



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO

FACULTAD DE INGENIERÍA

**ANÁLISIS COSTO-BENEFICIO DE
DIFERENTES MEDIDAS DE MITIGACIÓN
BASADO EN RESILIENCIA PARA
EDIFICIOS ESCOLARES**

TESIS

Que para obtener el título de

Ingeniero Civil

P R E S E N T A

Irada Medina Aguilar

DIRECTOR DE TESIS

Dr. Mauro Pompeyo Niño Lázaro



Ciudad Universitaria, Cd. Mx., 2023

Dedicado a:

A mis padres, Víctor Medina Arreguin y Patricia Aguilar López, por ser un ejemplo de vida, apoyarme en todo momento y motivarme a seguir a pesar de las adversidades.

A mis hermanas y mi sobrina, Vasthi Medina Aguilar, Patricia Medina Aguilar y Sara Camila Rosas Medina, por apoyarme y aconsejarme en todo momento.

A mis abuelos paternos, †Eduardo Medina Flores y Refugio Arreguin Reyes y a mis abuelos maternos, Luciano Aguilar Jiménez y †Catalina López Cabrera, por enseñarme y guiarme a lo largo de mi vida.

A mi tíos, tías, primos, primas y familia, por acompañarme a lo largo de este camino y aconsejarme cuando lo necesite.

A mi novia, Ximena Carbajal Guerrero, por brindarme su ayuda, apoyo y conocimientos en todo momento durante la realización de esta tesis.

Agradecimientos

A la Universidad Nacional Autónoma de México y la Facultad de Ingeniería por darme la oportunidad de realizar mis estudios de licenciatura.

Al Dr. Mauro Pompeyo Niño Lázaro, director de esta tesis por apoyarme en todo momento, así como compartir sus conocimientos y tiempo conmigo, además de tenerme paciencia durante todo el proceso.

Al M.I Carlos Emiliano González Calva, por compartir sus conocimientos y tiempo conmigo.

A mis sinodales, la Dra. Ana Beatriz Carrera Aguilar, la Ing. Ximena Penélope Amezcua Pastrana, el Ing. Heriberto Esquivel Castellanos y el M.I Héctor Javier Guzmán Olguín, por todos sus comentarios y observaciones que ayudaron a enriquecer el contenido de esta tesis.

ÍNDICE

Introducción.....	1
I. Antecedentes.....	4
I.1. Daños en edificios escolares producidos por sismos.....	4
I.2. Reforzamiento estructural en edificios escolares.....	9
I.3. Análisis costo - beneficio de edificios.....	11
I.4. Resiliencia.....	15
II. Metodología propuesta.....	17
II.1. Peligro sísmico.....	17
II.2. Exposición.....	19
II.3. Vulnerabilidad estructural.....	19
II.4. Riesgo sísmico.....	20
II.5. Resiliencia estructural.....	21
II.6. Medidas de mitigación/reparación.....	23
II.7. Costos y tiempos de intervención.....	24
II.8. Vulnerabilidad de estructuras intervenidas.....	25
II.9. Resiliencia de estructuras intervenidas.....	25
II.10. Análisis costo – beneficio.....	25
III. Casos de estudio.....	26
III.1. Definición del peligro sísmico.....	26
III.2. Definición de la exposición.....	28
III.3. Definición de la vulnerabilidad estructural original.....	30
III.3.1. Ejecución de Análisis Dinámicos Incrementales (IDA).....	31
III.3.2. Curva de capacidad dinámica.....	35
III.3.3. Índice de daño.....	37

III.3.4.	Función de vulnerabilidad.....	40
III.4.	Cálculo del riesgo sísmico	41
III.4.1.	Pérdida Anual Esperada (PAE).....	42
III.5.	Estimación de la resiliencia estructural original	43
III.6.	Definición de medidas de mitigación/reparación.....	46
III.7.	Estimación de costos y tiempos de intervención.....	49
III.8.	Definición de la vulnerabilidad de estructuras intervenidas	55
III.9.	Estimación del riesgo de estructuras intervenidas	68
III.10.	Estimación de la resiliencia de estructuras intervenidas	70
III.11.	Análisis costo – beneficio	71
IV.	Conclusiones y recomendaciones.....	75
	Referencias	77

Introducción

México es un país donde la actividad sísmica es considerable. En el periodo de tiempo comprendido entre 1990 y 2016 el Servicio Sismológico Nacional, SSN, ha registrado en promedio 28 sismos de magnitud entre 5 y 5.9; 3.5 de magnitud entre 6 y 6.9, y uno de magnitud entre 7 y 7.9 cada dos años (Pérez-Gavilán *et al.*, 2018). Esta actividad sísmica se debe a que en la costa del Pacífico se encuentra la placa de Cocos y de la Rivera, las cuales subducen con respecto a la placa Norteamericana; originando sismos de subducción e intraplaca, los cuales afectan de forma importante la parte centro de México. Esta parte del país se ha visto afectada a lo largo de los años debido a sismos de gran intensidad, los dos más importantes han sido los del 19 de septiembre de 1985 y 2017, los cuales afectaron severamente a la infraestructura, en especial a edificios escolares en la capital del país.

Según datos reportados posterior al sismo del 19 de septiembre de 2017, 17 mil 848 planteles escolares de educación básica se vieron afectados, de los cuales se catalogaron 201 planteles se reportaron con daño grave (demolición del inmueble), 6028 con daños de moderados a severos y 11619 con daños menores (Vicenteño, 2018). Estos edificios escolares juegan un papel importante ante la ocurrencia de un sismo de gran magnitud, ya que fungen como centros de acopio o refugios temporales, de ahí que es importante conocer *a priori* el nivel de pérdida de funcionalidad de los edificios escolares ante la ocurrencia de eventos sísmicos, así como identificar cuáles son las mejores medidas de reparación o mitigación, de tal forma que se puedan orientar los recursos necesarios para regresarles su capacidad de funcionalidad que estos tenían antes de la ocurrencia de los eventos que los afectarían.

Los reglamentos de construcción que se han empleado en México (e.g., RCDF-1976, RCDF-1987 MOC-CFE-1993, RCDF-2004, MOC-CFE-2008) (DDF, 1976; DDF, 1987; CFE, 1993, GDF 2004, CFE, 2008) han sido algunos de los más avanzados del mundo. Sin embargo, después de todos los daños que ocurrieron durante el terremoto de 1985, ocurrido en la zona de subducción de Michoacán, se ha vuelto una prioridad el reducir el riesgo en las estructuras que afectan a la población mexicana. Como resultado de esto, posterior a ese evento sísmico, las autoridades revisaron y actualizaron los reglamentos existentes en ese momento , dando

lugar al Reglamento de Construcciones del Distrito Federal de 1987, RCDF-1987 (DDF, 1987) y al Manual de Obras Civiles de la Comisión Federal de Electricidad, MOC-CFE-1993, (CFE, 1993), donde se publicaron nuevos parámetros del coeficiente sísmico de diseño, límites de desplazamiento, estabilidad, uso estructural, materiales, entre otras nuevas características (Rosenblueth, 1989). Dado que los reglamentos que se han empleado en México se han modificado a lo largo de los años desde su primera versión en 1942, hasta la última publicada en 2020, varias estructuras han quedado rezagadas en términos de seguridad sísmica.

Aunado a lo anterior, se espera la ocurrencia de un gran sismo en las costas de Guerrero, ya que no ha ocurrido un sismo significativo en 60 años en la zona, por lo cual estimaciones hechas por diversos sismólogos, sugieren que las aceleraciones que se presentarían en el suelo blando de la Ciudad de México serían mayores, bajo ciertas circunstancias, en comparación a las aceleraciones de los sismos del 19 de septiembre de 1985 y 2017 (Cruz Atienza *et al.*, 2017).

En la actualidad existen edificaciones en muchas ciudades del país que aún se encuentran definidas bajo normativas antiguas, por lo que es recomendable realizar un análisis de costo-beneficio como guía para utilizar eficientemente los recursos técnicos y económicos, que son limitados, para lograr la meta de reducción del riesgo sísmico, ya que se encuentra latente la amenaza de un gran sismo que ocasionaría grandes daños en las estructuras existentes.

Con base en lo anterior, el objetivo general de esta tesis se centra en identificar la medida de mitigación más adecuada que pueda implementarse en escuelas del sector público de 1, 2 y 3 niveles en el estado de Puebla, llevando a cabo un análisis costo-beneficio en función de su resiliencia sísmica. Así mismo se tienen como objetivos particulares los siguientes:

- Determinar la respuesta estructural a través de análisis no lineales, en escuelas de 1, 2 y 3 niveles con medidas de mitigación propuestas.
- Determinar los índices de daño en escuelas de 1, 2 y 3 niveles para cada una las medidas de mitigación consideradas.

- Determinar la vulnerabilidad en escuelas de 1, 2 y 3 niveles en términos de una intensidad sísmica (pseudoaceleración) y un valor de daño esperado.
- Determinar las pérdidas en escuelas tipo de 1, 2 y 3 niveles considerando diferentes eventos sísmicos de diferentes magnitudes y con diferente frecuencia anual de ocurrencia.
- Determinar la resiliencia en escuelas tipo de 1, 2 y 3 niveles considerando una pérdida de funcionalidad y su capacidad de recuperación.
- Calcular el costo – beneficio en las escuelas anteriormente estudiadas empleando los resultados de resiliencia obtenidos.

I. Antecedentes

La actividad sísmica que afecta a México es considerable por ubicarse geográficamente en el cinturón de fuego del Pacífico. Como se ha documentado a lo largo de los años, los sismos del 28 de julio de 1957 y del 19 de septiembre de 1985 y 2017, por mencionar algunos, han ocasionado daños a los edificios escolares, por lo que es de interés para el autor de esta tesis conocer el daño que se produce en los edificios escolares debido a la ocurrencia de los sismos que ahí se generan. Para comprender la relevancia del efecto de estos eventos, a continuación, se presentan algunos ejemplos de daños ocurridos.

I.1. Daños en edificios escolares producidos por sismos

El 28 de julio de 1957 se presentó un sismo de magnitud 7.5 grados en la escala de Richter, con epicentro a 100 km al sureste de Acapulco, el cual ocasionó que la mayoría de los daños ocurridos en la Ciudad de México se concentraran en la zona centro, este sismo es recordado por la caída del Ángel de la Independencia. Según la recopilación de información realizada por Narváez y Reinoso (2007), hubo alrededor de cuatro colapsos totales y cinco parciales, entre los cuales se encontraba la Escuela Superior de Ingeniería y Arquitectura, ESIA, del instituto Politécnico Nacional, IPN. De manera resumida, a continuación, se presenta la Tabla 1 con la información más relevante de los daños ocasionados por este sismo.

Tabla 1. Daños reportados en la ESIA del IPN (adaptada de Narváez y Reinoso, 2007)

Dirección	Año de construcción	# Niveles	Uso	Tipo estructural	Cimentación	Periodo del suelo	Daño estructural
Casco de Sto. Tomás	1950	4	Escuela	Marcos de concreto	Superficial	0.97	Colapso total

El 14 de marzo de 1979 ocurrió un sismo de magnitud 7.6 grados en la escala de Richter, con epicentro en Petatlán, Guerrero; a pesar de estar ubicado a 290 km al suroeste de la CDMX, el sismo es recordado como “El temblor de la Ibero” ya que ocasionó el colapso de dos

estructuras de la Universidad Iberoamericana (Ventura y Quinde, 2019). La Figura 1 muestra la Universidad Iberoamericana posterior al sismo.



Figura 1. Universidad Iberoamericana (Ventura y Quinde, 2019)






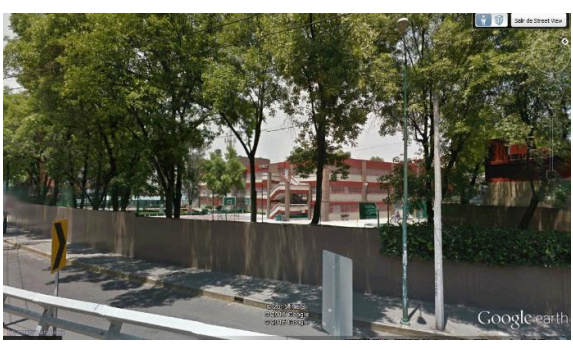
El 19 de septiembre de 1985 se presentó un sismo magnitud 8.1 en la escala de Richter, con epicentro a 400 km de la Ciudad de México, bajo las costas de Michoacán y Guerrero, es un sismo histórico que causó innumerables pérdidas humanas y daños en la infraestructura de la Ciudad de México principalmente (Máximo *et al.*, 2017). De acuerdo con el visualizador web de daños durante sismos (ERN, 2019), se identificaron 3 escuelas con daño grave, 3 con colapso parcial y 7 con colapso total en la Ciudad de México; se presenta la Tabla 2 con ejemplos de escuelas que sufrieron colapso total.

Tabla 2. Daños reportados en escuelas de la CDMX (ERN, 2019)

Edificio	Ubicación	Año estimado de construcción	Número de pisos	Sistema estructural	Periodo estimado de la estructura y suelo	Agravante de los daños	Observaciones
Vocacional 5 IPN escuela Benito Juárez	Emilio Donde ND, Centro, Cuauhtémoc	1976	4	Columnas y losas planas de concreto	$T_e = 0.53 s$ $T_s = 2.2 s$	*Golpeteo *Planta baja débil *Edificio alargado *Autoconstrucción /ampliaciones	Colapso de la planta. Aparentemente fallaron las columnas de planta baja por flexo compresión ampliada por la esbeltez de ellas
Secundaria 3#167	Chapultepec Juárez, Cuauhtémoc	1957	4	Marcos de concreto	$T_e = 0.53 s$ $T_s = 2.3 s$	*Efecto de columna corta *Hundimientos *Edificio alargado	Colapso de la estructura, posiblemente por efecto de columnas cortas
Instituto cultural Miguel A. De Quevedo	ND, P. San Andrés, Coyoacán	1975	4	Columnas y losas planas de concreto	$T_e = 0.53 s$ $T_s = 1.0 s$	*Efecto de esquina *Penetración en capiteles *Edificio alargado	Colapso total de la estructura, por efectos de punzonamiento de las losas

En la Tabla 3 se presentan imágenes del estado posterior al sismo y la situación actual de las escuelas que sufrieron colapso total presentadas en la Tabla 2. Cabe mencionar que las escuelas fueron parcial o totalmente reconstruidas (ERN, 2019)

Tabla 3. Comparativa de estados en las escuelas dañadas (ERN, 2019)

Edificio	Situación post-sísmica	Situación actual
Vocacional 5 IPN escuela Benito Juárez		
Secundaria 3		
Instituto Cultural		

El 19 de septiembre de 2017 ocurrió un sismo de magnitud 7.1 en la escala de Richter, con epicentro a 120 km de la Ciudad de México, en el límite entre los estados de Puebla y Morelos, el cual generó un fuerte impacto en la estabilidad de decenas de edificios que







colapsaron de manera total o parcial, y de cientos que sufrieron daños graves y quedaron inhabitables (Berrón, 2018). De acuerdo con el visualizador web de daños durante sismos (ERN, 2019), se identificaron 6 escuelas con daño grave, 1 con colapso parcial y 2 con colapso total en la Ciudad de México. Se presenta la Tabla 4 con ejemplos de escuelas que sufrieron diferentes daños.

Tabla 4. Daños reportados en escuelas de la CDMX (ERN, 2019)

Edificio	Ubicación	Año estimado de construcción	Número de pisos	Sistema estructural	Periodo estimado de la estructura y suelo	Agravante de los daños	Observaciones
Colegio Rébsamen	Rancho Tamboreo 11, Nueva Oriental Coapa, Tlalpan	1980	4	Columnas y losa plana de concreto	$T_e = 0.53 s$ $T_s = 1.0 s$	*Golpeteo *Planta baja débil	Colapso de los dos pisos inferiores debido a la falta de muros en planta baja
Tec de Monterrey Campus Ciudad de México	Calle del Puente 222, Ejidos de Huipulco (San Bartolo el chico), Tlalpan	1992	3	Marcos de concreto con muros de mampostería	$T_e = 0.33 s$ $T_s = 0.9 s$	*Ninguno apreciable	Daños intermedios en elementos estructurales y colapso total en puentes de paso
Secundaria técnica 17	Avenida Miguel Hidalgo 62, La Concepción, Coyoacán	1940	4	Columnas y losa plana de concreto	$T_e = 0.53 s$ $T_s = 0.9 s$	*Edificio alargado	Desprendimiento de muros interiores de mampostería, fallas en uniones de columna losa, fallas por cortante y compresión en columnas

En la Tabla 5 se presentan imágenes del estado antes y después de la ocurrencia del sismo, de las escuelas que sufrieron diferentes daños, presentadas en la Tabla 4.

Tabla 5. Comparativa de estados en las escuelas dañadas (ERN, 2019)

Edificio	Antes del sismo	Situación post-sísmica
Colegio Rébsamen	 <p>A photograph of a modern, multi-story school building with a white facade and green accents. The sign on the building reads 'ENRIQUE COLEGIO JARDIN DE REBSAMEN'.</p>	 <p>A photograph showing the same school building in a state of severe structural collapse. The concrete and steel frame is exposed, and the building is surrounded by debris and construction materials.</p>
Tec de Monterrey Campus Ciudad de México	 <p>A photograph of a large, multi-story building with a white facade and several trees in front of it. The building appears to be in good condition.</p>	 <p>A photograph showing the same building with significant structural damage. A large section of the facade has collapsed, and debris is visible on the ground.</p>
Secundaria técnica 17	 <p>A photograph of a multi-story school building with a brick and concrete facade. A white van is parked in front of the building.</p>	 <p>A photograph showing the interior of the school building, where a large section of the ceiling and upper walls has collapsed, leaving a large opening in the structure.</p>

I.2. Reforzamiento estructural en edificios escolares

En investigaciones realizadas a nivel internacional, Pinto y Torres (2016) estudiaron una edificación escolar de concreto reforzado, construida en la década de los sesenta, ubicada en la población de Chiguará, municipio Sucre, del estado Mérida, Venezuela. Estos autores buscaron determinar la reducción de la vulnerabilidad sísmica y estudiar el comportamiento ante la acción de sismos de diseño, para esto analizaron la Escuela Bolivariana Nueva

Esparta. Para ello, se reforzó la escuela optando por la colocación de muros estructurales en las esquinas de la estructura, que permitieron aumentar la rigidez de la misma, disminuyendo sustancialmente los efectos torsionales. Por lo cual, en dicha investigación se encontró que, con base en las curvas de capacidad dinámica, se observó un incremento sustancial de la rigidez en los marcos reforzados. De igual forma, la resistencia de los marcos reforzados a acciones horizontales se incrementó aproximadamente diez veces con respecto a los marcos en su condición original. Los autores concluyen que la propuesta de reforzamiento estructural mejoró el comportamiento sismorresistente debido a la incorporación de forma simétrica y en ambas direcciones de muros estructurales en las esquinas de la escuela, proporcionando una regularidad estructural con un desempeño deseable.

En investigaciones realizadas a nivel nacional, García y De León (2021) desarrollaron una investigación donde analizaron dos escuelas que son tipo U2C (Escuela urbana de 2 niveles a base de marcos rígidos de concreto armado, de acuerdo al “Catálogo de estructuras tipo” del INIFED, (INIFED, 2022) que se encuentran en zonas sísmicas B, C y D, ubicadas en las poblaciones de Yautepec y Tlatenchi, en el estado de Morelos. La investigación tiene como objetivo mostrar un enfoque basado en la confiabilidad estructural para identificar la alternativa óptima de la reparación, entre tres opciones propuestas, desde el punto de vista del costo mínimo esperado en el ciclo de vida. Se propusieron 3 alternativas de reparación, las propuestas son encamisado con concreto reforzado, encamisado con ángulos y soleras de acero y colocación de muros de concreto. Se llegó a que la reparación óptima para la escuela en Yautepec es la opción de reparación 2, con ángulos y soleras de acero, ya que el costo esperado en el ciclo de vida fue el menor de los otros dos costos de reparación con solo \$199,000 pesos mexicanos para su costo esperado en su ciclo de vida. Para la escuela en Tlatenchi, se identificó que la reparación óptima consiste en la colocación de muros de concreto de 15 cm de espesor con \$ 2'101,000 pesos mexicanos para su costo esperado en su ciclo de vida. Por lo cual, se concluye que la opción óptima depende de las áreas de planta, elevaciones, el acero de refuerzo que tienen originalmente, el tamaño de los elementos estructurales y el peligro sísmico del sitio. De manera preliminar, y a reserva de complementar su estudio con más casos, los autores observaron que, si los daños son

generalizados, conviene reparar todo el sistema estructural, incluyendo la adición de muros. Pero, si los daños son locales, conviene reparar con encamisados de concreto y/o acero.

Siguiendo la misma metodología, Guadarrama y De león (2021) proponen un procedimiento basado en la confiabilidad y los costos del ciclo de vida esperado, para comparar la efectividad de tres alternativas de rehabilitación (ángulos de acero, incremento en la sección de concreto y colocación de contravientos) en tres escuelas ubicadas en zonas con peligro sísmico donde se presentaron daños durante la ocurrencia del sismo del 19 de septiembre de 2017. Dichas escuelas se encuentran en los municipios de Tetela del Volcán, Morelos; Tehuacán, Puebla y Atlatlahucan, Morelos con 1, 2 y 2 niveles respectivamente, construidas de marcos de concreto y muros divisorios de mampostería. Se obtuvo que las probabilidades de falla de las escuelas estudiadas se redujeron de 0.032 a 0.0029, de 0.041 a 0.0028 y de 0.026 a 0.0026 donde las probabilidades reducidas son el promedio de las que resultan para las 3 alternativas de reparación. Se concluye que el procedimiento permitió identificar que el modo de falla dominante fue el de flexión y que la alternativa de reparación con ángulos de acero fue la mejor en reducción en probabilidad de falla y en costo esperado en el ciclo de vida.

I.3. Análisis costo - beneficio de edificios

Kappos *et al.* (1998) se han enfocado en identificar la relación existente entre los beneficios que se presentan cuando se repara o interviene una estructura y el costo económico que esto implica. En su investigación se centran, en primer lugar, en presentar un procedimiento de evaluación de la vulnerabilidad sísmica que combina un enfoque estadístico con uno analítico. También proponen un modelo para correlacionar los índices de daños calculado analíticamente con las pérdidas, además de obtener matrices de probabilidad de daños, las cuales se incorporan a un modelo de costo-beneficio para estimar la viabilidad de rehabilitar un parque de 3707 edificios dañados por el terremoto de 1978, en Tesalónica, Grecia. Para la evaluación de la vulnerabilidad de los edificios, se construyen matrices de probabilidad de daños para las siguientes categorías de edificios: marcos no dúctiles, de baja altura (1 a 3 niveles), de media altura (4 a 7 niveles) y de gran altura (8 o más niveles), sistemas duales

no dúctiles (marcos y muros de concreto), de baja, media y gran altura. Los resultados de su investigación indican que la relación costo-beneficio para los edificios de concreto reforzado es bastante baja, por lo cual se concluye que un programa de refuerzo previo al terremoto no está justificado económicamente.

El daño en estructuras a causa del terremoto de 1999 en Turquía llevó a Smyth *et al.*, (2004) a presentar una metodología de análisis costo-beneficio para la evaluación comparativa de varias medidas de refuerzo sísmico aplicado a un edificio de departamentos representativo, situado en Estambul, Turquía. Esta metodología toma en cuenta el desempeño estructural de las edificaciones en términos de curvas de fragilidad y amenaza sísmica, representada en términos de la curva de excedencia de la aceleración máxima del suelo. La estructura representativa es un edificio real situado en Caddebostan, suburbio de Estambul, Turquía, se trata de un edificio de 5 niveles de marcos de concreto resistente a momento sin muros de corte. Para dicho edificio representativo se proponen 3 medidas de refuerzo, contravientos en las 4 esquinas de cada nivel, muros de cortante parcial (en algunas crujías), muros de cortante total. Cabe mencionar que todos los valores de la relación beneficio-costo fueron obtenidos por los autores por medio del valor presente neto VPN; de acuerdo con los resultados obtenidos, ninguna de las tres medidas de mitigación es rentable si se consideran únicamente las pérdidas económicas directas debidas a los daños o al derrumbe del edificio, ya que el $VPN < 0$, esto debido a que los beneficios esperados no compensan los costos del refuerzo. Por otro lado, si se consideran las pérdidas humanas, las medidas de mitigación empiezan a ser viables económicamente hablando. En ese sentido si se considerará un escenario de 10 pérdidas humanas y un costo de la vida de un millón de dólares (sabiendo que la vida humana es invaluable), los datos arrojan que, para un horizonte de tiempo de 9 años, las 3 medidas de mitigación son viables ya que el $VPN > 0$. El criterio que usaron los autores para seleccionar la mejor medida de mitigación es la de maximizar el VPN, de acuerdo con este criterio, para un horizonte de tiempo de 50 años, 10 pérdidas humanas y un costo de la vida US\$1,000,000; la medida de contravientos tuvo un $VPN = US\$119,300$, la medida de muros de cortante parcial $VPN = US\$168,400$ y la medida de muros de cortante total $VPN = US\$118,900$. De acuerdo con los resultados obtenidos el refuerzo mediante muro de cortante parcial sería la opción más atractiva desde el punto de vista económico.

