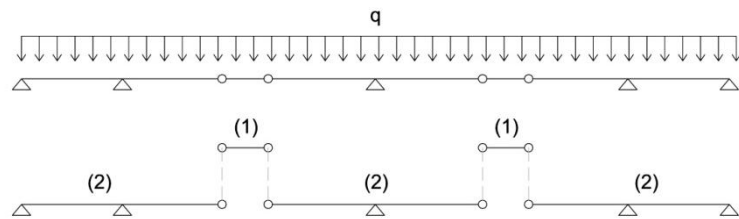
[Figura 28. Viga continua.]



[Figura 29. Viga con rótulas.]

Por una parte, este proyecto a primera vista no cumple aquello de tener dos rótulas menos que número de puntos de apoyo, pues debería haber un máximo de 3 articulaciones; pero no se puede olvidar el hecho de que cada apoyo aquí simplificado gráficamente en verdad son 4 soportes en el modelo tridimensional o dos en bidimensional.

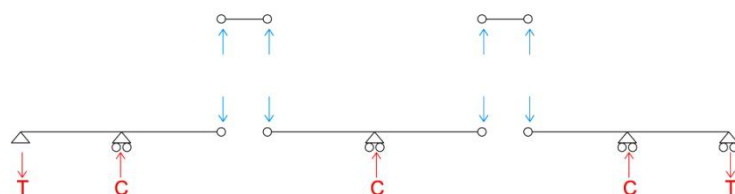
Posiblemente, en el Forth Bridge el elemento deslizante esté en las rótulas intermedias, ya que las torres están fijas [Figura 30]. Sólo que se trabaja con el esquema de la figura 19 para así simular el esquema de una viga Gerber.



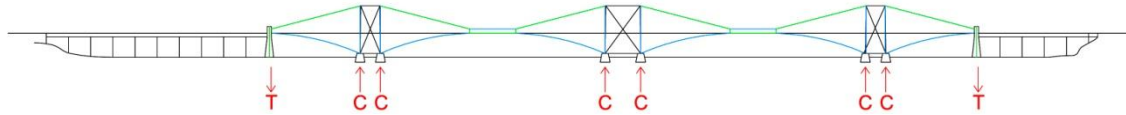
[Figura 30. Viga con apoyo fijo en las torres.]

Por otro lado, para la ubicación de las articulaciones, en la explicación inicial que se ha dado se decía que lo normal que es un vano tenga rótulas y el siguiente no. En este caso, como se muestra en la Figura 30, aunque haya rótulas en dos vanos adyacentes al ser los apoyos fijos y el modelo simétrico, el equilibrio se logra y la estructura no se cae.

Los tramos suspendidos transmiten sus cargas a través de las rótulas a los brazos cantiléver, éstos a las torres y de ahí a las cimentaciones. Por lo que se crearían las siguientes reacciones –rojo- en el esquema [Figura 31.], y en el proyecto las consecuentes tensiones internas –azul para compresión y verde para tracción-. [Figura 32]



[Figura 31. Reacciones]

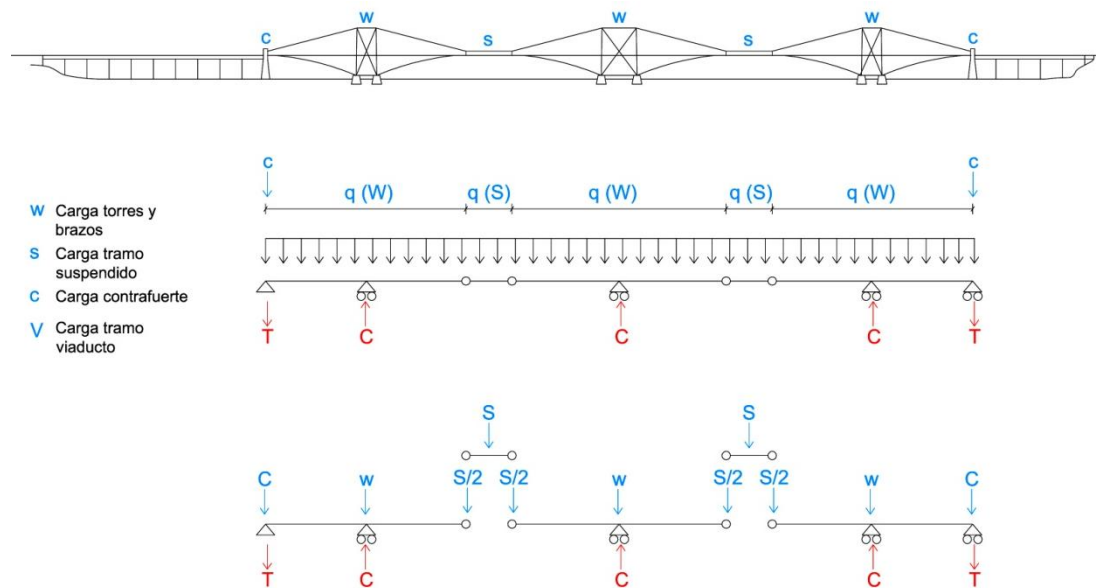


[Figura 32.Reacciones y tensiones internas.]

Antes de continuar, aclarar que aunque en la realidad los brazos en voladizo cuanto más cercanos son a las torres mayor peso propio tiene por tener una mayor sección, se va a suponer que las cargas son uniformemente distribuidas en toda la sección: para entender el esquema de forma más sencilla puesto que al final las cargas de las ménsulas se transmiten a las torres y de ahí a las cimentaciones como una carga puntual.

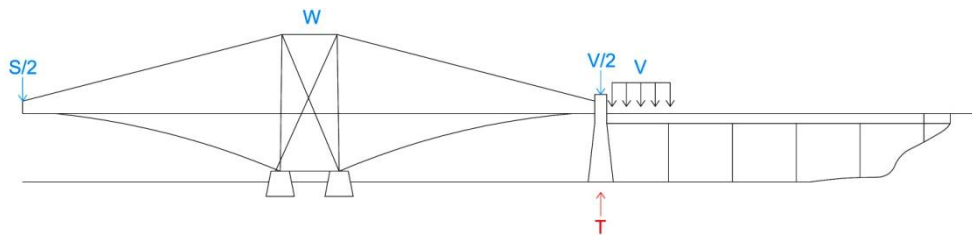
Si consideramos las cargas permanentes que actúan sobre el puente, se dan dos situaciones. Por una parte, la torre central está equilibrada, ya que tanto ella como sus brazos y como las cargas que recibe del tramo suspendido son simétricas; y sólo perdería la estabilidad cuando una carga activa actuase en ese tramo.

Por otro lado, las torres laterales están en equilibrio, pero éste no se ha conseguido como en el caso anterior por simetría. Dado que sobre el brazo en ménsula interior actúa la mitad de la carga del tramo suspendido y sobre el otro extremo no actúa esta carga; la estabilidad se consigue porque este brazo al estar fijado al contrafuerte –y éste al tener un peso de unas mil toneladas- recibe una carga adicional que garantiza el equilibrio. [Figura 33].



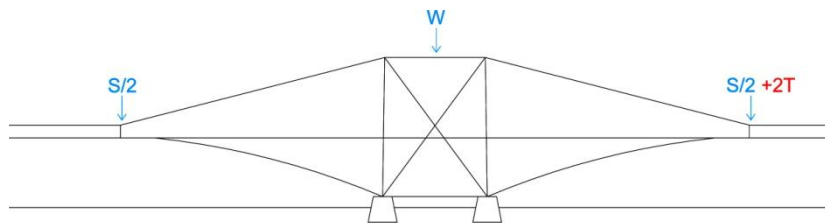
[Figura 33. Cargas y reacciones]

Como se puede apreciar en la Figura 34, el contrafuerte recibe la mitad de la carga del tramo de viaducto adyacente, y produce compresión en éste, pero debida a la tensión que se crea necesariamente por el conjunto, el contrafuerte siempre trabajará a tracción ya que el valor de la carga del viaducto nunca superará a la del puente.



[Figura 34. Contrafuerte.]

Al estudiar las cargas activas que pueden actuar sobre el puente, se puede tener en cuenta la temperatura y el viento –los cuales se tuvieron en cuenta en los cálculos estructurales de sus arquitectos a través de la posibilidad de expansión por temperatura y la necesidad de arriostramiento contra el viento- y con mayor importancia el tren; con el supuesto de que el caso más desfavorable sería cuando ambos trenes (T)–en direcciones opuestas- se encuentran sobre el tramo suspendido, y además en la posición que mayor palanca produciría, es decir, mayor posibilidad de vuelco.⁽¹¹⁾ [Figura 35.]



[Figura 35. Situación más desfavorable: tramo central con ambos trenes en el punto de mayor palanca.]

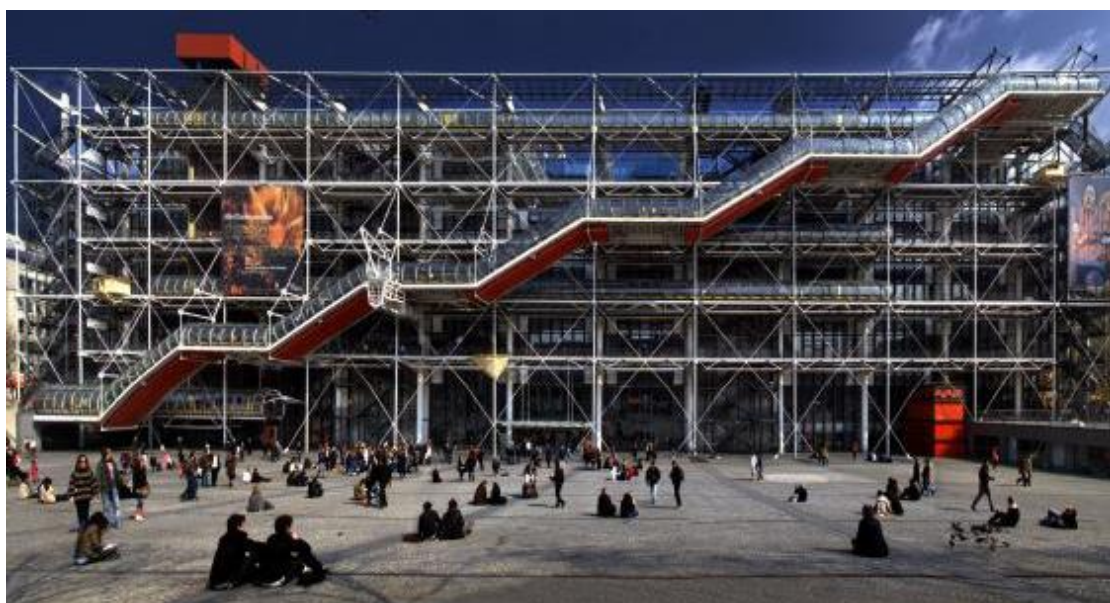
En las torres laterales, no se produciría giro del conjunto ya que los brazos exteriores están fijos a los contrafuertes, y de esta manera cuentan con una carga que además de conseguir el equilibrio también elimina la posibilidad de volteo. Sin embargo, la torre central no cuenta con este peso adicional, por lo que para que no se produzca vuelco debe encontrar el equilibrio en su conjunto. Se consigue ya que la torre es más ancha que las otras dos – unos 80 metros frente a los 44 laterales-⁽¹¹⁾, y por lo tanto indirectamente es un poco más pesada.

Asimismo, el puente también puede colapsarse, debido a la gran cantidad de fuerzas de compresión que actúan sobre él. Para solucionar este problema, los arquitectos calcularon la cantidad de arriostramiento que debía contener el conjunto. Según cálculos realizados en un estudio de la Universidad de Bath, la estructura está sobredimensionado al arriostramiento, y puede deberse a que hicieron uso de un coeficiente de seguridad en caso de que hubiese más cargas permanentes de las esperadas, y también para prevenir cualquier fallo posible debido a que en aquel momento no se tenía un conocimiento de las propiedades del acero como se tiene en la actualidad.⁽¹¹⁾

Con todo el desarrollo anterior, Forth Bridge es un claro ejemplo de sencillez y funcionalidad, que muchos años después continúa siendo una obra cumbre en el estudio de las Vigas Gerber y en la historia tanto de la ingeniería como de la arquitectura.

(11) Magee, A.D. 2007. *A critical analysis of The Forth Bridge*. University of Bath, Bath, UK.

MUSEO GEORGES POMPIDOU



[Imagen 13. Fachada principal Centro Georges Pompidou.]

El Centro Pompidou, también conocido como Centro Beaubourg, fue inaugurado en 1977 bajo el diseño de los arquitectos Renzo Piano y Richard Rogers, y el grupo de ingenieros Ove Arup & Partners. Todo empezó en 1970 cuando tuvo lugar un concurso de arquitectura propuesto por presidente de Francia en aquel entonces, Georges Pompidou. Los ganadores de la competición fueron los recién mencionados arquitectos, quienes a través de una estructura completamente de acero plantearon un espacio flexible que permitiese la versatilidad de los espacios. ⁽¹²⁾

La propuesta de una estructura formada por cerchas y tirantes no suponía ninguna novedad constructiva, pues ya se habían construido por aquel entonces una gran cantidad de puentes sólo en acero. El principio constructivo consiste en soportar a través de unos elementos con voladizo en su parte interior, -conocidos como gerberettes ⁽¹³⁾- una viga central que va de lado a lado de estos elementos. Los arquitectos fueron quienes llamaron a esas piezas “gerberettes” pues son una referencia hacia el tipo de viga diseñado por Heinrich Gerber. El conjunto de la viga central suspendida y las vigas en ménsula laterales es lo que se conoce como la solución gerberette. ⁽¹³⁾

La manera en que esta estructura tomó forma creando el esqueleto del Centro fue una clara innovación. Es decir, hasta entonces el empleo de este tipo de sistema constructivo ya se había utilizado en puentes y viaductos, pero dando solución sólo a una función estructural en la mayoría de los casos y en un único “nivel de forjado”. Sin embargo, el Centro Georges Pompidou implanta este modelo de estructura resolviendo una serie de forjados en altura – con un total de 7 plantas sobre la rasante-.

