

Comparative Evaluation of Seismic Bidirectionality according to Spectral Modal Analysis and Linear Time History Analysis in Reinforced Concrete Staggered Buildings

Evaluación comparativa de la Bidireccionalidad Sísmica según el Análisis Modal Espectral y Análisis Lineal Tiempo Historia, en Edificaciones Escalonadas de Concreto Armado

Harol Bermudo, Br.¹, Rodrigo De La Cruz, Br.², Junior Orihuela, MEng¹

¹Universidad Peruana de Ciencias Aplicadas, Perú, u201519035@upc.edu.pe, pccijori@upc.edu.pe

²Universidad Peruana de Ciencias Aplicadas, Perú, u201610867@upc.edu.pe

Abstract— In a traditional seismic analysis, the existence of seismic forces acting unidirectionally in two or three independent directions is mainly considered. However, it has been shown that the nature of seismic motion is erratic, i.e., seismic actions act in different directions towards the structure. In the present study, the responses of 4 structural models with a staggered architectural geometry are analyzed using a Spectral Modal Analysis (SMA) and a Linear Time History Analysis (LTHA), with incidence angles with increments every 10° in order to show the effects of the seismic bidirectionality versus the unidirectional one through the maximum responses of the models. The results obtained show that, for the Spectral Modal Analysis (SMA), the largest angle of incidence where the largest responses are presented is 45° for the 4 models, and for the ALTH the angles of incidence are variable. Likewise, in both dynamic analyses, evaluating the seismic bidirectionality, responses of 10 to 40% more than a unidirectional analysis are obtained.

Keywords-- seismic bidirectionality, angle of incidence, staggered geometry.

Resumen — En un análisis sísmico tradicional, se considera principalmente la existencia de fuerzas sísmicas que actúan unidireccionalmente en dos o tres direcciones independientes. Sin embargo, se ha demostrado que la naturaleza del movimiento sísmico es errática, es decir, que las acciones sísmicas actúan en diferentes direcciones hacia la estructura. En el presente estudio, se analiza las respuestas de 4 Modelos Estructurales con una geometría arquitectónica escalonada usando un Análisis Modal Espectral (AME) y un Análisis Lineal Tiempo Historia (ALTH),

con ángulos de incidencia con incrementos cada 10° de manera que se evidencie los efectos de la bidireccionalidad sísmica frente al unidireccional a través de las respuestas máximas de los modelos. Los resultados alcanzados muestran que, para el Análisis Modal Espectral (AME) el ángulo de incidencia mayor donde se presentan mayores repuestas es 45° para los 4 modelos, y para el ALTH los ángulos de incidencia son variables. Asimismo, en ambos análisis dinámicos, evaluando la bidireccionalidad sísmica se obtienen respuestas de 10 a 40% más que un análisis unidireccional.

Palabras clave—: bidireccionalidad sísmica, ángulo de incidencia, geometría escalonada

I. INTRODUCCIÓN

En el 2019 se registraron 1,637 terremotos en todo el mundo, los cuales generaron daños tanto económicos como sociales. Por consiguiente, un adecuado diseño sismorresistente resulta necesario para proyectar edificaciones menos vulnerables, resilientes, sostenibles y asequibles con el fin de reducir de forma significativa el número de muertes, de personas afectadas y las pérdidas económicas luego de la ocurrencia de un terremoto [1].

Las normas actuales consideran las fuerzas sísmicas sobre los ejes principales, en la cual el movimiento del suelo actúa de manera unidireccional. Sin embargo, este planteamiento no es del todo correcto, dado que los movimientos reales del suelo se representan mejor, mediante componentes horizontales no ortogonales [2]. Asimismo, también se debe tomar en cuenta la variación del ángulo incidente de estas excitaciones bidireccionales que conducen a una compresión valiosa en el rango elástico lineal, y a su vez nos muestran un comportamiento real de las estructuras.

Digital Object Identifier (DOI):

<http://dx.doi.org/10.18687/LACCEI2022.1.1.350>

ISBN: 978-628-95207-0-5 ISSN: 2414-6390

En estudios previos del análisis bidireccional sísmico, se planteó la utilización de un modelo de histéresis bidireccional capaz de capturar los efectos de la interacción bidireccional, donde se determinó que la respuesta dinámica aumenta de hasta 6 a 7.5 veces en estructuras excéntricas, produciendo una mayor demanda inelástica [4]. Otra investigación, analizó la influencia del ángulo de incidencia sobre las demandas sísmicas de estructuras inelásticas sometidas a movimientos bidireccionales, donde se encontró que las respuestas máximas se producen en cualquier ángulo de incidencia, en incrementos cada 5° en sentido antihorario [5].

