



Propuesta de rehabilitación por daños sísmicos. Evaluación de riesgo sísmico y estrategias de prevención.

Alumno: Guadarrama De León Alejandra Donají

Comité:

Dr. David De León Escobedo

Dr. David Joaquín Delgado Hernández

Dr. Sergio Alejandro Díaz Camacho

28 de abril de 2022

ÍNDICE

I. RESUMEN

II. INTRODUCCIÓN Y PRESENTACIÓN DEL OBJETO DE ESTUDIO

- II. a. Sismicidad en México y peligro sísmico
- II. b. Prevención de daño estructural en edificios escolares

III. ESTADO DEL ARTE

IV. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA, OBJETIVO E HIPÓTESIS

- IV. a. Objetivo
- IV. b. Justificación
- IV. c. Hipótesis

V. DESCRIPCIÓN METODOLÓGICA

VI. CASOS DE ESTUDIO

- VI. a.1 Escuela 1, Municipio de Tetela del Volcán, Morelos.
- VI. a.2 Escuela 2, Municipio de Tehuacán, Puebla.
- VI. a.3 Escuela 3, Municipio de Atlatlahucan, Morelos.
- VI. b. Daños observados
 - VI. b.1 Tetela del Volcán.
 - VI. b.2 Tehuacán.
 - VI. b.3 Atlatlahuacán.
- VI. c. Peligro sísmico

VII. RESULTADOS

- VII. a. Análisis preliminares
- VII. b. Probabilidad de falla bajo condiciones de daño
- VII. c. Alternativas de rehabilitación
 - VII. c.1. Rehabilitación uno
 - VII. c.2. Rehabilitación dos
 - VII. c.3. Rehabilitación tres
- VII. d. Costo de rehabilitación
- VII. e. Probabilidades de falla reducidas después de la rehabilitación.

VIII. DISCUSIÓN

- VIII. a. Costo de las consecuencias de falla y elección de la técnica de reparación.

IX. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

X. REFERENCIAS

Propuesta de rehabilitación por daños sísmicos. Evaluación de riesgo sísmico y estrategias de prevención.

I. RESUMEN

En México se han desarrollado estándares para nuevas estructuras, pero los criterios y pautas de reparación no se han afinado tan bien como los estándares para nuevas estructuras. En este trabajo se exploran tres de las recomendaciones de reparación incluidas en la guía técnica de rehabilitación sísmica de la infraestructura física educativa de México (INIFED, 2021), para tres escuelas ubicadas en áreas de alto riesgo sísmico, que sufrieron daño durante el sismo del 19 de septiembre de 2017, evaluando la confiabilidad de la rehabilitación a través de una formulación de riesgos y resiliencia. Para ello se consideran las incertidumbres inherentes al peligro y los componentes críticos de resistencia estructural. Se analizan los estados límite de falla y de servicio para calcular un índice de daño global. Se evalúan algunas alternativas de esquemas y niveles de reparación para reducir la probabilidad de falla global. El costo se calcula en términos de las posibles consecuencias de la falla, como posibles muertes, la pérdida de contenido, las reparaciones y el costo de pérdida asociado con la transferencia de actividades a otras instalaciones mientras se repara o reconstruye la escuela.

Palabras clave: Peligro sísmico; Confiabilidad; Resiliencia; Costo esperado del ciclo de vida; infraestructura física educativa.

II. INTRODUCCIÓN Y PRESENTACIÓN DEL OBJETO DE ESTUDIO

Los edificios pueden sufrir diferentes niveles de daño cuando se someten a excitaciones sísmicas debido a factores como el sistema estructural, las características del sismo, la calidad de la construcción, el mantenimiento de la obra, las propiedades de los materiales, etc. No obstante, con la experiencia adquirida en diversos sismos, se ha observado que el nivel de daños en gran medida se debe a la configuración arquitectónica, estructural y en elevación, así como los efectos de sitio donde se desplantan las construcciones.

A partir de los diversos eventos sísmicos que se han presentado en el país, la ingeniería mexicana ha avanzado continuamente, de manera particular, los reglamentos actuales proporcionan una mejor definición de las demandas sísmicas de diseño, de las propiedades de los materiales, así como de los factores y coeficientes de diseño con el objetivo de establecer estándares de seguridad más adecuados.

El diseño por cargas laterales de una estructura requiere el correcto desempeño de una estructura ante un evento natural generalmente viento o sismos, de tal forma que ésta no presente daños significativos que puedan poner en riesgo la vida de los ocupantes. Debido a ello, los reglamentos de construcción se encargan de definir parámetros, los cuales, en caso de rebasarse, comprometerían la seguridad no solamente de la estructura en sí, sino también la de los usuarios y transeúntes.

