

SEISMIC KNOCKING IN ADJACENT REINFORCED CONCRETE STRUCTURES, CAJAMARCA – 2022.

Julca Calua, Jorge¹, Ríos Jiménez Deysi, Margot², Romero Cueva, Yoner Jaime³,
Quevedo Porras, Violeta Zarela⁴ y Valderrama Puscan, Marlon Walter⁵

¹Universidad Privada del Norte, Perú, N00025821@upn.pe

²Universidad Privada del Norte, Perú, N00039169@upn.pe

³Universidad Privada del Norte, Perú, yoner.romero@upn.edu.pe

⁴Universidad Privada del Norte, Perú, violeta.quevedo@upn.pe

⁵Universidad Privada del Norte, Perú, marlonvalderrama1103@hotmail.com

Abstract– The historical record of the intensity and magnitude of earthquakes indicates that seismic shocks on structures can cause considerable damage and even collapse when they collide, if the separation distance between them is not sufficient be enough. This study intends to evaluate the repercussion of the seismic shock in 2 adjacent structures of reinforced concrete of 6 and 3 floors, located in the district of Cajamarca, carrying out a non-linear analysis of time-history, in order to hit the adjacent structures that present different heights.; through the use of Etabs V. 20.1, SeismoSignal and SeismoMatch software, in addition to Technical Standards E. 0.20, E. 0.30 and E. 0.60; as well as the national regulations on buildings.

The acceleration records used for the analysis of the time-history factor were from the province of San Ignacio, scaling with a spectral acceleration according to the E. 030 standard. The results were analyzed with and without a seismic joint, obtaining in the form of displacement, floor shear, drift and impact force. Higher buildings suffered more damage than smaller ones when the pounding occurred.

Keywords– Gap element, structure, seismic joint and threading.

Digital Object Identifier (DOI):

<http://dx.doi.org/10.18687/LEIRD2022.1.1.42>

ISBN: 978-628-95207-3-6 ISSN: 2414-6390

GOLPETEO SÍSMICO EN ESTRUCTURAS ADYACENTES DE CONCRETO ARMADO, CAJAMARCA - 2022

Abstract– The historical record of the intensity and magnitude of earthquakes indicates that seismic shocks on structures can cause considerable damage and even collapse when they collide, if the separation distance between them is not sufficient be enough. This study intends to evaluate the repercussion of the seismic shock in 2 adjacent structures of reinforced concrete of 6 and 3 floors, located in the district of Cajamarca, carrying out a non-linear analysis of time-history, in order to hit the adjacent structures that present different heights.; through the use of Etabs V. 20.1, SeismoSignal and SeismoMatch software, in addition to Technical Standards E. 0.20, E. 0.30 and E. 0.60; as well as the national regulations on buildings.

The acceleration records used for the analysis of the time-history factor were from the province of San Ignacio, scaling with a spectral acceleration according to the E. 030 standard. The results were analyzed with and without a seismic joint, obtaining in the form of displacement, floor shear, drift and impact force. Higher buildings suffered more damage than smaller ones when the pounding occurred.

Keywords-- Gap element, structure, seismic joint and threading.

Resumen– El registro histórico de la intensidad y magnitud de los terremotos nos indica que los golpes sísmicos sobre las estructuras pueden causar daños considerables e incluso hasta el colapso de las mismas cuando entran en colisión, en caso la distancia de separación entre ellas no sea suficiente. Este estudio pretende evaluar la repercusión del choque sísmico en 2 estructuras adyacentes de concreto armado de 6 y 3 pisos, ubicadas en el distrito de Cajamarca, efectuándose un análisis no lineal de tiempo-historia, a fin de golpear las estructuras adyacentes que presentan diferentes alturas; a través del uso de los softwares Etabs V. 20.1, SeismoSignal y SeismoMatch, además de las Normas Técnicas E. 0.20, E. 0.30 y E. 0.60; así como la normativa nacional sobre edificaciones.

Los registros de aceleración utilizados para el análisis del factor tiempo-historia fueron de la provincia de San Ignacio, escalándose con una aceleración espectral según el estándar E. 030. Los resultados se analizaron con junta y sin junta sísmica, obteniéndose en forma de desplazamiento, cortante de piso, deriva y fuerza de impacto. Los edificios de mayor altura sufrieron mayores daños que los de menor tamaño cuando se produce el golpeteo.

Palabra clave-- Elemento Gap, estructura, junta sísmica y roscado.

I. INTRODUCCIÓN

El golpeteo sísmico describe la colisión de dos o más edificios adyacentes causada por las fuerzas sísmicas que pueden resultar en daños estructurales severos y/o colapso

total del edificio [1], [2]. Así mismo, la razón principal del efecto del golpeteo, normalmente es causada por las diferencias en las propiedades dinámicas de las estructuras que las hacen vibrar fuera de fase, bajo la excitación sísmica [3]. Las edificaciones en general son estructuras que se esperan estén preparadas para aguantar la fuerza sísmica en caso llegase a presentarse este fenómeno [4]. Cuando ocurre este evento, la estructura responde con un movimiento conocido como “excitación”, el cual consiste en el balanceo de la estructura en el sentido que la fuerza se presenta. Dependiendo de algunas características como la altura y la separación de los edificios, así como de los tipos de terreno y cimentación, entre otras; es que se establece la distancia en que la estructura logra balancearse [5]. Al valor de la distancia de separación entre dos estructuras que será lo suficientemente grande para evitar el impacto entre ellas se le conoce como “junta de expansión sísmica” [6].

