

Diseño de un hospital con aislación sísmica en Sullana, Perú.

Design of a hospital with seismic isolation in Sullana, Peru.

Dorota Gorecka Aguirre ^a, Nicolás Espino Espíndola ^b y César Carpio Pacheco ^c

^a Ingeniera Civil. Ingeniero de Proyectos. IDOM Consulting, Engineering, Architecture. dorota.gorecka@idom.com

^b Ingeniero Civil. Ingeniero de Proyectos. IDOM Consulting, Engineering, Architecture. nicolas.espino@idom.com

^c Maestro en Ingeniería Estructural. Ingeniero de Proyectos. IDOM Consulting, Engineering, Architecture.

cesar.carpio@co.idom.com

RESUMEN

El Hospital de Apoyo de Sullana, Perú, se encuentra localizado en la Urbanización Popular Nuevo Sullana. De acuerdo con su normativa local de diseño sismorresistente E.030, pertenece a la Zona 4, la cual tiene la mayor demanda sísmica del país, así mismo, al ser una edificación esencial con categoría A1 por ser del sector salud, dicha normativa pide aislamiento sísmico de base. El Hospital Sullana tiene una dimensión en planta de 142 metros de largo por 60 metros de ancho, así, esta estructura se encuentra apoyada sobre 180 aisladores sísmicos, de los cuales 33 son aisladores elastoméricos sin núcleo de plomo (RB), 103 péndulos de fricción (Slider) y 44 elastoméricos con núcleo de plomo (LRB).

ABSTRACT

The Sullana Support Hospital, Peru, is located in Nuevo Sullana Popular Urbanization. According to its local earthquake-resistant design regulations E.030, this structure belongs to Zone 4, which has the highest seismic demand in the country and, as it is an essential building with category A1 because of being part of the health sector, this normative requires base seismic isolation. The Sullana Hospital has a plan dimension of 142 meters long by 60 meters wide, therefore, this structure is supported on 180 seismic isolators, of which 33 are elastomeric isolators without lead core (RB), 103 pendulums friction (Slider) and 44 elastomeric with lead core (LRB).

PALABRAS CLAVE: diseño sísmico, aisladores de base, elastoméricos, péndulos de fricción.

KEYWORDS: seismic design, seismic isolation, base isolators, elastomeric, friction pendulums.

1. Introducción

El aislamiento sísmico de base, tiene como principal finalidad alargar el periodo fundamental de las estructuras alejándolas de periodos cortos con mayor demanda sísmica, este concepto se puede observar con la Figura 1, donde se muestra un espectro de diseño sísmico de aceleraciones en el eje Y contra periodos en el eje X. Ante menores demandas sísmicas,

existirá una disminución importante de cortante basal, aceleraciones de entrepiso y de elementos mecánicos en los miembros estructurales que integran la edificación. La aislación de base producirá un desplazamiento considerable global en toda la estructura, sin embargo, provocar disminuciones importantes en las distorsiones (derivas) de entrepiso, entre

menores sean las distorsiones menor daño tendrán los miembros estructurales, Figura 2.

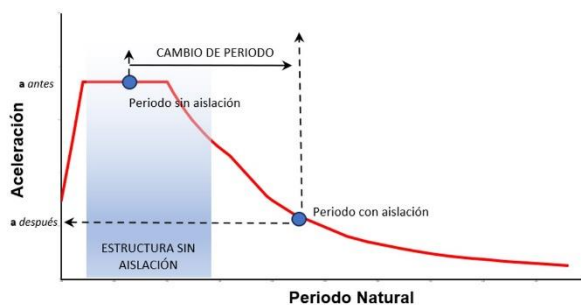


Figura 1. Aceleración correspondiente al periodo fundamental de la estructura con aislación sísmica.