En la normativa americana (FEMA 356) considera el efecto multidireccional de la siguiente manera, las fuerzas y deformaciones asociadas con el 100% de las fuerzas de diseño en la dirección X más las fuerzas y deformaciones asociadas con el 30% en la dirección Y horizontal, de igual manera para las fuerzas y deformaciones asociadas a la dirección Y [6]. Así mismo, en Latinoamérica, el estudio de la bidireccionalidad sísmica ha tomado mayor interés a lo largo de los años principalmente en algunos países. En Bolivia, la normativa estructural considera la amplificación del 30% en los ejes X-Y, el cual representa el porcentaje de ajuste para un análisis bidireccional.

Frente a esta situación, en la presente investigación se planteó una evaluación comparativa de la bidireccionalidad sísmica en edificaciones escalonadas, con el fin de evidenciar la variabilidad porcentual de un análisis unidireccional, usado tradicionalmente respecto a la bidireccional en dos análisis dinámicos (AME y ALTH).

II. MÉTODO

Para la elaboración de esta investigación se realizó dos análisis como indica la NTP E030, en ambos se analiza la unidireccionalidad y bidireccionalidad sísmica con el fin de realizar la evaluación comparativa. Primero, se realiza un Análisis Modal Espectral (AME) donde se considera el análisis unidireccionalmente en los ejes ortogonales X e Y de manera independiente utilizando espectros inelásticos de pseudo-aceleraciones y de la misma manera la bidireccionalidad según el ángulo de incidencia con incrementos cada 10°. Por otra parte, se realiza el ALTH de acuerdo con la Ecuación (1) mediante el método de combinación modal y funciones de tiempo transitorios, el cual considera el comportamiento histérico de los elementos [7]

$$[M] \times \ddot{U} + [C] \times \dot{U} + [K] \times U = F(t) \quad (1)$$

Donde:

M: Matriz masa

C: Matriz de amortiguamiento

K: Matriz de rigidez

U: Desplazamiento

F(t): Fuerza externa o fuerza sísmica

La bidireccionalidad, se representa mediante solicitaciones en dos direcciones perpendiculares al mismo tiempo. Estas solicitaciones se estudian para ángulos de incidencia con variaciones de 10°. Los registros sísmicos mínimos que se deben utilizar son tres; estas se tienen que corregir por filtrado de señales y línea base, además, se escala según los parámetros sísmicos de la zona [7]. Asimismo, los modelos estructurales a utilizar son duales (pórtico más muro estructural), los 4 modelos para esta investigación son de 16 pisos y 20 pisos, ambos de geometría escalonada.

III. RESULTADOS

A. Modelos estructurales

Para validar este estudio vamos a considerar 4 estructuras cuyas configuraciones tienen irregularidad de geometría vertical. El modelo 1 y 2 con altura de entrepiso en todos los niveles de 3 m, y el modelo 3 y 4 con altura del primer nivel de 5 m y los siguientes 3.5 m. Estas estructuraciones corresponden a edificaciones escalonadas siguiendo una tendencia modernista en los próximos años. Los elementos estructurales para los dos primeros modelos tienen secciones de 70x70 cm² para columnas y 30x50 cm² para vigas, los otros presentan sección de 60x60 cm² para la columnas y 30x60cm² para las vigas. En la Fig. 1 se muestran los modelos de estudio.

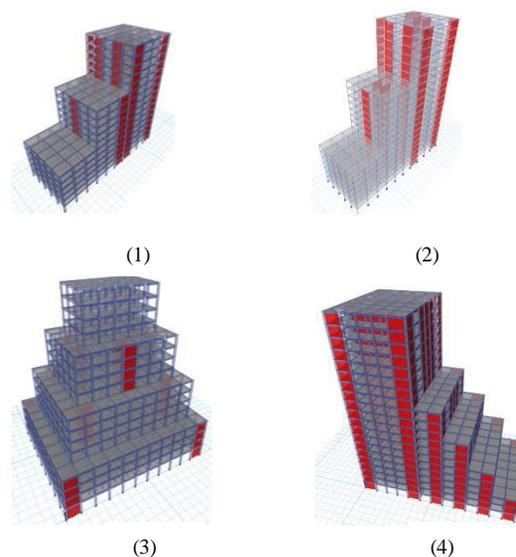


Fig. 1. (1) Modelo 1 y (3) Modelo 3, edificaciones de 16 pisos.
(2) Modelo 2 y (4) Modelo 4, edificaciones de 20 pisos.

B. Solicitaciones Sísmicas

En el Análisis Modal espectral se utilizaron los siguientes espectros pseudoaceleraciones para cada modelo.