Se han observado golpes estructurales en casi todos los grandes terremotos de las últimas décadas [7], [8]. Hay muchos casos informados en los cuales los golpes se han identificado como una causa del fracaso. Debido a esto, se han desarrollado varios modelos de contactos simplificados para estudiar los golpes estructurales durante los terremotos; tales como, el modelo de resorte lineal [9], [10], el modelo de Hertz [11], [12], el modelo lineal, el modelo viscoelástico [13] y el modelo viscoelástico no lineal [14], [15].

Los reglamentos sísmicos establecen las distancias mínimas de separación que deben proporcionarse entre estructuras adyacentes [4], siendo el suelo en las ciudades pobladas un valioso activo financiero, además del golpeo estructural que involucra edificaciones cercanas sin poder desplazarse, por lo que es necesario medir el efecto de golpeo en edificaciones, a fin de desarrollar un mejor control de daños y un uso más eficiente del espacio terrestre [16].

1. **Elemento Gap:** Simula el contacto entre dos estructuras generando fuerzas cuando las dos superficies se acercan [17], por lo que en el desarrollo de la presente investigación será utilizado para obtener las fuerzas de impacto en las estructuras adyacentes del caso de estudio, siendo el Gap parte del programa Etabs.

Digital Object Identifier (DOI):
<http://dx.doi.org/10.18687/LEIRD2022.1.1.42>
ISBN: 978-628-95207-3-6 ISSN: 2414-6390

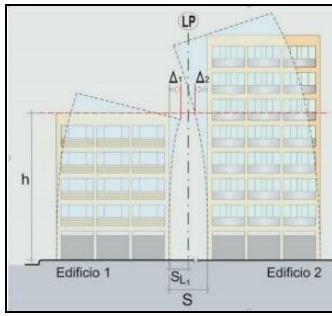


Fig. 1 Distancias estructurales
Nota. Esquematización de balanceo de estructuras

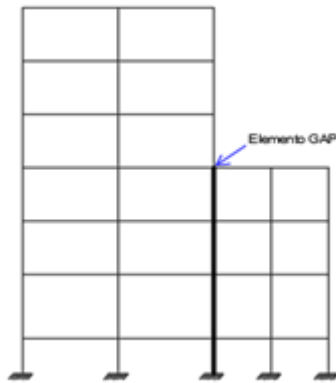


Fig. 2 Elemento Gap proporcionado en Etabs.
Nota. Simula el contacto entre dos estructuras generando fuerzas cuando las dos superficies se acercan.

El Gap es un elemento solo de compresión requerido para evaluar la fuerza de los golpes y simular el efecto de los golpes. El propósito del elemento Gap es transmitir la fuerza a través del enlace solo cuando se produce el contacto y se cierra el espacio. [18]

$$f = \begin{cases} k(d + open) & \text{si } (d + open) < 0 \\ 0 & \text{si } (d + open) \geq 0 \end{cases} \quad (1)$$

Donde “K” es la constante del resorte, “d” denota el desplazamiento y “open” es la apertura del espacio inicial, que debe ser cero o un número positivo. [18]

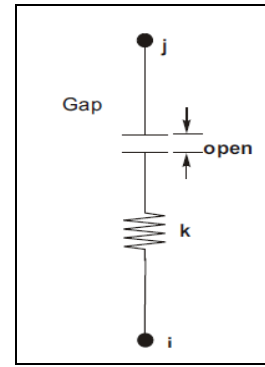


Fig. 3 Elemento Gap.
Nota. Elemento Gap con sus propiedades

La forma de seleccionar la rigidez de los elementos de separación se elige como un valor 100 veces mayor que la relación AE/L . Además, A es el área de la sección transversal del elemento, E es el módulo de elasticidad, y L es la longitud del elemento en la dirección perpendicular a las superficies de contacto. Por lo tanto, en este modelo K se calcula de la siguiente manera [16].

$$K = \frac{EA}{L} * 100 \quad (2)$$

El elemento K es definido como un resorte porque la disipación de energía durante el contacto se puede contabilizar por amortiguamiento. Por eso para lograr el comportamiento de contacto deseado, el elemento Gap incluye el efecto de la rigidez y la amortiguación lineal efectiva [16].

Se tiene como propósito evaluar la repercusión del golpeteo sísmico en estructuras adyacentes de concreto armado, además de establecer la manera en que repercute la junta sísmica tanto en el desplazamiento máximo, en las derivas y en la cortante de entrepiso en dichas estructuras, así como su ausencia en las fuerzas de impacto de las mismas.