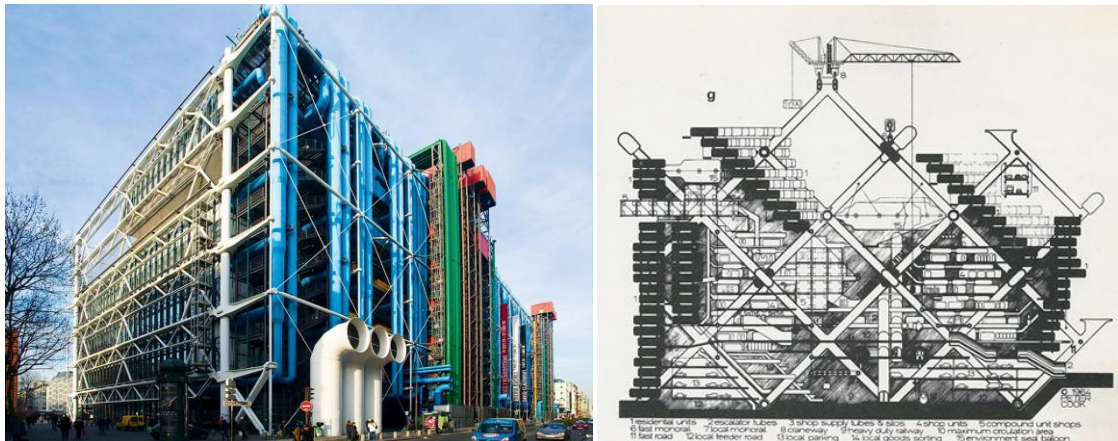
(12) Kenneth Powell. 1999-2011. *Richard Rogers: complete works*. London. Phaidon.

(13) Piano, Renzo. 1990. *Renzo Piano. Buildings & Projects. 1971-1989*. Barcelona. Gustavo Gili.

La arquitectura la forman en conjunto el edificio y la plaza –también diseñada por el estudio de Renzo Piano-, la cual es la entrada preliminar al edificio, y con un desnivel de 3.5 metros sobre el nivel de la calle, se accede al edificio creando una planta inferior que funciona como hall. ⁽¹⁴⁾

El edificio tiene unas dimensiones de 60 metros en dirección transversal por 170 metros en longitudinal, y una altura de 45.50 metros por la fachada oeste, y de 42 metros por la fachada este. Además, su volumen se divide por una parte en tres plantas subterráneas y 7 sobre rasante. Para crear la configuración de este edificio, y cumplir con la idea de flexibilidad de los espacios, las plantas debían estar vacías de pilares, para así poder albergar exposiciones y actividades diferentes a lo largo del tiempo. La no existencia de pilares se logra a través de una estructura de pórticos formados a partir de vigas Gerber que transmiten sus cargas a pilares y tirantes.

El vano de 6 metros creado a cada lado del edificio por la distancia entre la secuencia de soportes y de tensores, creó una profundidad que fue aprovechada para situar las circulaciones en la fachada principal, y para colocar las instalaciones y las circulaciones de servicio por la fachada posterior ⁽¹⁵⁾. Además, un código de colores permite identificar la función de cada tubo: azul para la climatización, verde para la canalización de agua, amarillo para el sistema eléctrico, y rojo para las circulaciones verticales ⁽¹⁶⁾. Al llevar todas la infraestructura al exterior, y liberar de pilares cada forjado, se consiguió por partida doble la idea de flexibilidad de los espacios.



[Imagen 14. Tubos fachada posterior.] [Imagen 15. Archigram.]

En la fachada principal es donde se encuentra el tubo más imponente, pues además de estar sujeto por una estructura adicional que apoya sobre la principal, es de color rojo en su parte inferior y permite acceder desde la parte inferior hasta la parte superior, donde se encuentra una especie de mirador hacia la ciudad de París, ya que el museo cuenta con una altura a la superior permitida en el barrio. ⁽¹⁴⁾

(14) Web: <https://myarchitecturalvisits.com/2014/02/05/centre-pompidou-beaubourg/>

(15) Silver, Pete. McLean Will & Evans, Peter. 2013. *Structural Engineering for Architects: A Handbook*. Laurence King Publishing.

(16) Piano, Renzo. 1990. *Renzo Piano. Buildings & Projects. 1971-1989*. Barcelona. Gustavo Gili.

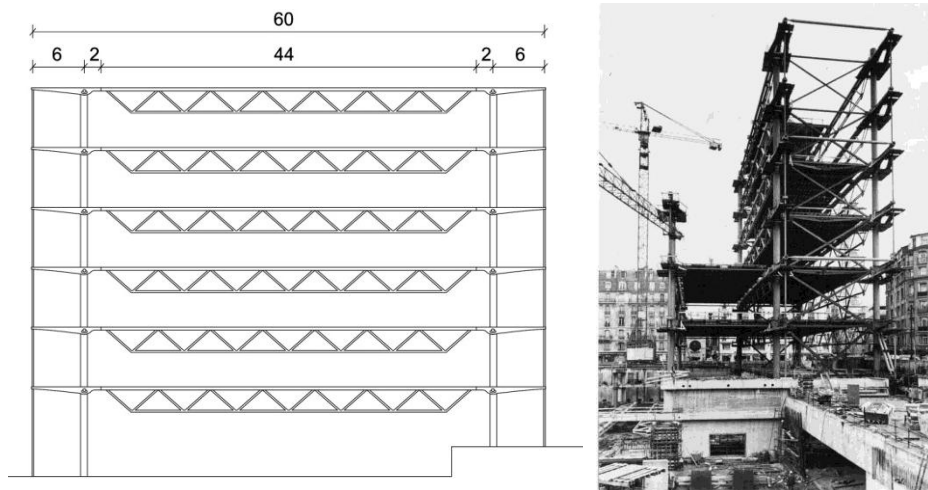
La idea de llevar todas las infraestructuras al exterior originó polémica entre los habitantes de la ciudad, quienes reconocían el edificio con diferentes apodos como: Nuestra Señora de la Cañería –Notre Dame de la Tuyauterie-, La Fábrica de gas o la Refinería de Petróleo.⁽¹⁷⁾ El Centro recoge ideas del grupo de arquitectos de los años 60 *Archigram*, -cuyos proyectos estaban basados en la tecnología y en obras de ciencia ficción-, pues fue como una cierta “puesta en escena” de la técnica al descubierto. Además, también reúne conceptos de Jean Prouvé, Buckminster Fuller o Cedric Price.

Por lo tanto, se puede decir que el Centro Georges Pompidou se incluye en los comienzos de la corriente arquitectónica de los años 70, *High Tech*, que se define como un estilo arquitectónico que mezcla la arquitectura con la alta tecnología, tomando su nombre del libro escrito por Suzanne Sleinn y Joan Kron, llamado *The Industrial Style and Source Book for The Home*. Las obras correspondientes a esta corriente destacan por la utilización de materiales industrializados, sobre todo en cubiertas, pisos o muros.⁽¹⁸⁾ Sin duda, la imagen que los arquitectos crearon del Museo tiene que ver con esta idea de industrialización llevado a su máximo punto de evidencia.

El Centro Georges Pompidou se puede declarar un icono de la arquitectura que creció en popularidad desde sus comienzos a pesar de las críticas iniciales por su estética tecnológica, y que hoy en día sigue valorándose como arquitectura moderna y contemporánea.

Proceso constructivo

La estructura del conjunto del edificio está formada por 14 pórticos, separados entre sí cada 12.8 metros, creando un volumen de 170 metros de largo por 60 de ancho. Estos pórticos, se asientan sobre una subestructura de losa de hormigón que ocupa 66.000 m², dando espacio para que bajo el nivel del suelo se construyan tres niveles.⁽¹⁹⁾



[Figura 36. Sección transversal vigas Gerber. Medidas en metros.] [Imagen 16. Pórticos en construcción]

(17) Web: <https://myarchitecturalvisits.com/2014/02/05/centre-pompidou-beaubourg/>

(18) Web: <http://www.arqhys.com/contenidos/arquitectura-high-tech.html>

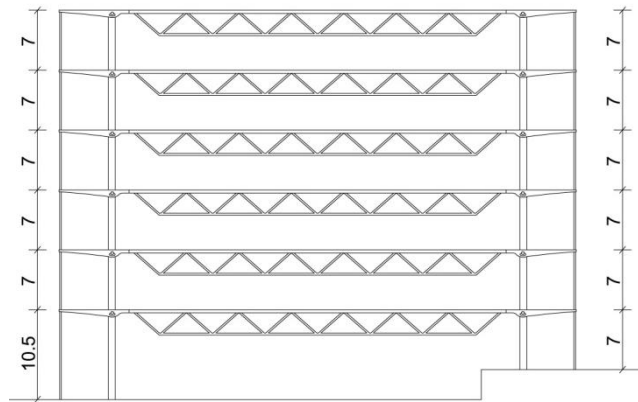
(19) <http://www.engineering-timelines.com/scripts/engineeringItem.asp?id=1275>

El sistema que configura el volumen exterior del edificio está realizado en su totalidad en acero moldeado con elementos prefabricados. El empleo de este material en el conjunto del proyecto hace de este una obra singular, ya que el acero fundido se usaba más en la industria del gas y del petróleo.

El esqueleto del edificio se va construyendo por pórticos, para poder así ir arriostrando los pórticos adyacentes a medida que se van levantando.

Para la construcción de cada viga, se erigen dos columnas prefabricadas separadas entre ellas 48 metros. Los soportes miden 7 metros de alto, excepto en la planta baja del lado oeste, donde se encuentran con la plaza pública y son de 10.5 metros, -para salvar el desnivel de 3.5 metros-. [Figura 37]

Los pilares se hicieron moldeados a través de un proceso de centrifugado en el que existía un diámetro externo de 85 cm, pero cuyo grosor era variable -el conjunto de los 6 soportes acababa teniendo 8.5 cm de espesor en la parte inferior y 4 cm en la parte superior del edificio-.⁽²⁰⁾



[Figura 37. Sección transversal con alturas de pilares en metros.]

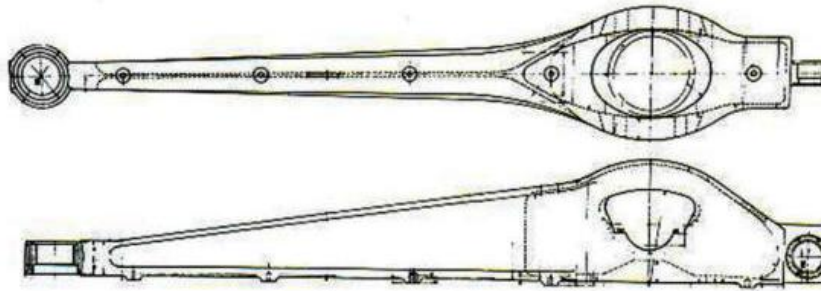
Una vez se habían erguido los pilares, se sitúan sobre ellos las llamadas “gerberettes”⁽²¹⁾, que son como hemos dicho una especie de vigas en voladizo de 8 metros de longitud. Éstas se fijan a las columnas y actúan como una especie de palanca; pero aunque pivoten alrededor de los soportes, no se crean fuerzas excéntricas en estos porque se apoyan sobre dos cojinetes esféricos. [Figura 38] El grupo alemán Krupp fue el encargado de manufacturar estos elementos prefabricados en acero fundido, cuyo peso es de unas 9.6 toneladas.⁽²⁰⁾



[Figura 38. Columnas y gerberettes.]

(20) Web: <http://www.engineering-timelines.com/scripts/engineeringItem.asp?id=1275>

(21) Piano, Renzo. 1990. *Renzo Piano. Buildings & Projects. 1971-1989*. Barcelona. Gustavo Gili.



[Imagen 17. Dibujo de las Gerberettes.]



[Imagen 18. Gerberettes.]



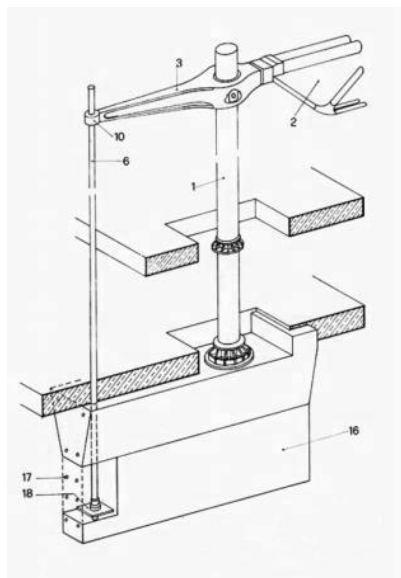
[Imagen 19. Cojinetes esféricos.]

Ambas imágenes : Pdg DigDesFab2011 Centre Pompidou Analysis

Posicionadas las gerberettes se colocaban en los extremos los tirantes, que son barras de acero rígido de 20 cm de diámetro, los cuales logran la conexión con el suelo y están fijados al muro de contención que está enterrado. [Figura 39]



[Figura 39. Columnas, gerberettes y tirantes.]