En el Análisis Tiempo Historia se hace uso de tres registros sísmicos de la estación Parque de la Reserva, Cercado de Lima, Lima (latitud: -12.70, longitud: -77.04) [8]. Las siguientes figuras se muestran los acelerogramas corregidos por línea base y filtrado de señales.

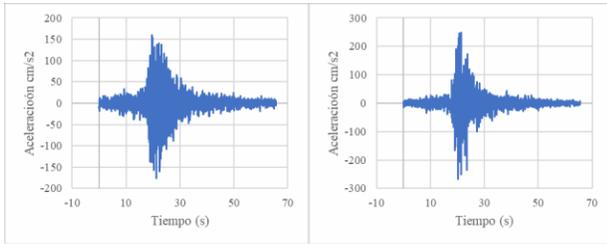


Fig. 2. Acelerograma 1966 (EW, izquierda y NS, derecha).

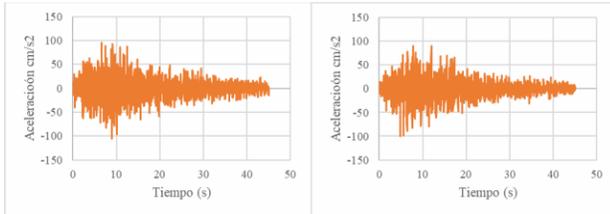


Fig. 3. Acelerograma 1970 (EW, izquierda y NS, derecha).

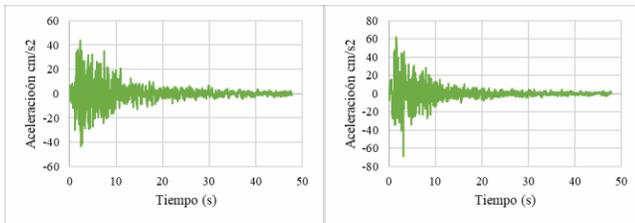


Fig. 4. Acelerograma 1974 (EW, izquierda y NS, derecha).

Estos acelerogramas fueron corregidos usando el software Seismosignal. Además, fueron escalados usando una compatibilización con el espectro de diseño de los modelos dentro del rango de periodos [0.2T; 1.5T] usando el software SeismoMatch.

C. Cortante Basal

Para las respuestas obtenidas de los dos análisis realizados se tomaron los valores máximos obtenidos para cada uno de los modelos.

De manera que, para el Modelo 1 (Fig. 5.) se obtuvo en el Análisis Modal Espectral (AME), que la máxima respuesta aplicando los ángulos de incidencia se da en el ángulo 45°, 135°, 225° y 315°, respectivamente el mismo valor en los cuatro cuadrantes. Asimismo, el valor es mayor en 13.28% con respecto al ángulo 0° en los ejes X y Y (Fig. 6.). Para el Análisis Lineal Tiempo Historia (ALTH) la mayor respuesta se obtuvo en el análisis del sismo 1970 con una variación con respecto al ángulo 0° de 8.71% (Eje X - 340° - Fig. 7) y 36.77% (Eje Y - 230° - Fig. 8).

En las siguiente figuras, se observa las variaciones significativas considerando el valor máximo en ambos análisis sísmicos respecto al ángulo 0°, valor representado por los parámetros de la Normativa E.30.

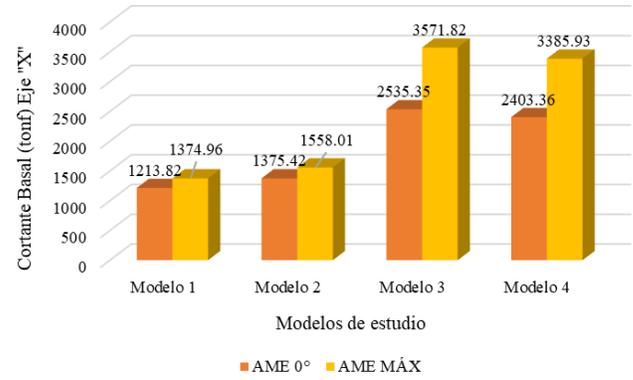


Fig. 5. Comparación de las respuestas de la Cortante Basal del Eje "X" respecto al ángulo 0° para el AME.

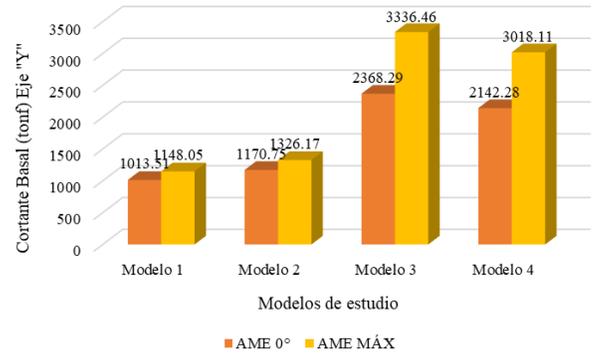


Fig. 6. Comparación de las respuestas de la Cortante Basal del Eje "Y" respecto al ángulo 0° para el AME.