II. METODOLOGÍA

La investigación es de tipo no experimental con diseño transversal descriptivo, siendo la unidad de estudio las dos edificaciones adyacentes con sistema de pórticos que no presenten junta sísmica en el distrito de Cajamarca. La población de estudio está comprendida por las viviendas aporticadas de concreto armado de 3 y 6 pisos que no presentan junta sísmica; así mismo en extensión a dicha población se ha considerado a las viviendas aporticadas de concreto armado que se encuentren adyacentes a las anteriormente mencionadas, ubicadas en el distrito de Cajamarca.

La revisión documental consistió en la lectura de la normativa nacional existente sobre edificaciones y la información de los trabajos de investigación obtenida a través de tesis, artículos de investigación y libros.

Para la obtención y recolección de datos se diseñó mediante softwares dos edificaciones de 3 y 6 pisos que cumplan con el Reglamento Nacional de Edificaciones (RNE), además de encontrarse una al lado de la otra y cuya ubicación sea en el distrito de Cajamarca.

Por otro lado, para el desarrollo de la presente investigación se utilizaron los softwares y programas informáticos AutoCAD, Etabs, SeismoSignal y SeismoMatch.

En esta investigación los métodos principales utilizados fueron el Análisis Modal Espectral (análisis por el espectro de respuesta) y el Análisis de tiempo-historia.

Para el Análisis de tiempo-historia se consideró los últimos registros sísmicos ocurridos en las ciudades de Tocache, Moyobamba y San Ignacio.

Para el Análisis Modal Espectral de ambas edificaciones, se ha tenido en cuenta sus características de ubicación y configuración estructural, así como también las características de uso. De acuerdo con la normativa vigente [4], las estructuras pertenecen a la categoría “C” donde se encuentran todas las edificaciones comunes. Se calcularon y se obtuvieron los datos necesarios de los coeficientes de zona, tipo de suelo de las edificaciones, coeficiente de reducción de las fuerzas sísmicas, asignación del sistema estructural y regularidad estructural, modelándose posteriormente la estructura en el programa Etabs, hallándose las derivas para verificar si estas son aceptadas según los valores tolerables de la norma sismorresistente vigente.

Después de realizar el Análisis Modal Espectral, se realizó el Análisis tiempo-historia, a fin de conocer las derivas, desplazamientos máximos, cortante de entrepiso y la fuerza de impacto de ambas edificaciones al mismo tiempo y su interacción entre sí ante la presencia de una fuerza sísmica, para lo cual se consideró modelar ambas estructuras con junta y sin junta sísmica.

Para lograr modelar la interacción (golpeo sísmico) y calcular su magnitud, se utilizó un elemento de conexión entre nudos cercanos de las edificaciones, siendo este el elemento Gap, que funciona a comprensión siempre que la distancia entre ambas edificaciones por efectos del sismo sea menor a cero; es decir, el elemento se activa cuando el acercamiento relativo entre uno y otro nudo cercano se vuelve mayor que la separación sísmica considerada [5].

Todos los datos obtenidos fueron registrados en tablas y gráficos, utilizados para elaborar un modelo matemático que permita determinar el daño producido a las estructuras tras el posible impacto entre ellas durante un sismo.

Caracterización estructural y modelamiento de los edificios.

Características del edificio (3 pisos).

A. Arquitectura

Es una edificación que tiene las siguientes características: Largo 20 m, ancho 6 m, área construida 120 m², cuenta con 3

niveles, la altura de entre piso es de 3.60 m para el primer nivel y 3 m para los siguientes niveles.

Características del edificio (6 pisos).

A. Arquitectura

Es una edificación que tiene las siguientes características: Largo 20 m, ancho 10 m, área construida 200 m², cuenta con 6 niveles, la altura de entre piso es 3.60 m para el primer nivel y 3 m para los siguientes niveles.

B. Estructuras para ambas edificaciones.

Cuenta con un sistema aporticado de concreto armado.

TABLA 1
CARACTERÍSTICAS DEL CONCRETO.

Característica	Valor
Resistencia a la compresión	$f'c = 210.00 \text{ Kg/cm}^2$
Peso específico	$\gamma = 2400.00 \text{ Kg/cm}^3$
Módulo de elasticidad	$E = 217370.651 \text{ kg/cm}^2$
Coefficiente de Poisson	$U = 1$

TABLA 2
CARACTERÍSTICAS DEL ACERO DE REFUERZO

Esfuerzo de fluencia	$f_y = 4200.00 \text{ Kg/cm}^2$
----------------------	---------------------------------

Los parámetros sísmicos fueron obtenidos de la Norma Técnica [4].

TABLA 3
RESUMEN DE LOS PARÁMETROS SÍSMICOS UTILIZADOS

Descripción	Parámetros Definidos	Valor
Sistema estructural (R0)	Albañilería Confinada	3.00
Tipo de suelo (S)	S3: Suelo blando	1.20
Zonificación (Z)	Zona 3	0.35
Regularidad estructural (la o lp)	Estructura Regular	1.00
Categoría de la edificación (U)	C: Edificaciones Comunes	1.00

Posteriormente, se calcularon los factores para ambas edificaciones de 3 y 6 pisos para el método dinámico modal espectral, teniendo en cuenta la norma [4], además de los valores obtenidos del análisis estático.