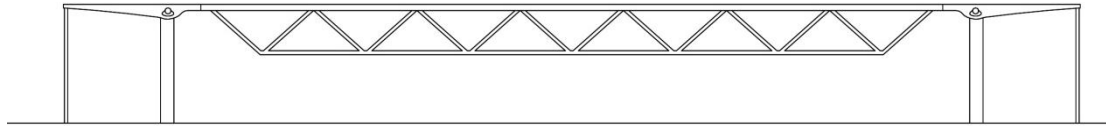


[Imagen 20: Tirantes unidos a la cimentación]



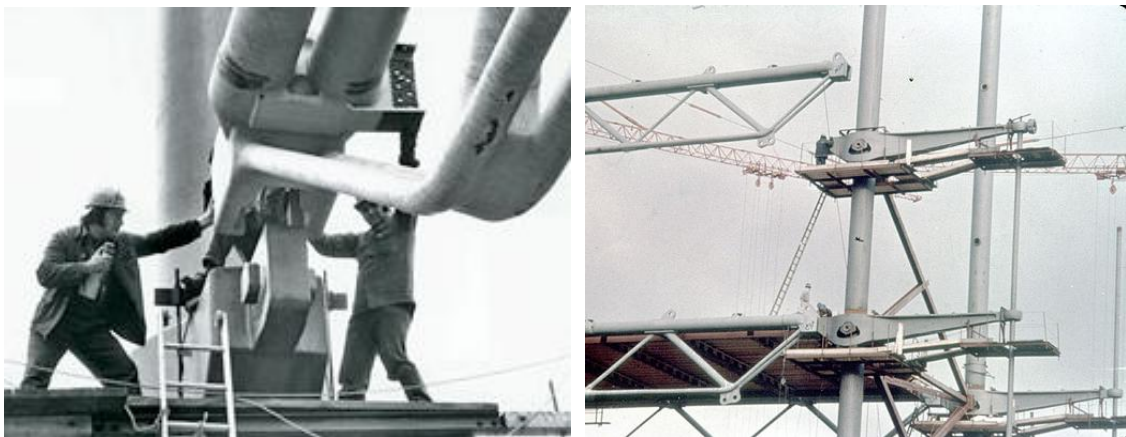
[Imagen 21: Conexión tirante con gerberette]

Sobre las gerberettes se apoyaban las vigas Warren, cuyas dimensiones eran de unos 44 metros de largo y 2.85 metros de canto ⁽²²⁾. Estas celosías son las que dan apoyo a los suelos de cada forjado -el cual se posiciona una vez se han colocado los tensores-. Las vigas cuentan con unos cordones superiores e inferiores compuestos por un pareado de tubos, y de unas diagonales, que se acoplan por medio de nudos de conexión.



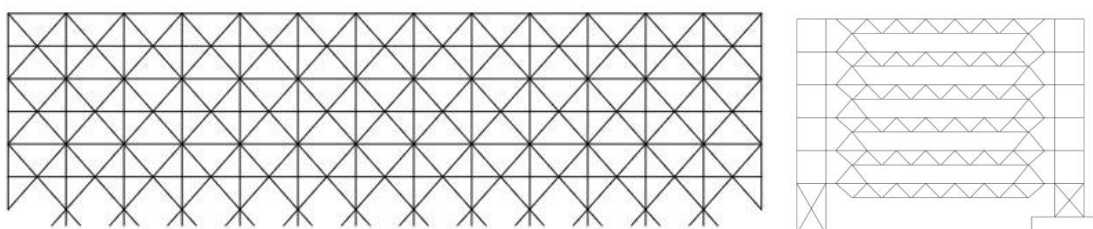
[Figura 40. Viga Gerber en conjunto.]

En la siguiente foto se puede observar el nudo de unión entre las “gerberettes” y las vigas, el cual actúa como una rótula que más tarde se explicará en el análisis estructural. La unión de la viga en ménsula con la viga suspendida es lo que ya se ha definido anteriormente como viga Gerber, y el conjunto se conoce como solución *gerberette*.⁽²³⁾



[Imagen 22 y 23. Unión de la viga Warren.]

Con este desarrollo se construye el primer nivel de un pórtico. Para seguir con el proceso, se debe levantar uno a uno cada pórtico. A medida que se van construyendo los pórticos adyacentes, se debe ir arriostrando la estructura, a través de unos tirantes de 6 cm de acero rígido por ambas fachadas longitudinales [Figura 41.a] y con elementos de acero en las fachadas transversales. [Figura 41.b]



[Figura 41. a) Arriostramiento fachada longitudinal. b) Arriostramiento fachada transversal.]

(22) <http://www.engineering-timelines.com/scripts/engineeringItem.asp?id=1275>

(23) Piano, Renzo. 1990. *Renzo Piano. Buildings & Projects. 1971-1989*. Barcelona. Gustavo Gili.

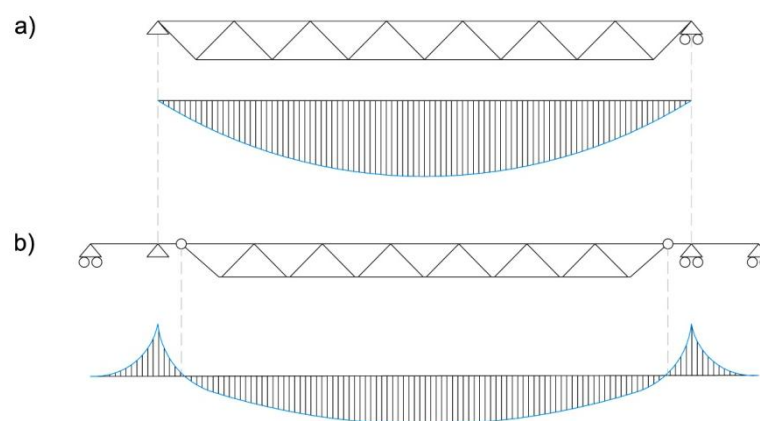
Una vez ese van alzando niveles, se puede continuar con la construcción del forjado propiamente dicho, el cual consiste en apoyar unas vigas de cercha a cercha que sirvan como soporte para las placas de hormigón que se sitúan encima. Sobre estas se coloca un pedestal donde se dispondrá el pavimento final. [Referencia 8]

Cada pódico por separado tardó en construirse sólo diez días, y el conjunto de la estructura 8 meses. Una vez la estructura estaba edificada en su totalidad, se pudo empezar con el resto de las infraestructuras, comunicaciones y cerramiento. Las fachadas consisten en una cortina de vidrio y acero. El conjunto de todas las obras que fueron necesarias desde que se comenzó hasta que el Centro abrió sus puertas duró cinco años.

Análisis estructural

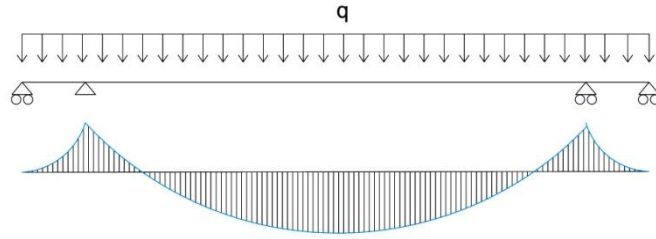
Esta obra, como la anterior, se basa en unos principios de la viga Gerber de una manera firme, y por ello es un buen caso de estudio. Además, es un proyecto significativo ya que las características de este tipo de vigas hacen que el proyecto tome un perfil y un diseño que de otra manera no sería posible, con todo una circulación vertical en la fachada oeste, un flujo de actividad horizontal en cada forjado sobre el tramo central, y un posicionamiento de las instalaciones en el tramo exterior este. Sin olvidar, que este tipo de vigas no suele emplearse en edificios de varias plantas –pues suele usarse en cubiertas de aeropuertos, naves industriales...- , ofreciendo unas plantas sin interrupciones físicas que garantizan flexibilidad.

La distancia libre que hay de pilar a pilar es de 48 metros, lo que de una forma convencional se salvaría con una viga en celosía biapoyada. [Figura 42.a] Esta solución requeriría una viga de gran canto y sección, y daría unos momentos en el vano central mayores de los actuales. Para facilitar los cálculos y el diseño se optó por una viga Gerber [Figura 42.b]



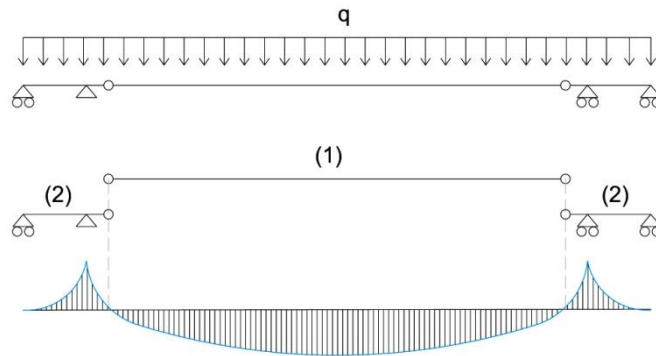
[Figura 42. a) Solución convencional. b) Viga Gerber]

Primero, se va a idealizar la viga, de forma individual, para luego verla actuar en el conjunto del Centro. Si la viga partiese de una viga continua, ésta sería simétrica y descansaría sobre 4 apoyos, dando lugar de este modo a tres vanos, con dos luces iguales y una tercera –la central- mayor.



[Figura 43. Viga continua con 4 apoyos.]

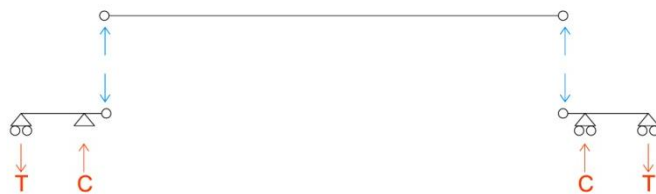
Al incluir las rótulas para dar lugar a la viga Gerber, se configuran dos tramos que dan apoyo (2) y un tramo que está apoyado (1), con su correspondiente diagrama flector.



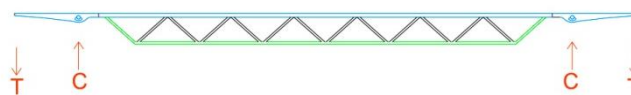
[Figura 44. Viga con rótulas.]

Por un lado, si el sistema se compara con el número de rótulas posibles que se ha explicado al inicio del estudio, en este caso cumple la regla de que el número máximo de rótulas es el número de apoyos menos dos. Por otro lado, si se hace referencia al posicionamiento de las articulaciones, en este caso se han situado las rótulas en el vano central –de tres-, dejando un vano sin articulaciones a cada lado.

El tramo suspendido, transmite su carga a las vigas ménsula laterales a través de las articulaciones, y éstas se transfieren por un lado a las columnas creando fuerzas de compresión y a los tirantes con esfuerzos de tracción-para que la viga no levante por el extremo-. Creando de este modo unas reacciones como las siguientes en la base de la estructura –en rojo- y unas tensiones internas en los elementos de la estructura – azul para compresión y verde para tracción-. [Figura 45 y 46]

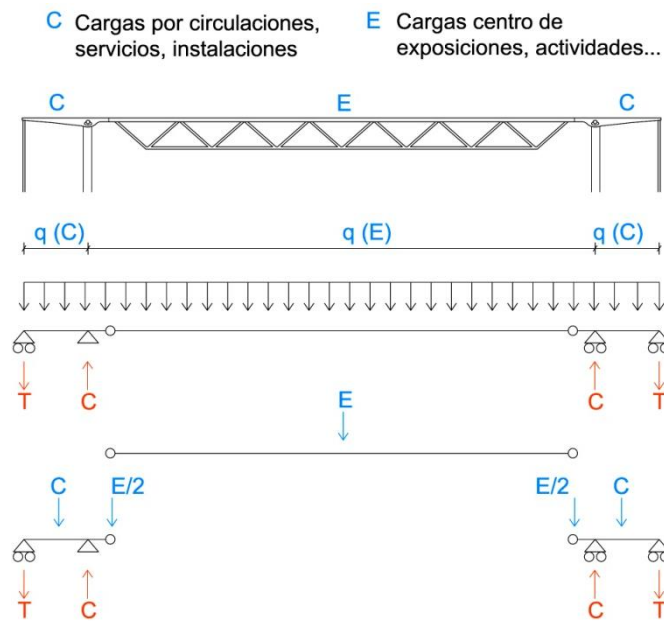


[Figura 45. Reacciones.]



[Figura 46. Reacciones y tensiones internas.]

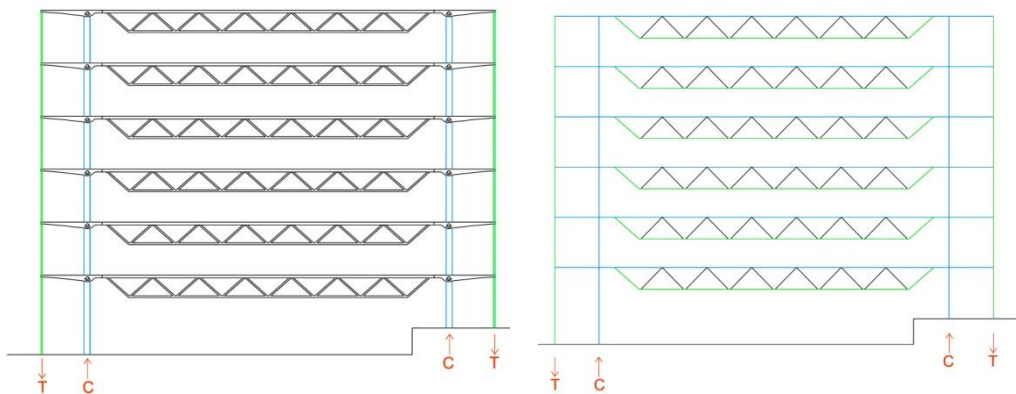
Las cargas que actúan en la viga se consideran uniformemente repartidas, y se estudia teniendo en cuenta que éstas son la combinación más desfavorable de cargas permanentes –peso propio de la viga en sí misma como de los elementos que apoyan sobre ella - y variables –mobiliario, esculturas-; y abarcan un ámbito que es la mitad de las luces de las crujeías adyacentes. Se diferencia entre el tramo exterior oeste que cuenta con las circulaciones públicas, el tramo central que se corresponde con la parte de actividades o exposiciones, y el extremo este que cuenta con las circulaciones de servicios e instalaciones. Aunque las cargas en ambos extremos no sean las mismas, al ser una estructura simétrica, lo más probable es que se realizase el análisis en su día como si fuesen similares, pues facilita el dimensionamiento, el proceso de ejecución y ayuda a la imagen arquitectónica del edificio. [Figura 47]



[Figura 47. Cargas y reacciones.]

