

Proyecto estructural de obra Nueva Markham College Ecosystem, Lima, Perú

Structural project for the New Markham College Ecosystem, Lima, Peru

Carlos Castañón Jiménez ^a, Héctor I. Minder Rodríguez ^b, Aldo R. Rebaza Smith ^c,
Romina González Hierro ^d

^a Ingeniero de Caminos Canales y Puertos. Director de Estructuras. IDOM Consulting, Engineering, Architecture

^b Ingeniero Civil. Ingeniero de Proyectos. IDOM Consulting, Engineering, Architecture^c

^c Ingeniero Civil. Ingeniero de Proyectos. IDOM Consulting, Engineering, Architecture

^d Ingeniero Superior Industrial. Ingeniero de Proyectos. IDOM Consulting, Engineering, Architecture

RESUMEN

La nueva sede de primaria del Colegio Markham en Lima, Perú, diseñada por IDOM y Rosan Bosch Studio es un complejo educativo conformado por 7 edificios más una pasarela peatonal y dos cubiertas ligeras, sumando un total de 28,000m² construidos. La materialidad y estructuración es variada, con edificios que combinan más de una tipología. En este artículo se presentan los aspectos técnicos del diseño de las estructuras más interesantes.

ABSTRACT

The new primary school of Markham College in Lima, Peru, designed by IDOM and Rosan Bosch Studio, is an educational facility consisting of 7 buildings plus a pedestrian walkway and two light roofs, totalling 28,000m² of constructed area. The materiality and structuring is varied, with buildings combining more than one typology. This article presents the technical aspects of the design of the most interesting structures.

PALABRAS CLAVE: Obra Nueva, Diseño sísmico, Estudio de Confort, Vibraciones, Construcción, Hormigón armado, estructura metálica, Perú, Retracción, Cimentaciones.

KEYWORDS: New construction, Seismic design, Comfort study, Vibrations, Construction, Reinforced concrete, steel structure, Peru, Shrinkage, Foundations.

1. Descripción general del proyecto

El colegio Markham College es un amplio complejo educativo situado en el distrito de Santiago de Surco, en la provincia de Lima.

Debido a las diferentes materialidades (Hormigón Armado y Acero Estructural), usos, niveles de altura libre y luz libre entre apoyos, el sistema estructural elegido es variado, y se adapta a las necesidades específicas de cada edificio (ver Figura 1).

Se proyecta el nivel bajo rasante, dividido en 4 módulos mediante juntas de dilatación (ver Figura 2).

Las estructuras están separadas entre sí para evitar problemas estructurales y constructivos derivados de la contracción de materiales y deformaciones laterales por sismo y transferencia de carga sísmica.