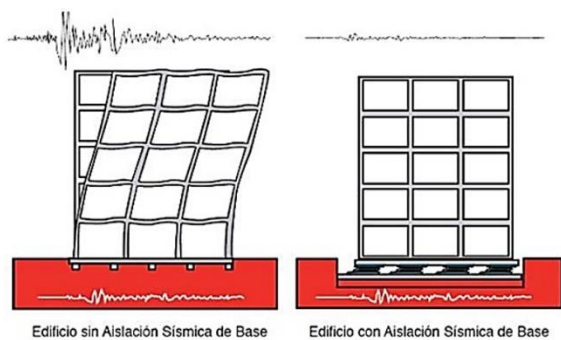


Figura 2. Desplazamiento sin y con aislación sísmica de base.

El trabajo en conjunto del sistema de aislación deberá tener una rigidez vertical suficiente para la resistencia ante cargas verticales, así como una rigidez lateral suficiente para bajas demandas sísmicas (sismos frecuentes) para que los aisladores trabajen siempre en el rango elástico, para altas demandas sísmicas (sismos de diseño) los aisladores trabajaran en su rango inelástico, pero siempre con suficiente capacidad de reserva de capacidad de deformación para evitar fallas en los aisladores.

Así, con el uso de aisladores de base se busca que la estructura permanezca elástica después de un evento sísmico y que todo el comportamiento no lineal que se llegase a presentar sea disipado con los aisladores, en el diseño por desempeño se traduce a una resiliencia estructural para que la edificación puede ser operable después de un sismo incluso de diseño.

La normativa E.030 [1], es la normativa local en Perú para el diseño sismorresistente de

las estructuras, de acuerdo con dicha normativa el Hospital se ubica en la Zona 4, zona con mayor demanda sísmica del país. La edificación al ser un establecimiento de salud pertenece a una categoría A1, al tener esta categoría y caer en la Zona 4, dicha normativa pide aislamiento sísmico como sistema de defensa sismorresistente. De manera indirecta la normativa pide un diseño por desempeño de la edificación garantizando la resiliencia estructural.

2. Configuración geométrica y estructural del Hospital

2.1 Geometría

El hospital cuenta con 5 niveles, de los cuales en los últimos 3 niveles se tiene una disminución de dimensiones en planta. Las primeras plantas tienen una dimensión de 142 metros de largo por 60 metros de ancho, las últimas plantas de 113 metros de largo por 37 metros de ancho. Las alturas de entrepiso son de 4.7 metros teniendo una altura total de 18.8 metros. Adicionalmente, se tiene un nivel de sótano técnico de 2.90 metros de altura aproximada reservado para los aisladores, Figura 3.

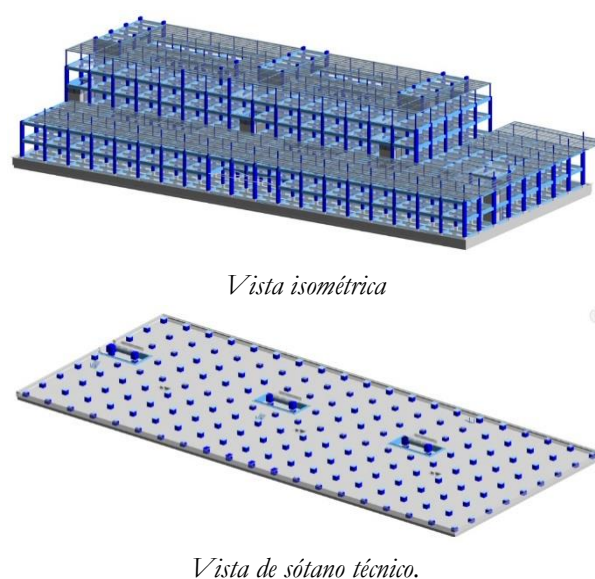


Figura 3. Geometría de la edificación.