Kappos y Dimitrakopoulos (2008) evalúan si el refuerzo previo al terremoto de un parque de edificios es económicamente viable o no, mediante un análisis costo-beneficio, además de obtener el nivel óptimo de refuerzo para mitigar el riesgo sísmico. El parque de edificios se encuentra en la ciudad de Tesalónica, Grecia y se conforma de edificios de 2, 4 y 9 niveles de concreto reforzado, con diferentes configuraciones (marcos rellenos, marcos con muros de cortante y sistemas con y sin pilotes en suelo blando). Ya que el parque de edificios es amplio y poco homogéneo, los autores consideraron que no era posible examinar a detalle cada método de reforzamiento y sus implicaciones en la reducción de la vulnerabilidad del parque de edificios; por lo tanto, realizaron algunas simplificaciones. Los autores tomaron el costo de reforzamiento por m^2 como el 12% del costo de sustitución del edificio por m^2 . Los resultados arrojaron que la relación beneficio costo son inferiores a la unidad ($B/C < 1$) cuando no consideraron las pérdidas humanas, por otro lado, cuando se considera el valor de vida humana como 500,00 euros y un horizonte de tiempo de 40 años, los beneficios aumentan y por lo tanto la relación $B/C > 1$. Los edificios de poca y gran altura (2 y 9 niveles) de marcos rellenos aparecen como candidatos de refuerzo, ya que la relación $B/C > 1$. Los autores concluyen que no se considera económicamente viable en Tesalónica un plan de refuerzo masivo que abarque todos los edificios antiguos de concreto reforzado, mientras que podría considerarse un refuerzo para algunos casos, como los edificios de baja altura (2 niveles) debido a que $B/C > 1$.

Años más tarde Liel y Deierlein (2013) evalúan medidas de mitigación para edificios antiguos de concreto reforzado a través de un análisis costo-beneficio basado en desempeño, combinando información sobre si el colapso pudiera ocurrir o no. Los beneficios incluyen la reducción de pérdidas humanas y daños. La investigación utiliza datos de un estudio complementario (Liel y Deierlein 2008 y Liel *et al.*, 2011), en el que los autores utilizaron técnicas de evaluación del comportamiento sísmico para calcular y comparar los riesgos de daño y colapso inducidos por terremotos en edificios de concreto reforzado de la época de 1960 en California, E.U.A. Estos edificios son de 2, 4, 8 y 12 pisos, los cuales pretenden ser representativos de edificios antiguos de concreto reforzado en California. Para ello, analizaron tres técnicas de reforzamiento, tales como, encamisado de concreto reforzado, muro de cortante y fibras de carbono. Hay que mencionar que los investigadores examinan

medidas de reforzamiento genéricas aplicadas a edificios tipo, sin analizar un diseño detallado de reforzamiento aplicado a un edificio específico. La investigación arrojó que el reforzamiento con encamisado de concreto reduce la probabilidad de colapso a 50 años en edificios de 4 y 8 niveles del 28% y el 41% (para los edificios tipo en su condición original) a entre el 3% y el 7% (para los edificios reforzados), respectivamente. Para el reforzamiento con muros de cortante la probabilidad de colapso se reduce a entre el 4% y el 13% para edificios de 4 y 8 niveles, respectivamente. Para fibras de carbono la reducción de colapso para edificios de 4 y 8 niveles es marginal. Por lo cual, los autores concluyen que, de las técnicas de reforzamiento, el encamisado de concreto es la que tiene una mayor disminución en las pérdidas, debido al aumento en la rigidez hay una disminución en los daños. En menor medida, el reforzamiento con muros de cortante también reduce los costos de reparación y las pérdidas.

En este sentido, Jafarzadeh *et al.* (2013) desarrollaron una metodología para realizar un análisis de costo-beneficio empleando información recopilada de una encuesta de campo de 158 escuelas públicas en Irán para proponer un modelo paramétrico y estar en posibilidades de estimar un costo de reconstrucción neto de reforzamiento utilizando 14 variables a través de una regresión multilínea. Sin embargo, a pesar del uso de datos estadísticos en su trabajo, éste carece de la variabilidad de la amenaza sísmica y de la respuesta estructural ante eventos sísmicos futuros, aspectos que pueden resolverse mediante el uso de enfoques probabilísticos.

Por otro lado, Mora *et al.* (2015) proponen una metodología para obtener la relación beneficio-costos de escuelas públicas en Colombia a nivel subnacional, mediante la evaluación de pérdida anual esperada (PEA) y el costo de un hipotético reforzamiento estructural. Las tipologías de escuelas más comunes en Colombia son los marcos de madera, mampostería no reforzada, mampostería reforzada y marcos de concreto reforzado, por lo general, son edificaciones de baja altura (2 o 3 niveles). Para ello, los autores definen las alternativas de rehabilitación o refuerzo como: 1) Los edificios de mampostería no reforzada se sustituyen por nuevas estructuras de mampostería reforzada 2) Para las restantes tipologías estructurales, se han asumido espectros de normativa baja para la condición actual de las

escuelas y normativa alta para el caso de reforzamiento estructural en las escuelas. Los costos de reforzamiento/reemplazo los asumieron de la siguiente forma: 1) los edificios de mampostería no reforzada se sustituyen por nuevos edificios de mampostería (es decir, se construye una nueva escuela con una inversión igual al valor de sustitución); 2) para el resto de tipologías estructurales, consideraron que los costos de reforzamiento eran el 15% del valor de sustitución. Los resultados obtenidos arrojaron que la relación $B/C > 1$ se presentó en las primeras cinco unidades administrativas subnacionales (departamentos), que fueron los departamentos de Nariño, Chocó, Putumayo, Risaralda y Antioquia, en ese sentido, los costos de reforzamiento de las escuelas a nivel nacional se estiman en 3.562 billones de dólares que suponen una inversión que representa el 30% de la inversión total anual 2010 en educación en Colombia. Pero si solo se refuerzan las escuelas en los cinco primeros departamentos (Nariño, Chocó, Putumayo, Risaralda y Antioquia), los costos previstos serían de unos 898 millones de dólares que representan el 25% del costo de reforzamiento de las escuelas a nivel nacional y acumulan el 87% de la reducción de pérdidas a nivel de país. Los autores concluyen que estos datos presentados se limitan a evaluaciones preliminares y son útiles para procedimientos de priorización de recursos.

I.4. Resiliencia

De forma general la RAE (RAE, 2022) define la resiliencia como la capacidad de un material, mecanismo o sistema para recuperar su estado inicial cuando ha cesado la perturbación a la que había estado sometido. Dentro del campo de la ingeniería, Bruneau *et al.* (2003) definen la resiliencia sísmica como la capacidad de las unidades sociales (por ejemplo, organizaciones o comunidades) para mitigar los peligros y contener los efectos de los desastres cuando ocurren, y llevar a cabo actividades de recuperación de manera que se minimicen los trastornos sociales y se mitiguen los efectos de futuros terremotos. Años más tarde Cimellaro *et al.* (2010) definen la resiliencia como una función que indica la capacidad de mantener un nivel de funcionalidad o rendimiento para un determinado edificio, puente, redes vitales o comunidad, durante un período definido como el tiempo de control (T_{LC}) que suele ser decidido por los propietarios, o la sociedad (suele ser el ciclo de vida, la vida útil del sistema, etc.).

Gran parte de los códigos de diseño sísmico a nivel mundial o metodologías (SEAOC, 1995; ASCE-41, 2006; FEMA, 2012; GCDMX, 2020) siguen la corriente de diseño basado en desempeño, los cuales se definen por estados límites de desempeño asociados a valores umbrales de variables físicas, por ejemplo, distorsiones de entrepiso, con el objetivo que éstas no sean excedidas y así garantizar un buen comportamiento estructural. Dichos códigos aceptan que ante la ocurrencia de sismos de gran magnitud las estructuras desarrollen niveles importantes de daño, sin que se presente el colapso estructural. Estos daños en las estructuras se traducen directamente en cuantiosas pérdidas económicas. Un ejemplo de edificios que experimentaron el estado límite, con daños estructurales de importancia, pero sin llegar al colapso se presentó por el sismo de febrero de 2011 de Christchurch, Nueva Zelanda. Lo que originó que diversas construcciones tuvieran que demolerse, ya que el costo de reparación era económicamente inviable, por otro lado, debido a los trabajos de reconstrucción (duración de tres años) muchas empresas tuvieron que ser reinstaladas en otro sitio. Lo anterior solo deja ver que, a pesar del buen desempeño de las estructuras, para la sociedad en general y los dueños no fue un acontecimiento de éxito, ya que ellos no esperaban que sus edificaciones se dañaran por los efectos de un sismo, debido a que estas habían sido diseñadas de acuerdo con un reglamento moderno. El ejemplo anterior deja ver que es necesario desarrollar nuevas metodologías de diseño y evaluación sísmica de edificios, que involucren variables de decisión (costos de reparación, tiempo de reparación, tiempo de recuperación, etc.) propias de la resiliencia estructural, Gutiérrez y Ayala (2022).

II. Metodología propuesta

Para determinar la resiliencia global en escuelas del sector público González (2019) presenta una metodología para el cálculo de la resiliencia. Se retoma dicha metodología agregando un análisis costo – beneficio considerando diferentes medidas de mitigación/repación. A continuación, se presentan los pasos a seguir:

1. Peligro sísmico
2. Exposición
3. Vulnerabilidad estructural
4. Riesgo sísmico
5. Resiliencia estructural
6. Medidas de mitigación/repación
7. Costos y tiempos de intervención
8. Vulnerabilidad de estructuras intervenidas
9. Riesgo de estructuras intervenidas
10. Resiliencia de estructuras intervenidas
11. Análisis costo – beneficio

II.1. Peligro sísmico

La amenaza o peligro sísmico es cualquier fenómeno físico (sacudida, rotura del suelo, etc.) asociado a un sismo que puede producir efectos adversos en las actividades humanas. De esta manera, el peligro puede ser descrito en términos puramente cualitativos o evaluarse cuantitativamente, dependiendo de las necesidades de la situación. En la práctica, la amenaza sísmica suele evaluarse para probabilidades de ocurrencia (Dowrick, 2009) de una determinada intensidad. En la actualidad se usa el enfoque probabilístico para el cálculo de la amenaza sísmica, e involucra la incertidumbre asociada a variables como el sitio, tiempo de ocurrencia del evento, aceleraciones que se presentan en diferentes sitios, entre otras. El propósito fundamental del estudio de amenaza sísmica es averiguar qué tan frecuentemente ocurren sismos y con qué intensidades se presentan en un sitio o zona determinada (Méndez,

2013). A continuación, se presenta en términos generales los pasos para el cálculo del peligro sísmico.

1) Establecer las características de las fuentes generadoras de sismos

Se tienen bien identificadas zonas que generan sismos a lo largo de la República mexicana, por lo cual deben seleccionarse las fuentes generadoras de sismos que afectaran a la zona de interés.

2) Implementación de ecuaciones de predicción del movimiento del suelo (GMPE)

Una vez caracterizadas las fuentes sísmicas, es necesario conocer la intensidad del movimiento que provocará el sismo en el sitio analizado, lo cual es posible gracias a las expresiones que relacionan la intensidad, magnitud y distancia epicentral, conocidas como leyes de atenuación (GMPE, por sus siglas en inglés). Estas ecuaciones se emplean con el fin de obtener las intensidades sísmicas en un sitio de estudio cualquiera, a partir de las características de una fuente sísmica y factores como la distancia a la fuente y las propiedades geológicas del sitio (González, 2019).

3) Cálculo de peligro sísmico

Una vez conocida la sismicidad de las fuentes y los patrones de atenuación de las ondas generadas en cada una de ellas, puede calcularse el peligro sísmico considerando la suma de los efectos de la totalidad de las fuentes sísmicas y la distancia entre cada fuente y el sitio en que se encuentra la estructura. El peligro $v(S_a)$, se expresa en términos de las tasas de excedencia de intensidades S_a (CFE, 2015).

Por último, se propone que la intensidad del peligro sísmico se cuantifique en términos de la intensidad sísmica que sea relevante para evaluar el desempeño de las estructuras. En este caso, la medida de intensidad que se sugiere emplear es la pseudoaceleración espectral (S_a) correspondiente al período de vibrar del primer modo. La intensidad de la amenaza de cada evento sísmico estimado se representará como una variable aleatoria por, al menos, sus dos primeros momentos estadísticos: (1) el valor esperado y (2) la varianza. Este proceso se

completa con la revisión de eventos históricos y estudios científicos previos realizados sobre la gravedad y frecuencia de los terremotos en la región de interés.

II.2.Exposición

Los elementos expuestos están relacionados principalmente con los componentes de la infraestructura o con la población expuesta que puede verse afectada por eventos de amenaza. Para caracterizar a la exposición, es necesario identificar sus componentes individuales, incluyendo ubicación, características físicas, valor económico y la ocupación humana esperada durante un evento determinado. El grado de precisión de los resultados dependerá del nivel de resolución y detalle de la información del inventario de exposición.

II.3.Vulnerabilidad estructural

La vulnerabilidad cuantifica el daño esperado causado a cada tipo de activo por la intensidad de un peligro dado. La manera formal de cuantificar la vulnerabilidad es a través de funciones del mismo nombre, expresiones matemáticas que tratan de establecer una relación entre la variable considerada para representar la intensidad del fenómeno que representa el peligro (velocidad del viento o la aceleración espectral en los sismos), y la probabilidad de que se presente daño (Flores *et al.*, 2006).

Las funciones de vulnerabilidad se clasifican en 3 tipos (empíricas, analíticas y opinión de expertos) de acuerdo con el método mediante el cual pueden obtenerse. En primer lugar, las funciones empíricas suelen ser las más deseables, ya que se obtienen directamente de la observación del comportamiento real de la estructura ante sismos, sin embargo, hay estructuras que no han experimentado movimientos fuertes, lo que representa una limitante. En segundo lugar, las funciones basadas en la opinión de expertos se obtienen cuando se reúne un grupo de expertos, los cuales emiten posibles pérdidas de ciertos activos para diferentes niveles de excitación sísmica con base en su experiencia. Por último, las funciones obtenidas a través de métodos analíticos se obtienen generalmente de modelos matemáticos y, en su mayoría, se emplean las mismas cuatro etapas: 1) Definición de las características

estructurales 2) Análisis estructural para la obtención de la respuesta estructural (distorsiones, desplazamientos, fuerzas), 3) Estimación del daño probabilístico y 4) Estimación de pérdidas (Porter, 2018).

II.4.Riesgo sísmico

El riesgo sísmico se define como la pérdida esperada de cierto elemento durante un determinado período de tiempo futuro. El elemento en riesgo puede ser un edificio, conjunto de edificios, ciudad, población humana o actividades económicas. Según el modo en que se defina el elemento en peligro, el riesgo puede medirse en términos de pérdidas económicas, pérdidas humanas o daños físicos a los bienes. El término riesgo habitualmente es utilizado para pérdidas económicas donde particularmente se refiere a la relación del costo de reparación y el costo de remplazo del elemento, Coburn y Spence (2003).

Se utilizan distintos tipos de estudio para la estimación de pérdidas, dependiendo de la naturaleza del problema y el objetivo del estudio. A continuación, se mencionan de acuerdo con Coburn y Spence (2003).

- Estudios de escenarios: Calcula los efectos de un único sismo en una región. A menudo se supone un sismo de magnitud “máxima probable”, con ubicación supuesta basada en fallas geológicas conocidas o zonas sísmicas probables. El estudio de escenarios se utiliza para estimar las pérdidas probables de un caso extremo, para comprobar la capacidad financiera de una empresa o institución para soportar ese nivel de pérdidas, y también para estimar los recursos que probablemente se necesitarán para hacer frente a la emergencia.
- Análisis probabilístico de riesgo: Calcula todas las potenciales pérdidas y la probabilidad de que se produzcan, debido a las diferentes magnitudes y ubicaciones de los sismos que puedan ocurrir. Para un edificio individual, serie de edificios u otros activos en una región, se genera la curva de probabilidad de excedencia de pérdidas (EP, por sus siglas en inglés) que definen el nivel de pérdida que se experimentaría con diferentes periodos de retorno. La curva EP se utiliza para calcular la pérdida

anual promedio la cual es usada para la fijación de tarifas de seguros o la evaluación comparativa de riesgos. El análisis probabilístico de riesgos puede utilizarse para estimar las curvas EP las cuales servirán para determinar, el número de edificios dañados, las pérdidas humanas o los costos económicos totales durante un periodo de tiempo determinado. Si el cálculo es lo suficientemente detallado, se puede estimar y calcular el efecto probable de las políticas de mitigación en la reducción de las pérdidas por sismos.

- Estudio de pérdidas potenciales: La asignación del efecto de los niveles de peligro esperados en una región o país muestra la ubicación de las comunidades que pueden sufrir grandes pérdidas. Por lo general, la intensidad histórica máxima o un nivel de aceleración máxima del suelo asociado a un período de retorno probabilístico largo se asigna a través de un área. El efecto de la intensidad en las comunidades dentro de esa zona se calcula para identificar las comunidades con mayor riesgo. Esto muestra, por ejemplo, qué ciudades o pueblos son susceptibles de sufrir mayores pérdidas, cuáles deberían ser prioritarios para los programas de reducción de pérdidas y cuáles son susceptibles de necesitar más ayuda o asistencia de rescate en caso de un gran sismo.

II.5. Resiliencia estructural

La resiliencia sísmica se define como la capacidad de las unidades sociales (por ejemplo, organizaciones, comunidades) para mitigar los peligros, contener los efectos de los desastres cuando ocurren y llevar a cabo actividades de recuperación de manera que se minimicen los trastornos sociales y se mitiguen los efectos de futuros sismos. Los objetivos en la mejora de la resiliencia sísmica son minimizar la pérdidas humanas y económicas, en resumen, minimizar cualquier reducción de la calidad de vida debida a los sismos. La resiliencia puede lograrse mejorando la capacidad de la infraestructura de una comunidad para funcionar durante y después de un sismo, a través de la respuesta a la emergencia, estrategias para afrontar y contener eficazmente las pérdidas, así como estrategias de recuperación que permitan a las comunidades volver a los niveles de funcionamiento anteriores al sismo lo más pronto posible (Bruneau *et al.*, 2003).

Para el cálculo de la resiliencia estructural es necesario definir la función de recuperación, la cual relaciona el nivel de funcionalidad con el tiempo que tarda en recuperarse una estructura tras ser sometida a un sismo y haber variado su nivel de desempeño. El tiempo de recuperación, T_{RE} , representa el periodo de tiempo necesario para restaurar la funcionalidad de una estructura o sistema a un nivel deseado en el cual pueda operar o funcionar igual, similar o mejor que originalmente. Con el fin de simplificar el cálculo de este parámetro, el tiempo de reparación se usa como un sustituto directo, a pesar de no ser necesariamente iguales, pues el tiempo de reparación es el periodo de tiempo que abarca la ejecución de las técnicas de rehabilitación usadas para restaurar el sistema estructural.

En la Figura 2 se muestra el perfil de la función de desempeño, la cual incluye la función de recuperación. En dicho perfil se distinguen cuatro etapas, la primera muestra las condiciones previas al sismo, en donde la estructura se encuentra operando a un nivel de funcionalidad adecuado, la segunda etapa abarca el tiempo que transcurre entre la ocurrencia del sismo y el inicio de las actividades de reparación (línea B-C), la etapa tres comprende la función de recuperación, en donde se lleva a la estructura a un nivel de funcionalidad igual (línea C-D), superior (línea C-E) o inferior (línea C-F) al nivel anterior. Finalmente, la cuarta etapa comprende el lapso de tiempo entre el final de la reparación y la reanudación total de las actividades llevadas a cabo por el sistema, a partir del punto E, D, o F, según corresponda (González, 2019).

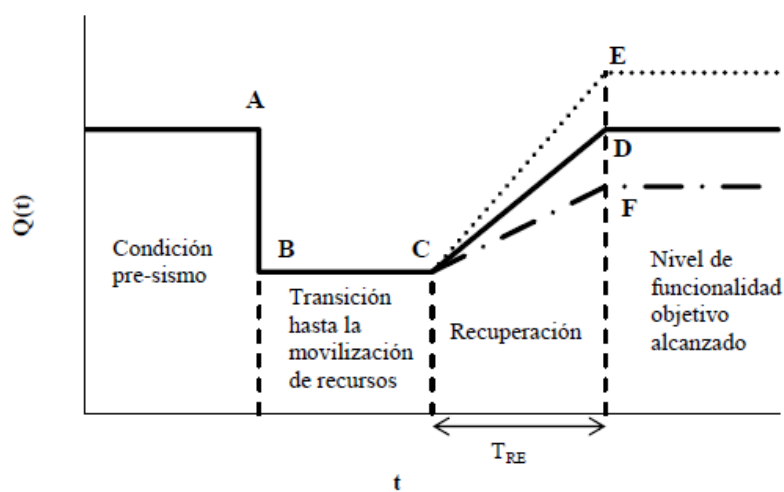


Figura 2. Procesos de la función de desempeño (González, 2019)

Por otro lado, el tiempo de control, T_{LC} , (Figura 3) es el tiempo en el cual se recupera totalmente la funcionalidad y dependiendo el valor que se establezca impactará en el cálculo de la resiliencia, una vez establecido, así como las funciones de recuperación, se calcula el área bajo el perfil de funcionalidad, comprendido en el T_{LC} , en donde se incluye el periodo de recuperación y el lapso restante hasta alcanzar el T_{LC} . Al dividir los valores del área bajo la curva entre el tiempo de control, se obtienen valores de resiliencia promedio para el periodo de tiempo que se desea evaluar. Es notorio que, en el desarrollo de este procedimiento no se ha tomado en cuenta el tiempo de ocurrencia de los eventos sísmico, es decir no se ha considerado la etapa pre-sismo en el cálculo de la resiliencia. Para este trabajo se considera que el tiempo de control y el tiempo de recuperación es el mismo.

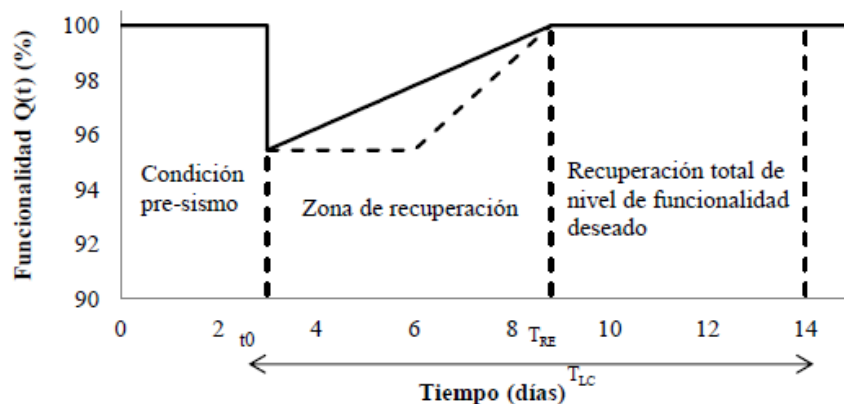


Figura 3. Perfil de funcionalidad (González, 2019)

II.6. Medidas de mitigación/repación

La necesidad de intervenir edificios de concreto reforzado se ha hecho notoria debido a daños en las estructuras en general, causados por sismos de gran intensidad que se han presentado (19 de septiembre de 1985 y 2017, entre otros). De acuerdo con Coburn y Spence (2003) las principales causas de un mal comportamiento en edificios de concreto reforzado que puede derivar en daños, son las siguientes:

- Resistencia insuficiente a la carga lateral, como resultado de diseñar para una carga lateral demasiado pequeña

- Ductilidad inadecuada, causada por un confinamiento insuficiente del refuerzo longitudinal, especialmente en las uniones viga – columna o losa – columna
- Interacción entre la estructura y los muros no estructurales que da lugar a fuerzas de torsión no deseadas y concentración de esfuerzos
- Planta baja débil debido a la falta de muros de corte o a la disposición asimétrica de los muros
- Gran flexibilidad combinada con una separación insuficiente entre edificios que da lugar a riesgo de que las estructuras vecinas se golpeen
- Concentración de esfuerzo locales debido a una geometría irregular en planta y elevación

El objetivo principal de la mayoría de las intervenciones en una estructura es aumentar la resistencia a la carga lateral (acciones sísmicas) de la estructura, por otro lado, el aumento en la ductilidad en ocasiones será un objetivo secundario. Las principales técnicas de mitigación o reparación para mejorar la capacidad a carga lateral de las estructuras de concreto reforzado, son las siguientes: muros de cortante, encamisado de acero o concreto, contravientos, fibra de carbono, entre otras, Coburn y Spence (2003).

II.7. Costos y tiempos de intervención

La determinación del costo aproximado de construcción de una obra es un dato que invariablemente se requiere a lo largo del proceso por el que atraviesan los proyectos de ingeniería. La determinación del costo de las obras antes de que se construyan, constituye lo que se denomina presupuesto. Los procedimientos o métodos para estimarlo son múltiples; sin embargo, uno de los más utilizados es con base en el cálculo de los precios unitarios de todas y cada una de las actividades (denominadas en este caso conceptos de obra), en que convencionalmente se haya dividido la obra por ejecutar (Mendoza, 2014).

Por otro lado, el tiempo de reparación es el periodo de tiempo que abarca la ejecución de las técnicas de rehabilitación usadas para restaurar el sistema estructural. Para determinar este tiempo, se desglosa el proceso constructivo en una serie de tareas, cada una asociada con

valores de mano de obra, materiales y equipo necesario para su realización. Para determinar el tiempo de reparación, la mano de obra es el parámetro más importante, pues de su rendimiento dependerá cuánto se tarden en ejecutar una tarea (González, 2019).

II.8. Vulnerabilidad de estructuras intervenidas

Ya que se definieron qué medidas de intervención se aplicarán a la estructura original, se modifican las propiedades de la estructura original (resistencia, rigidez elástica e inelástica) con el fin de que se puedan obtener las nuevas curvas de vulnerabilidad de las estructuras intervenidas.