En el análisis dinámico se utilizó un factor de escala diferente al considerado en el estático, debido a que esta vez se toma en consideración el valor de la gravedad; estableciéndose la siguiente fórmula:

$$F.E. = \frac{ZUSg}{R} \quad (3)$$

Para este caso, se consideró una gravedad igual a 9.81 m/s^2 [19].

Para modelar la edificación en el programa Etabs, se ingresó el factor de escala con la ayuda de una plantilla en formato Excel y teniendo en cuenta lo indicado en la Norma Técnica [4].

Para este caso, también se modeló la estructura en el programa Etabs y se hallaron las derivas para verificar si estos son aceptados según los valores tolerables de la norma sismorresistente vigente, cuyos datos tienen que ser menores a 0.007.

Los desplazamientos máximos sirvieron para hallar la distancia de la junta sísmica.

Según la Norma Técnica [4], la junta sísmica no debe ser menor que los $2/3$ de la suma de los desplazamientos máximos de los edificios adyacentes, para ello se analizaron los desplazamientos máximos del tercer piso de ambas estructuras, debido a que estos son los más críticos.

Análisis dinámico Tiempo-Historia

En el análisis dinámico tiempo-historia los registros sísmicos que fueron tomados en cuenta se desarrollaron muy cerca al lugar sobre el cual se proyectaron las estructuras.

Para el análisis se usó el registro sísmico de San Ignacio del año 2021, el cual se encuentra en la página del CISMID para las direcciones NS-EW, analizándose solo el impacto de las estructuras en una sola dirección.

Los registros sísmicos se corrigieron en el programa Seismosignal para realizar la corrección por línea base y filtración.

La corrección por línea base se empleó para evitar la desviación de los acelerogramas del centro, haciendo uso de una corrección de factor a factor igual a la aritmética común del signo al acelerograma [20].

Por otro lado, la corrección por filtrado es un procedimiento computacional o cálculo que cambia sobre una disposición de números a los que se dirige la señal de información en otra agrupación a la que se dirige la señal de rendimiento [20].

Se escalan los 3 acelerogramas ya corregidos al espectro de diseño mediante el software SeismoMatch, los mismos que se presentan a continuación.

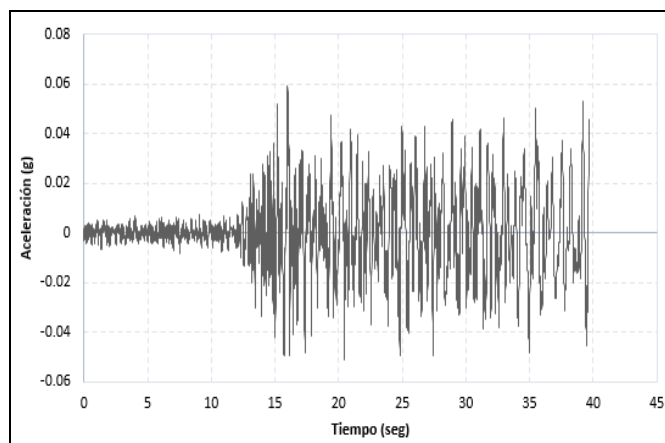


Fig. 4 Registro sísmico de San Ignacio escalado
Nota. Registro sísmico de San Ignacio escalado

El análisis dinámico tiempo-historia se realizó siguiendo los parámetros indicados en la norma [4], el conjunto de registro sísmicos se analizó solo en una componente (EW), escalados al espectro objetivo y aplicados en fuerzas horizontales, tal como se aprecia en la siguiente imagen:

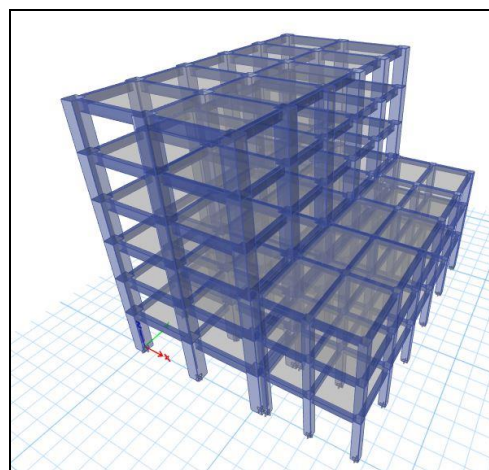


Fig. 5 Análisis en X (E-W).
Nota. Análisis en X (E-W).

En esta parte se realizó el análisis dinámico de ambas edificaciones al mismo tiempo e interacción entre sí. Para lograr modelar la interacción (golpeo sísmico) y calcular su magnitud se utilizó un elemento de conexión entre nudos cercanos de las edificaciones, siendo este el elemento Gap, el cual funciona a comprensión siempre que la distancia entre ambas edificaciones por efectos del sismo sea menor a cero; es decir, el elemento se activa cuando el acercamiento relativo entre uno y otro nudo cercano se vuelve mayor que la separación sísmica considerada [18].

El elemento Gap se caracteriza por su longitud y rigidez; gracias al uso de este elemento aparecen fuerzas de interacción que modifican el comportamiento dinámico de los edificios

respecto a cuándo están aislados, sus desplazamientos quedan efectivamente limitados entre sí [5].

