

ALBOROUJ CULTURAL HUB EN EL CAIRO UNA RETICULA ESTRUCTURAL SENCILLA PARA DAR FORMA A UNA GEOMETRIA COMPLEJA

Alborouj Cultural Hub in Cairo. A simple structural grid to shape a complex geometry.

Alejandro Bernabeu Larena ^a, Manuel de la Cal Manteca ^b

^a Dr. Ingeniero de Caminos, Canales y Puertos. Bernabeu Ingenieros.

^b Arquitecto. Máster de estructuras. Bernabeu Ingenieros.

RESUMEN

El escenario exterior de Alborouj Cultural Hub en El Cairo, inaugurado en 2018, es una estructura metálica compleja que combina en su diseño forma, geometría, control del pandeo y legibilidad de las uniones. La geometría del volumen está formada por una doble piel de forma esférica (piel interior) y toroidal (piel exterior), con grandes aperturas superior y en el frente del escenario. El volumen está resuelto con una retícula estructural triangular metálica, que se adapta a las geometrías de las pieles interior y exterior. La retícula está formada por pequeños perfiles en X, constituidos por una pletina principal y una secundaria, que se interrumpe al llegar al nudo, pero que aporta rigidez al perfil y controla el pandeo.

ABSTRACT

Opened in 2018, the outdoor stage of the Alborouj Cultural Hub in Cairo is complex steel structure that combines form, geometry, buckling control of the structural elements and legibility of the connections. The geometry is formed by a double skin that follows a spherical shape (inner skin) and a toroidal shape (outer skin), with large openings both above and in the front of the stage. A triangulated grid was adopted for the double skin surfaces. Small X-type profiles were chosen, formed by a main plate and a perpendicular secondary steel plate, that are interrupted at both ends before reaching the nodes but increase the rigidity of the profile and prevent the main steel plate from buckling.

PALABRAS CLAVE: Forma estructural, geometría, arquitectos-ingenieros, estructura metálica, Cairo

KEYWORDS: Structural shape, geometry, architects-engineers collaboration, Steel structure, Cairo.

1. Presentación general del proyecto

El escenario exterior del Alborouj Cultural Hub se inauguró el 11 de octubre de 2018 con un multitudinario concierto público. Se trata de un hito en la transformación y desarrollo de Alborouj, una nueva zona de expansión residencial en El Cairo (Egipto) (Figura 1).

Con el objetivo de promover eventos culturales, tiene una capacidad de 7.000 personas

de pie o 2.500 personas sentadas, y constituye uno de los principales equipamientos públicos del área, foco de atracción, representación y símbolo del nuevo Cairo. Posteriormente está prevista la construcción de un complejo de mayor tamaño, con un auditorio cubierto y otros equipamientos.



Figura 1. Alborouj Cultural Hub. Inauguración (11 de octubre de 2018).

El proyecto, resultado de un concurso internacional, es obra de Sancho Madrideo Architecture Office (Juan Carlos Sancho, Sol Madrideo) y Bernabeu Ingenieros, en colaboración con los ingenieros y constructores locales Cosmos Engineering y Hassan Allam.

2. Configuración geométrica y estructural

El Alborouj Cultural Hub es una estructura abierta que cubre un escenario exterior, con unas dimensiones de aproximadamente 12 m de ancho y 8 m de alto, sirve de soporte para el equipamiento de iluminación y sonido, y ofrece una imagen icónica al emplazamiento cultural.

A pesar de su complejidad geométrica, aparentemente aleatoria, la configuración geométrica y estructural sigue una lógica basada en el comportamiento por forma de la estructura, el control a pandeo de los elementos y la legibilidad y simplicidad de las uniones. La

geometría está formada por una doble piel que sigue unas formas esférica (piel interior) y toroidal (piel exterior), con grandes aperturas tanto superior como en el frente del escenario (Figura 2).