II.9. Resiliencia de estructuras intervenidas

Al igual que en el punto anterior se procede a calcular la resiliencia de las estructuras intervenidas, la aplicación de las medidas de intervención en la estructura original tendrá un impacto en la resiliencia original de la estructura, por lo cual esta diferencia en la resiliencia servirá para poder hacer un análisis costo–beneficio basado en resiliencia.

II.10. Análisis costo – beneficio

La eficiencia económica de un reforzamiento o reconstrucción de una estructura antes de un sismo se puede estimar en términos del valor actual neto de la inversión de la reparación o reconstrucción. Si los beneficios esperados superan la pérdida esperada, el valor presente es positivo (relación C/B, mayor que uno) y la inversión de reforzamiento o reconstrucción queda justificada económicamente (Kappos y Dimitrakopoulos 2008; Valcárcel *et al.* 2013; Jaimes y Niño 2017).

III. Casos de estudio

Para los casos de estudio se retoman las 6 escuelas tipo presentadas por González (2019). Dichas escuelas tipo servirán como base para, posteriormente, intervenirlas con las medidas de mitigación/reparación propuestas. A continuación, se detalla la implementación de la metodología previamente establecida, dejando para el subcapítulo “Definición de medidas de mitigación/reparación” en adelante todos los resultados y análisis pertinentes. Ya que el autor de esta tesis considera pertinente mencionar que formulaciones se usaron antes de presentar resultados y el análisis de estos.

III.1. Definición del peligro sísmico

La intensidad del peligro sísmico debe cuantificarse en términos de la intensidad sísmica relevante relacionada con el daño. Este estudio utiliza la pseudoaceleración (S_a) como parámetro estructural, considerando un 5% de amortiguamiento para diferentes períodos de vibrar relacionados con las edificaciones escolares estudiadas. Para ello, se crea un archivo de tipo *.ame (ame proviene de amenaza) que incluye un encabezado de descripción y múltiples mallas georreferenciadas que representan un conjunto de eventos de peligro, para cada evento con su tasa de ocurrencia asociada (ERN-AL, 2010; Cardona *et al.*, 2010, 2012; Marulanda *et al.*, 2013). Las incertidumbres consideradas para la estimación de la varianza son las relacionadas con los datos y las simplificaciones del modelo.

La República Mexicana se divide en 48 fuentes generadoras de sismos (CFE, 2015). Cada una de estas fuentes genera sismos a una tasa constante por unidad de área. La actividad de cada fuente sísmica se especifica en términos de la tasa de excedencia de las magnitudes, $\lambda(M)$, que ahí se generan. La tasa de excedencia de magnitudes mide qué tan frecuentemente se generan en una fuente temblores con magnitud superior a una dada. Para este estudio, los tipos de sismos que puede generar cada fuente sísmica se clasifican en tres grupos: sismos interplaca, de profundidad intermedia y superficiales o corticales. Para ello, se asocian leyes de atenuación diferentes a cada uno de estos tipos de sismos que afectan a la ciudad de Puebla, las cuales se describen a continuación:

- (1) Sismos interplaca o de subducción. Para la aceleración máxima del suelo generada por sismos que ocurran en la costa sur del Pacífico, la ley de atenuación empleada fue la propuesta por Jaimes *et al.* (2006). Esta ley fue desarrollada con base en numerosos registros de aceleración obtenidos por la Red de Acelerógrafos de la UNAM, que incluyen los registros del gran terremoto de Michoacán del 19 de septiembre de 1985.
- (2) Sismos de profundidad intermedia. Para este caso, se empleó un modelo de atenuación desarrollado por Jaimes *et al.* (2015). Este modelo se desarrolló a partir de 22 terremotos con magnitudes entre 5,2 y 7,4 y profundidades entre 40 y 128 km.
- (3) Sismos superficiales. Con el fin de modelar la atenuación de sismos corticales poco profundos que afectan a la ciudad de Puebla, se emplearon las ecuaciones de predicción del movimiento del suelo desarrolladas por Jaimes *et al.* (2016) utilizando 15 sismos locales en la zona de lomas de la Ciudad de México. Es importante recalcar que, si bien esta ley de atenuación no corresponde específicamente a la zona de estudio, las similitudes que existen entre las zonas de terreno firme de ambos sitios son importantes y, por su cercanía, están afectadas por las mismas fuentes locales. En la Figura 4 se muestran las zonas donde se generan sismos superficiales de acuerdo con CFE (2015).

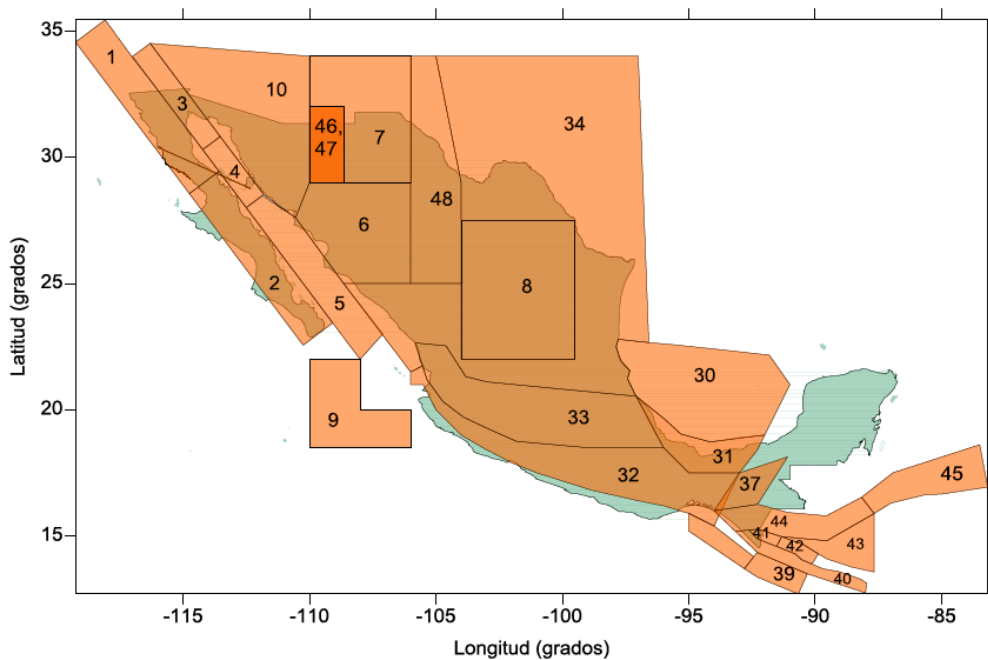


Figura 4. Zonas generadoras de sismos superficiales (CFE, 2015).

III.2. Definición de la exposición

Para caracterizar el inventario de escuelas, es necesario identificar cada activo, considerando ubicación, características físicas, vulnerabilidad y valor de reposición. El valor de reposición del activo debe entenderse como el valor económico requerido para reconstruir la estructura a sus condiciones originales antes de que ocurriera un sismo y puede ser dado directamente por el propietario o estimado a partir de fuentes secundarias (por ejemplo, INEGI, 2015; Jaimes y Niño, 2017). La precisión de los resultados dependerá del nivel de resolución y detalle de la información disponible.

Para mostrar la implementación de lo anteriormente expuesto, se retomaron los casos hipotéticos de escuelas públicas típicas presentadas por González (2019), localizadas en la colonia San Jerónimo Caleras, en la ciudad de Puebla de uno, dos y tres niveles, diseñadas con el Manual de Obras Civiles de la CFE en sus versiones 1993 y 2008, MOC-CFE-1993, MOC-CFE-2008 (CFE, 1993; CFE, 2008); por lo cual se tienen 6 estructuras tipo, de entrada. Las estructuras están formadas por marcos de concreto reforzado con dimensiones de 24 x 8 m en planta, con ocho crujías en el sentido largo formado 9 marcos y una crujía en sentido corto, con altura de entrepiso de 3.5 m (Figura 5), con tres niveles, construidas con las demandas sísmicas definidas en los manuales mencionados previamente. La elección de la tipología estructural se realizó tomando en cuenta las características de las instituciones educativas actualmente funcionales en la ciudad de Puebla.

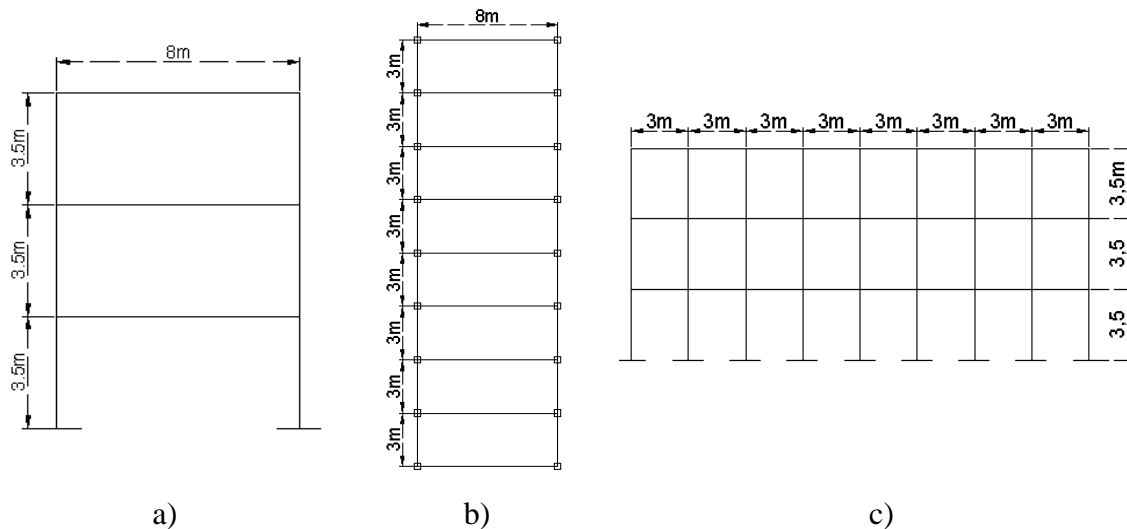


Figura 5. Geometría de las estructuras estudiadas a) Elevación lateral, b) Planta, c) Elevación frontal

Las 6 escuelas públicas presentadas por González (2019) servirán como base para futuros cálculos, por lo cual de ahora en adelante se hará referencia a estas como escuelas originales. Además, se agrega información adicional para tener un registro más completo de la base de datos de escuelas estudiadas, la cual se describe en la Tabla 6. Por otro lado, en la Figura 6 se muestra la ubicación de las escuelas originales.

Tabla 6. Información contenida en la base de datos

Nombre de campo	Características
ID	Nombre de la escuela
	Numero de niveles (1N, 2N, 3N)
	Año de construcción (1993, 2008)
	Medida de reparación (Encamisado de acero, Encamisado de concreto, Fibras de Carbono, Resina epóxica)
VALHUM	Valor de las pérdidas humanas
VALFIS	Valor de las pérdidas físicas
Latitud	Ubicación
Longitud	

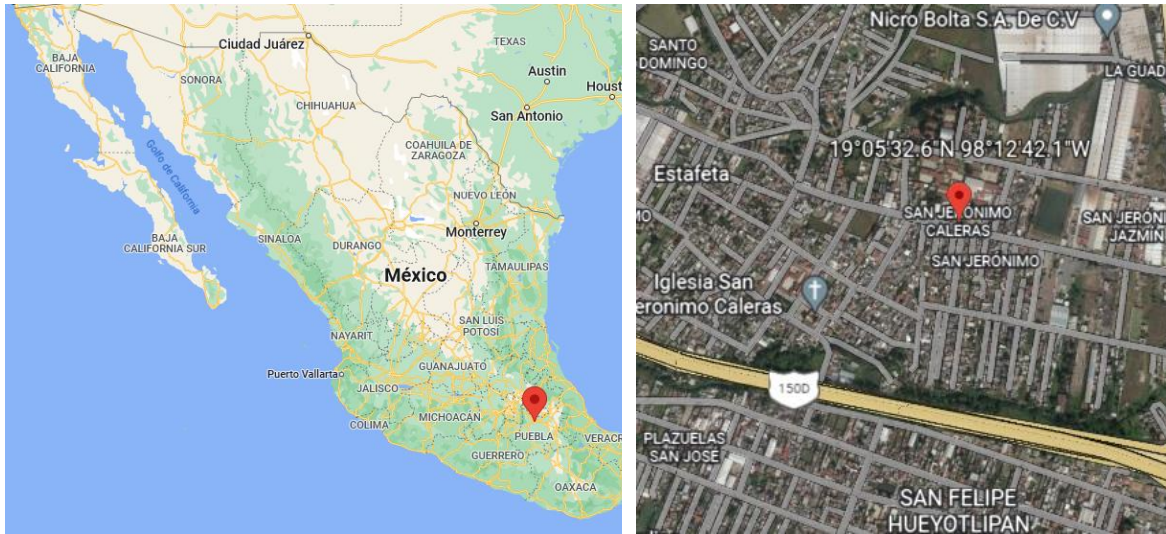


Figura 6. Ubicación de las escuelas originales (Google maps, 2023)

Por medio de un análisis modal espectral (González, 2019) definió las características de resistencia, rigidez y periodo fundamental de la estructura, así como las demandas sísmicas a partir de los reglamentos pertinentes. En la tabla 7 se muestran los periodos fundamentales de las escuelas originales.

Tabla 7. Periodos de vibrar de las escuelas originales

Año	Número de niveles	Periodo fundamental (s)
1993	1	0.390
	2	0.548
	3	0.480
2008	1	0.390
	2	0.370
	3	0.520

III.3. Definición de la vulnerabilidad estructural original

Las funciones de vulnerabilidad analíticas muestran la relación entre el daño esperado en la estructura y la intensidad del movimiento sísmico. En la curva de vulnerabilidad, el eje de

las abscisas lo forman los valores de la demanda sísmica en términos de pseudoaceleración espectral (S_a) y el de las ordenadas el nivel de daño o pérdida. Para cada valor de aceleración, el nivel de daño tendrá cierta incertidumbre que dependerá del evento sísmico que afecte a la estructura y de las propiedades reales de la misma, por esta razón, es necesario tomar en cuenta dicha incertidumbre y manejar el daño como una variable aleatoria con una distribución de probabilidad asociada. En la Figura 7 se presenta de forma ilustrativa la curva de vulnerabilidad con su desviación estándar (González, 2019).

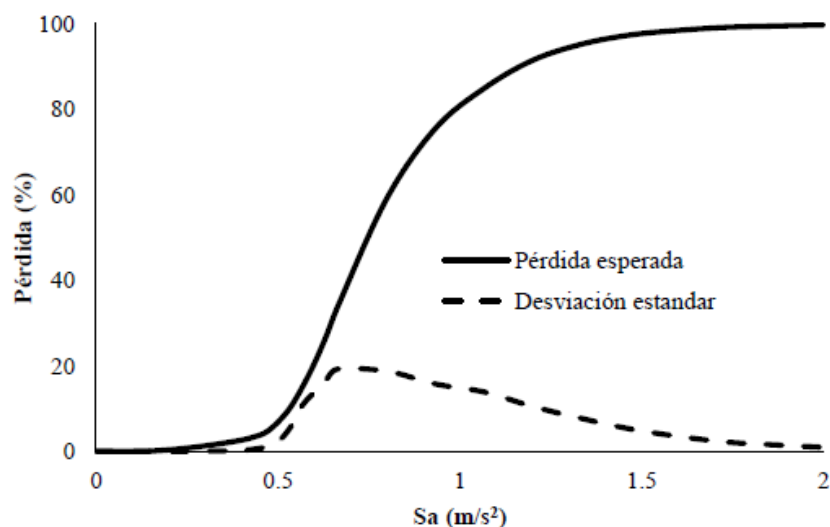


Figura 7. Forma ilustrativa de una curva de vulnerabilidad (González, 2019).

Es posible obtener funciones de vulnerabilidad a partir de curvas obtenidas de modelos de índices de daño y valores de distorsión de entrepiso resultantes de análisis dinámicos incrementales (IDA, por sus siglas en inglés), al obtener una ecuación que tenga como variable dependiente del nivel de daño asociada a la distorsión de entrepiso. A continuación, se describe con mayor detalle la metodología presentada con anterioridad, para la obtención de la función de vulnerabilidad estructural.

III.3.1. Ejecución de Análisis Dinámicos Incrementales (IDA)

Para poder realizar el análisis estructural que permitirá obtener la respuesta estructural se realizaron análisis dinámicos incrementales (IDA, por sus siglas en inglés), los cuales

consisten en someter un modelo estructural a uno o más registros sísmicos mediante análisis dinámicos no lineales; cada registro es escalado a distintas intensidades con el fin de llevar hasta la inestabilidad global a la estructura desde el rango elástico hasta el rango no lineal (Vamvatsikos y Cornell, 2002).

Para definir las características de resistencia y rigidez de los edificios estudiados, se tomaron los diseños de 6 escuelas típicas de concreto reforzado (González, 2019), las cuales fueron utilizadas como referencia de acuerdo con el Manual de Obras Civiles de la CFE en sus versiones 1993 y 2008, MOC-CFE-1993, MOC-CFE-2008 (CFE, 1993; CFE, 2008). Se consideró plasticidad concentrada en ambos extremos de vigas y columnas, asumiendo una articulación plástica que sigue un comportamiento histerético representado para el modelo Ibarra-Medina-Krawinkler (Ibarra *et al.*, 2005; Lignos y Krawinkler, 2013). Así mismo, se asumió en el modelado un amortiguamiento modal del 5% con respecto al crítico. Además, se consideró un factor de comportamiento sísmico $Q = 2$.

Para esta tesis, se usaron 98 registros de movimientos sísmicos del suelo registrados en diferentes sitios de terreno firme, tanto dentro de la ciudad de Puebla como de la ciudad de México y sitios con características similares. Debido al volumen de procesamiento de datos, los análisis dinámicos incrementales (IDA, por sus siglas en inglés) se realizaron con ayuda del programa Opensees (McKenna, 2011). A continuación, se muestra la respuesta estructural de las 6 escuelas originales (1N 1993, 1N 2008, 2N 1993, 2N 2008, 3N 1993, 3N 2008), donde cada línea en color gris representa la respuesta estructural debido a cada uno de los 98 registros sísmicos usados y la línea en color negro representa el promedio. En la Figura 8 se muestran las 3 curvas IDA (distorsión, desplazamiento y cortante) para las escuelas originales de un nivel, conforme MOC-CFE-1993 y MOC-CFE-2008 (CFE, 1993; CFE, 2008).

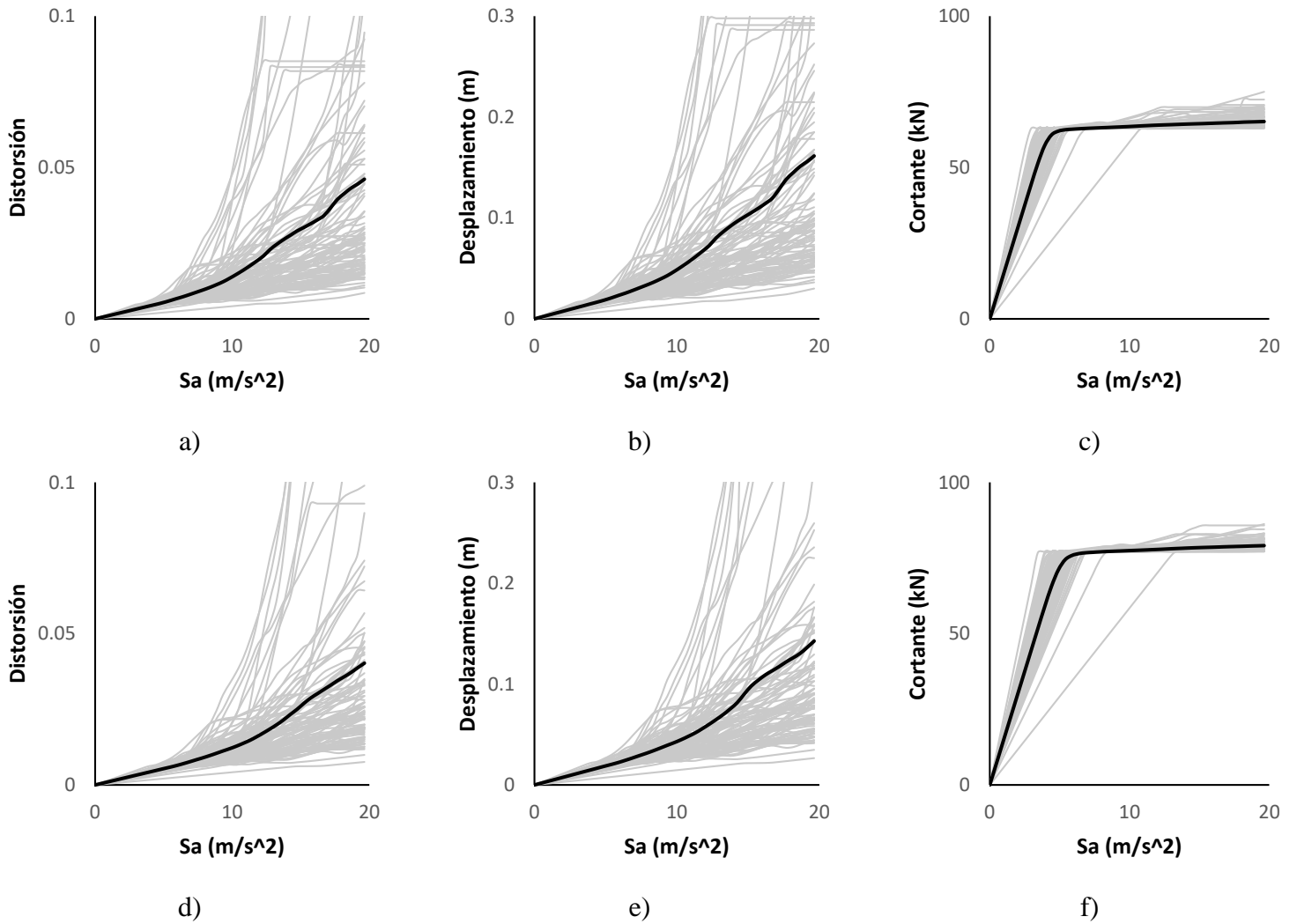
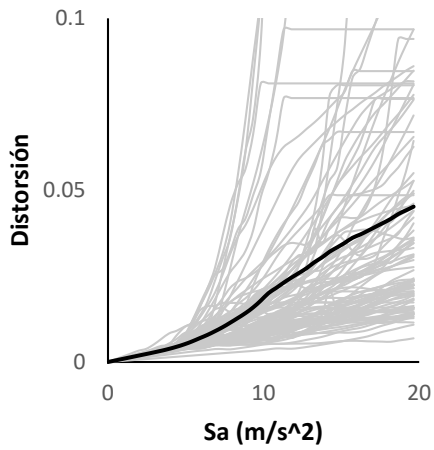
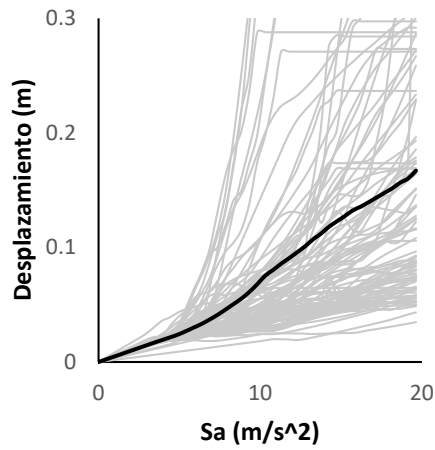


Figura 8. Curvas IDA para las escuelas originales de un nivel diseñadas conforme a: *MOC-CFE-1993 (a, b y c) y MOC-CFE-2008 (d, e, y f)*

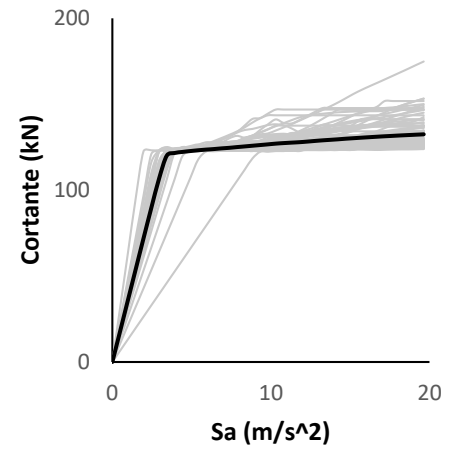
En la Figura 9 se muestran las 3 curvas IDA (distorsión, desplazamiento y cortante) para las escuelas originales de dos niveles conforme MOC-CFE-1993 y MOC-CFE-2008 (CFE, 1993; CFE, 2008).



