

Un enfoque alternativo para tomar en cuenta el efecto de la direccionalidad sísmica

An alternative approach to consider the effect of seismic directionality

S. Diaz ^{1*}, L. Pujades *, L. Pinzón *, Y. Vargas *

* Universidad Politécnica de Cataluña, Barcelona. ESPAÑA

** Universidad Juárez Autónoma de Tabasco, Tabasco. MEXICO

Fecha de Recepción: 29/01/2018

Fecha de Aceptación: 31/05/2018

PAG 279-290

Abstract

Recent researches have proven the importance of considering the seismic directionality effect. The performance of buildings subjected to earthquakes depends on its orientation respect to the seismic actions applied. This type of calculation is computed using the nonlinear dynamic analysis (NLDA) and rotating the acceleration horizontal components onto all non-redundant angles, which entails a high computational cost. This paper presents an alternative approach to consider the directionality effect. The method is based on the nonlinear static analysis (NLSA) and in the energy balance between the capacity curves and the response spectra of the rotated seismic actions. This approach was applied to a 4-story steel frame building 3D-model with ground motions records from Mexico City. A high variability in the building performance is observed due to the incidence angle of the seismic action; the proposed method would allow considering this variation in the structural analysis, in an easy way, demanding less calculation time and providing results compatible with those obtained through the NLDA.

Keywords: Directionality effect, nonlinear static analysis, capacity curve, response spectrum, seismic performance

Resumen

Investigaciones recientes han mostrado la importancia de considerar el efecto de direccionalidad sísmica. El desempeño de los edificios sometidos a sismos, dependen de la orientación que el edificio tenga con respecto a las acciones sísmicas aplicadas. Este tipo de análisis se suele realizar usando análisis dinámico no lineal (ADNL) y rotando las componentes horizontales de aceleración para todos los ángulos no redundantes, lo que conlleva un elevado costo computacional. Este artículo presenta un enfoque alternativo para considerar el efecto de direccionalidad. El método se basa, en el análisis estático no lineal (AENL) y en el balance energético entre la curva de capacidad y el espectro de respuesta para hallar el punto de capacidad por demanda. Este método se aplica a un edificio de pórticos de acero de 4 niveles que se modela en 3D y se somete a acciones sísmicas probables en la Ciudad de México. Se observa una alta variabilidad del desempeño del edificio en función del ángulo de entrada de la acción sísmica; el método alternativo supondría tener en cuenta esta variación en el análisis estructural, de forma más sencilla, con un menor tiempo de cálculo y proporcionando resultados compatibles con los obtenidos ADNL.

Palabras clave: Efecto de direccionalidad, análisis estático no lineal, curva de capacidad, espectro de respuesta, desempeño sísmico

1. Introducción

En estudios recientes, como el de Vargas et al. (2012) Y Vargas et al. (2017), el efecto de la direccionalidad de los sismos se ha evaluado desde dos enfoques: (1) el riesgo sísmico (Boore et al., 2006, Hong et al. 2009; Boore 2010; Pinzón et al., 2015) y (2) el rendimiento y daño sísmico esperado en los edificios (Rigato and Medina 2007; Lagaros 2010). El primer enfoque se refiere a la influencia que tiene la orientación del sensor en las ecuaciones predictivas del movimiento del suelo (GMPE). Este efecto se muestra en la Figura 1. En esta figura, se muestran los acelerogramas N-S y E-W correspondientes al registro del terremoto de México del

19 de septiembre de 1985, registrados en la estación SCT (MEX85 SCT) de la Ciudad de México. Se observa que el PGA máximo no ocurre para ninguno de los dos componentes individuales, pero, si se observa en el movimiento de la partícula, que este se obtiene al combinar ambos componentes y que se da para un ángulo específico. Hoy en día, las GMPE se han actualizado con nuevas medidas de intensidad (IM) (Boore et al., 2006; Boore 2010) que consideran este efecto, en los Estados Unidos (Power et al. 2008; Bozorgnia et al., 2014) y en México (Hong et al., 2009). Al estudiar estos efectos, es posible mejorar la definición de riesgo sísmico en sitios con alta sismicidad.

¹ Autor de correspondencia:

Universidad Juárez Autónoma de Tabasco, Tabasco. MEXICO
E-mail: Alberto.diaz@ujat.mx



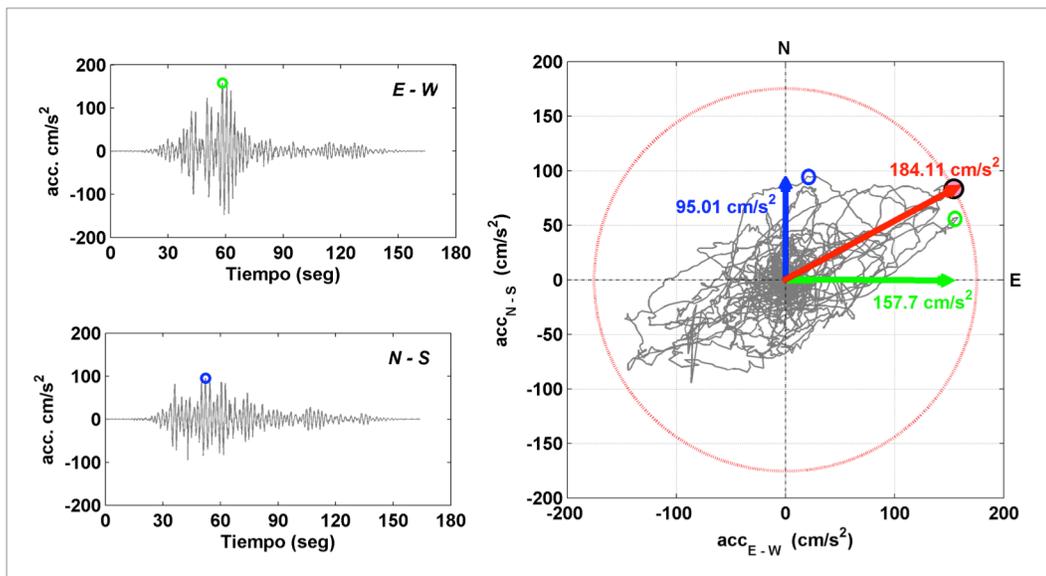


Figura 1. Componentes horizontales de aceleración N-S y E-W correspondientes al terremoto de la Ciudad de México (19 de septiembre de 1985), registrados en la estación SCT.

