UNIVERSIDAD PERUANA DE CIENCIAS APLICADAS

FACULTAD DE INGENIERÍA

PROGRAMA ACADÉMICO DE INGENIERÍA CIVIL

**Análisis de la Bidireccionalidad Sísmica en la Respuesta de Estructuras de
Concreto Armado con Irregularidades de Esquina Entrante y de Piso Blando**

TRABAJO DE INVESTIGACIÓN

Para optar el grado de bachiller en Ingeniería Civil

AUTOR(ES)

Sobrado Ortega, Victor Hugo (0000-0002-1869-1431)

Yaranga Huamaní, Rogelio (0000-0003-0776-2262)

ASESOR

Orihuela Dávila, Junior Didi (0000-0002-0209-2055)

Lima, 29 de enero de 2020

DEDICATORIA

A Dios, por la vida y haber puesto en mi camino a personas buenas

A mis padres, por incansable sacrificio y apoyo

A mi hermana Yesi, por ser mi ejemplo y fortaleza

Al P. Andrés y en memoria del P. Ugo por su labor en favor de muchos jóvenes, Solo Dios

SOBRADO ORTEGA, Victor Hugo

A Dios por permitirme disfrutar de esta vida.

A mamá Vilma Huamaní y a abuelita Eusebia Quispe que descansan en paz y guían mi camino.

A mis seres queridos papá, mamá y hermanos (as), ya que son el motor de mi perseverancia.

A todas las personas que me apoyaron en su momento tíos (as) y primos (as).

YARANGA HUAMANÍ, Rogelio

AGRADECIMIENTOS

Estamos profundamente agradecidos con todas las personas que apostaron por la educación de muchos jóvenes y estamos muy orgullosos de formar parte de la promoción de Beca Excelencia Académica (BEA). Este trabajo de investigación no se hubiese podido realizar sin la previa obtención de los conocimientos necesarios a lo largo de estos 5 años. Así, agradecemos a todos nuestros profesores no solo a los de la línea de investigación de este trabajo, sino a todos quienes durante estos años nos han formado y transmitido sus conocimientos. Damos las gracias a nuestro profesor Ing. David Álvarez por su tiempo, paciencia y ganas de transmitir sus conocimientos, y por aportar enormemente a la realización de esta investigación. A la UPC por haberse interesado no solo en llenarnos de teorías, sino también por habernos formado como buenas personas por medio del Grupo Excelencia Académica (GEA), del cual ambos formamos parte y somos egresados del Programa de Liderazgo. A nuestros compañeros, con quienes recorrimos juntos esta etapa universitaria y, sobre todo, a nuestros padres y familiares por ser las personas quienes confiaron y apoyaron durante estos años.

RESUMEN

El diseño sísmico de las edificaciones se realiza, por lo general, mediante el análisis unidireccional para cada uno de los ejes principales de manera independiente. Sin embargo, los eventos sísmicos tienen un comportamiento bastante aleatorio e imponen solicitaciones bidireccionales a las estructuras. En el presente trabajo se realiza el estudio de la respuesta en edificaciones con irregularidades de esquina entrante y de piso blando. Para ello, se ha realizado el análisis tiempo historia lineal (ATHL) de éstas imponiendo solicitaciones sísmicas en dos direcciones ortogonales. Así, se obtiene la respuesta estructural con variaciones de ángulos de incidencia de 10° y se compara con la respuesta derivada del análisis unidireccional. Los resultados obtenidos muestran que el análisis tradicional subestima las respuestas de las estructuras. Se obtienen variaciones de hasta 50% y 72% para estructuras modelos con esquina entrante y piso blando respectivamente.

Palabras clave: bidireccionalidad; ángulo de incidencia; sismo; esquina entrante; piso blando; respuesta

Analysis of Seismic Bidirectionality in the Response of Reinforced Concrete Structures
with Irregularities of Incoming Corner and Soft Floor

ABSTRACT

The seismic design of buildings is usually performed using one-way analysis for each of main axes independently. However, seismic events have random behavior and impose bidirectional requests on structures. In this work, the study of the response in buildings subject to earthquake loads with irregularities of incoming corner and soft ground. For this, the linear time history analysis (LHTA) of these has been carried out imposing seismic stresses in two orthogonal directions. Thus, the structural response with incidence angle variations of 10° is obtained and compared with the response derived from the unidirectional analysis. Variations of up to 50% and 72% are obtained for model structures with incoming corner and soft floor respectively.