En este caso, el análisis de tiempo-historia lineal resolverá para cada momento el estado de la estructura; es decir, relacionará los efectos de aceleración y masa, velocidad y amortiguamiento, posición y rigidez y fuerza externa al igual que en el caso de los edificios individuales; excepto que la fuerza externa sea modificada por la presencia del elemento Gap [5], [18]. Cuando la componente es E-W el registro actúa en el eje X.

Una vez obtenidos todos los registros sísmicos escalados, se procedió a ejecutar la estadística en el programa Etabs.

Finalmente se procedió a colocar el elemento Gap, con una distancia igual a la junta sísmica y otra sin ninguna distancia entre estructuras.

III. RESULTADOS

Repercusión del golpeteo sísmico con junta y sin junta en el desplazamiento.

TABLA 4
DESPLAZAMIENTO MÁXIMO EN LOS DIFERENTES NIVELES EN LA DIRECCIÓN “X”

N° Techo	Desplazamiento máximo (mm)			
	Con Junta		Sin Junta	
	Min.	Max.	Min.	Max.
6	-93.572	97.013	-94.122	91.996
5	-83.076	86.396	-81.934	81.222
4	-68.895	71.845	-68.040	66.801
3	-51.215	58.108	-38.356	52.632
2	-31.591	43.135	-23.165	37.673
1	-12.838	21.210	-12.059	21.394

La tabla muestra el desplazamiento máximo de puntos en cada nivel de piso para la estructura más alta en dirección X.

El desplazamiento máximo, tanto para el caso con junta y sin junta sísmica, ocurre en el nivel del techo del edificio, siendo el desplazamiento para el caso con junta de 97,013 mm y para el caso de sin junta de 91,996 mm. El desplazamiento de redujo en 5,017 mm; sin embargo, el movimiento máximo de desplazamiento hacia la izquierda mostró un aumento en el caso con junta de -94,122 mm, mientras que para el caso con junta de -93,572 mm.

Lo antes indicado puede deberse a la naturaleza flexible de los edificios más altos, que hacen que se recuperen después de los golpes [16]. Los desplazamientos negativos máximos para los niveles de piso por debajo del tercer nivel son aún más bajos en el caso de sin junta sísmica. Se observó, que el

golpeteo reduce el desplazamiento lateral en toda la altura del edificio [21].

Repercusión del golpeteo sísmico con junta y sin junta en la deriva.

TABLA 5
DERIVAS CON JUNTA Y SIN JUNTA PARA EL EDIFICIO DE 6 NIVELES EN DIRECCIÓN X

N° Techo	Derivas (1/1000)	
	Con Junta	Sin Junta
6	3.544	4.704
5	4.850	5.665
4	6.145	6.415
3	6.883	6.437
2	7.308	6.786
1	5.892	5.943

La tabla muestra la deriva de cada nivel del edificio más alto en dirección X, claramente se ve que la deriva del piso aumenta en los niveles por encima del tercer nivel. Por otro lado, debajo del tercer nivel la deriva de los pisos tiende a disminuir, todo esto se da en el caso de sin junta sísmica. Tanto para el caso con junta y sin junta sísmica la deriva del piso más pequeño existe en el último nivel de la estructura, siendo estos valores de 0,003544 y 0,004704, respectivamente. La deriva máxima de piso es de 0,007308 que se da para el caso de sin junta sísmica, cuyo valor sobrepasa los límites establecidos en la Norma Técnica [4]. El golpeteo del edificio más alto crea cortantes de piso por encima del tercer nivel y en éste se encuentra el nivel del techo del último piso del edificio adyacente [16]. Estos cortantes del piso provoca el aumento de la deriva en cada nivel por encima del tercer piso [21].

Repercusión del golpeteo sísmico con junta y sin junta en la cortante.

TABLA 6
CORTANTE DE ENTREPISO CON Y SIN JUNTA SÍSMICA EN DIRECCIÓN X

N° Techo	Cortante (tonf)	
	Con Junta	Sin Junta
1	214.523	230.653
2	193.750	194.571
3	162.679	187.386
4	123.696	153.101
5	89.934	122.707
6	46.211	82.667

IV. DISCUSIÓN

En la tabla se muestra la amplificación de corte de entepiso de cada nivel para los casos con junta y sin junta sísmica. El efecto del golpeteo se puede ver claramente en el fuerte aumento de la cortante desde el tercer piso en el edificio de mayor altura comparando ambos casos. Asimismo, la mayor cortante de entepiso siempre se da en el primer nivel del edificio [24].

Otra tendencia importante que se observó es que en el caso que presenta junta sísmica, la cortante es mucho menor en comparación con el caso de sin junta sísmica. En el piso seis la cortante fue de 82,667 tonf para el caso sin junta y 46,211 tonf con junta sísmica, lo cual equivale al 78,89% de aumento de la cortante de piso. Si bien el aumento de la cortante de entepiso es grande, esto implica que proporcionar una distancia de separación adecuada entre edificios es una opción viable para reducir el daño por golpes [27].

Repercusión del golpeteo sísmico con junta y sin junta en la fuerza de impacto.