El segundo enfoque estudia la variación del rendimiento sísmico de un edificio dependiendo de la orientación que tenga respecto del registro sísmico aplicado. Investigaciones recientes han demostrado que la máxima demanda de ductilidad en el desplazamiento de un sistema elastoplástico con un solo grado de libertad (García-Soto et al., 2012) y la máxima respuesta de desplazamiento y el daño esperado de un edificio específico (Vargas et al., 2012; Kostinakis et al., 2015; Reyes-Salazar et al., 2016; Kostinakis and Morfidis, 2017), se pueden presentar para un ángulo de incidencia diferente. Esto muestra que el efecto de la direccionalidad también influye en la respuesta estructural de un edificio. Este efecto se puede estudiar mediante los siguientes pasos: (i) se emplean modelo 3D de un edificio; (ii) se utiliza el análisis dinámico no lineal (ADNL); (iii) aplicando las componentes horizontales registrados (acc_{N-S} y acc_{E-W}) de un sismo en las direcciones principales del edificio; iv) el paso anterior se repite rotando los componentes horizontales grado a grado de 0° a 180° si la estructura es regular y de 0° a 360° si es irregular, es decir, 180 ADNL ó 360 ADNL respectivamente. Las componentes horizontales rotadas ($acc_x(\theta)$ y $acc_y(\theta)$) en función de las componentes registradas (acc_{N-S} y acc_{E-W}) se obtienen con la siguiente ecuación:

$$\begin{bmatrix} acc_x(\theta) \\ acc_y(\theta) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos(\theta) & \sin(\theta) \\ -\sin(\theta) & \cos(\theta) \end{bmatrix} * \begin{bmatrix} acc_{N-S} \\ acc_{E-W} \end{bmatrix} \quad \theta = 1^\circ \dots N^\circ \quad (1)$$

Como resultado del análisis de direccionalidad, se obtienen relaciones en función de una variable de salida, como por ejemplo el desplazamiento en el techo (δ), el cortante en la base o el daño esperado en función del ángulo de rotación (θ). Se obtienen mayores desplazamientos, cortantes y daños a los estimados con las componentes registradas (no rotados) en un análisis 3D (Vargas et al., 2012; Vargas et al., 2017). Sin embargo, se tiene un alto costo

computacional, que implica múltiples análisis dinámicos y dificultan la implementación de este efecto.

En este artículo, solo se estudia el efecto de direccionalidad en el rendimiento sísmico esperado de los edificios. Para esto, se desarrollan dos enfoques: 1) una técnica alternativa basada en el análisis estático no lineal (AENL) y el balance de energía (EB) (Mezzi et al., 2006; Leelataviwat et al., 2009; Diaz et al., 2017b) entre el espectro de capacidad y el espectro de respuesta, para encontrar el punto de desempeño; y 2) usando el ADNL. Para ambos enfoques, se usa como caso de estudio un modelo 3D de un edificio de acero de 4 pisos con un sistema estructural de marcos a momento resistente especiales, SMF, sujetos a registros de sísmicos de la Ciudad de México.

2. Efecto de la direccionalidad en los edificios

En esta sección se muestra el efecto de direccionalidad en los edificios, entendido como el efecto de la variación del rendimiento sísmico del edificio dependiendo de la orientación del edificio con respecto al registro sísmico aplicado. Este efecto se desarrolla a partir de dos enfoques: (1) el uso de una técnica basada en el análisis estático no lineal (AENL) y el balance de energía (EB), para encontrar el punto de desempeño y (2) con ADNL.

La evaluación de la direccionalidad en el rendimiento de los edificios con ambos enfoques se desarrolla con el caso de un edificio de acero de 4 niveles, con marcos de momento resistente especiales (SMF) de vigas y columnas de sección americana tipo W. Las conexiones entre los elementos son totalmente rígidas (FR) precalificadas (ANSI/AISC 358-10 2010). El edificio fue diseñado como un edificio de oficinas en la Ciudad de México y cumple con las especificaciones de los códigos NTC-DF (2004) y ANSI/AISC 341-10 (2010). El modelo del edificio se muestra en la Figura 2.

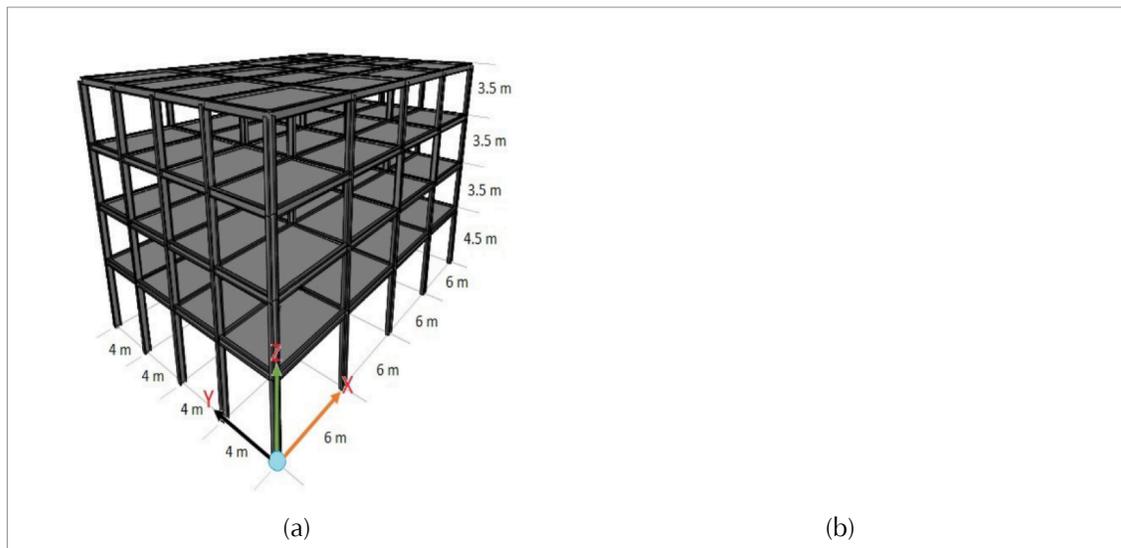


Figura 2. (a) Modelo 3D utilizado para evaluar el efecto de direccionalidad (b) secciones de vigas y columnas.

El edificio fue modelado en el programa Ruaumoko 3D (Carr, 2002), donde el comportamiento de las vigas y columnas se definieron en función de la relación resistencia-ductilidad con el modelo Ibarra-Medina-Krawinkler modificado (IMK) (Ibarra et al., 2005; Lignos and Krawinkler, 2011; Lignos and Krawinkler, 2013). El modelo IMK modificado de cada elemento estructural es adaptado a la ley de histéresis bilineal con endurecimiento y degradación por ductilidad usada por el programa Ruaumoko 3D mediante el procedimiento planteado en Diaz et al. (2017b). Las principales características del análisis modal del edificio (PF_1 , factor de participación modal del período fundamental, T_1 , W el peso de la estructura y el coeficiente de participación de la masa modal del período fundamental de vibración, α_1) se muestran en la Tabla 1.

