



Ingeniería. Revista de la Universidad de Costa Rica

ISSN: 1409-2441

ISSN: 2215-2652

revista.inii@ucr.ac.cr

Universidad de Costa Rica

Costa Rica

Garrido, César A; Fernández-Dávila, Víctor I.
COMPORTAMIENTO SÍSMICO DE EDIFICIOS IRREGULARES EN PLANTA
CONSIDERANDO SISTEMAS DE AISLACIÓN CON EXCENRICIDAD DE RIGIDEZ
Ingeniería. Revista de la Universidad de Costa Rica, vol. 34, núm. 2, 2024, Julio-Diciembre
Universidad de Costa Rica
Ciudad Universitaria Rodrigo Facio, Costa Rica

DOI: <https://doi.org/10.15517/ri.v34i2.55859>

Disponible en: <https://www.redalyc.org/articulo.oa?id=44177439002>

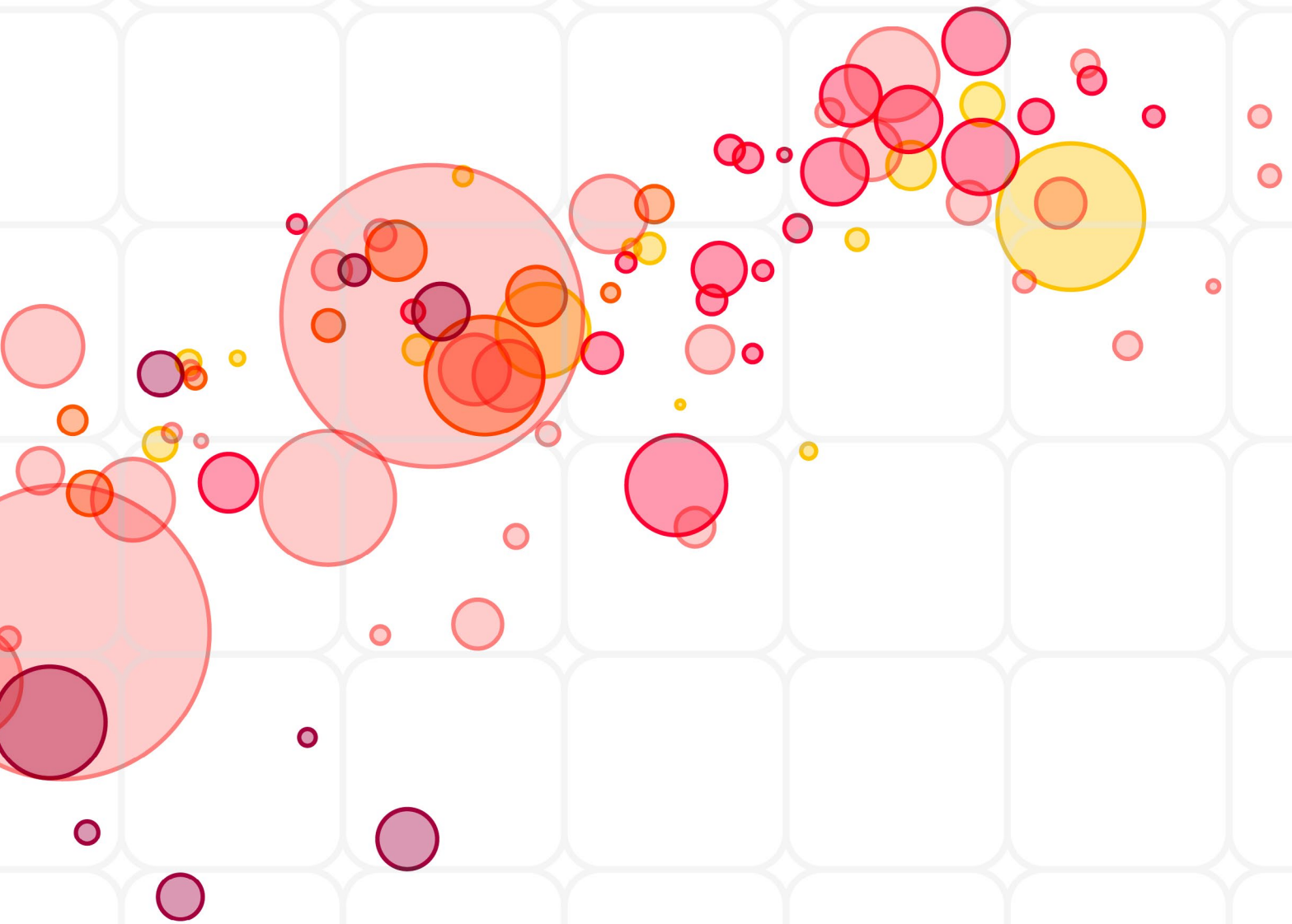
- Cómo citar el artículo
- Número completo
- Más información del artículo
- Página de la revista en redalyc.org

redalyc.org

Sistema de Información Científica Redalyc
Red de revistas científicas de Acceso Abierto diamante
Infraestructura abierta no comercial propiedad de la academia

Ingeniería

Revista de la Universidad de Costa Rica
JULIO/DICIEMBRE 2024 - VOLUMEN 34 (2)





Comportamiento sísmico de edificios irregulares en planta considerando sistemas de aislación con excentricidad de rigidez

Seismic behavior of irregular buildings in plan considering isolation systems with stiffness eccentricity

César A. Garrido ¹ , Víctor I. Fernández-Dávila ²

¹ Ingeniero Investigador, Facultad de Ingeniería Civil, Pontificia Universidad Católica del Perú, Lima, Perú.
correo: cgarridoc@pucp.edu.pe

² Profesor Asociado, Facultad de Ingeniería Civil, Pontificia Universidad Católica del Perú, Lima, Perú.
correo: vfernandezdávila@pucp.edu.pe

Palabras Clave:

Aislador elastomérico, análisis paramétrico, edificio aislado de concreto, excentricidad de masa, excentricidad de rigidez, irregularidad en planta.

Recibido: 16/07/2023

Aceptado: 31/01/2024

Resumen

El objetivo de la presente investigación es evaluar el efecto de los parámetros dinámicos del sistema de aislación (el grado de acoplamiento torsional $[\Omega_b]$, el periodo de vibración $[T_b]$, la razón de amortiguamiento crítico $[\xi_b]$ y la excentricidad de rigidez de la base de aislación $[e_{rb}]$) en el comportamiento torsional de una familia de edificios con seis pisos y aislados en la base de concreto armado, considerando las excentricidades de rigidez o masa (e_r o e_m , respectivamente) en la superestructura. Estas modifican su comportamiento estructural ante sismos severos e incrementan los desplazamientos laterales y las derivas de manera significativa. Para ello, se realizó un análisis no lineal tiempo-historia a cada modelo estructural, por lo que estos se sometieron a un conjunto de siete registros de aceleraciones sísmicas, medidos en la costa de Perú y Chile, los cuales fueron escalados según el espectro de diseño de pseudoaceleraciones vigente en Perú.

Como respuestas globales de interés, se consideran los desplazamientos laterales máximos y las derivas de entrepiso. Así pues, se observó que el efecto de e_m generó mayores amplificaciones en los desplazamientos laterales y derivas que e_r . Similarmente, el parámetro e_{rb} fue muy influyente en el comportamiento torsional de los edificios aislados con e_m y e_r , pues amplificó los desplazamientos laterales hasta en un 50 %. Además, el parámetro T_b impactó notablemente las derivas de entrepiso, ya que las redujo hasta en un 55 %. Por otro lado, los parámetros Ω_b y ξ_b fueron poco influyentes en dichas respuestas.

Keywords:

Elastomeric, irregularity plan, isolated building, mass eccentricity, parametric study, stiffness eccentricity.

Abstract

This research aims to evaluate the effect of the dynamic parameters of the isolation system (the degree of torsional coupling $[\Omega_b]$, the period of vibration $[T_b]$, the critical damping ratio $[\xi_b]$, and the stiffness eccentricity of the isolation base $[e_{rb}]$) on the torsional behavior of a six-story reinforced concrete building family, considering the stiffness or mass eccentricities (e_r or e_m , respectively) in the superstructure. These modify structural behavior under severe earthquakes and increase lateral displacements and drifts. For this purpose, a nonlinear time-history analysis was performed on each model by subjecting them to a set of seven seismic accelerations records, measured on the coast of Peru and Chile, which were scaled following the pseudo-acceleration design spectrum from Peru.

The main global responses were the maximum lateral displacements and the inter-story drifts. It was observed that the effect of e_m generated more amplification on lateral displacements and drifts than e_r . In a similar way, the parameter e_{rb} was very influential on the torsional behavior of the isolated buildings with e_m and e_r , amplifying lateral displacements up to 50 %. In addition, the parameter T_b impacted mostly on the inter-story drifts, reducing it up to 55 %. On the other hand, the parameters Ω_b and ξ_b did not significantly influence the responses of interest.

DOI: 10.15517/ri.v34i2.55859



1. INTRODUCCIÓN

La presencia de configuraciones estructurales irregulares en planta en las edificaciones incrementa las rotaciones y los desplazamientos laterales máximos de la estructura [1]. El comportamiento sísmico de esta clase especial de edificaciones fue estudiado principalmente a partir de algunos parámetros característicos de la estructura, como el periodo de vibración lateral, la razón de frecuencias traslacionales, el grado de acoplamiento torsional, la excentricidad de rigidez normalizada y el número de líneas de resistencia [2]. Esto con el propósito de identificar aquellos parámetros más influyentes en las respuestas de interés.