Keywords: bidirectionality; angle of incidence; earthquake; incoming corner; soft floor; response

TABLA DE CONTENIDOS

1	INTRODUCCIÓN.....	1
2	METODOLOGÍA.....	2
2.1	METODOLOGÍA DE ANÁLISIS.....	2
2.2	CONSIDERACIÓN DE LA BIDIRECCIONALIDAD SÍSMICA EN LAS RESPUESTAS DE LAS ESTRUCTURAS.....	3
3	RESULTADOS	3
3.1	MODELOS ESTRUCTURALES	3
3.2	SOLICITACIONES SÍSMICAS	4
3.3	CORTANTE BASAL.....	5
3.4	MOMENTO DE VOLTEO.....	5
3.5	DESPLAZAMIENTOS LATERALES	6
3.6	FACTOR DE AMPLIFICACIÓN POR BIDIRECCIONALIDAD SÍSMICA.....	10
4	CONCLUSIONES	10
5	REFERENCIAS	11
6	ANEXOS	13

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. (1) Modelo 1, con irregularidad de esquina entrante (2-a) Modelo 2, con irregularidad de piso blando (2-b) Elevación del Modelo 2.....	3
Figura 2. Espectros de pseudoaceleraciones.....	4
Figura 3. Acelerograma 1966 (EW, izquierda y NS, derecha).....	4
Figura 4. Acelerograma 1970 (EW, izquierda y NS, derecha).....	4
Figura 5. Acelerograma 1974 (EW, izquierda y NS, derecha).....	4
Figura 6. Cortante basal (T_n) del Modelo 1 (eje X, izquierda y eje Y, derecha)	5
Figura 7. Cortante basal (T_n) del Modelo 2 (eje X, izquierda y eje Y, derecha)	5
Figura 8. Momento de volteo ($T_n.m$) del Modelo 1 (eje X, izquierda y eje Y, derecha).....	6
Figura 9. Momento de volteo ($T_n.m$) del Modelo 2 (eje X, izquierda y eje Y, derecha).....	6
Figura 10. Desplazamientos laterales del primer piso(mm) del Modelo 1 (eje X, izquierda y eje Y, derecha).....	7
Figura 11. Desplazamientos laterales del primer piso(mm) del Modelo 2 (eje X, izquierda y eje Y, derecha).....	7
Figura 12. Derivas del Modelo 1, eje X	8
Figura 13. Derivas del Modelo 1, eje Y	8
Figura 14. Derivas del modelo 2, eje X.....	9
Figura 15. Derivas del modelo 2, eje Y	9

1 INTRODUCCIÓN

Existen muchos países que se encuentran expuestos al riesgo de la ocurrencia de un gran evento sísmico, especialmente aquellos que se ubican en el Cinturón de Fuego del Pacífico. La historia muestra que estos eventos han producido grandes pérdidas económicas y humanas como, por ejemplo, en Armenia 1999 (Colombia), Pisco 2007 (Perú), Maule 2010 (Chile), Salta 2015 (Argentina) y Muisne 2016 (Ecuador) [1]. El terremoto en Puebla 2017 (México) ocasionó el colapso de un edificio, no por problemas de diseño ni por la interacción suelo-estructura, sino por la direccionalidad sísmica, ya que las respuestas alcanzadas fueron mayores a las calculadas con el análisis unidireccional [2]. Así, es necesario que el diseño sísmico de las edificaciones se realice considerando la naturaleza de los eventos sísmicos, de esta manera el comportamiento de los modelos será más cercano al de las estructuras reales.

