

Metodología simplificada para la evaluación sísmica de edificios escolares tipo UC

Simplified methodology for the seismic assessment of school buildings type UC

Jorge Ruiz García*¹

RESUMEN

En este artículo se presenta una metodología simplificada para la evaluación sísmica de edificios escolares urbanos estructurados a base de marcos de concreto reforzado, clasificados como tipo UC. La metodología se basa en considerar la respuesta, en términos de la demanda de desplazamiento lateral máximo, de un sistema equivalente de un grado de libertad cuyo comportamiento está descrito por una envolvente idealizada trilineal. La envolvente trilineal considera una pendiente negativa posterior a la capacidad máxima, la cual representa la posible formación de un mecanismo de colapso en la planta baja asociado a la falla por cortante en las “columnas cortas” de concreto reforzado. La metodología propuesta permite la estimación de la distorsión máxima del primer nivel, IDR_1 , y de las “columnas cortas” de la planta baja, IDR_c , las cuales se emplean para estimar el daño en las columnas mediante funciones de fragilidad.

ABSTRACT

This paper presents a simplified methodology for the seismic assessment of urban school buildings whose structural system is based on reinforced concrete frames, classified as type UC. The methodology is founded in the response, in terms of the maximum lateral displacement, of an equivalent single-degree-of-freedom system whose behavior is described by an idealized trilinear envelope. The trilinear envelope includes a post-peak negative slope that represents the possible collapse mechanism associated to the shear failure of reinforced concrete captive columns at the ground floor. The introduced methodology allows an estimation of the interstorey drift at the first storey, IDR_1 , and the interstorey drift at the captive columns, IDR_c , which can be used to estimate their damage state through fragility functions.

Recibido: Noviembre 2025
Aceptado: Diciembre 2025
Publicado: Diciembre 2025

Palabras Clave:

Escuelas
Columna corta
Falla por cortante
Distorsión máxima

Keywords:

Schools
Short column
Shear failure
Maximum interstorey drift

1. INTRODUCCIÓN

Los edificios escolares se consideran como estructuras esenciales y, por ello, deben permanecer en operación después de un evento sísmico intenso; es decir, deben cumplir con el nivel de desempeño de operación inmediata. Sin embargo, eventos sísmicos recientes han evidenciado el inadecuado desempeño sísmico de los edificios escolares, principalmente públicos, en México. Por ejemplo, se informó que 15,822 edificios escolares exhibieron algún tipo de daño a consecuencia de los sismos interplaca del 7 de septiembre ($M_w 8.2$) e intraplaca del 19 de septiembre ($M_w 7.1$) de 2017 que afectaron a 9 estados y la Ciudad de México (INIFED, 2017; PNR, 2019). Debe notarse que esta cifra se actualizó a 16,136 edificios escolares con algún tipo de daño al 25 de octubre, lo cual puede parcial-

*Jorge Ruiz García, jruizgar@umich.mx

¹Profesor-Investigador Titular, Facultad de Ingeniería Civil, Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo, Edificio C, Cd. Universitaria, Morelia 58040, Michoacán. jruizgar@umich.mx

mente atribuirse al efecto de las réplicas posteriores al evento principal (PNR, 2019).

Posteriormente, el 16 de febrero de 2018 ocurrió un temblor de $M_w 7.1$ que afectó seriamente el estado de Oaxaca, el cual incrementó a 19,194 el número de edificios escolares que sufrieron algún tipo de daño. Recientemente, se reportó que 331 edificios escolares sufrieron algún tipo de daño a consecuencia del sismo del 19 de septiembre de 2022 en el estado de Michoacán, cuyo epicentro se ubicó a 63 km de la ciudad de Coalcomán, y al menos 148 edificios escolares se reportaron con algún tipo de daño en el estado de Colima a causa del temblor.

Con base en informes de inspecciones de campo después de eventos sísmicos históricos, se han identificado los tipos de falla más comunes en edificaciones escolares (por ejemplo, Alcocer y otros, 2020a). En particular, los edificios escolares urbanos estructurados a base de marcos de concreto reforzado, denominados edificios escolares tipo UC, exhiben recurrentemente una falla por cortante en las columnas de concreto reforzado, como se ilustra en la Figura 1. Esta forma de falla se origina por: 1) el fenómeno de columna “corta”, atribuido a que los muros adyacentes (divisorios) de mampostería no se desligan de las columnas, lo cual disminuye su altura libre, y 2) a que su resistencia a cortante en la altura del muro divisorio es insuficiente para resistir las fuerzas cortantes actuantes, debido a la excesiva separación de estribos y/o baja cuantía de refuerzo transversal (Guevara y García, 2005; Alcocer y otros, 2020a). Para fines de ilustración, en la figura 1 se muestra la falla por cortante en las columnas de la planta baja en dos escuelas en el estado de Morelos catalogadas con daño grave a consecuencia del temblor del 19 de septiembre de 2017, mientras que en la figura 2 se muestra nuevamente la falla por cortante en las “columnas cortas” de un edificio escolar debido al temblor del 19 de septiembre de 2022.



Figura 1 Edificios escolares con daño grave debido a falla por cortante en “columnas cortas” en la planta baja debido al temblor del 19 de septiembre de 2017 (tomadas de: García-Carrera et al., 2018).



Figura 2 Daño estructural grave por efecto de “columna corta” en escuela de un nivel en Tecomán, Colima, debido al temblor del 19 de septiembre de 2022 (tomadas de: Vizcaino, 2022).

Como parte del Programa Global para Escuelas Seguras (Global Program for Safer Schools) a cargo del Banco Mundial (World Bank, 2019) se propuso una metodología para evaluar la fragilidad y vulnerabilidad sísmica de edificios escolares índice. La metodología se basó en el método N2 (Fajfar y Gaspersic, 1996) para la evaluación del desempeño sísmico de edificios. Como parte del método N2, se propone convertir la curva de capacidad (es decir, fuerza cortante basal, V_b , vs. desplazamiento lateral de azotea, Δ_{azotea}), obtenida a partir de un análisis estático no lineal de un modelo analítico del edificio en consideración, a una envolvente bilineal empleando un criterio de igualación de energía. Posteriormente, se obtiene un sistema equivalente de un grado de libertad, SE1GL, cuyo comportamiento está descrito por la envolvente bilineal y, en consecuencia, su comportamiento histérico es elastoplástico perfecto como se ilustra en la Figura 3a.

Particularmente en México, son aún escasos los estudios previos enfocados en la evaluación sísmica de edificios escolares (Tena y Álvarez, 1995; Jaimes y Niño, 2017; Alcocer et al., 2020b; Ruiz-García et al., 2020, 2021). Por ejemplo, Jaimes y Niño (2017) llevaron a cabo análisis dinámicos no lineales para tres familias de edificios escolares estructurados a base de marcos de concreto reforzado de uno, dos y tres niveles diseñados con las disposiciones normativas para diseño por sismo de 1976, 1987 y 2004. Las vigas y columnas se modelaron con el criterio de plasticidad concentrada considerando el modelo modificado de Ibarra, Medina y Krawinkler (Ibarra et al., 2005), sin especificar el modo de falla de los elementos. Recientemente, Alcocer y otros (2020b) emplearon el método N2 (Fajfar y Gaspersic, 1996) para evaluar el desempeño sísmico de modelos analíticos representativos de edificios escolares estructurados a base de marcos de concreto reforzado conforme a los requerimientos de 1970 (tipo UC-1970), así como marcos con muros estructurales de concreto reforzado conforme a los requerimientos de 2011. Para desarrollar los análisis estáticos no lineales de los modelos analíticos de los edificios tipo UC-1970, los autores emplearon un criterio de plasticidad concentrada en el modelado de los elementos estructurales, considerando una envolvente fuerza-deformación sugerida en las disposiciones ASCE 41-17 (2017) y ASCE 41-23 (2023) para las vigas y columnas suponiendo una falla por flexión (es decir, falla dúctil). La curva de capacidad obtenida para cada modelo analítico fue idealizada como una envolvente bilineal elastoplástica.