Por otro parte, los sistemas de aislación sísmica han demostrado ser una excelente alternativa para mejorar el desempeño sísmico de las estructuras (regulares e irregulares). Además, las investigaciones orientadas a comprender el comportamiento torsional de edificios aislados [3]-[7] señalan que los desplazamientos laterales varían según cuál sea la fuente de la excentricidad (masa o rigidez), el conjunto de registros de aceleraciones sísmicas del movimiento del suelo empleados o el tipo de aislador considerado [4]-[8].

La excentricidad estructural de un edificio se define como la distancia entre el centro de rigidez (CR) y el centro de masa (CM). Esta se clasifica en dos tipos: a) excentricidad de masa (e_m) para una planta con configuración simétrica de geometría y de rigidez lateral, pero asimétrica de masas; b) excentricidad de rigidez (e_r) para una planta con configuración simétrica de geometría y de masa, pero asimétrica de rigidez lateral. La Fig. 1 muestra e_m y e_r en la superestructura, donde CR y CM presentan los subíndices “b” y “s” para referirse a la base de aislamiento y a la superestructura; además, los superíndices “sim.” y “asim.” hacen referencia a una configuración en planta simétrica o asimétrica. Cabe señalar que la Fig. 1 no muestra excentricidad en la base de aislamiento, pues CM_b y CR_b son coincidentes.

Los primeros estudios sobre el comportamiento torsional de edificios asimétricos de un piso apoyados sobre aisladores en la base señalaron que el efecto de e_m de la superestructura se eliminaba si CM_s coincidía con CR_b [7], [8]. Nagarajaiah *et al.* [9] ampliaron la investigación, considerando edificios asimétricos de varios niveles aislados en la base, con e_m o e_r del orden de 25 % de la dimensión en planta, e incluyendo una serie de parámetros, tales como las rigideces lateral y torsional de la superestructura, el número de aisladores y la influencia de los modos de vibración altos. Además, observaron que los resultados de estudios previos [10], [11] eran válidos solo para estructuras torsionalmente rígidas, pues su comportamiento dinámico se asemeja a los edificios aislados de un solo nivel.

Tena-Colunga *et al.* [4], [12], [13] incluyeron en los modelos paramétricos de estructuras aisladas el periodo de vibración, la fuerza de fluencia de aisladores, el tipo de excentricidad (e_m y e_r) y el efecto uni- y bidireccional del sismo. Los investigadores concluyeron que: a) el efecto de e_r en la base de aislación genera mayores amplificaciones de los desplazamientos laterales en dicha base en comparación con los otros tipos de excentricidades en la superestructura (e_r o e_m) y b) el efecto de e_m es más desfavorable

en la superestructura, pues amplifica los desplazamientos laterales por nivel [4], [12], [13].

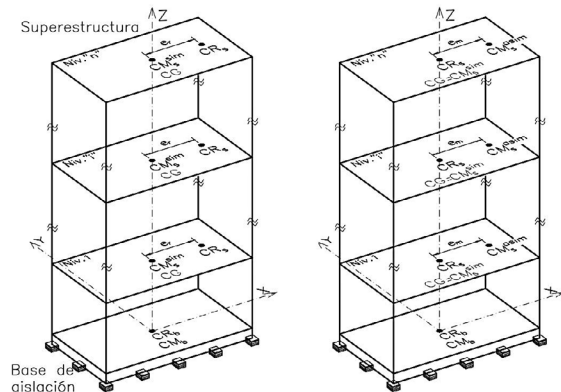


Fig. 1. Tipos de excentricidad en la superestructura de edificios con base aislada: a) Excentricidad de rigidez y b) Excentricidad de masa.

En la misma línea, Garrido y Fernández-Dávila [14] notaron que el aumento de derivas de entrepiso y desplazamientos laterales en edificios aislados por efecto de e_m o e_r en la superestructura fueron minimizados principalmente por: a) una relación de periodos de vibración del edificio en base fija T_y y base aislada T_b mayor a 4 ($T_y/T_b > 4$) y b) un incremento de la rigidez torsional de la superestructura.

El efecto de e_m en la superestructura de edificios asimétricos de varios niveles aislados en la base fue investigado en mayor detalle por Bhatt [7], concluyendo que las amplificaciones del desplazamiento lateral son significativas cuando e_m supera el 10 % de la dimensión de la planta. De igual forma, otras investigaciones se concentraron en conocer la ubicación óptima del CR_b para controlar el efecto de la torsión por excentricidades de masa en la superestructura [15], [16].

Por otro lado, se verificó que los dispositivos de fricción (FPS y TFP) controlan adecuadamente el efecto de e_m en la superestructura [5], [6], [17]-[19]. Este comportamiento se debe a que su fuerza lateral resistente depende de la fricción que se genere entre el dispositivo y la superestructura, lo cual está principalmente influenciado por la fuerza axial que soportan las columnas de la estructura. Esto implica que, si CM_s se desfase del centro de gravedad (CG), entonces, CR_b se alineará automáticamente a esa nueva posición [20].

El efecto de e_r en los edificios asimétricos con aisladores de fricción fue estudiado en un principio por Nagarajaiah *et al.* [5], quienes abordaron paraméricamente el efecto de los aisladores FPS, considerando la cantidad, junto con las rigideces lateral y torsional de la superestructura. Así, encontraron que el efecto de e_r en la superestructura ocasiona el aumento de las rotaciones en la base y que la rigidez torsional de la base es más influyente que el de la superestructura. Wang *et al.* [21], de manera similar, concluyeron que la e_r y la rigidez torsional de la superestructura no afectaba el desplazamiento lateral de la base con aisladores tipo FPS, pero sí el de la superestructura. En esta misma línea investigativa, se comparó

el efecto de e_r en la base de aislamiento con dispositivos LRB y FPS [22], con lo cual se concluyó que los de tipo FPS presentan mayores desplazamientos laterales y que los de tipo LRB, en cambio, presentan mayores amplificaciones torsionales.

Recientemente, Olivares *et al.* [3] examinaron el comportamiento torsional de edificios asimétricos aislados con dispositivos tipo TFP, empleando el modelo de Dao [23], que elimina las fuerzas de tracción en el aislador y las dos componentes horizontales de 21 registros de aceleraciones del movimiento del suelo. Con ello, obtuvieron mayores amplificaciones de los desplazamientos laterales en los edificios aislados con e_r que con e_m . Asimismo, encontraron que el parámetro de acoplamiento torsional de la superestructura tiene alta influencia en la amplificación global para ambos casos de excentricidad.

Como puede apreciarse, el comportamiento torsional de estructuras aisladas en la base es un tema relevante, pero aún existe escasa información sobre el comportamiento de edificios aislados en la base, con asimetría de rigidez en la superestructura y solicitados por sismos subductivos registrados en la costa de Perú y Chile. Esta es la principal fuente de motivación en la elaboración del presente estudio. Finalmente, los pocos estudios realizados en edificios con asimetría de rigidez en planta (e_r) y aislados en la base tuvieron objetivos particulares, al evaluar principalmente la influencia de parámetros propios de la superestructura y el empleo de un limitado número de registros de aceleraciones sísmicas medidos en su localidad [4], [9].

Así pues, este artículo describe la evaluación del comportamiento sísmico de modelos paramétricos de edificios de concreto armado de seis pisos con excentricidades de rigidez y masa en planta, considerando solo el comportamiento no lineal del sistema de aislamiento, compuesto por dispositivos del tipo LRB. Solo se tomaron en cuenta el efecto de las dos componentes horizontales del movimiento del suelo y la forma rectangular de la planta, con razón de aspecto 2 : 1.

2. METODOLOGÍA

A continuación, se describen: 1) el modelo del aislador; 2) las características geométricas y físicas de los edificios aislados en estudio; 3) la generación de casos paramétricos; y 4) las solicitaciones sísmicas consideradas.

2.1. Modelo de aislador

Se consideró un modelo histerético biaxial para el dispositivo LRB, cuyas fuerzas restitutivas en cada dirección X e Y son F_{rx} y F_{ry} , definidas mediante dos componentes: una no histerética proporcional al desplazamiento lateral y la otra histerética relacionada a la variable Z. Estas son expresadas mediante las ecuaciones (1) y (2) [24], [25], donde α es la relación de rigideces pre- y postfluencia, igual a 0.1; F_y y d_y son la fuerza y el desplazamiento lateral de fluencia,

respectivamente; U_x y U_y son los desplazamientos laterales en las direcciones X e Y.

$$F_{rx} = \alpha \cdot \frac{F_y}{d_y} \cdot U_x + (1 - \alpha) \cdot F_y \cdot Z_x \quad (1)$$

$$F_{ry} = \alpha \cdot \frac{F_y}{d_y} \cdot U_y + (1 - \alpha) \cdot F_y \cdot Z_y \quad (2)$$

Las variables auxiliares Z_x y Z_y representan el comportamiento histerético en ambas direcciones de análisis y están acopladas [26].

2.2. Descripción de la estructura

La Fig. 2a muestra la planta típica rectangular del edificio de concreto armado de seis niveles y la Fig. 2b su elevación longitudinal. La estructura consideró las recomendaciones de razón de esbeltez y tipo de sistema estructural dadas para los edificios típicos aislados en la base [27]. La planta rectangular tiene una razón de aspecto igual a 2 : 1 de dimensiones 30 m $\times$ 15 m; la altura de cada entrepiso es 3 m, con lo cual la altura total del edificio es 18 m y razón de esbeltez 1.2 : 1. El sistema estructural del edificio lo componen pórticos en ambas direcciones X e Y, con vanos iguales a 7.5 m [28].