Además, para solucionar los problemas que pudiesen ocasionarse por el viento o por fuerzas horizontales el edificio se encuentra arriostrado en ambas direcciones como se ha mostrado anteriormente en la Figura 41.

Este es el estudio en una viga individual, el cual al llevarse al conjunto de la estructura funcionaría de manera similar como se muestra en la Figura 48.



[Figura 48. Estructura.]

HEATHROW AIRPORT-TERMINAL 5



[Imagen 24. Interior Heathrow.]

El aeropuerto de Heathrow fue abierto en 1946, pero en los años 90 se sacó a concurso el diseño del proyecto de una nueva terminal (T5) la cual debía dar cabida a unos 30 millones de pasajeros anuales. Rogers Strik Harbour and Partners fue el estudio al que se le adjudicó la obra por su propuesta, que se basaba en una flexibilidad total del espacio interior que permitía organizar los servicios e instalaciones sin restricciones estructurales, y posibilitaba futuros cambios que fuesen necesarios.⁽³⁰⁾

El proyecto se compone de una gran cubierta ondulada de 175 metros de ancho y 396 metros de largo con una altura máxima en su punto central de 37 metros, la cual se sustenta gracias a 11 pares de soportes en forma de “Y” inclinados situados en el perímetro de las fachadas longitudinales –separados 156 metros-, para así dejar libre más espacio en el interior.⁽³¹⁾

Cada una de las 22 vigas de la cubierta tiene 0.8 metros de ancho y 3.8 metros de canto máximo, tensadas por dos cables de 11.5 cm de diámetro para absorber los empujes debido a su forma arqueada⁽³²⁾; se generan así 21 crujiás de unos 18 metros de luz cada una.

La estructura está formada por el conjunto de cubierta, soportes y fachada; ya que todos los elementos forman parte de un sistema que absorbe cargas, esfuerzos de viento o desplazamientos –entre otras acciones que puedan incidir en sus partes-. Por eso mismo, el interior del edificio cuenta con tres plantas de servicios e instalaciones del aeropuerto que tienen una estructura totalmente independiente a la de la

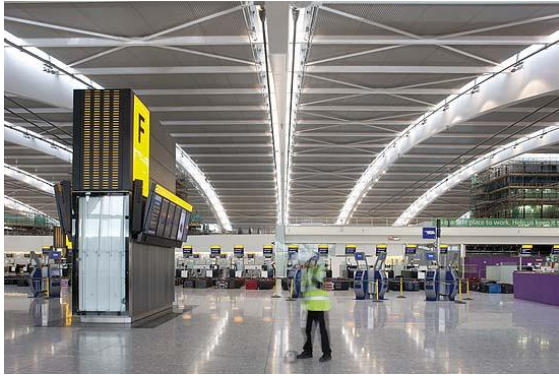
(30) Powell, Kenneth.1999 *Richard Rogers: Team 4, Richard+Su Rogers, Piano + Rogers, Richard Rogers Partnership*. Phaidon.

(31) Web: <http://www.rsh-p.com/projects/heathrow-terminal-5/>

(32) Arup. 2006. *Terminal 5, London Heathrow: The main terminal building envelope*. The Arup Journal

envolvente; y si en un futuro se requiriese un cambio de las funciones o de la organización, la estructura interior podría modificarse sin alterar la exterior.

Para su construcción, sin afectar al funcionamiento de los radares del aeropuerto que requiere una altura libre de 43 metros ⁽³³⁾, se optó por alzar la cubierta a través de gatos hidráulicos. Con este procedimiento además, se pudo unir todos los elementos que componían la cubierta a nivel del suelo y luego levantarlo, y así minimizar los riesgos que pudiesen ocurrir.



[Imagen 25. Vigas interiores.]



[Imagen 26. Construcción.]

Primero se ensamblaban sobre el suelo las piezas que componían la parte central de las vigas, se colocaban las piezas prefabricadas que conformaban las crujías entre vigas en su posición exacta y se pretensaba a través de un par de tirantes. ⁽³⁴⁾

Antes de alzar la sección central, había que erguir el conjunto de elementos de diámetro 914mm que componían los soportes en “Y” en su posición exacta con la parte de la cubierta que corresponde a esa zona. Después se alzaba la cubierta central 30 metros y en esa posición se debía de unir a la otra parte que ya estaba en su sitio para garantizar la continuidad de la cubierta en toda su longitud.

Este procedimiento se realizó de tres en tres crujías -54 metros-, excepto un levantamiento que fue únicamente de una crujía -18 metros- ⁽³⁵⁾. Una vez todo estaba unido en su posición exacta, se podía proceder a la colocación de la fachada acristalada, la cual apoya sobre unos elementos horizontales que transmiten su peso al suelo como se verá en el análisis estructural.

Los arquitectos realizaron este proyecto en conjunto junto al equipo de ingenieros Arup, para así conseguir la imagen visual deseada en un proyecto cuya estructura es determinante para su función. Además, dicha estructura salva una distancia de 156 metros gracias a las conocidas vigas Gerber como ahora se explica. Es un claro ejemplo en el que la idea proyectual, la estructura y la construcción tienen que ir unidas en el proceso para lograr todos los objetivos en uno.

(33) Web: <http://www.rsh-p.com/projects/heathrow-terminal-5/>

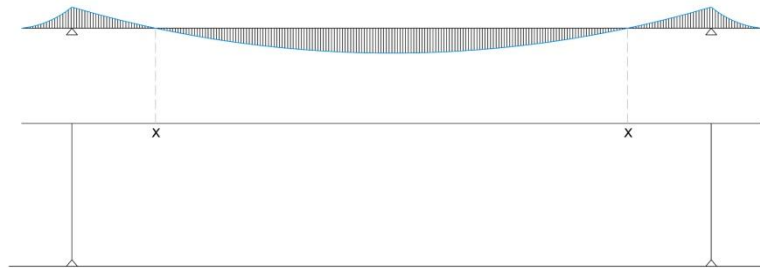
(34) IABSE.2009 *Outstanding Structure Award- HeathrowT5A*. IABSE British Group.

(35) Web: <http://www.engineeringtimelines.com/scripts/engineeringItem.asp?id=1349>

Análisis estructural

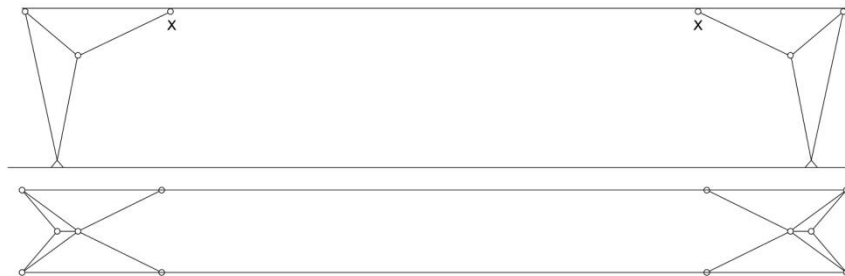
La estructura principal de la Terminal de Heathrow es un trabajo conjunto de los soportes con la cubierta y la fachada.

No emplea el principio Gerber al uso, sino que para el proyecto se acepta que el punto en el diagrama de flectores donde el momento es nulo, es como si trabajase como articulación, para así hacer unos cálculos y un diseño más sencillo. [Figura 49]. En ese punto es donde se trabaja para unir el conjunto de soportes con la cubierta.



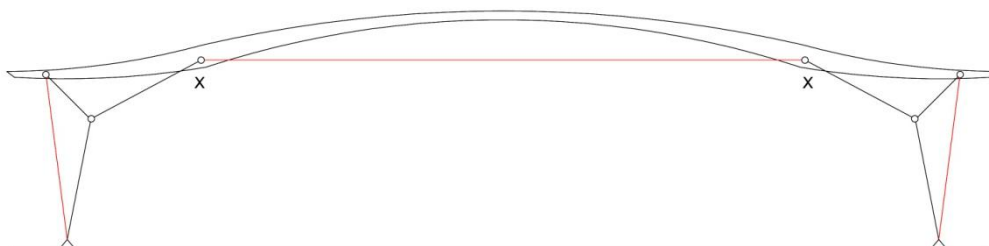
[Figura 49. Viga continua]

A la viga no se le añaden unas rótulas como en otros casos, sino que en este caso hay una particularidad: la viga es continua. Por lo que esos puntos, a los que se le ha llamado X separados entre sí 107 metros, permiten que la estructura trabaje en conjunto, pues hacen de unión de los soportes con la cubierta. Los soportes forman una "L invertida triangulada" inclinada en sección y en planta una especie de x. [Figura 50]



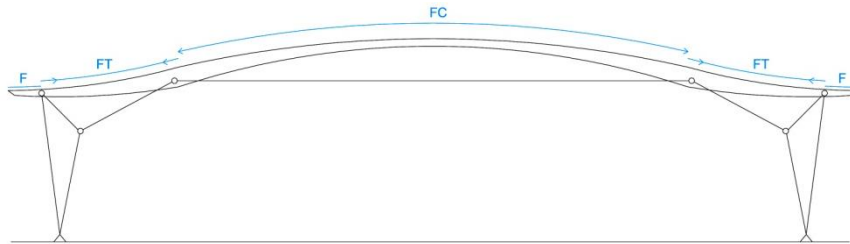
[Figura 50. Soportes]

Ahora bien, como la cubierta es un arco, se producen empujes sobre la estructura que son absorbidos en cada viga por un par de tirantes pretensados que van de punto X a punto X. Además, la estructura también tiene unos elementos que trabajan a tracción a cada extremo para que la cubierta no levante. [Figura 51]



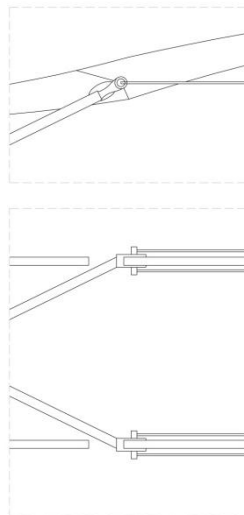
[Figura 51. Tirantes]

No se puede olvidar que la cubierta es continua y debido a su gran canto trabaja principalmente a flexión en toda su luz, y en menor medida a compresión en la parte central y a tracción de los puntos X a los extremos. [Figura 52] [FC=flexocompresión, FT= flexotracción, F=flexión.]



[Figura 52. Cubierta]

La cubierta forma parte de la estructura, y la carga por su propio peso es transmitida a los soportes para así llegar a la cimentación. Por eso, en el punto X de las vigas –que son las que de alguna manera soportan el peso de la cubierta- y para minimizar la excentricidad que se pueda producir al transferir cargas de unos elementos a otros, hay una especie de hueco o vacío que permite que los esfuerzos sean dirigidos con la menor excentricidad posible.⁽³⁶⁾ [Figura 53]



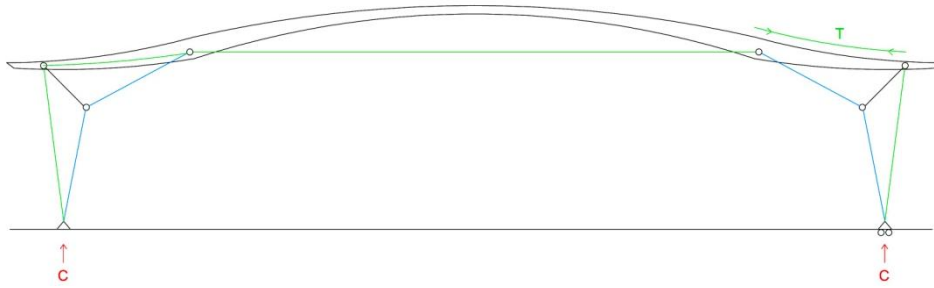
[Figura 53. Detalle conexión soportes-cubierta]



[Imagen 27. Conexión.]

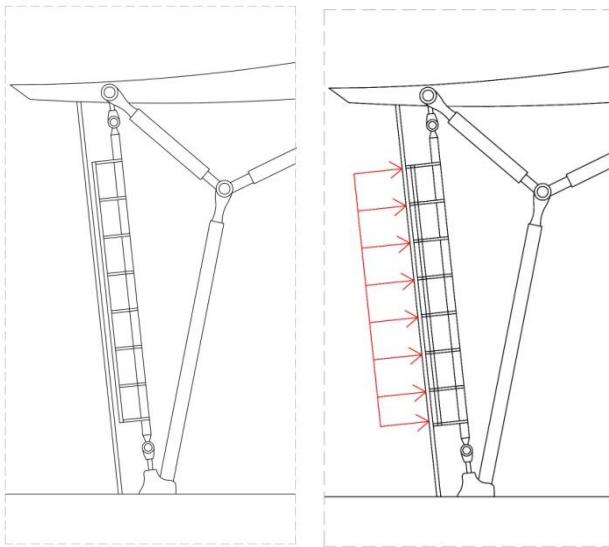
La estructura trabajaría de esta manera con las siguientes tensiones internas. (Azul para compresión, verde para tracción y rojo para reacciones)[Figura 54] Como se ve, la cubierta es continua, y las partes exteriores que están trabajando a tracción forman parte del conjunto; es decir, forman parte de la cubierta por su continuidad, pero a la par forman parte del sistema que equilibra las fuerzas y permite que trabaje sin colapsar.