Sin embargo, estudios recientes desarrollados por Ruiz-García y colaboradores (2020, 2021) con modelos analíticos refinados de edificios escolares, representativos de edificios tipo UC diseñados en la década de los 1990's, han evidenciado que su curva de capacidad exhibe una pendiente negativa una vez que alcanza su resistencia (es decir, la fuerza cortante basal máxima ante cargas laterales), lo cual puede atribuirse a la formación de un mecanismo de planta baja débil debido a la falla por cortante en "columnas cortas", como se ilustró en la Figura 1. La observación anterior sugiere que la idealización bilineal elastoplástica de la curva de capacidad como se considera en el método N2 (Fajfar y Gaspersic, 1996) y, en consecuencia, en la metodología del Banco Mundial (World Bank, 2019) no es adecuada para caracterizar la envolvente del SE1GL y evaluar el desempeño sísmico de edificios escolares.

El objetivo del artículo consiste en presentar una metodología simplificada para la evaluación sísmica de edificios escolares. Particularmente, la metodología trata de mejorar las limitaciones de la metodología propuesta por el Banco Mundial (World Bank, 2019) dado que considera el uso de una envolvente trilineal para un sistema equivalente de un grado de libertad, en vez de una envolvente bilineal, y el uso de funciones de fragilidad para evaluar el daño en columnas, en vez del uso de índices de daño globales.

2. METODOLOGÍA

Idealmente, para la evaluación detallada de edificios escolares de varios niveles sujetos ante acciones sísmicas se deberían considerar modelos analíticos tridimensionales que consideraran diferentes fuentes de no-linealidad en el comportamiento de la estructura. Sin embargo, considerando que los edificios escolares responden principalmente en el primer modo de vibración y el modo de falla predominante ocurre en la dirección longitudinal, es posible considerar una técnica de modelado simplificada para su análisis. De esta manera, en este estudio se empleó una metodología simplificada para la evaluación sísmica de este tipo de edificios. La metodología se divide en siete etapas:

Paso 1. Desarrollo de un modelo analítico que considere adecuadamente los modos de falla esperados de los elementos estructurales. Particularmente, se debe considerar un comportamiento histerético que represente la falla por cortante en columnas si existe evidencia de la formación de "columnas cortas". Asimismo, se deberán modelar la participación de los muros de mampostería alñados a las columnas considerando, por ejemplo, el modelado de puntales a compresión.

Paso 2. Obtener la curva de capacidad (cortante basal, V_b -desplazamiento lateral de azotea, Δ_{azotea}) del edificio escolar mediante un análisis estático no lineal (denominado pushover en la literatura inglesa). La curva de capacidad V_b - D_{azotea} también se puede expresar como V_b/W - D_{azotea} , donde W es el peso total del edificio y D_{azotea} es la distorsión de azotea (es decir, Δ_{azotea}/H , donde H es la altura total de edificio escolar en consideración).

Paso 3. Obtener una curva envolvente trilineal idealizada de la curva de capacidad, como se ilustra

en la figura 3b. Para obtener la idealización trilineal de la curva de capacidad se puede emplear el método de igual energía o el método descrito en la norma ASCE/SEI 41 (2017, 2023) de los Estados Unidos. La envolvente trilineal está caracterizada por la rigidez inicial (elástica), K_e , la rigidez de post-fluencia, $\alpha_s K_e$ (donde α_s es un parámetro que representa una fracción de K_e), y la rigidez post-pico, $\alpha_c K_e$ (donde α_c es un parámetro con valor negativo). Cabe aclarar que la metodología del Banco Mundial también considera el método de igual energía para obtener una envolvente bilineal idealizada de la curva de capacidad, la cual desprecia la pendiente con rigidez negativa una vez alcanzada la resistencia del edificio escolar, como se muestra en la figura 3a.

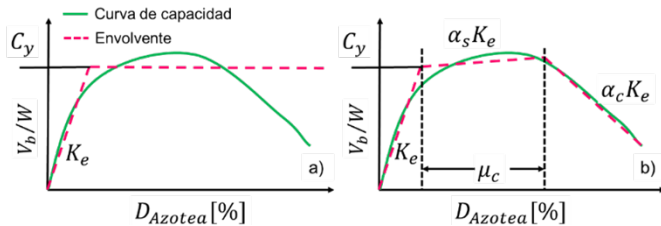


Figura 3 Curvas de capacidad y su idealización: a) bilineal y b) trilineal (con pendiente negativa).

Paso 4. Obtener el coeficiente asociado a la fluencia, C_y (definido como la fuerza cortante basal asociada a la fluencia, $V_{b,y}$, normalizada respecto a W), la capacidad de ductilidad de desplazamiento, μ_c , así como los parámetros α_s y α_c , a partir de la envolvente idealizada trilineal. Estos valores se emplean para considerar la envolvente de un sistema equivalente de un grado de libertad, SE1GL, representativo del edificio escolar en consideración.

Paso 5. Obtener la respuesta del SE1GL, en términos de la demanda máxima de desplazamiento, Δ_{SE1GL} , sujeto a un conjunto de acelerogramas representativos del peligro sísmico donde se ubica la estructura en estudio escalados para alcanzar diferentes niveles de intensidad sísmica. Posteriormente, se obtiene la distorsión máxima de azotea para cada respuesta (es decir, cada registro) por medio de la siguiente ecuación:

$$D_{azotea} = \frac{\Gamma_1 \phi_{1,azotea} \times \Delta_{SE1GL}}{H} \quad (1)$$

donde $\Gamma_1 \phi_{1,azotea}$ es el factor de participación modal respecto al primer modo normalizado respecto a la azotea y H es la altura total del edificio escolar en consideración. Posteriormente, se procesan estadísticamente las respuestas de los SE1GL para obtener la mediana de D_{azotea} , así como su variabilidad registro-a-registro (por ejemplo, los percentiles 16 y 84 de D_{azotea}).

Paso 6. A partir de la mediana de D_{azotea} , se obtiene una estimación de la distorsión máxima del primer nivel, IDR_1 , de la siguiente manera:

$$IDR_1 = COD \times D_{azotea} \quad (2)$$

donde COD es el coeficiente de distorsión que se define como IDR_1 entre D_{azotea} . Finalmente, se obtiene una estimación de la distorsión que experimentan las “columnas cortas” en la planta baja, conforme a la siguiente relación:

$$IDR_c = (h_1/h_c) IDR_1 \quad (3)$$

donde h_1 es la altura de entrepiso del primer nivel y h_c es la altura libre de las “columnas cortas” a partir del muro de mampostería adyacente.

