

FEASIBILITY OF PROTECTING WITH SEISMIC ISOLATION A SOCIAL HOUSING BUILDING IN PERU

Victor H. Calderon Astuhuaman ⁽¹⁾, Federico O. Vilca Córdova ⁽²⁾

⁽¹⁾ Pontificia Universidad Católica del Perú. Facultad de Ciencias e Ingeniería, Av. Universitaria 1801, San Miguel, 15088, Lima, Perú. vhcalderon@pucp.edu.pe

⁽²⁾ Universidad de Ingeniería y Tecnología. Facultad de Ingeniería Civil, Jr. Medrano Silva 165, Barranco, 15063, Lima, Perú. fvilca@utec.edu.pe

Received: March 2023. Accepted: August 2023. Published: September 2023

ABSTRACT

Limited Ductility Wall Buildings (EDML, in Spanish) are predominantly used as social housing in Peru. Due to some of their characteristics, their seismic performance is estimated to be lower than that of buildings with conventional reinforced concrete walls. Different protection technologies can be used to improve their performance during strong earthquakes, but these may be economically unfeasible. For this reason, this research evaluates the feasibility of implementing a seismic isolation system in an EDML located in Peru's highest seismic hazard zone, a representative property of those existing on the Peruvian coast. The objective is to quantify the over-cost of seismically isolating an EDML. Two types of buildings have been proposed to carry out this task: one with a fixed base and another with the same layout and type of walls but implemented with seismic isolators at its base. The results show that the seismic isolation of the chosen EDML effectively reduces its seismic design loads. However, the cost reduction in the superstructure is not enough to offset the cost of implementing the isolation system. Finally, it is concluded that isolating the chosen EMDL with the proposed seismic isolation system is not economically attractive.

Keywords: social housing, limited ductility walls, seismic isolation

FACTIBILIDAD DE PROTEGER CON AISLAMIENTO SÍSMICO UN EDIFICIO DE VIVIENDA SOCIAL EN EL PERÚ

RESUMEN

Los edificios de muros de ductilidad limitada (EMDL) son predominantemente empleados como viviendas sociales en el Perú. Debido a algunas de sus características, se estima que su desempeño sísmico es menor que el de los edificios con muros convencionales de concreto armado. Para mejorar su desempeño sísmico, en esta investigación se trata de evaluar la viabilidad económica implementar un sistema de aislamiento sísmico a un edificio de muros

de ductilidad limitada (EMDL) representativo de los existentes en la zona de mayor peligro sísmico en el Perú. Por lo cual se plantearon dos edificios: uno con base fija al suelo y otro con aisladores sísmicos en la base. Aunque el aislamiento sísmico redujo las solicitaciones sísmicas del EMDL, los costos de implementación no fueron compensados por la reducción de costos en la superestructura. Finalmente, se concluye que no es atractivo económicamente implementar el sistema de aislamiento sísmico propuesto en el EMDL elegido.

Palabras clave: vivienda social, muros de ductilidad limitada, aislamiento sísmico

1. ANTECEDENTES

En el Perú, las viviendas sociales se construyen principalmente bajo un sistema estructural conocido como edificios de muros de ductilidad limitada (EMDL). Definido por la Norma Técnica Peruana E.060 de Concreto Armado (Servicio Nacional de Capacitación para la Industria de la Construcción SENCICO, 2009), este sistema estructural está compuesto por un grupo de muros delgados de entre 10 y 15 centímetros de espesor, los cuales soportan la carga sísmica y de gravedad. En la práctica constructiva habitual, es frecuente utilizar refuerzos de una malla de acero electrosoldada o de acero dúctil en los muros de 10 cm de espesor. En el caso de los muros de 15 cm, se suele optar por la utilización de dos mallas de refuerzo y armaduras que brindan confinamiento a sus bordes extremos. Otra característica de los EMDL es que las normas peruanas de diseño estructural establecen un límite de ocho pisos para la construcción de edificios con este sistema, con el fin de tratar de controlar de las fuerzas que actúan sobre los muros.

En la actualidad, la Norma Técnica Peruana E.030 de Diseño Sismorresistente (SENCICO, 2018) busca evitar el colapso de las viviendas ante terremotos severos. Sin embargo, esta normativa no contempla los daños considerables que la estructura de la vivienda puede sufrir ante tales eventos. Este hecho no debe pasarse por alto, ya que el nivel de daño que se produce en las viviendas de una comunidad luego de un terremoto severo tiene un impacto determinante en la capacidad de recuperación de dicha comunidad. Si las viviendas sufren daños importantes o se derrumban, se pone en peligro la estabilidad socioeconómica de una gran parte de la población (Khalfan et al., 2015).

En particular, resulta notable la situación de los EMDL dado que estructuras con muros de características similares han sufrido severos daños en eventos sísmicos de alta intensidad. Un ejemplo de esto se evidenció tras el terremoto de 8.8 Mw ocurrido en Maule, Chile, en el año 2010, donde se observaron graves afectaciones en los muros de concreto armado de edificios residenciales. Estos daños se atribuyeron a diversos factores, tal como la gran cantidad de pisos de los edificios, la falta de confinamiento en los bordes de los muros y un espesor insuficiente de estos (Jünemann, 2016). Cabe destacar que estas dos últimas características, como se ha señalado, son particularmente comunes en los EMDL.

Por el contrario, los edificios que cuentan con muros convencionales de espesores mayores a 15 cm y con bordes confinados tienen una mayor capacidad de disipar la energía durante un sismo, lo cual juega un papel fundamental en su

desempeño sísmico. En contraste, se considera que los EMDL tendrá una capacidad limitada para disipar energía durante un evento sísmico.

Entonces, ¿es posible mejorar el desempeño sísmico de un EMDL? Tal vez, la implementación de un sistema de protección como el aislamiento sísmico, pueda contribuir a mejorar la respuesta de los EMDL ante sismos severos. El aislamiento sísmico consiste en colocar dispositivos flexibles entre el edificio y su cimentación, permitiendo la independencia de los movimientos del suelo y la estructura. Este enfoque permite una notable disminución de las fuerzas sísmicas transmitidas al inmueble, mejorando su capacidad para resistir los efectos del sismo.

Desde el año 2019, el Perú ha implementado una norma nacional que regula el diseño de edificios con aislamiento sísmico (SENCICO, 2019). A pesar de los beneficios que ofrece este sistema de protección, debido a su costo, su uso ha estado limitado a edificaciones consideradas “importantes”, tales como hospitales, edificios educacionales y viviendas de alto costo. En el caso de edificios de vivienda social, aún no se ha explorado su factibilidad económica. Es necesario, por tanto, analizar si resulta viable la implementación de aislamiento sísmico como método de protección en edificios de vivienda social. Es debido a esto que en esta investigación se ha seleccionado un EMDL y se ha evaluado el sobrecosto que implica implementar el aislamiento sísmico.

2. OBJETIVOS

El objetivo general de esta investigación es aportar a la mejora de la resiliencia ante sismos severos de los edificios de vivienda social en el territorio peruano.

En cuanto al objetivo específico, se plantea la siguiente tarea:

Determinar la diferencia de costos de construcción entre un edificio de vivienda social con muros de ductilidad limitada de base fija al suelo y otro edificio con la misma configuración de muros, pero equipado con aisladores sísmicos en su base.

