

Análisis del efecto de la direccionalidad de la acción sísmica sobre un modelo a escala reducida

Seismic action directionality effect analysis of a reduced scale model

Florencia Elina Lesser¹, Luis Pujades Beneit²

Ingeniería Civil/ artículo científico

Citar: Lesser F.E. y Pujades Beneit L. (2024). Análisis del efecto de la direccionalidad de la acción sísmica sobre un modelo a escala reducida. *Cuadernos de Ingeniería* (15). <http://revistas.ucasal.edu.ar>

Recibido: abril/2024

Aceptado: septiembre/2024

Resumen

El análisis de direccionalidad permite evaluar la influencia del ángulo de incidencia de la acción sísmica en las estructuras. En este trabajo se utilizó un modelo a escala reducida (estructura metálica) que fue sometido a distintas pruebas en el marco del proyecto Recursos Multidisciplinarios para el Diagnóstico Sísmico: Microzonificación y Daño (MASEDiMD). El análisis numérico se realizó con el *software* ETABS, utilizando modificadores de momento de inercia en los extremos de las vigas hasta lograr que los parámetros dinámicos se asemejen a los obtenidos con el modelo en forma experimental. Se establecieron tres casos de estudio: uno correspondiente a la estructura original (sin daño) y otros dos correspondientes a un modelo con daño en una cara longitudinal y en una cara transversal. Asimismo, se aplicó direccionalidad con las componentes horizontales del acelerograma del sismo registrado en Lorca, ocurrido en el año 2011. Del mismo modo, el desplazamiento en un nodo del nivel superior del edificio y el corte en la base se establecieron como parámetros a analizar. En casos de diferentes situaciones de daño, el mismo edificio presenta distinto comportamiento variando en función del ángulo de incidencia del sismo. El desplazamiento obtenido para algunos ángulos es mayor que el del ángulo inicial. Por otra parte, el valor del corte basal máximo difiere en los distintos casos, resultando mayor en los casos con daño y casi independiente de la rotación en el caso sin daño.

¹ Universidad Católica de Salta, Salta, Argentina.

² Universidad Politécnica de Catalunya, Barcelona, España.

Palabras clave: direccionalidad, análisis dinámico lineal, modelo a escala reducida

Abstract

Directionality analysis makes it possible to evaluate the influence of the angle of incidence of seismic action on structures. In this work, a small-scale model (metallic structure) representative of the typical buildings of the city of Barcelona was used. The numerical analysis was performed with the ETABS software, using moment of inertia modifiers at the ends of the beams until the dynamic parameters resemble those obtained with the experimental model. Three case studies were established: one corresponding to the original structure (without damage) and two others corresponding to a model with damage on longitudinal and transversal faces. In addition, directionality was applied with the horizontal components of the earthquake accelerogram recorded in Lorca that occurred in 2011. Likewise, the displacement at a node of the upper level of the building and the basal shear stress were established as parameters to be analysed. In cases of different damage situations, the same building presents different behaviour varying according to the angle of incidence of the earthquake. The displacement obtained for some angles is greater than that of the initial angle. Furthermore, the value of the maximum basal shear stress differs considering different cases, being higher in cases with damage and almost independent of rotation in the case without damage.

Keywords: directionality, linear dynamic analysis, scaled-down model

1. Introducción

A lo largo de los años se han realizado diversos estudios para evaluar la relevancia de la influencia del ángulo de incidencia sísmica en la respuesta estructural (López y Torres, 1997; López et al., 2000; Rigato y Medina, 2007; Lagaros, 2010; Torbol y Shinozuka, 2012; Vargas Alzate, 2013; Kalkan y Reyes, 2015; Reyes y Kalkan, 2015; Vargas Alzate et al., 2018; Pinzón y Ureña, 2020). En muchas partes del mundo se observa que edificios de idéntica planta, estructura, material, número de pisos y condiciones del suelo de fundación se comportan de distinta manera según el ángulo en que la acción sísmica lo solicite. El daño sísmico esperado depende de la direccionalidad de las cargas sísmicas (Vargas et al., 2018). Un ejemplo estudiado por Vargas et al. (2013) es el daño observado en un grupo de edificios del barrio de San Fernando, en la Ciudad de Lorca (Murcia, España) luego del terremoto ocurrido en mayo de 2011. Todos esos edificios fueron construidos con los mismos planos estructurales, pero algunos de ellos resultaron en daños irreparables mientras que otros no sufrieron daño.

En este artículo se determina la respuesta de un modelo a escala de una estructura de cuatro pisos sometido a un acelerograma rotado para considerar la direccionalidad de la acción sísmica, aplicando el *software* ETABS.

El modelo, construido para utilizarse en estudios previos, está formado por vigas de perfiles metálicos de sección rectangular, columnas continuas desde la base hasta el piso superior con sección tipo L y uniones entre los elementos estructurales materializadas con placas y tornillos. Además, fue ensayado con mesa vibratoria para sus parámetros dinámicos.