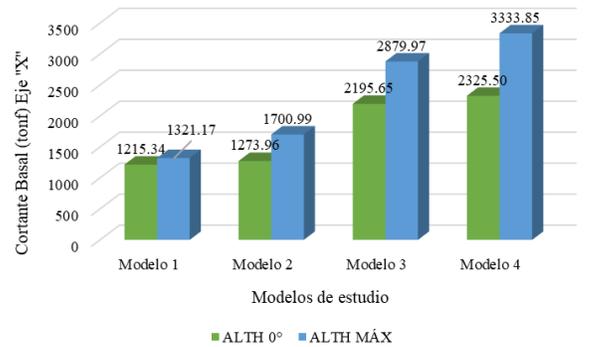


Fig. 7. Comparación de las respuestas de la Cortante Basal del eje X respecto al ángulo 0° para el ALTH.

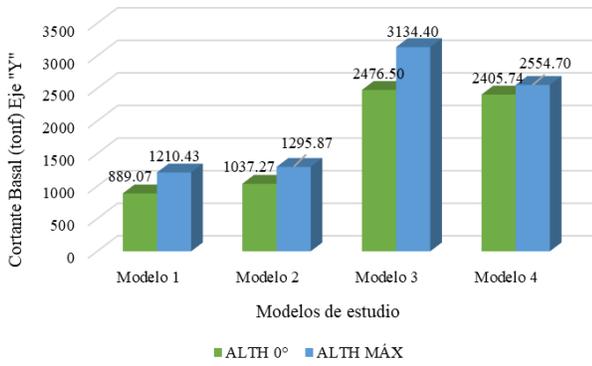


Fig. 8. Comparación de las respuestas de la Cortante Basal del eje Y respecto al ángulo 0° para el ALTH.

Asimismo, para el Modelo 2, en el AME se obtuvo una variación respecto al ángulo 0° de 13.28% en ambos ejes y ángulo de incidencia de 45°. De la misma manera, en el ALTH la mayor respuesta se dio para el sismo 1974 con una variación de 33.52% (X - 300°) y 24.93% (Y - 260°).

Realizando el AME para el Modelo 3 de 16 pisos se observó que la variación promedio respecto al ángulo 0° fue de 41% para ambos ejes, y de la misma manera para el Modelo 4 de 20 pisos.

En el ALTH, para el Modelo 3 las variación promedio de la cortante basal fue de 33% y 34% para los ejes X-Y respectivamente, y para el Modelo 4 de 44% y 6.19%. Estos valores corresponden al registro donde se presenta mayor respuesta de daño en la estructura.

D. Momento de Volteo

De igual manera se tomó en cuenta respuestas máximas para cada modelo evaluado según el análisis correspondiente.

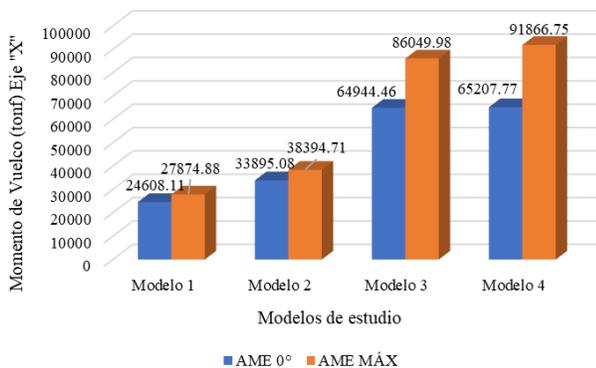


Fig. 9. Comparación del Momento del Volteo del Eje X para el AME.

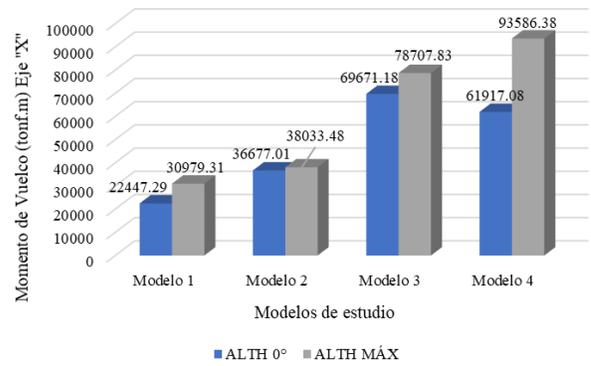


Fig. 10. Comparación del Momento del Volteo del eje X para el ALTH.