Paso 7. Obtener una estimación del daño estructural en las “columnas cortas” y columnas esbeltas mediante funciones de fragilidad, las cuales expresan la probabilidad de que una estructura alcance o exceda un estado de daño predefinido dado el nivel de IDR_c . En particular, se sugiere el uso de las funciones de fragilidad propuestas por Aslani y Miranda (2005) así como Ruiz-García y Ramos-Cruz (2024) para columnas con falla predominante a flexión-cortante y cortante, respectivamente, las cuales se ilustran en la figura 4. En ambos casos, los estados de daño corresponden a agrietamiento ligero (ED1), agrietamiento severo (ED2), falla por cortante (ED3) y pérdida de la capacidad a carga axial (ED4).

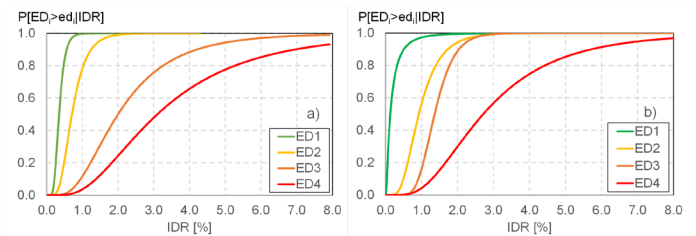


Figura 4 Funciones de fragilidad correspondientes a cuatro estados de daño para: 1) columnas con falla a flexión-cortante (Aslani y Miranda, 2005) y 2) columnas con falla a cortante (Ruiz-García y Ramos-Cruz, 2024).

3. EDIFICIOS ESCOLARES CONSIDERADOS EN ESTE ESTUDIO

Dado que la información disponible acerca de la estructuración de edificios escolares diseñados con una normatividad desactualizada es limitada, para fines de este estudio se decidió diseñar edificios escolares tipo UC representativos de la época de los 90's. Para ello, se diseñaron tres edificios escolares de uno, dos y tres niveles suponiendo que se ubicaban en la localidad de las Guacamayas, en el municipio de Lázaro Cárdenas, estado de Michoacán de Ocampo. Dicha localización fue elegida al encontrarse en una de las zonas con mayor peligro sísmico del país, debido a que la placa de Cocos y la placa Rivera se subducen ante la placa de Norteamérica dando origen a temblores de alta magnitud, como el sismo del 19 de septiembre de 1985 (Mw8.0), así como réplicas importantes como la que ocurrió el 20 de septiembre de 1985 (Mw7.6).

Para el diseño de los edificios se tomó como base la geometría y estructuración típica de edificios escolares tipo UC utilizada por Instituto de Infraestructura Física para la Educación del Estado de Michoacán (IIFEEM). De esta manera, los edificios escolares tienen una planta sensiblemente rectangular, con dimensiones de 8m x 42.88m, como se muestra en la figura 5. En el sentido largo se tienen 13 crujiás y en el sentido corto solo se cuenta con una crujiá. La altura de entrepiso típica es de 3.35 m. Los edificios están estructurados a base de marcos de concreto reforzado como se ilustra en la figura 5. Se supuso que se contaba con muros divisorios y muros de carga de mampostería confinada en el sentido largo, así como de muros cabeceros de mampostería confinada, con la intención de simular la estructuración típica de edificios escolares existentes tipo UC, diseñados en la década de los 90s. Para fines de análisis sísmico, se consideraron las disposiciones de la edición 1993 del Manual de Obras Civiles de la Comisión Federal de Electricidad. Una descripción del proceso de análisis y diseño sísmico de los edificios, así como de las secciones y detallado del refuerzo final de los elementos se puede consultar en Ruiz García y otros (2020; 2021).

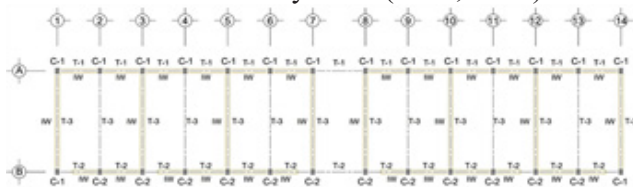


Figura 5 Planta típica de los edificios escolares tipo UC considerados en este estudio (Olvera, 2020).

4. CRITERIOS DE MODELADO PARA EDIFICIOS ESCOLARES

Modelado detallado para análisis dinámico no lineal

Para el análisis dinámico no lineal de los edificios, se modelaron los edificios escolares mediante la plataforma computacional *OpenSees* (2006). Para tal fin, se desarrollaron modelos bidimensionales, colocando el marco frontal y trasero de la dirección longitudinal en el mismo plano mediante un elemento viga “infinitamente rígido, con la intención de que los desplazamientos laterales en ambos marcos sean iguales (es decir, suponiendo que están ligados por un diafragma rígido). Cabe notar que se modelaron ambos marcos dado que, a pesar de tener la misma geometría, tienen columnas diferentes cada uno, con porcentajes de acero distintos, así como también aberturas en los muros de mampostería debidas a la presencia de ventanas o puertas. Las columnas se supusieron empotradas en su base.

Los elementos lineales (vigas y columnas) se modelaron mediante una viga equivalente que consiste de una viga con comportamiento elástico lineal con dos resortes rotacionales en los extremos, donde se concentra la no linealidad del elemento. Los resortes rotacionales se modelaron con el elemento *zerolength*, incluido en la biblioteca de *OpenSees* (2006). Cabe notar que a los elementos *zerolength* se les asignó un comportamiento descrito por el modelo modificado de Ibarra-Medina-Krawinkler (Ibarra y otros, 2005), denominado modelo IMK, incluido en la biblioteca de *OpenSees* (2006). En particular, se consideró que las “columnas cortas” exhiben predominantemente una falla por cortante, mientras que las columnas esbeltas exhiben una falla por flexión-cortante, por lo que se empleó el modelo *ModIMKPinching* Material y el modelo *ModIMKPeakOriented* Material, respectivamente, para simular ambos comportamientos. Por ejemplo, en la figura 6 se muestra el comportamiento cíclico descrito por el modelo *ModIMKPinching* Material, indicando sus parámetros representativos, el cual permite simular el adelgazamiento de los lazos de histeresis cerca del origen y un deterioro de resistencia en el ciclo severo, como el observado en pruebas experimentales de columnas de concreto reforzado con falla por cortante (Ruiz-García y Ramos-Cruz, 2024).

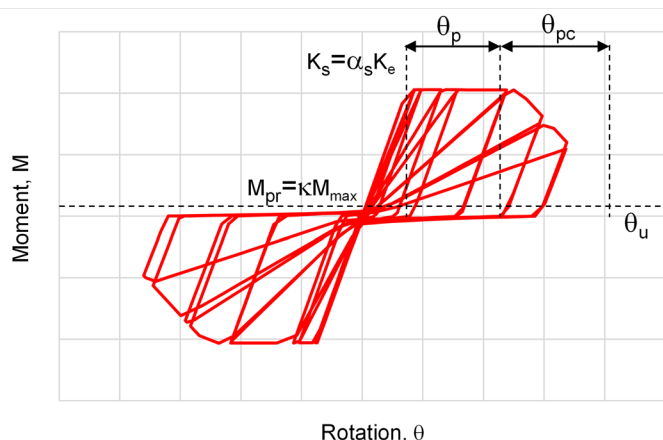


Figura 6 Comportamiento cíclico y parámetros requerido en el modelo ModIMKPinching Material en OpenSees (2006).