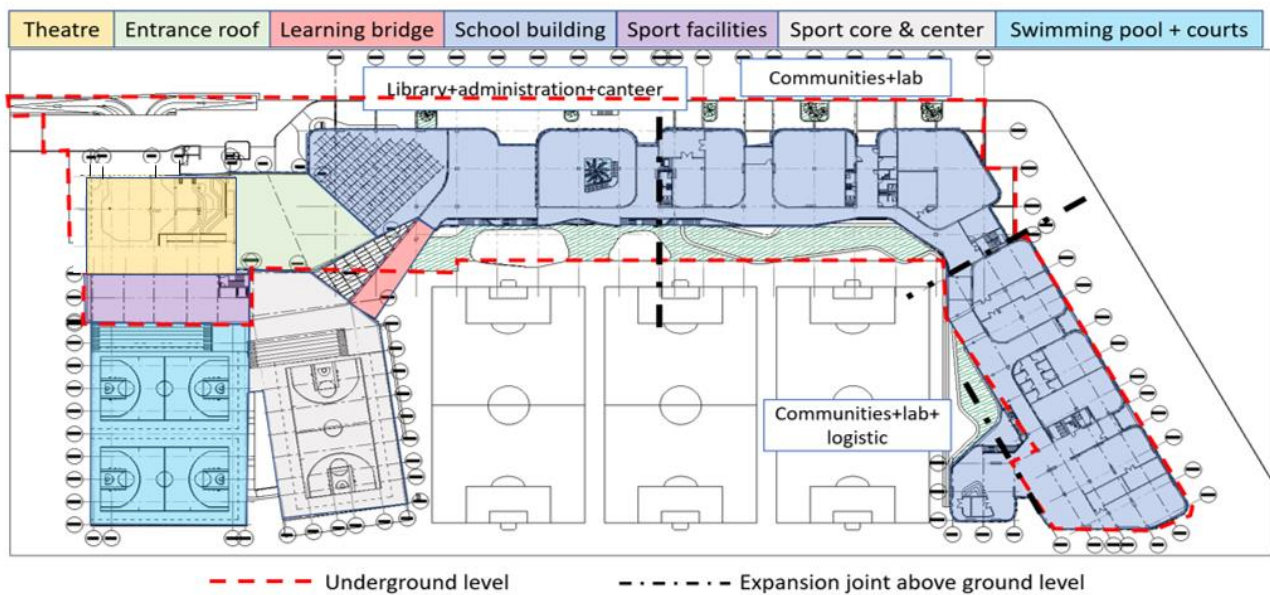


Figura 1 Estructuras sobre rasante y juntas de dilatación

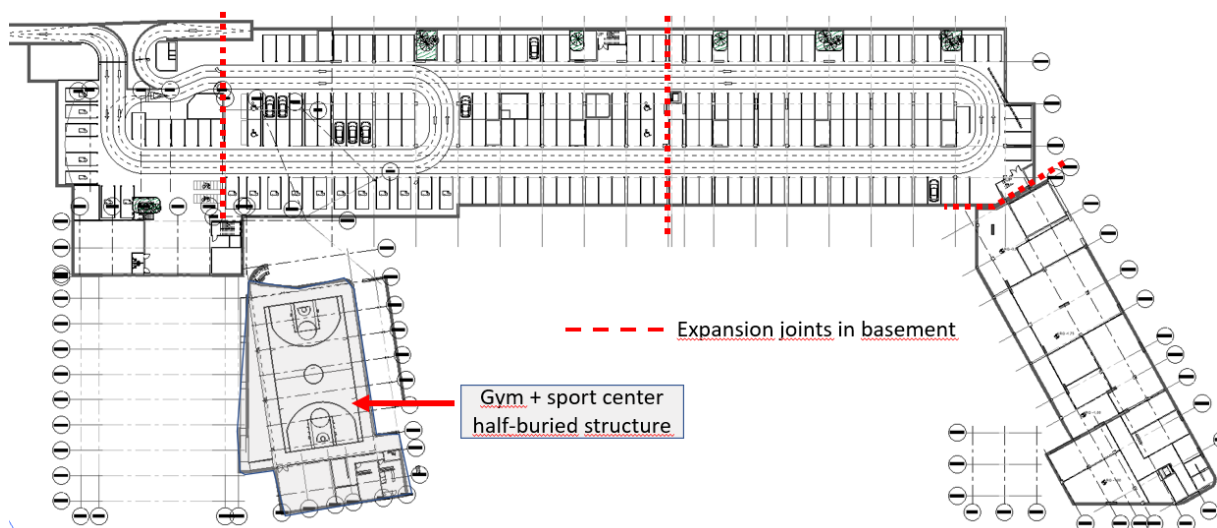


Figura 2 Estructuras bajo rasante y juntas de dilatación

A diferencia del resto de edificios, el caso excepcional del Learning Bridge, pasarela peatonal metálica de dos niveles transitable, que se ha diseñado para apoyarse entre el edificio del Sport core center y el edificio Library+administration+canteen mediante apoyos deslizantes.

2. Normativa Utilizada

Se ha seguido las siguientes normativas peruanas:

NTE E.020 – Cargas [1]

NTE E.030 – Diseño sismorresistente [2]

NTE E.050 – Suelos y Cimentaciones [3]

NTE E.060 – Hormigón armado [4]

NTE E.090 – Estructura metálica [5]

Además de normativas complementarias y afines a la normativa peruana (ASCE, AASHTO, ACI, AISC)

3. Información Geotécnica

La capa superficial del terreno es arcilla-limosa y arena limosa (no competente para cimentación) de espesor 1.5m de material. Bajo esta capa se encuentra el terreno competente, descrito como grava arenosa con buena capacidad de carga (4 kg/cm²).