En cuanto al análisis de direccionalidad sobre el modelo numérico, se lo sometió al acelerograma del sismo de Lorca (2011), el cual cuenta con las dos componentes horizontales ortogonales. Asimismo, se analizaron como parámetros de demanda el desplazamiento máximo de un nodo seleccionado en el piso superior y el corte en la base.

Los resultados del trabajo están orientados a estudiar solamente la influencia de la direccionalidad para idénticas condiciones del suelo y sin tener en cuenta la influencia del sitio o de la interacción sueloestructura.

2. Características del modelo a escala

El modelo estructural utilizado consta de cuatro niveles, con una altura de 169 cm, ancho 141 cm y una profundidad de 79 cm (Figura 1). Además, está compuesto por barras metálicas de acero A36. Las columnas con perfiles L con alas de 2 cm y las vigas perfiles rectangulares macizos de 2 cm de ancho y 1 cm de alto, 2 mm de espesor.

Con el fin de representar las sobrecargas de la estructura, se colocaron paquetes de ocho placas de plomo sobre el centro de la luz de las vigas. Estos paquetes pesan 4,5 kg. Las medidas de las placas son 20 cm de longitud por 7 cm de ancho y 4 mm de espesor y están fijadas a las vigas con dos placas metálicas unidas con cuatro tornillos.



Figura 1. Estructura metálica a escala

Las conexiones entre las vigas y columnas están hechas con perfiles L soldados a los extremos de las vigas y se unen a las columnas a través de tornillos. El modelo se une a la mesa vibratoria por medio de una placa fijada con tornillos.

Con el propósito de calibrar el modelo numérico se partió de los datos de periodos obtenidos con el modelo experimental en un estudio anterior (Martín, 2018) y que se observan en la Tabla

1. Dicho experimento constaba en realizar un impacto en la mesa vibradora con una pelota cada diez minutos (Figura 2). En la cara opuesta al sector del impacto de la pelota se ubicaron los acelerómetros que registraron el movimiento de la estructura durante el ensayo. Los modos 1 y 4 son a modos traslacionales según la dirección y, longitudinal, los modos 2 y 5 son traslacionales según la dirección x, longitudinal. Los modos 3 y 6 corresponden a modos rotacionales.

Tabla 1. Periodos para los primeros seis modos de vibrar del modelo experimental

Modo	Periodo
1	0,397
2	0,387
3	0,267
4	0,131
5	0,113
6	0,108

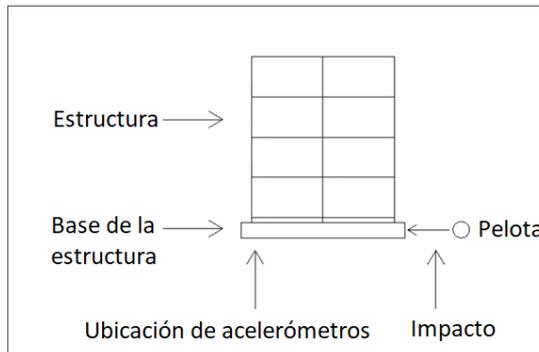


Figura 2. Esquema del modelo con el punto de impacto de la pelota (Martín, 2018)

3. Calibración del modelo analítico

Con el objetivo de calibrar el modelo numérico se buscó asemejar los valores de los primeros seis modos con los del modelo experimental. Debido a que las uniones entre las vigas y las columnas no son uniones rígidas, se las modeló en ETABS variando el valor de los modificadores de momento en los extremos de las vigas.

Con el propósito de modelar estas uniones, en los extremos y en una longitud del 10 % de la luz de las vigas, se aplicaron modificadores del momento de inercia. En la Figura 3 se señalan en azul los segmentos (con longitudes iguales al 10 % de la luz correspondiente) donde se aplicaron modificadores de la inercia.

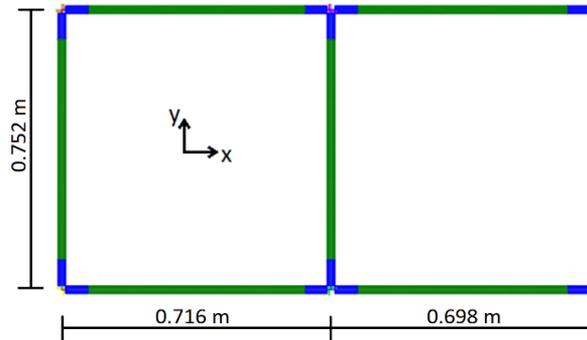


Figura 3. Planta tipo del modelo numérico en ETABS

A medida que se reduce el valor de los modificadores, la unión se vuelve menos rígida, se incrementa el período y, en consecuencia, la frecuencia disminuye. La Tabla 2 presenta los resultados (para los seis primeros modos) de sus periodos. Como se observa, se inició con un modificador igual a 1 y se fue reduciendo su valor en un paso de 0,1 hasta alcanzar un rango en el que al menos los primeros tres modos se acercaron al valor experimental de la Tabla 1.