2.2 Estructuración

El sistema de aislación será un sistema de aislación de base, es decir, la superestructura se apoya sobre 180 aisladores ubicados en el sótano técnico. El sistema sismorresistente es un sistema de pórticos viga-pilar de hormigón reforzado. El sistema de piso en todos los niveles es una losa maciza de 15 cm de espesor igual de hormigón reforzado apoyada en las vigas principales y secundarias. La estructura se desplanta en una losa de cimentación de 60 cm de peralte.

3. Cargas sobre la estructura

3.1 Cargas muertas y vivas

Las cargas muertas quedan definidas por el peso propio de los miembros estructurales, pesos de acabados de piso, muros divisorios, instalaciones, equipos médicos especiales, rellenos en azotea y pesos de fachadas. Las cargas vivas fueron definidas por la normativa peruana E.020 [2], utilizando un valor promedio de 300 kg/m² correspondiente a hospital en casi todas las áreas de la edificación.

3.2 Cargas sísmicas

El espectro de diseño elástico fue definido por la normativa local E.030, E.031,[1,3] y se muestra en la Figura 4.

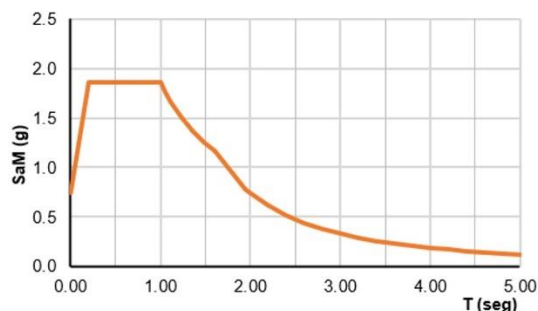


Figura 4. espectro de diseño elástico.

Se realizó un análisis espectral modal dinámico, se diseñó utilizando los resultados de la combinación cuadrática completa (CQC)

como respuesta máxima obtenida del análisis modal. De acuerdo con la normativa peruana, los elementos estructurales sobre el sistema de aislamiento deberán diseñarse usando los requerimientos para una estructura no aislada y las fuerzas obtenidas de un análisis dinámico reducidas por R_a , donde R_a es el coeficiente de reducción de fuerzas sísmicas de la estructura sobre el sistema de aislamiento calculado como $3/8 R_0$ no menor que 1 ni mayor que 2. R_0 es coeficiente de reducción de fuerzas sísmicas para la estructura considerada con base fija según la norma E.030 [1], para esta edificación se tomó $R_0=2$. Por otra parte, el sistema de aislamiento sísmico, la cimentación y todos los elementos estructurales de la subestructura serán diseñados según los requerimientos de una estructura no aislada y las fuerzas sísmicas no serán reducidas.

4. Estrategia de diseño

Para estimar un periodo objetivo es necesario conocer las propiedades dinámicas del edificio con base rígida. En este caso se tienen periodos de 0.83 seg. Tomando de referencia lo anterior el periodo aislado debe estar entre 2.5 a 4 veces el periodo en base rígida, en este caso, y después de muchas iteraciones de diseño se dejó un periodo objetivo de 3.6 seg.

El sistema de aislamiento debe ser diseñado y construido para soportar, como mínimo, el desplazamiento máximo, D_M .

$$D_M = \frac{S_{AM} T_M^2}{4\pi B_M} \quad (1)$$

donde:

S_{AM} : Ordenada del espectro elástico de pseudo aceleraciones correspondiente al sismo máximo.

T_M : Período efectivo de la estructura sísmicamente aislada, asociado al desplazamiento traslacional D_M en la dirección de análisis.