4. Categoría de Edificación y Zona Sísmica

Según la norma Peruana NTE E.030 [2], este edificio, al ser una institución educativa, se considera del tipo A2 (Tabla N° 5 NTE E.030 [2]) y está emplazado en la zona sísmica 4, la más crítica, con un factor $Z=0.45$, es decir, con aceleración máxima horizontal de $0.45g$ en suelo rígido con una probabilidad de 10% de ser excedida en 50 años.

5. School Buildings

Los 4 edificios que componen el conjunto denominado School Buildings han sido diseñados y construidos en hormigón armado con tipología sismo-resistente en base a muros de cortante. La estructura horizontal es losas y vigas de hormigón armado y vigas de hormigón postesado en el pasillo en voladizo.



Figura 3 Vista del School Building desde el pasillo en voladizo

5.1 Estructuración sismo-resistente

La normativa Peruana NTE E.030 – Diseño sismorresistente [2] especifica, para una determinada categoría y Zona sísmica, sistemas estructurales permitidos (Tabla N° 6) y requisitos de regularidad tanto en planta como en elevación (Tabla N°10).

La estructuración de hormigón armado con sistema de muros se permite para este caso

y no se permiten las siguientes irregularidades: de masa o peso, geométrica vertical, torsional, piso blando, piso débil, discontinuidad de los sistemas resistentes, esquinas entrantes, discontinuidad del diafragma y sistemas no paralelos.

En el desarrollo del proyecto ha sido necesario adaptar las ideas iniciales del concepto arquitectónico a las condicionantes antes mencionadas. Para lograrlo se han seguido los siguientes pasos:

- Primero: se han dispuesto las juntas de dilatación necesarias para separar en 4 volúmenes lo más regulares posible.

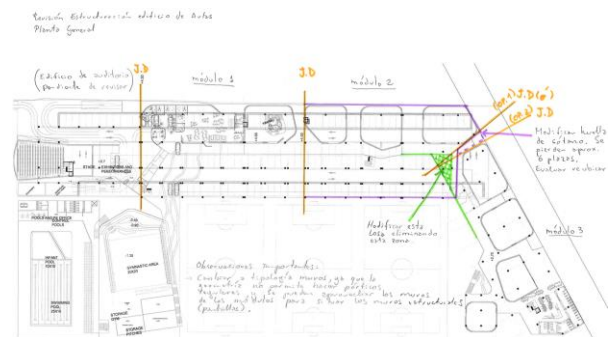


Figura 4 Esquema de juntas de dilatación (JD) en concept design

- Segundo: revisar la geometría para detectar irregularidades del tipo geométricas, tales como huecos en losas que pudieran considerarse como esquinas entrantes o generar discontinuidad de diafragma.

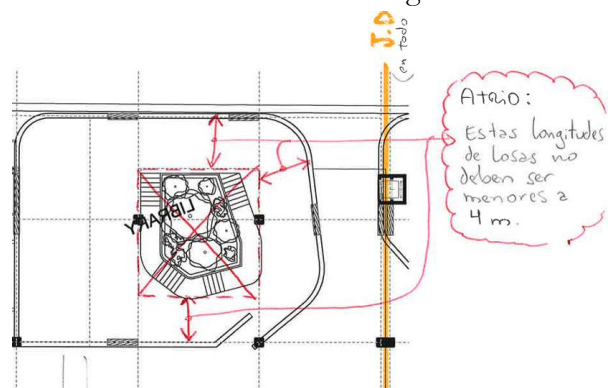


Figura 5 Revisión de dimensiones mínimas para no incurrir en discontinuidad de diafragmas

- Tercero: disposición inicial de muros de cortante y posterior revisión iterativa para cumplir con los criterios de rigidez.

Para cumplir con el criterio de rigidez se debe restringir el máximo drift a un 0.007 para este tipo de estructuración y restringir la torsión de las plantas.