Se definieron las siguientes propiedades mecánicas de los materiales: a) acero estructural, con esfuerzo de fluencia $f'_y = 420$ MPa y módulo de elasticidad $E_s = 200$ GPa, y b) concreto armado, con resistencia a compresión $f'_c = 21$ MPa, módulo de elasticidad $E_c = 21.5$ GPa, y coeficiente de Poisson $\nu = 0.2$.

Las lasas fueron modeladas con elementos tipo membrana; las vigas y columnas, con elementos tipo barra; los aisladores sísmicos, con elementos tipo *link*. Se consideró que los apoyos inferiores de los aisladores sísmicos sean empotrados y que la losa maciza se comporte como un diafragma rígido en su propio plano por cada piso; así, se definieron tres grados de libertad en su respectivo CM: dos desplazamientos traslacionales ortogonales entre sí y un desplazamiento rotacional respecto a un eje vertical. El peso sísmico de cada nivel fue en promedio 10 kN/m², de acuerdo con la norma E.020 para el uso de oficinas [29].

La e_r de la superestructura fue generada en la dirección X, a partir de variaciones en las dimensiones de columnas y vigas (Fig. 2a), mientras que la e_m fue generada por el desplazamiento del CM_s en la dirección X. Cabe señalar que los pórticos centrales estuvieron desconectados de los dos pórticos extremos en la dirección X, con el fin de lograr un mayor control sobre la excentricidad y la rigidez torsional (Fig. 2b).

El sistema de aislamiento lo conformaron dispositivos de tipo LRB, ubicados en la base de las columnas del primer piso; además, la excentricidad de rigidez propia del sistema en la dirección X fue generada por la variación de la rigidez lateral de los aisladores ubicados en los ejes extremos. Se asumió que los elementos de la superestructura se comportan elásticamente y que solo los aisladores poseen capacidad de incursionar al rango de comportamiento inelástico [30], [11], [6]; pues se ha demostrado

que los sistemas de aislación generan una gran reducción en las fuerzas de diseño en la superestructura y logran minimizar sus daños [29], [31], [32].

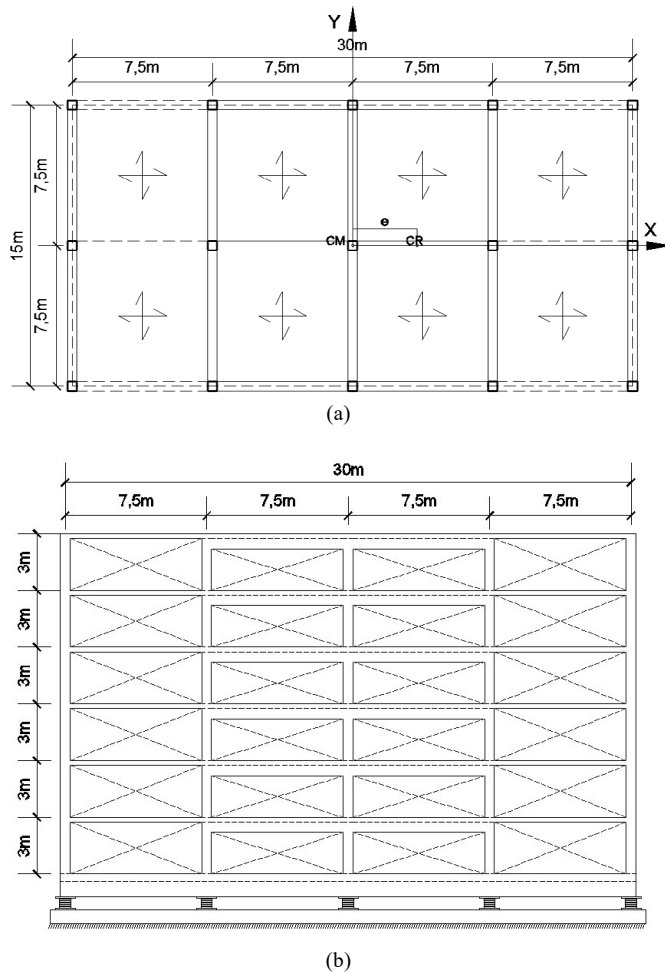


Fig. 2. Configuración de modelos estructurales: a) Planta estructural típica y b) Elevación típica.

2.3. Casos de estudios paramétricos

La superestructura se definió mediante cuatro parámetros: 1) el periodo fundamental de vibración en Y (T_y); 2) la relación de periodos de vibración traslacionales (T_y/T_x); 3) el grado de acoplamiento torsional (Ω), definido como la relación entre las frecuencias circular de vibración torsional y traslacional en Y; y 4) la excentricidad de masa o rigidez normalizada respecto al radio de giro (e_m/r o e_r/r). Por otra parte, el sistema de aislación fue definido mediante cuatro aspectos: 1) el periodo de vibración objetivo (T_b); 2) el coeficiente de amortiguamiento objetivo (ξ_b); 3) el grado de acoplamiento torsional del sistema (Ω_b); y 4) su excentricidad de rigidez normalizada respecto al radio de giro (e_{rb}/r).

El CUADRO I muestra los valores asignados a cada uno de los parámetros elegidos, donde los parámetros de la superestructura se mantuvieron constantes, a excepción de las

excentricidades. Los modelos paramétricos fueron generados a partir de la combinatoria de estos parámetros, con un total de 16 casos por tipo de excentricidad en la superestructura.

El CUADRO II muestra las propiedades globales elegidas para los aisladores LRB (el periodo efectivo [T_{eff}], el amortiguamiento efectivo [ξ_{eff}], la fuerza característica [Q], la rigidez pre- y postfluencia [K_e y K_d], junto con el desplazamiento objetivo [D_{obj}]), que definen su gráfica fuerza-deformación. El desplazamiento objetivo (D_{obj}) de cada caso fue obtenido según el espectro de desplazamientos dado por la norma E.031 [33], [34].

CUADRO I
VALORES ASIGNADOS A LOS PARÁMETROS
ELÁSTICOS

ID	Superestructura				Sistema de Aislación			
	T_y (s)	T_y / T_x	Ω	e_r/r o e_m/r	T_b (s)	ξ_b (%)	Ω_b	e_{rb}/r
1	0.70	0.75	1.0	0.0	3.0	10	1.20	0
2	-	-	-	0.4	4.0	25	1.05	0.8
3	-	-	-	0.8	-	-	-	-
Total	1	1	1	3	2	2	2	2

(-): No hay dato

CUADRO II
PROPIEDADES DE LOS AISLADORES LRB

T_{eff} (s)	ξ_{eff} (%)	D_{obj} (m)	Q (kN)	K_d (kN/m)	K_e (kN/m)
3.0	10	0.336	47.63	779.04	7790.74
3.0	25	0.205	69.62	581.24	5812.73
4.0	10	0.336	26.79	438.16	4382.22
4.0	25	0.205	39.13	326.96	3269.65

2.4. Registros de aceleraciones sísmicas

Se seleccionaron siete pares de registros de aceleraciones sísmicas (componentes horizontales principal y secundaria) con las siguientes características: medidos durante eventos importantes ($M_w > 7.5$), ocurridos en Perú y Chile (mecanismo de subducción) y pertenecientes a tipos de suelos S1 y S2 [35]. Este criterio de selección permite obtener espectros de pseudoaceleraciones con formas similares; por ejemplo se ha observado que, para sismos leves ($M_w < 5$), se tienen picos de valores en periodos de 0.15 s y, para sismos fuertes ($M_w > 8$), los picos se presentan en periodos de 0.5 s [36]. El CUADRO III muestra las especificaciones de los eventos sísmicos elegidos: magnitud, aceleración máxima del suelo (PGA) por componente, tipo de suelo, profundidad focal y distancia hipocentral.

Se empleó el escalamiento de amplitudes (Weighted scaling) en los registros de aceleraciones escogidos, con la finalidad de

no alterar el contenido de frecuencias. El método consiste en la aplicación de factores de escala (FS) a cada par de registros sísmicos, tal que el promedio de las ordenadas espectrales resultantes ($\bar{S}_a$) definido según las ecuaciones (3) y (4), se ajuste al espectro de pseudoaceleraciones de diseño (espectro de diseño objetivo). Para ello, se minimizó el error cuadrático medio entre el espectro $\bar{S}_a$ y el espectro de diseño objetivo [37], en un determinado dominio de periodos de vibración.

$$S_{ai} = FS_i \cdot \sqrt{S_{ai_x}^2 + S_{ai_y}^2} \quad (3)$$

$$\bar{S}_a = \frac{\sum_{i=0}^n S_{ai}}{n} \quad (4)$$

Siendo S_{ai_p} y S_{ai_s} las ordenadas espectrales de aceleración de las componentes horizontales principal y secundaria del registro

“i”, S_{ai} es la ordenada espectral escalada obtenida mediante la combinación SRSS (Square root of the sum of the squares) [37] del registro “i”, $\bar{S}_a$ es el promedio de las ordenadas espectrales resultantes, n es el número total de registros sísmicos considerados, igual a siete; además, FS_i es el factor de escala correspondiente a cada registro.

La Fig. 3 muestra el espectro de diseño objetivo según la norma peruana E.031 [33] y el espectro de pseudoaceleraciones promedio $\bar{S}_a$ considerando una zona sísmica Z4 y un tipo de suelo S1.