(36) IABSE.2009 *Outstanding Structure Award- HeathrowT5A*. IABSE British Group.

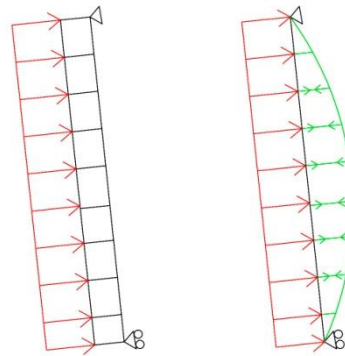


[Figura 54. Reacciones y tensiones internas]

Como la estructura debe soportar también el cerramiento de fachada, esto da lugar a dos situaciones: una viga atirantada a flexión cuando actúa el empuje del viento, y un soporte comprimido bajo el peso del acristalamiento y de la cubierta.

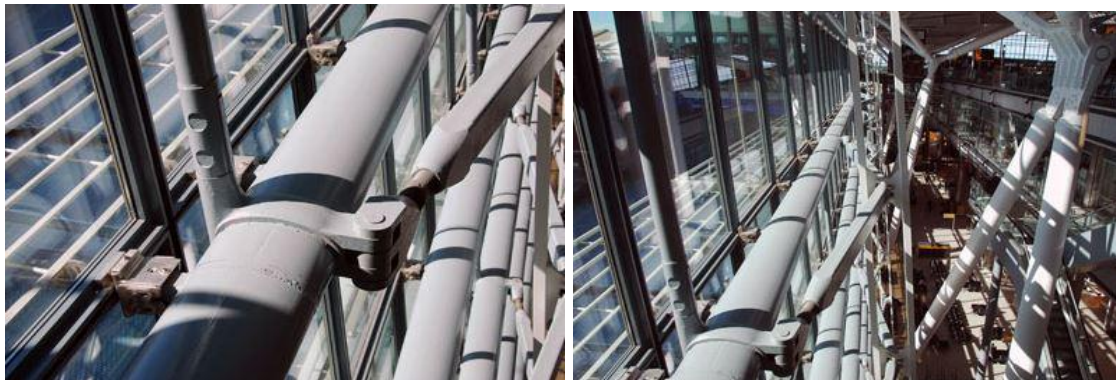


[Figura 55. Fachada]



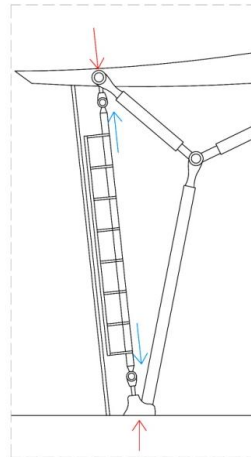
[Figura 56. Empuje del viento]

En cualquiera de los dos casos, ninguno de los elementos que forman el atirantamiento puede resultar comprimido debido a su gran esbeltez; por lo que hay que aplicar una fuerza de pretensado para evitar posibles compresiones debidas a las cargas actuantes.



[Imagen 28 y 29. Detalle encuentro fachada.]

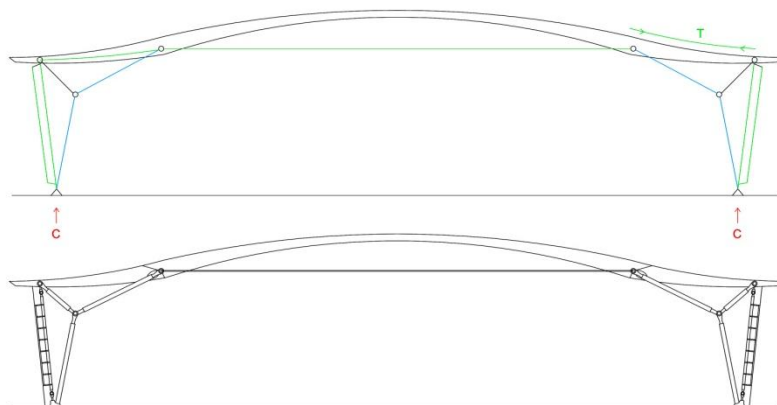
Por otro lado, cuando actúa el peso de la cubierta y del acristalamiento, el conjunto atirantado funciona como un único soporte. Al actuar la carga, el peso comprime el elemento interior y éste no funcionaría porque no tiene rigidez. Por ello, como la pieza está pretensada, el elemento funciona a tracción ya que el valor de pretensado al igual como se ha dicho en el párrafo anterior, tiene que superar a la compresión que pueda afectarle. Además, al funcionar a tracción la cubierta no levanta. [Figura 57]



[Figura 57. Peso cubierta y fachada.]

La manera de pretensar el tirante no se ha podido observar en planos ni en imágenes. Al necesitar de un punto fijo y con rigidez al que anclarse, lo lógico es que por la parte inferior se ancle a cimentación, y por la parte superior al punto donde se conecta con los elementos comprimidos de los soportes, pues ahí hay firmeza suficiente.

Con lo anterior, la estructura funciona de la siguiente manera [Figura 58], y está arriostrada en la cubierta gracias a unos tirantes en cruz en ambas direcciones.



[Figura 58. Conjunto en sección.]

Como se ha dicho al principio de este análisis, la estructura se calcula suponiendo que el punto X es una articulación aunque en realidad no lo sea. Esto permite el diseño inicial del proyecto a través de unos cálculos más o menos acertados –ya que no se sabe la exacta posición de X- , como si fuese isostática; es decir, se trabaja con la estructura como si la cubierta tuviese esas rótulas para llegar al resultado final más fácilmente.

AEROPUERTO DE STANSTED



[Imagen 30. Stansted acceso principal]

En 1981 empezó el diseño de la actual terminal del aeropuerto por el estudio Foster and Partners en colaboración con Ove Arup & Partners. El proyecto presentó un cambio en la idea de los aeropuertos, pues invirtió la organización de los niveles, situando las plantas de servicios e instalaciones bajo el nivel de la calle, para así situar la planta de terminal de pasajeros en la parte superior. Al cabo de diez años, el aeropuerto se abrió con esta nueva terminal. ⁽⁴¹⁾

La estructura principal se compone de una retícula cuadrada de 121 módulos -cada uno de 18 metros de lado- que forma la cubierta, y la cual se soporta gracias a 36 conjuntos de soportes situados entre sí cada 36 metros. ⁽⁴²⁾

Los módulos de cubierta están formados por elementos triangulares planos y una claraboya central. Es el conjunto de los 4 soportes truncados en la parte superior⁽⁴³⁾ – con forma de pirámide invertida- lo que sostiene la retícula para transmitir sus cargas a la cimentación. Estas columnas están formadas por elementos tubulares de 457 mm de diámetro⁽⁴⁴⁾ que trabajan a compresión y cables que trabajan a tracción soportando los empujes de que provoca la cubierta.

Al situar prácticamente toda la infraestructura en los niveles inferiores –con estructura independiente-, la cubierta se pudo diseñar ligera; lo que permitió dejar las fachadas acristaladas ya que no tenían que soportar peso. Sólo una pequeña parte de equipamiento se situó en el espacio que hay entre el conjunto de soportes, como paneles de información, aparatos de control climático, cajas de incendios entre otros servicios ⁽⁴⁵⁾, para dejar el resto de la terminal libre de estructura e instalaciones.

(41) Foster, Norman. 1999. *Norman Foster: obras seleccionadas y actuales de Foster and Partners*. Paraninfo.

(42) “La estructura como generadora de espacio arquitectónicos” Universidad Católica de Colombia.

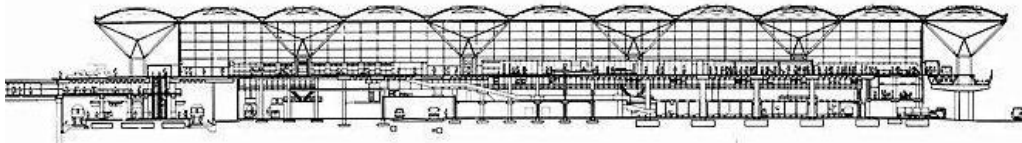
(43) Slessor, Catherine. 1997. *Arquitectura y sostenibilidad. Eco-Tech*. Gustavo Gili.

(44) Web:<http://www.engineering-timelines.com/scripts/engineeringItem.asp?id=235>

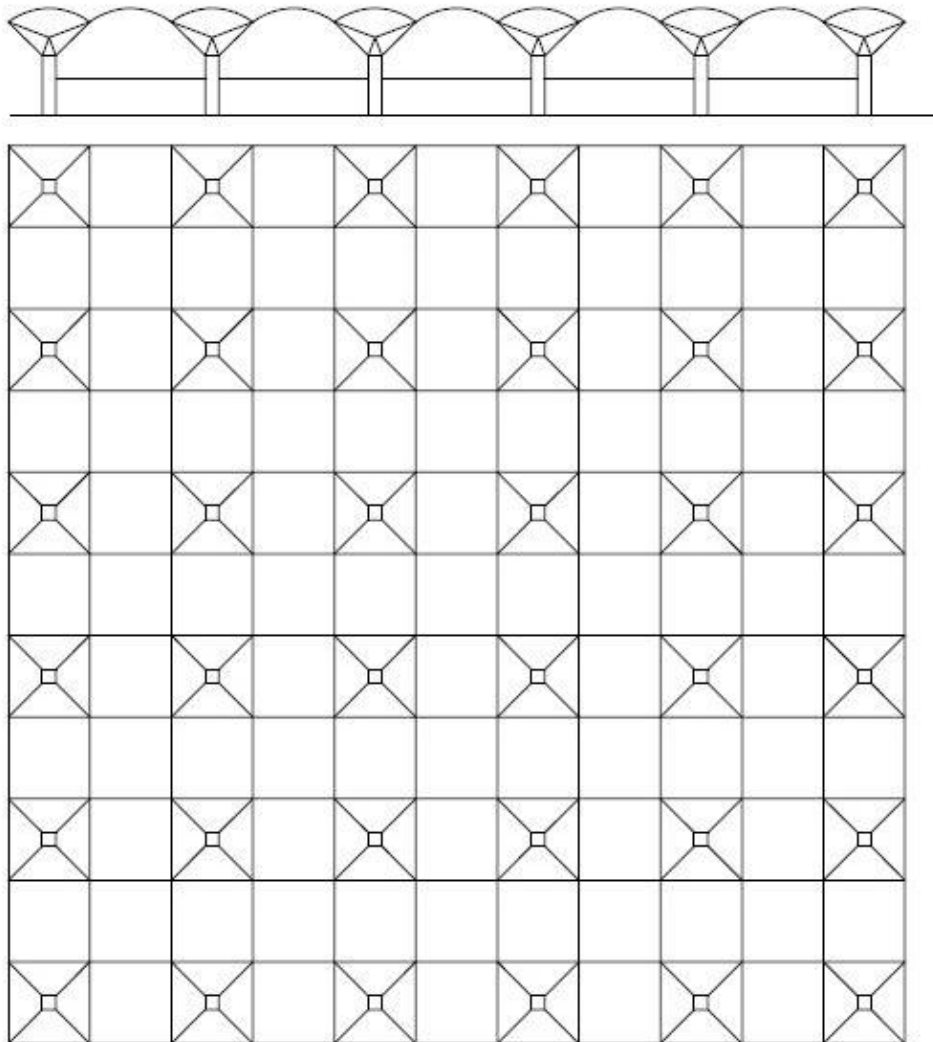
(45) Treiber, Daniel. 1998. *Norman Foster*. Akal.

Análisis estructural

La estructura del aeropuerto de Stansted está compuesta por 121 módulos como se ha dicho anteriormente, es decir por 11 en cada dirección. Ahora bien, como la cubierta es simétrica tanto es sección longitudinal o transversal; en el análisis se va a realizar en un plano para ver así como influye en su comportamiento las cargas que puedan darse sobre el conjunto; pero no se puede olvidar que el análisis de las vigas se dan en dos sentidos. El conjunto de pilares se va a idealizar como uno solo, es decir, como un único apoyo, pues aunque sean cuatro soportes, todos actúan juntos y el análisis se hace como un único punto de apoyo.

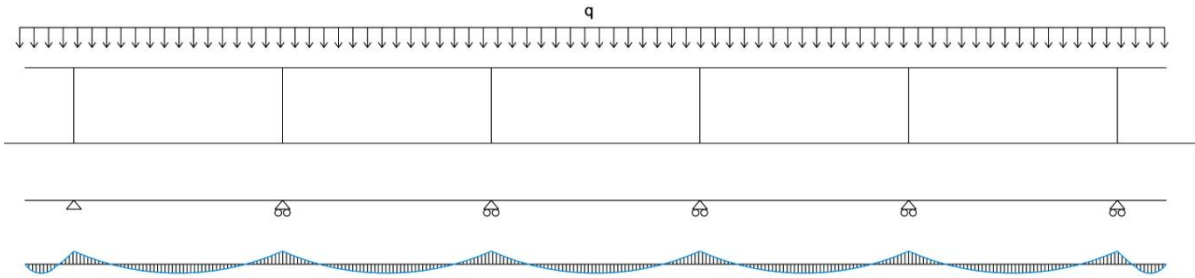


[Imagen 31. Sección]

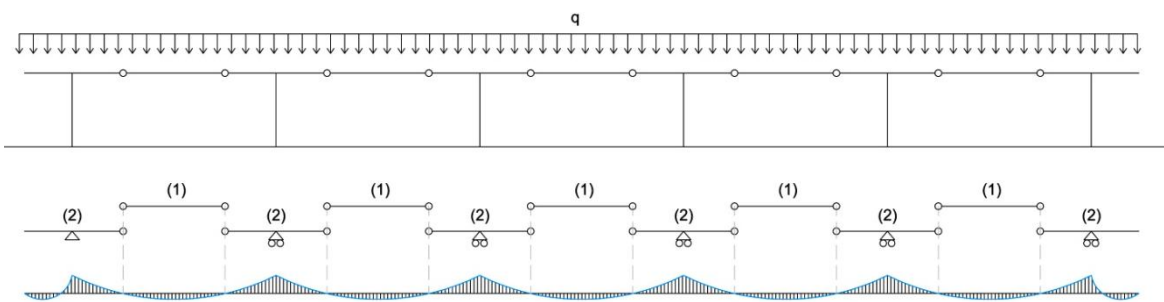


[Figura 59. Sección y planta.]