De manera que, para el Modelo 1 se obtuvo en el AME una variación de 13.28% con un ángulo de incidencia de 45°, y para el ALTH la mayor respuesta se obtuvo en el análisis del sismo 1974 con una variación con respecto del ángulo 0° de 38.01% (X - 220°) y 29.42% (Y - 60°). Asimismo, para el Modelo 2, en el AME se obtuvo un variación respecto al ángulo 0° de 13.28% (ángulo de incidencia de 45° en ambos ejes) mientras que, en el ALTH la mayor respuesta se dio para el sismo 1970 con una variación de 12.20% (X-130°) y 17.76% (Y-210°).

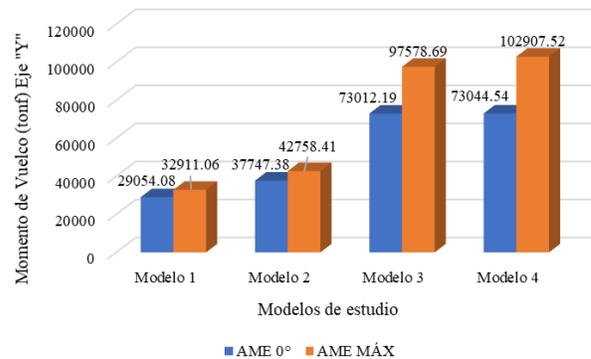


Fig. 11. Comparación del Momento del Volteo del Eje X para el AME.

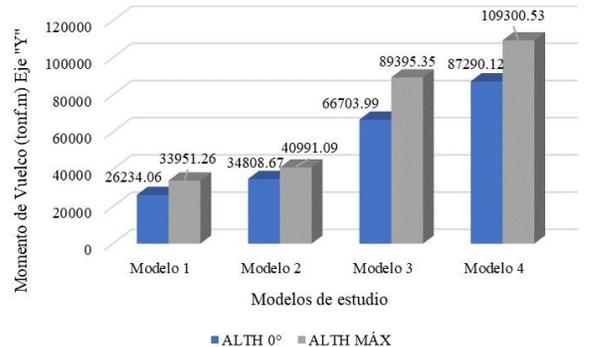


Fig. 12. Comparación del Momento del Volteo del eje Y para el ALTH.

Realizando el AME para el Modelo 3 se observó que la variación promedio respecto al ángulo 0° fue de 33% y 34% para X-Y respectivamente y para el Modelo 4 de 41% en ambos ejes.

En el ALTH, para el Modelo 3 las variación del momento de volteo fue de 13% y 34% para los ejes X-Y respectivamente, y para el Modelo 4 de 51% y 22%.

E. Desplazamientos

Se tomo las respuestas máximas obtenidas en los dos tipos de análisis. Para el caso del AME, se multiplicaron los desplazamiento elásticos por el factor 0.85 para estructuras irregulares y el R que depende del sistema estructural, para obtener las respuestas inelásticas.

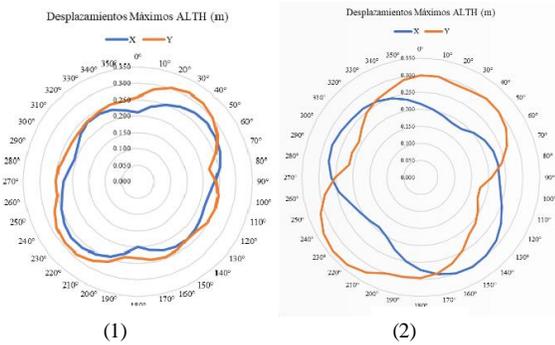


Fig. 13. ALTH evaluado para ángulos de incidencia cada 10°. (1) Modelo 1 sismo 1974 (2) Modelo 2 sismo 1974.

De manera que, para el Modelo 1 se obtuvo en el AME una variación de 6.28% (X-50°) y de 13.28% (Y-40°), y para el ATHL la mayor respuesta se obtuvo en el analisis del sismo 1974 con una variación con respecto del ángulo 0° de 30.82% (X-50°) y 20.55% (Y-30°). Asimismo, para el Modelo 2, en el AME se obtuvo un variación respecto al ángulo 0° de 6.28% (X-50°) y de 13.28% (Y-50°) mientras que, en el ATHL la mayor respuesta se dio para el sismo 1974 con una variación de 42.72% (X-150°) y 10.11% (Y-230°).