Se realizó el análisis sísmico no lineal tiempo-historia considerando la bidireccionalidad de los siete pares de registros sísmicos para cada modelo, mediante el software ETABS [38]. Se utilizó el método FNA (*Fast Nonlinear Analysis*) [39], ya que reduce el tiempo de cálculo al solo considerar la no linealidad en elementos particulares (aisladores).

CUADRO III
CARACTERÍSTICAS DE REGISTROS SÍSMICOS SELECCIONADOS [29]

EVENTO SÍSMICO	AÑO	ESTACIÓN	Mw	PGA		Tipo de Suelo	Profundidad Focal (km)	Distancia Hipocentral (km)	Factor de Escala
				$\ddot{u}_{gp}$ (g)	$\ddot{u}_{gs}$ (g)				
LIMA 1966	1966	P. de la Reserva	8.1	0.27	0.18	S1	24	235.0	3.45
LIMA 1974	1974	P. de la Reserva	7.5	0.20	0.18	S1	13	113.0	4.30
MOQUEGUA	2001	C. Vizcarra	8.3	0.30	0.24	S2	33	338.0	2.30
TOCOPILLA	2007	Mejillones	7.9	0.42	0.41	S1	40	116.0	1.45
MAULE	2010	Hualañé	8.8	0.45	0.38	S1	30	195.0	2.25
IQUIQUE	2014	HMBCX	8.2	0.24	0.22	S1	39	133.0	2.10
VALPARAISO	1985	Pichilemu	8.0	0.26	0.18	S1	33	141.4	3.32

$\ddot{u}_{gp}$, $\ddot{u}_{gs}$: Aceleración máxima del suelo en la dirección horizontal principal (P) y secundaria (S)

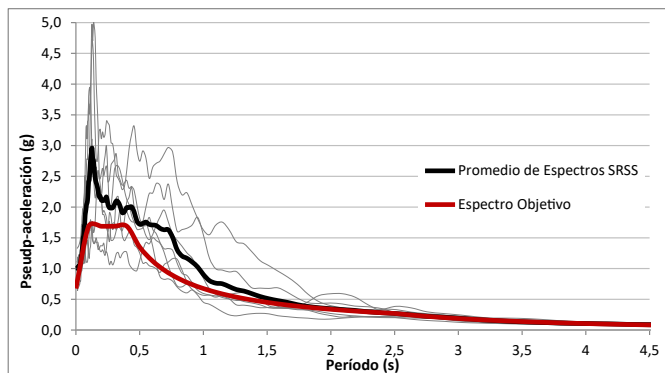


Fig. 3. Escalamiento en amplitud de los siete pares de registros sísmicos respecto al espectro de diseño de la norma peruana E.031

3. DISCUSIÓN DE RESULTADOS

Las respuestas de interés fueron: 1) la amplificación de los desplazamientos laterales; 2) la relación de irregularidad torsional por planta; y 3) la deriva de entrepiso.

Todos los resultados se calcularon a partir del promedio de las respuestas obtenidas para cada uno de los siete pares de registros de aceleración considerados.

Los resultados discutidos a continuación pretenden ayudar a los diseñadores estructurales en la elección de parámetros que reduzcan los efectos torsionales por e_m y e_r en la superestructura para edificios aislados, siendo válidos para los edificios aislados, cuyos parámetros elásticos y físicos estén en el rango de los valores asignados en el CUADRO I.

3.1. Factor de amplificación de desplazamientos laterales

El factor de amplificación lateral se define como el cociente de los desplazamientos laterales máximos del lado flexible del edificio asimétrico aislado y del correspondiente edificio simétrico aislado, donde $fad_{y_{ba}}$ y $fad_{y_{azt}}$ son los factores de amplificación en la base de aislamiento y la azotea. La Fig. 4 muestra el factor de amplificación de desplazamiento lateral en la dirección Y (fad_y) para los edificios aislados con $e_m/r = 0, 0.4, 0.6$ y 0.8 , fijando los parámetros siguientes $T_y = 0.70$ s, $T_y/T_x = 0.75$, $\Omega = 1$, $e_{rb}/r = 0$, $\Omega_b = 1.20$, $T_b = 4.0$ s y $\xi_b = 10\%$. Se observó un comportamiento semejante entre $fad_{y_{ba}}$ y $fad_{y_{azt}}$ respecto a e_m/r , con una diferencia menor a 3 %, debido a que la rotación de todas las plantas del edificio fue similar. Además, existe una tendencia parabólica del fad_y , con un valor máximo comprendido entre $e_m/r = 0.4$ y 0.8 , debido a que el aumento de las rotaciones en planta por el acoplamiento de los modos (laterales y torsionales) es cada vez menor para $e_m/r > 0.6$. Nótese que este comportamiento es válido para los edificios asimétricos aislados con parámetros de aislación fijos: $e_{rb}/r = 0$, $\Omega_b = 1.20$, $T_b = 4.0$ s y $\xi_b = 10\%$. De manera similar, esta reducción del $fad_{y_{ba}}$ y $fad_{y_{azt}}$ para e_m elevadas también se presentó en la investigación de Kilar y Koren [15].

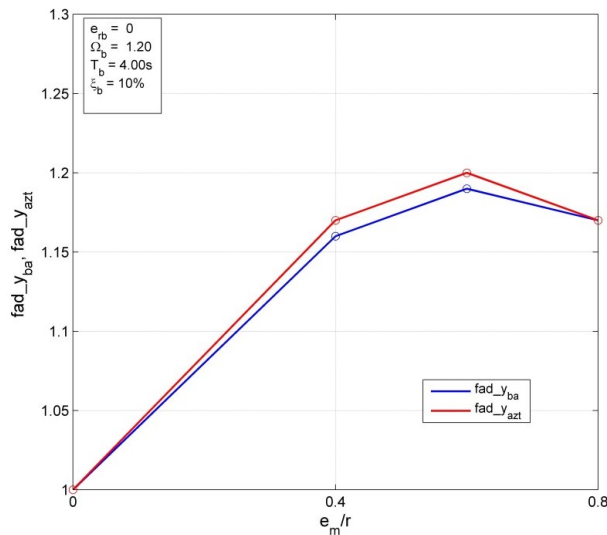


Fig. 4. Efecto de la e_m en el $fad_{y_{azt}}$ y $fad_{y_{ba}}$ para edificios aislados con parámetros $e_{rb}/r = 0$, $\Omega_b = 1.20$, $T_b = 4.0$ s y $\xi_b = 10\%$.

3.1.1. Factor de amplificación de desplazamiento lateral en edificios con e_m/r

La Fig. 5 y la Fig. 6 muestran los efectos de los parámetros T_b , ξ_b , Ω_b y e_{rb} en los $fad_{y_{azt}}$ y $fad_{y_{ba}}$, para los edificios aislados con e_m , los cuales serán detallados a continuación. Se consideró una tendencia parabólica del fad_y para los casos con e_m , de acuerdo con el comportamiento visto en la Fig. 4. En general, la presencia de e_m produjo valores cercanos entre $fad_{y_{azt}}$ y $fad_{y_{ba}}$, con un valor máximo de 1.52.

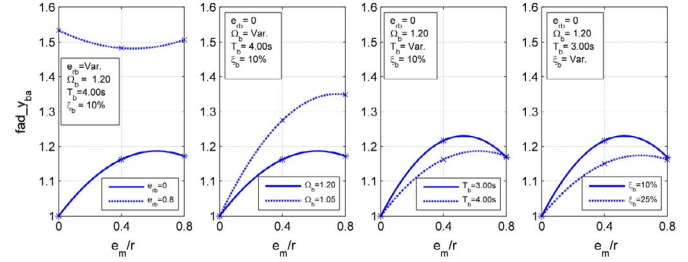


Fig. 5. Efecto de los parámetros e_{rb} , Ω_b , T_b y ξ_b en $fad_{y_{ba}}$ vs. e_m/r .

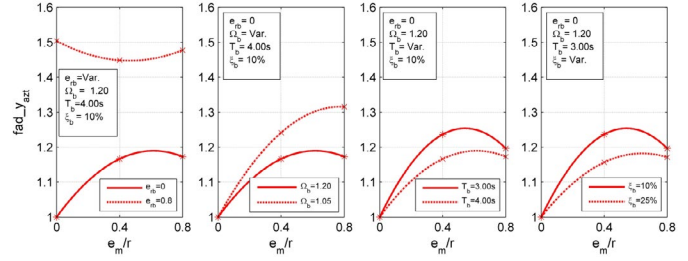


Fig. 6. Efecto de los parámetros e_{rb} , Ω_b , T_b y ξ_b en $fad_{y_{azt}}$ vs. e_m/r .

Efecto de los parámetros en los $fad_{y_{azt}}$ y $fad_{y_{ba}}$ de la estructura:

En primer lugar, el incremento de e_{rb}/r en los edificios aislados con e_m generó fuertes incrementos del $fad_{y_{azt}}$ y $fad_{y_{ba}}$. Estos resultados son explicados por el aumento del acoplamiento de los modos principales, lo cual llega a incrementar el periodo de vibración fundamental y, por tanto, los desplazamientos laterales. Nótese que la coincidencia de excentricidades e_m/r y e_{rb}/r (CMs = CRb) no logra disminuir efectivamente los $fad_{y_{azt}}$ y $fad_{y_{ba}}$, por lo que se evidencia la importancia de reducir la e_{rb}/r en el diseño de edificios aislados. Según la Fig. 6, el máximo $fad_{y_{azt}}$ en edificios aislados con e_m para $e_{rb}/r = 0.8$ fue igual a 1.52.

