Cubierta del Centro Acuático de los Juegos Panamericanos Lima 2019

Roof of the 2019 Lima Pan American Games Aquatic Center

Juan Luis Bellod Thomas[a], Diego Aita Santos[b]

[a] Ingeniero de Caminos, Canales y Puertos. Cesma Ingenieros, S.L. Director General. cesma@cesmaing.com

[b] Ingeniero Técnico de Obras Públicas. Cesma Ingenieros, S.L. Ingenieros. peru@cesmaing.com

RESUMEN

El edificio, destinado a albergar las competiciones de waterpolo de los Juegos Panamericanos de Lima 2019, se proyecta mediante una cubierta metálica apoyada únicamente en los pilares perimetrales. Se define una estructura simple y ordenada, de peso reducido, formada por ocho celosías transversales dobles y cuatro celosías longitudinales del mismo canto, que estabilizan a las primeras sin necesidad de disponer otros elementos de arriostrado. Para ello se recurre al cálculo detallado de los efectos de 2º orden mediante la adopción de deformadas iniciales y cálculo no lineal. Las estructuras secundarias de cubierta y fachada se definen conjuntamente con la principal, compatibilizando estructura y acabados, evitando de esta forma elementos duplicados.

ABSTRACT

The building, which was destined to host the water polo competitions of the 2019 Lima Pan American Games, was designed through a metal roof supported by perimeter columns only. A simple and orderly lightweight structure was defined, which is made up of eight double transverse trusses and four longitudinal trusses of the same depth, which stabilise the former without the need for other bracing elements. Therefore, a detailed 2nd order effects calculation was carried out through the assumption of initial deformed states and non-linear analysis. Secondary roof and façade structures were jointly defined with the main one, making structure and finishes compatible, thus avoiding duplication of elements.

PALABRAS CLAVE: Singularidad, grandes luces, dobles celosías, fachada-cubierta curva.
KEYWORDS: Singularity, long spans, double trusses, curved roof-façade

1. Introducción

La ciudad de Lima fue seleccionada para la celebración de los XVIII Juegos Panamericanos 2019, la cita deportiva más importante del continente americano. Se establecieron en la ciudad diversas sedes, como la Villa Deportiva Nacional (VIDENA), la Villa Deportiva Regional del Callao y el Complejo Deportivo Villa María del Triunfo (VMT), en donde se encuentra el Centro Acuático, que albergó la competición de waterpolo. Se trata de un edificio con un cuidado diseño arquitectónico, erigido como emblema de la sede, alrededor del cual se definieron y distribuyeron el resto de estadios y

equipamientos deportivos, accesos, zonas de tránsito peatonal, etc.

La elaboración del proyecto de la cubierta, y del resto de la estructura previamente, se llevó a cabo en paralelo con la construcción de las obras, utilizando la metodología denominada "fast track", con el fin de agilizar los procesos y reducir los plazos de ejecución. Se contó para ello con el proyecto de arquitectura, que incluía una cubierta espacial con nudos definidos mediante esferas con patente internacional, con la premisa de mantener en la medida de lo posible la envolvente exterior de la cubierta, reduciendo los costes de ejecución y empleando únicamente los perfiles metálicos que hubiera en stock en el mercado.

2. Descripción de la estructura

La estructura de la cubierta presenta una longitud de 79.5 m y 53.81 m de ancho sobre el edificio, dejando además voladizos sobre el mismo. Está formado por ocho celosías transversales dobles separadas 10 m entre sí, y cuatro celosías longitudinales cada 17.94 m, que estabilizan a las primeras sin necesidad de disponer otros elementos de arriostrado. Tanto las celosías longitudinales como las transversales están formadas por perfiles de acero estructural con sección cuadrada y se apoyan directamente en los pilares de hormigón armado del edificio. En el caso de las primeras, salvan una luz de 53.81 m y se definen con un canto variable de 1.9 a 2.17 m, mientras que las segundas salvan una luz de 10 m y presentan un canto constante de 2.3 m.

Los aleros en las fachadas norte, este y oeste, se forman mediante una celosía triangular que sirve de remate a las celosías transversales o longitudinales según corresponda. Estas celosías presentan una inclinación hacia el centro de la cubierta, de forma que el agua de lluvia vierta hacia el canalón perimetral del cerramiento superior, que queda oculto de esta forma. En el caso del paramento sur, las celosías transversales se prolongan describiendo una serie de formas curvas hasta mitad de la altura del edificio, unificando la fachada con la cubierta.