En ambos enfoques, las acciones sísmicas se han definido a partir de acelerogramas reales (componentes horizontales) y sus respectivos espectros de respuestas. Utilizando la técnica de Vargas et al. (2013) de compatibilidad entre espectros de respuesta y un espectro objetivo, son seleccionado de un base de datos de sismos de la Ciudad de México analizada por Diaz et al. (2015), 4 acelerogramas con espectro de respuesta compatible con el espectro de diseño de la zona IIIa del códigos NTC-DF (NTC-DF 2004) de la Ciudad de México. Sus principales características se presentan en la Tabla 2 y sus respectivos espectros de respuesta normalizados por la mayor PGA de las componentes horizontales correspondiente a cada registro sísmico (indica con rojo en la Tabla 2) se muestran en la Figura 3.

Tabla 1. Valores T_1 , W , PF_1 y α_1 del edificio estudiado de la Figura 1

Dirección	Periodo Fundamental T_1 (s.)	Peso Total W (kN)	PF_1	α_1
X	0.89	12,460	1.28	0.881
Y	1.04	12,460	1.20	0.885

Table 2. Principales características de los registros sísmicos seleccionados de la base de datos de la Ciudad de México y que corresponden con la zona IIIa.

ZONA	#	Estación ⁽¹⁾	Fecha	Duración (s)	Mw ⁽²⁾	PGA N-S (cm/s ²)	PGA E-W (cm/s ²)	Epi. Dist. ⁽³⁾	Azimut ⁽⁴⁾
IIIa	1	HJ72	18/04/14	167.47	7.2	33.20	32.19	331.1	221.4
	2	AL01	18/04/14	165.77	7.2	28.87	37.00	330.9	221.0
	3	TL55	30/09/99	173.86	5.5	28.80	15.62	447.6	149.7
	4	MJSE	15/06/99	144.01	7.0	17.70	13.76	222.3	128.8

(1) Acrónimo de las estaciones acelerométricas en la Ciudad de México
 (2) Magnitud momento
 (3) Distancia epicentral en km
 (4) Azimut entre la estación acelerométrica y el epicentro del registro del sismo

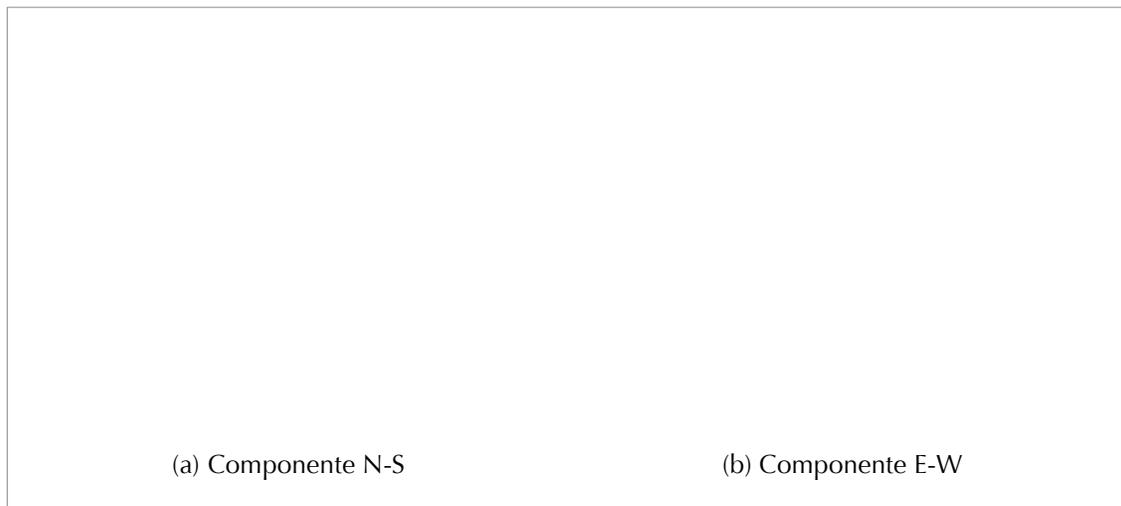


Figura 3. Espectro de respuesta de los 4 registros sísmicos seleccionados de la Ciudad de México.

2.1 Método alternativo

Primero, se aborda el enfoque alternativo. Un

diagrama general del método propuesto es mostrado en la figura 4, y se describe paso a paso el proceso:

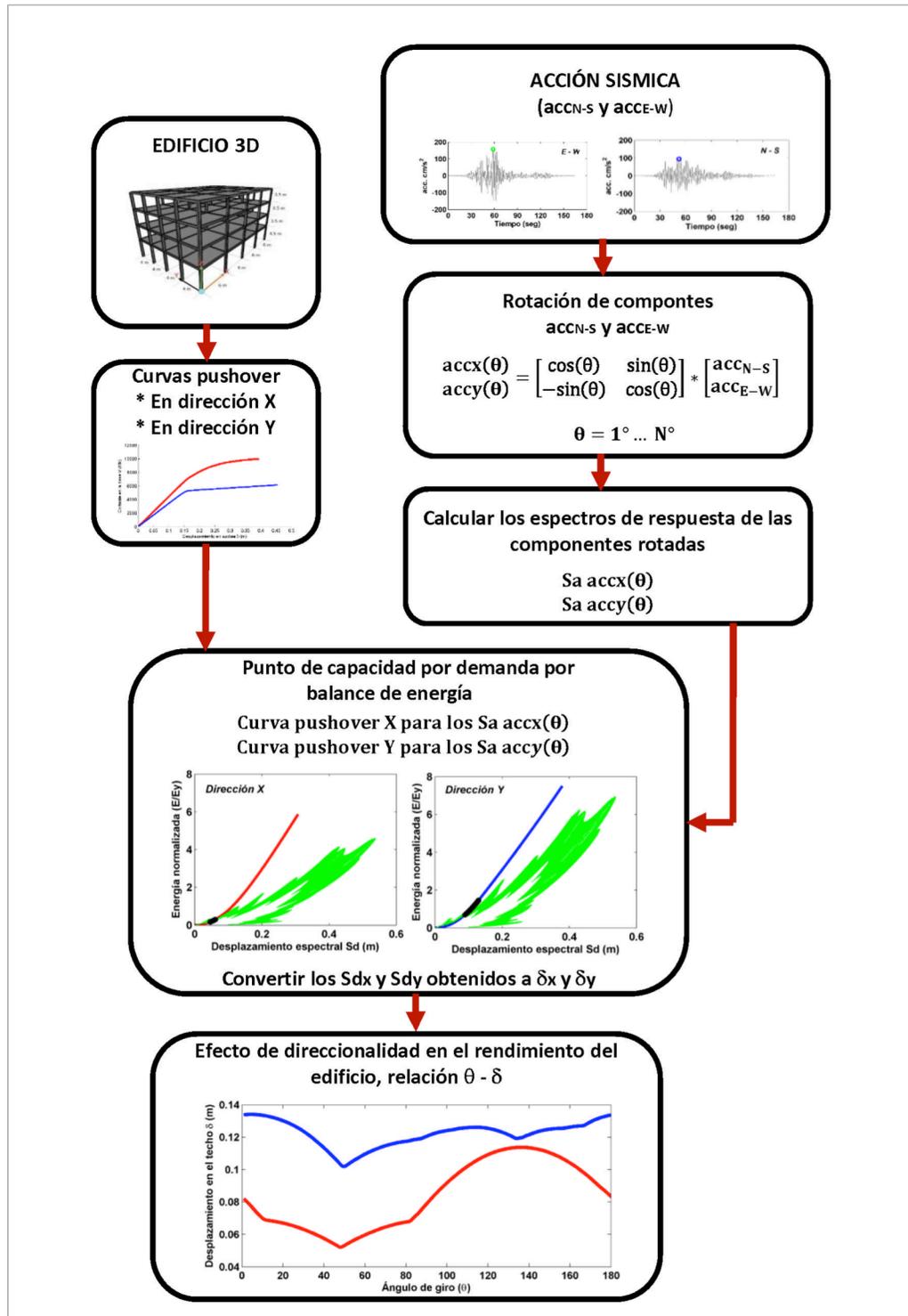


Figura 4. Técnica alternativa para considerar la variación del rendimiento sísmico de los edificios dependiendo de la orientación con respecto a una determinada acción sísmica.



1. Se realizó el AENL, obteniendo las curvas de capacidad de las direcciones principales del edificio (X e Y). Para esto, se utilizó el método de pushover adaptativo (PA) (Satyarno, 2000) incluido en el

programa Ruaumoko 3D (Carr, 2002). Sin embargo, también se puede usar el pushover convencional. Las curvas de capacidad se muestran en la Figura 5.

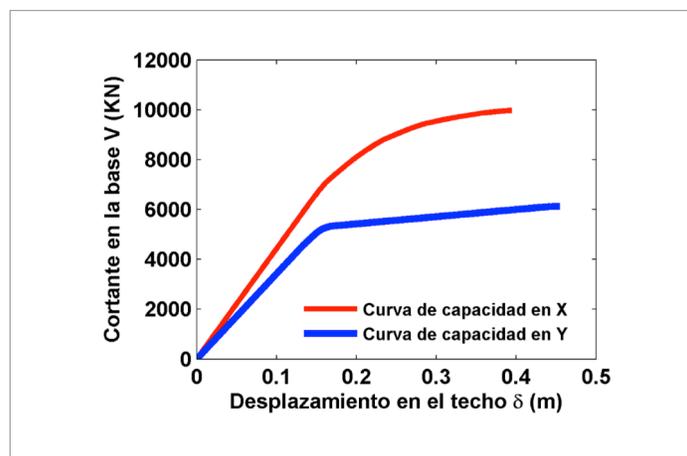


Figura 5. Curvas de capacidad en las direcciones principales del edificio (X e Y)

2. Las componentes rotadas ($\text{accx}(\theta)$ y $\text{accy}(\theta)$) de cada registro sísmico se obtienen con la ecuación 1. En este estudio, el edificio tiene simetría, por lo que las dos componentes horizontales de cada registro sísmico se rotan grado a grado de 0° a 180° .
3. Se calcula el espectro de respuesta de las componentes rotadas ($\text{Sa accx}(\theta)$ y $\text{Sa accy}(\theta)$) de cada registro sísmico.
4. El conjunto de $\text{Sa accx}(\theta)$ y $\text{Sa accy}(\theta)$ de cada registro sísmico se normaliza por su respectiva mayor PGA de las dos componentes registradas (máximo PGA_x y PGA_y de cada registro sísmico, marcado en rojo en Tabla 2). La normalización logra mantener las relaciones entre los dos componentes horizontales del mismo registro y la relación de cada componente registrado con sus respectivos componentes rotado. Como ejemplo, los espectros de respuesta del registro sísmico 2 se muestra en la Figura 6 y en la Figura 7 se muestra la

variación de la aceleración espectral $\text{Sa accx}(\theta)$ y $\text{Sa accy}(\theta)$ de cada registro sísmico para el período $T = 0$ s., equivalente al PGA del registro sísmico y para los períodos fundamentales de cada dirección principal del edificio $T1x = 0.89$ s. y $T1y = 1.04$ s. La variación en la aceleración espectral puede estar relacionada con el rendimiento sísmico del edificio dependiendo de la orientación que tenga respecto a la acción sísmica aplicada. En la Tabla 3 se muestra el ángulo donde se genera la máxima aceleración espectral en $\text{Sa accx}(\theta)$ y $\text{Sa accy}(\theta)$ de cada registro sísmico para $T = 0$ s., $T1x$ y $T1y$. Por otro lado, con la normalización, el conjunto de espectros $\text{Sa accx}(\theta)$ y $\text{Sa accy}(\theta)$ de cada registro sísmico se puede escalar para cualquier PGA requerido. Para este estudio, se usan dos PGA. El primero de 0.12 g para que el rendimiento del edificio esté en su rango lineal y el segundo de 0.22 g para que el rendimiento del edificio esté en el rango no lineal.

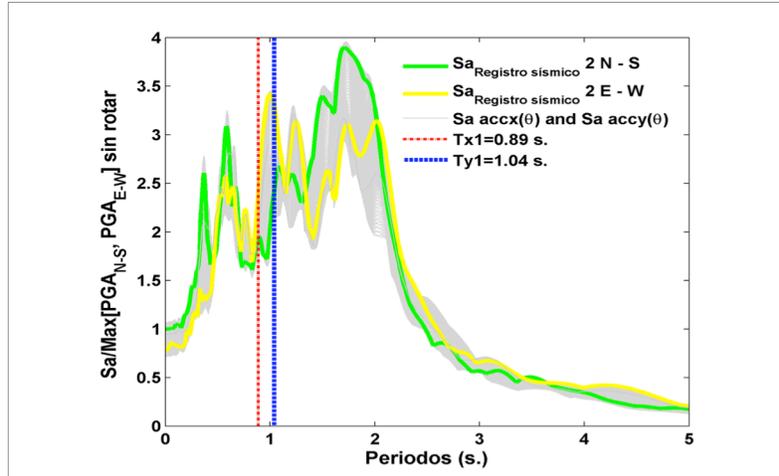


Figura 6. Espectros de respuesta de las componentes registradas en comparación con las rotadas ($Sa\ accx(\theta)$ y $Sa\ accy(\theta)$) del registro sísmico 2. Además, se muestran los dos periodos fundamentales (T_{x1} y T_{y1}) del edificio estudiado, que corresponde a las direcciones principales (X e Y)