Si se idealiza la estructura, se parte de una viga continua y simétrica con varios apoyos [Figura 60] Al introducir una serie de rótulas –en cuyo punto el momento es cero- se pasa un sistema en el que unas vigas están apoyadas (1) y otras vigas dan apoyo (2). [Figura 61]



[Figura 60. Viga continua recta.]

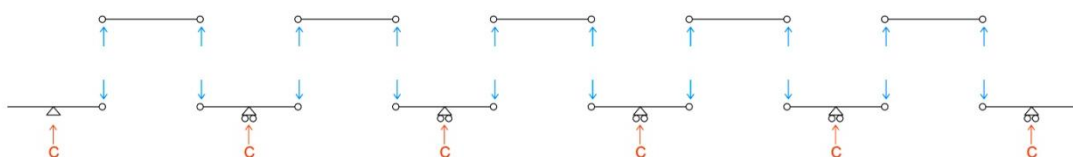


[Figura 61. Viga con rótulas.]

En este plano se tienen en cuenta 6 apoyos, por lo que el número máximo de articulaciones es 4 (hay que tener en cuenta que se han idealizado los apoyos a 6, pero serían el doble, y el número máximo de rótulas sería 10).

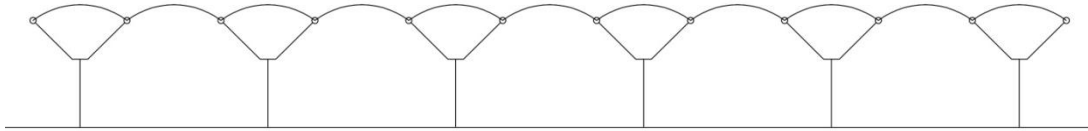
Por otra parte, como en el Forth Bridge, se han situado articulaciones en tramos adyacentes, en los cuales se consigue el equilibrio ya que los soportes están fijos –aunque en el esquema sean apoyos deslizantes para idealizarlo como viga Gerber, en la realidad son fijos-. Además, se han situado en un punto exacto para que la viga se dividiese en tramos de la misma longitud, y así crear una cubierta de retícula.

Con este supuesto de viga recta, los tramos suspendidos transmitirían su carga a las articulaciones y éstas a los apoyos dando lugar a unas reacciones como las siguientes [Figura 62]. Aunque todos los pilares trabajen a compresión, los dos pilares exteriores del conjunto trabajarían por una parte a compresión –debido a la carga transmitida por la viga- y por otra parte tendrían tensiones de tracción –para evitar el vuelco que pudiese producirse al carecer por ese extremo del peso de otro tramo apoyado-; pero siendo el valor de las cargas a compresión siempre mayor que el de tracción.



[Figura 62. Reacciones en viga recta.]

Ahora bien, en la realidad los soportes se dividen en una parte recta y otra inclinada; y la viga que se ha articulado y dividido en diferentes vanos, no es recta, sino que tiene una forma arqueada [Figura 63], la cual produce empujes que hace que ésta tienda abrirse, por lo que se necesita de unos tensores para contrarrestar el empuje. En la Figura 64 se muestra una figura de lo que sería unos tirantes en un caso general. Sin embargo, en este proyecto los tirantes adoptan el siguiente esquema de la Figura 65, en el que forman parte del conjunto “arbolado”.



[Figura 63. Esquema forma del conjunto.]

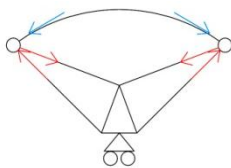


[Figura 64. Esquema con tirantes generales.]

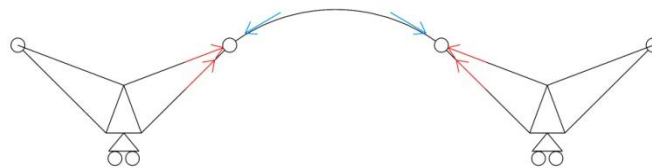


[Figura 65. Esquema con tirantes en el proyecto.]

Si se estudia por separado los módulos de la cubierta, en la Figura 66 se observa que los empujes que produce la cubierta son absorbidos por el tirante trabajando a tracción y por la ménsula sobre el soporte trabajando a compresión. Mientras que en la Figura 67 se observa que el módulo curvo produce compresión tanto en el tirante como en la ménsula. Por lo tanto, los tirantes se tienen que pretensar, y la tracción que se transmite por el empuje junto con la tensión de pretensado no debe superar la admisible por el tirante; y por otro lado, la compresión que pueda llegar a los cables no debe ser superior a la tensión de pretensado.



[Figura 66. Esquema vano impar.]



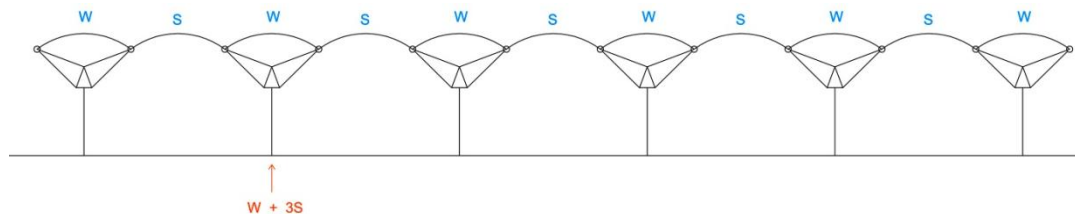
[Figura 67. Esquema vano par.]

Por lo tanto, en el conjunto hay unas tensiones internas que se representan en la Figura 68, -con las compresiones en azul, las tracciones en verde y las reacciones en rojo-.

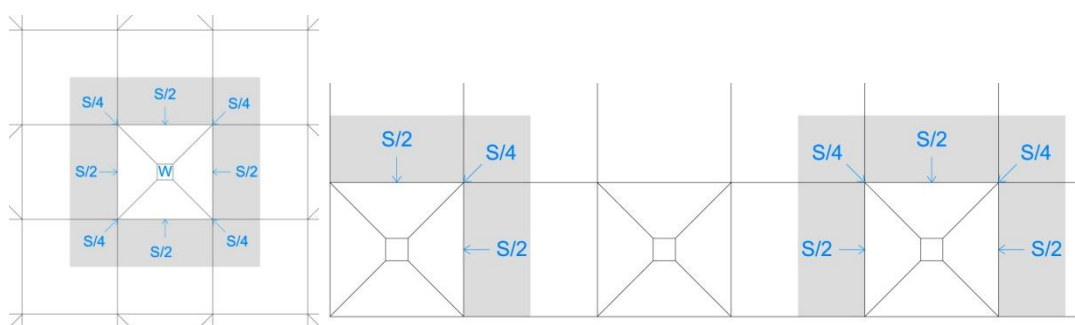


[Figura 68. Tensiones internas.]

Si se examinan las cargas que actúan sobre la viga Gerber, teniendo en cuenta la combinación más desfavorable de permanentes y variables, se genera un esquema como el de la Figura 70, en el que W representa el conjunto de las cargas de la estructura y de la cubierta que hay sobre ella, mientras que S representa la carga de la cubierta apoyada. Por lo que cada soporte debe aguantar las $W+3S$. [Figura 69]



[Figura 69. Cargas en sección]



[Figura 70. Cargas sobre la estructura.]

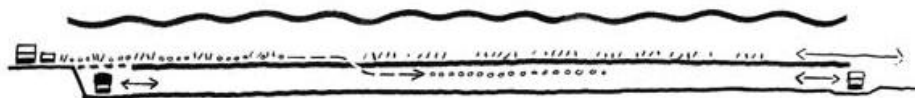
[Figura 71. Soportes laterales y exteriores]

Si se estudia en planta, se ve que los soportes de los conjuntos centrales sí que soportan las cargas de la Figura 70, pero que los soportes de los laterales, así como el de las esquinas soportan cargas diferentes [Figura 71].

En estos casos, los soportes llevan cargas diferentes a los centrales, y posiblemente el valor de la tensión de pretensado de los tirantes deba de ser mayor que en el resto, puesto que no reciben las mismas cargas por todos sus laterales y esto podría producir vuelco. Por otro lado, los pilares al recibir diferente carga podrían ser de menos sección, -aunque al ser la cubierta ligera las cargas no varíen mucho-.

El proyecto está realizado de forma similar en ambas direcciones, por lo que el análisis anterior sobre la viga Gerber debe entenderse en los dos planos. Por lo tanto, los elementos estructurales –soportes, módulos de cubierta, rótulas, tirantes- hacen su función en ambas direcciones, es decir, por partida doble y deben estar dimensionados para ello.

Como un proyecto es la unión de la idea arquitectónica, del proceso constructivo y de la estructura; todos los soportes, tirantes u otros elementos constructivos –de las mismas características entre ellos- tienen dimensiones iguales puesto que así se logra una imagen más estética y de idea de proyecto.



[Imagen 32. Idea]

PALAZZETTO DELLO SPORT

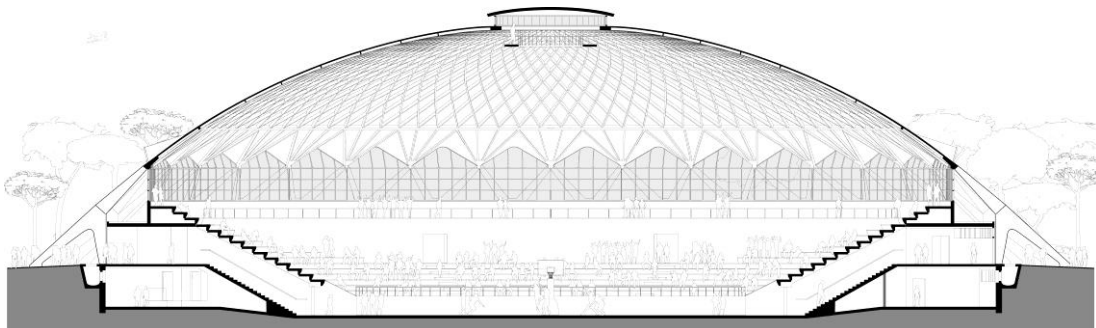


[Imagen 33. Palazzetto dello Sport]

El Palazzetto dello Sport fue uno de los edificios que se diseñó para albergar los Juegos Olímpicos de 1960 que se celebraron en Roma. Esta obra en particular era el lugar en donde se celebraban los combates de boxeo y los partidos de baloncesto durante los Juegos.

Pier Luigi Nervi fue a quien se le adjudicó en 1950 la obra; pues el proyecto debía lograr un espacio libre de elementos estructurales, y además, ser económico tanto en el proceso de ejecución, como en la infraestructura y mantenimiento. Nervi había diseñado por aquel entonces el Salone B en Turín, el cual resolvía los mismos requisitos. ⁽²⁴⁾

El Palazzetto se compone de una cúpula circular de 60 metros de diámetro en planta que se apoya sobre 36 soportes con forma de “Y” -que se disponen radialmente desde el centro de la cubierta cada 10 grados ⁽²⁵⁾ -formando una especie de anillo que rodea la gran cubierta. Esta especie de pilares inclinados siguen la dirección de la pendiente de la cúpula y están fijados contra las cimentaciones para resistir el empuje de la cubierta –como si actuaran de contrafuertes-. El conjunto de la obra abarca un diámetro total de 80 metros en planta.



[Imagen 34. Sección]

(24) Iori, T. & Poretti, S. *The nervi System: between complexity and ethic*. Universidad de Roma “Tor Vergata”, Italia.

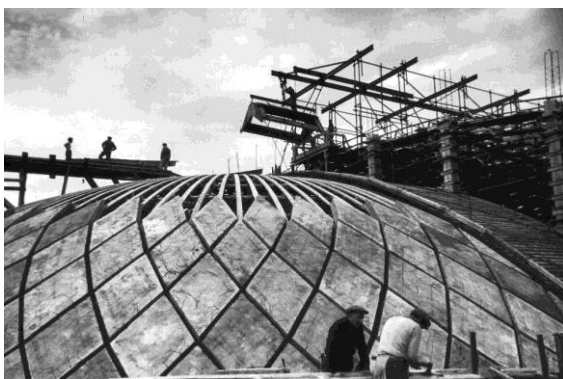
(25) Iori, Tullia. 2009. *Pier Luigi Nervi*. Milán. Motta ARchitettura.

En la parte interior del edificio, se sitúan unas gradas descendientes que llegan hasta la pista central de juego. El espacio que se crea entre el graderío y los soportes inclinados conforma un anillo perimetral en el que se sitúa la parte de servicios – administraciones, bares, vestuarios o servicios sanitarios entre otros. Además, para ofrecer luz natural se crea una cristalera continua que rodea todo el edificio y salva la altura entre las gradas y la cúpula.

Para la construcción del edificio, la cimentación se realizó a través de una especie de viga circular que rodease todo el futuro edificio y absorbiese los esfuerzos axiales y los empujes que recibiría debido a la cubierta curva.⁽²⁶⁾ Una vez se había ejecutado el basamento, se prosiguió construyendo los soportes a través de hormigón in situ, cuya forma debía seguir la misma pendiente que las fuerzas que produce el arco, para así que estas se transmitiesen a las cimentaciones de forma directa.