En segundo lugar, el decremento de Ω_b resultó influyente en los $fad_{y_{azt}}$ y $fad_{y_{ba}}$ de los edificios aislados con e_m . De acuerdo con la Fig. 6, el máximo $fad_{y_{azt}}$ en edificios aislados con e_m , considerando $\Omega_b = 1.20$ y 1.05 , fue igual a 1.19 y 1.35.

En tercer lugar, el incremento de T_b redujo los $fad_{y_{ba}}$ y $fad_{y_{azt}}$ en los edificios aislados con e_m , con una mayor reducción para $e_m/r = 0.4$. Se observó en la Fig. 6 que el máximo $fad_{y_{azt}}$ en edificios aislados con e_m , para $T_b = 3$ s y 4 s, fue igual a 1.26 y 1.18.

En cuarto lugar, el incremento de ξ_b generó una reducción en los $fad_{y_{ba}}$ y $fad_{y_{azt}}$ de los edificios aislados con e_m . Según la Fig. 6, el máximo $fad_{y_{azt}}$ en los edificios aislados con e_m , para $\xi_b = 10\%$ y 25% , fue igual a 1.24 y 1.18.

3.1.2. Factor de amplificación de desplazamiento lateral en edificios con e_r/r

La Fig. 7 y la Fig. 8 muestran los efectos de los parámetros T_b , ξ_b , Ω_b y e_{rb} en los $fad_{y_{azt}}$ y $fad_{y_{ba}}$ para los edificios aislados con e_r , los cuales serán detallados a continuación. En general,

el efecto de e_r aumentó principalmente el valor de $fad_{y_{azt}}$, a excepción del caso con $e_{rb}/r = 0.8$, con un valor máximo de 1.51.

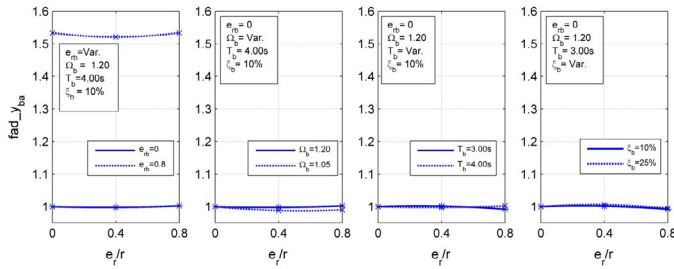


Fig. 7. Efecto de los parámetros e_{rb} , Ω_b , T_b y ζ_b en $fad_{y_{ba}}$ vs. e_r/r .

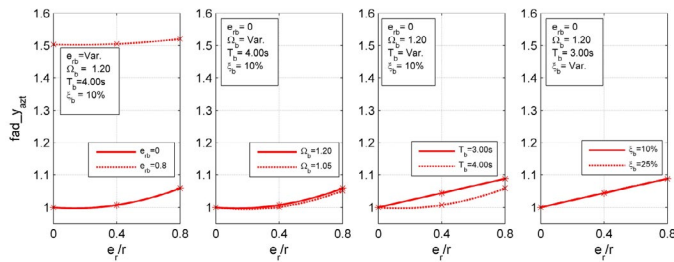


Fig. 8. Efecto de los parámetros e_{rb} , Ω_b , T_b y ζ_b en $fad_{y_{azt}}$ vs. e_r/r .

Efecto de los parámetros en los $fad_{y_{azt}}$ y $fad_{y_{ba}}$ de la estructura:

En primer lugar, el incremento de e_{rb}/r en los edificios aislados con e_r generó fuertes incrementos del $fad_{y_{azt}}$ y $fad_{y_{ba}}$. Similar a los casos con e_m/r variable, estos resultados son producto del acoplamiento de los modos principales. Según la Fig. 8, el máximo $fad_{y_{azt}}$ en edificios aislados con e_r , para $e_{rb}/r = 0.8$, fue igual a 1.51.

En segundo lugar, el decremento de Ω_b resultó poco influyente en los $fad_{y_{azt}}$ y $fad_{y_{ba}}$ de los edificios aislados con e_r . De acuerdo con la Fig. 8, el máximo $fad_{y_{azt}}$ en edificios aislados con e_m , considerando $\Omega_b = 1.20$ y 1.05 , fue igual a 1.06 y 1.05.

En tercer lugar, el incremento de T_b redujo los $fad_{y_{azt}}$ en los edificios aislados con e_r , lo cual coincide parcialmente con los resultados presentados por Tena-Colunga y Gomez-Soberon [12], quienes indicaron que el efecto de e_r es despreciable si el valor de T_b es elevado. Se observó en la Fig. 8 que el máximo $fad_{y_{azt}}$ en edificios aislados con e_m , para $T_b = 3$ s y 4 s, fue igual a 1.09 y 1.06.

En cuarto lugar, el incremento de ζ_b generó poca influencia en los edificios aislados con e_r . Según la Fig. 8, el máximo $fad_{y_{azt}}$ en los edificios aislados con e_r , para $\zeta_b = 10\%$ y 25% , fue igual a 1.09 aproximadamente.

3.2. Relación de irregularidad torsional (TIR)

La razón o relación de irregularidad torsional (TIR), definida como la relación entre la deriva máxima y la deriva promedio de un nivel es una medida de la torsión en planta.

3.2.1. TIR en edificios con e_m/r

La Fig. 9 y la Fig. 10 muestran los efectos de los parámetros T_b , ζ_b , Ω_b y e_{rb} en el TIR_{ba} y TIR_{azt} de los edificios aislados con e_m , los cuales serán detallados a continuación. En estas, TIR_{ba} y TIR_{azt} son las relaciones de irregularidad torsional en la base de aislamiento y la azotea. Exceptuando los casos con $e_{rb}/r = 0.8$, se observó que la presencia de e_m produjo valores similares de TIR_{ba} y TIR_{azt} , con un valor máximo de 1.41. Este comportamiento indica que los edificios aislados con e_m rotan como un bloque rígido desde la base de aislamiento al presentar un acoplamiento del modo rotacional.

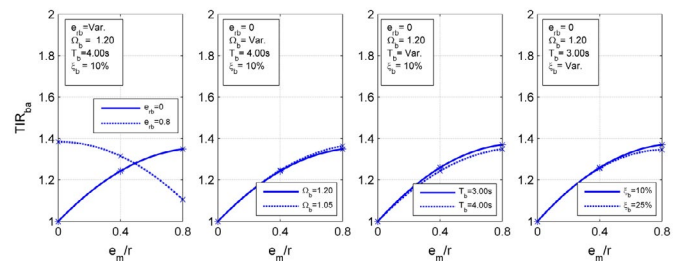


Fig. 9. Efecto de los parámetros e_{rb} , Ω_b , T_b y ζ_b en TIR_{ba} vs. e_m/r .

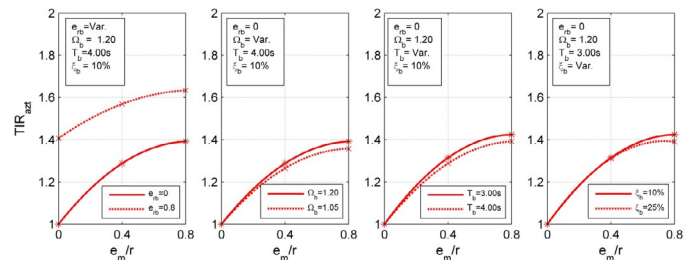


Fig. 10. Efecto de los parámetros e_{rb} , Ω_b , T_b y ζ_b en TIR_{azt} vs. e_m/r .

Efecto de los parámetros en el TIR_{ba} y TIR_{azt} de la estructura:

En primer lugar, el incremento de e_{rb}/r fue muy influyente en los TIR , pues generó aumentos del TIR_{azt} y TIR_{ba} para los edificios aislados cuando $e_m = 0$. Se observó que, a medida que aumentó la e_m y se acercó el CM_s a CR_b, la rotación del edificio se concentró en la superestructura y disminuyó en la base de aislación. Por ejemplo, cuando $e_m/r = 0.8$, el TIR_{azt} fue 1.61 y TIR_{ba} fue 1.1.

En segundo lugar, el decremento de Ω_b generó ligeras reducciones del TIR_{azt} para los edificios aislados con e_m . En la Fig. 10, el máximo TIR_{azt} en edificios aislados con e_m , para $\Omega_b = 1.20$ y 1.05 , fue igual a 1.39 y 1.37 ; es decir, se redujo un 1.9% .

En tercer lugar, el incremento de T_b redujo los TIR_{azt} y TIR_{ba} en los edificios aislados con e_m . En la Fig. 10, el máximo TIR_{azt} en edificios aislados con e_m , para $T_b = 3.0$ s y 4.0 s, fue igual a 1.43 y 1.39 ; es decir, se redujo un 2.7% .

En cuarto lugar, el incremento de ξ_b generó una ligera reducción en el TIR_{ba} de los edificios aislados con e_m . En la Fig. 10, el máximo TIR_{azt} en edificios aislados con e_m , para $\xi_b = 10\%$ y 25% , fue igual a 1.43 y 1.39 ; es decir, se redujo un 2.8% .