3. METODOLOGÍA

El edificio seleccionado, el cual presenta una base fija al suelo, será denominado como el edificio convencional, y se encuentra ubicado en el distrito de Ancón, al norte de la ciudad de Lima, en Perú. Este inmueble forma parte de un plan de viviendas denominado "Ciudad Alameda Ancón" (VIVA Grupo AENZA, 2015), donde se prevé la construcción de un total de veinte edificios de características similares a la del edificio elegido.

El proyecto habitacional “Ciudad Alameda Ancón” fue impulsado por el Ministerio de Vivienda, Construcción y Saneamiento (MVCS) del Perú a través del programa Fondo Mivivienda. En consecuencia, las viviendas a ser construidas fueron planificadas para ser adquiridas mediante distintos programas de subvención del Estado peruano. En el caso específico del edificio elegido, el programa de adquisición de vivienda correspondió al “Crédito Mivivienda”. Dicho programa

financia a ciudadanos peruanos para la compra de viviendas cuyo costo oscila entre 17 000 USD y 121 200 USD (Fondo MIVIVIENDA Sociedad Anónima, 2020).

El edificio elegido para el estudio es de uso habitacional multifamiliar, posee ocho pisos y no cuenta con sótanos. Su estructura está compuesta por muros de ductilidad limitada en sus dos direcciones principales X – Y (véase figura 1b). Los muros del edificio presentan un espesor que varía entre 10 y 15 cm en los dos primeros pisos. Esto se debe a que, de acuerdo con las especificaciones de la NTP E. 060, aquellos muros que requieren confinamiento en sus bordes deben contar con un espesor mínimo de 15 cm. Por otro lado, los seis pisos superiores están conformados por muros de diferentes espesores, que oscilan entre 10, 12 y 15 cm.

En cuanto a la losa, esta está construida con concreto armado y tiene un espesor uniforme de 10 cm en todos los pisos. La cimentación del edificio está conformada por vigas de cimentación, donde se apoyan los muros, y una platea que las integra. El edificio cuenta con un área techada de 585 m² y tiene una altura de entrepiso típica de 2.40 m en todos sus niveles. La figura 1a presenta los niveles de cada piso respecto al terreno natural, y la figura 1c muestra una vista en 3D de la edificación.

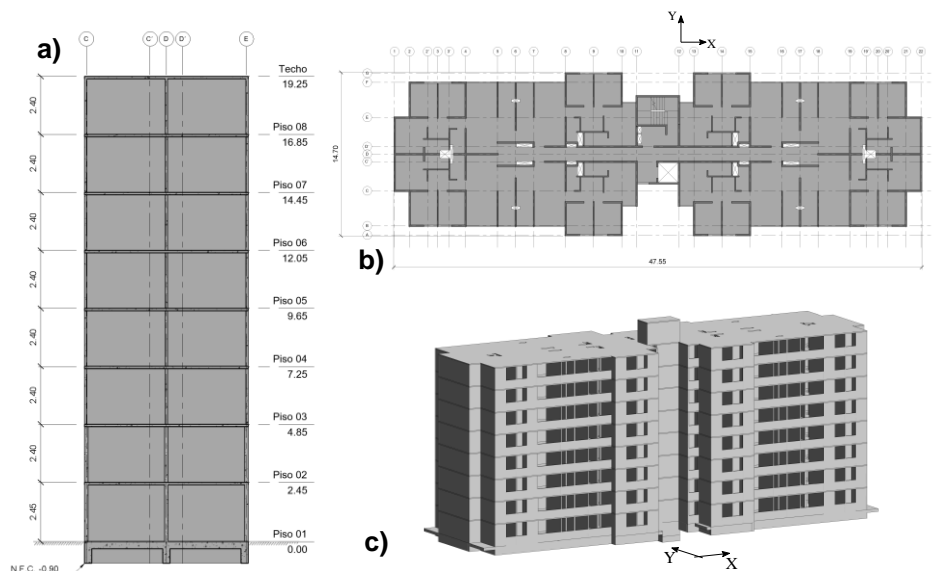


Figura 1. a) Elevación y niveles de piso; b) planta típica del edificio; c) vista en 3D del edificio convencional.

En aras de aislar sísmicamente el edificio convencional, se llevó a cabo una modificación en la estructura de su cimentación. Se reemplazó la placa de cimentación por un conjunto de vigas que soportan los muros, junto con una losa de 20 cm de espesor que las conecta. Parte de estas vigas se apoyan en otras vigas, mientras que el resto descansa sobre capiteles que están conectados a los dispositivos de aislamiento (ver figura 2a). Estos dispositivos se apoyan sobre pedestales que se extienden desde una placa de cimentación de concreto, la cual transmite las fuerzas del edificio aislado al suelo. Es importante destacar que la

plataea de cimentación, los pedestales, los dispositivos de aislamiento, así como los capiteles y vigas, se encuentran ubicados por debajo del nivel del suelo. Para tal fin, se proyectó un muro de contención que surge de los bordes de la placa de cimentación (ver figura 2b).

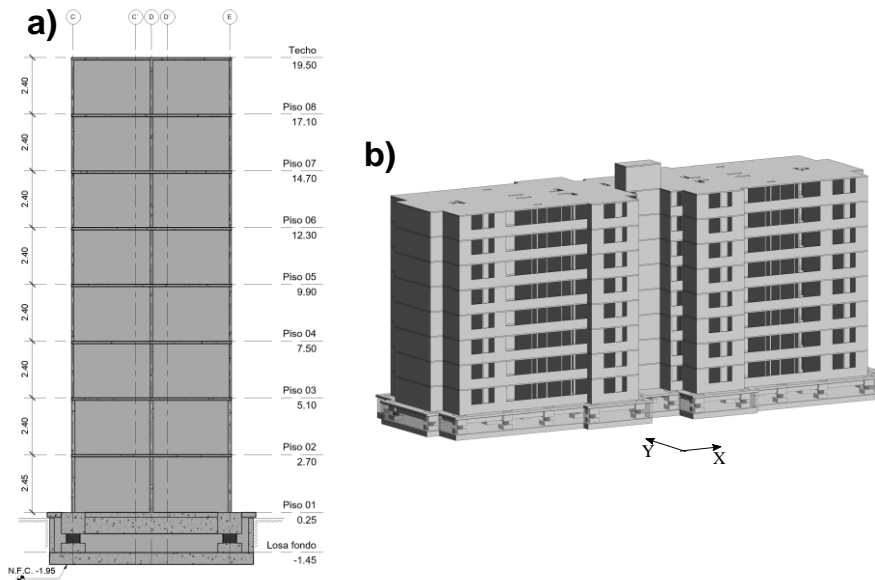


Figura 2. a) Elevación y niveles de piso; b) vista en 3D del edificio aislado sísmicamente y parte de su sistema de aislamiento.

La zona que se encuentra en la parte inferior de la estructura aislada y en la parte superior de la estructura que se mueve con el suelo es conocida como interfaz de aislamiento.

La parte de la estructura que está aislada puede subdividirse en dos partes: la superestructura y los elementos estructurales que transmiten las fuerzas entre los dispositivos de aislamiento y la superestructura. La superestructura incluye muros de ductilidad limitada, losas de entrepiso, escaleras y parapetos. Por otra parte, son las vigas, los capiteles y la losa de 20 cm de espesor los que conectan la superestructura con los dispositivos de aislamiento, permitiendo la transferencia de fuerzas entre ellos. Además, la subestructura es la parte de la estructura que se desplaza rígidamente con el suelo. En el caso del edificio aislado, esta subestructura está compuesta por pedestales, una platea de cimentación y muros de contención (figura 3).