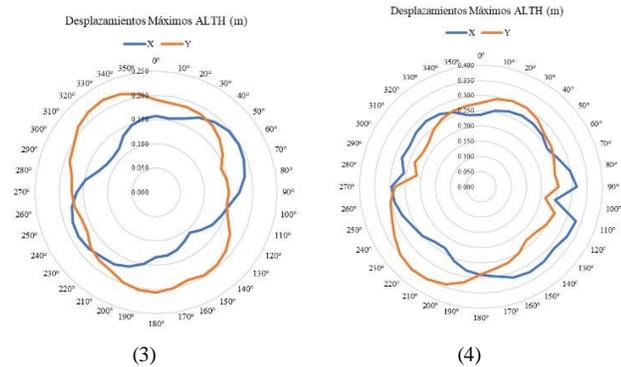


Fig. 14. Desplazamientos máximos para el Modelo 3 y 4 según el ALTH.

Realizando el AME para el Modelo 3 de 16 pisos se observó que la variación promedio respecto al ángulo 0° fue de 39% para ambos ejes, mientras que para el modelo 4 de 20 pisos fue de 10% para el eje X y 40% para el eje Y, la diferencia en el eje X se presenta debido a que el modelo 4 presenta mayor rigidez por se sistema de muros estructurales.

En el ALTH, para el Modelo 3 las variaciones promedio de los desplazamientos máximos fue de 23% y 13% para los ejes X-Y respectivamente, y para el Modelo 4 de 27% y 19% de la misma manera.

F. Derivas

Se tomaron las respuestas máximas para cada caso de análisis para cada modelo, se evidencio que al aplicar la bidireccionalidad sísmica a través de los ángulos de incidencia se podría superar el rango mínimo establecido por la NTPE030 que indica que la distorsión límite para estructuras de concreto armado deberá ser de <0.007.

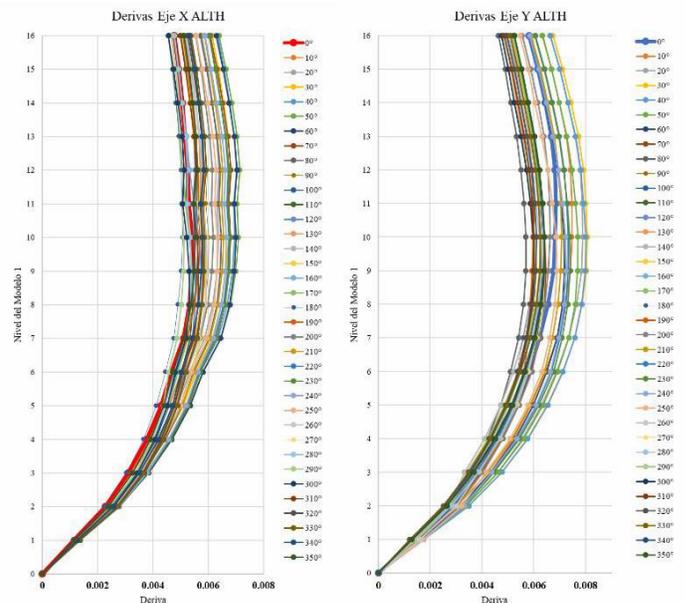


Fig. 15. Derivas del Modelo 1 para ambos ejes del ALTH.

De manera que, para el Modelo 1 se obtuvo en el AME una variación de 6.96% (X-50°) y de 13.27% (Y-50°), y para el ATHL la mayor respuesta se obtuvo en el analisis del sismo 1974 con una variación con respecto del ángulo 0° de 31.81% (X-50°) y 17.73% (Y-30°).

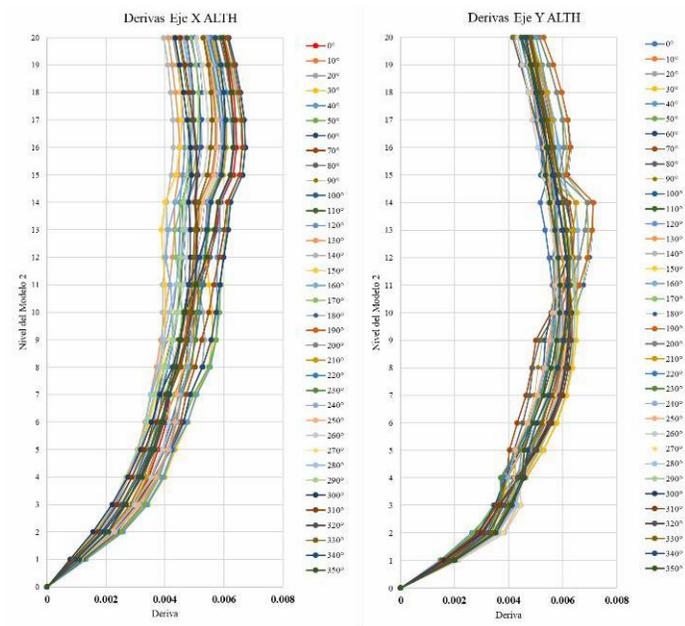


Fig. 16. Derivas del Modelo 2 para ambos ejes del ALTH.