Gran parte de los códigos de diseño sismorresistente indican que el estudio de las estructuras se debe realizar mediante el análisis unidireccional en cada eje principal de manera independiente; sin embargo, esta consideración no es correcta, ya que los movimientos sísmicos son fenómenos bidimensionales en el plano horizontal y tienen un comportamiento aleatorio [3]. Una pregunta importante de la dinámica estructural es si las respuestas calculadas con el análisis tradicional son similares a las respuestas más exactas obtenidas considerando la bidireccionalidad sísmica. Al respecto, Kostinakis et al. [4] estudian la influencia del ángulo de incidencia en edificios simétricos respecto a sus ejes estructurales. Señalan que la respuesta máxima no depende del ángulo en estructuras simétricas con igual rigidez en las dos direcciones ortogonales; en cambio, el ángulo es influyente en edificaciones que tienen distinta rigidez en sus ejes estructurales. Por su parte, Magliulo et al. [5], Cantagallo et al [6], Armaloo y Emami [7] realizan estudios del comportamiento sísmico de estructuras irregulares en planta. Los resultados obtenidos muestran que el ángulo de incidencia influye significativamente en la respuesta de las estructuras. A su vez, Heredia y Machicao [8] desarrollan un estudio de la demanda estructural de modelos torsionalmente rígidos y flexibles. El incremento de la respuesta es mayor en los modelos torsionalmente flexibles y se incrementa según el grado de irregularidad. Estas investigaciones evidencian que las respuestas de las estructuras se ven influenciadas por la bidireccionalidad sísmica.

En este estudio se consideran dos tipos de estructuras de concreto armado de tres niveles, uno con irregularidad de esquina entrante y otro con irregularidad de piso blando. En primer lugar, se realiza el Análisis Modal Espectral (AME), según el proceso tradicional que señalan los códigos de diseño sísmico [9-11]. En segundo lugar, se realiza el Análisis Tiempo

Historia Lineal (ATHL) considerando la bidireccionalidad sísmica con ángulos de incidencia incrementales de 10°. Finalmente, se analiza la variación de las respuestas de interés obtenidas por ambos tipos de análisis.

2 METODOLOGÍA

2.1 Metodología de análisis

El desarrollo de la presente investigación considera dos tipos de análisis, uno para analizar las estructuras considerando la unidireccionalidad sísmica y el otro para realizar el estudio de la bidireccionalidad sísmica. Por un lado, se realiza el Análisis Modal Espectral (AME) considerada dentro de muchos códigos de diseño sismorresistente. Esta metodología tradicional realiza el análisis unidireccionalmente en los ejes ortogonales X e Y de manera independiente utilizando espectros inelásticos de pseudo-aceleraciones y factor de amortiguamiento $C=0.05$ [12]. Por otra parte, se realiza el ATHL de acuerdo con la Ecuación 1 mediante el método de combinación modal y funciones de tiempo transitorios, por ser adecuada para solicitaciones sísmicas [13].

$$\vec{K}\vec{X}(t) + \vec{C}\dot{\vec{X}}(t) + \vec{M}\ddot{\vec{X}}(t) = \vec{r}(t) \quad (1)$$

Donde:

M, C y K representan las matrices de masa, viscosidad y rigidez de la estructura respectivamente.

$\ddot{\vec{X}}$, $\dot{\vec{X}}$ y $\vec{X}$ representan la aceleración, velocidad y desplazamiento de la estructura respectivamente.

$r(t)$ son las fuerzas externas que se dan según el paso del tiempo.

En esta se considera la bidireccionalidad, por lo que se imponen 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 [14]. Asimismo, los modelos estructurales a utilizar son de Concreto Reforzado (CR) de sistema estructural aporticado, y niveles entre tres a cuatro pisos.

2.2 Consideración de la bidireccionalidad sísmica en las respuestas de las estructuras

La bidireccionalidad influye en las respuestas sísmicas de diseño y puede ser fuente de colapso de una estructura [2]. Las respuestas sísmicas que se calculan son a nivel global y a continuación, se plantea la siguiente ecuación que considera un factor de amplificación por bidireccionalidad a las respuestas calculadas mediante el análisis unidireccional.

$$R_f = K R_0 \quad (2)$$

Donde, R_f es la respuesta final que considera la bidireccionalidad en un eje, R_0 es la respuesta que se obtiene del análisis sísmico unidireccional en cada eje y el factor K depende del tipo de irregularidad de la edificación y de la respuesta a obtener, estos factores se presentan en los resultados.