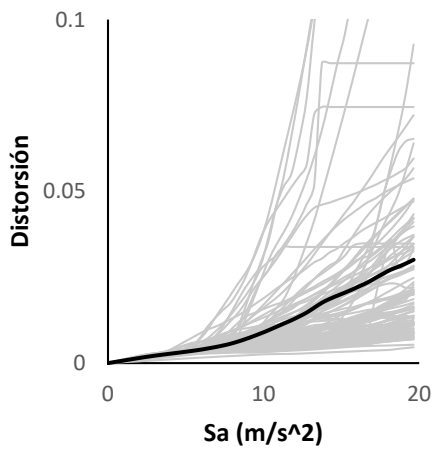
a)



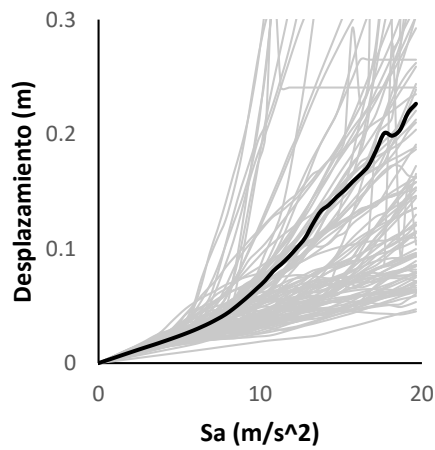
b)



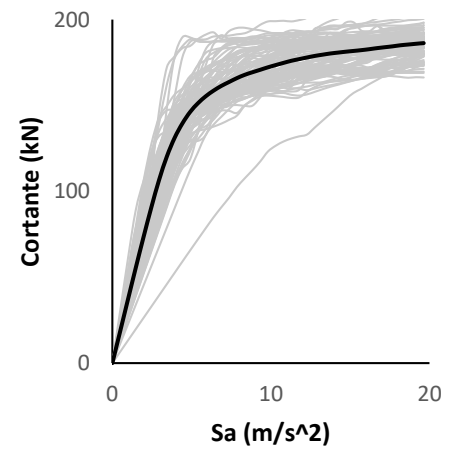
c)



d)



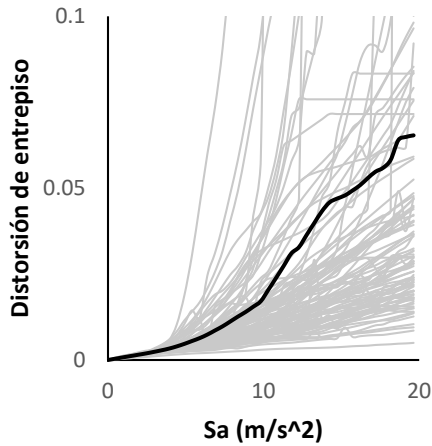
e)



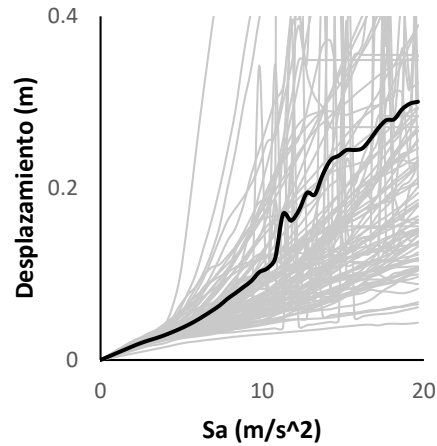
f)

Figura 9. Curvas IDA para las escuelas originales de dos niveles diseñadas conforme a: MOC-CFE-1993 (a, b y c) y MOC-CFE-2008 (d, e, y f)

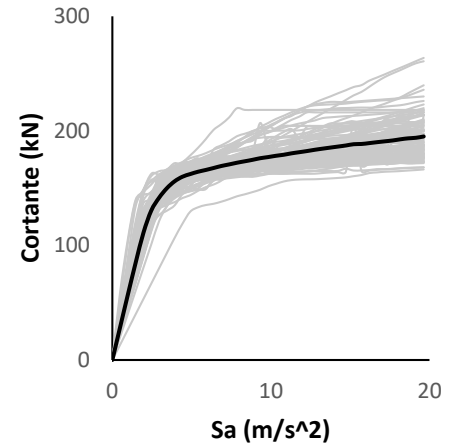
En la Figura 10 se muestran las 3 curvas IDA (distorsión, desplazamiento y cortante) para las escuelas originales de tres niveles conforme MOC-CFE-1993 y MOC-CFE-2008 (CFE, 1993; CFE, 2008).



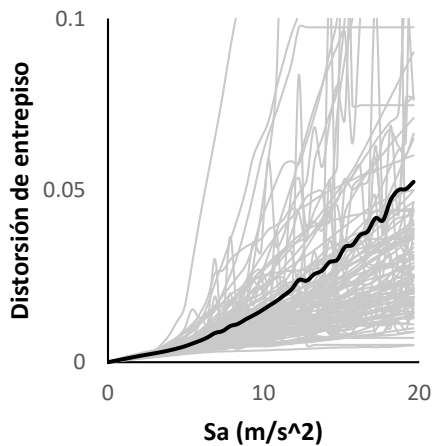
a)



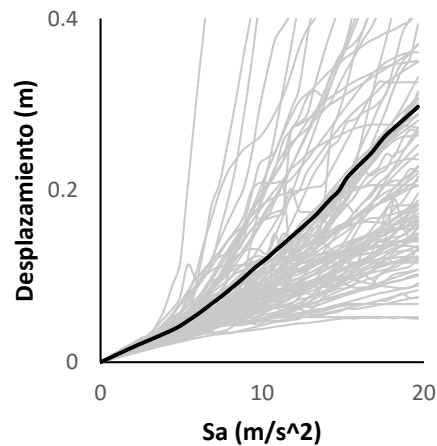
b)



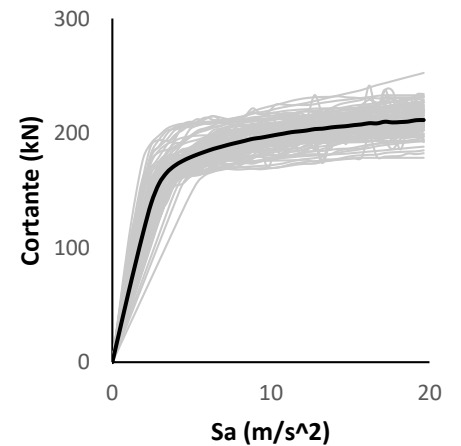
c)



d)



e)



f)

Figura 10. Curvas IDA para las escuelas originales de tres niveles diseñadas conforme a: MOC-CFE-1993 (a, b y c) y MOC-CFE-2008 (d, e, y f)

III.3.2. Curva de capacidad dinámica

Una vez que se realizaron los análisis IDA se obtiene la respuesta estructural, en términos de distorsiones, desplazamientos y cortante para diferentes valores de pseudoaceleración espectral.

Con la información presentada en la sección anterior (curvas IDA), es posible obtener la curva de capacidad dinámica de la estructura (Figura 11), la cual representa el

comportamiento no lineal global de la estructura ante una demanda sísmica y muestra la relación entre el cortante basal y el desplazamiento de un punto de control, generalmente el centro de masa del nivel superior, (Cárdenas, 2010). En la Figura 11 se presenta de forma ilustrativa la curva de capacidad dinámica.

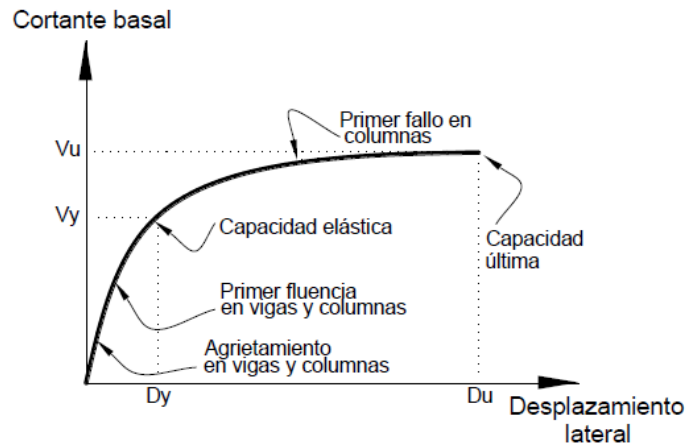


Figura 11. Curva de capacidad dinámica (Cárdenas, 2010).

Recordando que la vulnerabilidad relaciona el daño esperado y la intensidad sísmica, es importante la obtención de las curvas de capacidad dinámica para obtener las características estructurales (rigidez elástica, rigidez de post fluencia y resistencia a la fluencia) con la finalidad de modelar un sistema de un grado de libertad (SDOF por sus siglas en inglés), el SDOF se usará para estimar los índices de daño. En la Figura 12 se presentan las curvas de capacidad dinámica de las escuelas originales: un nivel (Figura 12a y 12d), dos niveles (Figura 12b y 12e) y tres niveles (Figura 12c y 12f).

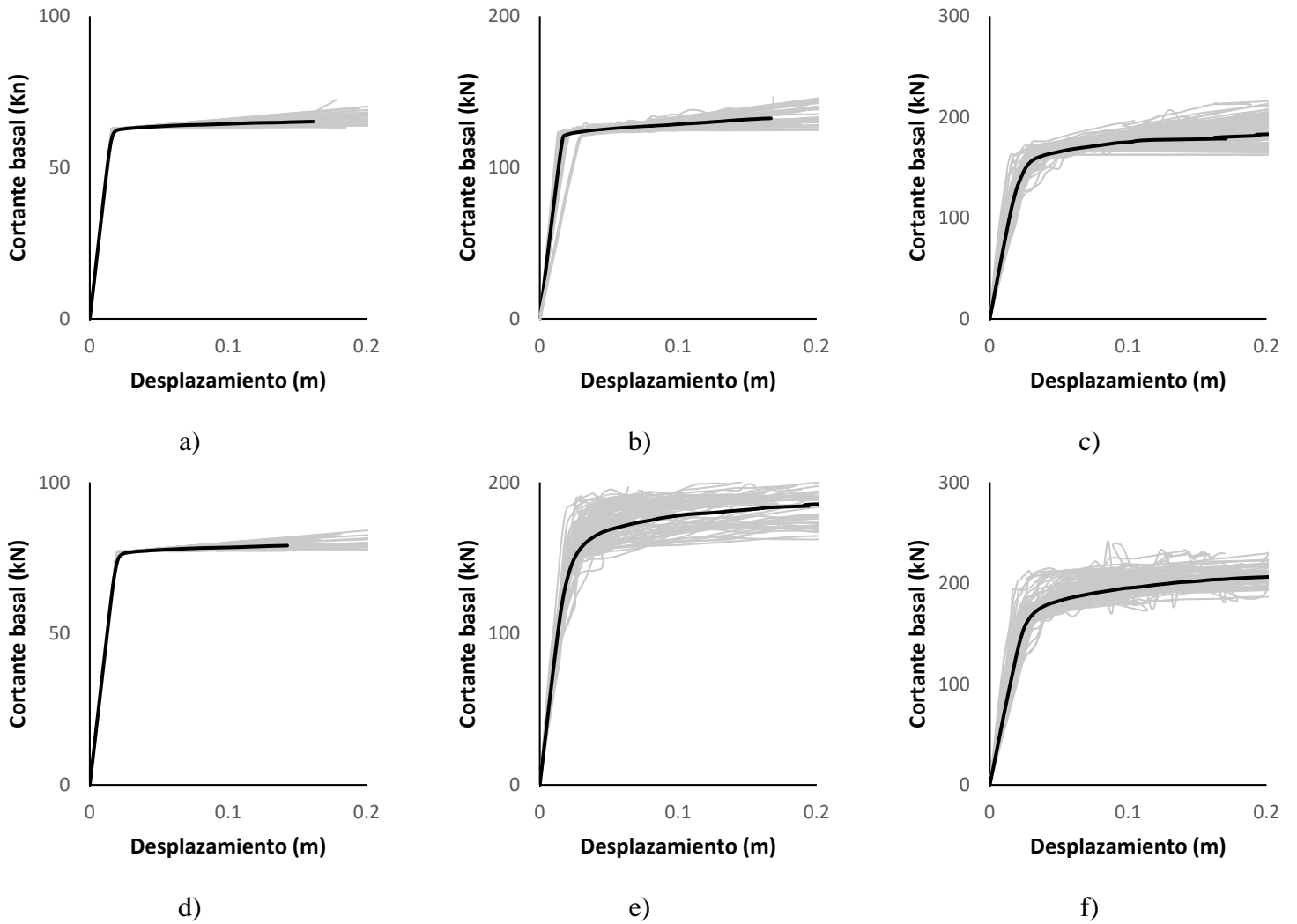


Figura 12. Curvas de capacidad dinámica de las escuelas originales de acuerdo con: MOC-CFE-1993 (a, b y c) y MOC-CFE-2008 (d, e, y f)

III.3.3. Índice de daño

El objetivo principal del diseño sísmico es conocer la respuesta estructural para brindar un nivel de seguridad deseado durante un sismo y controlar los daños en las estructuras, de tal manera que se mantengan en un rango reparable, por esto, es necesario contar con criterios para estimar el daño, siendo el índice de daño uno de ellos. Es importante mencionar que los parámetros de desempeño obtenidos con anterioridad (distorsión de entrepiso, ductilidad de desplazamiento y energía disipada) serán los valores de entrada que permiten estimar los valores de daño esperado sobre la estructura (González, 2019). Una vez que se tienen los

índices de daño, por medio de un análisis de regresión lineal, se obtienen ecuaciones que permiten obtener la curva de vulnerabilidad. En la Figura 13 se presenta de forma ilustrativa datos de índices de daño vs. distorsión de entrepiso.

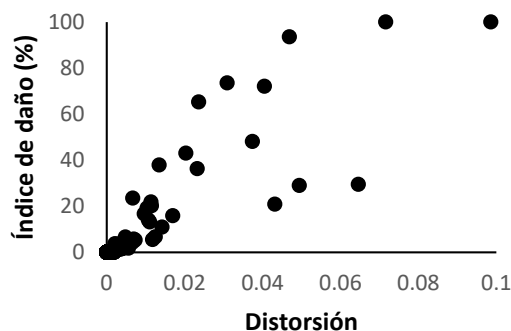


Figura 13 Forma ilustrativa índice de daño vs. distorsión de entrepiso.

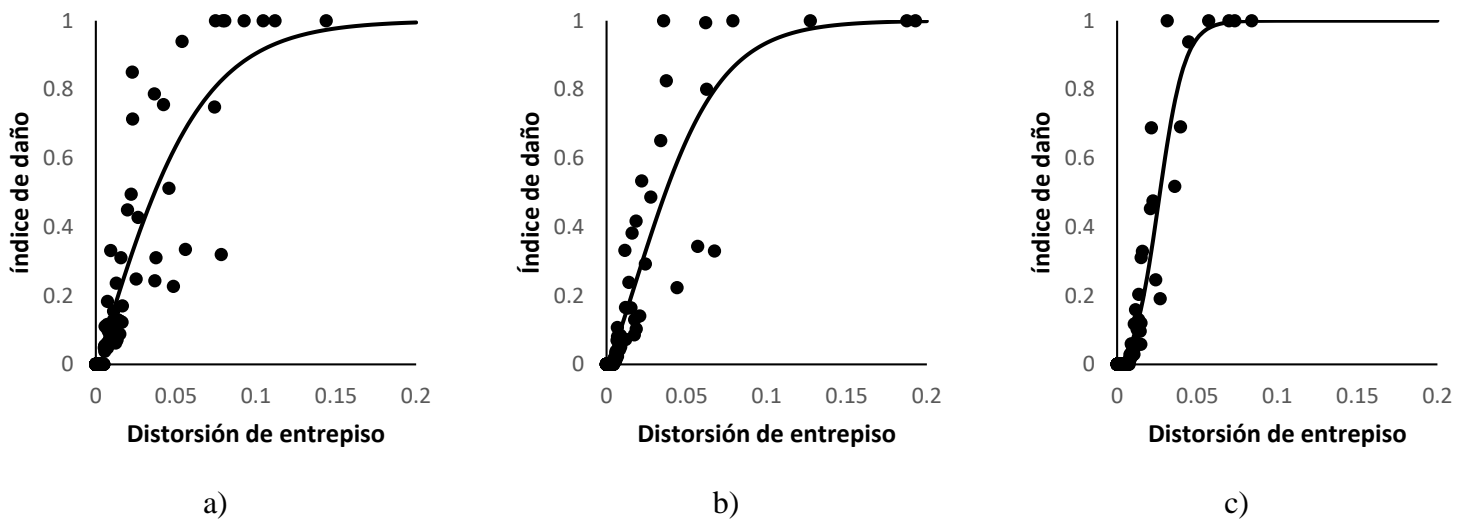
En la literatura se pueden encontrar modelos de índice de daño como Park y Ang (1985) y el de Terán y Jirsa (2005), el primero es el más usado, pero tiene la desventaja de volverse inestable en sus valores extremos, lo que genera valores de daño no nulos cuando no hay existencia de daño. Por esta razón, se opta por usar el modelo de Terán y Jirsa (2005) el cual logra corregir la inestabilidad cerca del límite inferior para los valores de daño, presentando valores nulos en la zona correspondiente al rango elástico.

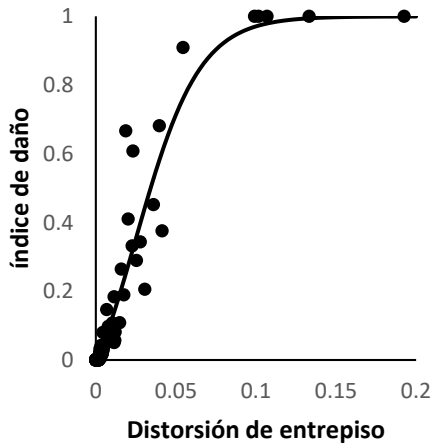
El índice de daño sugerido se define entre cero y uno, siendo cero la ausencia de daño y uno se supone daño o falta total de resistencia. Como muchos otros índices de daño, el índice de daño de Teran y Jirsa, IDTJ, no considera la interacción suelo-estructura; sin embargo, sí emplea energía histerética disipada por un sistema de un grado de libertad (SDOF por sus siglas en inglés) y su desplazamiento asociado en términos de ductilidad.

Como ya se comentó con anterioridad, a partir de las curvas IDA se obtiene la curva de capacidad dinámica, de la cual es posible obtener características estructurales, tales como, rigidez elástica, rigidez de post fluencia y resistencia a la fluencia, dichas características estructurales servirán para modelar SDOF. El índice de daño en esta tesis, se calculó para un SDOF, que representan las características del modo fundamental para cada estructura típica

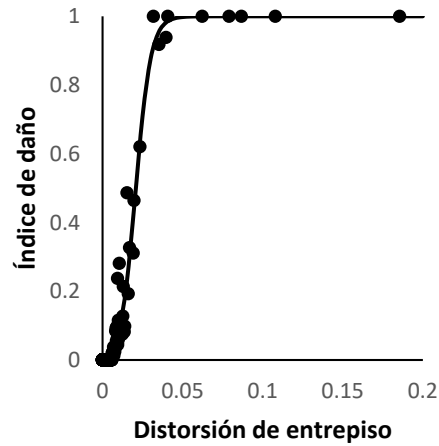
(período de vibración, amortiguación y resistencia lateral). Al ser estructuras de concreto reforzado, se utilizó el modelo modificado de Ibarra y Krawinkler (Ibarra *et al.*, 2005; Lignos y Krawinkler, 2013) implementado en Opensees (McKenna, 2011) para calcular la respuesta no lineal de los modelos estructurales y los SDOF.

Una vez que se obtuvieron los índices de daño de acuerdo al modelo de Teran y Jirsa, IDTJ, mediante un análisis de regresión no lineal se obtuvieron ecuaciones de ajuste, que permitieron obtener graficas de índice de daño vs distorsión de entrepiso, como las mostradas a continuación. En la Figura 14 se muestran las gráficas índices de daño vs. distorsión de entrepiso para las 6 escuelas originales: un nivel (Figura 14a y 14d), dos niveles (Figura 14b y 14e) y tres niveles (Figura 14c y 14f).

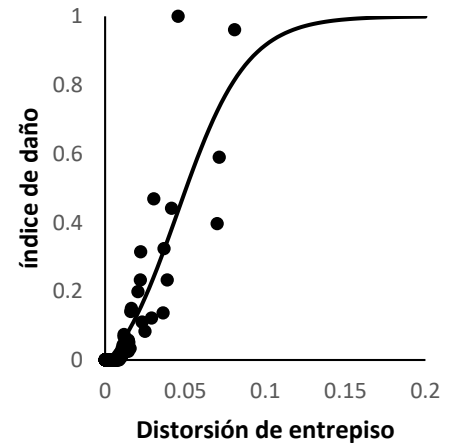




d)



e)



f)

Figura 14. Curvas de regressão lineal conforme a los datos del análisis de daño para las escuelas originales de acuerdo con: MOC-CFE-1993 (a, b y c) y MOC-CFE-2008 (d, e, y f)

III.3.4. Función de vulnerabilidad

Recordando que la función de vulnerabilidad muestra el daño de la estructura en función de la intensidad del movimiento sísmico y dado que en el paso anterior mediante el uso del índice de daño de Terán y Jirsa (2005), se obtuvo el daño de la estructura en función de la distorsión, mediante una regresión no lineal, es posible obtener una ecuación que calcule el daño en función de la distorsión, por lo tanto, como ya se cuenta con datos de distorsión en función de la intensidad es posible obtener curvas de vulnerabilidad. En la figura 15 se muestran las curvas de vulnerabilidad para todas las escuelas estudiadas en su condición original: un nivel (Figura 15a y 15d), dos niveles (Figura 15b y 15e) y tres niveles (Figura 15c y 15f).

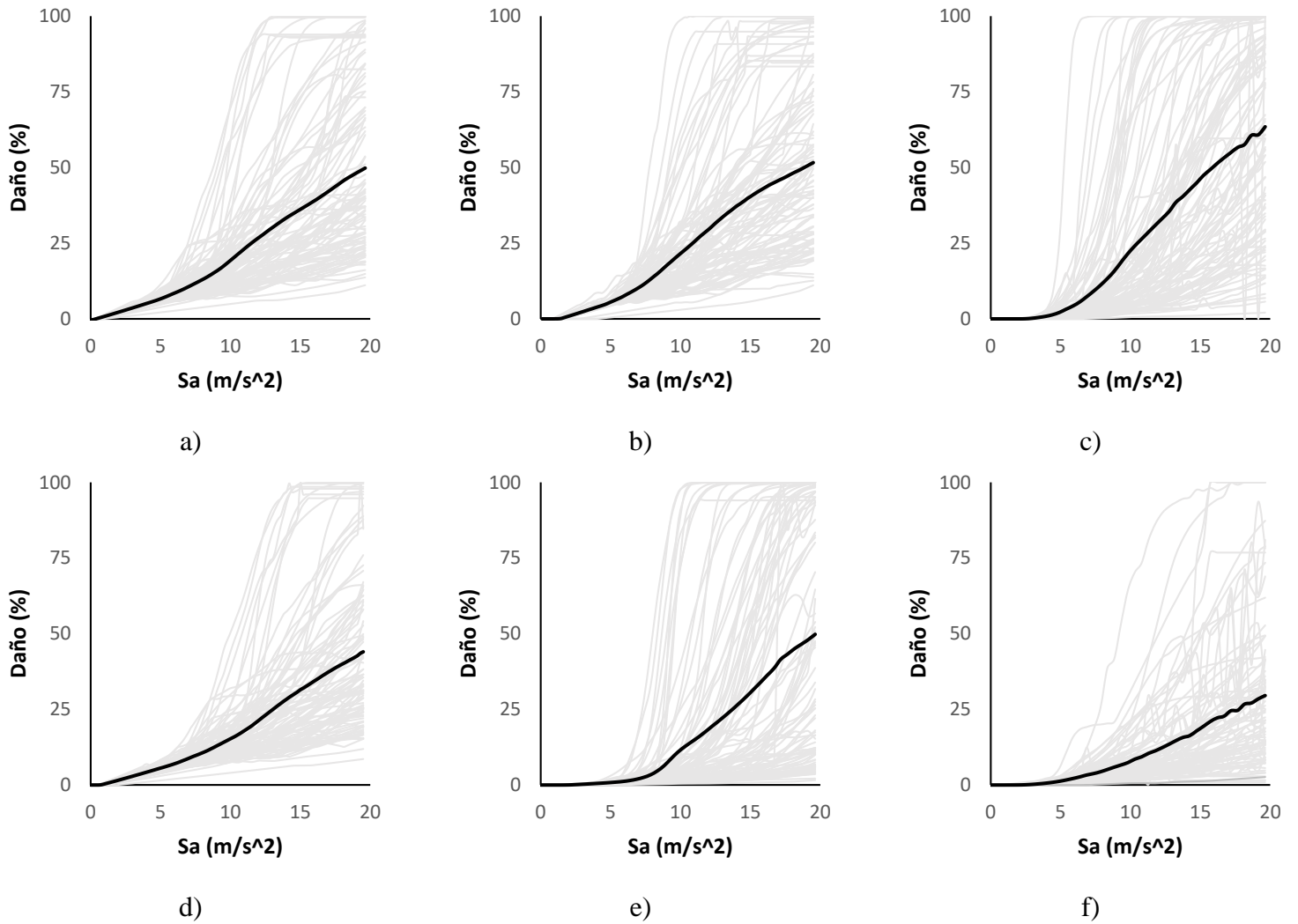


Figura 15. Funciones de vulnerabilidad para las escuelas originales de acuerdo con:
MOC-CFE-1993 (a, b y c) y MOC-CFE-2008 (d, e, y f)

III.4. Cálculo del riesgo sísmico

El riesgo debido a fenómenos naturales comúnmente se expresa en términos de la pérdida anual esperada (PAE), la cual especifica la frecuencia, generalmente anual, de la ocurrencia de las pérdidas (Esteva, 1967, 1976) y la tasa anual de excedencia, $\nu(\beta)$.

En esta tesis, se propone que el análisis de costo/beneficio se base en la PAE. Para el cálculo de este indicador, se consideran dos incertidumbres: una alrededor de la ocurrencia o no ocurrencia de intensidades sísmicas desconocidas y una segunda, que es la incertidumbre del

tamaño de las pérdidas dado que ha ocurrido un evento específico. Esta segunda incertidumbre se emplea para tener en cuenta que eventos idénticos pueden causar diferentes cantidades de pérdidas, lo que da como resultado un rango de valores posibles con diferentes probabilidades. Esta incertidumbre también refleja que estructuras con las mismas características afectadas por un mismo evento podrían tener diferente nivel de pérdida (Niño *et al.*, 2021).