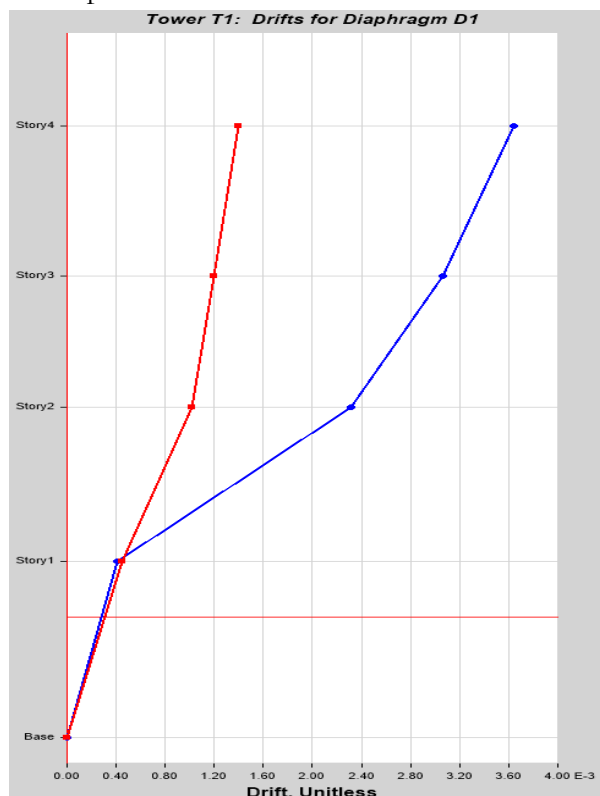


Figura 6 Drifts para sismo en X de edificio Library+administration+canteer

5.2 Retracción y Acciones térmicas

Según la normativa E.020 de Cargas de Perú [1], Las cargas térmicas a aplicar a la estructura son variaciones de 30°C para estructuras de acero y 20° de estructuras de hormigón (artículo 15), sin hacer distinción de ubicación, altura sobre el nivel del mar ni condiciones de aislamiento, lo que puede resultar en el caso de proyectos emplazados en Lima sin exposición directa a la intemperie, bastante conservador, considerando la variación de temperatura real.

Los efectos de la retracción están indicados en el artículo 16 de la misma normativa, e indican una retracción total del hormigón del 0,00025 del largo total del edificio.

Este valor se entiende como la suma de la retracción a corto plazo más la de largo plazo.

La situación crítica resulta de la superposición de los efectos de la variación negativa de la temperatura y la retracción (aplicada al análisis como una variación negativa de temperatura), la que afecta principalmente al diseño de la losa de sótano al ser un elemento muy coaccionado por los muros de sótano, además del diseño de los muros y las cimentaciones.

Para revisar de manera más afinada los esfuerzos provenientes de los casos térmicos se aplican factores de modificación de la rigidez a la losa, considerando el estado fisurado inducido por la tracción generada por el gradiente negativo de temperaturas.

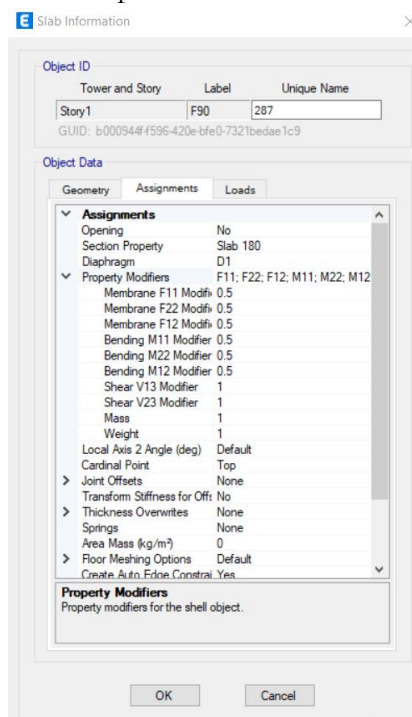


Figura 7 Modificadores de rigidez

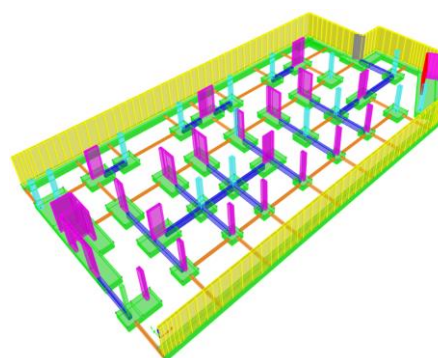


Figura 8 Modelo no-lineal de cimentaciones

Además, con el software ETABS 21 Ultimate se incluye en el modelo del edificio las cimentaciones con elementos shell sobre muelles no lineales de “sólo compresión”, permitiendo el giro de la cimentación en la base del apoyo.

Estas dos medidas flexibilizan el edificio y ayudan a reducir los esfuerzos producidos por cargas térmicas.