Para incorporar el comportamiento no lineal de los muros de mampostería en los modelos analíticos se optó por emplear el método de puntales de compresión (Noh y otros, 2017). El método consiste en modelar el muro de mampostería como un puntal con propiedades geométricas equivalentes. Los puntales fueron colocados como elementos tipo *Truss* en el programa *OpenSees* (2006). A los elementos *Truss* se les asignó un comportamiento histerético descrito por el modelo modificado *ModIMKPinching* Material. En la figura 7 se muestra la estrategia computacional empleada para modelar el marco frontal del edificio escolar de tres niveles.

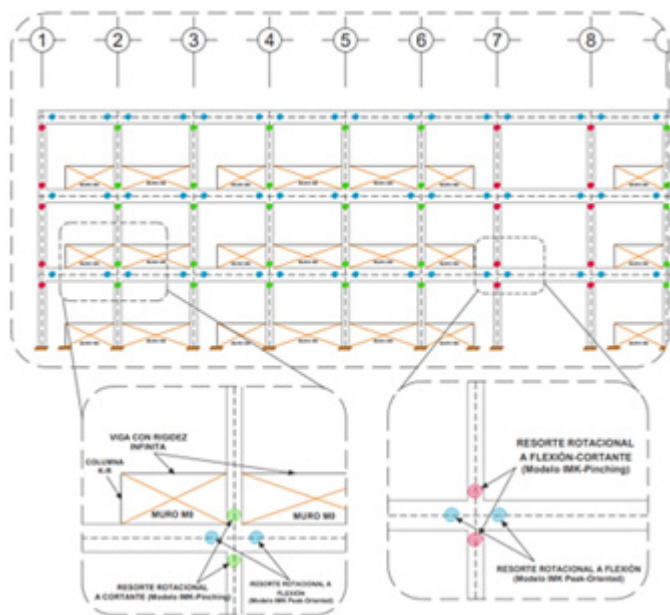


Figura 7 Estrategia de modelado del edificio escolar de 3 niveles (Olvera, 2020).

Cabe notar que los parámetros para definir la envolvente del modelo IMK requeridos para simular el comportamiento histerético de las “columnas cortas”, columnas esbeltas y muros de mampostería se obtuvieron mediante un proceso de calibración con resultados experimentales de especímenes ensayados ante cargas cíclicas reversibles. El proceso de calibración se describe detalladamente en Olvera (2020) y López (2021).

Modelado simplificado para análisis estático no lineal

En una sección previa se describió la estrategia computacional empleada para el análisis dinámico no lineal de edificios escolares. Sin embargo, cabe aclarar que para desarrollar el análisis estático no lineal no es necesario modelar el comportamiento fuerza-deformación (o bien, momento-rotación) cíclico de los elementos dado que sólo se requiere la envolvente fuerza-deformación de los elementos. Para tal fin, se pueden emplear los criterios descritos en las secciones 7.5.1.2 y 7.6.3 de la norma ASCE/SEI 41-23 (2023). En particular, la sección 7.5.1.2 sugiere el uso de tres envolventes fuerza-deformación para considerar un comportamiento dúctil (Tipo 1 y 2) y un comportamiento no dúctil-frágil (Tipo 3). Asimismo, la sección 7.6.3 proporciona los lineamientos para obtener la envolvente fuerza-deformación a partir de resultados experimentales. Por ello, la envolvente tri-lineal del modelo IMK se calibró mediante resultados de pruebas experimentales para representar una falla por flexión en las vigas, una falla por flexión-cortante en las columnas esbeltas y una falla por cortante en las “columnas cortas” y muretes de mampostería. Por ejemplo, en la figura 8a se muestra una comparación de la envolvente experimental positiva obtenida del espécimen 3SLH18 (línea azul), ensayado por Lynn y otros (1996), y su respectiva envolvente calibrada del modelo modificado de IMK (línea roja). Asimismo, en la figura 8b se muestra una comparación de la respuesta histerética experimental (línea azul) y analítica (línea roja), empleando el modelo *ModIMKPinching* Material que considera el adelgazamiento de los lazos de histéresis, del espécimen 3SLH18 cuya falla predominante fue por cortante (Lynn et al., 1996). Una descripción del proceso de calibración se puede consultar en Olvera (2020) y López (2021).

Finalmente, en la tabla 1 se presenta el promedio de los parámetros empleados para obtener la envolvente momento-rotación con el modelo IMK para si-

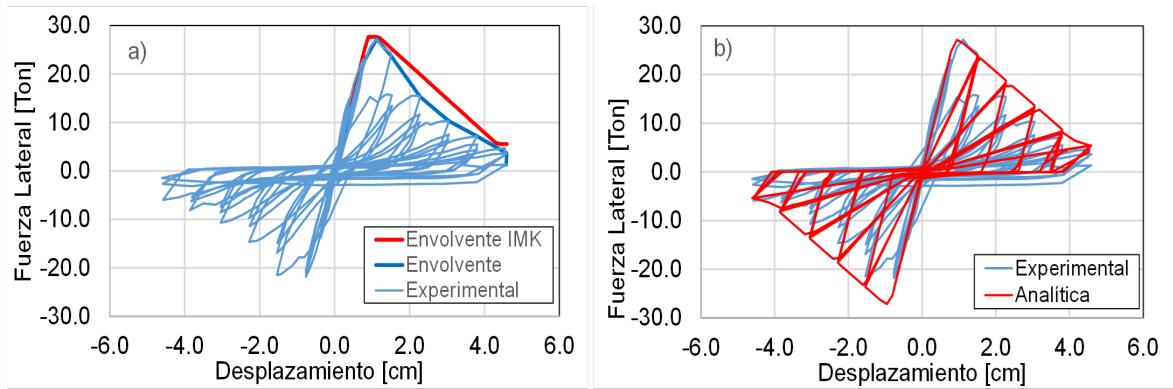


Figura 8 Calibración del espécimen 3SLH18 (Lynn y otros, 1996): a) comparación de la envolvente experimental y analítica (modelo IMK); b) comparación del comportamiento cíclico experimental y el comportamiento analítico obtenido con el software OpenSees (2006).

Tabla 1 Promedio de los parámetros empleados para simular el comportamiento de “columnas cortas” (ModIMKPinching Material) y columnas esbeltas (modelo ModIMKPeakOriented Material) así como muretes de mampostería con falla a cortante (ModIMKPinching Material) empleando la plataforma computacional OpenSees (2006).

Parámetro	“Columna corta”	Columna esbelta	Muros de mampostería
α_s	0.001	0.001	0.005
κ	0.100	0.150	---
θ_p	0.010	0.053	0.002
θ_{pc}	0.033	0.019	0.005
θ_u	0.043	0.071	0.006

mular el comportamiento de las columnas y los muros adyacentes de mampostería.