B_M : Factor de amortiguamiento, correspondiente a la razón entre la ordenada espectral para 5% de amortiguamiento y la ordenada espectral para el

amortiguamiento efectivo β_M correspondiente al desplazamiento traslacional D_M , el amortiguamiento del sistema de aislamiento β_M se supondrá igual a 30 %. A partir de la siguiente tabla se obtiene el valor del coeficiente de reducción B_M que es igual a 1.7. Según Tabla 5 de la norma E.031 [3]. Por otra parte, el desplazamiento total, D_{TM} , de los elementos del sistema de aislamiento debe incluir el desplazamiento adicional debido a la torsión real y accidental, calculado con la distribución espacial de la rigidez lateral del sistema de aislamiento y la ubicación más desfavorable de la masa excéntrica.

$$D_{TM} = D_M \left[1 + \left(\frac{y}{P_T^2} \right) + \left(\frac{12 e}{b^2 + d^2} \right) \right] \quad (2)$$

donde:

y : Distancia entre el centro de rigidez del sistema de aislamiento y el elemento de interés, medida perpendicularmente a la dirección de la sollicitación sísmica considerada.

b : Dimensión menor de la proyección en planta de la estructura, medida perpendicularmente a la dimensión mayor en planta de la estructura, d .

e : Excentricidad obtenida como la suma de la distancia en planta entre el centro de masa de la estructura sobre la interfaz de aislamiento y el centro de rigidez del sistema de aislamiento, más la excentricidad accidental, tomada como 5% de la mayor dimensión en planta del edificio en dirección perpendicular a la de la fuerza sísmica considerada.

P_T : Razón entre el período traslacional efectivo del sistema de aislamiento y el período rotacional efectivo del sistema de aislamiento.

Con lo descrito con anterioridad se obtiene un desplazamiento $D_M=42.1$ cm y un $D_{TM}=52.8$ cm, ver Tabla 1. La rigidez horizontal efectiva de la estructura k_M se obtuvo con la siguiente ecuación:

$$T_M = 2 \pi \sqrt{\frac{P}{k_M g}} \quad (3)$$

donde:

P : Peso de la estructura sobre la interfaz de aislamiento.

g : Aceleración de la gravedad.

Así, con $P=46,956$ ton y con $T_M=3.6$ seg, k_M requerida fue de 14,589.93 ton/m.

Tabla 1. Desplazamiento de la estructura.

T_M	3.60 seg
g	9.81 m/s ²
S_{AM}	0.23
β_M	27%=0.27
B_M	1.72
D_M	0.421 m
P_T	1.10
b	60.0 m
d	142.5 m
e (5%)	7.125 m
$y=d/2$	71.25 m
D_{TM}	0.528 m

Como se mencionó con anterioridad la edificación cuenta con un sótano técnico para el alojamiento de los aisladores, se tiene un total de 180 aisladores, Figura 5.



Figura 5. Sótano técnico para la colocación de aisladores sísmicos.

Hasta aquí el valor de la rigidez efectiva de cada aislador se obtendría con dividir la

rigidez horizontal efectiva de la estructura entre el número de aisladores, sin embargo, la carga axial en cada uno de ellos es diferente, por lo tanto, se tuvieron que clasificar de acuerdo con el valor correspondiente de carga axial, resultando 4 tipos de aisladores, ver Figura 6.

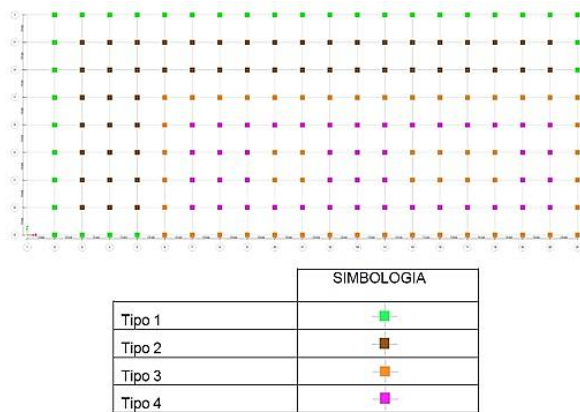


Figura 6. Tipos de aisladores sísmicos.

El modelo de análisis se elaboró en el software ETABS (CSI) [4], se consideró un modelo computacional completo de la estructura, a la cual se le agregó el aislamiento sísmico en la base, se incorporaron todas las masas presentes en la estructura. Los dispositivos de aislamiento se modelaron como elementos tipo link y se ubicaron por debajo de la superestructura, Figura 7.