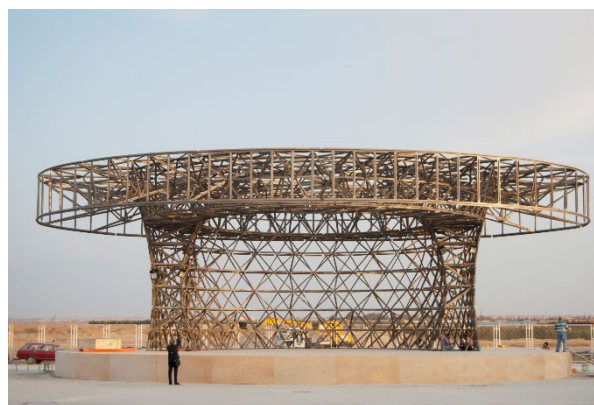


Figura 2. Vista exterior.

Esta doble piel define la imagen exterior del volumen, y conforma el espacio del escenario. Sirve así mismo de soporte del plano abierto de cubierta, que combina a su vez dos geometrías diferentes, elíptica en el perímetro exterior de la cubierta y circular en el anillo interior (Figura 3).

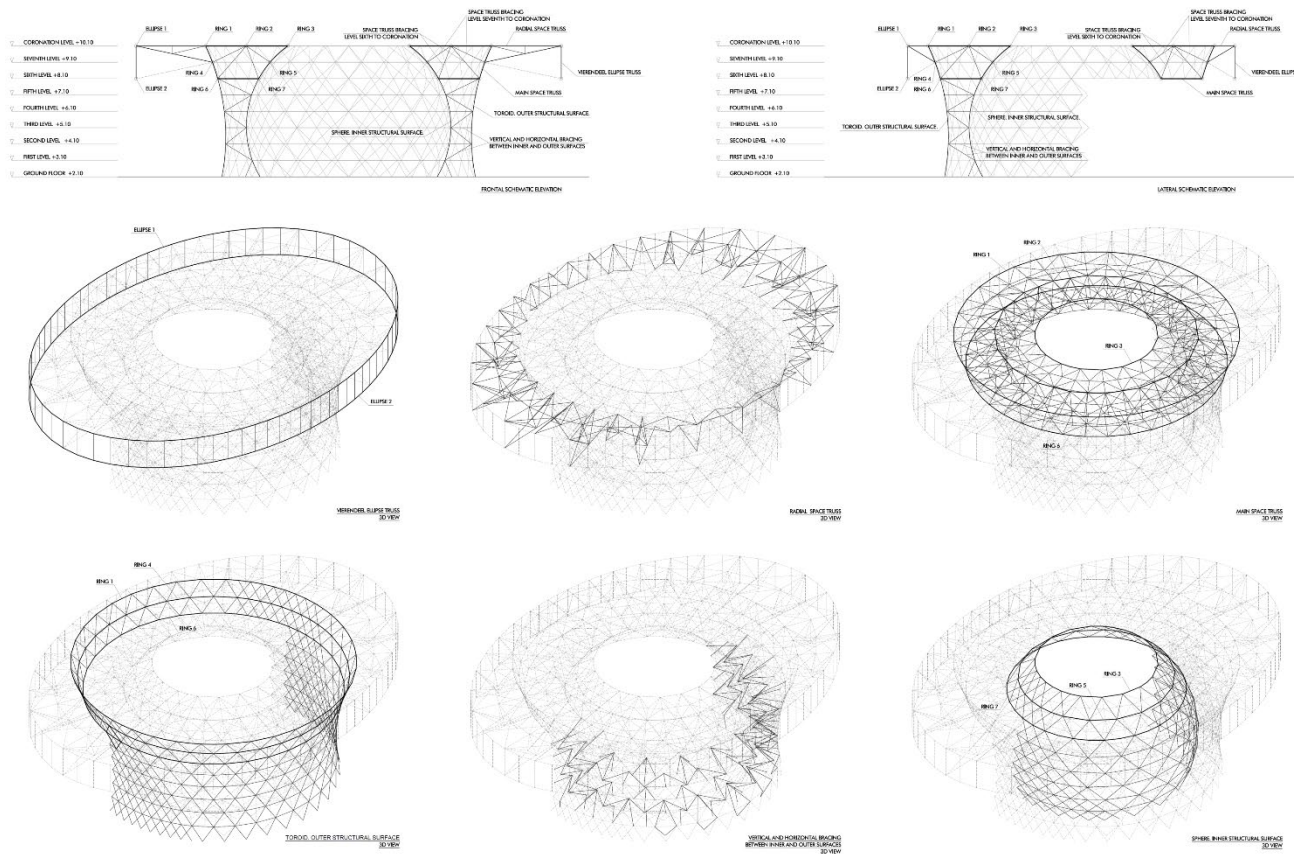


Figura 3. Definición geométrica general.

La geometría adoptada garantiza el comportamiento por forma de la estructura, de manera que los esfuerzos son predominantemente axiales, limitando los esfuerzos de flexión, a fin de asegurar un eficiente comportamiento estructural y permitir adoptar un dimensionado mínimo de los elementos.

Una vez establecida la forma, el reto consintió en definir una retícula estructural que permitiera, con elementos de pequeño tamaño, controlar los efectos de inestabilidad y pandeo. Se adoptó una retícula triangulada de 1,2m, que permitía adaptarse con flexibilidad a la geometría de las dos pieles estructurales -esférica interior y toroidal exterior-, junto con un sistema de diagonales que conectan ambas pieles entre sí, evitando el pandeo de las superficies. Por otra parte, la estructura de cubierta está formada por una celosía triangulada espacial de gran rigidez (Figura 4), que da forma al anillo circular interior y sirve de soporte, mediante una serie de triangulaciones radiales, a una celosía tipo

Vierendeel (Figura 5) que conforma el perímetro exterior elíptico de la cubierta.



Figura4. Celosía espacial en forma de anillo.



Figura 5. Celosía perimetral tipo Vierendeel.