Con la finalidad de calibrar el modelo, se debía llegar al periodo 0,39 segundos correspondiente al primer modo de vibrar del modelo experimental. En cuanto a un modificador igual a 0,35, el requerimiento para el primer modo se cumplió, mientras que para los restantes no, tal como se observa en la Tabla 3.

Tabla 2. Periodos (seg.) para los primeros seis modos de vibrar con modificadores de momento de inercia variantes entre 1 y 0,1

Modificador	Modo 1	Modo 2	Modo 3	Modo 4	Modo 5	Modo 6
1,00	0,320	0,287	0,260	0,092	0,084	0,076
0,90	0,326	0,292	0,264	0,093	0,085	0,077
0,80	0,333	0,297	0,268	0,094	0,087	0,078
0,70	0,342	0,305	0,274	0,096	0,088	0,079
0,60	0,353	0,314	0,280	0,098	0,090	0,081
0,50	0,367	0,326	0,289	0,101	0,092	0,082
0,40	0,387	0,343	0,300	0,105	0,096	0,085
0,39	0,389	0,345	0,301	0,105	0,096	0,085
0,38	0,391	0,347	0,303	0,105	0,097	0,085
0,37	0,394	0,349	0,304	0,106	0,097	0,086
0,36	0,397	0,351	0,306	0,106	0,097	0,086

0,35	0,399	0,354	0,307	0,107	0,098	0,086
0,34	0,402	0,036	0,309	0,107	0,098	0,087
0,33	0,405	0,359	0,310	0,108	0,099	0,087
0,32	0,408	0,361	0,312	0,108	0,099	0,087
0,31	0,412	0,364	0,314	0,109	0,100	0,088
0,30	0,415	0,367	0,316	0,109	0,100	0,089
0,20	0,462	0,408	0,339	0,116	0,107	0,104
0,10	0,555	0,494	0,377	0,136	0,128	0,119

Tabla 3. Periodos para los primeros seis modos de vibrar de los modelos numérico y experimental (modificador: 0,35)

Modelo numérico		Modelo experimental		Error
Modo	Periodo (seg)	Modo	Periodo (seg)	%
1	0,399	1	0,397	0,005
2	0,354	2	0,387	0,085
3	0,307	3	0,267	0,150
4	0,107	4	0,131	0,183
5	0,098	5	0,113	0,133
6	0,086	6	0,108	0,204

Con el objetivo de mejorar la aproximación de los valores de periodos, se distinguió entre vigas orientadas según el eje x de las orientadas según el eje y , variando los valores de los modificadores de los tramos extremos de esas vigas en forma diferenciada.

Ambos modificadores se modificaron hasta arribar a los valores de periodos más cercanos posibles. Se obtuvieron los periodos que se aprecian en la Tabla 4, que se comparan con los del modelo experimental, con los valores 0,25 para los modificadores en los tramos de barras orientadas según el eje x y 0,36 para los orientados según el eje y .

Tabla 1. Periodos para los primeros seis modos de vibrar de los modelos numérico y experimental (modificadores: 0,25 y 0,36)

Modelo numérico		Modelo experimental		Error
Modo	Periodo (seg)	Modo	Periodo (seg)	%
1	0,397	1	0,397	0,000
2	0,385	2	0,387	0,005

3	0,312	3	0,267	0,169
4	0,106	4	0,131	0,191
5	0,103	5	0,113	0,088
6	0,089	6	0,108	0,176

Es importante mencionar que en el modelo se consideró los apoyos de la base rígidos, con restricciones tanto en los desplazamientos como en los giros.

4. Casos analizados

Se analizaron tres casos (Figura 4): el primero (Caso A) corresponde a la estructura original, que se considera sin daño, con los valores de modificadores obtenidos anteriormente (0,25 y 0,36). Este representa el modelo tal cual se encuentra sobre la mesa vibratoria.

A fin de considerar casos de daño, se reduce a la mitad el valor de los modificadores. El Caso B representa una situación hipotética de daño que afecta a la cara sombreada en color magenta orientada según el eje y . Y del mismo modo, el Caso C con daño en la cara sombreada señalada en la figura, orientada según el eje x . Con respecto a estos dos modelos se pretende simular un daño asimétrico en el sistema, introduciendo torsión en él al debilitar solo una cara en cada caso. De esta manera, el centro de masa se desplaza respecto del centro de rigidez.

Con el fin de crear estos dos modelos con daño en una cara, se la debilita disminuyendo los valores de los modificadores de las vigas que se encuentran sobre dicha cara a la mitad.