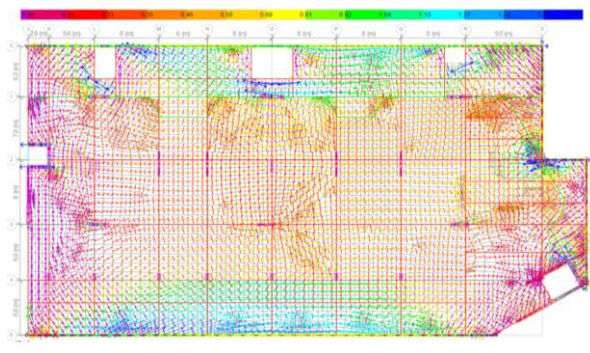


Figura 9 Esfuerzos principales en losa con modelo sin fisura y apoyos fijos

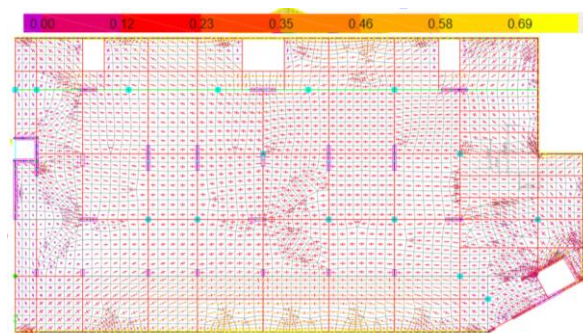


Figura 10 Esfuerzos principales en losa con modelo con fisuración y apoyos flexibles

Considerando que el sismo se analiza mediante método espectral-modal lineal, no se puede desarrollar en un modelo con apoyos no-lineales. Por esto ha sido necesario generar dos modelos: el primero es un modelo con apoyos fijos para obtener las reacciones provenientes de los casos sísmicos (en X y en Y) y el segundo es el modelo no-lineal (descrito anteriormente) al cual se le agregan las reacciones del modelo sísmico directamente a las cimentaciones, de esta manera se analizan y comprueban directamente desde el modelo de ETABS.

6. Learning Bridge

El Learning Bridge es una pasarela peatonal de dos niveles transitable para el uso público con una luz libre de 17.7m entre apoyos, un voladizo de 4.2m, ancho variable (4.4m–5.7m) y una pendiente longitudinal de 7.7%. Su estructura es una doble cercha de acero estructural con forjado mixto (chapa colaborante). Esta estructura descansa sobre dos estructuras de hormigón armado, cada una de ellas pertenecientes a dos estructuras distintas.



Figura 11 Vista del Learning Bridge desde el exterior



Figura 12 Vista del Learning Bridge desde el interior

6.1 Análisis

Para su análisis se hace un modelo en el programa SAP2000 con elementos shell para los elementos de apoyo de hormigón armado, elementos del tipo deck (sin rigidez a la flexión y reparto de cargas unidireccional) para el forjado

de chapa colaborante, elementos tipo frame para los elementos metálicos de la pasarela y la unión entre el apoyo de hormigón y la superestructura del tipo “constraint” para recrear las uniones deslizantes en uno de los extremos.

Considerando que la normativa sísmica de Perú no considera el caso específico de una pasarela con estas características es que se han considerado los valores sugeridos por la AASHTO LRFD Bridge Design Specifications [6] para obtener un valor de R (modificador de la respuesta sísmica), es decir, columnas de hormigón como péndulos invertidos en la dirección longitudinal ($R=3$) y columnas de hormigón funcionando como pórtico en uno de los extremos en la dirección transversal ($R=5$) y como péndulo en la otra dirección ($R=3$).