Conjunto de acelerogramas considerados en este estudio

Con la intención de evaluar el comportamiento sísmico de los edificios escolares, se consideraron 14 acelerogramas registrados en 7 estaciones acelerométricas ubicadas específicamente en sitios rocosos en la zona de subducción de la República Mexicana durante tres temblores históricos. En la tabla 2 se presentan las

características de los eventos y acelerogramas, como su aceleración máxima del terreno, AMT , y el periodo predominante del movimiento del terreno, T_g . Cabe notar que T_g es una medida del contenido de frecuencia del movimiento del terreno, y se calculó como el periodo asociado a la ordenada máxima en el espectro de velocidad.

Por otra parte, en la figura 9 se presentan una comparación de los espectros de respuesta de aceleración, S_a , obtenidos a partir del conjunto de registros considerados en este estudio (línea gris), con la mediana del

Tabla 2 Características de los acelerogramas considerados en este estudio.

Fecha	Magnitud (M_w)	Estación (lugar)	Nombre del archivo	Comp.	AMT (cm/s ²)	T_g (s)
19/09/1985	8.1	Aeropuerto	AZIH850919.191	N00E	-95.362	2.57
		Zihuatanejo (Zihuatanejo, Gro.)		N90E	-156.81	1.72
11/01/1997	6.9	Caleta de Campos	CALE9701.111	S00E	-350.43	1.29
		(Caleta de Campos, Mich.)		S90E	396.61	0.35
19/09/1985	8.1	Papanao	PAPN8509.191	S00W	157.7	1.16
		(Papanao, Gro.)		S90W	112.53	0.92
	6.5	Papanao	PAPN967.151	N00W	-293.95	0.17
		(Papanao, Gro.)		N90W	-318.55	0.29
19/09/1985	8.1	El Paraíso	PARS8509.191	S00E	-106.62	2.28
		(El Paraíso, Gro.)		S90E	-86.969	1.39
19/09/1985	8.1	El Suchil	SUCH8509.191	S00W	-89.028	0.63
		(El Suchil, Gro.)		S90W	-81.44	0.90
19/09/1985	8.1	La Unión	UNIO8509.191	S00E	-164.9	2.43
		(La Unión, Gro.)		S90E	150.78	0.54

espectro de S_a (línea roja) así como sus percentiles 16 (línea azul inferior) y 84 (línea azul superior) de S_a . Puede verse que las ordenadas espectrales máximas se presentan en el intervalo de periodo corto, siendo la máxima mediana de S_a igual a 506 cm/s² correspondiente a un periodo de 0.17 segundos. Sin embargo,

la ordenada de S_a para el mismo periodo correspondiente al percentil 84 alcanza un valor de 1,013 cm/s². De esta manera, los edificios escolares considerados en esta investigación pueden estar sujetos a altas aceleraciones espectrales durante su vida útil.

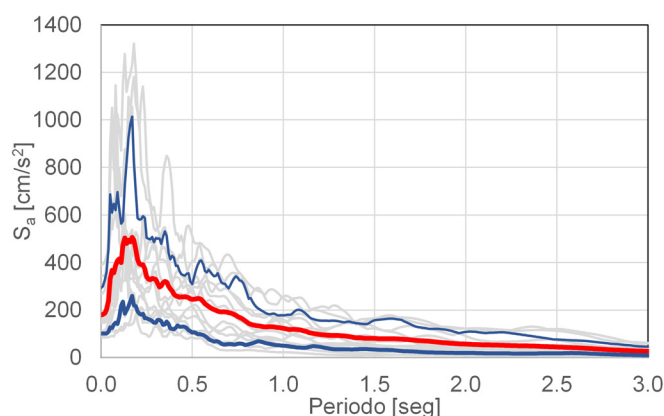


Figura 9 Comparación de la mediana del espectro de S_a , percentiles 16 y 84 de S_a , así como espectros individuales (línea gris) obtenidos del conjunto de acelerogramas considerados en este estudio.

Aplicación de la metodología propuesta

El método propuesto se aplicó a los edificios escolares descritos en la sección anterior. Para fines de ilustración, se hará énfasis en el edificio 3NLC. A continuación, se describen las consideraciones y resultados de cada paso.

Paso 1. Se desarrolló un modelo analítico de cada uno de los edificios escolares con la ayuda de la plataforma computacional *OpenSees* (2006), considerando los criterios descritos en las secciones anteriores. En particular, se emplearon las envolventes del modelo IMK calibradas con resultados experimentales como se ilustró en la Figura 8a. Una vez terminada la modelación de cada uno de los edificios escolares, se realizó un análisis modal convencional para calcular los periodos fundamentales de vibración, T_1 , de cada modelo, los cuales fueron de 0.60 seg, 0.40 seg y 0.21 seg correspondientes a los edificios 3NLC, 2NLC y 1NLC, respectivamente.

Paso 2. A partir de un análisis estático no lineal se obtuvo la curva de capacidad, V_b/W_T versus D_{azotea} , de cada uno de los edificios escolares considerando una distribución triangular invertida de fuerzas. En la figura 10 se muestran las curvas de capacidad para cada uno de los edificios escolares. A partir de la figura, se puede apreciar que el edificio escolar de un nivel (1NLC) tiene menor resistencia (es decir, capacidad máxima ante cargas laterales) pero mayor capacidad de deformación respecto a los edificios escolares de dos (2NLC) y tres (3NLC) niveles. En particular, es notorio el deterioro de resistencia, caracterizado por una pendiente negativa que inicia cuando se alcanza la capacidad máxima, en los edificios de dos y tres

niveles. La pendiente negativa está asociada a la formación de un mecanismo de planta baja débil debido a la falla por cortante en las “columnas ‘cortas’”.

Paso 3. Una vez que se obtuvo la curva de capacidad, se procedió a obtener una envolvente idealizada de la curva de capacidad. Para obtener la idealización trilineal de la curva de capacidad se puede emplear el método de igual energía o el método descrito en la norma ASCE/SEI 41-17 (2017) de los Estados Unidos. Por ejemplo, en la figura 11a se muestra la curva de capacidad del edificio 3NLC, así como sus envolventes idealizadas bilineal y trilineal obtenidas con el método de igual energía. Asimismo, en la figura 11b se muestran las envolventes idealizadas trilineales correspondientes a los edificios escolares de uno, dos y tres niveles.

Paso 4. A partir de la idealización trilineal, se obtienen los valores de C_y , μ_c , α_s , y α_c , los cuales se indican en la tabla 3 para cada uno de los edificios escolares.

Cabe notar que el periodo del SE1GL se puede calcular como:

$$T_e = 2\pi \sqrt{\frac{\Delta y_{azotea}/\Gamma_1 \phi_{azotea,1}}{C_y/\alpha_j}} \quad (4)$$

donde $\Gamma \phi_{azotea,1}$ es el factor de participación modal correspondiente al primer modo y normalizado respecto a la azotea y α_j es el factor de participación por cortante basal, los cuales se calculan como:

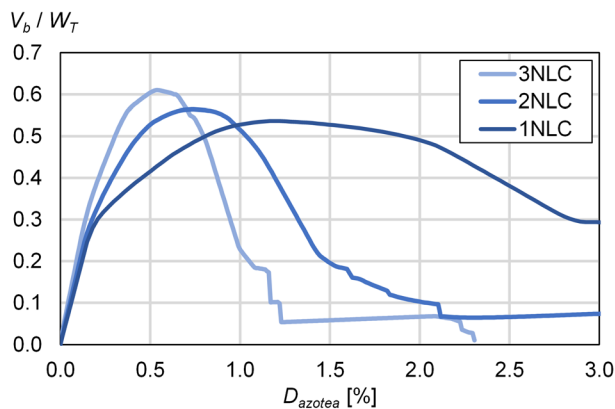


Figura 10 Comparación de las curvas de capacidad obtenidas para los edificios escolares considerados en este estudio.