En el proceso de creación del modelo computacional de los edificios, se utilizó el software ETABS (Computers and Structures Inc, 2016). Se empleó el elemento de tipo shell para modelar los muros y las losas tanto del edificio convencional como de la superestructura del edificio aislado. Se considera que la losa posee una alta rigidez en su plano, por lo que se le asignan diafragmas rígidos en cada piso. En el caso específico del edificio aislado, las vigas y los capiteles del sistema de aislamiento se modelan con elementos de tipo frame, mientras que la losa que los conecta se modela con elementos de tipo shell, a los cuales se les

asignó un diafragma rígido en su nivel. Por otra parte, los dispositivos se modelan como elementos de tipo link y las propiedades no lineales de los dispositivos son sus entradas. Para el LDR el link utilizado se denomina Hysteretic (Rubber) Isolator y el del DP se denomina Friction – Pendulum Isolator (Computers and Structures Inc, 2016).

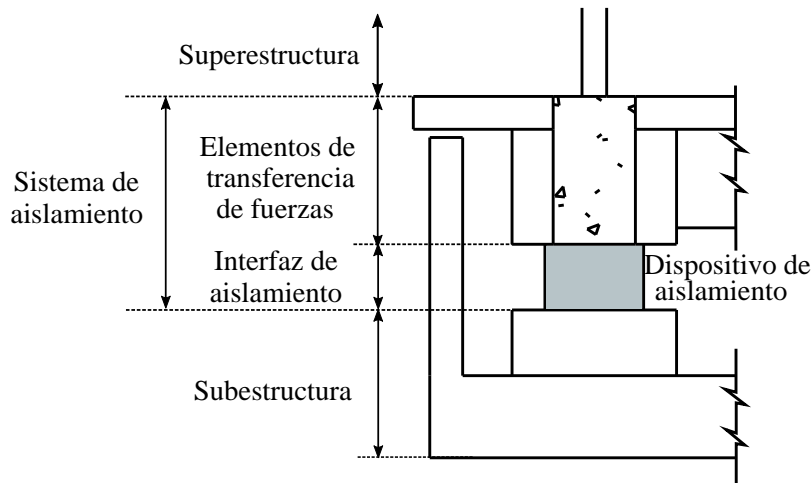


Figura 3. Partes del edificio aislado sísmicamente.

En el caso de los aisladores sísmicos, se aplica un enfoque simplificado basado en modelos matemáticos lineales para calcular las propiedades del sistema de aislamiento y los aisladores sísmicos, según la NTP E. 031 y otras normas nacionales (Instituto Nacional de Normalización INN, 2013). Esto se debe a que los aisladores presentan una relación constitutiva no lineal entre la fuerza aplicada y la deformación resultante. Mediante este enfoque, es posible realizar un prediseño de las propiedades no lineales de los aisladores a la vez que controla la magnitud de algunos parámetros de diseño que resultan del análisis dinámico Tiempo – Historia (ATH). Por otra parte, en esta investigación se decidió utilizar el criterio de la Capacidad de Fluencia Óptima (conocido por sus siglas en inglés como OYC) para optimizar el sistema de aislamiento sísmico (De la Llera et al., 2004).

En la figura 4 se presentan, en función del periodo efectivo de vibración del edificio T_M , las fuerzas de diseño del edificio aislado y la demanda de desplazamiento en el sistema de aislamiento. En ella se muestran el desplazamiento máximo de traslación DM , el desplazamiento total DTM , así como las fuerzas mínimas de diseño del sistema de aislamiento V_b y de la superestructura V_S para el EMDL aislado sísmicamente. Para esta representación se ha normalizado las fuerzas con el peso de la porción del edificio que se encuentra aislado (P).

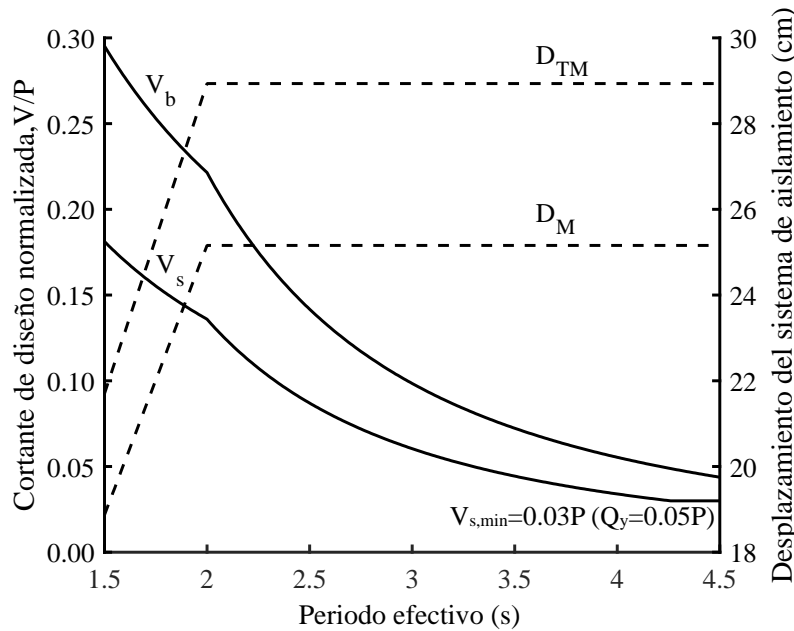


Figura 4. Desplazamientos en el sistema de aislamiento y fuerzas de diseño en el edificio aislado.

En la figura 4 se puede apreciar que, cuando los periodos efectivos de vibración del edificio TM superan los 4.3 segundos, la fuerza mínima de diseño en la superestructura se mantiene constante. Es a partir de este punto que los costos en el diseño de la superestructura no pueden reducirse aún más. Por otra parte, al considerar una capacidad de fluencia del sistema de aislamiento igual a $Q_y = 0.05P$, se obtiene el valor mínimo de la fuerza en la superestructura.

En un proceso iterativo, la elección de las propiedades no lineales y la cantidad de dispositivos de aislamiento de cada tipo dependen del desplazamiento de demanda. En el prediseño del sistema de aislamiento, la regulación de la fuerza mínima de restitución por la NTP E.031 (SENCICO, 2019) fue el principal factor determinante de las propiedades del mismo. Este requerimiento trata de que no se generen desplazamientos residuales en el sistema de aislamiento que alteren su eficacia tras un evento sísmico. La NTP E.031 establece que, como forma de establecer un límite en la fuerza de restitución, la diferencia entre la fuerza lateral durante el desplazamiento máximo del interfaz de aislamiento y la fuerza lateral a la mitad de dicho desplazamiento debe de superar el 2.5% del peso de la estructura aislada.

Los aisladores elastoméricos de bajo amortiguamiento (LDR, por sus siglas en inglés) combinados con deslizadores friccionales planos (DP) se eligieron para ser utilizados debido a su capacidad para alcanzar los niveles de reducción de demanda sísmica deseados a un costo relativamente bajo. Además, la combinación de estos dos tipos de dispositivos de aislamientos genera otro beneficio particular: mientras que los LDR mejoran la capacidad de restitución del sistema y ubicados

en el perímetro reducen los desplazamientos por torsión del edificio, los DP agregan amortiguamiento al sistema sin aumentar su rigidez.



a) **Figura 5.** Aisladores sísmicos utilizados: a) aislador elastomérico; b) deslizador plano.