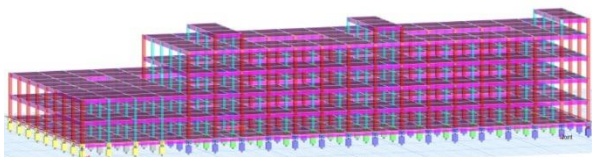
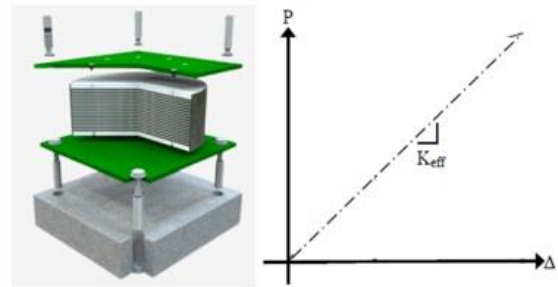


Figura 7. Modelo de análisis.

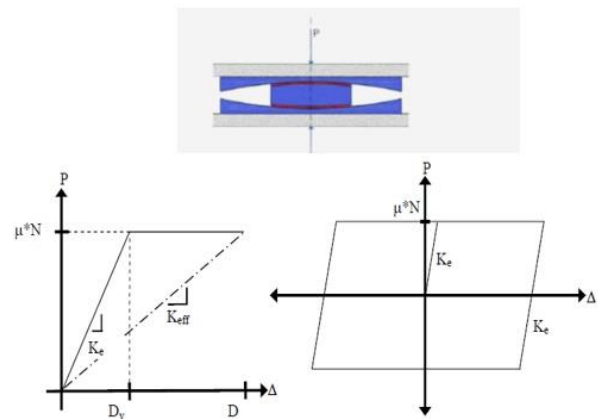
4.1 Diseño de aisladores sísmicos

La compañía encargada de suministrar los aisladores, realizó una propuesta haciendo una combinación para los 180 dispositivos con: Tipo 1) 33 son aisladores elastoméricos sin núcleo de plomo (RB), Tipo 2) 51 péndulos de fricción A (Slider A), Tipo 3) 52 péndulos de fricción B (Slider B), y Tipo 4) 44 elastoméricos con núcleo de plomo (LRB), esta propuesta fue

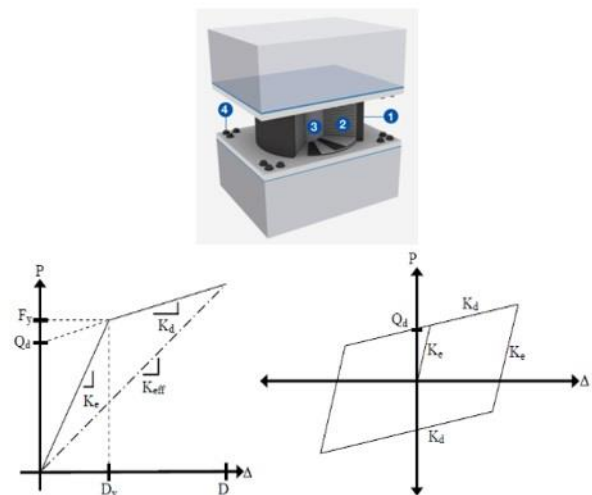
para agilizar la fabricación, entrega e instalación de los aisladores en obra, Figura 8.



Aisladores tipo RB.



Aisladores tipo péndulos de fricción.



Aisladores tipo LRB.

Figura 8. Tipos de aisladores sísmicos.

Fuente: <https://www.cdvperu.com>

Las propiedades lineales y no lineales de cada aislador fueron proporcionadas por el proveedor, los valores nominales se muestran en la Tabla 2.

Tabla 2. Las propiedades lineales y no lineales de aisladores sísmicos.