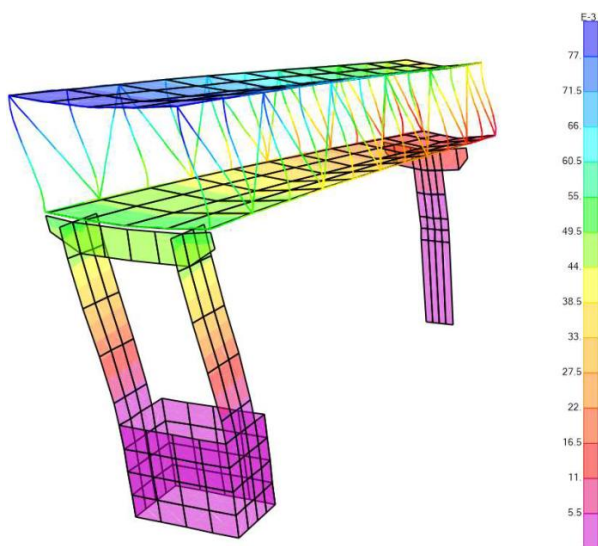


Figura 13 Deformación lateral transversal por sismo

El punto crítico del diseño es la deformación lateral transversal de la pasarela, ya que al ser una pasarela elevada con gran masa sísmica en su cubierta se concentra una carga sísmica elevada que genera una desangulación en la base de la superestructura y una desangulación de los marcos formados entre las cerchas metálicas.

Para contrarrestar la torsión del prisma se generan pórticos continuos a momento conformados por las vigas transversales y los montantes de las cerchas.

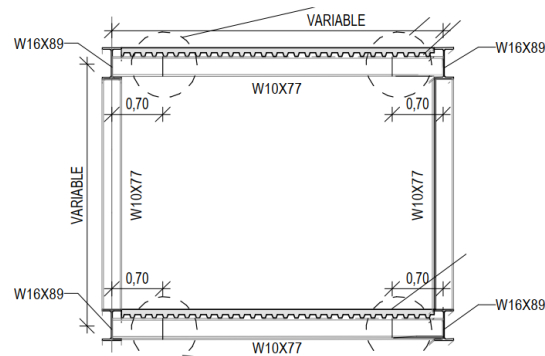


Figura 14 Pórticos transversales de la pasarela

7. Sport Core & Center

El sport center es un edificio con múltiples tipologías y materialidades. El sótano está conformado por muros de hormigón armado, los forjados son de chapa colaborante y desde rasante hacia arriba es estructura metálica con tipología de pórticos arriostrados. El forjado superior está diseñado para resistir cargas de uso deportivo y la longitud libre de vano es de 19.5m, por lo que los requerimientos de resistencia y rigidez son altos.

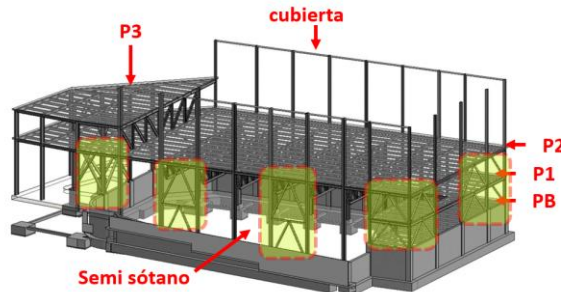


Figura 15 Vista 3D de la estructura completa y sus arriostramientos



Figura 16 Vista interior del Sport Core

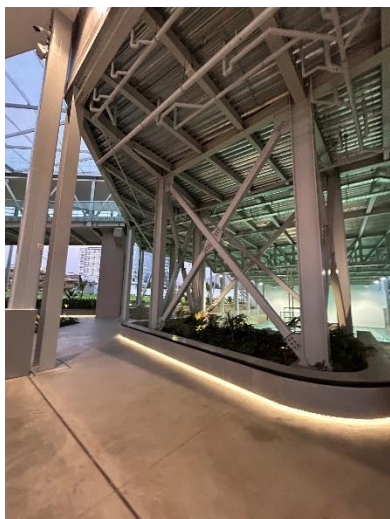


Figura 17 Núcleo de pórticos arriostrados

7.1 Análisis de vibraciones

La planta de cubierta 1 se trata de un forjado con uso deportivo donde se pueden ejercer actividades rítmicas y de aglomeración. Las actividades rítmicas son una de las causas más potenciales de provocar problemas de vibración en los edificios, por ello se ha estudiado en detalle su comportamiento y se ha realizado un estudio de confort de acuerdo a la Guía 11 de Diseño de acero AISC [7].

La frecuencia fundamental del forjado es de 7.52 Hz, este valor se encuentra debajo del límite de 8.5 Hz, que asegura que no habrá problemas de confort al usuario.