La estructura secundaria de cubierta y de fachada, se definió por medio de una serie de correas formadas por perfiles "doble T", que apoyaban directamente en la estructura principal, sirviendo de sujeción a los elementos de cerramiento.

Figura 1. Vista General de la Cubierta. Fachadas Oeste y Sur.

2. Concepción estructural

Para definir la estructura de la cubierta, se trató en primer lugar de simplificar el diseño previo incluido en el proyecto de arquitectura, compatibilizándolo, además, con la estructura de hormigón armado del edificio sobre el que apoya cuya ejecución estaba en proceso en el momento de redacción del proyecto de estructura de la cubierta. Para ello, se realizó un estudio completo de la misma, incluyendo los pilares de hormigón del edificio, los elementos principales y la estructura secundaria de cubierta y fachadas. De esta forma se garantizó la compatibilidad de todos los elementos, evitando duplicidades.

La concepción global del edificio, posibilita la reducción de elementos de arriostramiento manteniendo la estabilidad frente a cargas de viento y sismo, tanto para el diseño en servicio como durante el proceso constructivo. La gran rigidez de las correas longitudinales (Fig. 2), que salvan luces de 10 m, unido a un cuidado estudio de los detalles de unión entre elementos, definen un eficaz arriostrado por efecto Vierendeel, por lo que no