El procedimiento de construcción era doble, ya que por una parte se estaba ejecutando in situ el anillo exterior que soportaría la cúpula, mientras que por otro lado, se estaban realizando los bloques prefabricados que se usarían para conformar el conjunto de la cúpula.

La idea de lo que se conoce como el sistema Nervi –económico y rápido-, consistía en descomponer la bóveda de la cubierta en miles de piezas –concretamente 1620- las cuales se construirían a pie de obra. La cúpula estaba compuesta como por anillos sucesivos, por lo que había un total de 13 fragmentos diferentes –que podían ser triangulares, romboidales o rectangulares- a los cuales se les llamaba “tavellonis”⁽²⁷⁾. Estas piezas no se fabricaban a través de encofrados de madera, sino que se usaban una especie de “contramoldes” para crear las piezas de hormigón armado un espesor de 3 cm.⁽²⁸⁾ Ésta técnica es la que se usó, anteriormente, en el Salone B de Turín, en la cual se emplea un material conocido como *ferrocemento*⁽²⁸⁾ el cual fue implantado básicamente por Nervi, y que consistía en reformular las proporciones de acero y hormigón propias del hormigón armado.



[Imagen 35. Puesta en obra *Tavellonis*.]



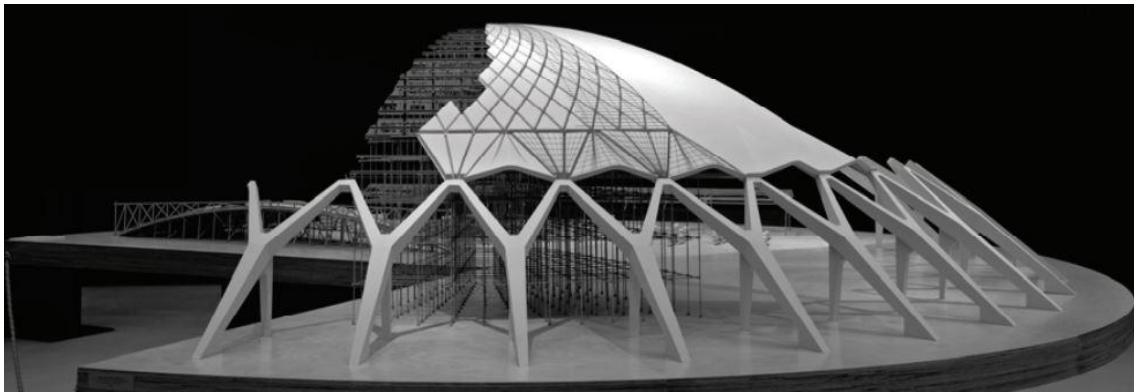
[Imagen 36. *Tavellonis*.]

(26) www.Arch.mcgill.ca/prof/sijpkcs/arch-struct-2008/book-2.pdf

(27) Iori, T. & Poretti, S. *The nervi System: between complexity and ethic*. Universidad de Roma “Tor Vergata”, Italia.

(28) Iori, Tullia. 2009. *Pier Luigi Nervi*. Milán. Motta ARchitettura.

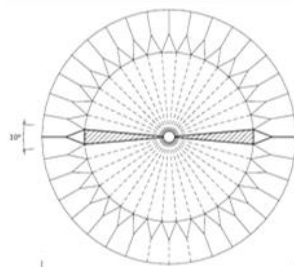
Una vez estaban los soportes contruidos, y las piezas prefabricadas listas para poner en obra, se empezó con la construcción de la cúpula. Se debían situar primero los bloques más cercanos al anillo exterior, para así sucesivamente ir llegando hasta la parte central de la cúpula. Por otra parte, los huecos que quedaban entre piezas se rellenaban vertiendo hormigón sobre ellos. Posteriormente, sobre todos los bloques de la cubierta se cubrieron con hormigón in situ para formar una especie de encofrado, y diese una imagen de monolito. El proceso de colocar las piezas y verter el hormigón sobre la cúpula duró solamente 30 días, gracias a la rapidez del sistema Nervi. ⁽²⁹⁾



[Imagen 37. Modelo de etapas constructivas]

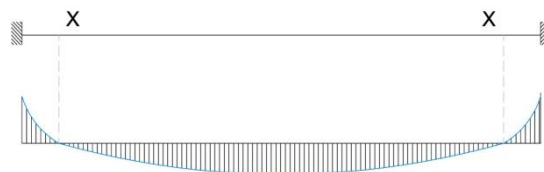
Análisis estructural

El proyecto está compuesto por un sistema radial [Figura 1] de elementos planos aislados ⁽²⁹⁾, pero se estudiará como si el pórtico fuese un único elemento, y no las 1620 piezas que se ha dicho anteriormente. El análisis que se realiza es similar en todos los *pórticos* del proyecto.



[Imagen 38. Planta.]

Este proyecto no es una viga Gerber, pero se diseñó como si lo fuese, pues una viga continua se sabe que tiene un punto X donde el momento es cero. [Figura 72]

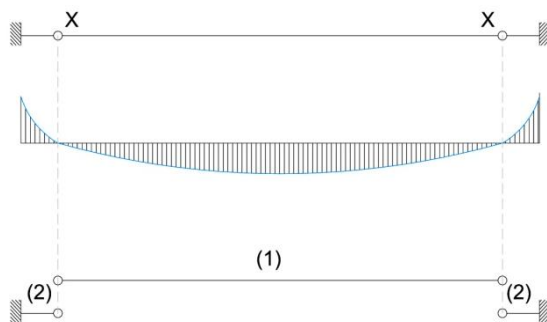


[Figura 72. Viga continua.]

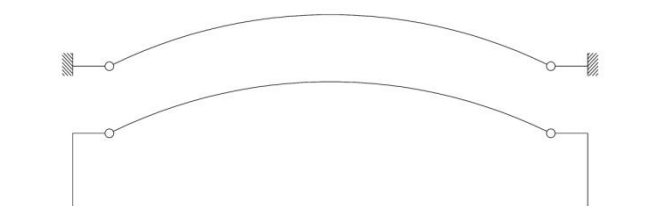
(29) Iori, T. & Poretti, S. *The nervi System: between complexity and ethic*. Universidad de Roma "Tor Vergata", Italia.

Por lo tanto, para empeñar con el dimensionado y poder hacerse una idea de las medidas de proyecto, se diseña como si la viga tuviese unas rótulas en esos puntos de momento cero. Esto facilita los cálculos al hacerlo como si fuese un sistema isostático.

Si a esa viga se le sitúan dos rótulas [Figura 73], se crea un vano central apoyado (1) y dos tramos exteriores que dan apoyo (2). Si el tramo central en vez de ser recto fuese curvo, como en la realidad es el proyecto; la estructura no necesita obligatoriamente tirantes o algún elemento que absorba los empujes que se van a crear al intentar la cúpula abrirse, puesto que tiene una unión empotrada. [Figura 74]

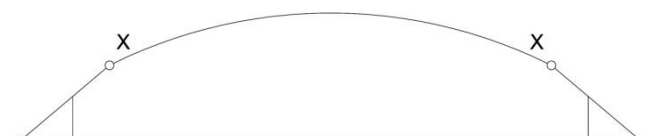


[Figura 73. Viga con rótulas.]



[Figura 74. Parte central arqueada.]

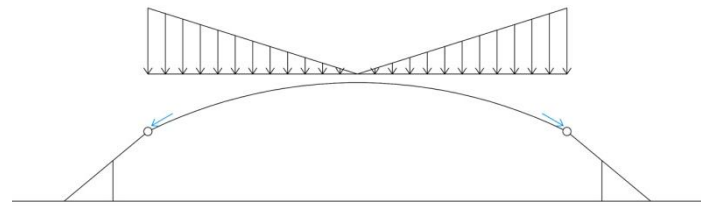
Sin embargo, al ser el diseño arquitectónico un papel fundamental en el proyecto, otro elemento que puede absorber estos esfuerzos horizontales es el contrafuerte –cuya función es transmitir los empujes al terreno-. Se optó por este elemento estructural, y al ser un espacio radial, éstos creaban un efecto visual de un anillo perimetral. Pero a diferencia de realizarlos con la geometría tradicional de acabar en un soporte más grueso; los contrafuertes toman inclinación tangente desde la base de la cimentación hasta el punto donde se encuentran con la cúpula –la supuesta articulación-. [Figura 75]



[Figura 75. Sección del proyecto.]

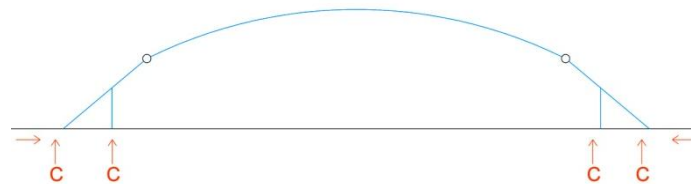
La carga que actúa sobre el edificio -siendo la combinación más desfavorable de cargas permanentes y variables- es triangular en la cúpula debido a que al ser un sistema radial, en la parte más central de ésta –que es donde el radio es menor-, tiene un menor ámbito que al ir hacia el extremo –donde el radio es mayor-. Esta carga

triangular acaba llegando a la rótula como una carga puntual como se observa en la Figura 76.



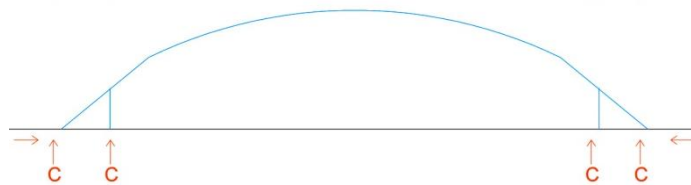
[Figura 76. Carga cúpula.]

Por lo que se crean unas tensiones internas y unas reacciones como las de la Figura 77, las cuales se pueden asimilar en todos los elementos radiales del edificio. La cúpula trabaja a flexocompresión, pero al tener poco espesor, la compresión –en azul– predomina.



[Figura 77. Tensiones internas y reacciones.]

Como se ha dicho, en la realidad el encuentro entre soportes y la cúpula no es una articulación, sino un nudo rígido; por lo que el esquema sería el de la Figura 78. Sólo se idealiza con rótulas para realizar los cálculos, pues facilita el trabajo al hacerlo como si fuese una viga isostática.



[Figura 78. Esquema final.]

MAGAZZINI GENERALI WAREHOUSE



[Imagen 39. Magazzini Generali.]

El almacén de aduanas conocido como Magazzini Generali Warehouse situado en la ciudad de Chiasso –al sur de Suiza- se construyó en 1924 gracias al diseño de Robert Maillart (1872-1940) y a la colaboración del ingeniero Ettore Brenni (1884-1955).⁽³⁷⁾ Actualmente sigue usándose como depósito aduanero bajo el mando del Gobierno Suizo.

El edificio tiene unas dimensiones de 33.4 metros de ancho, 50 metros de largo y 7.5 metros de alto en la parte más alta de la cubierta.⁽³⁸⁾ Se trata de un espacio abierto a dos aguas compuesto por un sistema que trabaja en conjunto con soportes, cubierta y cerchas. La estructura -de hormigón armado en su conjunto- consiste en seis cerchas que se apoyan sobre 6 pares de soportes en forma de “Y” separados entre sí 25 metros⁽³⁹⁾; por lo que se crean 5 vanos transversales. Estos soportes se bifurcan en su parte superior por el lado más exterior para dar apoyo al extremo de la cubierta, y por la parte interior para unirse a la cercha.

La cercha está compuesta de un cordón superior y otro inferior conectados a través de 7 elementos verticales, los cuales en el análisis veremos que no trabajan todos con el mismo esfuerzo axial. Sobre la cercha se sitúa una cubierta de poco espesor, la cual se ejecutó en conjunto para así reforzar las fibras comprimidas de la parte superior de la cercha.⁽⁴⁰⁾

(37) Billington, David P. 1997. *Robert Maillart: builder, designer and artist*. University Cambridge Press.

(38) Web: <http://www.engineering-timelines.com/scripts/engineeringItem.asp?id=1332>

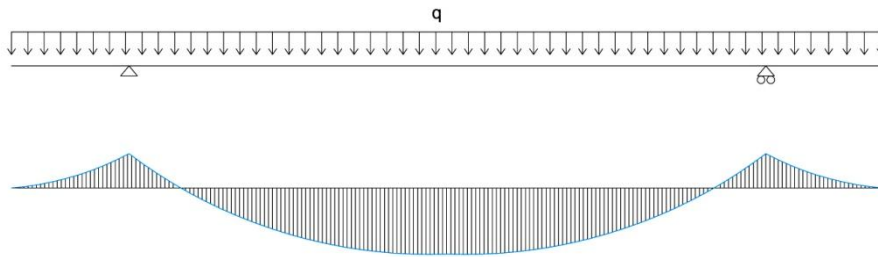
(39) Billington, David P. 1990. *Robert Maillart and the art of reinforced concrete*. Nueva York: Architectural History Foundation.

(40) Silver, Pete. McLean Will & Evans, Peter. 2013. *Structural Engineering for Architects: A Handbook*. Laurence King Publishing.

Para que el conjunto aguante acciones externas horizontales y se prevenga el colapso, el edificio está arriostrado longitudinalmente a través de 4 elementos lineales que se corresponden con los cuatro elementos verticales de mayor altura de la cercha. Además, los soportes van aumentando de canto a medida que se llega a la cubierta hasta tal punto que se bifurca, lo que también asegura el arriostramiento en la otra dirección ⁽⁴¹⁾

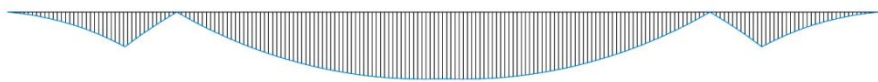
Análisis estructural

El almacén de aduanas de Maillart es conocido por tener una relación visual entre su geometría y el diagrama de momentos de una viga biapoyada con voladizos laterales. Por ello, si se parte de una viga continua biapoyada como al de la Figura 79, se obtienen los respectivos momentos flectores.