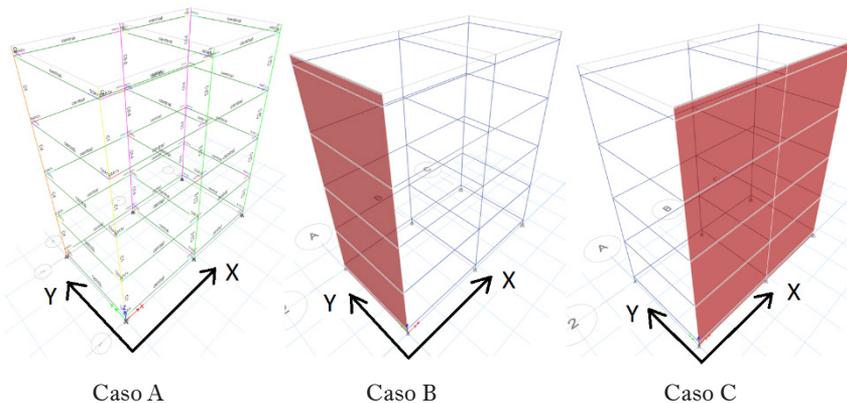


Figura 4. Casos analizados: Caso A, estructura original; Caso B, daño en cara según eje de las y ; Caso C, daño en cara según eje de las x

5. Análisis numérico de efectos de la direccionalidad

Con el propósito de realizar el análisis de direccionalidad, se utilizaron las dos componentes horizontales del acelerograma del sismo de Lorca (Murcia, España, 2011) ocurrido en mayo de 2011 de una magnitud de 5.1, con epicentro a 2 km de la ciudad e hipocentro a 1 km de profundidad (Figuras 5 y 6).

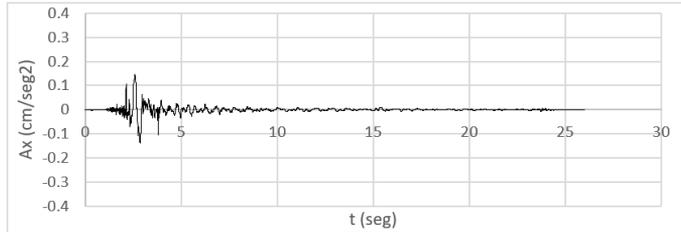


Figura 5. Componente del sismo de Lorca N-S aplicado en la dirección x (0°)

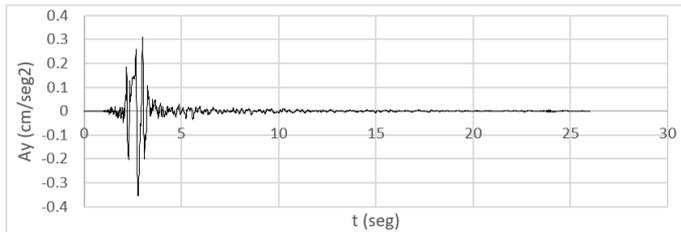


Figura 6. Componente del sismo de Lorca E-W aplicado en la dirección y (0°)

Se evaluó la direccionalidad cada 5° desde 0° hasta 180° . El *software* ETABS utiliza la siguiente matriz para rotar la señal de sismo:

$$\begin{pmatrix} a_{x_\theta} \\ a_{y_\theta} \end{pmatrix} = \begin{bmatrix} \cos(\theta) & \text{sen}(\theta) \\ -\text{sen}(\theta) & \cos(\theta) \end{bmatrix} * \begin{pmatrix} a_x \\ a_y \end{pmatrix}$$

La Figura 7 muestra los registros rotados ciertos ángulos representativos. En la Figura 8 se muestran sus correspondientes espectros de respuesta.

Análisis del efecto de la direccionalidad de la acción sísmica sobre un modelo a escala reducida

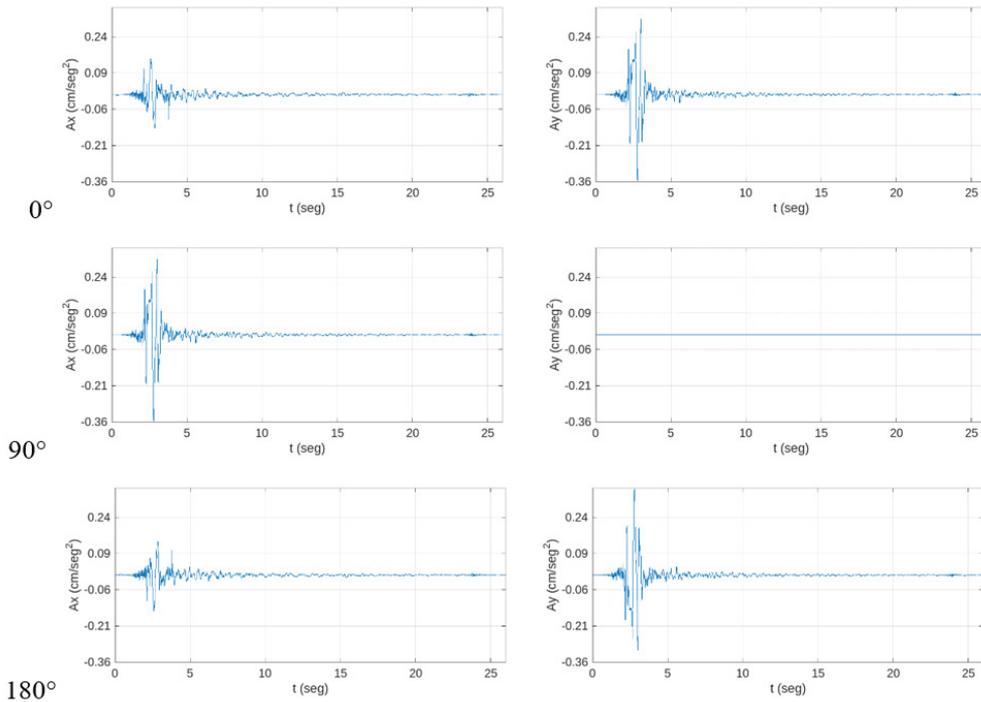


Figura 7. Acelerograma de las componentes en dirección x (izquierda) e y (derecha) del sismo de Lorca rotado para diferentes ángulos