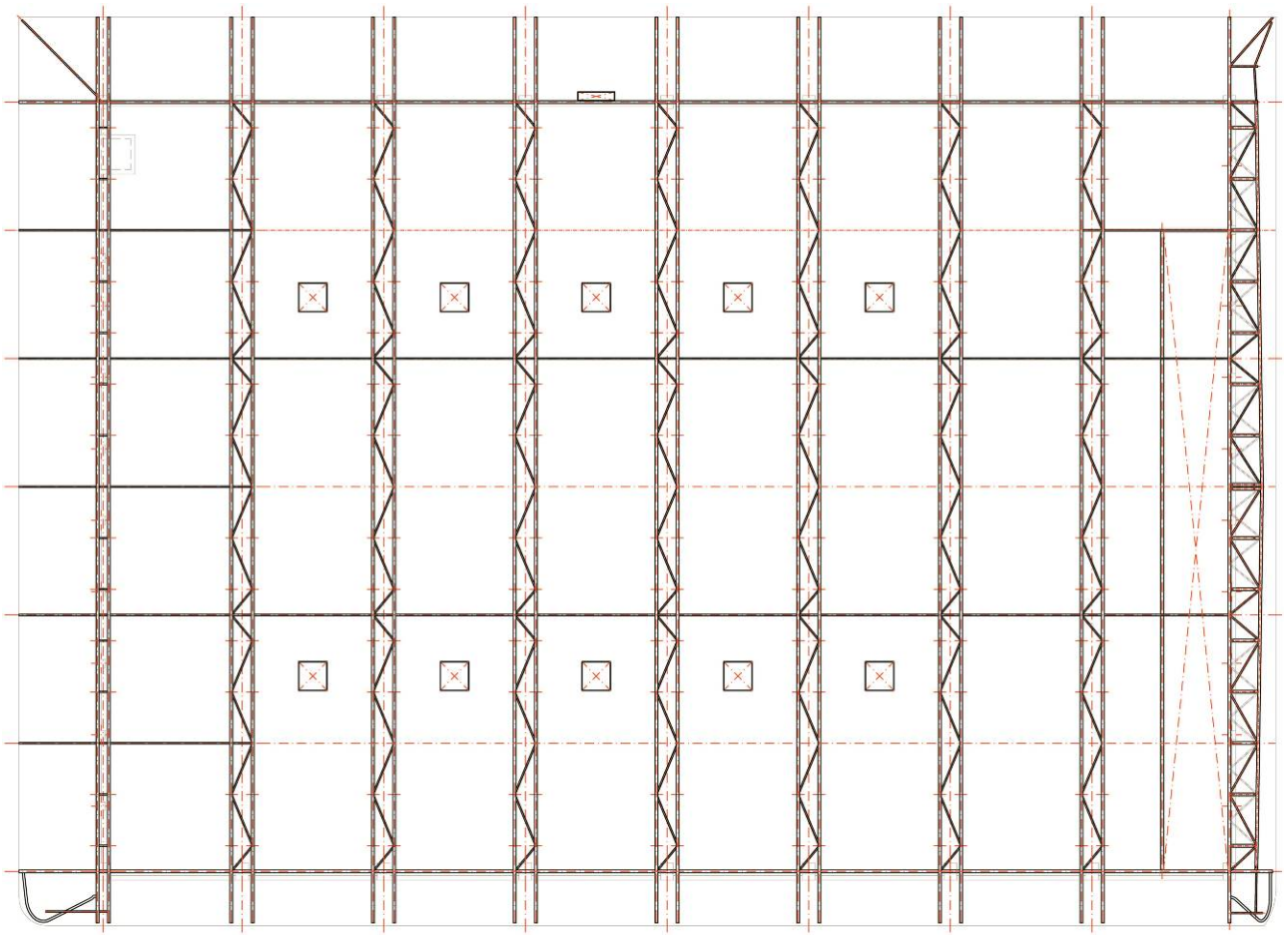


Figura 2. Planta General. Vista Superior.

es necesario incluir ningún tipo de rigidización adicional en planta.

Con respecto a la estructura del edificio, fue necesario asegurar la correcta transmisión de esfuerzos entre la cubierta y los pilares sobre los que descansa, ya que el diseño de estos últimos no permitía, por falta de armado, la transmisión de esfuerzos horizontales a los pilares dispuestos en varias alineaciones, y sobre ninguno de ellos estaba prevista la transmisión de esfuerzos flectores derivados de empotramientos. Para ello se tomaron las siguientes medidas:

- Disponer apoyos fijos o apoyos móviles en uno y otro extremo de la estructura en sentido transversal para no inducir fuerzas horizontales de la cubierta a los pilares de hormigón menos armados.
- Disponer articulaciones en todos los apoyos garantizando que no se producen momentos flectores en coronación de los pilares.
- Ajustar los detalles de los anclajes a las dimensiones de los pilares de hormigón de 0.9 x 0.9 m, y 0.9 x 1.2 m.

Para el diseño de la cubierta se prestó especial atención a la definición de las celosías transversales y longitudinales, cuidando su diseño y la definición de las uniones, con el fin de mantener la estética de la estructura, que quedaría vista desde el interior, minimizando los plazos de ejecución y tratando de facilitar el proceso de montaje.

Para ello, como primera medida, se trató de emplear únicamente perfiles metálicos disponibles en el mercado en el momento en el que se estaba desarrollando el proyecto, con el fin de evitar demoras de suministro. En segundo lugar, se cuidó especialmente el diseño de las uniones, tanto en taller como en obra, limitando su número en la medida de lo posible y simplificando su definición, con el fin de reducir su peso y facilitar su ejecución.

3. Verificación de la estructura

Con objeto de aligerar la cubierta para facilitar el montaje y optimizar la estructura principal, fue necesario un estudio pormenorizado de las acciones solicitantes durante su periodo de servicio. Este estudio incluye la obtención del peso real de todos los elementos de acabado que definen la carga muerta sobre la estructura y la determinación de la carga de viento y sismo.

3.1 Modelo de cálculo

Para el diseño y verificación de los elementos de la estructura se utilizó un modelo tridimensional de elementos finitos (Fig. 3), en el que se consideraban tanto las características mecánicas de cada uno de los elementos que forman la estructura, como las excentricidades impuestas por la geometría resultante en las uniones, con objeto de obtener directamente del modelo de cálculo los esfuerzos para el dimensionado de las uniones.

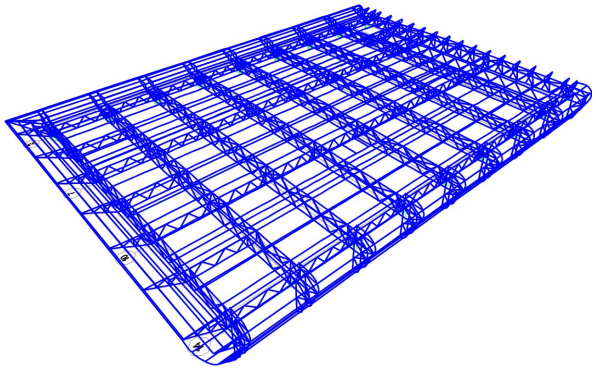


Figura 3. Modelo de cálculo.