Tabla 3. Ángulo donde se presenta la aceleración espectral máxima en $Sa\ accx(\theta)$ y $Sa\ accy(\theta)$ de cada registro sísmico para $T = 0\ s.$, T_{1x} y T_{1y}

Registro sísmico	Ángulo en $Sa\ accx(\theta)$		Ángulo en $accy(\theta)$	
	$T_x=0\ s.$ o PGA_x	$T_{1x}=0.89\ s.$	$T_y=0\ s.$ o PGA_y	$T_{1y}=1.04\ s.$
1	51°	137°	141°	8°
2	35°	19°	125°	99°
3	11°	146°	101°	132°
4	82°	131°	172°	93°

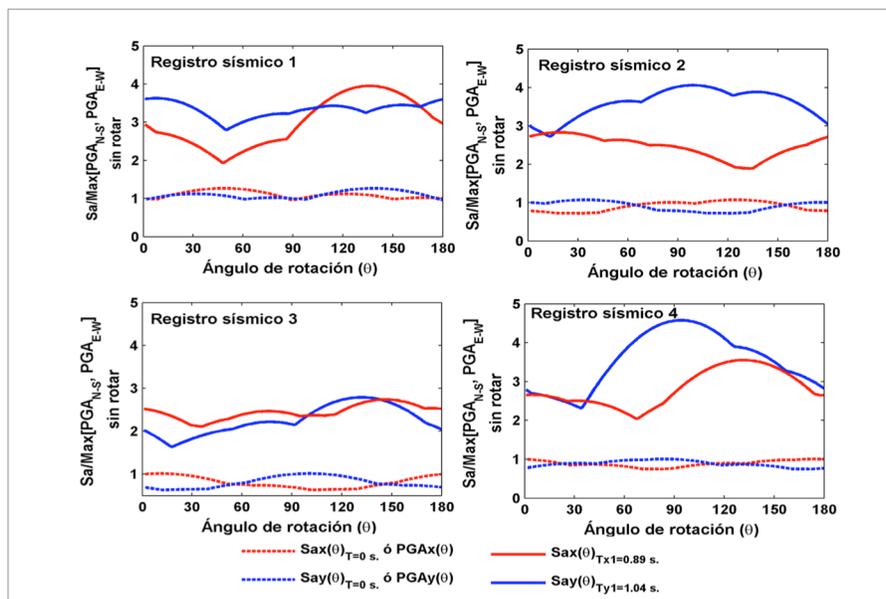


Figura 7. Variación de la aceleración espectral como una función del ángulo de rotación (θ) para $T = 0\ s.$ (PGA) y para los periodos $T_{x1} = 0.89\ s.$ y $T_{y1} = 1.04\ s.$ en los espectros $Sa\ accx(\theta)$ y $Sa\ accy(\theta)$ de cada registro sísmico



5. Obtenemos el desplazamiento en el techo, δ del punto de desempeño (PP) en las curvas de capacidad X e Y para su conjunto respectivo de Sa accx (θ) y Sa accy (θ) de cada registro sísmico. En este enfoque, el balance de energía (EB) (Mezzi et al., 2006; Leelataviwat et al., 2009; Diaz et al., 2017b) se utiliza para cruzar los espectros de capacidad con el de demanda. Sin embargo, cualquier otra técnica se puede utilizar para estimar el PP, que se considere adecuado para el tipo de estructura. El método EB se basa en la relación entre el espectro de respuesta de energía del acelerograma (S_a) y la curva de capacidad, convertida a Energía Acumulada por Deformación (EAD). Ambas curvas deben expresarse en desplazamiento de energía espectral ($S_d - E$) normalizado por la energía en el punto de fluencia de la curva de capacidad (E_y). El espectro de respuesta energética S_a se obtiene con las ecuaciones propuestas por Chopra y Goel (2002) y Lee et al. (2004); mientras que la curva EAD se define como el área bajo la curva de capacidad $F(\xi)$, con la siguiente ecuación:

$$EAD(\delta) = \int_0^{\delta} F(\xi) d\xi \quad 0 \leq \xi \leq \delta_u; \quad 0 \leq EAD(\delta) \leq EAD(\delta_u) \quad (2)$$

En esta curva, el desplazamiento en el techo (δ) se debe convertir a desplazamiento espectral por la relación $S_d = \delta / PF$. Se describen más detalles de estas funciones de energía y cómo se calcula el punto de capacidad por demanda en la investigación de Leelataviwat et al. (2009) y Diaz et al. (2017b). Un ejemplo del resultado de aplicar esta técnica se muestra en la Figura 8. También, el δ_u se puede obtener aplicando el método del espectro de capacidad (CSM) propuesto en el ATC-40 (1996) y en el FEMA-273 (1997).

6. El paso anterior se aplicó a los 4 registro sísmico escalados para los dos PGA elegidos (0.12 y 0.22 g). Se obtienen los valores del desplazamiento en el techo δ en función del ángulo de rotación θ , correspondiente al punto de desempeño (PP). Los resultados se muestran en la Figura 9.

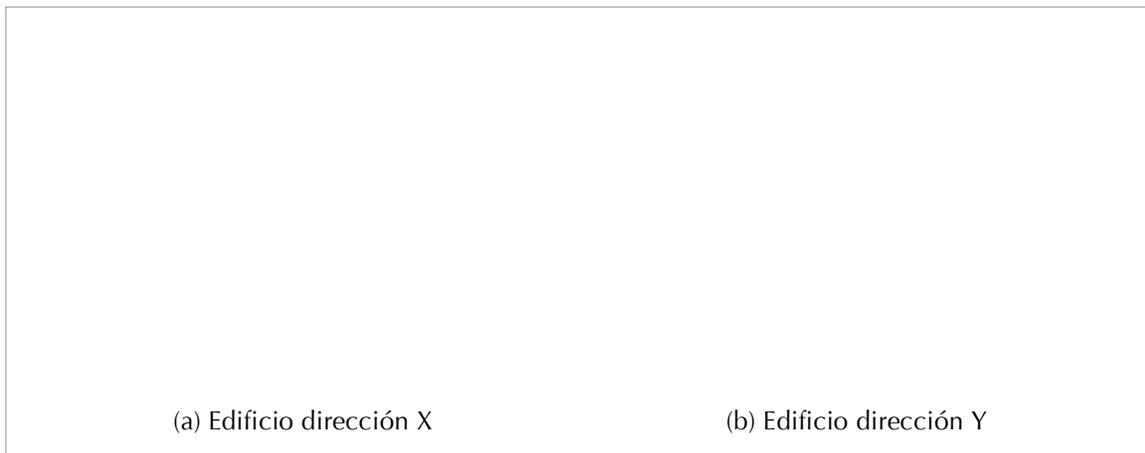


Figura 8. Ejemplo del método EB para curvas EAD con Sa accx (θ) y Sa accy (θ) del registro sísmico 2 escalado para un PGA de 0.12 g.