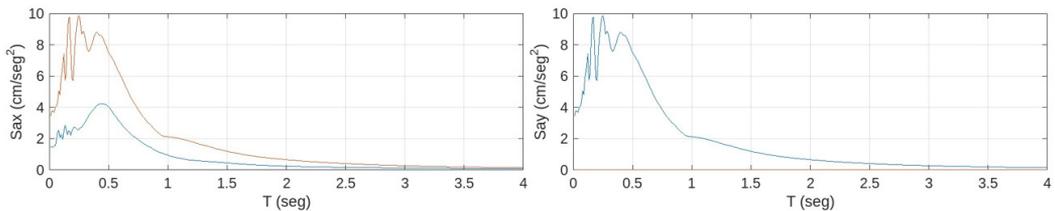


Figura 8. Espectros de respuesta para las componentes según dirección x (izquierda) e y (derecha) del sismo de Lorca rotado para diferentes ángulos (0° y 180° línea azul, y 90° línea roja)

Los parámetros de demanda que se analizaron son el desplazamiento máximo del nodo 14 ubicado en el nivel superior y el corte en la base (Figura 9).

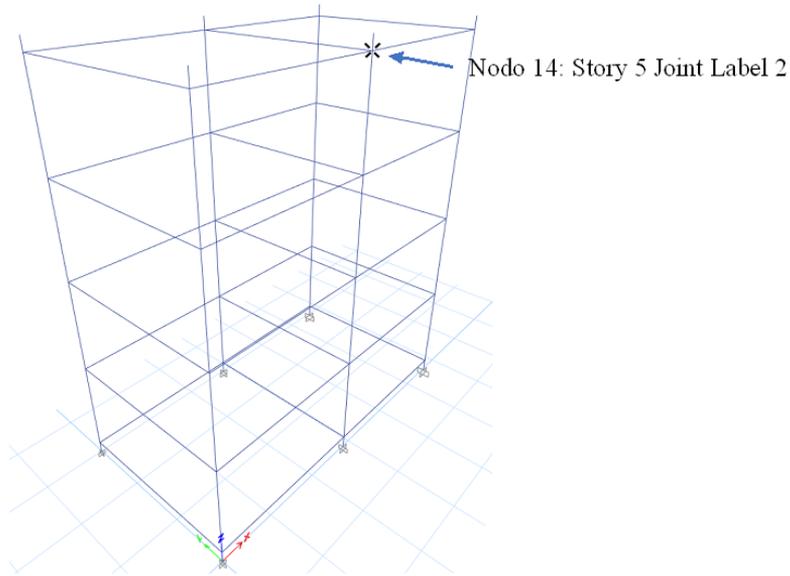


Figura 9. Nodo seleccionado (nodo 14) para analizar el desplazamiento máximo con los efectos de direccionalidad

6. Análisis de resultados

Se puede apreciar en la Figura 10 que están representados los valores máximos de cortante. Por otra parte, en la Figura 11 se observan los valores máximos de desplazamiento para cada ángulo de rotación, como así también la resultante máxima de cortante y desplazamientos, calculada con la ecuación generalizada (1), donde m puede representar el esfuerzo de corte máximo en la base (F) o el desplazamiento máximo (D) en el punto de referencia.

(1)

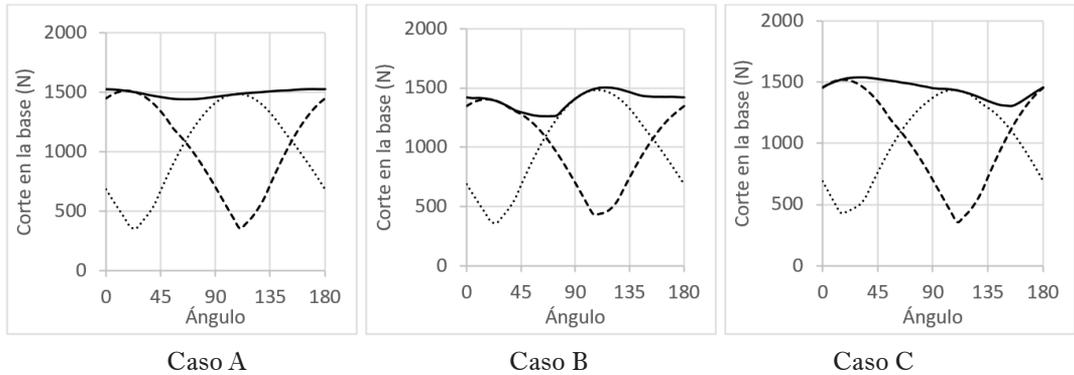


Figura 10. Corte basal máximo en la dirección x (línea de puntos), en la dirección y (línea de trazo) y valor resultante máximo (línea sólida)