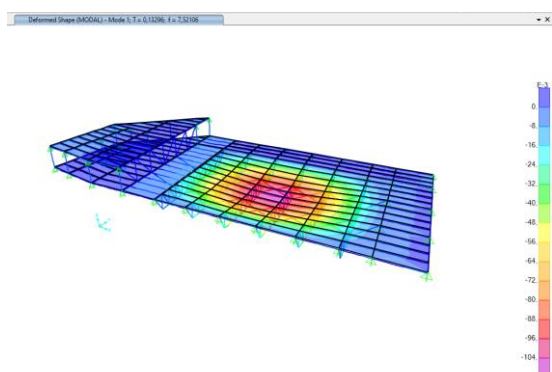


Figura 18 Deformación del primer modo vertical $f=7.52\text{Hz}$

La fuerza dinámica durante una actividad rítmica grupal viene definida en la tabla 7.4 de la Guía 11 de Diseño de Acero AISC [7].

Tabla 1. Parámetros de la serie de Fourier para cargas rítmicas grupales

Aerobics, $w_p = 4.2 \text{ psf}$		
Dominant Frequency, Hz	h	α
2.0-2.75	1	1.5
2.75-5.5	2	0.6
5.5-8.25	3	0.1

En este caso el armónico dominante en la excitación rítmica corresponde al tercer armónico.

La respuesta resonante se puede predecir usando el método FRF en el cual el pico de la aceleración es el producto de la máxima magnitud FRF (función de respuesta de frecuencia) obtenida para la frecuencia de resonancia por la amplitud del armónico correspondiente.

La función FRF se ha modelado mediante una función unidad Steady State que cubre el rango de frecuencias recomendado. Esta función se ha definido cubriendo la zona con mayor deformación en el modo fundamental de la estructura.

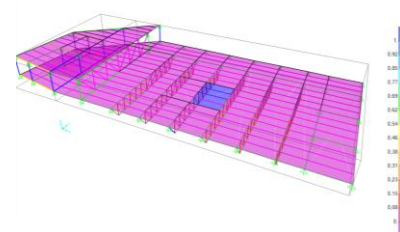
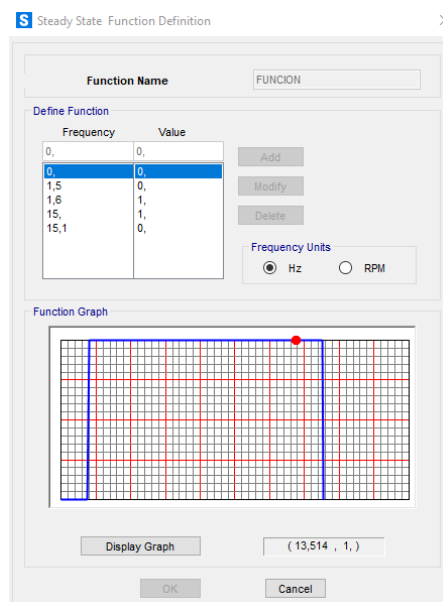


Figura 19 Función FRF

La verificación de confort se ha realizado en el punto central donde la amplitud ante la excitación es máxima. En la siguiente gráfica se pudo observar la amplitud en este punto bajo la función FRF. Se ve que la amplitud máxima se produce ante la frecuencia fundamental de la estructura con un valor de 12.46 m/s^2 .