3.2.2. TIR en edificios con e_r/r

La Fig. 11 y la Fig. 12 muestran los efectos de los parámetros T_b , ξ_b , Ω_b y e_{rb} en el TIR_{ba} y TIR_{azt} de los edificios aislados con e_r , los cuales serán detallados a continuación. En estas, TIR_{ba} y TIR_{azt} son las relaciones de irregularidad torsional en la base de aislamiento y la azotea. El efecto de e_r generó principalmente incrementos de TIR_{azt} , con un valor máximo de 1.81 , lo cual indica que, en los edificios aislados con e_r , la rotación se concentra en la superestructura.

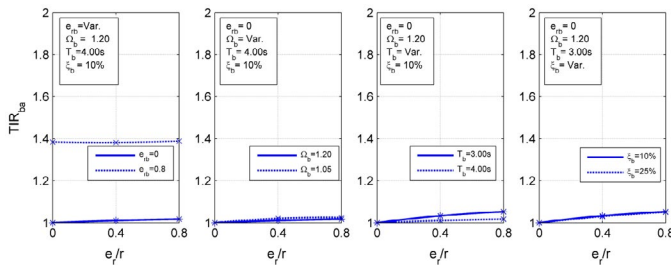


Fig. 11. Efecto de los parámetros e_{rb} , Ω_b , T_b y ξ_b en TIR_{azt} vs. e_r/r .

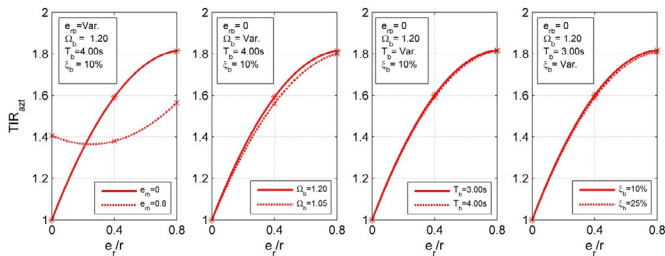


Fig. 12. Efecto de los parámetros e_{rb} , Ω_b , T_b y ξ_b en TIR_{azt} vs. e_r/r .

Efecto de los parámetros en el TIR_{ba} y TIR_{azt} de la estructura:

En primer lugar, el incremento de e_{rb}/r fue muy influyente en los TIR , ya que generó aumentos del TIR_{azt} y TIR_{ba} para los edificios aislados cuando $e_r = 0$. Se observó que, a medida que aumentó la e_r y se acercó el CR_s a CR_b , la rotación en la superestructura aumentó y en la base de aislamiento se mantuvo

constante. Por ejemplo, cuando $e_r/r = e_{rb}/r = 0.8$, el TIR_{azt} fue 1.59 y el TIR_{ba} fue 1.40 . Además, se notó que el máximo valor de TIR_{azt} con $e_{rb}/r = 0.8$ se redujo en comparación con el caso con $e_{rb}/r = 0$; es decir, el aumento de e_{rb}/r permitió distribuir las rotaciones de la superestructura con la base de aislamiento.

En segundo lugar, el decremento de Ω_b generó ligeras reducciones del TIR_{azt} para los edificios aislados con e_r . En la Fig. 12, el máximo TIR_{azt} en edificios aislados con e_r , para $\Omega_b = 1.20$ y 1.05 , fue igual a 1.81 y 1.79 ; es decir, se redujo un 1.1% .

En tercer lugar, el incremento de T_b redujo únicamente el TIR_{ba} en los edificios aislados con e_r . En la Fig. 12, el máximo TIR_{ba} en edificios aislados con e_r , para $T_b = 3.0$ s y 4.0 s, fue igual a 1.04 y 1.02 ; es decir, se redujo un 1.9% .

En cuarto lugar, la variación del parámetro ξ_b no influyó en TIR_{azt} y TIR_{ba} de los edificios aislados con e_r .

3.3. Derivas de entrepiso

La Fig. 13 y la Fig. 14 muestran los efectos de los parámetros T_b , ξ_b , Ω_b y e_{rb} en las derivas de entrepiso de los edificios aislados con e_m y e_r . Se consideró un límite de deriva igual a 0.0033 para que el edificio tenga un comportamiento lineal-elástico y presente daños leves [40], lo cual corresponde a un tipo de edificio C1M (Edificio de pórticos de concreto armado de mediana altura) y un nivel de diseño sísmico moderado según el manual técnico HAZUS-MH 2.1 [40].

Además, la norma E.031 [33] brinda valores límites para las derivas de entrepiso de la superestructura, que son igual a 0.005 si se emplea análisis dinámico no lineal tiempo-historia.

En general, los edificios aislados con e_m presentaron menores derivas de entrepiso que los edificios aislados con e_r . Este comportamiento se debe a que los edificios aislados con e_m presentan periodos de vibración altos asociados a sus modos acoplados. Asimismo, se observó efectividad del aislamiento sísmico, pues las máximas derivas de entrepiso fueron menores al límite de la norma E.031 [33]. Por otro lado, solo los edificios aislados con $T_b = 3$ s y $e_r/r = 0.8$ superaron el límite de derivas de entrepiso del manual técnico HAZUS-MH 2.1 [40], con un valor máximo de 0.0039 . La Fig. 13 y la Fig. 14 describen los efectos de cada parámetro en estas respuestas de interés.

Efecto de los parámetros en las derivas de entrepiso:

En primer lugar, el incremento de e_{rb} generó mayores derivas de entrepiso para los edificios aislados con e_m de hasta en un 50% . En cambio, en el caso de edificios aislados con e_r , el incremento de e_{rb} generó un incremento de las derivas de entrepiso para los casos con $e_r/r = 0$ y una reducción para $e_r/r = 0.4$ y 0.8 . Esto indica la poca influencia de e_r en las derivas de entrepiso cuando existe una e_{rb} ; por ejemplo, para el caso con $e_{rb}/r = 0.8$ y $e_r/r = 0$, la deriva máxima es igual a 0.00138 y para el caso con $e_{rb}/r = 0.8$ y $e_r/r = 0.8$ la deriva máxima es igual a 0.00145 .

En segundo lugar, el incremento de Ω_b no fue influyente en las derivas para los casos aislados con e_r y e_m . En la Fig. 13b,

la deriva máxima en edificios aislados con e_m , para $\Omega_b = 1.20$ y 1.05 , fue igual a 0.0011 . Por otro lado, en la Fig. 14b, la deriva máxima en edificios aislados con e_r , para $\Omega_b = 1.20$ y 1.05 , fue igual a 0.0022 .

En tercer lugar, el incremento de T_b fue muy influyente en las derivas de entrepiso. Se observó que, a mayor T_b , las derivas disminuyeron en los casos aislados con e_m y e_r . En la Fig. 13c, la deriva máxima en edificios aislados con e_m , para $T_b = 3.0$ s y 4.0 s, fue igual a 0.0020 y 0.0011 , respectivamente. Por otro lado,

en la Fig. 14c, la deriva máxima en edificios aislados con e_r , para $T_b = 3.0$ s y 4.0 s, fue igual a 0.0037 y 0.0022 , respectivamente.

En cuarto lugar, el incremento de ξ_b no fue influyente en las derivas para los casos aislados con e_m y e_r . En la Fig. 13d, la deriva máxima en edificios aislados con e_m , para $\xi_b = 10\%$ y 25% , fue aproximadamente igual a 0.0019 . Por otro lado, en la Fig. 14d, la deriva máxima en edificios aislados con e_r , para $\xi_b = 10\%$ y 25% fue aproximadamente igual a 0.0037 .