2.2 Análisis dinámico no lineal

En esta sección, se calcula el análisis del efecto de la orientación del edificio en su rendimiento, utilizando el análisis dinámico no lineal, ADNL. En este enfoque, las componentes horizontales de cada registro sísmico se rotan de 0 a 180 ° con incrementos de 1 °, siguiendo la ecuación 1 y se introducen uno por uno en el ADNL. El análisis también se realiza para los 4 registros sísmicos escalados para los dos PGA elegidas (0.12 g y 0.22 g) en el método alternativo. Se obtienen los valores de desplazamiento en el techo, δ en función del ángulo de rotación θ . Los resultados también se muestran en la Figura 9. Estos son comparados con los obtenidos con la técnica alternativa. En la Tabla 4 se muestran los ángulos en los que se obtienen los mayores

desplazamientos en el edificio para el Sa accx (θ) y Sa accy (θ) de cada registro sísmico con el ADNL. Finalmente, la Tabla 5 muestra, para los 8 casos estudiados (2 intensidades PGA x 4 registro sísmicos) el desplazamiento máximo del techo, máx. δ y el desplazamiento en el techo δ obtenido con las componentes registradas originales (sin rotar).

La comparación de las tablas 3 y 4 muestra que el ángulo donde se obtiene la mayor aceleración espectral para el período $T = 0$ s, difiere del ángulo en el que se presenta el mayor desplazamiento en las direcciones principales (X e Y) del edificio; caso contrario, con el ángulo determinado para la mayor aceleración para los períodos T_{1x} y T_{1y} , donde se observa que son similares con el ángulo del mayor desplazamiento en X e Y respectivamente, especialmente en

SPANISH VERSION.....

los casos en que la estructura está en la zona lineal, que es, prácticamente el mismo ángulo. En algunos casos, se obtienen aumentos significativos de hasta un 42% en los

desplazamientos esperado, si se tiene en cuenta el efecto de la orientación del edificio sobre su rendimiento (véase la Tabla 5).

Tabla 4. Ángulo donde se presenta el mayor desplazamiento en las direcciones X e Y considerando el efecto de la orientación en el rendimiento del edificio con ADNL

Registro sísmico	PGA=0.12 g (zona lineal)		PGA=0.22 g (zona no-lineal)	
	X	Y	X	Y
1	136°	6°	108°	0°
2	19°	99°	12°	157°
3	148°	132°	147°	136°
4	130°	84°	132°	99°

Tabla 5. Comparación del mayor desplazamiento en X e Y con el desplazamiento de los componentes no rotados obtenidos con el ADNL

#	PGA=0.12 g (zona lineal)				PGA=0.22 g (zona no-lineal)			
	$\delta_{max X}$ (m)	$\delta_{X no rotado}$ (m)	$\delta_{max Y}$ (m)	$\delta_{Y no rotado}$ (m)	$\delta_{max X}$ (m)	$\delta_{X no rotado}$ (m)	$\delta_{max Y}$ (m)	$\delta_{Y no rotado}$ (m)
1	0.119	0.0835	0.1366	0.1363	0.1897	0.1661	0.2112	0.2112
2	0.0781	0.0756	0.1551	0.1140	0.1409	0.1354	0.2084	0.1911
3	0.0771	0.0703	0.1044	0.0734	0.1412	0.1253	0.1616	0.1217
4	0.0950	0.0767	0.1654	0.1062	0.1544	0.1429	0.2260	0.1774