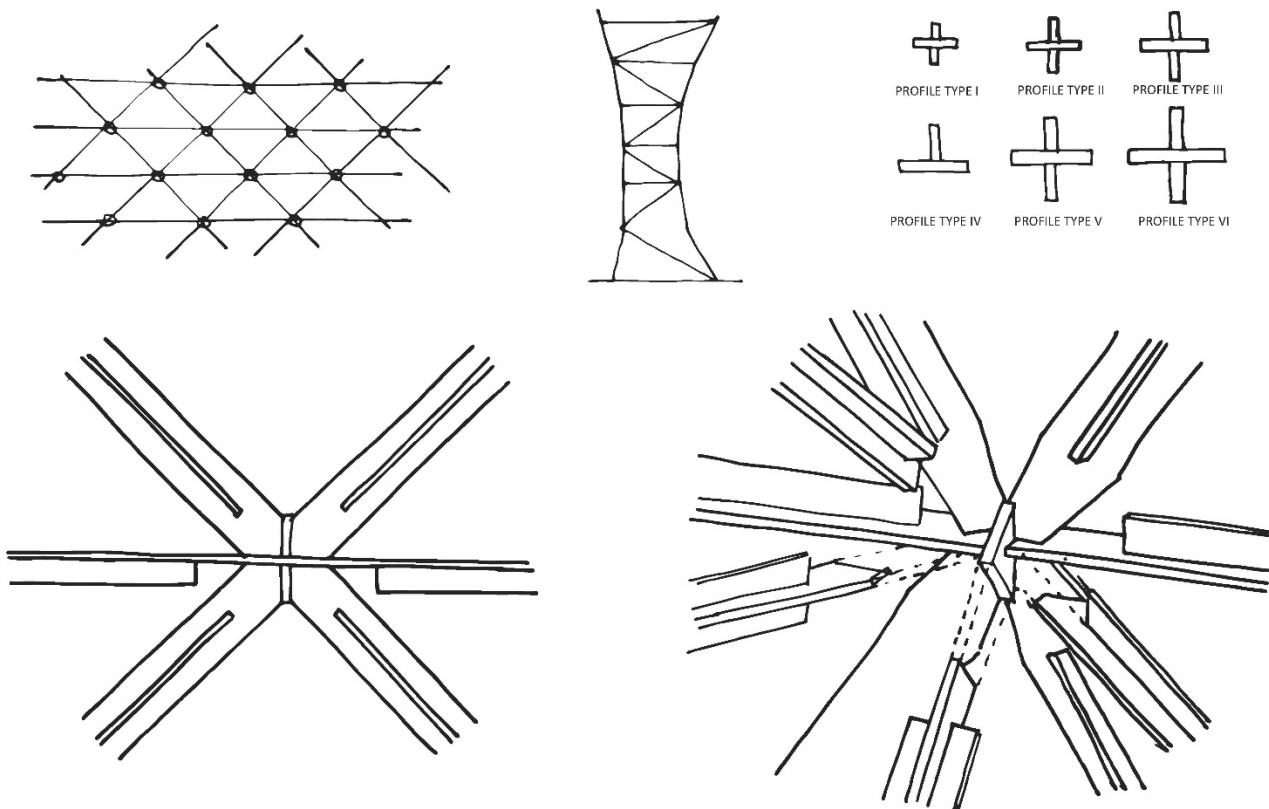
A partir de esta retícula estructural, de gran complejidad geométrica pero que se adapta de forma natural y flexible a los distintos volúmenes, se definió el tipo y dimensión de los distintos elementos, con el objetivo de que tuvieran una presencia mínima. Se debía tener así mismo en cuenta la complejidad de los nudos de conexión, que llegan a conectar hasta nueve elementos distintos. Los perfiles adoptados son perfiles en X, formados por una pletina principal y una pletina secundaria, de espesores de 10 a 20 mm. Las pletinas principales garantizan la transferencia de esfuerzos en los nudos de conexión, mientras que las pletinas secundarias, cuya función estructural es aumentar la rigidez de los elementos y evitar el pandeo, se interrumpen antes de llegar a los nudos. De esta manera, los nudos de conexión únicamente deben garantizar la continuidad de las pletinas principales, simplificando enormemente su diseño, que se resuelve conectando mediante soldadura unas pletinas con otras, con ayuda de pequeños rigidizadores de conexión (Figura 6). El resultado son unos nudos sencillos y

delicados que contribuyen a la precisión y legibilidad de la estructura (Figura 7).



Figura 7. Vista entramado pieles estructurales.

En función de los esfuerzos a los que están sometidos los distintos elementos se definieron nueve tipos distintos de elementos, variando su dimensión de 60x60 a 120x140, de manera que en cada caso se ajusta su dimensión al nivel de esfuerzos que debe soportar (Figura 6). Así mismo, en las zonas donde se abre el volumen en el frente del escenario, donde se concentran importantes esfuerzos por el apoyo de la gran celosía espacial de cubierta, se optó por duplicar localmente la retícula estructural, permitiendo así mantener el dimensionado de los elementos considerados.



3. Desarrollo y características principales de análisis

3.1 Desarrollo de diseño

El desarrollo de diseño se fundamentó principalmente en un minucioso trabajo de colaboración entre los estudios de arquitectura y estructura. Partiendo de la base de una geometría generada a partir de formas puras (esfera, toroide, circunferencia y elipse), se llevó a cabo un proceso de ida y vuelta hasta lograr la forma arquitectónica buscada y estructuralmente adecuada. Además, el uso de formas puras como elementos generadores, facilitó el diseño de pieles y celosías trianguladas, con lo que se consiguió simplicidad y coherencia constructiva y un comportamiento estructural óptimo en base a elementos traccionados o comprimidos (Figura 8).