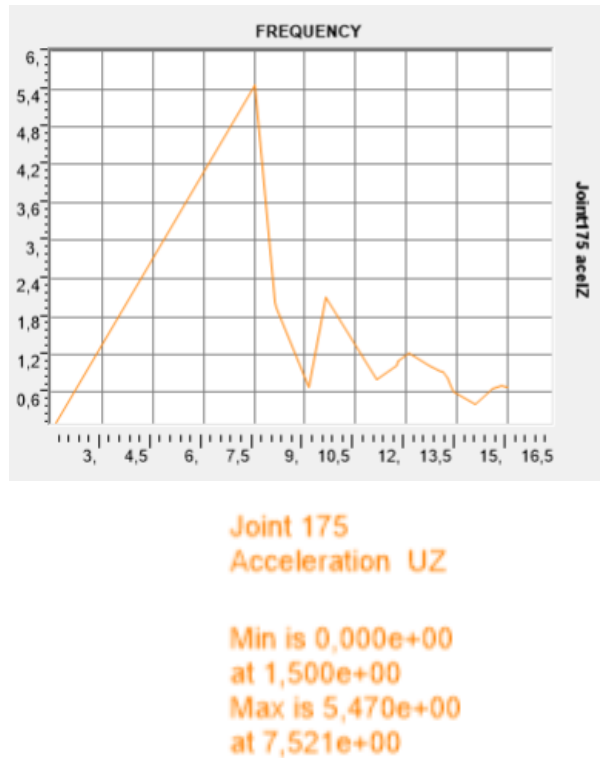


Figura 20 Aceleración z en el nodo central del forjado ante la función FRF

A continuación, se calcula la aceleración pico para cada armónico y la resultante de los 3 armónicos, en este caso $a_p = 0.517 \text{ m/s}^2 = 5.47\% g$ la que se encuentra por debajo del límite de aceleración recomendado por la guía de 7%.

Conclusiones

- El proceso de diseño de este proyecto ha tenido una intensa iteración entre el concepto arquitectónico y el estructural debido a las fuertes limitantes del código de diseño sismo resistente peruano, el cual penaliza e incluso prohíbe ciertas irregularidades estructurales, no obstante se trabajó de manera conjunta para mantener la idea arquitectónica lo más fiel al concepto original.
- A diferencia de la mayoría de los

establecimientos educativos en Lima, este proyecto propone un diseño geométrico singular con grandes zonas de voladizos, grandes vanos y estructuraciones poco regulares, lo que conlleva cuantías de refuerzo mayores a las acostumbradas en los proyectos educativos locales típicos.

- La acción sísmica en Lima es de gran magnitud, la cual ha sido controlada, tanto en resistencia como en deformación, mediante la inclusión de elementos sismo-resistentes tales como muros de cortante en el caso de edificios de hormigón armado y pórticos arriostrados en los edificios de estructura metálica.
- En algunos edificios de hormigón armado, los muros de cortante se encuentran en los extremos, lo que ha resultado muy eficiente para el control de las deformadas sísmicas y de la torsión de la planta, pero a la vez, se han visto muy exigidos por el desplazamiento inducido por incrementos térmicos, tanto por retracción como por temperatura exterior. Esto ha llevado a la necesidad de grandes cuantías de armado en estos elementos, sobretodo en los niveles basales.
- La normativa peruana especifica unas únicas cargas térmicas y deformaciones unitarias, que se aplican a cualquier estructura independiente de las condiciones de borde del proyecto, lo que puede resultar, en algunos casos, en una demanda térmica excesiva con respecto a la real. La normativa peruana no ofrece alternativas de manera explícita para ajustar estas cargas.
- Considerando las grandes luces y su uso deportivo, la cubierta del Sport Core & Center ha sido diseñada principalmente por la verificación del criterio de confort del usuario (análisis de vibraciones), y a falta de una metodología o criterios claros de la normativa peruana se ha adoptado la metodología de la Guía 11 de Diseño de acero AISC [7].

Referencias

- [1] Servicio Nacional de Capacitación para la Industria de la construcción (SENSICO) (2019) "*NTE E.020 – Cargas*". Reglamento Nacional de Edificaciones, Perú.
- [2] Servicio Nacional de Capacitación para la Industria de la construcción (SENSICO) (2018) "*NTE E.030 – Diseño sísmorresistente*". Reglamento Nacional de Edificaciones, Perú.
- [3] Servicio Nacional de Capacitación para la Industria de la construcción (SENSICO) (2018) "*NTE E.050 – Suelos y cimentaciones*". Reglamento Nacional de Edificaciones, Perú.
- [4] Servicio Nacional de Capacitación para la Industria de la construcción (SENSICO) (2006) "*NTE E.060 – Hormigón Armado*". Reglamento Nacional de Edificaciones, Perú.
- [5] Servicio Nacional de Capacitación para la Industria de la construcción (SENSICO) (2006) "*NTE E.090 – Estructura metálica*". Reglamento Nacional de Edificaciones, Perú.
- [6] American Association of State Highway and Transportation Officials (AASHTO) (2024). "*LRFD Bridge Design Specifications, 10th Edition*". AASHTO, USA.
- [7] American Institute of Steel Construction (AISC) (2016). "*Design Guide 11: Vibrations of Steel-Framed Structural Systems Due to Human Activity (Second Ed.)*". AISC, USA.