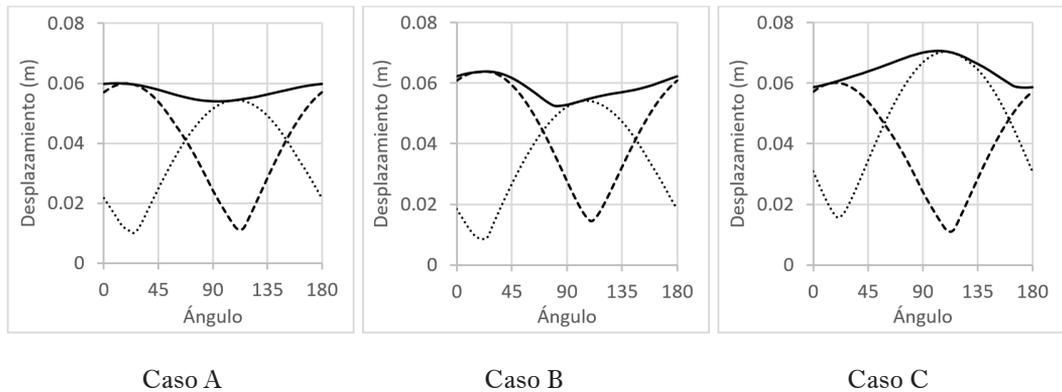


Figura 11. Desplazamiento máximo del nodo 14 en la dirección x (línea de puntos), en la dirección y (línea de trazos), y valor resultante máximo (línea sólida)

Se puede observar en estas figuras que los valores de desplazamiento y corte máximo según los ejes x e y varían en función del ángulo de incidencia de la acción. Los valores de la resultante máxima de desplazamiento y corte en la base coinciden con los anteriores en los puntos donde los desplazamientos y cortes según los ejes x e y son máximos.

En cuanto al nodo seleccionado del nivel superior en el cual se registró el desplazamiento máximo, se obtuvieron los diagramas de movimientos de partículas correspondientes a cada uno de los casos de estudio. En las Figuras 12, 13 y 14 se muestra para los Casos A, B y C, los diagramas obtenidos para los ángulos en los que el desplazamiento tiene una marcada direccionalidad

según los ejes x y y . Además, el ángulo donde el desplazamiento tiene componentes apreciables en ambas direcciones.

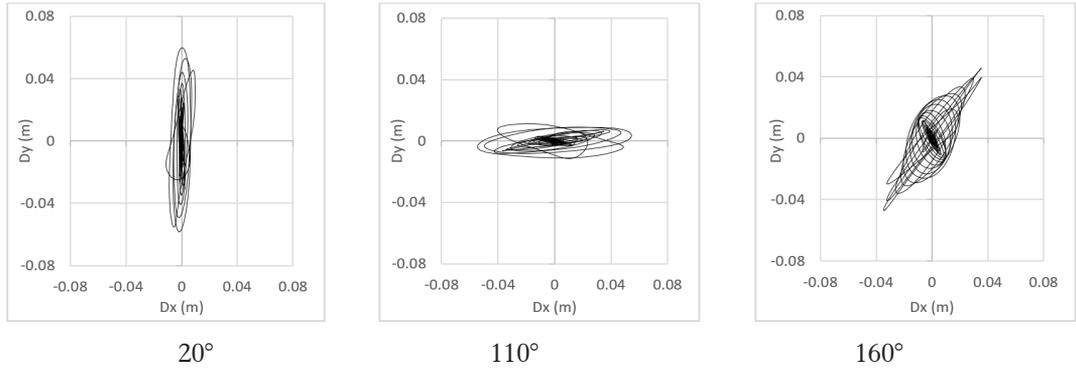


Figura 12. Diagramas de movimiento de partículas para el Caso A y tres ángulos de rotación

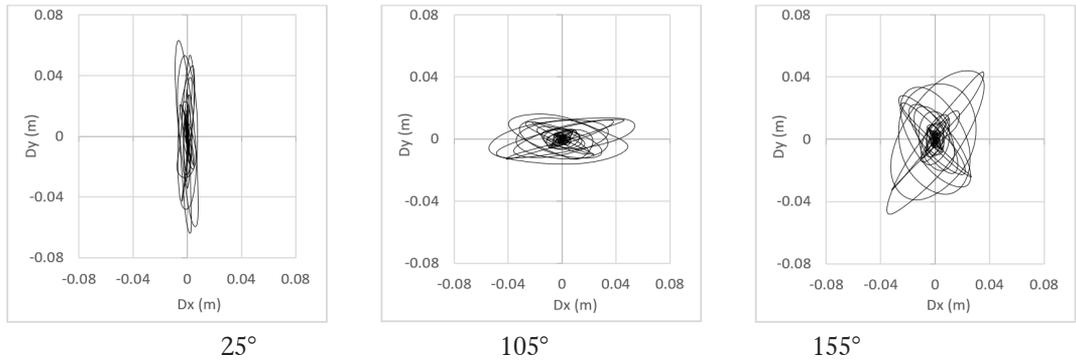


Figura 13. Diagramas de movimiento de partículas para el Caso B y tres ángulos de rotación