Este trabajo se apoyó principalmente en los programas de diseño 3D y cálculo de estructuras, Grasshopper-Rhino y SAP2000, respectivamente. Estas herramientas

permitieron un control de la forma y una comunicación entre especialistas necesaria para el desarrollo del diseño.

3.2 Análisis de la estructura

El diseño y análisis de la estructura se realizó en función de la normativa egipcia de estructuras de acero ECOP-205-2007 [2], fundamentada en la normativa americana AISC-ASD-89 [3]. Estas normativas de diseño se basan al método ASD (Allowable Stress Design).

Este método de diseño solo considera la resistencia elástica del material, sin considerar la resistencia en régimen plástico. Y se basa en el principio de que las tensiones desarrolladas en las secciones estructurales no deben exceder un cierto porcentaje del límite elástico del acero. Este porcentaje de agotamiento se calcula en base a acciones de servicio, sin mayorar, y su límite se fija en función de diferentes aspectos, como el espesor de las pletinas de los perfiles, la esbeltez del elemento, el modo de trabajo al que esté sometido el elemento o la calidad del acero.

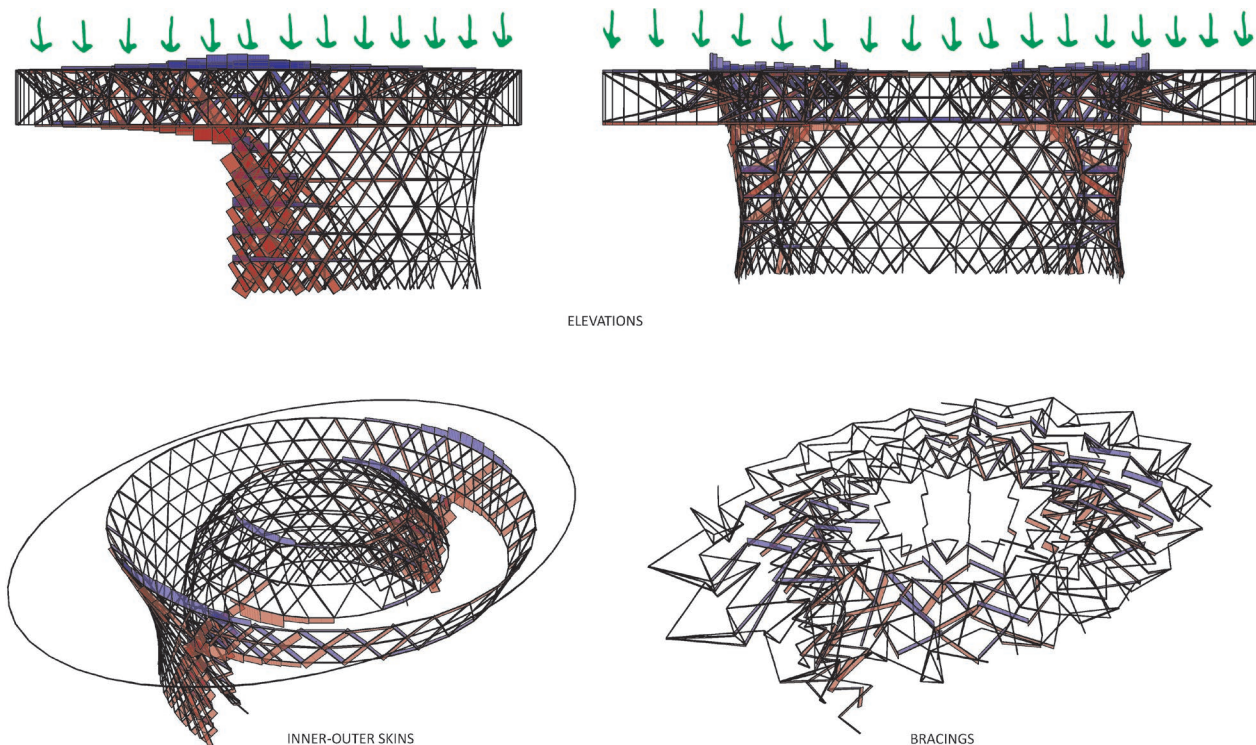


Figura 8. Esfuerzos axiales. Modelo de cálculo SAP2000

Definimos a continuación los límites de tensión para los modos de trabajo principal de los elementos de nuestra estructura, tracción y compresión (Figura 8). Se describen simplifícadamente las especificaciones de la normativa referenciada para la comprobación de estos elementos, para ejemplificar el fundamento del método de cálculo.