3 RESULTADOS

3.1 Modelos estructurales

Para validar este estudio vamos a considerar 2 estructuras cuyas configuraciones tienen irregularidad de esquina entrante (modelo 1) con altura de entrepiso en el primer nivel de 4 m y los siguientes 3 m, y el otro de piso blando (modelo 2) con altura del primer nivel de 4,5 m y los siguientes 3 m. Estas estructuraciones corresponden a edificaciones comunes en Lima. Se considera suelo con velocidades de propagación de onda de corte entre 500 m/s y 1500 m/s. Los elementos estructurales de ambas estructuras tienen secciones de 45x70 cm² las columnas y 30x60 cm² las vigas. En la Fig. 1 se muestran los modelos de estudio.

Figura 1. (1) Modelo 1, con irregularidad de esquina entrante (2-a) Modelo 2, con irregularidad de piso blando (2-b) Elevación del Modelo 2

3.2 Solicitaciones sísmicas

En el análisis modal espectral se utilizaron los siguientes espectros pseudoaceleraciones para modelo y para cada eje estructural:

Figura 2. Espectros de pseudoaceleraciones

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) [15]. Las siguientes figuras se muestran los acelerogramas mencionados:

Figura 3. Acelerograma 1966 (EW, izquierda y NS, derecha)

Figura 4. Acelerograma 1970 (EW, izquierda y NS, derecha)

Figura 5. Acelerograma 1974 (EW, izquierda y NS, derecha)

3.3 Cortante basal

En las figuras 6 y 7 se muestran las variaciones de cortante basal que se obtienen con los dos tipos de análisis para el modelo 1. Se observa que en el eje X se presentan variaciones de hasta 31.61% (0°) y en el eje Y se tienen variaciones hasta 49.67% (40°). En el modelo 2 se obtienen variaciones de 72.39% (130°) en el eje X y 18.77% (10°) en el eje Y.

Figura 6. Cortante basal (T_n) del Modelo 1 (eje X, izquierda y eje Y, derecha)

Figura 7. Cortante basal (T_n) del Modelo 2 (eje X, izquierda y eje Y, derecha)

3.4 Momento de volteo

Al igual que las cortantes basales se analiza el momento de volteo. En el modelo uno se calcularon variaciones de hasta 45.91% (40°) y 32.15% (130°) en los ejes X e Y respectivamente. También, en el modelo 2 se tuvieron variaciones de 20.99% (10°) en el eje X y 69.24% (130°) en el eje Y.

Figura 8. Momento de volteo (Tn.m) del Modelo 1 (eje X, izquierda y eje Y, derecha)

Figura 9. Momento de volteo (Tn.m) del Modelo 2 (eje X, izquierda y eje Y, derecha)

3.5 Desplazamientos laterales

En las siguientes figuras se muestran los desplazamientos en el primer nivel que se tienen para cada estructura analizada. En el modelo 1 se puede observar variaciones de hasta 31.13% (0°) en el eje X y 48.59% (40°) en el eje Y. También, en el segundo modelo se presentan variaciones de hasta 71.52% (110°) en el eje X y 18.95% (190°) en el eje Y.

Figura 10. Desplazamientos laterales del primer piso(mm) del Modelo 1 (eje X, izquierda y eje Y, derecha)

Figura 11. Desplazamientos laterales del primer piso(mm) del Modelo 2 (eje X, izquierda y eje Y, derecha)

Con los resultados de desplazamientos obtenidos para cada nivel se ha realizado el control de derivas de acuerdo con las consideraciones de FEMA 356 para estructuras de concreto armado [11].

Figura 12. Derivas del Modelo 1, eje X

Figura 13. Derivas del Modelo 1, eje Y

Figura 14. Derivas del modelo 2, eje X

Figura 15. Derivas del modelo 2, eje Y

De acuerdo con los resultados obtenidos se puede observar que en la mayor parte de los ángulos de incidencia analizados las derivas obtenidas sobrepasan el límite de distorsión del entrepiso obtenidas según el análisis modal espectral (líneas de color rojo). El caso de los ejes resistentes X para ambos modelos, estas no sobrepasan el límite de desempeño sísmico (0.007), ya que han sido diseñadas de manera conservadora, pero en los ejes resistentes Y para los dos modelos en algunos ángulos de incidencia no cumplen con dicha condición.

3.6 Factor de amplificación por bidireccionalidad sísmica

De acuerdo con los resultados obtenidos se plantean los siguientes factores de amplificación por bidireccionalidad sísmica considerando las variaciones máximas obtenidas para las respuestas estudiadas. El factor K es aplicable para respuestas como desplazamientos, cortante basal y momento de volteo. Para estructuras con irregularidad de esquina entrante el factor K es 1,5 y para estructuras con irregularidad de piso blando K es 1,7.