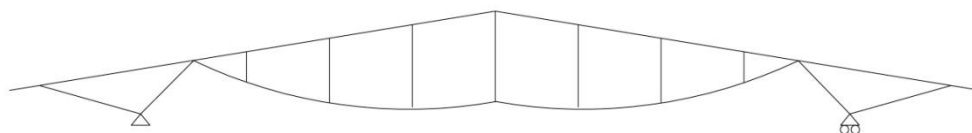
[Figura 79. Viga biapoyada.]

En algunos estudios se ha visto que si se invierte las partes exteriores de este diagrama de momentos se tiene una geometría parecida a la del proyecto. ⁽⁴²⁾ [Figura 80]



[Figura 80. Diagrama flector invertido.]

El proyecto debido a su situación requería una cubierta a dos aguas (por las posibles lluvias y nieves); por lo que si el esquema anterior se traduce en una forma geométrica para el edificio con esta necesidad, se llega al esquema de la Figura 81.

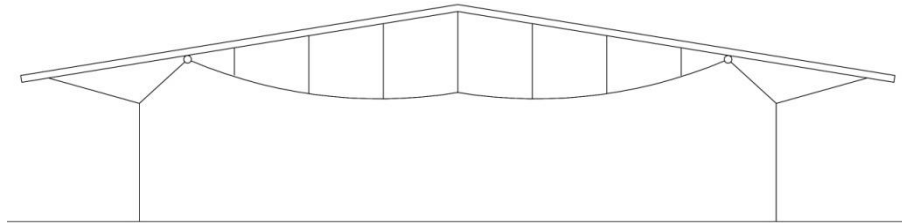


[Figura 81. Esquema de proyecto.]

(41) Picon, Antoine. 1997. *L'art del ingenieur. Constructeur, entrepreneur, inventeur*. Centre Georges Pompidou: Le Moniteur.

(42) Silver, Pete. McLean Will & Evans, Peter. 2013. *Structural Engineering for Architects: A Handbook*. Laurence King Publishing

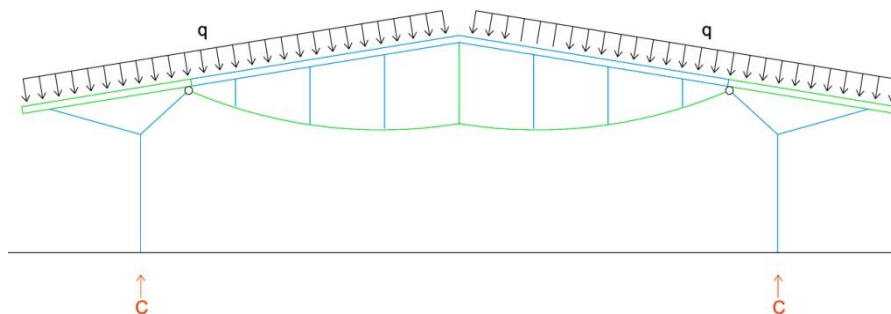
Al igual que en el aeropuerto de Heathrow, este proyecto tiene la cubierta continua, la cual se construyó junto con la cercha, para así reforzar, como se ha dicho, las fibras comprimidas de la parte superior de ésta. ⁽⁴²⁾ Por lo tanto, para facilitar el diseño, al saber que en una viga continua hay ciertos puntos donde el momento es cero, en esos puntos es donde se sitúa la rótula. [Figura 82]



[Figura 82. Esquema de proyecto.]

Situando unas articulaciones en los encuentros entre la cercha y los pilares bifurcados, se logra crear un punto con momento nulo –como en el diagrama–, en el que se crean tres vanos; con la particularidad de que la cubierta es un tablero que forma parte de la cercha.

En este proyecto, el tramo exterior de la cubierta también forma parte del conjunto de los soportes. Por lo que al evaluar las cargas del proyecto debidas al peso propio y a las posibles sobrecargas de nieve, se obtienen las siguientes tensiones internas y reacciones [Figura 83] Se observa que el inferior de la cercha soporta cargas de tracción, pues está construido a través de hormigón pretensado como si actuase de tirante. (Reacciones en rojo, compresión en azul y tracción en verde.)



[Figura 83. Tensiones internas y reacciones.]

Este proyecto representa un esquema estructural realizado a través de hormigón armado in situ, en el que los niveles de fuerza eran casi uniformes en las fibras de los elementos superiores e inferiores según un análisis realizado por Max Bill, por lo que él dijo que “la forma sigue el flujo de las fuerzas” en esta construcción. ⁽⁴²⁾

Por lo tanto, en este caso de estudio en el que los pares de la cubierta tienen continuidad; el principio Gerber se debe a que la sección variable del conjunto de la cercha –tirantes, montantes y cabeza superior comprimida–, hace que el punto donde el canto es mínimo se pueda asimilar a una rótula.

(42) Silver, Pete. McLean Will & Evans, Peter. 2013. *Structural Engineering for Architects: A Handbook*. Laurence King Publishing

CONCLUSIONES

Al inicio del estudio, el empleo de la viga Gerber lo veía relacionado con estructuras en las que su aplicación era directa, es decir, en los que se introducían rótulas en sus vanos para así influir en el comportamiento de la viga y de esta manera en el conjunto del proyecto arquitectónico.

A través de los casos analizados, se ha podido constatar que el concepto de viga Gerber también es una herramienta apta para el estudio y cálculo aproximado de estructuras en fase inicial de proyecto que ayuda a comprender su funcionamiento, situando rótulas virtuales en los puntos de momento nulo en la viga continua, cuya posición fijamos aproximadamente, transformándola así en una pieza isostática cuyo análisis es más sencillo, siguiendo de esta manera la idea de Eduardo Torroja :

“Nunca debe acometerse el cálculo laborioso de una estructura sin haber hecho antes unos primeros tanteos, todo lo burdos y rápidos que se quiera, pero que permitan asegurarse de que se va por buen camino y de que las dimensiones adoptadas, sobre las que la comprobación del cálculo ha de actuar, son aceptables en primera aproximación.” ⁽⁴³⁾

(43) Torroja, Eduardo. 1991. *Razón y ser de los tipos estructurales*. Madrid: CSIC.

BIBLIOGRAFÍA

- Arup. 2006. *Terminal 5, London Heathrow: The main terminal building envelope*. The Arup Journal
- Baker, B. 1884. *The Forth Bridge*. Read at the British Association. Montreal.
- Billington, David P. 1997. *Robert Maillart: builder, designer and artist*. University Cambridge Press.
- Billington, David P. 1990. *Robert Maillar and the art of reinforced concrete*. Nueva York: Architectural History Foundation.
- Foster, Norman. 1999. *Norman Foster: obras seleccionadas y actuales de Foster and Partners*. Paraninfo.
- Giada, Daniele 2003. *La trave Gerber*. Corso di Statica e Stabilità delle costruzioni murarie. Universidad de Catania, Italia.
- IABSE.2009 *Outstanding Structure Award- HeathrowT5A*. IABSE British Group.
- Iori, T. & Poretti, S. *The nervi System: between complexity and ethic*. Universidad de Roma "Tor Vergata", Italia.
- Magee, A.D. 2007. *A critical analysis of The Forth Bridge*. University of Bath, Bath, UK.
- Piano, Renzo. 1990. *Renzo Piano. Buildings & Projects.1971-1989*. Barcelona. Gustavo Gili.
- Picon, Antoine. 1997. *L´art del ingenieur. Constructeur, entrepreneur, inventeur*. Centre Georges Pompidou: Le Moniteur.
- Pizzettu, Giulio y Zorgno Trisciuglio, Anna Maria 1980. *Principi Statici e forme Strutturali*. Torino, Unione Tipografico-Editrice Torinese (UTET)
- Powell, Kenneth.1999 *Richard Rogers: Team 4, Richard+Su Rogers, Piano + Rogers, Richard Rogers Partnership*. Phaidon.
- Powell, Kenneth. 1999-2011. *Richard Rogers: complete works*. London. Phaidon.
- Ruskin, John. 1987, *Las siete lámparas de la arquitectura*. Barcelona: Alta Fulla.
- Silver, Pete. McLean Will & Evans, Peter. 2013. *Structural Engineering for Architects: A Handbook*. Laurence King Publishing.
- Slessor, Catherine. 1997. *Arquitectura y sostenibilidad. Eco-Tech*.Gustavo Gili.
- Torroja, Eduardo. 1991. *Razón y ser de los tipos estructurales*. Madrid: CSIC.

- _ Treiber, Daniel. 1998. *Norman Foster*. Akal.
- _ “*The Forth Bridge. Nomination for Inclusion in the World Heritage List*”. 2014. Historic Scotland.
- _ “La estructura como generadora de espacio arquitectónicos” Universidad Católica de Colombia.

WEBGRAFÍA

http://www.engineering-imelines.com/why/forthRailBridge/forthRailBridge_02.asp

<http://www.benjaminbaker.org.uk/life-and-times-of-benjamin-baker.html>

<http://www.rpbw.com/project/3/centre-georges-pompidou/>

<https://myarchitecturalvisits.com/2014/02/05/centre-pompidou-beaubourg/>

<http://www.arqhys.com/contenidos/arquitectura-high-tech.html>

<http://www.engineering-timelines.com/scripts/engineeringItem.asp?id=1275>

[www. Arch.mcgill.ca/prof/sijpkcs/arch-struct-2008/book-2.pdf](http://www.arch.mcgill.ca/prof/sijpkcs/arch-struct-2008/book-2.pdf)

<http://www.rsh-p.com/projects/heathrow-terminal-5/>

<http://www.engineeringtimelines.com/scripts/engineeringItem.asp?id=1349>

<http://www.engineering-timelines.com/scripts/engineeringItem.asp?id=1332>

<http://www.engineering-timelines.com/scripts/engineeringItem.asp?id=235>

FIGURAS

Elaboración por el autor del trabajo.

IMÁGENES:

- [1] <http://www.ticketone.it/scavi-di-pompei-immagini.html?affiliate=ITT&doc=venuePage&fun=venue&action=images&venueGroupId=17951&picId=28876>
- [2] http://www.tarraconensis.com/cabanes/arco_cabanes.html
- [3] <http://artemisiaweb.forumfree.it/?t=17822572>
- [4, 5 y 6] <https://provinciadiprato.wordpress.com/2013/03/08/viaggiatori-inglesi-a-prato/>
- [7] <https://es.foursquare.com/v/south-queensferry-harbour/4e7f38cad22dc3a88defc51f>

- [8] http://www.engineering-timelines.com/why/forthRailBridge/forthRailBridge_02.asp
- [9] <http://digital.nls.uk/scottish-bridges/pageturner.cfm?id=74570308>
- [10] <http://digital.nls.uk/scottish-bridges/pageturner.cfm?id=74570332>
- [11 y 12] <http://architecturepastebook.co.uk/post/67237731726/scalesofperception-construction-of-the-forth>
- [13] http://www.traveltour.fr/en/sites/default/files/imagecache/ci_gallery/centre%20georges%20pompidou%20paris%20fa%C3%A7ade.jpg
- [14] <http://www.businessdestinations.com/bd-portrait/deconstructing-tradition-the-rise-of-renzo-piano/>
- [15] <https://proyectos4etsa.wordpress.com/tag/archigram/>
- [16] http://www.pixelcreation.fr/nc/galerie/voir/le_centre_pompidou_a_30_ans/les_30_ans_du_centre_pompidou/vue_du_chantier/
- [17] <http://www.arch.ttu.edu/courses/2008/Fall/3501Perl/benavides/project1/A%20Modern%20Approach.htm>
- [18,19 y 20] Pdg DigDesFab2011 Centre Pompidou Analysis
- [21] <http://centropompidou.blogspot.com.es/>
- [22] Centre Georges Pompidou, courtesy Rogers Stirk Harbour + Partners
- [23] <https://es.pinterest.com/pin/464504149048801747/>
- [24] <https://www.flickr.com/photos/jimmywuphotography/22264520944/>
- [25] <http://hughpearman.com/richard-rogers-colossal-new-heathrow-airport-terminal-5-whoops-he-put-the-real-one-in-spain/>
- [26] <http://www.e-architect.co.uk/london/heathrow-terminal-5>
- [27] <http://www.gettyimages.fr/detail/photo-d'actualit%C3%A9/general-view-of-the-new-terminal-5-at-heathrow-photo-d'actualit%C3%A9/80238624>
- [28 y 29] <http://tboake.com/SSEF1/shapes.shtml>
- [30] http://www.allposters.es/-sp/Stansted-Airport-Terminal-Stansted-Essex-England-United-Kingdom-Posters_i2662690_.htm
- [31 y 32] <http://www.fosterandpartners.com/projects/stansted-airport/>
- [33] <http://europavintage.tumblr.com/post/39345865379/palazzetto-dello-sport-rome-italy-from-postales>
- [34] <https://architecturefarm.wordpress.com/2014/02/05/drawing-nervi/>
- [35 y 36] <http://www.domusweb.it/it/dall-archivio/2011/04/28/il-palazzo-delle-esposizioni.html>

[37] ARchitettura come sfida. Roma. Ingegno e costruzione, MAXXI, Rome, 2010.

[28] Master AAPUD-Cubiertas de gran luz.

[39] <http://www.engineering-timelines.com/scripts/engineeringItem.asp?id=1332>