3.2 Cálculo sísmico

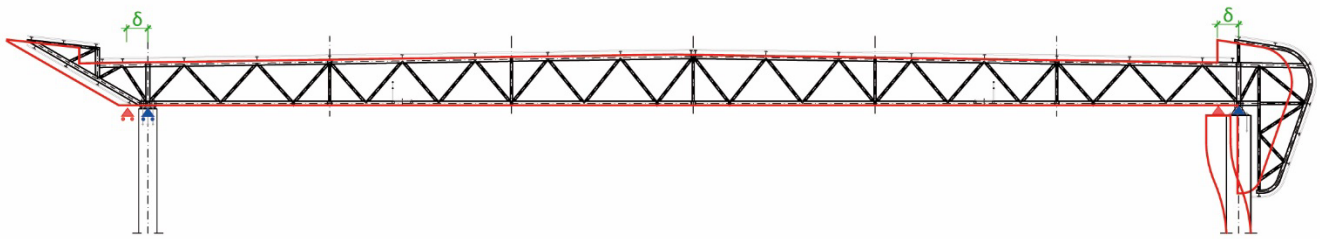
Puesto que la cubierta no forma parte de la estructura principal resistente a sismo del edificio, se desarrolló un cálculo particular de la cubierta frente a esta acción, considerando un sistema de un grado de libertad, suponiendo que la cubierta se comporta como una masa oscilante en la coronación de los pilares de hormigón (Fig. 5).

Esta simplificación es posible ya que, de forma impuesta por el armado definido en la estructura de hormigón, los únicos pilares capaces de resistir la aplicación de fuerzas horizontales en cabeza son los situados en la fachada oeste, definiéndose, por tanto, para los pórticos principales un apoyo fijo articulado en la fachada oeste y un apoyo deslizante articulado en esta fachada, de forma que prácticamente la totalidad de los esfuerzos horizontales son transmitidos a los primeros.

3.3 Verificación estructural

La verificación de la estructura se realizó de acuerdo con la normativa de referencia AISC/ASCE mediante el método de diseño LRFD (Load and Resistance Factor Design), el cual aplica una mayoración de cargas en las combinaciones, al mismo tiempo que reduce la resistencia de la sección.

.



Uno de los aspectos críticos para la correcta optimización de la estructura metálica, es el estudio del pandeo de los elementos comprimidos de las celosías ya que, en caso de optar por un cálculo excesivamente simplificado, se produciría el sobredimensionado de estos elementos elevando la cuantía final de acero estructural. Para optimizar estos elementos se realizó un estudio de estabilidad tipo "buckling" considerando las combinaciones de diseño para resistencia de las acciones verticales, obteniendo tanto los factores críticos para el pandeo elástico como la geometría de los modos de pandeo, a partir de los cuales, en función de las distancias entre los puntos de inflexión, se obtienen las longitudes de pandeo equivalentes para los diferentes elementos comprimidos.

4. Modelado BIM

Con objeto de garantizar la compatibilidad de la estructura de la cubierta con la estructura de hormigón ejecutada, así como para garantizar que tanto la estructura principal como la estructura secundaria eran acordes a la geometría final definida por la arquitectura, se realizó un modelo tridimensional completo con el programa TEKLA, con el que no sólo se consiguieron los objetivos anteriores, sino que fue posible garantizar que los diferentes tramos a montar el obra encajaran perfectamente, ya que este modelo también sirvió como guía para la fabricación de toda la estructura metálica en taller (Fig. 5).

5. Detalles constructivos

Una vez determinado el comportamiento global de la estructura, es fundamental la definición de los detalles constructivos. En esta estructura particular, la correcta definición de estos detalles resulta fundamental, tanto desde el punto de vista estructural como desde el punto de vista estético y constructivo ya que no sólo es necesario que estos detalles permitan la transmisión de esfuerzos entre elementos, sino que, al ser vistas, es necesario cuidar especialmente la estética de las uniones.