La distribución en planta del sistema de aislamiento propuesto se muestra en la figura 6, donde se observa la presencia de un total de 60 dispositivos de aislamiento sísmico. De estos, 24 son aisladores elastoméricos de bajo amortiguamiento, mientras que los restantes 36 son deslizadores friccionales planos.

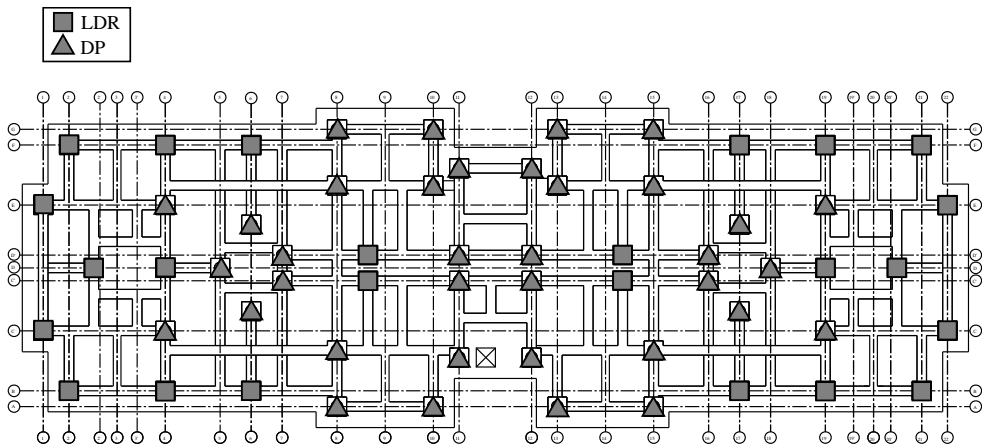


Figura 6. Ubicación en planta de los aisladores sísmicos.

4. ANÁLISIS ESTRUCTURAL

En el análisis dinámico del edificio con base fija al suelo se utilizó el análisis modal – espectral donde empleó el espectro de diseño de pseudoaceleración de la NTP E. 030 (SENCICO, 2018). En cambio, se aplicó un análisis dinámico Tiempo-Historia (ATH) al edificio aislado, el cual toma en cuenta de forma explícita la no linealidad de las fuerzas en los dispositivos de aislamiento. En este análisis, se utilizaron al menos siete conjuntos de acelerogramas, cuyos espectros de pseudoaceleración se escalan y compatibilizan con el espectro de pseudoaceleración de diseño de la NTP E. 031.

Debido a la existencia de pocos acelerogramas de eventos sísmicos que sean coherentes con espectro de diseño de la NTP E. 031 dentro del rango de interés (0.2TM – 1.25TM) y que a la vez hayan sucedido en la ciudad de Lima, se optó por utilizar además de acelerogramas de sismos peruanos, acelerogramas de sismos chilenos debido a la similitud entre ambos de la fuente y el rango de frecuencias preponderantes. Los acelerogramas originales, que fueron capturados por acelerógrafos analógicos o digitales, estuvieron distorsionados por el ruido. Esta distorsión es evidente al integrar el acelerograma, y notar que la velocidad y el desplazamiento que resultan no ser congruentes físicamente.

La remoción de las frecuencias que perturban el acelerograma se lleva a cabo mediante los llamados filtros de frecuencia, el high-pass y el low-pass. Además, al ajustar la línea base también se usan filtros de frecuencia. La alteración de la línea base se debe a la presencia significativa de ruido de alta frecuencia en el acelerograma. Por lo que corregir la línea base implica también eliminar este ruido y esto a su vez genera la corrección de la incongruencia física entre la velocidad y el desplazamiento que resultan del acelerograma. Los procedimientos y criterios que se siguieron para la adaptación del acelerograma se basan en las recomendaciones de Boore y Bommer (Boore y Bommer, 2005).

Para adecuar el espectro de los acelerogramas al espectro de diseño, se utilizó el método ideado por Al Atik y Abrahamson (Al Atik y Abrahamson, 2010). Dicho método altera el contenido de frecuencias del acelerograma al aplicarle ondículas que se encuentran ajustadas de forma que la línea base no precise ser corregida al aplicarse al acelerograma. En términos generales, el acelerograma compatible conserva las características principales del acelerograma original, incluyendo los momentos de máxima y mínima velocidad y desplazamiento, aunque con amplitudes diferentes (Al Atik y Abrahamson, 2010). La Tabla 1 muestra la pseudo aceleración y velocidad máximas, y el desplazamiento máximo que resultan de los acelerogramas que han sido compatibilizados con el espectro de diseño.

Tabla 1. Acelerogramas de espectro compatibles con el espectro de diseño (Calderon, 2021)

Terremoto	Estación	PGA ^a	PGV	PGD
Lima (17/10/1966)	Parque de la Reserva (E - W)	0.76	80.87	37.13
Lima (17/10/1966)	Parque de la Reserva (N - S)	0.78	65.45	44.06
Lima (03/10/1974)	Parque de la Reserva (E - W)	0.85	90.40	30.45
Lima (03/10/1974)	Parque de la Reserva (N - S)	0.79	99.81	23.35
Arequipa (23/06/2001)	Mariscal Nieto, Moquegua (E - W)	0.66	73.47	31.30
Arequipa (23/06/2001)	Mariscal Nieto, Moquegua (N - S)	0.79	64.97	32.73
Pisco (15/08/2007)	U.N. San Luis Gonzaga, Ica (E - W)	0.70	101.98	33.33
Pisco (15/08/2007)	U.N. San Luis Gonzaga, Ica (N - S)	0.92	78.36	25.39
Maule (27/02/2010)	Concepción (N60 - E)	0.53	66.76	24.97
Maule (27/02/2010)	Concepción (S30 - E)	0.73	91.24	56.68
Maule (27/02/2010)	Curicó (S30 - E)	0.73	79.03	35.69
Maule (27/02/2010)	Curicó (S60 - W)	0.67	88.49	33.52
Maule (27/02/2010)	Hualañé (E - W)	0.83	79.30	31.06
Maule (27/02/2010)	Hualañé (N - S)	0.62	71.39	25.45

PGA: aceleración máxima en el acelerograma compatible, PGV: velocidad máxima que resulta del acelerograma compatible, PGD: desplazamiento máximo que resulta del acelerograma compatible.

^aUnidades en g, cm, s

Dentro del rango de interés ya mencionado, las ordenadas que resultan de combinar los espectros compatibles de cada par de acelerogramas con el método de la raíz cuadrada de la suma de los cuadrados (SRSS, por sus siglas en inglés) deben ser iguales o mayores que las ordenadas del espectro de diseño. La figura 7 muestra la combinación de acelerogramas dentro y fuera del rango de interés (0.52 s a 4.35 s) utilizando el método de SRSS y el promedio que resulta de los siete pares de acelerogramas.