TABLA 7
FUERZAS DE IMPACTO CON Y SIN JUNTA SÍSMICA
EN CADA NIVEL EN DIRECCIÓN X

N° Techo	Fuerza de impacto (tonf)	
	Sin Junta	Con Junta
1	74.193	0.000
2	76.075	0.000
3	123.620	0.000

En la tabla se aprecia que el edificio al no contar con junta sísmica aumenta la fuerza de impacto ligeramente en cada piso, siendo por el contrario que al tener junta no hay fuerzas de impacto. La fuerza de impacto solo se da en caso de sin junta sísmica, por lo que la fuerza máxima de impacto se dio en el tercer nivel con un valor de 123,62 tonf. Estos resultados muestran que la distancia de separación adecuada entre las estructuras reducirá significativamente el daño por golpes [16].

Asimismo, la alta fuerza de golpeteo causa una gran diferencia en el desplazamiento entre los niveles del edificio [21], así que una fuerza de golpeteo más pequeña es mucho deseable porque reduce las posibilidades de colapso de las estructuras [22]. Esta fuerza de golpeteo adicional puede dañar los elementos estructurales de las estructuras. Las fuerzas de golpeteo entre edificios dependen mucho de las características del registro del terremoto y también de las características dinámicas de los edificios adyacentes [23]; sin embargo, una distancia de separación muy pequeña puede evitar la acumulación de impulso de las masas en movimiento, reduciendo así las fuerzas de impacto.

El fenómeno del golpeteo sísmico ha sido la causa principal del inicio del colapso en muchos terremotos registrados. El daño severo causado por los golpes se puede notar fácilmente cuando fuertes terremotos golpean ciudades metropolitanas y áreas urbanas densamente pobladas [20]. El golpeteo es un fenómeno muy complejo que podría provocar daños en los muros, deformaciones plásticas, fallas por cortante de la columna, asentamientos y posible colapso de la estructura [22], es por eso que, en esta investigación, se trató de dar a conocer la importancia de contar con una distancia óptima entre edificaciones adyacentes.

A partir de los resultados obtenidos se corroboró la evaluación de la repercusión del golpeteo sísmico en estructuras adyacentes de concreto armado con respecto al factor tiempo-historia [24]. En el caso de edificios adyacentes con diferente nivel de piso, el máximo desplazamiento en un edificio de 7 pisos fue de 45,48 mm a 3,52 s, mientras que para uno de 10 pisos fue de 95,64 mm a 3,52 s, por lo que se observa que el máximo movimiento fuera de fase de ambos edificios a 3,52 s es de 61,11 mm, que es mayor que la junta de dilatación. Debido a esto la fuerza de impacto del momento de fase se crea en el elemento de separación, la fuerza de impacto máxima es de 1250 kN creado entre los edificios adyacentes.

Así mismo [25], se estableció que en un edificio de 8 pisos el desplazamiento máximo fue de 80,30 mm a 2,2 s, mientras que para uno de 6 pisos fue de 212,53 mm a los 12,8 s, por lo que se observa que el máximo movimiento fuera de fase de ambos edificios es 192,83 mm, que es mayor que la expansión dada por articulación, debido a que se es incapaz de acomodar esto fuera del movimiento de fase y los edificios adyacentes golpearán o chocarán entre sí.

Por otro lado [5], existen resultados con respecto al caso de golpeteo entre estructuras adyacentes de concreto armado de 5 y 12 pisos sin una adecuada junta de separación sísmica, por lo que la fuerza cortante en la base se aumentó por lo menos cuatro veces su valor sin golpeteo, pasando de 635.3 tnf en análisis dinámico a 3,092.7 tnf en análisis tiempo-historia. Este valor no resultó el más importante, ya que la falla se produce en el punto de golpeteo más alto y no en la base, ya que no colapsa la edificación por completo. La fuerza de golpeteo disminuyó en 0.20 % en el quinto nivel entre los dos edificios adyacentes, a medida que la distancia de separación aumentó con una variación de 20 mm gradualmente.

Por lo expuesto, se puede afirmar que los resultados obtenidos en esta investigación si guardan relación con respecto a los hallazgos mencionados anteriormente; sin embargo, estos valores son estrictamente aplicables a estructuras sujetas a impactos unilaterales y no necesariamente al caso más común de una hilera de edificios en la manzana de una ciudad, donde los impactos de dos lados afectarán a todos menos al edificio final en la fila [23].

Asimismo, estos resultados indican que el golpeteo puede causar sobreesfuerzos elevados, principalmente cuando la colisión entre estructuras tiene alturas, periodos o masas significativamente diferentes [26], sugiriéndose una posibilidad de introducir en la normativa un conjunto de condiciones y disposiciones especiales como alternativa al requisito de separación sísmica, además de requisitos especiales de diseño para muros y columnas ubicados en los lados sujetos a golpeteos, aplicado en ciudades sísmicamente activas, donde el costo del terreno en las áreas metropolitanas es alto o el tamaño de los lotes es pequeño en muchas ciudades y cuando un nuevo edificio es adyacente a los existentes construidos en las líneas divisorias de la propiedad [27], aunque para optar por estas medidas, se requieren estudios adicionales con modelos estructurales más sofisticadas.