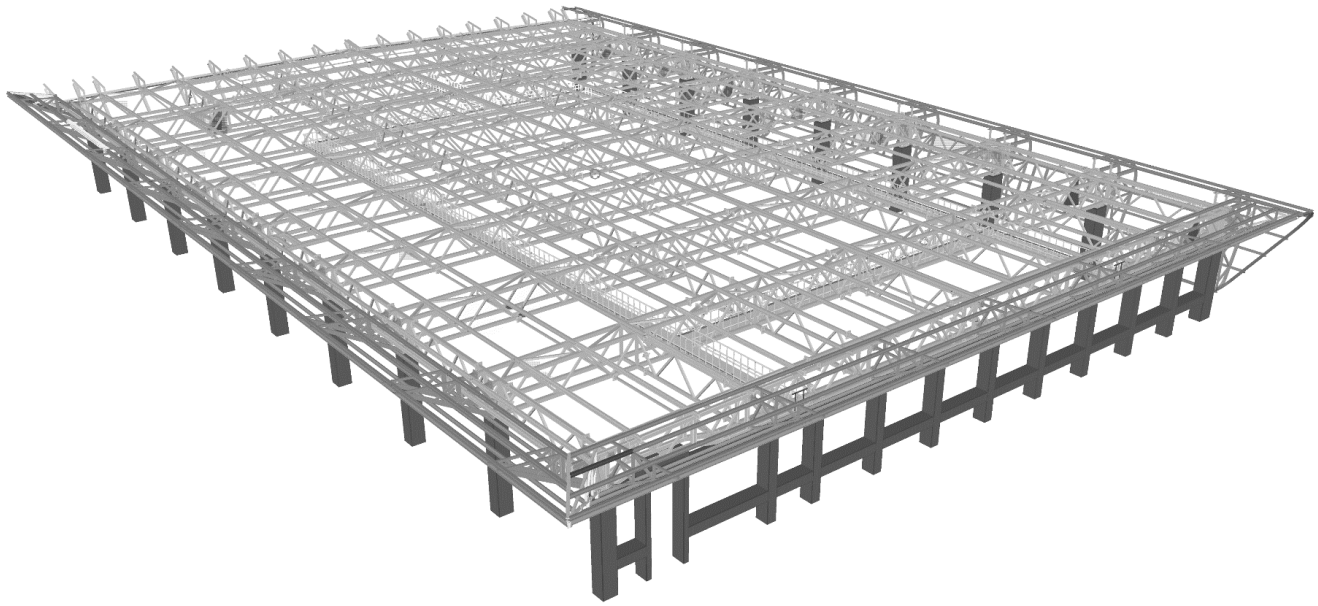


Figura 5. Modelo 3D para fabricación de la estructura metálica.

5.1 Uniones en taller de la estructura principal y secundaria

Todas las uniones de la estructura de la cubierta realizadas en taller, tanto en elementos principales y secundarios como en la unión de ambos, se resolvieron mediante soldadura. Con el diseño de las mismas se garantizó la correcta transmisión de esfuerzos y se cuidó el aspecto estético de la estructura (Fig. 6).

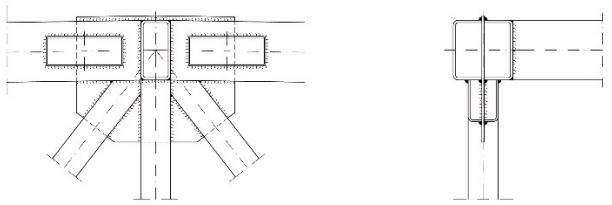


Figura 6. Detalle unión tipo. Cordón Superior. Celosía Transversal con Celosía Longitudinal.

5.2 Uniones en obra de la estructura principal y secundaria

El diseño de las uniones a realizar en obra, estuvo condicionada por una serie de cuestiones externas. Entre ellas destaca la imposibilidad de contar con grúas de grandes dimensiones y de colocar apoyos temporales intermedios sobre el vaso de la piscina, que ocupa la mayor parte de la superficie del pabellón, y que en el momento de montaje de la cubierta se encontraba en proceso de impermeabilización. Esto hace que el montaje únicamente pudiera realizarse desde el exterior del edificio de hormigón, contando con una superficie de acopio de material y montaje muy reducida.

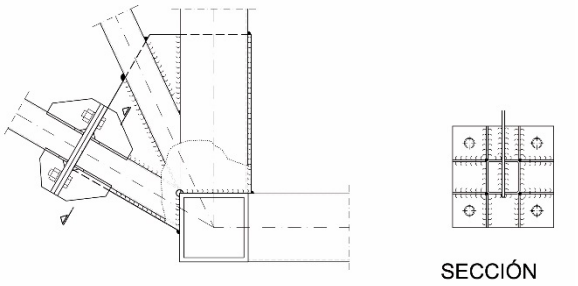


Figura 7. Detalle unión cordón inferior celosía principal con celosía del alero de remate lateral.

5.3 Unión celosías-pilares

Estas uniones permiten la conexión de las celosías metálicas transversales con los pilares de hormigón que se sitúan en las fachadas este y oeste del edificio (Fig. 8). La definición de estos apoyos viene determinada por la geometría de los pilares de hormigón, definidos previamente al diseño de la cubierta, y cuya construcción no se había finalizado en el momento en el que se estaba realizando el diseño de la cubierta.