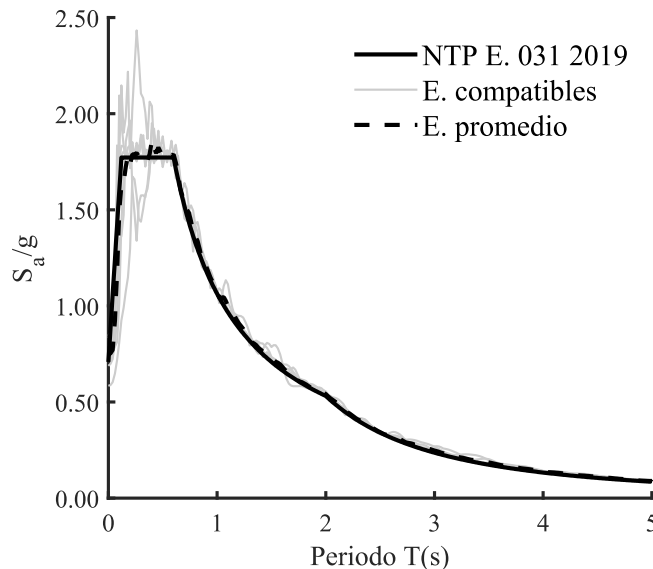


Figura 7. Promedio de los espectros de pseudoaceleración de los acelerogramas escalados y compatibles con el espectro de diseño de la NTP E.031.

Se determina la componente fuerte y la componente débil en cada par de acelerogramas combinados. La componente fuerte es aquella que muestra mayores magnitudes en su espectro de pseudoaceleración dentro del rango de periodos de interés. Para su alineación correcta, la componente fuerte se coloca en la dirección positiva de análisis (por ejemplo, X+), mientras que la componente débil se ubica en una dirección perpendicular a esta. Se examinaron solamente dos casos de excentricidad accidental debido a que la planta del edificio posee una simetría razonable en los cuatro cuadrantes, y a que obtener datos mediante el ATH resulta en una cantidad significativa y costosa de procesamiento. En la dirección X e Y de análisis, se consideró la excentricidad accidental en la dirección X- e Y-, respectivamente (figura 8).

En el ATH se utilizan, como se mencionó, explícitamente las propiedades inelásticas de los dispositivos de aislamiento sísmico que resultan del proceso de prediseño. Como una forma de considerar la variabilidad de las propiedades de los dispositivos dentro del modelo computacional, la NTP E. 031 considera factores que modifican la rigidez y el coeficiente de rozamiento dinámico de los dispositivos. En el cálculo de las fuerzas de diseño en el sistema de aislamiento, se utiliza el límite superior de las propiedades de los dispositivos, el cual generalmente implica un aumento en su rigidez. Por otro lado, el límite inferior se emplea para calcular la

deformación máxima del sistema de aislamiento al reducir las rigideces de los dispositivos (Building Seismic Safety Council BSSC, 2012).

Para describir de manera aproximada el lazo de histéresis en el caso de los LDR se necesitan la rigidez efectiva k_{eff} el cual tiene valor máximo, mínimo y nominal iguales a 78, 48 y 60 ton/m², respectivamente; y el amortiguamiento efectivo ξ_{eff} , que presenta variaciones con los factores de modificación máximo, mínimo y nominal, siendo de 6,8 %, 6,3 % y 6,5 %, respectivamente. Por otro lado, los deslizadores planos exhiben una variabilidad en su coeficiente de fricción μ , presentando valores máximos, mínimos y nominales de 8 %, 4 % y 5 %, respectivamente.

Al analizar dinámicamente los modelos obtienen los modos de vibración de los dos edificios analizados. La relevancia de la excentricidad en planta se hace evidente al considerar que la dimensión del edificio es mayor en la dirección X en comparación con la dirección perpendicular. Esta característica influye significativamente en la respuesta de ambos edificios. Por tal motivo, se examinaron los cuatro casos de excentricidad accidental en el edificio convencional, mientras que, como se mencionó, en el edificio aislado sólo se evaluó el caso más crítico de excentricidad accidental en cada dirección principal.

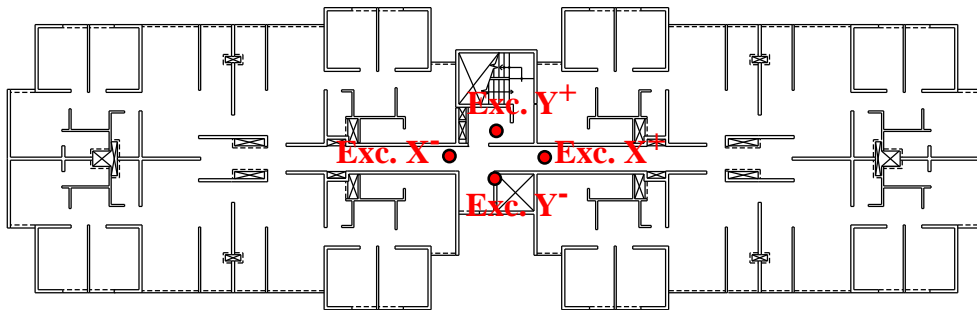


Figura 8. Casos de masa excéntrica evaluados en el edificio convencional.

Los periodos de vibración se muestran en la Tabla 2. En el edificio convencional se observa que los periodos de vibración son menores que 0.255 s, lo que indica que, debido a la densidad de muros en ambas direcciones, el edificio es rígido. Además, en cada uno de los cuatro casos de excentricidad accidental analizados, se observa que, a pesar de la simetría del edificio, los tres primeros modos de vibración tienen la capacidad de generar desplazamientos torsionales significativos en la estructura. El aumento del periodo de vibración torsional en la estructura se debe a la diferencia en las dimensiones principales del edificio, lo cual resulta en una magnitud considerable del momento de inercia de cada techo con respecto a un eje normal que atraviesa su centro de masa.

En la Tabla 2, el edificio aislado se puede observar que los tres primeros modos de vibración son los más importantes debido a su masa modal. Estos tres modos, dos de traslación y uno de rotación, son indicativo de que la deformación se concentra en el sistema de aislamiento, mientras que la superestructura muestra un comportamiento cercano al de un cuerpo rígido. Se verifica, además, que la relación entre el periodo de traslación y el periodo de rotación del edificio aislado es $PT =$

1.23 y $PT = 1.25$ para el límite superior e inferior de las propiedades de los dispositivos, respectivamente. Los valores de PT que exceden uno sugieren que la disposición espacial de los aisladores sísmicos es apropiada ya que minimiza la torsión del edificio aislado (INN, 2013).

Tabla 2. Modos de vibración del edificio convencional y del edificio aislado

Caso	Modo	T de los modelos		
		T [s]	Dir	MM (%)
Edif. Convencional Exc. Natural	1	0.235	Y	57.06
	2	0.233	θ	56.05
	3	0.184	X	71.73
	4	0.056	Y	19.57
Edif. Convencional con Exc. Acci. X ⁻	1	0.255	θ	39.98
	2	0.216	Y	29.79
	3	0.184	X	71.47
	4	0.060	Y	11.77
Edif. Convencional con Exc. Acci. Y ⁻	1	0.236	θ	43.29
	2	0.234	Y	44.75
	3	0.182	X	68.86
	4	0.056	θ	9.22
Edif. Aislado Lím. Superior	1	2.69	Y	87.86
	2	2.61	X	100.00
	3	2.19	θ	87.83
	4	0.21	θ	~ 0
	5	0.18	θ	~ 0
Edif. Aislado Lím. Inferior	1	3.57	Y	90.44
	2	3.47	X	100.00
	3	2.86	θ	90.41
	4	0.21	θ	~ 0
	5	0.18	θ	~ 0

T: periodo modal del edificio, Dir: dirección modal predominante, MM: masa modal en la dirección predominante, Acci. X⁻: excentricidad accidental generada al desplazar el centro de masa de cada piso en dirección X⁻, Acci. Y⁻: excentricidad accidental generada al desplazar el centro de masa de cada piso en dirección Y⁻

Se puede observar que la fuerza de corte de diseño la superestructura del edificio aislado es menor al 50% de la necesaria en el edificio con base fija. Vale notar que la reducción de la fuerza cortante en el edificio aislado se da a pesar de que es diseñado para un sismo con periodo de retorno de 2475 años, mientras que el edificio de base fija es diseñado para un sismo con periodo de retorno de solo 475 años.