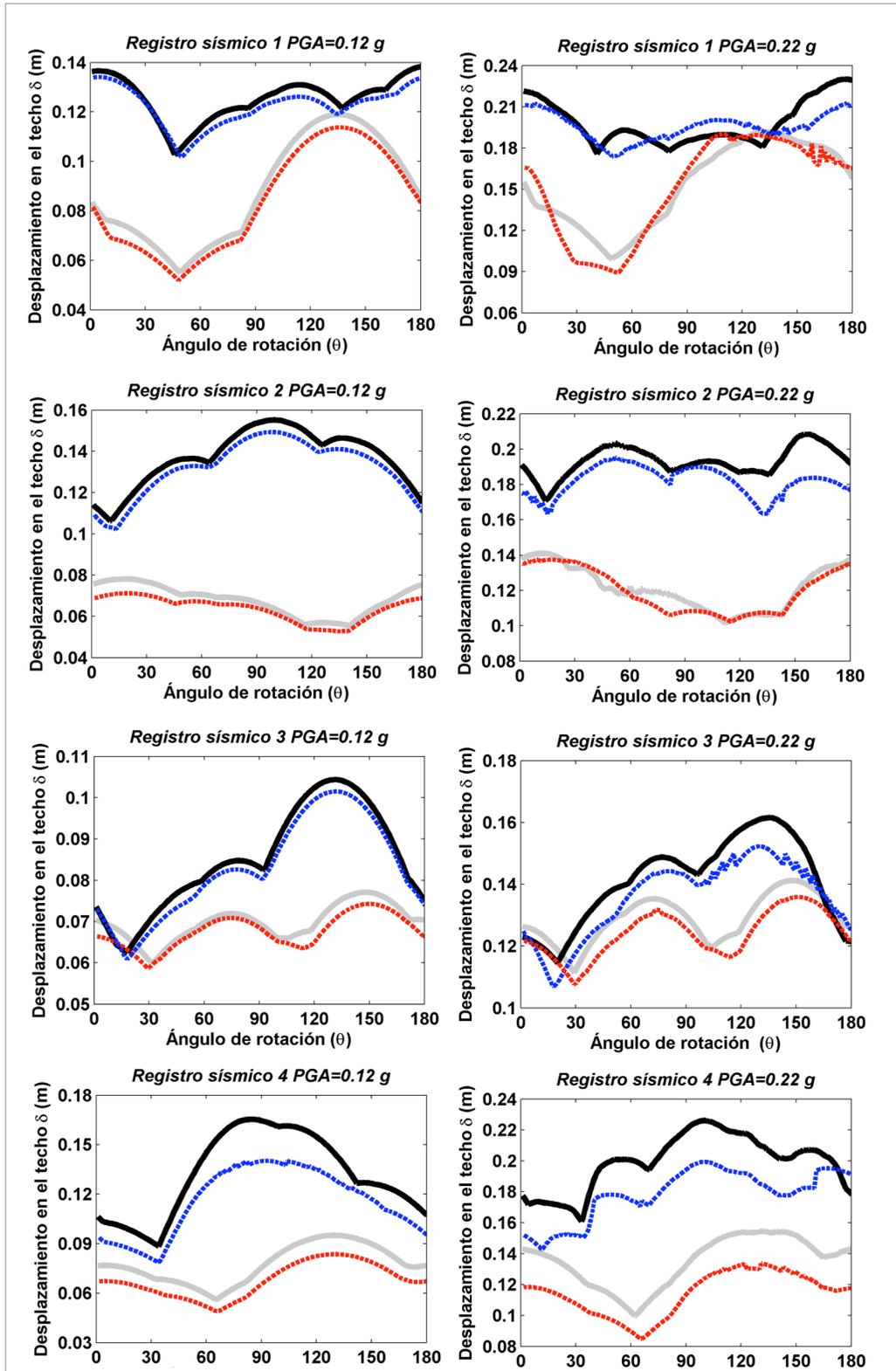


Figura 9. Relación $\theta - \delta$ obtenida con el análisis de direccionalidad usando la técnica alternativa y el ADNL para los 4 registros sísmicos escalados (PGA de 0.12 g y 0.22 g)

3. Discusión

Del estudio presentado en este artículo, se obtienen los siguientes resultados relevantes: (i) comparando los resultados del método alternativo, basado en la AENL, con los obtenidos a mediante el ADNL, se destacan dos aspectos: (1) en la zona lineal (para un PGA de 0.12 g) hay un buen acuerdo entre los resultados del AENL y el ADNL y (2) en la zona no lineal (para un PGA de 0.22 g) el acuerdo es menor (hay algunas diferencias en los desplazamientos obtenidos); en cualquier caso, el efecto de la orientación del edificio con respecto a la acción sísmica se detecta bien y es coherente con ambos análisis tanto para las acciones débiles como para las fuertes. (ii) Se observa que el lado débil de la estructura, la dirección Y, es el que tiene el mayor desplazamiento, es decir, dependiendo del ángulo de orientación del edificio con respecto a la acción sísmica, puede ser más intenso, y cuando afecta la dirección débil del edificio, el rendimiento esperado será el peor. (iii) Se obtiene una alta variabilidad en el rendimiento esperado en función de la orientación del edificio, como se muestra en la Tabla 5. (iv) Existe una buena relación entre la dirección o el ángulo donde se presenta la demanda sísmica más alta para el periodo fundamental del edificio, con la dirección donde se obtiene el mayor desplazamiento, especialmente en la zona lineal. Esta relación disminuye o se pierde en la zona no lineal, lo que se atribuye al hecho de que en esta zona el edificio comienza a tener daños en algunos de sus elementos, lo que provoca un cambio en su rigidez y aumenta su período fundamental, por lo tanto, la demanda sísmica correspondiente a su modo fundamental ya no será la que se está aplicando en el edificio. (v) Los desplazamientos obtenidos (ver Figura 9) se pueden usar para realizar un análisis del daño esperado. Para ello, puede usarse el método propuesto en el proyecto RISK EU (Milutinovic and Trendafiloski, 2003) o el índice de daño simplificado que se puede obtener directamente de la curva de capacidad propuesta por Pujades et al. (2015) para estructuras de hormigón armado y para estructuras de acero (Díaz et al., 2017a y Díaz et al., 2017b).

4. Conclusiones

En este artículo se estudia el efecto de direccionalidad

sísmica en el rendimiento de los edificios. Son obtenidas las siguientes conclusiones:

- Analizando los desplazamientos obtenidos con ambos enfoques que consideran el efecto de la orientación del edificio respecto a los acelerogramas aquí estudiados, se observa que la influencia de la orientación es relevante y significativa, ya que, en algunos casos, las respuestas esperadas pueden incrementarse hasta un 42% dependiendo de la orientación del edificio.
- El método alternativo proporciona resultados con excelente compatibilidad con los obtenidos con ADNL, que es más sofisticado y costoso, por lo que se considera una alternativa rápida y directa que permite considerar el efecto de direccionalidad sísmica en los edificios.
- Los resultados de esta investigación muestran que, el estudio del efecto de direccionalidad aplicado en el rendimiento de los edificios es de gran interés en el campo de la ingeniería sísmica y debe considerarse en futuros códigos estructurales ya que permite mejorar la evaluación en el daño sísmico esperado en los edificios.

5. Agradecimientos

Esta investigación ha sido parcialmente financiada por el Ministerio de Economía y Competitividad (MINECO) del Gobierno de España y por el Fondo Europeo de Desarrollo Regional (FEDER) de la Unión Europea a través de los proyectos de investigación de referencia: CGL2011-23621 y CGL2015-65913-P (MINECO / FEDER, UE). El primer autor tuvo las becas de doctorado de la Universidad Juárez Autónoma de Tabasco (UJAT) y del "Programa de Mejoramiento del Profesorado, México (PROMEP). El tercer autor es apoyado por una beca de doctorado del Instituto para la Formación y Aprovechamiento de Recursos Humanos (IFARHU) y de la Secretaría de Ciencia, Tecnología e Innovación (SENACYT) del Gobierno de Panamá.

6. Referencias

- ANSI/AISC 341-10 (2010)**, Seismic Provisions for Structural Steel Buildings, American National Standard and American Institute of Steel Construction, pp. 356.
- ANSI/AISC 358-10 (2010)**, Prequalified connections for special and intermediate steel moment frames for seismic applications, American National Standard and American Institute of Steel Construction, pp. 178.
- ATC-40 (1996)**, Seismic evaluation and retrofit of concrete buildings, Applied Technology Council, Redwood City, California, pp 346.
- Boore D.M. (2010)**, Orientation-independent, nongeometric-mean measures of seismic intensity from two horizontal components of motion. Bull. Seismol. Soc. Am., 100:1830–1835, doi: <https://doi.org/10.1785/0120090400>.
- Boore D.M., Watson-Lamprey J.A. and Abrahamson, N.A. (2006)**, Orientation-independent measures of ground motion. Bull. Seismol. Soc. Am., 96:1502–1511, doi: <https://doi.org/10.1785/0120050209>.