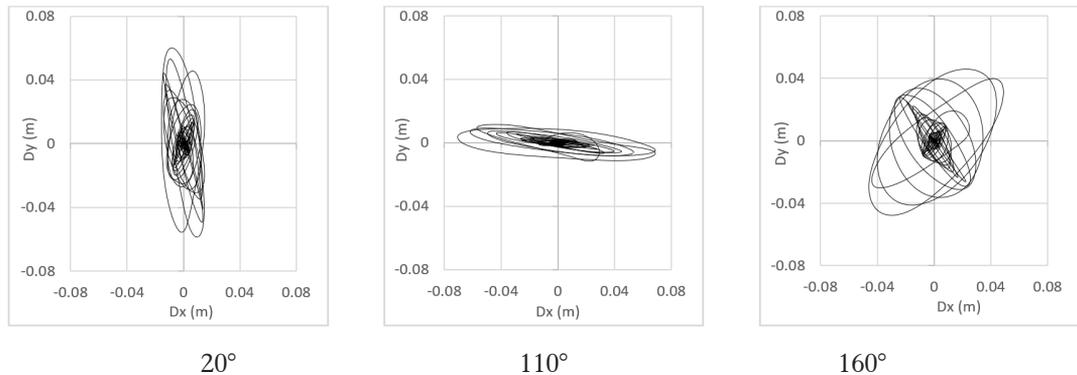


Figura 14. Diagramas de movimiento de partículas para el Caso C y tres ángulos de rotación

7. Conclusiones

La acción del sismo representa una sollicitación compleja para todo tipo de estructuras. Un aspecto del problema que está recibiendo especial atención es el efecto de la direccionalidad de la acción sísmica respecto de la estructura. Se analizó la respuesta de una estructura sometida a distintos ángulos de incidencia de las componentes horizontales (acelerogramas) del sismo de Lorca de 2011. Asimismo, se adoptaron como parámetros de demanda el corte basal y los desplazamientos de un nodo ubicado en el nivel superior.

Además, se realizó un análisis modal y un análisis dinámico lineal.

Se consideraron tres casos de estudio: la estructura original (modelo a escala en su estado actual) y dos casos donde se materializaron estados de daño mediante la reducción de las rigideces correspondientes.

Considerando como punto de partida la acción de las componentes según las direcciones principales del edificio (eje x en la dirección mayor y eje y en la menor) se realizó la experimentación numérica rotando el ángulo de incidencia desde 0° a 180° .

Los valores de desplazamientos obtenidos para algunos ángulos de rotación son mayores que aquellos resultantes de la condición de partida (0°), tanto en valores máximos promediados como en las componentes x e y .

El desplazamiento resultante (estimado por la ecuación 1) tiene un comportamiento similar para el Caso A que corresponde a la estructura sin daño y el Caso B con daño en la cara transversal señalada en la Figura 4, donde los valores son menores en el rango desde los 90° hasta los 120° , mientras que el caso C con daño en la cara longitudinal (Figura 4), registra los máximos en este mismo rango (Figura 11).

En cuanto al valor del corte basal, los valores máximos difieren en relación con el comportamiento. Siendo casi independiente de la rotación en el Caso A, pero la diferencia se ve más marcada en los casos B y C, cuando se ha considerado un mayor nivel de daño inicial de la es-

estructura. Los valores máximos según cada dirección se corresponden aproximadamente con el valor máximo promediado.

Los ángulos en los que se presentan los valores de máximo desplazamiento en las direcciones x e y se encuentra en el mismo rango para los tres casos de estudio. Lo cual se aprecia claramente en las Figuras 12, 13 y 14.

La norma para el diseño sismorresistente de Argentina INPRESCIRSOC 103 (INPRESCIRSOC, 2018) estipula que para “construcciones con sistemas sismorresistentes ubicados en dos direcciones perpendiculares, se puede considerar que las fuerzas especificadas actúan independientemente a lo largo de cada una de dichas direcciones horizontales. Cuando no se cumpla la condición anterior será suficiente aplicar la acción sísmica en dos direcciones perpendiculares y una tercera a 45° con las anteriores”. En este caso de estudio se observa que aun cuando el edificio exhiba claramente dos direcciones perpendiculares, hay una diferencia en las respuestas según el ángulo de solicitación, por lo que sería necesario profundizar en estos aspectos y, en caso necesario, disponer de los resultados del estudio para realizar recomendaciones para las normativas diseño sismorresistentes.