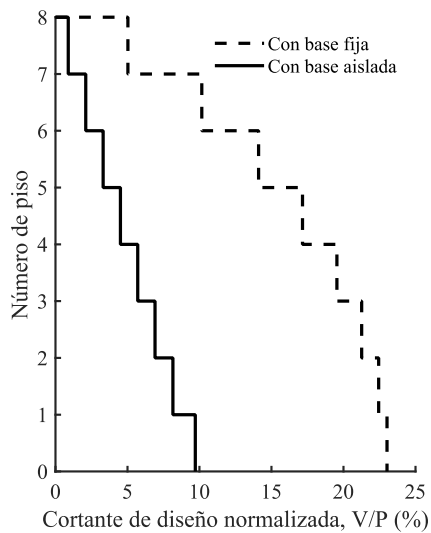


Figura 9. Fuerzas cortantes de entrepiso de diseño del edificio con base fija y de la superestructura del edificio aislado sísmicamente, normalizadas por su peso sísmico.

Es además que en el análisis dinámico Tiempo – Historia (ATH) se verifica que se cumpla con la fuerza restitución mínima del sistema de aislamiento. Esto se comprueba para ambos límites de las propiedades del sistema de aislamiento: máximas, que rigidizan al sistema y disminuyen su desplazamiento; mínimas, que flexibilizan al sistema y aumentan su desplazamiento. En el edificio aislado analizado, la diferencia mínima entre la fuerza lateral para el desplazamiento máximo y el 50% de ese desplazamiento es de 120 t-f (2.5% del peso de la estructura aislada). Este mínimo se cumple tanto para las propiedades máximas y mínimas del sistema de aislamiento ya que la fuerza de restitución promedio en cada caso es de 152 t-f y 122 t-f, respectivamente.

5. RESULTADOS

Luego de analizar estructuralmente ambos edificios, se procedió a diseñarlos estructuralmente. La norma que regula el diseño en concreto armado (CA) de los elementos estructurales de los edificios convencional y aislado sísmicamente, es la NTP E.060 de Concreto Armado (SENCICO, 2009). Con el fin de facilitar la comparación entre los metrados del edificio convencional y el edificio aislado, en ambos se utilizan los mismos insumos para los elementos estructurales, incluyendo concreto de resistencia $f'c = 210 \text{ kg-f/cm}^2$ y acero de refuerzo de grado 60 A615-420. ($f_y = 4200 \text{ kg-f/cm}^2$).

Mientras que el edificio con base fija al suelo se diseñó de manera convencional, en el edificio aislado surgió una particularidad durante el diseño de la superestructura. Durante el diseño del edificio aislado el primer objetivo que se persiguió fue reducir el costo de la superestructura con el fin de compensar el aumento de precio debido a la implementación del sistema de aislamiento, esto era, reducir el espesor de los muros de concreto. Sin embargo, debido a que la NTP E.

031 requiere que la superestructura del edificio aislado sea diseñada con detallamiento sísmico, conlleva a que se evalúe la necesidad de confinar los bordes extremos por medio de la ecuación:

$$c \geq \frac{l_w}{600 (\delta_u/h_w)} \quad (1)$$

donde c representa el límite máximo de la profundidad del eje neutro para confinar el borde extremo del muro, l_w es la longitud del muro, h_w es su altura y δ_u es el desplazamiento lateral inelástico en el nivel más alto del muro, y donde la relación mínima de δ_u/h_w es 0.005. El problema surge debido a que en el edificio aislado δ_u en los muros tiene valores ínfimos, lo cual indica que teóricamente no sería necesario confinar sus bordes. A pesar de esto, utilizar la ecuación 1 hace que varios muros requieran de confinamiento, lo que se traduce en que haya menor cantidad de muros con un espesor menor que 15 cm. Además, debido a relación directa entre h_w y c , el reducir el espesor del muro genera valores más conservadores de c , y esto a que el muro requiera de confinamiento.

Los otros elementos estructurales de concreto armado del edificio aislado: vigas, capiteles, pedestales, platea de cimentación y muros de contención; y del edificio convencional: platea y vigas de cimentación, se diseñaron con detallamiento sísmico convencional como se indica en la NTP E. 060. Para el análisis económico se diseñaron todos elementos estructurales del edificio convencional y del aislado, y se muestran más detalles de estos elementos en Calderon (2021).

Tanto para el edificio convencional como para el edificio aislado, se incluyen las tareas de excavación, acarreo y eliminación de material en el movimiento de tierras. En el edificio convencional, se agrega el relleno estructural debido a que la base de la platea se encuentra a -0.9 m en relación al nivel del suelo natural (ver figura 1a). En esta zona, el suelo tiene una baja presión admisible de $q_{adm} = 0.7$ kg/cm². El colocar un relleno estructural aumentaría la presión del suelo a $q_{adm} = 1.4$ kg/cm².

En el edificio aislado sísmicamente, el fondo de la platea se encuentra a -1.9 m en relación al nivel del suelo natural (ver figura 2a). Debido a que la presión admisible del suelo mejora a esa profundidad ($q_{adm} = 1.0$ kg/cm²), se determinó que la presión máxima generada por las fuerzas en el edificio aislado no requería un relleno estructural.

Luego de realizar el diseño estructural de ambos edificios se prosiguió con la elaboración de sus planos estructurales y finalmente con la cubicación de los insumos y la mano de obra para poder comparar la diferencia del costo entre ambos edificios. Se calcularon los costos del edificio convencional analizando los metrados y costos unitarios de cada partida. Algunos de estos costos unitarios se obtuvieron de revistas de construcción peruanas, mientras que otros se tomaron de proyectos similares en Lima. De manera similar, los costos del edificio aislado sísmicamente, de los elementos estructurales de concreto armado dentro de su subestructura y del sistema de aislamiento, se obtuvieron de revistas de construcción peruanas.

Los precios de los LDR y los DP dependen de diversas características, tales como el tipo de dispositivo, las fuerzas y deformaciones de diseño, y el fabricante que los produce. En el caso de los LDR, las propiedades que se entregan al

fabricante incluyen la rigidez y el amortiguamiento efectivo, mientras que en los DP se indica el coeficiente de rozamiento que poseen. También se proporciona al fabricante la matriz de ensayos requeridos por la NTP E. 031 y los límites de las propiedades de los dispositivos debido a los factores de modificación máximo y mínimo. Según la NTP E. 031, se requieren dos prototipos de cada tipo de aislador para ensayos y no se utilizarán en la construcción. En la partida de los dispositivos de aislamiento se incluye, aparte del costo de los dispositivos en sí, los costos de la instalación como el sistema de anclaje, la plantilla de montaje; además, se considera los costos de importación y transporte; y adicionalmente la visita del especialista a obra.