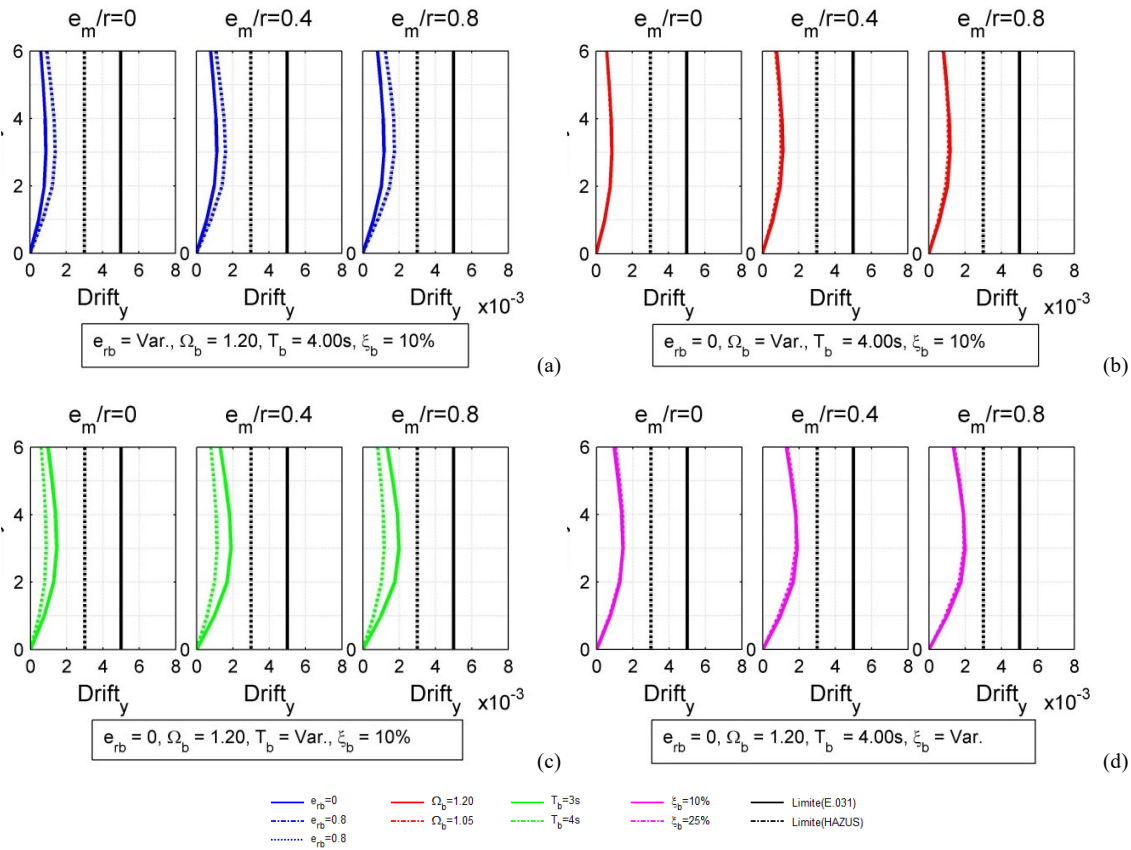
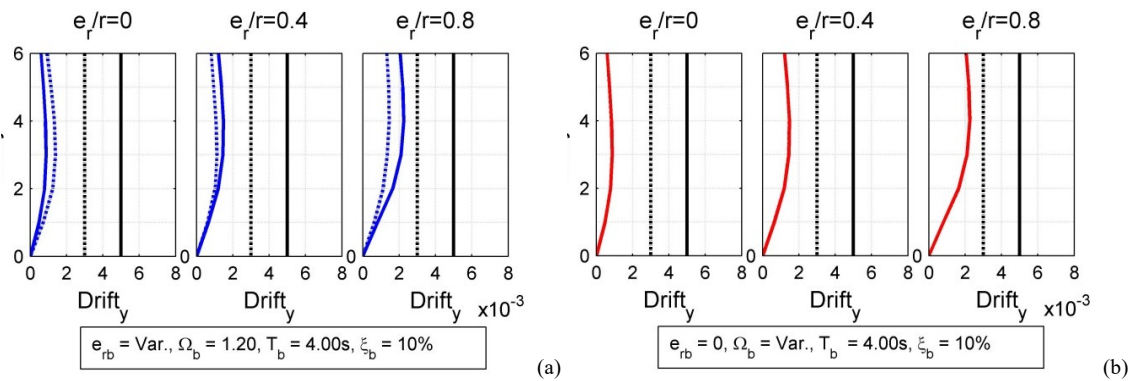


Fig. 13. Efecto de los parámetros e_{rb} , Ω_b , T_b y ξ_b en derivas, para edificios aislados con e_m : a) Efecto de e_{rb} ,

b) Efecto de Ω_b , c) Efecto de T_b y d) Efecto de ξ_b .



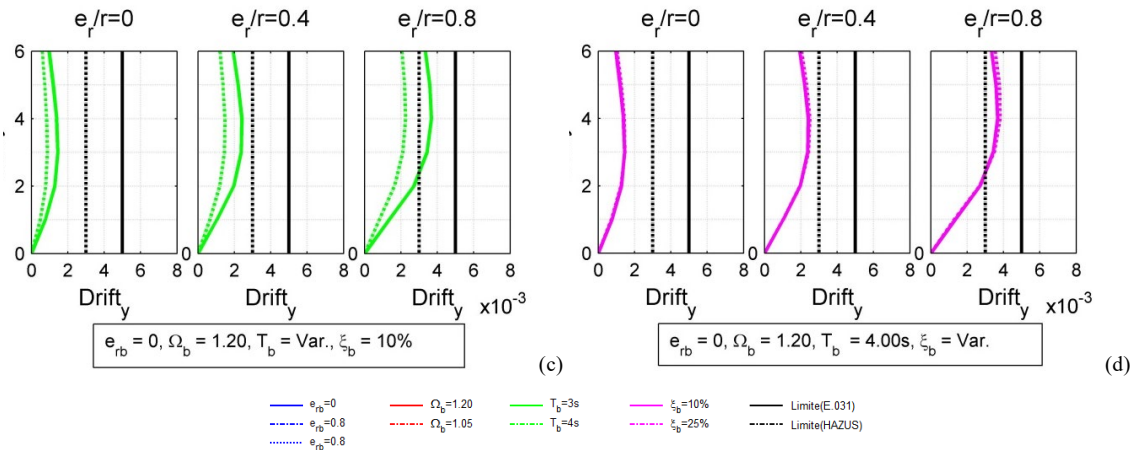


Fig. 14. Efecto de parámetros e_{rb} , Ω_b , T_b y ξ_b en derivas, para edificios aislados con e_r : a) Efecto de e_{rb} , b) Efecto de Ω_b , c) Efecto de T_b y d) Efecto de ξ_b .

CONCLUSIONES

El estudio realizado discutió la respuesta sísmica no lineal de edificios de concreto armado de seis niveles, aislados con dispositivos LRB, con asimetría por efecto de e_m y e_r en la superestructura, sometidos a sollicitaciones sísmicas bidireccionales, con el fin de estudiar en detalle las características de la base de aislamiento a partir de parámetros (e_{rb}/r , Ω_b , T_b y ξ_b). Se consideró solo el efecto de las dos componentes horizontales del sismo, el uso de dispositivos elastoméricos y una forma rectangular fija en planta con razón de aspecto 2 : 1. De los resultados, se desprenden las siguientes conclusiones.

En primer lugar, se observó que la presencia de e_{rb} en la base de aislamiento generó un comportamiento acoplado en los edificios aislados con e_m y e_r , lo cual llegó a amplificar significativamente los desplazamientos laterales hasta en un 50 %.

En particular, el incremento de e_r en los edificios aislados con $e_{rb}/r = 0.8$ generó una mínima variación de los valores máximos de $fad_{y_{ba}}$, $fad_{y_{azt}}$ y derivas de entrepiso. Sin embargo, incrementó el valor del TIR_{azt} hasta en un 12 %. Por otro lado, el incremento de e_m en los edificios aislados con un $e_{rb}/r = 0.8$ incrementó principalmente las derivas de entrepiso en un 50 % y concentró las rotaciones de planta en la superestructura debido al aumento del TIR_{ba} .

En relación a los parámetros Ω_b y ξ_b , se observó que tuvieron poca influencia en los TIR y las derivas de entrepiso; no obstante, sí incidieron en los valores máximos de $fad_{y_{azt}}$ en los edificios aislados con e_m . Por ejemplo, el máximo $fad_{y_{azt}}$ en edificios aislados con e_m , para $\Omega_b = 1.20$ y 1.05 , fue igual a 1.19 y 1.35; mientras que, para $\xi_b = 10\%$ y 25% , fue igual a 1.24 y 1.18.

Por último, el incremento del parámetro T_b generó mayor efectividad del aislamiento sísmico y disminuyó el $fad_{y_{azt}}$ únicamente de los edificios aislados con e_m hasta un valor de 1.18. Además, redujo las derivas de entrepiso de los edificios aislados con e_m y e_r hasta en un 55 %.

AGRADECIMIENTOS

El presente trabajo ha sido realizado gracias al apoyo de la sección de Postgrado de la Pontificia Universidad Católica de Perú (PUCP).

ROLES DE AUTORES

César A. Garrido: Conceptualización, Metodología, Diseño de la investigación, Visualización, Redacción – borrador original.

Victor I. Fernandez-Davila: Conceptualización, Metodología, Diseño de la investigación, Administración del proyecto, Supervisión, Redacción – revisión y edición.

REFERENCIAS

- [1] C. Arnold y R. Reitherman, *Building configuration and seismic design – the architecture of earthquake resistance*. Nueva York, NY, Estados Unidos: John Wiley & Sons, 1982.
- [2] V.I. Fernandez-Davila y E.F. Cruz, “Parametric study of the non-linear seismic response of three-dimensional building models”, *Engineering Structures*, vol. 28, no. 5, pp. 756-770, abr. 2006, doi: 10.1016/j.engstruct.2005.10.007.
- [3] C. Olivares, J. De la Llera y A. Poulos, “Torsion control in structures isolated with the triple friction pendulum system”, *Engineering Structures*, vol. 216, p. 110503, ago. 2020, doi: 10.1016/j.engstruct.2020.110503.
- [4] A. Tena-Colunga y J.L. Escamilla-Cruz, “Torsional Amplifications in Asymmetric Base-Isolated Structures”, *Engineering Structures*, vol. 29, no. 2, pp. 237-247, feb. 2007, doi: 10.1016/j.engstruct.2006.03.036.
- [5] S. Nagarajaiah, A.M. Reinhorn y M.C. Constantinou, “Torsion Coupling in Sliding Base-Isolated Structures”, *Journal of Structural Engineering, ASCE*, vol. 119, no. 10, pp. 130-149, ene. 1993, doi: 10.1061/(ASCE)0733-9445(1993)119:1(130).