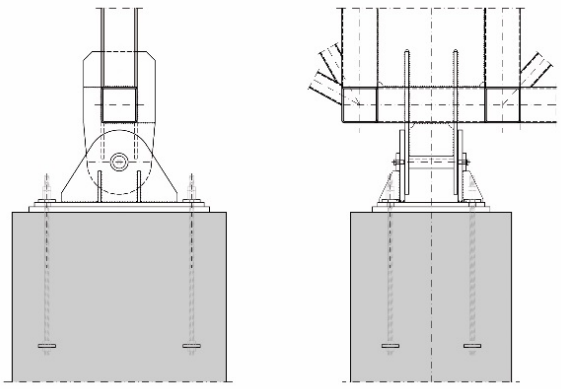


Figura 8. Detalle en planos unión celosía - pilares. Extremo con articulación

Para la conexión de ambos tipos de apoyo se dejaron barras roscadas embebidas en el hormigón de los pilares, que además fue necesario recrecer en una de las fachadas.

5.4 Encuentro en esquinas

La necesidad de adaptar la envolvente final de la cubierta al diseño inicial incluido en el proyecto de arquitectura, obligó a realizar un cuidado diseño geométrico, que se hizo especialmente palpable en la definición de las esquinas del edificio, en donde se produce el encuentro entre las celosías de los aleros, prolongación de las estructuras principales y de los elementos secundarios de cubierta y fachada.

Figura 9. Detalle en obra unión celosía - pilares. Extremo con articulación.

Figura 10. Vista general interior de la cubierta.

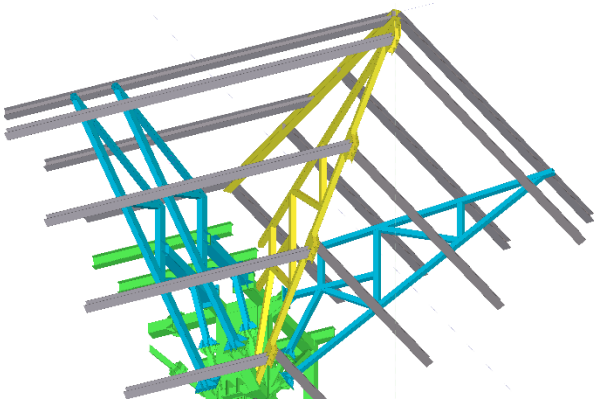


Figura 11. Modelo tridimensional para resolver los encuentros en esquina.

6. Conclusiones

El desarrollo de una cubierta con las características descritas, en donde la redacción del proyecto se llevó a cabo simultáneamente a la ejecución de la obra debido a los requerimientos de limitación de plazo, y donde por el mismo motivo primaba la simplificación del diseño y ejecución, manteniendo las premisas fundamentales descritas en la arquitectura, teniendo en cuenta además que el resto del edificio ya se había construido, el trabajo de ingeniería resulta más complejo que en el caso de un proyecto convencional. La consecución de los objetivos previstos, se logró gracias a la realización de un estudio global de la estructura y al cuidado de los detalles, lo que permitió un considerable ahorro de material y la reducción del plazo de ejecución.

Por otra parte, la realización de un modelo tridimensional BIM utilizando el programa Tekla, permitió compatibilizar la cubierta con la estructura de hormigón ya ejecutada, además de garantizar la precisión del montaje de los distintos tramos de estructura metálica, evitando demoras en la construcción de las obras.

Referencias

[2] E.020, "Cargas", Norma Técnica, Perú.

[3] E.090 "Estructuras Metálicas", Norma Técnica, Perú.

[4] Decreto Supremo Nº003-2016-Vivienda que modifica la Norma Técnica E.030 "Diseño Sismorresistente" del RNE Perú.

[5] ASCE/SEI 7-16, "Minimum Design Loads and Associated Criteria for Building and Other Structures", American Society of Civil Engineers & Structural Engineering Institute, USA.

[6] AISC, "Load and Resistance Factor Design Specification for Structural Steel Building", ANSI/AISC 360, American Institute of Steel Construction, Chicago, IL, USA.

Ficha Técnica de la estructura

Datos de la obra	
Ubicación	Lima
Año de ejecución	2019
Propiedad	Municipalidad de Lima
Proyecto constructivo y asistencia técnica	Cesma Ingenieros
Empresa contratista	Sacyr - Fabertek
Arquitectura	Conurma
Datos técnicos	
Longitud	79.5 m
Ancho	53.81 m
Superficie	4.278 m²
Luz máxima	53.81 m
Cuantía de acero estructural	75 kg/m²