III.4.1. Pérdida Anual Esperada (PAE)

Aceptando que cada tipo de peligro está definido por eventos que son colectivamente exhaustivos y mutuamente excluyentes, la PAE para cualquier peligro puede estimarse con la siguiente expresión (Ecuación 1):

$$PAE = \sum_{i=1}^{EN} E(\beta)P_{rA}(i) \quad (1)$$

donde $E(\beta)$ es la pérdida esperada causada por el i -ésimo evento a los bienes expuestos y $P_{rA}(i)$ es la probabilidad anual de ocurrencia de dicho evento.

La realización del análisis de pérdidas se hizo por medio del programa CAPRA GIS (ERN-LA., 2010). Para lo cual, se utilizó un archivo de amenaza sísmica generado en CRISIS 2007 (Ordaz *et al.* 2015) además de usar las funciones de vulnerabilidad obtenidas anteriormente las cuales deben de contar con valores promedios, así como su respectiva desviación estándar para tomar en cuenta las incertidumbres asociadas a estas funciones. Como parte del proceso de cálculo se tomó un archivo de exposición en formato shape para cada estructura, el cual contiene sus coordenadas de localización, así como el nombre de la función de vulnerabilidad asociada y los valores de los bienes físicos, indispensable para generar el cálculo de pérdidas. Estos valores se establecieron igual a 100 para obtener los resultados como un porcentaje de pérdida. El riesgo se presenta en términos de la pérdida esperada para eventos individuales con el fin de definir la variación en la funcionalidad y con ello, calcular la resiliencia sísmica por eventos (González, 2019). De acuerdo con (González, 2019) los valores de pérdida anual esperada para las 6 escuelas originales se muestran en la Tabla 8.

Tabla 8. Pérdida anual esperada para las escuelas originales

Escuela		
Año	Número de niveles	PAE (%)
1993	1	3.3
	2	1.9
	3	0.2
2008	1	2.6
	2	0.4
	3	0.1

III.5. Estimación de la resiliencia estructural original

Antes de poder calcular la resiliencia es necesario definir las funciones de recuperación las cuales relacionan el nivel de funcionalidad en porcentaje con el tiempo que tarda en recuperar una estructura un nivel de funcionalidad determinado sin necesidad de este sea el 100% tras la ocurrencia de un sismo, lo anterior dependerá del nivel de funcionalidad al cual se quiera llevar la estructura.

En la literatura existen numerosos modelos para representar pérdidas en donde éstas son medidas relativas a una condición previa al sismo. Chang (2004) sugiere una función de recuperación trigonométrica en donde la respuesta social está limitada por una falta de organización o recursos, sin embargo, una vez que pasa este lapso y los recursos comienzan a movilizarse, la rapidez de recuperación se incrementa significativamente (Ecuación 2). Por otro lado, Kafali (2005) muestra un modelo exponencial en el cual se ve una creciente rapidez de recuperación desde los primeros instantes, sin embargo, hacia el final del proceso de recuperación la rapidez disminuye (Ecuación 3).

$$f_{rec}(t) = \frac{a}{2} \left(1 + \cos \left(\pi b \left(\frac{t - t_{0E}}{T_{RE}} \right) \right) \right) + b \quad (2)$$

$$f_{rec}(t) = a \exp\left(-b\left(\frac{t - t_{0E}}{T_{RE}}\right)\right) \quad (3)$$

Donde a y b son constantes calculadas de acuerdo con ajustes de curvas de datos disponibles, t es la variable independiente que marca el paso del tiempo, t_{0E} marca el momento en el que ocurre el sismo y T_{RE} es el tiempo de recuperación.

En este sentido, Cimellaro (2010) propone un modelo lineal relativamente simple, el cual se recomienda usar cuando no se cuenta con datos certeros acerca del contexto socioeconómico en el cual se encuentra el sistema (Ecuación 4).

$$f_{rec}(t) = a\left(\frac{t - t_{0E}}{T_{RE}}\right) + b \quad (4)$$

En este trabajo, la estimación cuantitativa de la resiliencia sísmica se basa en lo planteado por (Cimerallo *et al.*, 2010), quien propone la siguiente ecuación (Ecuación 5)

$$R = \int_{t_{0E}}^{t_{0E} + T_{LC}} Q(t) / T_{LC} dt \quad (5)$$

donde R define la resiliencia como el área normalizada bajo la curva de la función de desempeño o funcionalidad de un sistema; T_{LC} es el tiempo de control, el periodo para el cual se requiere evaluar la resiliencia, usualmente definido por las necesidades sociales (típicamente el tiempo de vida de la estructura) y $Q(t)$ es la función de la curva de desempeño, la cual representa un proceso estocástico no estacionario y que, en este caso, depende de la vulnerabilidad estructural, la función de recuperación y las pérdidas calculadas a través del estudio de riesgo empleando.

La ecuación anterior permite calcular la resiliencia para un evento específico; sin embargo, es necesario tomar en cuenta todos los posibles eventos, así como su probabilidad de

ocurrencia, de tal forma que se esté en posibilidad de tomar decisiones bien informadas. Es por esto que se propone emplear la Ecuación 6, definida por González *et al.*, (2020), para calcular la resiliencia sísmica global de la estructura, considerando tres variables: el tiempo de recuperación, la función de pérdidas y la frecuencia de ocurrencia del evento.

$$RG = \sum_{i=1}^n R * fi \quad (6)$$

donde el término *RG* representa la resiliencia sísmica global ante un conjunto de eventos estocásticos que representan al ambiente sísmico en el cual se localiza la estructura y que podrían afectarla durante su vida útiles, *n* el número de eventos sísmicos evaluados y *fi* representa la frecuencia de ocurrencia del *i*-ésimo evento.

De acuerdo con (González, 2019), en la Tabla 9 se presenta la resiliencia de los 5 eventos sísmicos que arrojaron el mayor número de pérdidas para las escuelas originales.

Tabla 9. Resiliencia para los 5 eventos que arrojaron el mayor número de pérdidas

Año	Número de niveles	Resiliencia por evento sísmico				
1993	1	94.91%	96.29%	96.88%	97.09%	97.25%
	2	95.09%	96.59%	97.20%	97.46%	97.59%
	3	97.88%	98.88%	99.29%	99.46%	99.54%
2008	1	95.81%	97.08%	97.51%	97.73%	97.85%
	2	97.72%	98.58%	98.78%	99.01%	99.04%
	3	99.17%	99.56%	99.69%	99.76%	99.79%

De acuerdo con (González, 2019) se presenta la Tabla 10 con la resiliencia global probabilística para las escuelas originales.

Tabla 10. Resiliencia global probabilística para las escuelas originales

Número de niveles	Año de construcción	Resiliencia global probabilística (RG)
1	1993	82.99%
	2008	86.66%
2	1993	74.11%
	2008	77.53%
3	1993	82.86%
	2008	86.86%

III.6. Definición de medidas de mitigación/reparación

Debido a que Morales (2019) propone el uso de resina epóxica, fibra de carbono, y encamisado de concreto, acero como medidas de intervención, para el desarrollo de esta tesis se retoman dichas medidas de reparación con el fin de hacer uso de tiempos y costo de reparación que presenta Morales (2019) en su investigación. A continuación, se ahonda más en estas medidas de intervención.

Inyección de resina epóxica

El objetivo principal de este tipo de reparación es restaurar la integridad estructural y la resistencia a la penetración de humedad del elemento de concreto. El método de inyección se utiliza típicamente para grietas en superficies horizontales, verticales o “sobre-cabeza” donde los métodos convencionales de reparación no pueden penetrar y distribuir el producto de reparación específico en la grieta. El primer paso consiste en instalar los puertos de entrada los cuales son dispositivos en forma de tubo que permite la transferencia efectiva de la resina epóxica bajo presión en la grieta, en seguida, se instala el sello externo el cual retendrá la resina epóxica conforme se inyecta bajo presión dentro de la grieta, después se comienza con la inyección de la resina cuidando que no rebose la resina por alguno de los puertos, el proceso finaliza hasta que ya no entre más resina epóxica (Keane, 2012).

En el trabajo desarrollado por Engindeniz *et al.*, (2005) se hace una recopilación de las medidas de reparación para uniones viga columna de concreto reforzado de diferentes autores a lo largo de los años, en ese sentido, French *et al.*, (1990) estudiaron la eficacia de reparar una unión viga columna de concreto reforzado con daño moderado debido a un anclaje inadecuado, obtuvieron que aplicando esta medida de reparación se restaura el 85% de la rigidez, resistencia y disipación de energía original.

Fibra de carbono (FRP)

Las cubiertas de fibra de carbono (FRP) se forman adhiriendo fibras continuas de carbono, vidrio, aramida u otra fibra sintética y la lámina o placa de fibra a la cara de la columna con una resina epóxica, viniléster o poliéster. Al igual que el encamisado de acero, la función principal de la fibra de carbono es proporcionar confinamiento al elemento de concreto reforzado existente. El refuerzo de estructuras existentes mediante el uso de fibra de carbono (FRP) ha sido adoptado desde hace más de una década en Japón, siendo la primera aplicación, el revestimiento de columnas a mediados de los 80' s. Hoy en día, el revestimiento mediante fibras de carbono es la técnica más popular para el refuerzo y la rehabilitación de columnas de concreto reforzado (Wu *et al.*, 2006).

De acuerdo con González *et al.*, (2002) estudiaron el efecto del refuerzo adicional a flexión mediante fibra de carbono en las propiedades mecánicas de vigas de concreto reforzado, principalmente en lo que se refiere a resistencia y capacidad de deformación. Realizaron ensayos experimentales en seis vigas simples de concreto reforzado sujetas a carga monotónica y en cuatro subensamblajes viga-columna sujetos a carga cíclica reversible. De acuerdo con los resultados y la comparación de elementos con y sin fibra de carbono, obtuvieron un aumento en la capacidad resistente del 30%; así como un aumento de 4.48 veces la rigidez de post fluencia original.

Encamisado de concreto reforzado

La técnica de encamisado de concreto consiste en aumentar las dimensiones de los elementos principales de la estructura, recubriendo los elementos existentes con concreto armado nuevo. El refuerzo adecuado de concreto reforzado nuevo puede aumentar tanto la resistencia como la ductilidad, y el concreto dañado por un sismo previo puede sustituirse al mismo tiempo. Hay que tener en cuenta que se tenga una correcta adherencia entre el concreto existente y el nuevo. Cabe mencionar que el encamisado en las vigas es mucho más difícil de realizar que el encamisado en las columnas, por lo cual el encamisado puede ser una opción viable cuando se puede obtener una mejora significativa en la resistencia y ductilidad de algunas o todas las columnas sin tener que intervenir las vigas, Coburn y Spence (2003).

Alcocer y Jirsa (1990) estudiaron la respuesta de marcos de concreto reforzado rediseñados mediante encamisado de concreto reforzado. Las probetas que ensayaron se les aplicó una carga cíclica bidireccional. Los autores concluyeron que el encamisado puede cambiar el concepto estructural de viga fuerte-columna débil a columna fuerte-viga débil y los resultados de su experimento arrojaron que al recubrir el elemento más dañado (la columna) la resistencia y la rigidez aumentan un 35 y 45% respectivamente, respecto a los valores obtenidos de la estructura no dañada.

Encamisado de acero

El encamisado de acero se lleva a cabo mediante un esqueleto de perfiles estructurales conectados entre sí con soleras o varillas soldadas, o bien, grandes segmentos de placa unidos con pernos o soldadura a tope, forrando completamente la columna. Se debe poner especial cuidado en el diseño de la unión con las losas, lo cual se puede resolver mediante un collar de ángulos en la corona y base de la columna y encajonando el nodo con placas. Asimismo, el espacio entre la camisa y la columna debe ser rellenado con mortero epóxico o adicionado con fibras expansivas. Finalmente, es recomendable aparte darle al encamisado un recubrimiento de concreto y malla electrosoldada, el cual proporciona cierta protección

contra la corrosión y el fuego y puede constituir un acabado adecuado, sobre todo si la totalidad de la estructura es de concreto, (Armendáriz, 2016).

Corazao y Durrani (1989) reforzaron dos subensamblajes de viga-columna-losa bidireccional, atornillando y uniendo con epóxico placas de acero exteriores en cada cara de la columna, soldando ángulos de acero a las placas y ampliando la región de la junta con un empalme de concreto. La resistencia y la rigidez aumentaron 21 y 34% respectivamente, respecto a los valores iniciales de resistencia y rigidez.

De acuerdo con la información recopilada en la literatura, correspondiente a la reparación de elementos de concreto reforzado a continuación, se resume en la Tabla 11, los incrementos en la resistencia y rigidez, ya que estos valores nos permitirán modificar las características originales (resistencia y rigidez) de las 6 escuelas tipo en estudio.

Tabla 11. Medidas de mitigación/reparación

Medida de reparación	Autores	Resistencia	Rigidez
Resina epóxica	French et al., (1990)	Restaura el 85%	Restaura el 85%
Fibras de carbono	González et al., (2002)	Aumento del 30%	Aumento de 4.48 veces
Encamisado de concreto	Alcocer y Jirsa (1990)	Aumento del 35%	Aumento del 45%
Encamisado de acero	Corazao y Durrani (1989)	Aumento del 21%	Aumento del 34%

III.7. Estimación de costos y tiempos de intervención

Morales (2019) define una metodología para la estimación de los tiempos de recuperación estructural de una escuela tipo de tres niveles de marcos de concreto reforzado debido a daños ocasionados por evento sísmicos. En primer lugar, estableció las características estructurales, seguido de definir la amenaza sísmica que afectará la funcionalidad, por lo cual, estableció

diversos métodos de reparación para recuperar la funcionalidad de la estructura. A continuación, realizó la evaluación de la respuesta estructural mediante análisis no lineales, con el uso de registros sísmicos del 19 de septiembre de 1985 y registros sísmicos sintéticos, usando como semilla el registro del sismo del 25 de abril de 1989 en la formulación propuesta por Niño *et al.*, (2018). El resultado de la evaluación de la respuesta estructural arrojó que el mayor número de rotaciones plásticas se presentaron para el sismo hipotético de M8.2. Por lo cual Morales (2019) propone medidas de reparación basadas en niveles de daño que pueden presentarse durante y después de un sismo, resina epóxica para daño menor, fibra de carbono y encamisado de acero para daño moderado y encamisado de concreto para daño severo. Por último, para la estimación del costo y tiempo de intervención, Morales (2019) propone un análisis de precios unitarios a costo directo, los cuales varían dependiendo del daño presentado, disponibilidad de materiales a emplear, número de cuadrillas y maquinaria utilizada.

Para plantear la periodización de actividades de restauración, se ha utilizado la descripción de daños físicos sobre elementos estructurales presentados en la literatura disponible (FEMA, 2012a y 2012b), en donde los daños se clasifican en cuatro niveles, DS1 representa un estado de daño ligero (e.g. agrietamientos menores), DS2 representa daños moderados (e.g. desprendimiento de concreto), DS3 daños severos (e.g. fractura de refuerzo longitudinal) y DS4 un estado de daño igual o cercano al colapso. Esto sirvió como una guía, a partir de lo cual Morales (2019) obtuvo diagramas de Gantt como el mostrado en la Tabla 12.

Tabla 12. Tiempos de ejecución de actividades de reparación para estructuras de un nivel de daño

Actividad	Días											
	1			2			3					
Limpiar área dañada	█											
Relleno de zonas desprendidas con epóxico comercial		█										
Redondeo de esquinas			█	█								
Eliminar bultos e imperfecciones del área del elemento					█							
Mezcla de componentes de primera resina comercial					█							

DS2	Es necesario realizar reparaciones a los elementos estructurales para mantener los límites de distorsión permisibles para elementos no estructurales y para limitar la degradación de la estabilidad estructural. Las vigas exhiben grietas residuales de anchos mayores a 0.06 pulgadas. Desprendimiento de recubrimiento hasta exponer el refuerzo transversal, pero no el longitudinal. No existe fractura ni pandeo del refuerzo longitudinal.	0.5%
DS3	Se necesitan reparaciones estructurales importantes para recuperar un margen de seguridad en la estabilidad lateral, sin embargo, es posibles que las reparaciones no sean viables desde el punto de vista económico (puede que la estructura presente pérdidas económicas totales). Las vigas exhiben grietas residuales con anchos mayores a 0.06 pulgadas. Desprendimiento de recubrimiento hasta exponer una parte significativa del refuerzo longitudinal. Falla por aplastamiento del concreto de la viga puede ocurrir. Puede ocurrir fractura o pandeo del refuerzo longitudinal, requiriendo reemplazarlo.	1%
DS4	La distorsión residual es tan grande que la estructura se encuentra en riesgo de colapso debido a los daños del sismo.	2%

Tomando los valores de distorsión de entrepiso que presenta FEMA (2012a y 2012b) en sus estados de daño (Tabla 13) es posible obtener la pseudoaceleración espectral (S_a) entrando a la gráfica distorsión vs. pseudoaceleración espectral (Figura 16), ya que se conoce la S_a asociada a cada estado de daño, se puede entrar a la gráfica curva de vulnerabilidad (Figura 17) con el valor de aceleración y así obtener el daño esperado o pérdida, que a su vez está asociado a cada distorsión de entrepiso. Es importante mencionar que, para el desarrollo de esta tesis, se asume el daño y las pérdidas como iguales. A continuación, se presentan las curvas distorsión vs. S_a (Figura 16) y daño esperado vs. S_a (Figura 17) para las escuelas de un nivel de acuerdo con: MOC-CFE-1993 y MOC-CFE-2008. Realizando este

procedimiento para las escuelas de dos y tres niveles, se obtienen las pérdidas asociadas a las distorsiones de cada estado de daño.

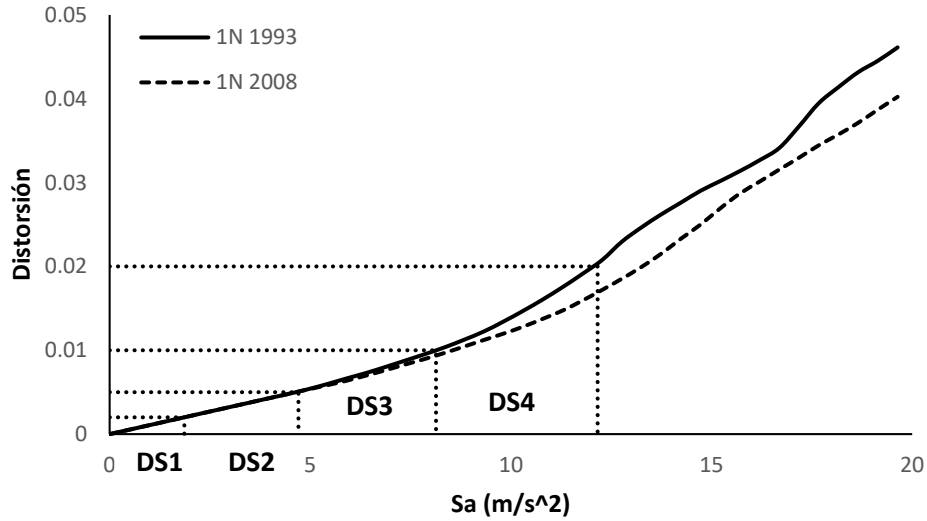


Figura 16. Gráfica distorsión vs. pseudoaceleración para escuelas de un nivel conforme a: MOC-CFE-1993 y MOC-CFE-2008

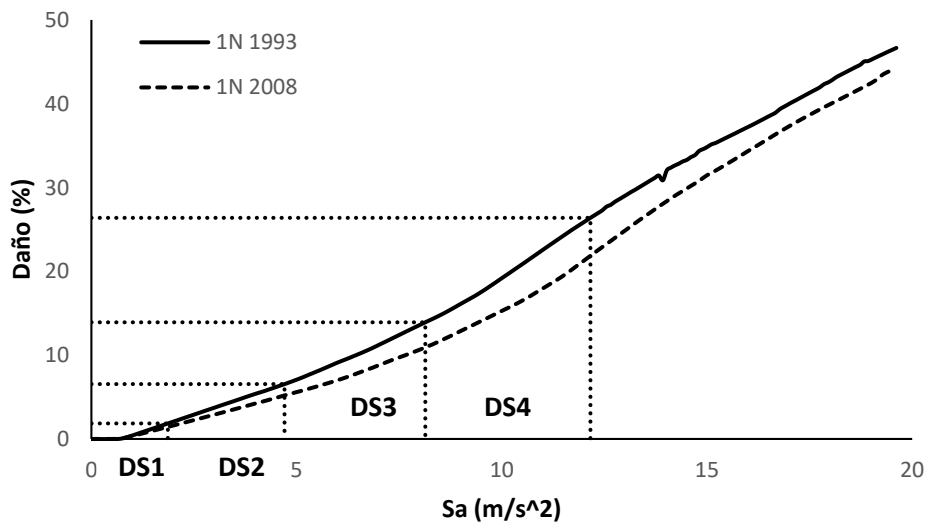


Figura 17. Gráfica daño esperado vs. pseudoaceleración para escuelas de un nivel conforme a: MOC-CFE-1993 y MOC-CFE-2008

En la tabla 14 se muestran los valores de pérdidas (EP) asociados a cada distorsión de entrepiso para cada estado de daño en las escuelas originales.

Tabla 14. Pérdidas asociadas a cada estado de daño para cada escuela

Estado de daño	Distorsión (%)	Escuela 1 nivel		Escuela 2 niveles		Escuela 3 niveles	
		Sa (m/s ²)	EP (%)	Sa (m/s ²)	EP (%)	Sa (m/s ²)	EP (%)
DS1	0.2	1.87	1.87	1.86	0.69	2.88	0.04
DS2	0.5	4.67	6.51	4.60	4.76	5.24	2.46
DS3	1	8.20	14.06	7.46	11.69	7.81	9.34
DS4	2	12.16	26.41	10.54	24	10.52	25.41

En la Tabla 15 y 16 se muestran los tiempos de recuperación y los costos de reparación para una escuela tipo de tres niveles de acuerdo con Morales (2019), estos valores fueron divididos para obtener los tiempos y costos de una escuela de 1 y 2 niveles de forma simplificada. Más adelante en el cálculo de la resiliencia y la relación costo-beneficio se usarán estos datos para poder determinar qué medida de reparación es la más conveniente.

Tabla 15. Tiempos de recuperación

Número de niveles	Tiempos de recuperación (días)			
	Encamisado acero	Encamisado concreto	Fibra de carbono	Resina epóxica
1	5.29	20.56	1.83	0.57
2	7.93	30.85	2.74	0.86
3	15.86	61.69	5.49	1.72

Tabla 16. Costos de reparación promedio

Número de niveles	Costo de reparación (pesos)			
	Encamisado	Encamisado	Fibra de	Resina
	acero	concreto	carbono	epóxica
1	61,521	103,057	11,436	631
2	92,281	154,586	17,153	947
3	184,562	309,172	34,306	1,893

III.8. Definición de la vulnerabilidad de estructuras intervenidas

Después del sismo de Michoacán de 1985 y del de Morelos de 2017, se demolieron diversas estructuras debido a los daños sufridos o, en su caso, se repararon y reforzaron para cumplir con los nuevos estándares establecidos en los reglamentos de construcción vigentes. Por esta razón, se consideró que las escuelas ya existentes sufrieron un nivel de daño y fueron reparadas para seguir en operación, por lo que se consideraron cuatro medidas de reparación: 1) encamisado de acero, 2) encamisado de concreto, 3) fibras de carbono y 4) resinas epóxicas. A partir de esta reparación, se observó que las estructuras tenían resistencia y rigidez diferente y suficiente para cumplir con los requisitos establecidos por el reglamento de construcción vigente. Con esta medida, los períodos de vibración cambiaron significativamente en comparación con los originales (Tabla 17).

Tabla 17. Periodos de vibrar de las diferentes estructuras estudiadas

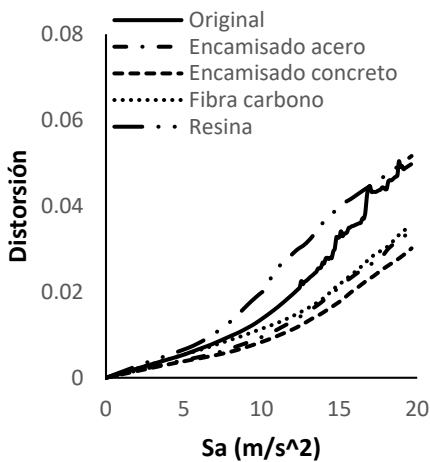
Año	Número de niveles	Periodo fundamental (s)				
		Original	Encamisado	Encamisado	Fibra de	Resina
			acero	concreto	carbono	
1993	1	0.390	0.340	0.327	0.380	0.426
	2	0.548	0.346	0.333	0.401	0.434
	3	0.480	0.423	0.407	0.489	0.530
2008	1	0.390	0.340	0.327	0.380	0.426
	2	0.370	0.325	0.312	0.376	0.408

3	0.520	0.452	0.435	0.523	0.567
---	-------	-------	-------	-------	-------

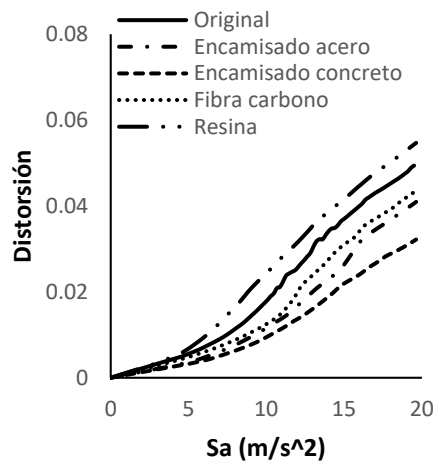
A cada una de las 6 escuelas originales, propuestas por González (2019), se les aplicó las 4 medidas de reparación mencionadas con anterioridad, por lo cual se obtuvieron 24 escuelas, estas serán los casos de estudio. A dichas escuelas se les modificó las características iniciales de resistencia y rigidez, de acuerdo con la Tabla 11 (Medidas de mitigación/reparación), para después realizarles análisis dinámicos incrementales (IDA, por sus siglas en inglés) con la ayuda del programa Opensees. Los resultados obtenidos de estos análisis se muestran en las Figuras 18 a 21.