Referencias

- Alva Bañuelos, R. E. (2021). *Daño sísmico y propiedades modales en estructuras de edificación*. [Tesis doctoral]. Universitat Politècnica de Catalunya, Barcelona, España.
- INPRES CIRSOC 103 (2018) Reglamento argentino para construcciones sismorresistentes. Parte I. Construcciones en general. Edición Julio 2018. Ministerio del Interior, Obras públicas y Vivienda. Secretaria Técnica de Planificación Territorial y Coordinación de Obra Pública.
- Kalkan, E., y Kwong, N. S. (2013). Pros and Cons of Rotating Ground Motion Records to Fault-Normal/Parallel Directions for Response History Analysis of Buildings. *Journal of Structural Engineering*, 140-142.
- Lagaros, N. D. (2010). The impact of the earthquake incident angle on the seismic loss estimation. *Engineering Structures*, 32, 1577-1589.
- López, O. A., y Torrez, R. (1997). The critical angle of seismic incidence and the maximum structural response. *Earthquake Engineering and Structural Dynamics*, 26, 881-894.
- López, O. A., Chopra, A. K., y Hernández, J. J. (2000). Critical response of structures to multicomponent earthquake excitation. *Earthquake Engineering and Structural Dynamics*, 29(12), 1759-1778.
- Martín Balet, A. (2018). *Damage degree determination of structure from natural frequencies variation*. [Disertación para maestría universitaria en ciencias]. Universidad de Minho, Braga, Portugal.
- Pinzón Ureña, L. A. (2020). *Directionality and soils' effects on the seismic hazard and risk. Applications to ground motion big data sets and to urban environments*. [Programa de Doctorado en Ingeniería Sísmica y Dinámicas Estructurales]. Universidad Politècnica de Cataluña, Barcelona, España.

- Pinzón Ureña, L. A., Pujades, L. G., Hidalgo, D. A., y Díaz, S. (2018). Directionality models from ground motions of Italy. *Ingegneria Sismica*, 35(3), 43-63.
- Reyes, J. C., y Kalkan, E. (2015). Significance of rotating ground motions on behavior of symmetric-and asymmetric-plan structures: Part 1. Single-story structures. *Earthquake Spectra* 31 (3). <http://dx.doi.org/10.1193/072012EQS241M>
- Reyes, J.C. y Kalkan, E. (2012). Significance of rotating ground motions on nonlinear behavior of symmetric and asymmetric buildings in near fault sites. En T. I. Technology (Ed.), *Joint conference proceedings. 9th International Conference on Urban Earthquake Engineering/ 4th Asia Conference on Earthquake Engineering March 6-8*. Tokyo, Japan.
- Rigato, A., y Medina, R. (2007). Influence of angle of incidence on seismic demands for inelastic single-storey structures subjected to bidirectional ground motions. *Engineering Structures*, 36-45.
- Torbol, M., y Shinozuka, M. (2014). The directionality effect in the seismic risk assessment of highway networks. *Structure and Infrastructure Engineering*, 10(2), 175-188.
- Vargas Alzate, Y. F. (2013). *Análisis estructural estático y dinámico probabilista de edificios de hormigón armado. Aspectos metodológicos y aplicaciones a la evaluación del daño*. [Tesis doctoral]. Universidad Politécnica de Cataluña, Barcelona, España.
- Vargas Alzate, Y. F., Pujades Beneit, L. G., Barbat, A. H., Hurtado Gómez, J. E., Diaz Alvarado, S. A., y Hidalgo Leiva, D. A. (2018). Probabilistic seismic damage assessment of reinforced concrete buildings considering directionality effects. *Structure and Infrastructure Engineering*, 14(6), 817-829.
- Vargas Alzate, Y. F., Pujades, L. G., Barbat, A. H., y Hurtado, J. E. (2013). Risk assessment of reinforced concrete buildings considering the earthquake directionality effects. *ECCOMAS Thematic Conference - COMPDYN 2013: 4th International Conference on Computational Methods in Structural Dynamics and Earthquake Engineering, Proceedings - An LACM Special Interest Conference* (pp. 714724).

Florencia Elina Lesser

Perfil académico y profesional: Ingeniera civil (Facultad de Ingeniería, UCASAL). Magister en Ciencias de la Ingeniería, mención Estructuras y Geotecnia (Facultad de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales UNC). Docente de Estabilidad y Resistencia de Materiales, Estabilidad II y Fundaciones en la Facultad de Ingeniería (UCASAL) y docente de Estructuras I en la Facultad de Arquitectura y Urbanismo (UCASAL).

Correo electrónico: felesser@ucasal.edu.ar

Luis Gonzaga Pujades Beneit

Perfil académico y profesional: Doctor en Ciencias Físicas por la Universidad de Barcelona y profesor investigador de la Escuela Técnica Superior de Ingenieros de Caminos Canales y Puertos de Barcelona y del Departamento de Ingeniería Civil y Ambiental. Coordinador del programa de doctorado en Ingeniería Sísmica y Dinámica Estructural de la Universidad Politécnica de Cataluña (UPC). Autor/coautor de numerosos trabajos científicos. Ha participado y liderado un número importante de proyectos competitivos nacionales y europeos.

Correo electrónico: lluis.pujades@upc.edu

Identificador ORCID: 0000-0002-2619-0805