Asimismo, para el Modelo 2, en el AME se obtuvo un variación respecto al ángulo 0° de de 6.87% (X-50°) y de 13.28% (Y-50°) mientras que, en el ATHL la mayor respuesta se dio para el sismo 1970 con una variación de 4.86% (X-60°) y 24.48% (Y-190°).

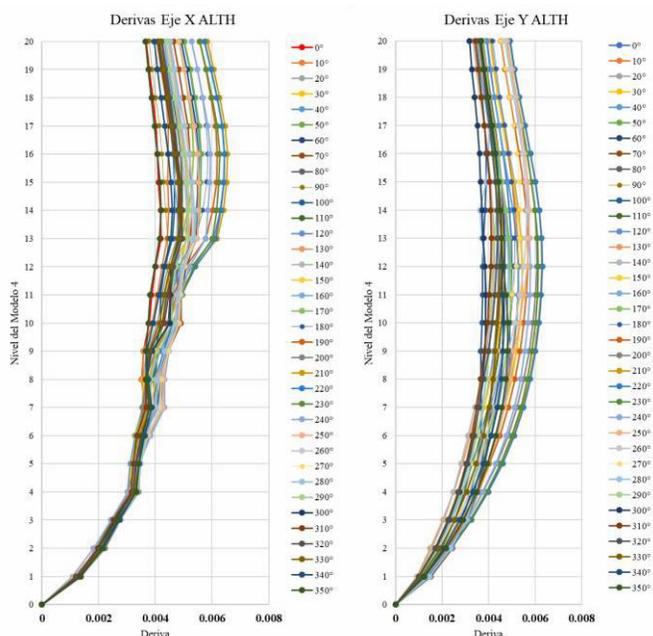


Fig. 18. Derivas del Modelo 4 para ambos ejes del ALTH.

Analizando las derivas para el Modelo 3 según el AME se determinó que la variación promedio respecto al ángulo 0° fue de 38% para ambos ejes (X-Y), mientras que para el Modelo 4 fue de 8.36% para el eje X y 39.36% para el eje Y, la diferencia en el eje X se presenta debido a que el Modelo 4 presenta mayor rigidez por los muros estructurales.

En el ALTH, para el Modelo 3 las variaciones promedio de los derivas máximas fue de 30.49% y 32.54% para los ejes X-Y respectivamente, y para el Modelo 4 de 28% y 21% de la misma manera.

IV. VALIDACIÓN DE RESULTADOS

La aplicación de la bidireccionalidad sísmica, como normativa específica no existe actualmente. No obstante, en algunos países evalúan el efecto multidireccional, donde consideran una combinación de ajuste o porcentaje de amplificación para reflejar el efecto real de un evento sísmico en la estructura.

La normativa americana (FEMA 356) y boliviana establecen factores de amplificación para las fuerzas ortogonales en ambos ejes, es decir, se aplica las fuerzas al 100% en la dirección X más 30% en la dirección Y, y 100% en la dirección Y más 30% en la dirección X. Este valor de amplificación se encuentra en el rango de los resultados obtenidos aplicando bidireccionalidad sísmica [10%-40%], que nos da entender que estos valores comprometen a un factor de amplificación donde se aplica el análisis unidireccional. Asimismo, en la normativa argentina para construcciones sismorresistentes, también se evidenció la aplicación de fuerza adicional en el ángulo 45°, que corresponde al ángulo de incidencia donde se presentan mayores respuestas de daño para el AME.

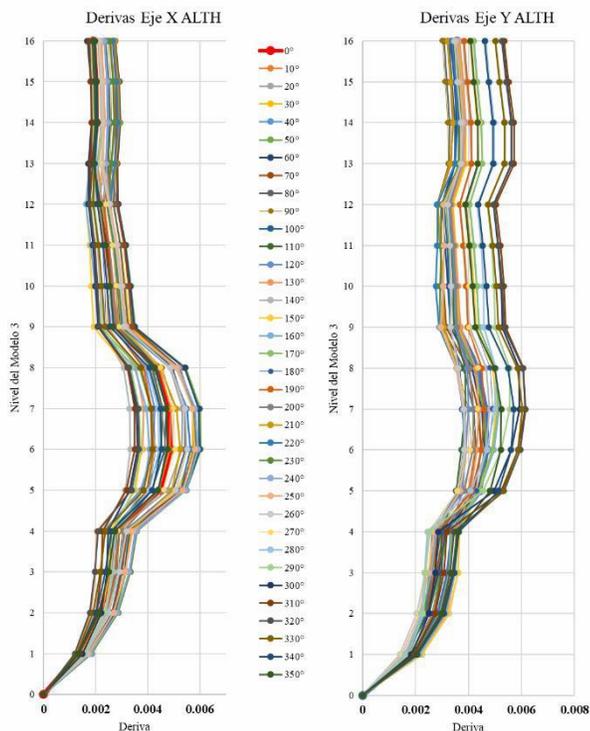


Fig. 17. Derivas del Modelo 3 para ambos ejes del ALTH.