Para mejorar esta investigación se recomienda realizar estudios con estructuras adosadas (losa-columna) y estructuras irregulares, asimismo estos edificios deben contar con alturas de entrepiso diferentes. Para obtener resultados más amplios se deben realizar modelos considerando diferentes tipos de suelos; además del análisis a dos o más edificaciones adyacentes en una misma hilera [28].

V. CONCLUSIONES

En base al análisis realizado sobre el golpeteo sísmico en estructuras adyacentes de concreto armado, se demuestra la importancia de considerar junta sísmica en edificaciones adyacentes, teniendo en cuenta los resultados de cada repercusión.

La respuesta del edificio se ve muy afectada en la dirección del impacto (eje X), disminuyéndose los desplazamientos máximos, aumentándose las derivas, cortantes de entrepiso y generándose fuerzas de impacto entre edificios, cuyos factores pueden dañar gravemente los elementos estructurales de las edificaciones.

Los desplazamientos máximos disminuyen ligeramente en el caso de sin junta sísmica en comparación al caso contrario, esto porque los movimientos de las estructuras se bloquean entre sí, además que la edificación más alta sufre un aumento considerable del desplazamiento desde el tercer piso, debido a que la otra estructura adyacente ya no le impide moverse libremente.

Las derivas de los pisos aumentan, en el caso de sin junta sísmica; es decir, va aumentando gradualmente desde el tercer piso, aunque la menor deriva siempre se da en el último piso, en ambos casos con y sin junta sísmica.

Las cortantes de entrepiso aumentan, en el caso de sin junta sísmica; es decir, va aumentando gradualmente desde el tercer piso, aunque la mayor deriva siempre se da en el primer piso, en ambos casos con y sin junta sísmica.

La fuerza de impacto solo se da en el caso de no contar con junta sísmica y esta fuerza va aumentando ligeramente en cada piso, así que la fuerza máxima de impacto se da en el tercer nivel, por lo que la junta sísmica permite que el edificio

vibre dentro de la distancia de separación; es decir, a 6.94 cm, disminuyéndose así el efecto de las fuerzas sísmicas sobre los edificios.

Las limitaciones que se encontraron en la presente investigación, son la necesidad de realizar pruebas o ensayos que proporcionen datos con mayor precisión y certeza, lo cual hubiese cambiado los resultados de los análisis.

REFERENCIAS

- [1] Anagnostopoulos, A. (1996). Building pounding re-examined: How serious a problem is it? Eleventh World Conference on Earthquake Engineering. https://www.iitk.ac.in/nicee/wcee/article/11_2108.PDF
- [2] Kasai, K., Jeng, V., Patel, P. & Munshi, J. (1992). Seismic pounding effects – Survey and análisis. Eleventh World Conference on Earthquake Engineering. https://www.iitk.ac.in/nicee/wcee/article/10_vol7_3893.pdf
- [3] Jankowski, R. & Mahmoud, S. (2015). Earthquake-Induced Structural Pounding. <https://link.springer.com/book/10.1007/978-3-319-16324-6?noAccess=true>
- [4] Norma Técnica E. 030. (2019). E. 030 Diseño sismoresistente. https://cdn.www.gob.pe/uploads/document/file/299950/d289856_opt.pdf
- [5] Castillo, S. y Flores, J. (2019). Análisis de la interacción entre estructuras adyacentes. Lima, Perú. https://repositorioacademico.upc.edu.pe/bitstream/handle/10757/628036/Castillo_MS.pdf?sequence=3
- [6] Warnotte, V., Stoica, D., Majewski, S. y Voiculescu, M. (2007). State of the art in shock mitigation techniques. Technical University of Civil Engineering of Bucharest. Romania. https://www.researchgate.net/publication/266176805_State_of_the_art_in_the_pounding_mitigation_techniques
- [7] Arnold, C. & Reitherman, R. (1982). Building Configuration and Seismic Design. New York. <https://pdfcoffee.com/83-building-configuration-the-architecture-of-seismic-design-christopher-arnold-pdf-free.html>
- [8] Anagnostopoulos, S. (1992). Earthquake induced pounding in adjacent buildings. European Conference on Earthquake Engineering. https://scholar.google.com.pe/scholar?q=Anagnostopoulos,+S.,+Earthquake+induced+pounding;&hl=es&as_sdt=0&as_vis=1&oi=scholar
- [9] Maison, F. & Kasai, K. (1990). Analysis for type of structural pounding. Journal of Structural Engineering. Recuperado de <https://ascelibrary.org/doi/10.1061/%28ASCE%290733-9445%281990%29116%3A4%28957%29>
- [10] Maison, F. & Kasai, K. (1992). Dinámica de golpes cuando chocan dos edificios, Earthq. Ing. Estructura.
- [11] Cui, L., Guo, A. y Li, H. (2011). Investigation of the parameters of hertz impact model for the pounding analysis of highway bridge. Procedia Engineering. <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1877705811014263>
- [12] Papadrakakis, M., Mouzakis, H., Plevris, N., & Bitzarakis S. (1991). A Lagrange multiplier solution method for pounding of buildings during earthquakes. <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/abs/10.1002/eqe.4290201102>
- [13] Liu, Y., Liu, W., Wang, X., He, W. & Yang, Q. (2014). New equivalent linear impact model for simulation of seismic isolated structure pounding against moat wall. <https://www.hindawi.com/journals/sv/2014/151237/>
- [14] Khatiwada, S., Chouw, N., & Butterworth, W. (2014). A generic structural pounding model using numerically exact displacement proportional damping. <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0141029614000194>
- [15] Chau, K. & Wei, X. (2001). Pounding of structures modelled as non-linear impacts of two oscillators. <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/abs/10.1002/eqe.27>