4 CONCLUSIONES

El análisis unidireccional no refleja las respuestas más exactas de las edificaciones, ya que las respuestas máximas obtenidas no se presentan en los ejes que comúnmente se analizan; es decir, las respuestas calculadas con el análisis unidireccional subestiman las respuestas reales de las estructuras. El efecto aumenta en medida que las estructuras presentan mayor grado de irregularidad dentro de su configuración, como es el caso del modelo de esquina entrante en comparación al de piso blando, en el que se obtienen variaciones de hasta 50% y 72% respectivamente. Ante esto es necesario incluir un factor de mayoración de las respuestas globales con el fin de considerar la bidireccionalidad sísmica en las respuestas calculadas mediante el análisis unidireccional. Para estructuras con irregularidad de esquina entrante el factor K es 1,5 y para estructuras con irregularidad de piso blando el factor K es 1,7. Estos factores por bidireccionalidad sísmica son aplicables a estructuras con los tipos de irregularidad estudiados, por lo que es necesario seguir con esta línea de investigación considerando distintas tipologías estructurales y edificaciones con más niveles de entrepiso.

5 REFERENCIAS

- [1] Villar-Vega M, Silva V. Assessment of earthquake damage considering the characteristics of past events in South America. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering* 2017;99:86-96.
- [2] Pinzón L, Pujades L, Diaz S, Alva R. Do directionality effects influence expected damage? A case study of the 2017 central mexico earthquake. *Bulletin of the Seismological Society of America* 2018;108(5):2543-2555.
- [3] Nievas C, Sullivan T. Accounting for directionality as a function of structural typology in performance-based earthquake engineering design. *Earthquake Engineering & Structural Dynamics* 2017;46(5):791-809.
- [4] Kostinakis K, Manoukas G, Athanatopoulou A. Influence of seismic incident angle on response of symmetric in plan buildings. *KSCE Journal of Civil Engineering* 2018;22(2):725-735.
- [5] Magliulo G, Maddaloni G, Petrone C. Influence of earthquake direction on the seismic response of irregular plan RC frame buildings. *Earthquake Engineering and Engineering Vibration (Harbin)* 2014;13(2):243-256.
- [6] Cantagallo C, Camataa G, Spaconeb E. Influence of ground motion selection methods on seismic directionality effects. *Earthquake and Structures* 2015;8(1):185-204.
- [7] Amarloo N, Emami AR. A 3-dimensional perspective for inter-storey drift, ductility and damage distributions in plan-irregular RC buildings considering seismic orientation effect. *Bulletin of Earthquake Engineering* 2019.
- [8] Heredia-Zavoni E, Machicao-Barrionuevo R. Response to orthogonal components of ground motion and assessment of percentage combination rules. *Earthquake Engineering and Structural Dynamics* 2004;33(2):271-284.
- [9] Ministerio de Vivienda, Construcción y Saneamiento. Norma Técnica E.030 Diseño Sismorresistente, 2019.

- [10] Instituto Nacional de Normalización. Diseño Sísmico de Edificios NCH 433.Of 1966, 2012.
- [11] FEMA. Prestandard and commentary for the seismic rehabilitation of buildings. FEMA 356, Building Seismic Safety Council of the National Institute of Building Sciences: Washington, D.C., United States, 2009.
- [12] Paz M. Dinámica Estructural. Barcelona: Reverté, 1992.
- [13] Chopra A. Dinámica de Estructuras. 4ª ed. México: Pearso Educación, 2014.
- [14] Hudson D. Reading and interpreting strong motion accelerograms. Earthquake Engineering Reseach Institute, 1979.
- [15] REDACIS [Internet]. Red Acelerográfica del CISMID/FIC/UNI. 2019 [citado 6 octubre 2019]. Disponible en: <http://ceois.cismid-uni.org/red/>

6 ANEXOS

ACELEROGRAMAS OBTENIDOS DEL REDACIS

ACELEROGRAMAS CORREGIDOS (TRATAMIENTO POR LINEA BASE Y
FILTRADO DE SEÑALES)

ACELEROGRAMAS ESCALADOS