- Bozorgnia Y., Abrahamson N.A., Al Atik L., et al. (2014)**, NGA-West2 research project. *Earthq. Spectra*, 30: 973–987, doi: <https://doi.org/10.1193/072113EQS209M>.
- Carr A.J. (2002)**, Ruaumoko 2d y 3d- inelastic dynamic analysis program. University of Canterbury, New Zealand.
- Chopra A. and Goel R. (2002)**, A modal pushover analysis procedure for estimating seismic demands for buildings. *Earthq. Eng. Struct. Dyn.*, 31:561–582, doi: <https://doi.org/10.1002/eqe.144>.
- Diaz S.A., Pujades L.G., Barbat A.H., Hidalgo-Leiva D.A. and Vargas Y.F. (2017a)**, Capacity, damage and fragility models for steel buildings. A probabilistic approach. *Bulletin of Earthquake Engineering*, doi: <https://doi.org/10.1007/s1051>.
- Diaz S.A., Pujades L.G., Barbat A.H., Vargas Y.F. and Hidalgo-Leiva D.A. (2017b)**, “Energy damage index based on capacity and response spectra”, *Eng. Struct.*, 152(1):424–436. doi: <https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2017.09.019>.
- FEMA 273 (1997)**, NEHRP guidelines for the seismic rehabilitation of buildings, Federal Emergency Management Agency, Washington, DC. pp. 435.
- García-Soto A., Hong H. and Gomez R. (2012)**, Effect of the Orientation of Record on the Estimated Displacement Ductility Demand. *Can. J. Civ. Eng.*, 39(4):362–373, doi: <https://doi.org/10.1139/l2012-010>.
- Hong H., Pozos-Estrada A. and Gómez-Martínez R. (2009)**, Orientation effect on ground motion measurement for Mexican subduction earthquakes. *Earthq. Eng. Vib.*, 8:1–16, doi: <https://doi.org/10.1007/s11803-009-8155-z>.
- Ibarra L.F., Medina R.A., Krawinkler H. (2005)**, Hysteretic models that incorporate strength and stiffness deterioration. *Earthq. Eng. Struct. Dyn.*, 34:1489–1511, doi: <https://doi.org/10.1002/eqe.495>.
- Kostinakis K., Athanatopoulou A. and Morfidis K. (2015)**, Correlation between ground motion intensity measures and seismic damage of 3D R/C buildings. *Eng. Struct.*, 82:151–167, doi: <https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2014.10.035>.
- Kostinakis K. and Morfidis K. (2017)**, The impact of successive earthquakes on the seismic damage of multistorey 3D R/C buildings. *Earthq. and Struct.*, 12:1–12, doi: <https://doi.org/10.12989/eas.2017.12.1.001>.
- Lagaros N.D. (2010)**, The impact of the earthquake incident angle on the seismic loss estimation. *Eng. Struct.*, 32:1577–89, doi: <https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2010.02.006>.
- Lee S., Goel S.C. and Chao S. (2004)**, Performance-based seismic design of steel moment frames using a target drift and yield mechanism. *Proceedings of the 13th World Conference on Earthquake Engineering*, Vancouver, Canada.
- Leelataviwat S., Saewon W. and Goel S.C. (2009)**, Application of energy balance concept in seismic evaluation of structures. *J. Struct. Eng.*, 135:113–121, doi: [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)0733-9445\(2009\)135:2\(113\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)0733-9445(2009)135:2(113)).
- Lignos D.G. and Krawinkler H. (2011)**, Deterioration Modeling of Steel Components in Support of Collapse Prediction of Steel Moment Frames under Earthquake Loading. *J. Struct. Eng.*, 137:1291–1302, doi: [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)ST.1943-541X.0000376](https://doi.org/10.1061/(ASCE)ST.1943-541X.0000376).
- Lignos D.G. and Krawinkler H. (2013)**, Development and Utilization of Structural Component Databases for Performance-Based Earthquake Engineering. *J. Struct. Eng.*, 139:1382–1394, doi: [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)ST.1943-541X.0000646](https://doi.org/10.1061/(ASCE)ST.1943-541X.0000646).
- Mezzi M., Comodini F., Lucarelli M., et al. (2006)**, Pseudo-energy response spectra for the evaluation of the seismic response from pushover analysis. *Proceedings of the 1st European Conferences on Earthquake Engineering and Seismology*, Geneva, Switzerland.
- Milutinovic Z. and Trendafiloski G. (2003)**, RISK-UE. An advanced approach to earthquake risk scenarios with applications to different European towns. WP04 Vulnerability of current buildings, pp. 111.
- NTC-DF (2004)**, Norma Técnica Complementaria del Distrito Federal. Diseño por Sismos. Ciudad de México, Gaceta oficial de México. Tomo I y II, pp. 586.
- Pinzón L.A., Hidalgo-Leiva D.A. and Pujades L.G. (2015)**, Medidas de intensidad sísmica independientes de la orientación del sensor: Aplicación a una base de datos con acelerogramas de Costa Rica, El Salvador y Nicaragua. *Rev I+D Tecnológico*, 11:55–67, doi: <https://doi.org/10.13140/rg.2.1.2564.4240>
- Power M., Chiou B., Abrahamson N.A., et al. (2008)**, An overview of the NGA project. *Earthq. Spectra*, 24:3–21, doi: <https://doi.org/10.1193/1.2894833>.
- Pujades L.G., Vargas-Alzate Y.F., Barbat A.H. and González-Drigo J.R. (2015)**, Parametric model for capacity curves. *Bull. Earthq. Eng.*, 13:1347–1376, doi: <https://doi.org/10.1007/s10518-014-9670-5>.
- Reyes-Salazar A., Valenzuela-Beltrán F., De León-Escobedo D., Bójorquez-Mora E, and López-Barraza A. (2016)**, Combination rules and critical seismic response of steel buildings modeled as complex MDOF systems. *Earthq. and Struct.*, 10(1):211–238, doi: <https://doi.org/10.12989/eas.2016.10.1.211>.
- Rigato A.B. and Medina R.A (2007)**, Influence of angle of incidence on seismic demands for inelastic single-storey structures subjected to bi-directional ground motions. *Eng. Struct.*, 29:2593–2601, doi: <https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2007.01.008>.
- Satyarno I. (2000)**, Adaptive pushover analysis for the seismic assessment of older reinforced concrete buildings. Ph.D. Dissertation, University of Canterbury, Canterbury.
- Vargas-Alzate Y.F., Barbat A.H., Pujades L.G. and Hurtado J.E. (2012)**, Probabilistic vulnerability assessment of a reinforced Concrete structure by using a 3-D model. *Proceedings of the 15th World Conference on Earthquake Engineering (15WCEE)*. Lisboa, Portugal.
- Vargas-Alzate Y.F., Pujades L.G., Barbat A.H., and Hurtado J.E. (2013)**, Capacity, fragility and damage in reinforced concrete buildings: A probabilistic approach. *Bull. Earthq. Eng.*, 11(6):2007–2032, doi: <https://doi.org/10.1007/s10518-013-9468-x>.
- Vargas-Alzate Y.F., Pujades L.G., Barbat A.H., Hurtado J.E., Diaz S.A. and Hidalgo-Leiva D.A. (2017)**, Probabilistic seismic damage assessment of reinforced concrete buildings considering directionality effects. *Struct. Infrastruct. Eng.*, 2479(October):1-13. DOI: <https://doi.org/10.1080/15732479.2017.1385089>.