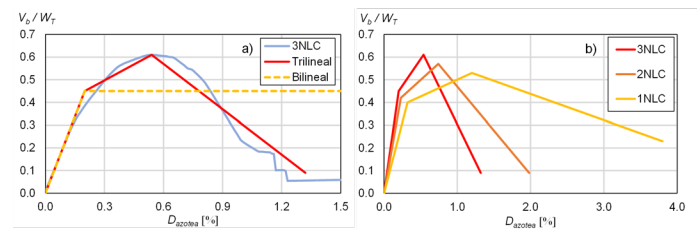


Figura 11 a) Comparación de la curva de capacidad obtenida para el modelo 3NLC con la envolvente idealizada trilineal y bilineal; b) comparación de las envolventes trilineales indeidealizadas obtenidas para los tres modelos analíticos de escuelas tipo UC.

Tabla 3 Propiedades mecánicas y dinámicas de los edificios escolares considerados en este estudio

Modelo	C_v	$D_{v,azotea}$ [%]	$\Delta_{v,azotea}$ [m]	μ_c	α_s [%]	α_c [%]	$\Gamma_i \phi_{1,azotea}$	α_1
1NLC	0.485	0.32	0.011	3.75	11.8	9.2	1.000	1.000
2NLC	0.468	0.23	0.015	3.22	16.1	21.2	1.217	0.897
3NLC	0.400	0.20	0.200	2.70	20.9	29.6	1.191	0.928

$$\Gamma_j \phi_{ij} = \left[\frac{\sum_{k=1}^N m_k \phi_{kj}}{\sum_{k=1}^N m_k \phi_{kj}^2} \right] \phi_{ij} \quad (5)$$

$$\alpha_j = \frac{[\sum_{k=1}^N m_k \phi_{kj}]^2}{[\sum_{k=1}^N m_k] \sum_{k=1}^N m_k \phi_{kj}^2} \quad (6)$$

donde N es el número de niveles, i es el nivel y j es el modo de vibración. En la tabla 3 también se indican los $\Gamma \phi_{azotea,1}$ y α_1 correspondientes a cada edificio. De esta manera, se calcularon los periodos $T_e=0.37s$, $0.33s$, y $0.328s$, asociados a los edificios 3NLC, 2NLC y 1NLC, respectivamente. Estos periodos se consideraron en la medida de intensidad como T_1 .

Paso 5. A partir del SE1GL, se procedió a realizar el análisis dinámico incremental de cada SE1GL considerando como medida de intensidad sísmica a la aceleración espectral correspondiente al periodo del SE1GL, $S_a(T_1)$ y el desplazamiento máximo del SE1GL, Δ_{SE1GL} , como parámetro de demanda ingenieril. Para tal fin, se consideraron 10 niveles de $S_a(T_1)$, es decir desde $0.2g$, donde g es la aceleración de la gravedad, hasta $1.2g$, en incrementos de $0.1g$. A partir de los resultados individuales de Δ_{SE1GL} , se obtuvo la mediana y los percentiles 16 y 84 para cada nivel de intensidad. Por ejemplo, en la figura 12a se muestra la evolución de Δ_{SE1GL} correspondiente al SE1GL del edificio 3NLC con respecto al incremento en $S_a(T_1)$, donde la mediana de Δ_{SE1GL} se indica en línea color rojo, y los percentiles en línea punteada. Posteriormente, se transformó Δ_{SE1GL} a D_{azotea} , en porcentaje, empleando la ecuación (1), como se muestra en la figura 12b.

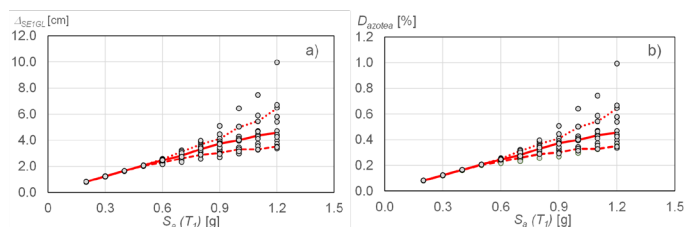


Figura 12 a) Evolución de la mediana de Δ_{SE1GL} con respecto a $S_a(T_1)$, así como de los percentiles 16 y 84; **b)** evolución de la mediana de D_{azotea} con respecto a $S_a(T_1)$, así como de los percentiles 16 y 84.

Cómo se discutió en la Introducción, el método propuesto por el Banco Mundial (World Bank, 2019) considera una envolvente idealizada bilineal para obtener la respuesta de un SE1GL. Por ello, es pertinente comparar la evolución de D_{azotea} con ambas idealizaciones. En la figura 13 se muestra la comparación de la evolución de la mediana de D_{azotea} obtenida para el edificio escolar 3NLC con respecto a $S_a(T_1)$ considerando una envolvente idealizada bilineal (línea azul) y trilineal (línea roja). Las líneas punteadas superior e inferior al valor de la mediana para cada idealización indican los percentiles 16 y 84. A partir de la figura, puede verse que D_{azotea} es igual hasta $S_a(T_1)=0.5g$ para ambas idealizaciones, lo cual puede explicarse dado que el comportamiento del SE1GL es elástico hasta este nivel de intensidad. Sin embargo, puede notarse que el valor de D_{azotea} es diferente a partir de $S_a(T_1)=0.5g$ para la envolvente bilineal y trilineal, cuya diferencia se incrementa conforme se incrementa el nivel de $S_a(T_1)$. En particular, la idealización bilineal conduce a valores mayores de la mediana de D_{azotea} que

el calculado con la idealización trilineal. Por ejemplo, la idealización bilineal sobre-estima la mediana de D_{azotea} en 13.8% respecto a la mediana de D_{azotea} calculada con la idealización trilineal para $S_a(T_1)=1.0g$.

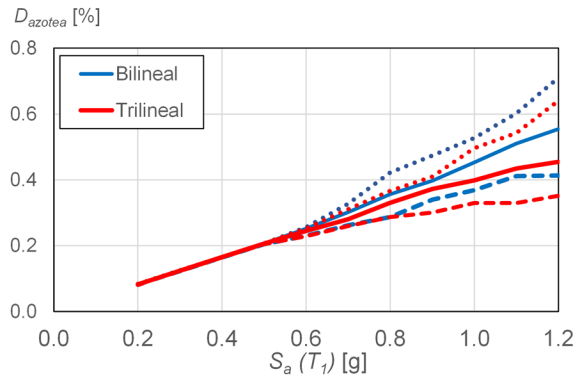


Figura 13 Comparación de la evolución de la distorsión de azotea, D_{azotea} , del modelo 3NLC con respecto al nivel de intensidad, $S_a(T_1)$ [g], para el SE1GL considerando una envolvente idealizada bilineal y trilineal.