Posteriormente se procesó la información correspondiente a los análisis IDA, de los que se obtienen curvas de distorsión de entrepiso vs. pseudoaceleración espectral (Figura 18), estas son de utilidad para determinar los estados daño, por otro lado, las curvas de desplazamiento y cortante basal vs. pseudoaceleración espectral (Figura 19 y 20) servirán para construir la curva de capacidad dinámica (Figura 21).

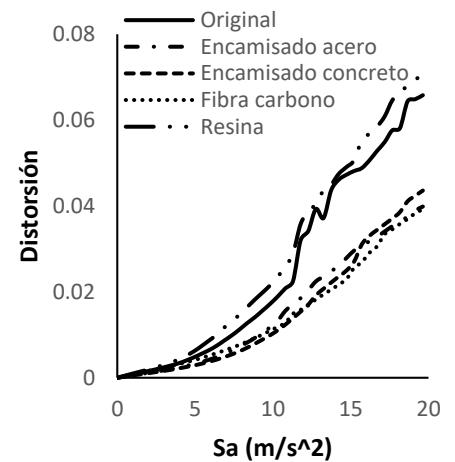
La Figura 18 muestra los resultados en términos de distorsiones de entrepiso contra aceleración espectral para las diferentes escuelas, de acuerdo con las demandas sísmicas de diseño de MOC-CFE-1993 y MOC-CFE-2008: un nivel (Figura 18a y 18d), dos niveles (Figura 18b y 18e) y tres niveles (Figura 18c y 18f).



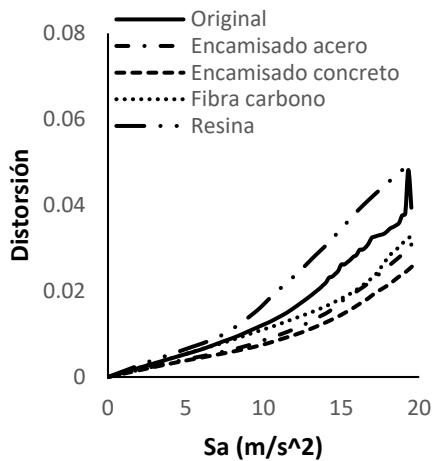
a)



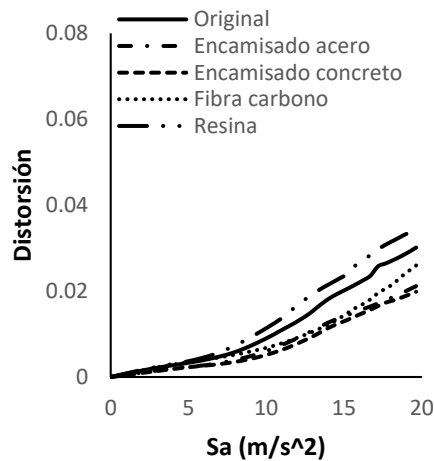
b)



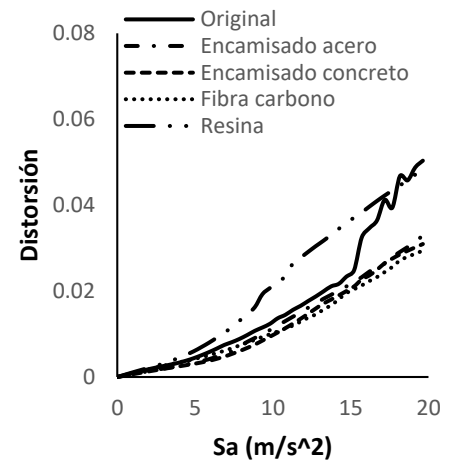
c)



d)



e)



f)

Figura 18. Curvas IDA de los edificios escolares diseñadas conforme a: MOC-CFE-1993 (a, b y c) y MOC-CFE-2008 (d, e, y f)

Como se observa en las curvas distorsión vs. pseudoaceleración espectral (Figura 18) las escuelas de uno, dos y tres niveles diseñadas con el MOC-CFE-2008 (CFE, 2008) presentan menores distorsiones en comparación con las escuelas diseñadas con MOC-CFE-1993 (CFE, 1993), además se observa que el encamisado de acero, concreto y las fibras de carbono presentan una reducción en las distorsiones a excepción de la resina epóxica, ya que es la única medida de reparación que no presentó una reducción en las distorsiones, debido a que esta medida solo restaura un porcentaje de la capacidad resistente original, por otro lado, es importante mencionar que la medida de reparación de encamisado de concreto es la medida que mayor impacto mostró en la reducción de las distorsiones.

La Figura 19 muestra los resultados en términos de desplazamientos contra aceleración espectral para las diferentes escuelas, de acuerdo con las demandas sísmicas de diseño de MOC-CFE-1993 y MOC-CFE-2008: un nivel (Figura 19a y 19d), dos niveles (Figura 19b y 19e) y tres niveles (Figura 19c y 19f).

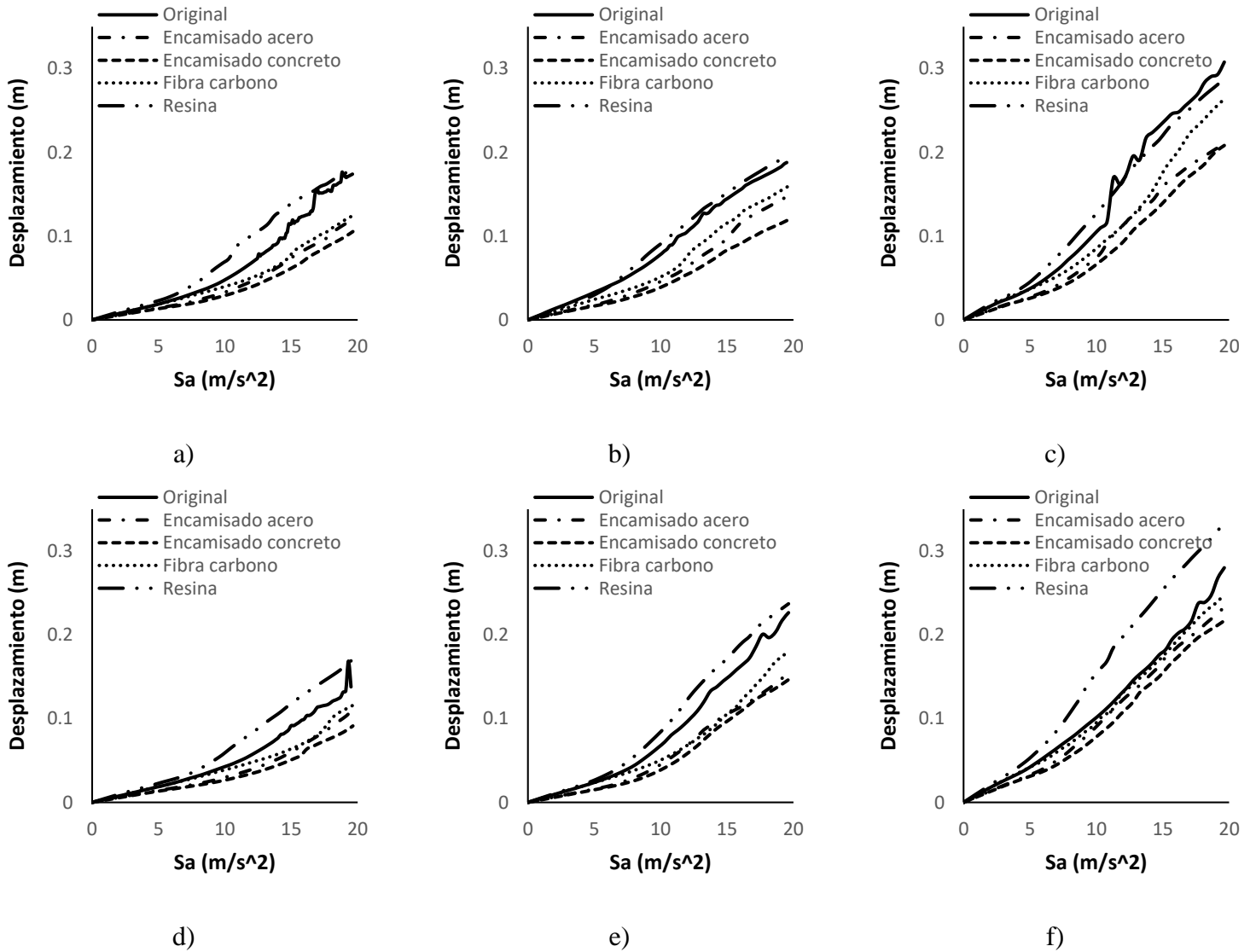


Figura 19. Curvas IDA de los edificios escolares diseñadas conforme a: MOC-CFE-1993 (a, b y c) y MOC-CFE-2008 (d, e, y f)

Como se observa en las curvas desplazamiento vs. pseudoaceleración espectral (Figura 19) las escuelas de uno, dos y tres niveles diseñadas con el MOC-CFE-2008 (CFE, 2008) presentan en general menores desplazamientos en comparación con las escuelas diseñadas con MOC-CFE-1993 (CFE, 1993), además se observa que el encamisado de acero, concreto y las fibras de carbono presentan una reducción en los desplazamientos a excepción de la resina epóxica ya que es la única medida de reparación que no presenta una reducción en los desplazamientos, debido a que esta medida solo restaura un porcentaje de la capacidad

resistente original, por otro lado, es importante mencionar que la medida de reparación de encamisado de concreto es la medida que mayor impacto mostró en la reducción de los desplazamientos.

La Figura 20 muestra los resultados en términos de cortante basal contra aceleración espectral para las diferentes escuelas, de acuerdo con las demandas sísmicas de diseño de MOC-CFE-1993 y MOC-CFE-2008: un nivel (Figura 20a y 20d), dos niveles (Figura 20b y 20e) y tres niveles (Figura 20c y 20f).

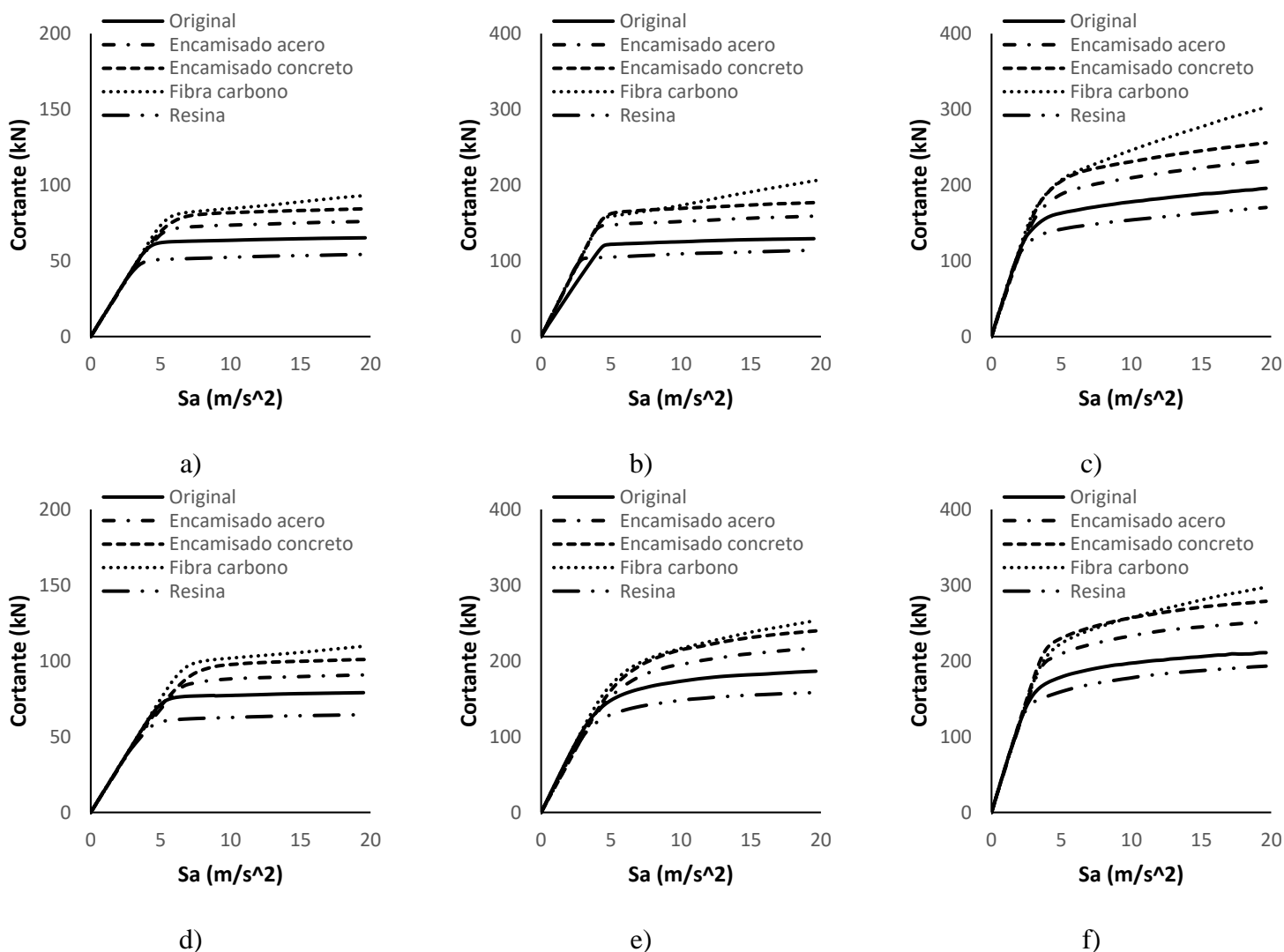
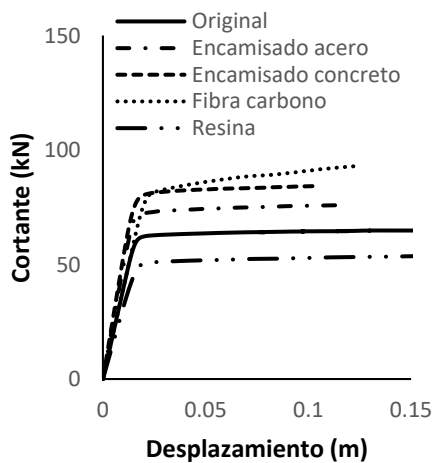


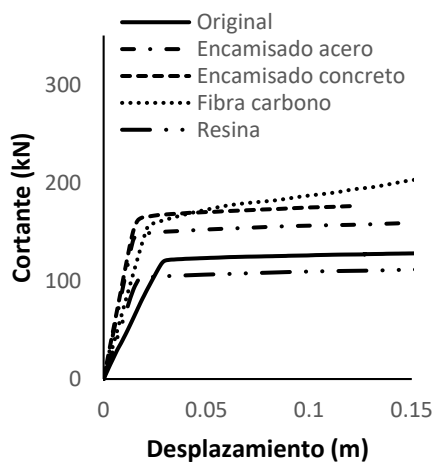
Figura 20. Curvas IDA de los edificios escolares diseñadas conforme a: MOC-CFE-1993 (a, b y c) y MOC-CFE-2008 (d, e, y f)

Como se observa en las curvas cortante vs. pseudoaceleración espectral (Figura 20) las escuelas de uno, dos y tres niveles diseñadas con el MOC-CFE-2008, (CFE, 2008) presentan mayor capacidad resistente en comparación con las escuelas diseñadas con el MOC-CFE-1993, (CFE, 1993), además se observa que el encamisado de acero, concreto y las fibras de carbono presentan un aumento en la capacidad resistente de las escuelas a excepción de la resina epóxica ya que es la única medida de reparación que no presenta un aumento en la capacidad resistente, debido a que esta medida solo restaura un porcentaje de la capacidad resistente original, por otro lado, es importante mencionar que se observa que las escuelas reparadas con fibras de carbono tienen el mayor aumento en la capacidad de rigidez de post-fluencia comparada con dicha rigidez de las otras medidas de reparación, esto se debe principalmente a la gran rigidez que aporta dichas fibras.

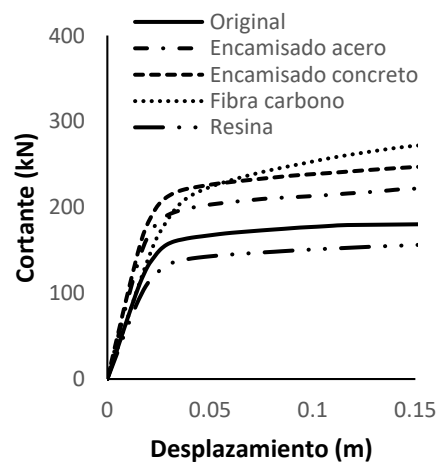
La Figura 21 presenta las curvas de capacidad dinámica de las diferentes estructuras estudiadas: un nivel (Figura 21a y 21d), dos niveles (Figura 21b y 21e) y tres niveles (Figura 21c y 21f)



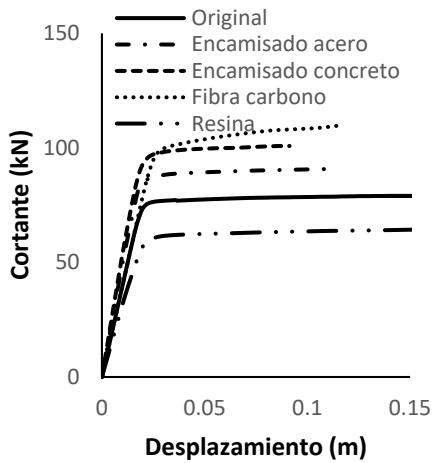
a)



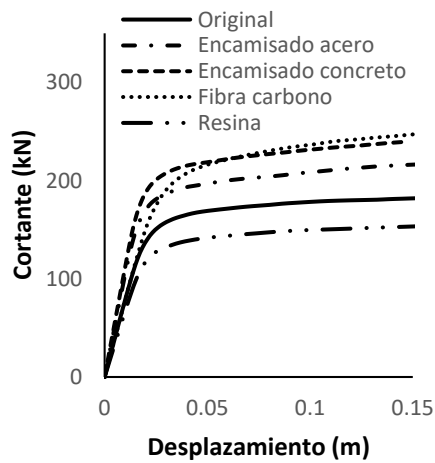
b)



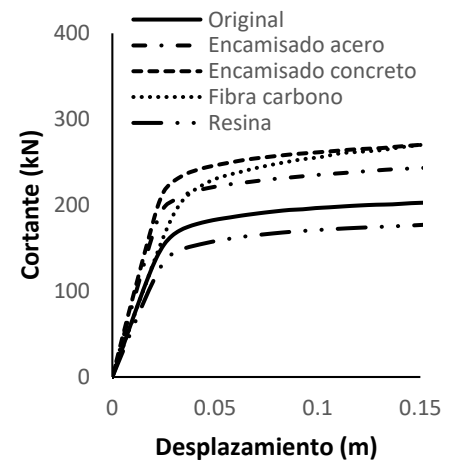
c)



d)



e)



f)

Figura 21. Curvas de capacidad dinámica de los edificios escolares diseñadas de acuerdo con: MOC-CFE-1993 (a, b y c) y MOC-CFE-2008 (d, e, y f)

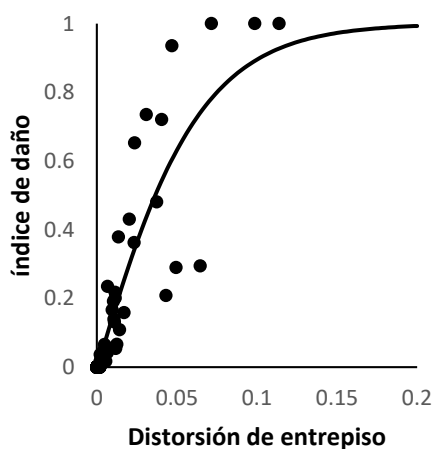
Como se observa en las curvas de capacidad dinámica (Figura 21) las escuelas de uno, dos y tres niveles diseñadas con el MOC-CFE-2008, (CFE, 2008) presentan mayor capacidad resistente en comparación con las escuelas diseñadas con MOC-CFE-1993, (CFE, 1993), por otro lado, es importante mencionar que se observa que las escuelas reparadas con fibras de carbono presentan la mayor rigidez de post-fluencia comparada con dicha rigidez de las otras medidas de reparación, esto se debe principalmente a la gran rigidez que aporta dichas fibras, además la medida de resina epóxica, fue la única medida de reparación que tuvo una reducción en la capacidad resistente debido a que esta medida solo restaura un porcentaje de la capacidad resistente original.

De la curva de capacidad dinámica se obtuvieron las características estructurales necesarias (rigidez elástica, rigidez de post-fluencia y resistencia a la fluencia) para modelar un sistema de un grado de libertad equivalente que se usó para la estimación de los índices de daño (González, 2019). En la Tabla 18 se muestran las características estructurales de resistencia y rigidez de post-fluencia de las 24 escuelas, para poder estimar los índices de daño y posteriormente obtener la curva de vulnerabilidad.

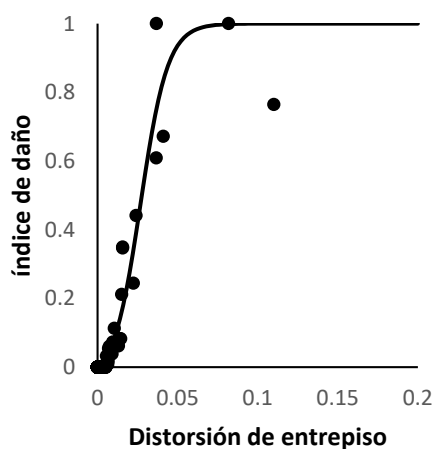
Tabla 18. Valores de cortante de fluencia y rigidez de post-fluencia para todas las escuelas

Cortante de fluencia (kgf) / Relación rigidez de post fluencia (%)					
Año	Número de niveles	Encamisado acero	Encamisado concreto	Fibra de carbono	Resina
1993	1	7443/0.5705	8255/0.6931	8436/2.5201	5208/0.6016
	2	15279/0.6917	16971/0.8656	16497/4.2889	10688/0.7944
	3	19949/2.0552	22570/1.8602	23039/4.5792	14253/1.8257
2008	1	8928/0.7022	9884/1.0009	10312/2.4102	6282/0.6099
	2	19302/1.9213	21373/2.0918	21562/3.4523	14341/1.2035
	3	22594/1.6623	25047/1.8823	23856/4.2887	16595/1.7110

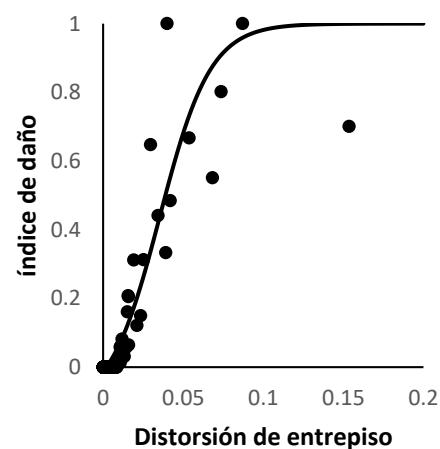
A continuación, se muestran los índices de daño de acuerdo al modelo de Teran y Jirsa, IDTJ, y las gráficas de índice de daño vs. distorsión de entrepiso, para todas las 24 escuelas intervenidas (Figura 22 a 25). En la Figura 22 se muestran las gráficas índices de daño vs. distorsión de entrepiso para las escuelas intervenidas con encamisado de acero, conforme a la siguiente clasificación: un nivel (Figura 22a y 22d), dos niveles (Figura 22b y 22e) y tres niveles (Figura 22c y 22f).