Vertical Properties			Linear Properties		
Definition	K Vertical (ton/m)	C vertical (ton-acc/m)	Effective Stiffness (ton/m)	Effective Damping (ton-sec/m)	Distance from End-J (mm)
RB A	167619	31.3	113.9	0.0	419
SLIDER B	290733	49.2	40.5	29.3	121
SLIDER C	340979	62.8	57.9	41.8	146
LRB D	229480	57.6	126.8	20.1	456

Nonlinear Properties							
Definition	Stiffness (ton/m)	Yield Strength h (ton)	Post-Yield Stiffness Ratio	Friction Coeff, Slow	Friction Coeff, Fast	Rate Parameter	Radius of sliding surface
RB A	1139	0.0	0.1				
SLIDER B	10000	18.1		0.04	0.089	39.37	10000
SLIDER C	10000	25.8		0.04	0.091	39.37	10000
LRB D	990	13.8	0.1				

Es de mencionar que cualquier construcción alrededor de la edificación aislada debe permitir el libre desplazamiento de los aisladores, DMT mencionado con anterioridad. Aquí se dejó una separación del muro de contención del piso técnico al borde de los soportes de los aisladores de 65 cm, mayor al DMT , Figura 9.

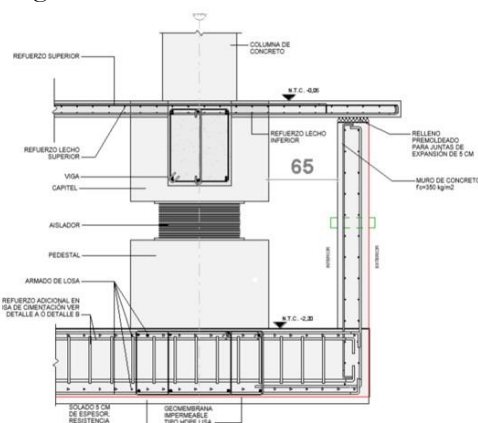


Figura 9. Separación libre para permitir desplazamiento de aisladores.

5. Revisión de parámetros de diseño

Del análisis modal espectral se obtiene un periodo de $T_M=3.66$ seg, igual al periodo objetivo elegido.

El desplazamiento en la dirección X como en Y fue de 48.6 cm, similar al desplazamiento del aislador obtenido con anterioridad, así mismo se cumplen las distorsiones permisibles de acuerdo con la

normativa E.031 [3]. La demanda de cortante basal mínimo para la revisión de la superestructura deberá ser igual a, al menos, el valor de $V_b=0.9 k_M D_M = 5502 \text{ ton}$. El cortante basal del análisis fue de 5670 ton , cumpliendo con este requisito. Estos parámetros se pueden observar en la Tabla 3 y Figura 10.

Tabla 3. Periodos fundamentales y cortante basal de la estructura.

TABLE:
Modal Participating Mass Ratios

Case	Mod e	Period (sec)	UX	UY	UZ	SU M UX	SU M UY
MODAL	1	3.73	0.40	0.42	0.00	0.40	0.42
MODAL	2	3.66	0.51	0.48	0.00	0.91	0.90
MODAL	3	3.37	0.08	0.09	0.00	0.99	0.99
MODAL	4	0.57	0.00	0.00	0.00	0.99	0.99
MODAL	5	0.56	0.00	0.00	0.00	0.99	0.99
MODAL	6	0.48	0.00	0.00	0.00	0.99	0.99

Periodos fundamentales.