Los precios de los dispositivos de aislamiento se basan en una de dos cotizaciones obtenidas. Estas cotizaciones fueron otorgadas por dos entidades: una empresa peruana que importa dispositivos de un fabricante norteamericano; y una empresa chilena que fabrica y provee de manera directa los dispositivos. Se seleccionó la cotización de la empresa que no solo resultó ser la más económica, sino que también cumplía con las propiedades requeridas de los dispositivos. Sin embargo, en este documento no se revelan los nombres de las empresas que cotizaron los dispositivos debido a solicitud de las mismas.

La figura 10 se presenta el costo total de la estructura para el edificio convencional y el edificio aislado sísmicamente, junto con la contribución de cada partida al costo total. Los costos son presentados en la moneda oficial peruana, esto es, en soles, debido a que se obtuvieron los costos de las partidas e insumos en dicha moneda, excepto el costo de los dispositivos de aislamiento. Se convirtió la cotización de los dispositivos de aislamiento de dólares a soles utilizando el tipo de cambio proyectado para el año 2021, cuando comenzó la investigación, que es de S/ 3.60 por cada dólar. De la figura 10 se puede inferir que construir la estructura del edificio aislado sísmicamente, con el sistema de aislamiento propuesto, costaría un poco más del doble en comparación la del edificio convencional.

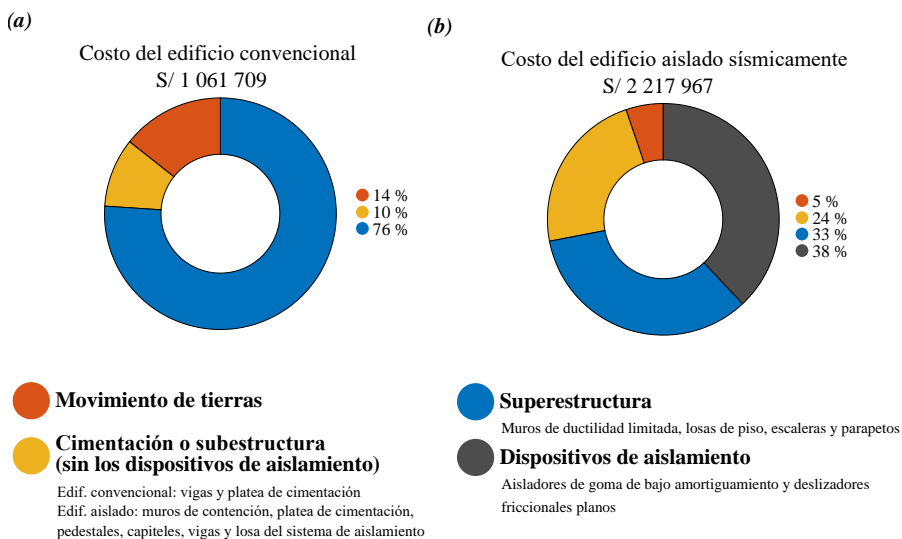


Figura 10. Costo a nivel estructural de cada edificio y la incidencia de cada partida en este: a) edificio convencional; y b) edificio aislado sísmicamente. (Calderon, 2021)

La figura 11 presenta la comparativa económica en términos estructurales entre el edificio convencional y el edificio con aislamiento sísmico. Aunque el edificio aislado utilizó menos materiales en la superestructura según la figura 11b, los gastos asociados con el sistema de aislamiento hicieron que su estructura fuera la más costosa. La colocación de vigas en el sistema de aislamiento y la cantidad de aisladores aumentaron el costo del edificio aislado. Varios dispositivos fueron requeridos para proporcionar puntos de apoyo para las vigas. En la figura 10, los dispositivos de aislamiento representan el 38% del costo total de la estructura del edificio aislado.

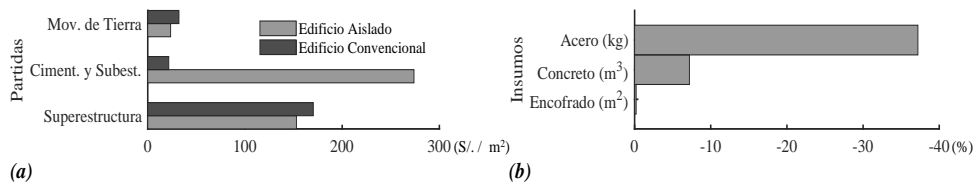


Figura 11. Comparación económica a nivel estructural entre el edificio convencional y el edificio aislado: a) relación del costo de las partidas en soles por metro cuadrado construido; y b) porcentaje de reducción de la cantidad de insumos necesarios en los muros del edificio aislado respecto a los necesarios en los muros del edificio convencional.

La diferencia en el costo de las estructuras de ambos edificios se debe, en parte, a la filosofía de diseño adoptada en cada uno. El edificio convencional se diseña para resistir sismos severos sin colapsar, pero puede sufrir daños estructurales graves. En cambio, el edificio aislado se diseña para mantener su estructura esencialmente elástica ante un sismo severo. Así pues, tras un sismo de gran intensidad, el edificio convencional requeriría reparaciones que pueden resultar costosas o, en el peor de los casos, debería ser demolido (Reyes, 2017). Por su parte, el edificio aislado seguiría siendo funcional después de un sismo de gran magnitud o, en el peor de los casos, solo necesitaría reparaciones menores en su estructura.

Otro factor que genera la discrepancia en el costo es que ambos edificios fueron diseñados bajo las regulaciones de diseño sísmico de la NTP E. 060. El objetivo inicial en el edificio aislado era no solo reducir la cantidad de acero de refuerzo requerida en los muros en comparación con el edificio convencional, sino también disminuir el espesor de los mismos. Sin embargo, en los primeros pisos de varios muros, fue necesario evaluar la profundidad del eje neutro, al igual que en el edificio convencional, lo que limitó la reducción deseada. Como resultado el espesor de los muros en el edificio aislado se redujo de 15 cm a 10 cm a partir del tercer piso.

Hay dispositivos de aislamiento menos conocidos, pero más económicos que los utilizados en este estudio. Konstantinidis y Kelly (Konstantinidis y Kelly, 2014) propusieron un nuevo tipo de aislador elastomérico para ser usado en edificios que tienen muros estructurales en su superestructura. Por su parte, Jampole et al. (Jampole et al., 2016) diseñaron un nuevo deslizador friccional plano cuyos materiales de fabricación son más económicos que los empleados en los deslizadores descritos en la Sección 3. Su costo de fabricación puede ser solo el 10

% de un deslizador convencional. Aunque no se utilizaron en esta investigación debido a su falta de difusión en el mercado y a la poca literatura que describe su comportamiento. En futuras investigaciones para el aislamiento sísmico de edificios de viviendas sociales, se recomienda considerar dispositivos de bajo costo, como estos y otros tipos disponibles.