V. CONCLUSIONES

Al realizar un análisis con solicitaciones de bidireccionalidad se demuestra que el análisis unidireccional no refleja resultados máximos. Es decir, no es suficiente con un análisis unidireccional para representar las respuestas reales de un sismo sobre una estructura. El valor de un análisis unidireccional presenta una gran variación frente a sus respuestas máximas obtenidas a través de la aplicación de ángulos de incidencia. Del presente estudio se obtuvo que:

- Al elaborar el Análisis Lineal Tiempo Historia para cada modelo escalonado, donde se evaluó la unidireccionalidad basada en la norma peruana E.030 y la bidireccionalidad sísmica, se resalta que, en los 4 modelos, los ángulos incidentes fluctúan según el registro histórico sísmico y el eje de análisis, esto se debe principalmente a que en el ALTH son datos acelerográficos en el cual las fuerzas de acción varían según el periodo de la estructura.
- Para las respuestas de derivas, los modelos 1 y 2 superan el límite recomendado por la norma E030 de <0.007 aplicando la bidireccionalidad sísmica para el AME y el ALTH. Asimismo, los Modelos 3 y 4 presentan un aumento notorio correspondiente al ángulo 0° . De tal manera que, se valida la importancia de tener en cuenta las solicitaciones bidireccionales para la evaluación e interpretación de resultados más reales.
- Tanto para las respuestas de cortante basal, momento de volteo, desplazamientos y derivas se obtienen grandes variaciones considerando la bidireccionalidad sísmica en un rango del 10% al 40% frente al análisis unidireccional.
- Existe una relación entre las respuestas obtenidas en el AME para cada uno de los Modelos irregulares expuestos, la cual presenta una respuesta máxima en los ángulos de 45° , 135° , 225° y 315° , en la cual se repite el mismo valor para los cuatro cuadrantes.
- Para investigaciones futuras, se recomienda tomar en cuenta una mayor muestra de edificaciones con diversas irregularidades, así como en planta y altura, mayores registros sísmicos, y un Análisis No lineal.

AGRADECIMIENTOS

Este trabajo forma parte del proyecto de investigación de la Facultad de Ingeniería Civil de la Universidad Peruana de Ciencias Aplicadas (UPC), Lima.

REFERENCIAS

- [1] Tavera, H. (2019). Conceptos Básicos | Instituto Geofísico del Perú. Retrieved June 21, 2019. Adaptado de <https://portal.igp.gob.pe/conceptos-basicos>.
- [2] Dutta, S., & Kunath, S. (2013). Effect of bidirectional interaction on seismic demand of structures. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 52, 27-39.
- [3] Simón, F., Rodríguez, J. & Pfitzschner, J. (1999). DIFRACCIÓN ACÚSTICA POR FACHADAS ESCALONADAS Y SU APLICACIÓN A LA ARQUITECTURA MODERNISTA: UNA APROXIMACIÓN DE SU PROTECCIÓN ACÚSTICA. Madrid: Tecni-Acústicas.
- [4] Hussain, M., & Dutta, S. (1 de 6 de 2020). Inelastic seismic behavior of asymmetric structures under bidirectional ground motion: An effort to incorporate the effect of bidirectional interaction in load resisting elements. *Structures*, 25, 241-255.
- [5] Osorio Bustamante, E. (2012). Efectos de los esfuerzos cortantes biaxiales en la respuesta sísmica de columnas de hormigón armado. (Tesis doctoral, Universidad Politécnica de Catalunya, Departamento de Ingeniería de la Construcción, Barcelona, España).
- [6] FEMA, «HAZUS-MH 2.1. Multi-Hazard loss estimation methodology: earthquake model. Technical Manual,» FEMA, Washington D.C., 2011. Transl. J. Magn. Japan, vol. 2, pp. 740–741, August 1987 [Digests 9th Annual Conf. Magnetics Japan, p. 301, 1982].
- [7] Ministerio de Vivienda, Construcción y Saneamiento. Norma Técnica E.030 Diseño Sismorresistente, 2018
- [8] REDACIS [Internet]. Red Acelerográfica del CISMID/FIC/UNI. 2019. Disponible en: <http://ceois.cismid-uni.org/red/>