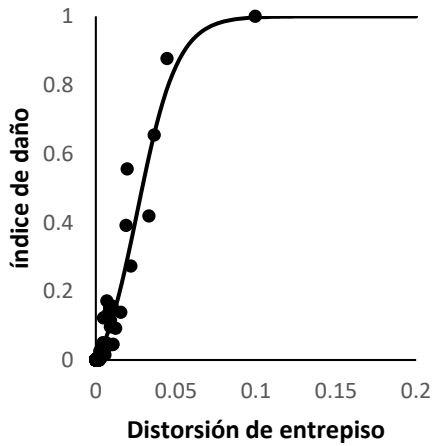
a)



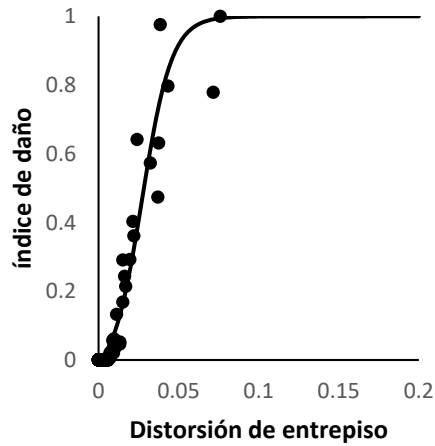
b)



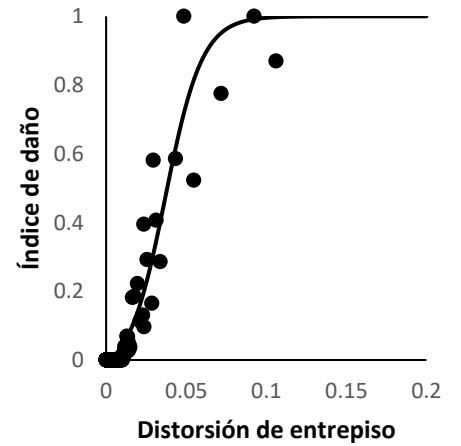
c)



d)



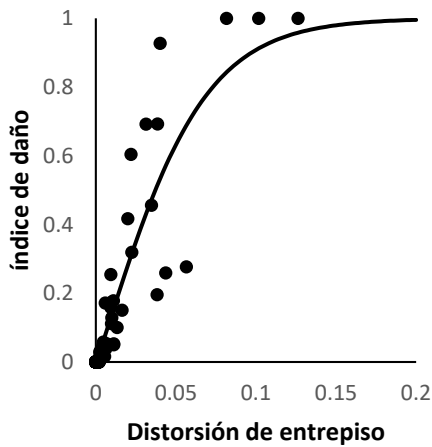
e)



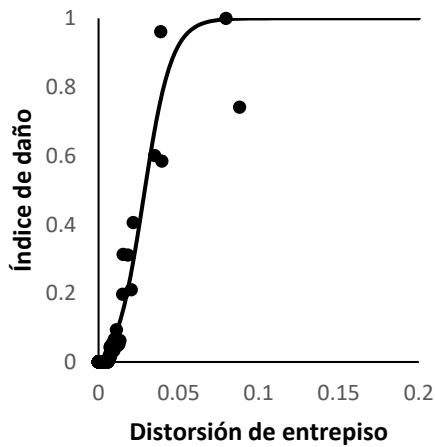
f)

Figura 22. Gráficas índices de daño vs. distorsión de entrepiso para las escuelas intervenidas con encamisado de acero, de acuerdo con: MOC-CFE-1993 (a, b y c) y MOC-CFE-2008 (d, e, y f)

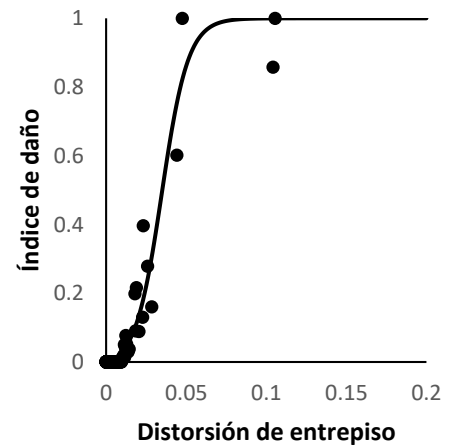
En la Figura 23 se muestran las gráficas índices de daño vs. distorsión de entrepiso para las escuelas intervenidas con encamisado de concreto, conforme a la siguiente clasificación: un nivel (Figura 23a y 23d), dos niveles (Figura 23b y 23e) y tres niveles (Figura 23c y 23f).



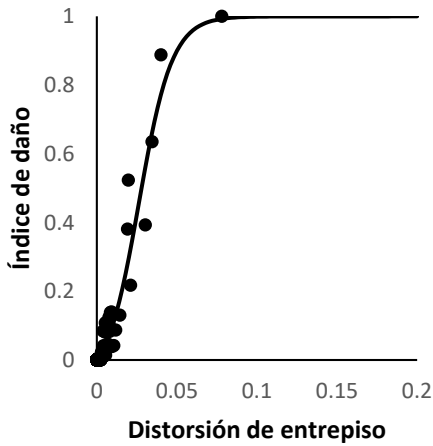
a)



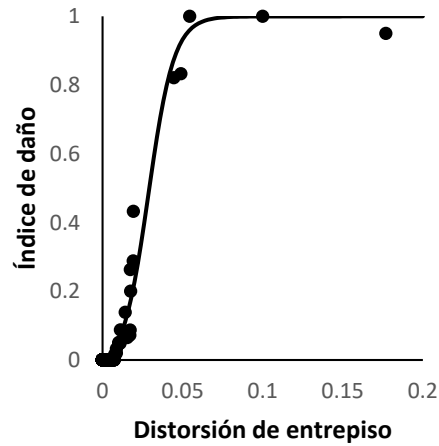
b)



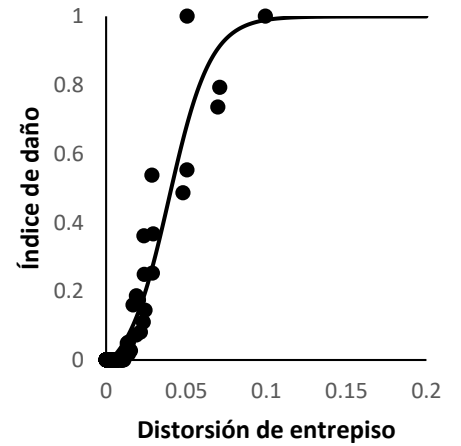
c)



d)



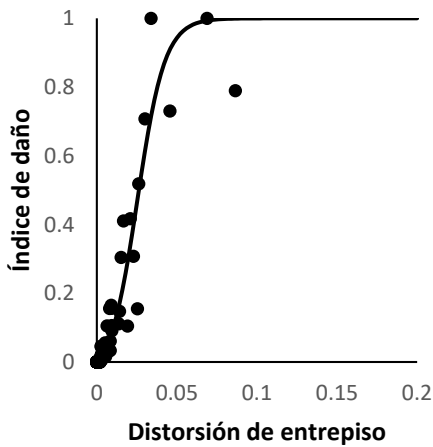
e)



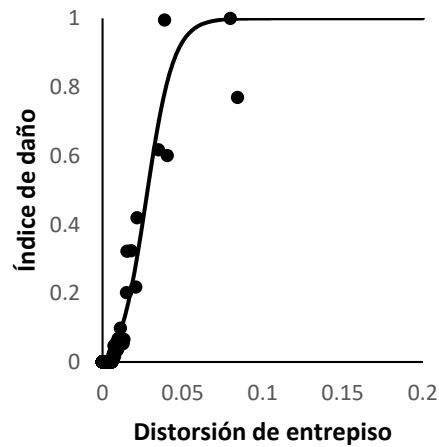
f)

Figura 23. Gráficas índices de dano vs. distorsión de entrepiso para las escuelas intervenidas con encamisado de concreto, de acuerdo con: MOC-CFE-1993 (a, b y c) y MOC-CFE-2008 (d, e, y f)

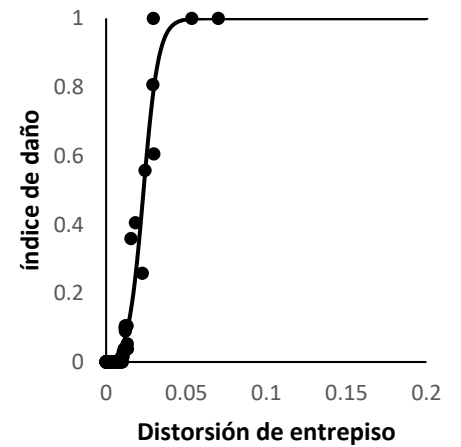
En la Figura 24 se muestran las gráficas índices de dano vs. distorsión de entrepiso para las escuelas intervenidas con fibras de carbono, conforme a la siguiente clasificación: un nivel (Figura 24a y 24d), dos niveles (Figura 24b y 24e) y tres niveles (Figura 24c y 24f).



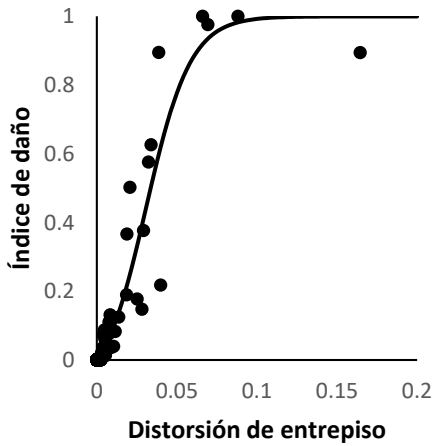
a)



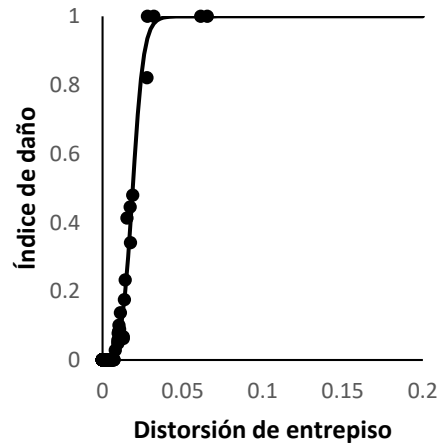
b)



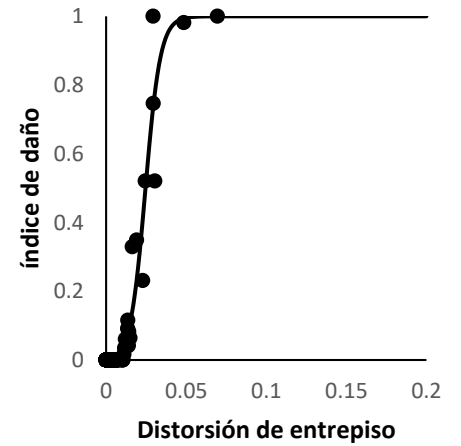
c)



d)



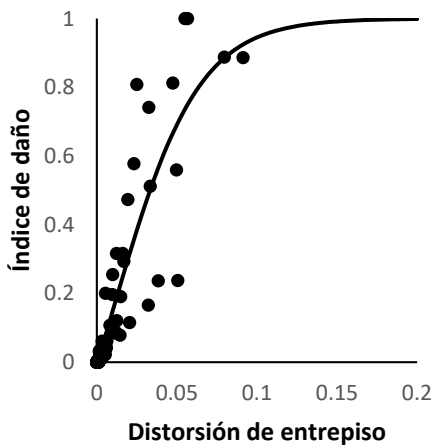
e)



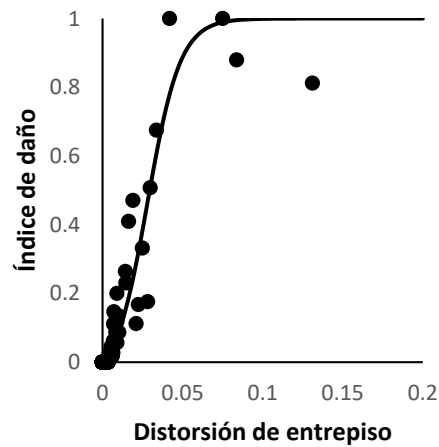
f)

Figura 24. Gráficas índices de daño vs. distorsión de entrepiso para las escuelas intervenidas con fibras de carbono, de acuerdo con: MOC-CFE-1993 (a, b y c) y MOC-CFE-2008 (d, e, y f)

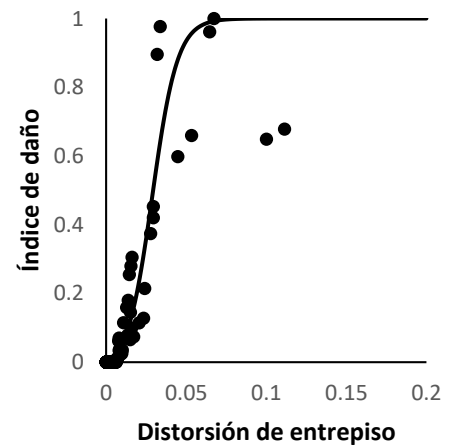
En la Figura 25 se muestran las gráficas índices de daño vs. distorsión de entrepiso para las escuelas intervenidas con resina epóxica, conforme a la siguiente clasificación: un nivel (Figura 25a y 25d), dos niveles (Figura 25b y 25e) y tres niveles (Figura 25c y 25f).



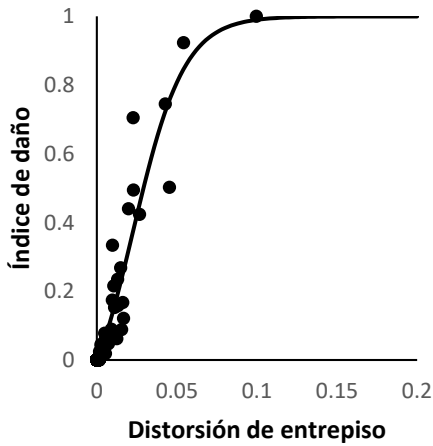
a)



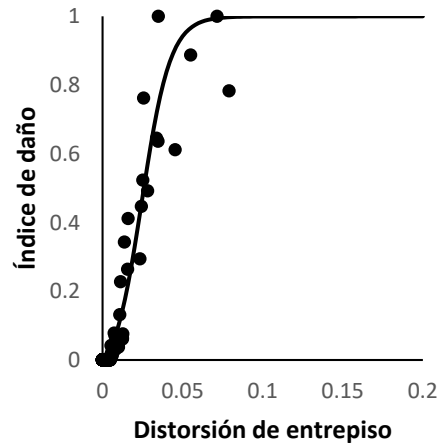
b)



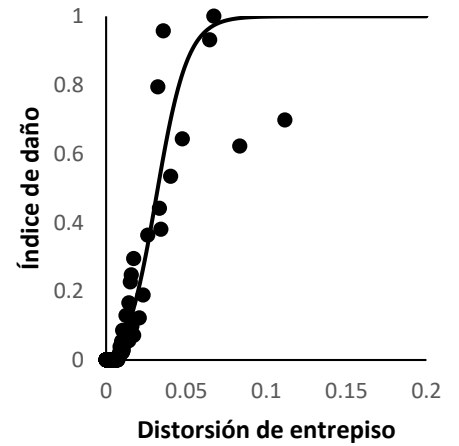
c)



d)



e)



f)

Figura 25. Gráficas índices de dano vs. distorsión de entrepiso para las escuelas intervenidas con resina epóxica, de acuerdo con: MOC-CFE-1993 (a, b y c) y MOC-CFE-2008 (d, e, y f)

Ya que se obtuvo el índice de dano en función de la distorsión de entrepiso mediante una ecuación de ajuste para cada escuela intervenida, es posible relacionar el dano esperado en las escuelas intervenidas con la distorsión de entrepiso, ya que se cuenta con valores de distorsión de entrepiso de los análisis IDA previamente calculados.

En la Figura 26 se presentan las curvas de vulnerabilidad de las diferentes estructuras estudiadas mostrando el dano esperado para escuelas de: un nivel (Figura 26a y 26d), dos niveles (Figura 26b y 26e) y tres niveles (Figura 26c y 26f).

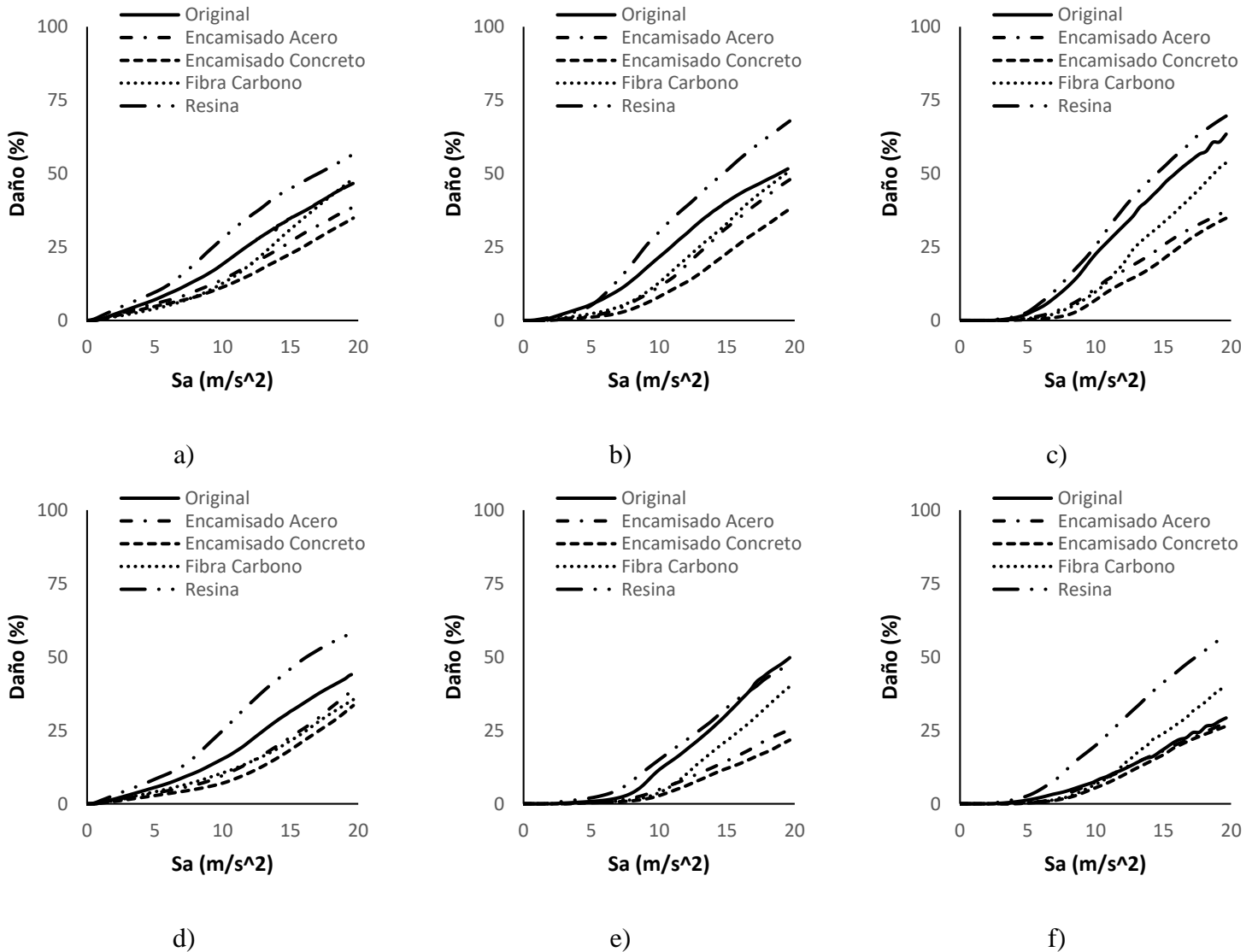


Figura 26. Curvas de vulnerabilidad para cada una de las escuelas diseñadas de acuerdo con: MOC-CFE-1993 (a, b y c) y MOC-CFE-2008 (d, e, y f)

De las figuras anteriores tomando como referencia las escuelas originales, se observa que en las escuelas reparadas se incrementan las distorsiones y desplazamientos a mayor número de niveles debido a que el incremento en la rigidez no es proporcional al incremento en las fuerzas sísmicas. Se observan mayores valores de cortante basal a mayor número de niveles, así como en escuelas más recientes, lo que significa mayor capacidad resistente lo cual es lo esperado de acuerdo con el diseño estructural. Las escuelas más recientes son menos vulnerables debido a la actualización en las normas de diseño sísmico, esto quiere decir que

se observan menores pérdidas para una misma intensidad sísmica. Las escuelas con menor número de niveles al encontrarse en la ciudad de Puebla el periodo del suelo afecta a estructuras con un periodo más corto por lo cual se presentan mayores daños en intensidades bajas en comparación a las escuelas de mayor número de niveles, esto cambia para intensidades más altas donde se presentan mayores daños en escuelas de mayor número de niveles. Lo anterior se puede apreciar en el comportamiento de las curvas de vulnerabilidad.

Una vez que las 6 escuelas originales se repararon con las 4 medidas de reparación, se observa que las escuelas reparadas con resina epóxica pierden capacidad resistente además de ser las más vulnerables, debido a que solo se restaura el 85% de la capacidad resistente original que tenían las escuelas. El encamisado de concreto presenta los valores de daño más bajos, por lo cual resulta en las escuelas menos vulnerables, resultado lógico ya que esta medida de reparación es la que mayor aumento tiene en su resistencia y rigidez después de la reparación. El encamisado de acero presenta los segundos valores más bajos de daño lo cual hace de las escuelas menos vulnerables, pero en menor proporción con el encamisado de concreto. Por último, la fibra de carbono presenta la mayor capacidad resistente en el rango inelástico en comparación a las demás medidas de reparación, esto debido a que su incremento en la rigidez de post fluencia fue mayor. En cuanto a la vulnerabilidad la fibra de carbono tuvo un comportamiento muy parecido al encamisado de acero con excepción de intensidades altas.

III.9. Estimación del riesgo de estructuras intervenidas

Como ya se mencionó anteriormente, el análisis de pérdidas se hizo por medio del programa CAPRA GIS (ERN-LA., 2010) usando un archivo de amenaza sísmica generado en CRISIS 2007 (Ordaz *et al.* 2015). En esta tesis, el análisis C/B se basa en la pérdida anual esperada (PAE), por lo cual, el riesgo sísmico físico de cada estructura (original y reparada) se evaluó mediante la conjunción del peligro con la vulnerabilidad de los elementos expuestos. Los valores de la pérdida anual esperada debido al ambiente sísmico en el cual se encuentran las estructuras se muestran en la Tabla 19. Como se puede observar las estructuras más recientes presentan menores valores de pérdida.

Tabla 19. Pérdida anual esperada como porcentaje del costo de reconstrucción de las escuelas considerando las diferentes medidas de reparación

Año	Número de niveles	Pérdida anual esperada (%)				
		Original	Encamisado acero	Encamisado concreto	Fibras de carbono	Resina epóxica
1993	1	3.3%	3.46%	2.72%	5.77%	16.36%
	2	1.9%	0.66%	0.43%	0.95%	2.90%
	3	0.2%	0.06%	0.03%	0.07%	0.28%
2008	1	2.6%	2.25%	1.66%	3.38%	10.85%
	2	0.4%	0.18%	0.12%	0.21%	0.86%
	3	0.1%	0.03%	0.02%	0.05%	0.25%

En lugar de usar la pérdida anual esperada (PAE) para el cálculo de la resiliencia, el autor de esta tesis propone usar los 5 eventos sísmicos que generaron las mayores pérdidas, ya que estos valores de pérdida por evento son mayores a la PAE y, de esta forma, tiene un mayor impacto en los cálculos de la resiliencia, de otra forma usando la PAE los valores de resiliencia serían muy cercanos al 100%, por lo tanto no se apreciaría el impacto de las medidas de reparación en el cálculo de la relación costo-beneficio.

En la Tabla 20 se muestra el promedio de los 5 eventos que generaron las máximas pérdidas, cabe mencionar que estos eventos no son necesariamente los escenarios críticos, ya que no se consideró la frecuencia de ocurrencia, solo se consideraron los eventos que generaron las máximas pérdidas.

Tabla 20. Pérdida promedio como porcentaje del costo de reconstrucción de las estructuras considerando las diferentes medidas de reparación

Año	Número de niveles	Pérdida promedio (%)			
		Encamisado acero	Encamisado concreto	Fibras de carbono	Resina epóxica
1993	1	5.67%	4.70%	4.60%	10.22%
	2	3.14%	2.21%	3.79%	7.29%
	3	0.87%	0.47%	0.81%	2.53%
2008	1	3.85%	2.93%	4.09%	9.16%
	2	1.22%	0.91%	1.56%	3.78%
	3	0.55%	0.40%	0.53%	2.05%

Como se puede observar en la Tabla 19 la pérdida anual esperada para las escuelas de un nivel en su condición original diseñada conforme a MOC-CFE-1993, MOC-CFE-2008 (CFE, 1993; CFE, 2008), se observa que dichas escuelas rebasan el límite de daño ligero DS1 (Tabla 14) por lo cual se espera que tengan daño moderado razón por la cual se repararon, para las escuelas de dos y tres niveles se observa que se encuentra dentro del estado de daño DS1 no obstante se repararon. La mayoría de las pérdidas se concentran en escuelas de un nivel (Tabla 20), estas al encontrarse en la ciudad de Puebla y tener un periodo corto cercano al del suelo provoca lo anterior.

III.10. Estimación de la resiliencia de estructuras intervenidas

Como se mencionó, se consideró el promedio de los 5 eventos sísmicos que generaron las máximas pérdidas para el cálculo de la resiliencia. También es importante mencionar que la recuperación se tomó como valores fijos en lugar de utilizar una función de recuperación, estos valores utilizados se retomaron de Morales (2019) (Tabla 15). Con el fin de comparar los resultados obtenidos, se presenta la (Tabla 21) con los valores de la resiliencia promedio de los 5 eventos que generaron las máximas pérdidas.

Tabla 21. Resiliencia estructural promedio para las diferentes medidas de reparación

Año de construcción	Número de niveles	Resiliencia (%)				
		Original	Encamisado acero	Encamisado concreto	Fibras de carbono	Resina epóxica
1993	1	96.48	97.17	97.65	97.70	94.89
	2	96.82	98.43	98.90	98.10	96.35
	3	99.01	99.57	99.76	99.59	98.74
2008	1	97.20	98.08	98.53	97.75	95.42
	2	98.63	99.39	99.55	99.22	98.11
	3	99.60	99.73	99.80	99.73	98.97

Como era de esperarse se observa un aumento en la resiliencia para los 24 casos de estudio comparándolos con su condición original, con excepción de la resina epóxica, donde se observa una disminución en la resiliencia, debido a que después de repararse solo se logró restaurar el 85% de su capacidad original. También se observa que el encamisado de concreto es la medida de reparación que más incrementa el valor de la resiliencia original, lo cual corresponde a la medida de reparación que más aumento tiene en la resistencia y rigidez original.