Paso 6. Una vez que se cuenta con una estimación de D_{azotea} , se emplean las ecuaciones (2) y (3) para obtener una estimación de IDR_1 e IDR_c , respectivamente. Para obtener IDR_1 con la ecuación (2) se consideró un COD igual a 2.0 para todos los niveles de intensidad con base en un estudio estadístico de la respuesta del edificio 3NLC ante el conjunto de 14 registros sísmicos. La independencia de COD con respecto a $S_a(T_1)$

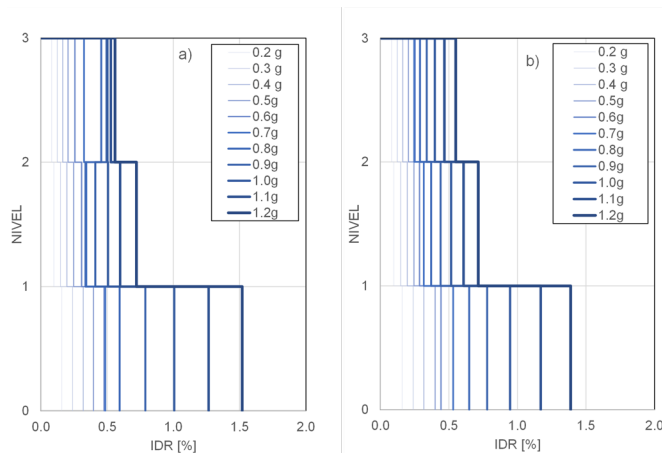


Figura 14 Evolución de la distorsión de entrepiso, IDR , con incremento en el nivel de intensidad, $S_a(T_1)$ [g] para el edificio escolar 3NLC sujeto a los registros de la estación AZIH: a) comp. N00E. b) comp. N90E.

se puede atribuir a la formación de un mecanismo de planta baja débil aún a bajos niveles de intensidad sísmica. Por ejemplo, en la figura 14 se muestra la evolución de IDR conforme se incrementa el nivel de intensidad para el modelo 3NLC sujeto ante a los acelerogramas registrados en la estación AZIH (Aeropuerto Zihuatanejo)(Olvera, 2020).

Paso 7. En las figuras 15 y 16 se muestra la variación de IDR_1 e IDR_c , respectivamente, con el incremento de $S_a(T_1)$. Para fines de estimar el estado de daño de las columnas esbeltas, con falla a flexión-cortante, y las “columnas cortas”, con falla a cortante, se indica la mediana de la distorsión (es decir, con una probabilidad del 50% de alcanzar el estado de daño a este nivel de distorsión) asociada a los estados de daño ED1, ED2 y ED3. Para el caso de las columnas esbeltas, existe un 50% de probabilidad de alcanzar el ED1, asociado al agrietamiento ligero, a una intensidad sísmica $S_a(T_1)=0.41g$, mientras que el ED2, correspondiente al agrietamiento severo, se alcanza a una intensidad sísmica $S_a(T_1)=1.2g$. En caso de considerar la incertidumbre registro-a-registro, existe un 50% de probabilidad de alcanzar el ED2 a una intensidad sísmica aproximadamente de 0.75g. Asimismo, existe un 50% de probabilidad de alcanzar el ED2, asociado al agrietamiento severo, a una intensidad sísmica $S_a(T_1)=0.8g$ en las “columnas cortas”. Si se considera la incertidumbre registro-a-registro, existe un 50% de probabilidad de alcanzar el ED2 y ED3 a una intensidad sísmica ligeramente superior a $S_a(T_1)=0.7g$

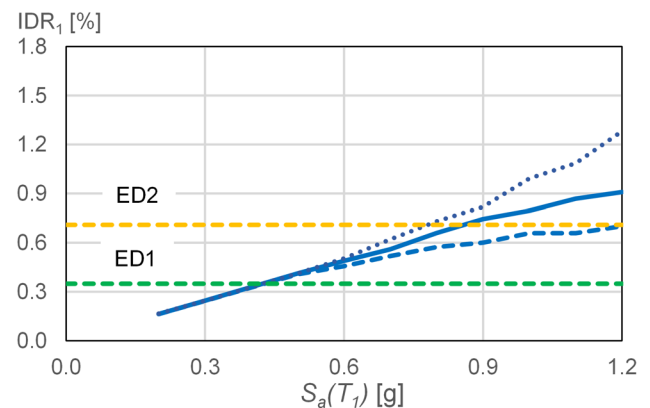


Figura 15 Evolución de la distorsión del primer nivel, IDR_1 , con respecto al nivel de intensidad, $S_a(T_1)$ [g].

y 1.0g, respectivamente en las “columnas cortas”. Cabe notar que el ED1, asociado a un agrietamiento ligero, se puede alcanzar a niveles de intensidad sísmica menores de 0.2g en las “columnas cortas”, que sólo requieren un proceso de reparación local.

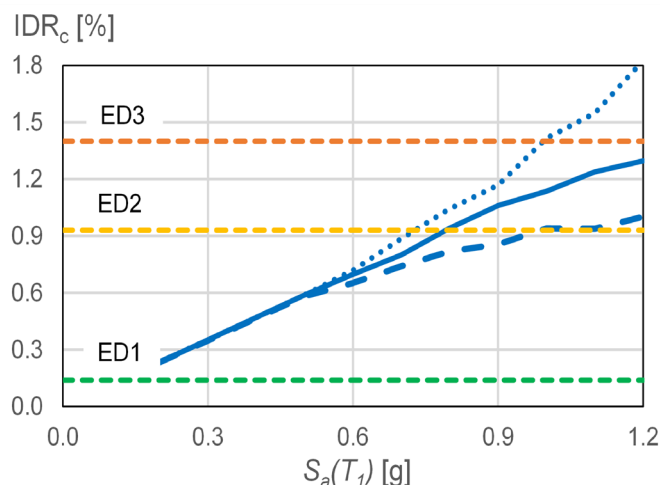


Figura 16 Evolución de la distorsión en las “columnas cortas” del primer nivel, IDRc, con respecto al nivel de intensidad, $S_a(T_1)$ [g].

Los resultados anteriores son consistentes con el daño observado en edificios escolares, dado que el daño se concentra en las “columnas cortas” de planta baja, como se ilustró en las figuras 1 y 2.

CONCLUSIONES

Se presentó un método simplificado para la evaluación sísmica de edificios escolares existentes, particularmente del tipo UC que exhiben planta baja débil. Este tipo de edificios es susceptible de exhibir un mecanismo de colapso en la planta baja debido a la falla por cortante, o flexión-cortante, en las columnas. En general, la metodología considera 7 pasos, la cual fue ilustrada en la evaluación sísmica de un edificio escolar de tres niveles representativo de un edificio ubicado en el puerto de Lázaro Cárdenas, Michoacán, y diseñado en la época de los 90’s.

A diferencia de otras metodologías dispuestas en la literatura, como la propuesta por el Banco Mundial (World Bank, 2019), la metodología propuesta considera una envolvente idealizada trilineal para representar el comportamiento no lineal de un sistema de un grado de libertad equivalente, SE1GL, en vez de una envolvente idealizada bilineal. La envolvente trilineal

considera la pendiente negativa posterior a alcanzar la capacidad máxima (resistencia) ante cargas laterales, la cual se atribuye a la formación del mecanismo de planta baja débil observado en este tipo de edificios.