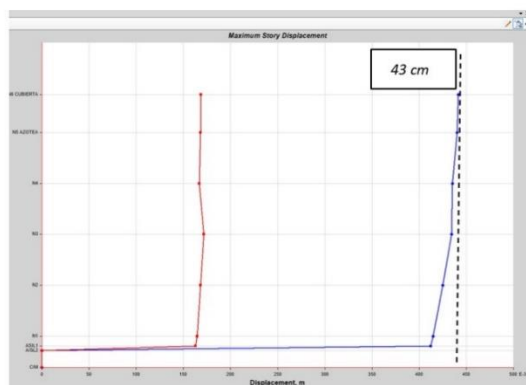
TABLE:
Base Reactions

Out Case	Case Type	FX (ton)	FY (ton)	FZ (ton)
CSx	LinRespSpec	5667.33	1704.02	103.22
CSy	LinRespSpec	1700.89	5677.75	179.02

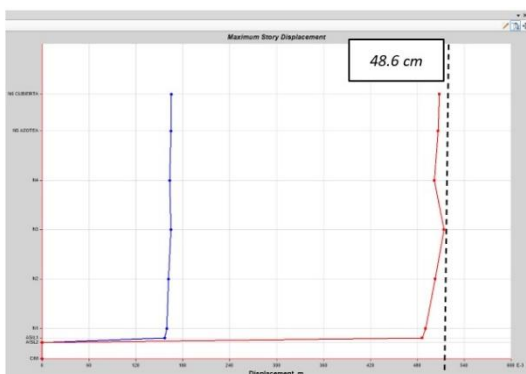
Cortante basal de la superestructura.

Para los análisis dinámicos no lineales tiempo-historia se obtuvieron los registros acelerográficos del Instituto Geofísico de Perú (IGP) <https://www.igp.gob.pe/servicios/informacion-acelerometrica/resgistros-acelerometricos>) [5]. El proceso de filtrado se llevó a cabo con el programa PRISM [6], que permite filtrar y corregir señales.

Para escalar las señales sísmicas se utilizó la técnica de Ajuste de Espectros (Spectral Match) con el software ETABS, la cual implica modificar el contenido de las frecuencias de los registros sísmicos utilizando registros reales, hasta que logren empatar con el espectro deseado (objetivo) teniendo así un espectro y un acelerograma compatible. En la Figura 11, se muestran 4 de los acelerogramas usados en el diseño.



Desplazamiento en X.



Desplazamiento en Y.

Figura 10. Desplazamientos de la superestructura.

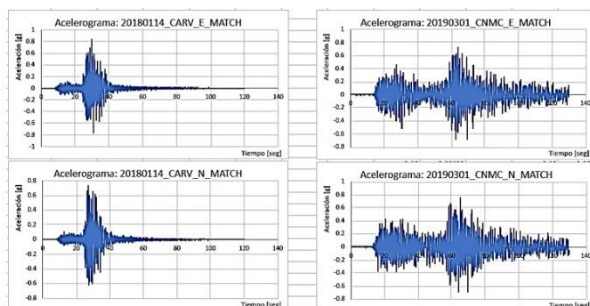


Figura 11. Acelerogramas de diseño.

Así, el promedio de los espectros de respuesta de cada acelerograma, ya escalados, es semejante al espectro de diseño, Figura 12.

De los análisis tiempo-historia se verificó que el valor de V_b en los registros acelerográficos no se consideraba por debajo del 80% de $V_b = k_{EM} D_M$.

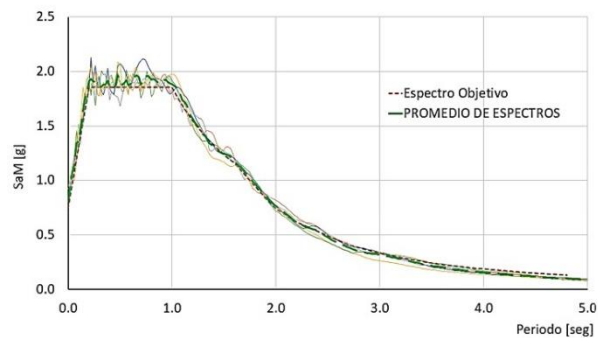


Figura 12. Espectros de diseños de registros acelerográficos.