En Lima, construir edificios convencionales de muros de ductilidad limitada tiene un costo total aproximado de S/ 1260 (US \$ 350) por metro cuadrado de área construida. Esto cubre la arquitectura, estructuras, instalaciones sanitarias y eléctricas, y obras preliminares. Por lo tanto, el costo directo del edificio convencional, con un área construida de 4740.56 m², es de alrededor de S/ 5 973 100. Si se supone que los costos, excepto el de estructuras, se mantengan al aislar el edificio, el costo total de construcción del edificio aislado sería de S/ 7 129 360, lo que representa un aumento del 19.4% en comparación con el edificio convencional. A pesar de que es técnicamente factible aislar sísmicamente un EMDL de vivienda social y a que mejoraría de manera importante su desempeño sísmico, no sería económicamente atractivo para las empresas inmobiliarias debido al incremento de los costos.

6. CONCLUSIONES

En esta investigación, se cuantificó el sobrecosto de aislar sísmicamente un edificio de vivienda social de muros de ductilidad limitada representativo de los que se ubican en la zona de mayor peligro sísmico del Perú. Las principales conclusiones son las siguientes:

El aislamiento sísmico tenía la capacidad de reducir significativamente las solicitaciones sísmicas del EMDL. A pesar de que la magnitud del espectro de diseño de la superestructura del edificio aislado era cuatro veces mayor que la del edificio convencional, el aislamiento sísmico redujo significativamente las solicitaciones sísmicas del EMDL. Lo cual se tradujo en que los muros del edificio aislado se diseñaran con fuerzas sísmicas menores.

Con el objetivo de obtener mayores beneficios económicos en la implementación de aislamiento sísmico en edificios, resulta imprescindible reducir sus requisitos de detallamiento sísmico establecidos en las normas peruanas. A pesar de que los muros del edificio aislado conservan su comportamiento prácticamente elástico ($R_a = 1.5$) frente al sismo máximo considerado, en las normativas actuales en Perú se exige un detallamiento sísmico de los mismos. La inclusión del análisis para determinar la necesidad de confinar los bordes extremos evitó la disminución del espesor de algunos muros del edificio aislado.

En el análisis económico se concluye que el ahorro en la construcción de la superestructura de un edificio aislado no compensa el incremento en el costo del sistema de aislamiento. Esto se debe a la necesidad de vigas que soporten los muros y se conecten a los dispositivos de aislamiento en un EMDL.

Aunque es técnicamente factible aislar sísmicamente un EMDL, el costo de implementación hace que el sistema propuesto no sea una inversión satisfactoria en protección sísmica. El aumento en el costo de la estructura del edificio aislado en comparación con el convencional es del 109%, lo que resulta en un costo de

construcción general un 19.4% más alto. Para reducir los costos del sistema de aislamiento sísmico, se recomienda usar dispositivos de aislamiento más económicos o que no necesiten vigas y capiteles para conectarse a los muros. Esto hará que el aislamiento sísmico sea una opción económicamente atractiva para la protección de los EMDL.

En futuras investigaciones que pretendan determinar la viabilidad económica del aislamiento sísmico del EMDL seleccionado, sería necesario calcular los costos de reparación tanto para el edificio convencional como para el aislado en caso de un sismo severo. Para ello, se requiere el uso de modelos computacionales capaces de capturar los efectos locales en los muros, como la pérdida de recubrimiento y el pandeo lateral. No obstante, es importante tener en cuenta que estos modelos son complejos y requieren ser verificados a través de ensayos experimentales, lo que implica un alto costo de procesamiento computacional.

REFERENCIAS

- Al Atik, L., & Abrahamson, N. (2010). "An improved method for nonstationary spectral matching". *Earthquake Spectra*, 601-6017. Disponible en: <https://doi.org/10.1193/1.3459159>
- Boore, D., & Bommer, J. (2005). "Processing of strong-motion accelerograms: needs, options and consequences". *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, **25**, 93-115. Disponible en: <https://doi.org/10.1016/j.soildyn.2004.10.007>
- Building Seismic Safety Council BSSC. (2012). *NEHRP Recommended Seismic Provisions: Design Examples*. Washington, DC. Federal Emergency Management Agency FEMA. Seismically Isolated Structures, 4-63. Disponible en: <https://bit.ly/30gGPYd>
- Calderon, V. (2021). "Factibilidad de proteger con aislamiento sísmico un edificio de vivienda social de muros de ductilidad limitada". Tesis de pregrado, Pontificia Universidad Católica del Perú. Disponible en: <https://tesis.pucp.edu.pe/repositorio/handle/20.500.12404/20108>.
- Computers and Structures Inc. (2016). *CSI Analysis Reference Manual for SAP2000, ETABS, SAFE and CSIBridge*. Berkeley, California.
- De la Llera, J. C., Lüders, C., Leigh, P., & Sady, H. (2004). "Analysis, testing, and implementation of seismic isolation of buildings in Chile". *Earthquake Engineering and Structural Dynamics*, **33(5)**, 543-574. Disponible en: <https://doi.org/10.1002/eqe.360>
- Fondo MIVIVIENDA Sociedad Anónima. (2020). *Nuevo Crédito Mivivienda*. Disponible en: <http://bit.ly/3sRHPye>
- Instituto Nacional de Normalización INN. (2013). *Norma Chilena NCh 2745 Análisis y Diseño de Edificios con Aislación Sísmica*. Santiago de Chile, Chile.
- Jampole, E., Deierlein, G., Miranda, E., Fell, B., Swensen, S., & Acevedo, C. (2016). "Full-scale dynamic testing of a sliding seismically isolated unibody house". *Earthquake Spectra*, **32(4)**, 2245-2270. Disponible en: <https://doi.org/10.1193/010616EQS003M>
- Jünemann, R. (2016). "Response of reinforced concrete shear wall buildings during the 2010, Chile earthquake". Tesis doctoral, Pontificia Universidad Católica de Chile. Disponible en: <https://bit.ly/38bNqI0>
- Khalfan, M., Tait, M., & El-Dakhkhni, W. (2015). "Seismic Risk Assessment of Nonengineered Residential Buildings: State of the Practice". *Natural Hazards Review*, *ASCE*, **16(3)**. Disponible en: [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)NH.1527-6996.0000164](https://doi.org/10.1061/(ASCE)NH.1527-6996.0000164)

- Konstantinidis, D., & Kelly, J. (2014). "Advances in low-cost seismic isolation with rubber". *10th U.S. National Conference on Earthquake Engineering: Frontiers of Earthquake Engineering*. Alaska, EEUU.
- Reyes, C. (2017). "Estudio analítico de vulnerabilidad sísmica de edificios de muros de ductilidad limitada (EMDL) en la costa central del Perú". Tesis de maestría, Pontificia Universidad Católica del Perú. Disponible en: <http://hdl.handle.net/20.500.12404/8738>
- Servicio Nacional de Capacitación para la Industria de la Construcción SENCICO. (2009). *Norma Técnica Peruana E.060 Concreto Armado*. Lima, Perú.
- Servicio Nacional de Capacitación para la Industria de la Construcción SENCICO. (2018). *Norma Técnica Peruana E.030 Diseño Sismorresistente*. Lima, Perú.
- Servicio Nacional de Capacitación para la Industria de la Construcción SENCICO. (2019). *Norma Técnica Peruana E.031 Aislamiento Sísmico*. Lima, Perú.
- VIVA Grupo AENZA. (2015). *Memoria Descriptiva del Proyecto de Arquitectura del Proyecto Ciudad La Alameda de Ancón*. Disponible en: bit.ly/3gQCrv8