- [6] M. Fallahian, F. Khoshnoudian y V. Loghman, "Torsionally Seismic Behavior of Triple Concave Friction Pendulum Bearing", *Advances in Structural Engineering*, vol. 18, no. 12, nov. 2015, doi: 10.1260/1369-4332.18.12.2151.
- [7] G. Bhatt, "A Parametric Study on Torsionally Coupled Base-Isolated Structures", en *Emerging Trends in Civil Engineering. Lecture Notes in Civil Engineering*, K. Babu, H. Rao y Y. Amarnath, Eds., vol. 61. Singapur: Springer, 2020, pp. 267-274. [En línea]. Disponible en: https://doi.org/10.1007/978-981-15-1404-3_22.
- [8] F. Khoshnoudian y N. Azizi, "Nonlinear response of a torsionally coupled base-isolated structure", *Proceedings of the ICE - Structures and Buildings*, vol. 160, no. 4, pp. 207-219, ago. 2007, doi: 10.1680/stbu.2007.160.4.207.
- [9] S. Nagarajaiah, A.M. Reinhorn y M.C. Constantinou, "Torsion in Base Isolated Structures with Elastomeric Isolation Systems", *Journal of Structural Engineering, ASCE*, vol. 119, no. 10, pp. 2932-2951, oct. 1993, doi: 10.1061/(ASCE)0733-9445(1993)119:10(2932).
- [10] T. Pan y J.M. Kelly, "Seismic response of torsionally coupled base isolated structures". *Earthquake Engineering and Structural Dynamics*, vol. 11, no. 6, pp. 749-770, nov. 1983, doi: 10.1002/eqe.4290110604.
- [11] R.S. Jangid y T.K. Datta, "Performance of base isolation system for asymmetric building subject to random excitation", *Engineering Structures*, vol. 17, no. 6, pp. 443-454, jul. 1995, doi: 10.1016/0141-0296(95)00054-B.
- [12] A. Tena-Colunga y L.A. Gomez-Soberon, "Torsional Response of Base-Isolated Structures due to Asymmetries in the Superstructure", *Engineering Structures*, vol. 24, no. 12, pp. 1587-1599, dic. 2002, doi: 10.1016/S0141-0296(02)00102-5.
- [13] A. Tena-Colunga y C. Zambrana-Rojas, "Dynamic torsional amplifications of base-isolated structures with an eccentric isolation system", *Engineering Structures*, vol. 28, no. 1, pp. 72-83, ene. 2006, doi: 10.1016/j.engstruct.2005.07.003.
- [14] C. Garrido y V. Fernández-Dávila, "Efecto de las excentricidades de rigidez y de masa en la respuesta sísmica de edificios de concreto armado aislados en la base". Presentado en *XIII Congreso Chileno de Sismología en Ingeniería Sísmica ACHISINA*, Viña del Mar, Chile, oct. 24-26, 2023.
- [15] V. Kilar y D. Koren, "Seismic behaviour of asymmetric base isolated structures with various distributions of isolators", *Engineering Structures*, vol. 31, no. 4, pp. 910-921, abr. 2009, doi: 10.1016/j.engstruct.2008.12.006.
- [16] S. Etedali y M.K. Kareshk, "Mitigation of torsional responses in asymmetric base-isolated structures using an optimal distribution of isolators in base story", *Structures*, vol. 35, pp. 807-817, ene. 2022, doi: 10.1016/j.istruc.2021.11.053
- [17] V. Zayas, S. Low y S. Mahin, "The FPS earthquake resisting system experimental report", Earthquake Engineering Research Center, University of California Berkeley, Berkeley, CA, Estados Unidos, Report No. UCB/EERC-87/01, jun. 1987.
- [18] H. Tajammolian, F. Khoshnoudian y V. Loghman, "Rotational components of near-fault earthquakes effects on triple concave friction pendulum base-isolated asymmetric structures", *Engineering Structures*, vol. 142, pp. 110-127, jul. 2017, doi: 10.1016/j.engstruct.2017.03.042.
- [19] H. Tajammolian, F. Khoshnoudian y N. Partovi Mehr, "Seismic responses of isolated structures with mass asymmetry mounted on TCFP subjected to near-fault ground motions", *International Journal of Civil Engineering*, vol. 14, pp. 573-584, dic. 2016, doi: 10.1007/s40999-016-0047-9.
- [20] T. C. Becker, E. Keldrauk, M. Mieler, S. Mahin y B. Stojadinovic, "Effect of Mass Offset on the Torsional Response in Friction Pendulum Isolated Structures", presentado en *15th World Conference on Earthquake Engineering*, Lisboa, Portugal, sep. 24-28, 2012.
- [21] J. Wang, Y. Ding y D. Li, "Seismic Response of the Asymmetric Structure Isolated by the Friction Sliding Bearings", *Advanced Materials Research*, vol. 163-167, pp. 4218-4221, ene. 2011, doi: 10.4028/www.scientific.net/AMR.163-167.4218.
- [22] E. Ozer, M. Inel y B.T. Cayci, "Seismic behavior of LRB and FPS type isolators considering torsional effects", *Structures*, vol. 37, pp. 267-283, mar. 2022, doi: 10.1016/j.istruc.2022.01.011.
- [23] D. Dao, "Seismic Response of a Full-scale 5-story Steel Frame Building Isolated by Triple Pendulum Bearings under Three-Dimensional Excitations", Tesis de Doctorado, University of Nevada, Reno, NV, Estados Unidos, 2012.
- [24] Y.K. Wen, "Method for Random Vibration of Hysteretic Systems", *Journal of the Engineering Mechanics Division, ASCE*, vol. 102, no. 2, pp. 249-263, abr. 1976, doi: 10.1061/JMCEA3.0002106.
- [25] S. Nagarajaiah, A.M. Reinhorn y M.C. Constantinou, "Nonlinear Dynamic Analysis of 3-D-Base-Isolated Structures", *Journal of Structural Engineering, ASCE*, vol. 117, no. 7, pp. 2035-2054, jul. 1991, doi: 10.1061/(ASCE)0733-9445(1991)117:7(2035).
- [26] Y.J. Park, Y.K. Wen y A.H.-S. Ang, "Random Vibration of Hysteretic Systems under Bi-directional Ground Motions", *Earthquake Engineering and Structural Dynamics*, vol. 14, no. 4, pp. 543-557, jul. - ago. 1986, doi: 10.1002/eqe.4290140405.
- [27] R.L. Mayes y F. Naeim, "Design of Structures with Seismic Isolation", en *The Seismic Design Handbook*, F. Naeim, Ed., Boston, MA, Estados Unidos: Springer, 2001, cap. 14, pp. 724-755.

- [28] C. Garrido, “Comportamiento sísmico de edificios asimétricos con sistemas de aislación”, Tesis de Maestría en Ingeniería Civil, Pontificia Universidad Católica del Perú (PUCP), Lima, Perú, 2023.
- [29] Cargas, Norma Técnica Peruana E.020, Ministerio de Vivienda, Construcción y Saneamiento, Perú, dic. 2020. [En línea]. Disponible en: <https://drive.google.com/file/d/15atg-9w0OEXjR5C1m6IXUFihwYeUh1aN/view>
- [30] P. Tsopelas, S. Nagarajaiah, M. Constantinou y A. Reinhorn, “3D-BASIS-M: Nonlinear Dynamic Analysis of Multiple Building Base Isolated Structures”, National Center for Earthquake Engineering, Buffalo, NY, Estados Unidos, Technical report NCEER-91-0014, may. 1991.
- [31] G.C. Giuliani, “Design experience on seismically isolated buildings”, *Nuclear Engineering and Design*, vol. 127, no. 3, pp. 349-366, jun. 1991, doi: 10.1016/0029-5493(91)90059-Q.
- [32] H. Akehashi y I. Takewaki, “Critical Analysis of Nonlinear Base-Isolated Building Considering Soil-Structure Interaction under Impulsive and Long-Duration Ground Motions”, *Geotechnics*, vol. 1, no. 1, pp. 76-94, jun. 2021, doi: 10.3390/geotechnics1010005.
- [33] Aislamiento Sísmico, Norma Técnica Peruana E.031, Ministerio de Vivienda, Construcción y Saneamiento, dic. 2020. [En línea]. Disponible en: <https://drive.google.com/file/d/1IZ22Z1h3jfZpp4GKdsLLFQ1FIVSUVUso/view>.
- [34] A. Mendo y V.I. Fernandez-Davila, “Bases for standard of analysis and design of base isolation system for buildings in Perú”, presentado en *16th World Conference on Earthquake Engineering WCEE*, Santiago, Chile, jun 9-13, 2017.
- [35] Diseño Sismorresistente, Norma Técnica Peruana E.030, Ministerio de Vivienda, Construcción y Saneamiento, dic. 2020. [En línea]. Disponible en: <https://drive.google.com/file/d/1W14N6JldWPN8wUZSqWZnUphg6C559bi-/view>.
- [36] E. Kalkan y A.K Chopra, “Practical Guidelines to Select and Scale Earthquake Records of Nonlinear Response History Analysis of Structures”, U.S. Geological Survey, Reston, VA, Estados Unidos, Open-file Report 2010-1068, jul. 2010.
- [37] S. Mazzoni, M. Hachem y M. Sinclair, “An Improved Approach for Ground Motion Suite Selection and Modification for Use in Response History Analysis”, presentado en *15th World Conference on Earthquake Engineering*, Lisboa, Portugal, sep. 24-28, 2012.
- [38] *CSI Analysis reference manual for SAP2000, ETABS, SAFE and CSI Bridge*, Computer and Structure Inc., Berkeley, California, Estados Unidos, 2016.
- [39] E.L. Wilson, *Three-Dimensional Static and Dynamic Analysis of Structures*. Berkeley, CA, Estados Unidos: Computers and Structure Inc., 2002.
- [40] *Hazus-MH 2.1 Technical Manual - Earthquake Model*, Department of Homeland Security, Federal Emergency Management Agency, Washington, DC, Estados Unidos, 2013.