Los resultados obtenidos en la evaluación sísmica de un edificio escolar de tres niveles considerando un SE1GL con envolvente bilineal y trilineal mostraron que su respuesta, en términos del desplazamiento máximo y, en consecuencia, la distorsión de azotea, D_{azotea} , tiende a ser diferente conforme se incrementa el nivel de intensidad sísmica, medida en términos de la aceleración espectral correspondiente al periodo fundamental del edificio en consideración, $S_a(T_1)$. En particular, la mediana de D_{azotea} es mayor cuando se considera una envolvente bilineal. De esta manera, se recomienda el uso de una envolvente idealizada trilineal cuando el edificio escolar en consideración exhibe “columnas cortas”, en vez de una envolvente idealizada bilineal.

Asimismo, se mostró la utilidad de emplear curvas de fragilidad basadas en distorsión para evaluar el posible daño en “columnas cortas” con falla predominante a cortante y columnas esbeltas con falla por flexión-cortante.

AGRADECIMIENTOS

El autor quisiera agradecer a la Coordinación de Investigación Científica de la Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo, así como al Consejo Nacional de Humanidades, Ciencia y Tecnología por el financiamiento otorgado para el desarrollo del proyecto. Asimismo, se agradece la participación del Ing. Roberto Nahum Olvera Alejo, del M. en I. José Alberto Lopez Barrón y la Ing. Jessica Montserrat Hernández Ibarra en el desarrollo de los resultados presentados en este artículo.

REFERENCIAS

- Alcocer S.M., Murià-Vila D., Fernández-Sola L.R., and Arce, J.C., (2020a). Observed damage in public school buildings during the 2017 Mexico earthquakes. *Earthquake Spectra*, 36(2_suppl):110–129.
- Alcocer S.M., Arce J.C., Murià-Vila D., Fernández-Sola L.R., and Guardia, D.A. (2020b). Assessment of the seismic safety of school buildings in Mexico: A first look. *Earthquake Spectra*, 36(2_suppl):130–53.

ASCE/SEI 41-17 (2017). Seismic evaluation and retrofit of existing buildings. ASCE/SEI standard 41-17. American Society of Civil Engineering (ASCE).

ASCE/SEI 41-23 (2023) Seismic evaluation and retrofit of existing buildings. ASCE/SEI standard 41-23. American Society of Civil Engineers (ASCE).

Aslani H., and Miranda, E. (2005). Probabilistic earthquake loss estimation and loss disaggregation in buildings. Report No. 157, The John A. Blume Earthquake Engineering Center, Stanford, CA.

Fajfar P., and Gaspersic, P. (1996). The N2 method for the seismic damage analysis of RC buildings. *Earthquake Eng Struct Dyn*, 25:23–67.

Freeman, S., Nicoletti, J. P., and Matsumura, G. (1984). Seismic design guidelines for essential buildings. *Proceedings of the VIII World Conference on Earthquake Engineering*, EERI (Vol. 1, pp. 715-722).

García-Carrera, J.S., Mena-Hernández, U., and Bermúdez-Alarcón, F.J. (2018). El terremoto 19S en Morelos: la experiencia operativa del INEEL en la evaluación del riesgo estructural. *Salud Publica Mex*; 60(supl 1): S65-S82.

Guevara, T., and García, L.E. (2005). The captive- and short-column effects. *Earthquake Spectra*, 21(1): 141–160.

Ibarra, L.F., Medina, R.A., and Krawinkler, H. (2005). Hysteretic models that incorporate strength and stiffness deterioration. *Earthquake Engineering & Structural Dynamics*, 34: 1489–1511.

INIFED (2017). Informe de Actividades 2015- 2017. Instituto Nacional de la Infraestructura Física Educativa (INIFED)[<http://www.inifed.gob.mx/escuelasalcien/pdf/Informe%20de%20actividades%20INIFED2017.pdf>]

Jaimes, M.A., and Niño, M. (2017). Cost-benefit analysis to assess seismic mitigation options in Mexican public school buildings. *Bull Earthquake Eng* 15: 3919–3942.

López Barrón, J.A. (2021). Evaluación de la capacidad remanente y de demolición de edificios de concreto reforzado con planta baja débil. Tesis de Maestría, Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo, 124pp.

Lynn, A.C., Moehle, J.P., and Mahin, S.A. (1996). Seismic evaluation of existing reinforced concrete building columns. *Earthquake Spectra*, 12(4): 715-739.

McKenna, F., Fenves, G. L., and Scott, M. H. (2006). OpenSees: Open system for earthquake engineering simulation. Pacific Earthquake Engineering Research Center, University of California, Berkeley, CA., <http://opensees.berkeley.edu>.

Noh, N.M., Liberatore L., Mollaioli F., and Tesfamariam, S. (2017). Modelling of masonry infilled RC frames subjected to cyclic loads: State of the art review and modelling with OpenSees. *Engineering Structures*, 150: 599-621.

Olvera, Alejo R.N. (2020). Evaluación de la resiliencia sísmica de edificios escolares en el Estado de Michoacán. Tesis de Licenciatura, Facultad de Ingeniería Civil, Universidad Michoacana de San Nicolas de Hidalgo, 91pp.

Ruiz-García J., Olvera R.N., López J.A., and Frías A.D. (2020). Evaluación de la resiliencia sísmica de edificios escolares. *Memorias del XXII Congreso Nacional de Ingeniería Estructural*, Agu.

Ruiz-García J., Olvera R.N., and Frías A.D. (2021). Seismic assessment of school buildings with short captive RC columns under subduction seismic sequences. *Structures*, 34: 2432-2444.

Ruiz-García, J., and Ramos-Cruz, J.M. (2024). Drift-based fragility assessment of nonductile reinforced concrete columns failing in shear under cyclic loading. *Engineering Structures*, 302: 117378.

PNR (2019), “Programa Nacional de Reconstrucción. Informe del primer año”, [http://www.reconstruyendoesperanza.gob.mx/difusion/wp-content/uploads/2020/11/PNR_Informe%20anual_2019_20201118.pdf]

Servicio Sismológico Nacional (SSN). Reporte Especial: Sismo del día 19 de septiembre de 2017, Puebla-Morelos (M 7.1). Universidad Nacional Autónoma de México (UNAM), http://www.ssn.unam.mx/sismicidad/reportes-especiales/2017/SSNMX_rep_esp_20170919_Puebla-Morelos_M71.pdf

Tena-Colunga A., and Álvarez, J.L. (1995). Seismic retrofit of low-rise school building using post-tensioned

bracing systems. 7th Canadian Conference on Earthquake Engineering, Montreal, pp. 859-869.

World Bank (2019). Fragility and vulnerability assessment guide. Global Program for Safer Schools, The Global Library of School Infrastructure; disponible en: <https://>

gps.worldbank.org/sites/gps/files/2019-10/Fragility%20and%20Vulnerability%20Assessment%20Guide.pdf

Vizcaino I. (2022), <https://www.facebook.com/indira.vizcaino.s> (ultima consulta 23 de septiembre de 2022).