A continuación, se muestran los desplazamientos y las distorsiones en el sentido Y del edificio (sentido débil de la estructura) ante cada registro acelerográfico. Se observa que el promedio de distorsiones cumple de acuerdo con la normativa E.031 [3], valor menor a 0.005, Figura 13.

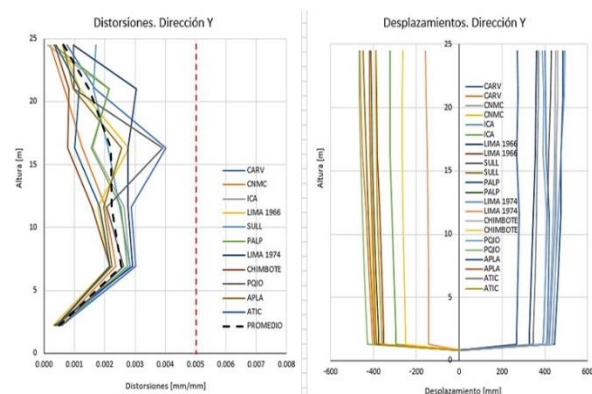
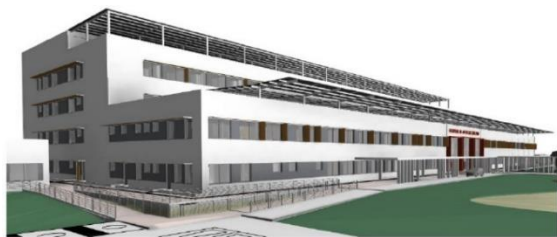


Figura 13. Distorsiones y desplazamientos de análisis tiempo-historia.

Es de mencionar que las propiedades reales de los aisladores pueden variar a las propiedades nominales teóricas presentadas en la Tabla 2. Para poder tomar en cuenta estas incertidumbres y garantizar que la estructura siga teniendo un comportamiento satisfactorio, la estructura se diseña con un aumento promedio del 50% y una disminución del 20% de las propiedades nominales de los aisladores. Por cuestiones de espacio en este documento estas revisiones no son presentadas, sin embargo, en la memoria de cálculo estructural de la edificación [7] se muestra a detalle cada una de estas.

6. Conclusiones

Se presentó la estrategia de diseño para el hospital de Apoyo Sullana en Perú. Esta estructura cuenta con 180 aisladores sísmicos en la base. Al ser una edificación del sector salud cuenta con un diseño por desempeño para garantizar una resiliencia estructural de la edificación para ser operable incluso después de un sismo de diseño, Figura 14.



Render del proyecto.



Fotografía en la actualidad.

Figura 14. Vista de Hospital Sullana, Perú.

Agradecimientos

A todo el equipo de ingeniería y arquitectura de IDOM Consulting, Engineering, Archicture, el trabajo en conjunto de estas disciplinas tiene como resultados grandes proyectos a favor de la sociedad. Así mismo, agradecer al equipo de OHL Perú, quienes ejecutaron la construcción de la obra. El intercambio de información entre la obra y el diseñador es fundamental para solventar incertidumbres y problemáticas presentadas en el proceso de construcción.

Referencias

- [1] Normas técnicas de Edificación NTE E.030 Diseño sismorresistente, Perú, 2006.
- [2] Normas técnicas de Edificación NTE E.020 Cargas, Perú, 2006.
- [3] Normas técnicas de Edificación NTE E.031 Aislamiento sísmico, Perú, 2019.
- [4] CSI. (2018). Computers and Structures, Inc. ETABS V18. Berkeley, California, EU.
- [5] <https://www.igp.gob.pe/servicios/informacion-acelerometrica/resgistros-acelerometricos>).
- [6] PRISM: STRONG-GROUND MOTION PROCESSING SOFTWARE. Quake Logic, California, EU.
- [7] Memoria de cálculo estructural, CONTRATO: 100001 - Proyecto Hospital de Apoyo Sullana II-2, OHLA Progress Enablers, 2021.