Tensión admisible para elementos a tracción

$$F_t = 0.58 F_y$$

Acero	F_t (t/cm ²)	
	$t \leq 40$ mm	$t < 40$ mm ≤ 100 mm
St 37	1.4	1.3
St 44	1.6	1.5
St 52	2.1	2.0

* Considerando el área neta de la sección

Tensión admisible para elementos a compresión

$$\text{Si } \lambda = kl/r < 100$$

$$F_c = 0.85F_y - \frac{(0.85F_y - 0.75)}{10^4} \lambda^2$$

Acero	F_c (t/cm ²)	
	$t \leq 40$ mm	$t < 40$ mm ≤ 100 mm
St 37	$F_c = (1.4 - 0.000065\lambda^2)$	$F_c = (1.3 - 0.000055\lambda^2)$
St 44	$F_c = (1.6 - 0.000085\lambda^2)$	$F_c = (1.5 - 0.000075\lambda^2)$
St 52	$F_c = (2.1 - 0.000135\lambda^2)$	$F_c = (2.0 - 0.000125\lambda^2)$

$$\text{Si } \lambda = kl/r \geq 100$$

$$F_c = 7500 \lambda^2 \text{ Para todos los tipos de acero.}$$

* Considerando el área total de la sección. Salvo en elementos donde su supere el valor máximo de esbeltez (Tabla 1), donde se deberá considerar el área neta de la sección.

Ratio de esbeltez

$$\lambda = \frac{k \cdot L}{r}$$

Donde,

K, coeficiente de pandeo del elemento

L, longitud entre apoyos del elemento

r, radio de giro de la sección

Tabla 1. Máximo ratio de esbeltez para elementos a compresión

Elemento	$\lambda_{\max}$
Elementos comprimidos	180
Elementos de arriostramiento	200

En base a estos extractos de la normativa referencia, se observa cómo, principalmente para elementos a compresión, la tensión máxima a la que puede estar sometida la sección y, por lo tanto, la resistencia de esa sección, se reduce drásticamente si se sobrepasan los límites de esbeltez establecidos (esbeltez mayor que 100 o mayor que 180).

Esto supone, que gran parte del trabajo de diseño realizado en esta estructura haya sido buscar ese límite de esbeltez a la hora del diseño de los perfiles en X, con el objetivo de diseñar una estructura con elementos lo más livianos posibles y, a su vez, lo más optimizada posible.

4. Conclusiones

El Alborouj Cultural Hub es un proyecto singular, que constituye un ejemplo interesante de la relación entre forma, geometría y estructura, y de la colaboración entre arquitectos e ingenieros en su desarrollo.

A pesar de su reducido tamaño ha tenido gran repercusión por su singularidad geométrica y estructural, y fue seleccionada para formar parte de la exposición “The bones of architecture”, en el Centro Cultural de Belém, Lisboa (junio – septiembre 2019), que explora el papel y el potencial de la estructura en el desarrollo de la arquitectura contemporánea.

Referencias

- [1] .M. Rinke (ed.), The bones of architecture. Structure and design practices. Triest-Verlag, 2019.
- [2] Permanent committee for Code of Practice for Steel Construction and Bridges (ASD), ECP-205-201, Ministry of Housing, Arab Republic of Egypt, 2007
- [3] American Institute of Steel Construction, Specification for Structural Steel Buildings, Allowable Stress Design and Plastic Design, AISC-ASD89, Chicago, 2001