- [16] Raja, H. (2013). Non-linear FEM Analysis of seismic induced pounding. <https://www.scielo.br/j/lajss/a/7JSNqcDfkhBQhpMxyP7Xqw/?format=pdf&lang=en>
- [17] Rajesh, P. & Athol, C. (2010). Building Pounding State of the Art: Identifying Structures Vulnerable to Pounding Damage. https://www.researchgate.net/publication/46118013_Building_Pounding_State_of_the_Art_Identifying_Structures_Vulnerable_to_Pounding_Damage
- [18] Afroz, K. & Vidyadhara, H. (2013). Seismic pounding of multistoreyed buildings. https://d1wqtxts1xzle7.cloudfront.net/34238020/seismic_pounding_of_multistoreyed_buildings-with-cover-page-v2.pdf?Expires=1658354776&signature=lrxlhynpchnfne3w1u5sideu-tx~fxrk9ejpucbnarubg9rqdnwlmwermolgiwuqcv6ksl~emw15jmn7toefqr8i2a5bnijrbcgvrzgt4ybamvw1fnncdz6cmgqot8f3fha7et1veqjjpo46m7mguy5gismdygnrvidup-jcfffvfe5p6sp5klk3amupgysert505bgqr4v7copytfeqnwbojutwn9axkyhnfov54h~firtzuzfshsetobk2t9nqgkdk4jkzocvmsi121nbeyh59jwhizxe8fjagffzqc7yxeaaflgw8b~xit9jyyogibmuomktdpnwxb5ycw__&key-pair-id=apkajlohf5ggslrbv4za
- [19] Reglamento Nacional de Edificaciones - E. 030. (2020). Norma E.030 Diseño sismoresistente (Primera edición digital ed.). Lima, Perú: Servicio Nacional de Capacitación para la Industria de la Construcción – SENCICO.
- [20] Ricalde, G. (2019). Análisis Dinámico comparativo Modal espectral Vs Tiempo historia de una estructura con muros de ductilidad limitada. Villa el Salvador, Perú. <https://repositorio.ucv.edu.pe/handle/20.500.12692/49656>
- [21] Robert, J. (2009). Non-linear FEM analysis of earthquake-induced pounding between the main building and the stairway tower of the Olive View Hospital, Engineering Structures, Vol. 31.
- [22] Jamal, K. & Vidyadhara, H. (2013). Seismic pounding of multistoreyed buildings. International Journal of Research in Engineering and Technology, 02, 12-17.
- [23] Rahman, A. et al. (2001). Seismic pounding of a case of adjacent multiple-storey buildings of differing total heights considering soil flexibility effects. Bulletin of the New Zealand Society for Earthquake Engineering 34(1), 40-59.
- [24] Puneeth, M., & S Karuna. (2015). Effect of seismic pounding between adjacent buildings (Vol. 4). Revista Internacional de Investigación en Ingeniería y Tecnología. <https://ijret.org/volumes/2015v04/i07/IJRET20150407034.pdf>
- [25] Ravindranatha, E. (2016). DZA study of seismicpounding effect between adjacent buildings and its mitigation by using different type of bracing systems. <https://d1wqtxts1xzle7.cloudfront.net/52018200/IRJET-V4I2124-with-cover-page-v2.pdf?Expires=1653534852&Signature=cFOR9ZcjF7SmKxxz6BUEz1k8fLMZFeyBdySg7v0iHIEfh-mLAAvkyBvlnG5zv8NapwBvXUXLRdwMfq7dR9jqt-hM6nPULPGbi3QaSrVLAj3CYNdel5MFSNJw9rgbzyHj0AsFposo82TmMB>
- [26] Karayannis, C. & Favvata, M. (2005). Earthquake-induced interaction between adjacent reinforced concrete structures with non-equal heights. Earthquake Engineering & Structural Dynamics. 34(1). 1-20.
- [27] Shehata, E. & Abdel, R. (2006). Seismic pounding between adjacent building structures. Electronic Journal of Structural Engineering, Vol. 6.
- [28] Dogan, M. (2009). Gunaydin, Pounding of adjacent RC buildings during seismic loads. Journal of Engineering and Architecture Faculty of Eskisehir Osmangazi University.
- [29] Reglamento Nacional de Edificaciones - E. 020. (2020). Reglamento Nacional de Edificaciones – E. 020 cargas (Primera edición digital ed.). Lima, Perú: Servicio Nacional de Capacitación para la Industria de la Construcción – SENCICO.
- [30] Norma Técnica E. 060. (2009). E. 060 Concreto armado. http://www3.vivienda.gob.pe/dnc/archivos/Estudios_Normalizacion/Normalizacion/normas/E060_concreto_armado.pdf