III.11. Análisis costo – beneficio

La factibilidad económica de un proyecto (por ejemplo, reparación de una escuela dañada) requiere de una evaluación la cual se puede realizar usando diferentes indicadores, tales como el valor presente neto (VPN), la tasa interna de retorno (TIR) o la relación costo-beneficio (C/B). El valor presente neto (VPN) toma en cuenta el valor del dinero a través del tiempo en la determinación de los flujos de efectivo netos del proyecto, es decir se determina el valor presente de las entradas de dinero y se compara con el valor presente de las salidas de dinero, si dicha comparación es mayor se dice que el proyecto es rentable. La tasa interna de retorno (TIR) de un proyecto equivale a la tasa de interés que dicho proyecto le va a dar a la persona que invirtió ahí su dinero. La relación costo-beneficio consiste en dividir todos los beneficios del proyecto sobre los costos del mismo, dicho cociente debería tener un valor mayor a uno.

Por lo cual, se opta por usar la relación C/B debido a que esta relación toma en cuenta los beneficios de evitar futuras pérdidas en términos económicos aplicando medidas de mitigación/repación a las escuelas.

La relación C/B, Ecuación 7 (debido al reforzamiento o reconstrucción) se calcula siguiendo los diferentes trabajos realizados por Smyth *et al.* (2004), Kappos y Dimitrakopoulos (2008) y más recientemente Valcárcel *et al.* (2013), Jaimes y Niño (2017):

$$C/B = \frac{R_R - R_U}{C_R} \quad (7)$$

Donde, para este trabajo, R_U es la resiliencia esperada debido a todos los sismos futuros para la condición actual de la estructura; R_R es la resiliencia esperada debido a todos los sismos futuros para los casos, y C_R es el costo de reparación.

Para el cálculo de la relación C/B se usaron los valores de la resiliencia promedio de los 5 eventos sísmicos que generaron el mayor número de perdidas (Tabla 21), así mismo se usaron los costos asociados a cada medida de reparación (Tabla 16). Con dicha información es posible emplear las Ecuaciones 5 y 7 para obtener la relación C/B de las escuelas reparadas considerando una tasa de depreciación del 5%. En la Tabla 22 se presentan las relaciones C/B para todas las escuelas considerando las medidas de reparación

Tabla 22. Relación costo-beneficio para las diferentes medidas de reparación consideradas

Año de construcción	Número de niveles	Relación Costo-Beneficio			
		Encamisado acero	Encamisado concreto	Fibras de carbono	Resina epóxica
1993	1	0.001111%	0.00113%	0.01063%	-0.25263%
	2	0.00174%	0.00134%	0.00749%	-0.04537%
	3	0.00030%	0.00024%	0.00170%	-0.01449%
2008	1	0.00143%	0.00130%	0.00661%	-0.28231%
	2	0.00083%	0.00060%	0.00346%	-0.05428%
	3	0.00007%	0.00007%	0.00040%	-0.03290%

Se presenta el análisis de los resultados previamente presentados (Tabla 20 a 22)

Tabla 23. Cuadro comparativo de las Tablas 20 a 22

Medidas de mitigación/reparación	Pérdidas promedio	Resiliencia	Relación costo-beneficio
Encamisado acero	Intermedias	Aumento	Valores positivos
Encamisado concreto	Menores	Aumento	Valores positivos
Fibras de carbono	Intermedias	Aumento	Valores positivos
Resina epóxica	Mayores	Disminución	Valores negativos

- La aplicación de las medidas de reparación en las escuelas en su condición original arrojó relaciones C/B positivas con excepción de la medida de resina epóxica, lo que significa que, para las medidas de encamisado de acero, concreto y fibras de carbono, su implementación provocara un aumento en su resiliencia original, mientras que, para la resina epóxica su implementación provocara una disminución en la resiliencia. Por lo cual la resina epóxica no sería del todo una medida recomendada.
- La implementación del encamisado de concreto como medida de reparación, arroja los valores de resiliencia más altos en comparación con las demás medidas de reparación (Tabla 21) pero debido a su alto costo de reparación (Tabla 16) impacta de forma significativa en la relación C/B. Por lo cual podría ser una opción atractiva para su implementación sin ser la mejor opción.
- A pesar de que las fibras de carbono no arrojaron los mayores valores de resiliencia, su bajo costo de reparación impacta de forma significativa en la relación C/B. Por lo cual, las fibras de carbono arrojan las mayores relaciones C/B para todos los casos de estudio, razón por la cual es la opción más adecuada para implementarse.
- Debido a que se puede observar que las pérdidas son mayores en las escuelas de un nivel (Tabla 20), y la resiliencia presenta valores menores en comparación con las escuelas de dos y tres niveles, se concluye que las escuelas de un nivel en el estado de Puebla podrían ser candidatas para ser intervenidas antes que las escuelas de dos y tres niveles.

- La implementación del MOC-CFE de distintos años (1993 y 2008) en el diseño de las escuelas tipo, impacta de forma significativa el comportamiento estructural de las escuelas que fueron estudiadas, ya que se observó que para el MOC-CFE-2008 las escuelas tuvieron un mejor comportamiento estructural en comparación con el MOC-CFE-1993.
- Es importante mencionar que a lo largo de esta investigación no se consideró el impacto que se tendría en la cimentación, la implementación de las medidas de mitigación/repación. Sin embargo, se recomienda que para futuras investigaciones se tome en cuenta, ya que por ejemplo, el encamisado de concreto tendría un mayor impacto en la cimentación.

Ya que se analizaron los resultados, se puede concluir que para las escuelas reparadas con fibras de carbono se observa que arroja las mayores relaciones C/B, además se observa que para la escuela de un nivel diseñada conforme a MOC-CFE-1993 se obtiene la mayor relación C/B ($C/B = 0.01063$). También es posible observar que la resina epóxica no es del todo recomendable para las escuelas, ya que se tienen valores C/B negativos en todos los casos, lo cual indica que su implementación no genera un aumento en la resiliencia y la mitigación del daño es nula.

IV. Conclusiones y recomendaciones

Se presentó un enfoque para realizar un análisis C/B para evaluar posibles opciones de reparación de estructuras, enfocadas a la pronta recuperación de las mismas y a la mitigación de pérdidas físicas directas por acciones sísmicas. Dado su rol particularmente sensible en la sociedad, la implementación de esta metodología se ha mostrado en escuelas públicas típicas, ubicadas en la ciudad de Puebla, teniendo como parámetros de medida la resiliencia promedio de los 5 eventos que arrojan las máximas pérdidas. Las escuelas típicas de concreto reforzado utilizadas como referencia se diseñaron de acuerdo considerando dos documentos donde se definen las demandas sísmicas publicados por la CFE a lo largo de los años: 1993 y 2008.

La metodología propuesta ha permitido obtener valores de la relación C/B para cada escenario gracias a los antecedentes existentes en la literatura. Sin embargo, en este estudio se ha dado un paso más al considerar toda la serie de eventos sísmicos relevantes al sitio analizado, tomando en cuenta el tiempo de recuperación que se requiere para regresar a las estructuras a condiciones similares a las que tenía antes de la ocurrencia de un evento sísmico. Las comparativas entre valores de C/B correspondientes a distintas medidas de reparación han arrojado resultados interesantes, los cuales se mencionan a continuación.

- Se esperaba que las estructuras con menor número de niveles estuviesen asociados a los mayores valores de resiliencia promedio; sin embargo, no ha sucedido así, lo cual indica que, al menos para la ciudad de Puebla, las escuelas con la tipología presentadas serán menos resilientes a medida que se incrementa su periodo en un rango de 0.3 a 0.4 s.
- A pesar que se esperaba que las actualizaciones en las NTC de concreto y los MDOC de la CFE fueran eficaces en producir estructuras más resilientes, este parámetro no se había cuantificado anteriormente en nuestro país, lo que representa un gran avance en el conocimiento de la situación en la que se encuentran un gran número de estructuras del sector educativo público.

- Los valores de resiliencia presentados son de gran relevancia, pues permiten tomar decisiones sociales de gran impacto, tales como la designación de posibles albergues en caso de desastres, además de ayudar a decidir cómo administrar los recursos disponibles; por ejemplo, se podrá destinar una mayor cantidad de recursos a ciertas estructuras para mejorar su resiliencia por medio de técnicas de reparación más eficientes.

A partir de los resultados obtenidos en este trabajo basado en resiliencia, es posible orientar a los encargados de tomar decisiones en relación a qué medidas de reparación son las más convenientes con base en el mayor valor de la relación C/B. En este caso la fibra de carbono sería la medida de reparación más conveniente ya que arroja relaciones C/B mayores en comparación con las demás medidas de reparación, además se logra apreciar que la estructura de un nivel diseñadas con reglamento de 1993 requiere mayor atención ya que arrojó mayores pérdidas.

Este tipo de análisis permite identificar la acción que reduce las pérdidas con la menor cantidad de recursos económicos; en este sentido, es posible minimizar el impacto negativo que podría producir un sismo a lo largo de la vida útil de estos edificios en localidades donde los recursos son limitados.

Es importante mencionar que, si bien los resultados obtenidos son de gran relevancia en el avance del conocimiento, se requieren llevar a cabo actividades adicionales que permitan fortalecer y respaldar lo ya obtenido, por esta razón, en trabajos futuros se tomarán en cuenta las pérdidas ocasionadas por fallas diferentes a las estructurales, como aquellas asociadas a elementos no estructurales y contenidos.

Si bien los resultados obtenidos en este trabajo son de ayuda, se basan en escuelas tipo con consideraciones de tiempos y costos de reparación para casos particulares, por lo que se recomienda usar esta metodología y usar modelos para obtener los tiempos y costo de reparación de forma más general, con el fin de que los resultados sean más generales y aplicables a más regiones del país.

Referencias

- Alcocer, S., y Jirsa, J. O. (1990). Assessment of the response of reinforced concrete frame connections redesigned by Jacketing. In *Proceedings of the Fourth US National Conference on Earthquake Engineering* (Vol. 3, pp. 295-304).
- Armendáriz, M. A. (2016). Evaluaciones estructurales y reparación de superestructuras. (Tesis de Licenciatura). Universidad Nacional Autónoma de México, México. Recuperado de <https://repositorio.unam.mx/contenidos/298998>.
- ASCE-41, American Society of Civil Engineers. (2006). Seismic Rehabilitation of Existing Buildings, American Society of Civil Engineers, ASCE Standard ASCE/SEI 41-06, prepublication edition.
- Berrón, R. (2018). Las lecciones del sismo del 19 de septiembre de 2017. *Revista IC Ingeniería Civil*, (590), 20-24.
- Bruneau, M., Chang, S. E., Eguchi, R. T., Lee, G. C., O'Rourke, T. D., Reinhorn, A. M., y otros. (2003). A framework to quantitatively assess and enhance the seismic resilience of communities. *Earthquake Spectra*, 733-752.
- Cárdenas, R. (2010). Estudio comparativo de análisis sísmicos simplificados y el análisis dinámico incremental en el cálculo de la curva de capacidad. (Tesis de Maestría). Universidad Nacional Autónoma de México, México. Recuperado de <https://repositorio.unam.mx/contenidos/71906>.
- Cardona O.D., Ordaz M.G., Reinoso E., Yamín L.E. y Barbat A.H. (2010), "CAPRA- Comprehensive approach to probabilistic risk assessment: International initiative for risk management effectiveness", Proceedings of the 14th European conference on earthquake engineering, Ohrid, Macedonia.

- Cardona O.D., Ordaz M., Reinoso E., Yamin L.E., y Barbat A.H., (2012) “CAPRA-comprehensive approach to probabilistic risk assessment: international initiative for risk management effectiveness”. PMemorias de la 15th World Conference on Earthquake Engineering, Lisboa, Portugal.
- CFE, Comisión Federal de Electricidad (1993) “Manual de Diseño de Obras Civiles; Diseño por Sismo”. México.
- CFE, Comisión Federal de Electricidad (2008) “Manual de Diseño de Obras Civiles; Diseño por Sismo”. México.
- CFE, Comisión Federal de Electricidad. (2015). Manual de Diseño de Obras Civiles; Diseño por Sismo Comentarios. México.
- Cimellaro, G. P., Reinhorn, A., y Bruneau, M. (2010). Framework for analytical quantification of disaster resilience. *Engineering Structures*, 3639-3649.
- Coburn, A., y Spence, R. (2003). *Earthquake protection*. John Wiley & Sons.
- Corazao, M., y Durrani, A. J. (1989). *Repair and strengthening of beam-to-column connections subjected to earthquake loading*. National Center for Earthquake Engineering Research.
- Cruz-Atienza, V. M., Singh, S. K. y Ordaz, M (2017) ¿Qué ocurrió el 19 de septiembre de 2017 en México?, en *Revista Digital Universitaria (RDU)*, Vol. 18 (7), septiembre-octubre. Recuperado de <http://dx.doi.org/10.22201/codeic.16076079e.2017.v18n7.a10>.
- DDF, Departamento del Distrito Federal (1976) “Reglamento de Construcciones del Distrito Federal”. Gaceta Oficial del Departamento del Distrito Federal.

DDF, Departamento del Distrito Federal (1987) “Reglamento de Construcciones del Distrito Federal”. Gaceta Oficial del Departamento del Distrito Federal.

Dowrick, D. J. (2009). Earthquake resistant design and risk reduction. John Wiley & Sons.

Engindeniz, M., Kahn, L. F., & Abdul-Hamid, Z. (2005). Repair and strengthening of reinforced concrete beam-column joints: State of the art. *ACI structural journal*, 102(2), 1.

ERN-AL (2010) CAPRA, “Compressive approach for probabilistic risk assessment”, World Bank, Inter-American Development Bank. Recuperado de www.ecapra.org

ERN. (2019). Visualizador Web de daños durante sismos. Consultado <https://serv.ern.com.mx/Visualizador> ERN el 30 de mayo de 2022.

Esteva L. (1967). Criterios para la construcción de espectros de diseño. 3rd Pan-American Symposium of Structures, Caracas, Venezuela (in Spanish).

Esteva L. (1976). Seismic risk and engineering decisions. Lomnitz C. and Rosenblueth E. (Eds), Elsevier Scientific Publishing Company, Amsterdam.

FEMA, Federal Emergency Management Agency. (2012). “Seismic performance assessment of buildings, Volume 1-Methology, FEMA P-58-1”. Federal Emergency Management Agency, Washington, DC, USA.

FEMAP-58-3. (2012), “Seismic performance assessment of buildings. Raleigh”: FEDERAL EMERENY MANAGEMENT AGENCY.

Flores, L., López, O., Pacheco, M. A., Reyes, C., & Rivera, D. (2006). Evaluación de la vulnerabilidad física y social. Guía Básica para la Elaboración de Atlas Estatales y

Municipales. Centro Nacional de Prevención de Desastres. Sistema Nacional de Protección Civil.

French, C. W., Thorp, G. A., & Tsai, W. J. (1990). Epoxy repair techniques for moderate earthquake damage. *Structural Journal*, 87(4), 416-424.

García, J. L., y De León, D. (2021). Reparación óptima de escuelas con muros de mampostería y marcos de concreto con daños sísmicos basada en confiabilidad. *Ingeniería sísmica*, (106), 45-75. Epub 18 de marzo de 2022. <https://doi.org/10.18867/ris.106.590>.

GCDMX, Gobierno de la Ciudad de México. (2020). “Normas técnicas complementarias para diseño por sismo con comentarios, No. 361, NTC-DS”. Gaceta Oficial de la Ciudad de México, CDMX, MEX.

GDF, Gobierno del Distrito Federal (2004) “Reglamento de Construcciones del Distrito Federal”. Gaceta Oficial del Gobierno del Distrito Federal.

González O. M., Guerrero J. J., Arroyo D. y Quiroz L. (2002). Efecto de la fibra de carbono en las propiedades mecánicas de vigas de concreto reforzado. Memorias del XIII Congreso Nacional de la Sociedad Mexicana de Ingeniería Estructural, 2002.

González, C. E. (2019). Estimación de la resiliencia sísmica en escuelas del sector público. (Tesis de Maestría). Universidad Nacional Autónoma de México, Coordinación General de Estudios de Posgrado, UNAM. Recuperado de <https://repositorio.unam.mx/contenidos/3530165>.

González C., Niño, M. y Jaimes, M. (2020). Event-based assessment of seismic resilience in Mexican school buildings, *Bulletin of Earthquake Engineering*, 18(14), 6313-6336.

Google maps. (2023). Imagen obtenida de

<https://www.google.com/maps/place/19%C2%B005'32.6%22N+98%C2%B012'42.1%22W/@24.7497904,-107.659823,5.71z/data=!4m4!3m3!8m2!3d19.0924!4d-98.2117>. Consultado el 13 de febrero de 2023.

Guadarrama, A., y De León, D. (2021). Procedimiento Basado En Confiabilidad Y Costos Esperados Para Elegir La Mejor Alternativa De Reparación Para Escuelas Dañadas Por Sismo. *Revista Internacional De Ingeniería De Estructuras*, 26(3), 472–497. <https://doi.org/10.24133/riie.v26i3.2337>.

Gutiérrez Trejo, Juan, & Ayala Milián, Gustavo. (2022). Análisis de la resiliencia sísmica de edificios. *Ingeniería sísmica*, (107), 47-73. Epub 29 de agosto de 2022. <https://doi.org/10.18867/ris.107.603>.

INEGI, Instituto Nacional de Estadística y Geografía (2015), “Estadísticas sobre las afectaciones de los sismos de septiembre de 2017 en las actividades económicas”, Ciudad de México.

INIFED. (2022). Catálogo de estructuras tipo. Recuperado de https://www.cmic.org.mx/comisiones/Sectoriales/educacion/Reuniones/Reuni%C3%B3n_de_Trabajo_CMIC-INIFED/REUNI%C3%93N_06-08-2104/CATALOGO%20DE%20ESTRUCTURAS%20CAPFCE.pdf el 12 de septiembre de 2022.

Jafarzadeh R., Wilkinson S., González V., Ingham J.M., y Ghodrati G. (2013) “Predicting seismic retrofit construction cost for buildings with framed structures using multilinear regression analysis”. *Journal of Construction Engineering and Management*, 140(3), 04013062.

- Jaimes M., Reinoso E., y Ordaz M. (2006), “Comparison of methods to predict response spectra at instrumented sites given the magnitude and distance of an earthquake”, *Journal of earthquake engineering*, pp. 887-902.
- Jaimes M., Gaytan A., y Reinoso E. (2015), “Ground-Motion prediction model for intermediate-depth intraslab earthquakes at the hill and lake-bed zones of Mexico City”, *Journal of Earthquake Engineering*, pp. 1260-1278.
- Jaimes M., Lermo J., y García-Soto A. (2016), “Ground-motion prediction model from local earthquakes of the Mexico basin at the hill zone of Mexico City”, *Bulletin of Seismological society of America*, pp. 1-13.
- Jaimes M. y Niño M. (2017) “Cost-benefit analysis to assess seismic mitigation options in Mexican public school buildings”, *Bulletin of Earthquake Engineering*, 15, 3919–3942.
- Kappos A., Stylianidis K., y Pitilakis K. (1998) “Development of seismic risk scenarios based on a hybrid method of vulnerability assessment”. *Natural Hazards*, 17, 177-192.
- Kappos A, y Dimitrakopoulos EG (2008) “Feasibility of pre-earthquake strengthening of buildings based on cost-benefit and life-cycle cost analysis, with the aid of fragility curves”. *Natural Hazards*, 45, 33-54.
- Keane, B. F. (2012). *Reparación de Grietas Estructurales por Inyección de Resinas Epóxicas*. American Concrete Institute.
- Liel A, y Deierling GG (2013) “Cost-benefit evaluation of seismic risk mitigation alternatives for older Concrete Frame Buildings”. *Earthquake Spectra*, 29(4), 1391-1411.

- Marulanda M.C., Carreño M.L., Cardona O.D., Ordaz M.G. y Barbat A.H., (2013) “Probabilistic earthquake risk assessment using CAPRA: application to the city of Barcelona, Spain”, *Natural Hazards*, 69(1), 59-84.
- Máximo, P., Hernández, A., Ramos, R. y Martínez, A. (2017). Daños estructurales en Ciudad de México, producidos por los sismos del 28 de julio de 1957 y el 19 de septiembre de 1985. *Revista UNIMAR*, 35(2), 161-186.
- McKenna, F. (2011). OpenSees: a framework for earthquake engineering simulation. *Computing in Science & Engineering*, 13(4), 58-66.
- Méndez, A. (2013). Estimación de riesgo sísmico en puentes vehiculares ubicados en la Ciudad de México. (Tesis de Maestría). Universidad Nacional Autónoma de México, México. Recuperado de <https://repositorio.unam.mx/contenidos/226736>.
- Mendoza, E. R. (2014). Factores de consistencia de costos y precios unitarios. FUNDEC, A.C.
- Mora M, Valcárcel J, Cardona OD, Pujades LG, Barbat AL, y Bernal GA (2015) “Prioritizing interventions to reduce seismic vulnerability in school facilities in Colombia”. Technical Note, *Earthquake Spectra*, 31(4), 2535-2552.
- Morales, E. A. (2019). Tiempos de recuperación estructural para la evaluación de la resiliencia sísmica en escuelas del sector público. (Tesis de Licenciatura). Universidad Nacional Autónoma de México, Facultad de Ingeniería, UNAM. Recuperado de <https://repositorio.unam.mx/contenidos/3439553>
- Narváez, V. O., & Angulo, E. R. (2007). REVISIÓN A 50 AÑOS DE LOS DAÑOS OCASIONADOS EN LA CIUDAD DE MÉXICO POR EL SISMO DEL 28 DE JULIO DE 1957 CON AYUDA DE INVESTIGACIONES RECIENTES Y

SISTEMAS DE INFORMACIÓN GEOGRÁFICA. *Revista de Ingeniería Sísmica*, (76), 61-87.

Niño, M., Medina, I. y González, C. (2021). Análisis costo-beneficio de diferentes medidas de mitigación basado en resiliencia para edificios escolares. Memorias del XXII Congreso Nacional de la Sociedad Mexicana de Ingeniería Estructural, 2021.

Ordaz, M., Martinelli, F., Aguilar, A., Arboleda, J., Meletti, C., y D'Amico, V. (2015). CRISIS2015, Program for Computing Seismic Hazard.

Park, Y., y Ang, A. (1985). Mechanistic seismic damage model for reinforced concrete. *Journal of structural engineering, ASCE*.

Pérez-Gavilán J.J., Aguirre J., Ramírez L. (2018) Sismicidad y seguridad estructural en las construcciones: lecciones aprendidas en México. *Salud Pública*, 60(1), pp. S41-S51. <https://doi.org/10.21149/9300>.

Pinto, A. Torres, R. (2016). Reducción de la vulnerabilidad sísmica de una edificación escolar mediante reforzamiento estructural. Conference: VII Coloquio de Microzonificación Sísmica at: Mérida, Venezuela Recuperado de https://www.researchgate.net/publication/309385060_Reducccion_de_la_vulnerabilidad_sismica_de_una_edificacion_escolar_mediante_reforzamiento_estructural.

Porter, K. (2018). A beginner's guide to fragility, vulnerability and risk. University of Colorado Boulder.

RAE. (2019). Diccionario de la Lengua Española. Consultado <https://dle.rae.es/resiliencia> el 12 de septiembre de 2022.

- Rosenblueth E, Ordaz M, Sánchez-Sesma F, y Singh SK (1989) “The Mexico earthquake of September 19, 1985-Design Spectra for Mexico’s Federal District”. *Earthquake Spectra*, 5, 273-291.
- SEAOC, Structural Engineers Association of California. (1995). “VISION 2000, A Framework for Performance-Based Engineering”. Structural Engineers Association of California, Sacramento, CA, USA.
- Smyth AW, Altay G, Deodatis G, Erdik M, Franco G, Gülkan P, Kunreuther H, Lus H, Mete E, Seeber N, y Yüzügüllü Ö (2004) “Probabilistic Benefit-Cost Analysis for earthquake damage mitigation: evaluating measures for apartment houses in Turkey”, *Earthquake Spectra*, 20(1), 171-203.
- Teran, G. A., y Jirsa, J. (2005). A damage index for practical seismic design that accounts for low cycle-fatigue. *Earthquake spectra* 21, 803-832.
- Valcárcel J., Mora M.A., Cardona O., Pujades L., Barbat A., y Bernal G. (2013) “Methodology and applications for the benefit cost analysis of the seismic risk reduction in buildings portfolios at broadscale”, *Natural Hazards*, 69:845-868.
- Vamvatsikos, D., y Cornell, C. A. (2002). Incremental dynamic analysis. *Earthquake engineering and structural dynamics*, 491-514.
- Ventura, F., Quinde, P (2019) A 40 años del sismo de la IBERO: lo que pasó, lo que pasaría hoy si volviera a ocurrir, en boletín ERNtérate, Recuperado de https://ern.com.mx/boletines/NotadeInteres/ERNterate_Nota_40_a%C3%B1os_simo_Ibero.pdf el 25 de mayo de 2022.
- Vicenteño, D. (2018). Listas, 98% de las escuelas afectadas por sismos de septiembre, Recuperado de <https://www.excelsior.com.mx/nacional/listas-98-de-las-escuelas-afectadas-por-sismos-de-septiembre/1258546> el 30 de abril de 2021.

Wu, Y. F., Liu, T., y Oehlers, D. J. (2006). Fundamental principles that govern retrofiting of reinforced concrete columns by steel and FRP jacketing. *Advances in Structural Engineering*, 9(4), 507-533.