Dicho análisis proporciona un panorama general de los posibles daños que pudieron o pueden llegar a presentarse en un evento sísmico, de igual manera, con base a esta información es posible revisar y atender oportunamente este tipo de problemas y así disminuir los efectos nocivos que se ocasionarían a la población. Además, es necesario conocer la confiabilidad que define el nivel de daño esperado bajo una excitación, por lo que las estructuras se evalúan a diferentes grados de intensidad teniendo como referencia la aceleración de la gravedad suficiente para que falle. Lo comentado anteriormente ha mostrado que el conocer el

comportamiento y la confiabilidad en las estructuras es de gran interés, ya que esto permitirá identificar las medidas para minimizar las consecuencias producidas por los eventos sísmicos. Por tal razón, se estudian estructuras representativas a aquellas que se han visto afectadas por eventos sísmicos, para así determinar la repuesta estructural de una edificación ante una amenaza sísmica dada, sobre todo en estructuras para uso educativo.

II. a. Sismicidad en México y peligro sísmico

La actividad sísmica en México se debe principalmente a la subducción de las placas Rivera y Cocos bajo la placa de Norteamérica; generando sismos de gran magnitud a lo largo de su historia que han ocasionado daños importantes. Los epicentros de la gran mayoría de los sismos se localizan en los estados de Jalisco, Colima, Michoacán, Guerrero, Oaxaca y Chiapas a lo largo de la costa del Pacífico, sin embargo, también han ocurrido sismos importantes en el centro y sur de Veracruz, Puebla, Estado de México y la península de Baja California.

Es posible que a lo largo de la historia del país hayan ocurrido un gran número de eventos sísmicos y probablemente en el futuro seguirán ocurriendo, tal vez la diferencia más importante es el hecho que, actualmente se cuenta con la tecnología suficiente para llevar a cabo registros sísmicos, lo que permite comprender mejor este tipo de fenómenos naturales (Gutiérrez et al, 2011).

Actualmente existe un consenso general en la comunidad científica con respecto a la zona de más alto potencial sísmico en el país que es la costa de Guerrero (Singh y Ordaz, 1994); a causa de la subducción de las placas de Cocos y Rivera bajo la de Norteamérica. Aunque la frontera entre las placas de Rivera y Norteamérica es algo incierta, se estima que intercepta en la costa de México cerca de Manzanillo (19.1°N, 104.3°W) (Rosenblueth, 1986). Por ejemplo, los grandes temblores de una fuente dada tienen tiempos de recurrencia de varios decenios cuando se trata de temblores de subducción. Es necesario recalcar que en los últimos 78 años no se ha originado ningún sismo al poniente de Acapulco, a pesar de que su tiempo de recurrencia es de 50 años, por lo que si el área de ruptura se llegase a presentar en dicha zona es posible que el próximo evento alcance una magnitud de 8.1 o 8.2, además, la distancia que existe con la Ciudad de México es ligeramente menor a la del sismo de 1985 por lo que es probable que la intensidad sea similar o mayor a este último (Singh y Ordaz, 1994).

El peligro sísmico se mide por medio de la probabilidad de ocurrencia de un sismo en una zona determinada durante un tiempo específico, cuyos efectos pueden ser representados por una medida de intensidad sísmica, tal como la aceleración máxima del terreno, velocidad máxima del terreno o la aceleración espectral asociada a una razón de amortiguamiento del 5% (Bozzo y Barbat, 2004), es decir, es una medida del grado de exposición que un sitio dado tiene a los movimientos sísmicos referente a las máximas intensidades que en él pueden presentarse (Bazán y Meli, 2001).

El peligro sísmico puede expresarse también en términos del espectro de respuesta. El Dr. Jesús Valdés presenta una metodología para estimar el peligro sísmico en términos de los espectros de respuesta elásticos correspondientes a diferentes temblores considerados los máximos creíbles para diseño en sitios donde la información sísmica es escasa, aplicando dos planteamientos deterministas diferentes (teoría de vibraciones aleatorias y simulación de acelerogramas usando registros pequeños como funciones de Green empíricas). (Valdés, 2007). Los eventos identificados que están asociados con altas frecuencias pueden ser

Propuesta de rehabilitación por daños sísmicos. Evaluación de riesgo sísmico y estrategias de prevención.

empleados como escenarios para evaluar estructuras ingenieriles e infraestructura nueva y existente. Las características de los escenarios también pueden ser considerados para seleccionar registros del movimiento del terreno que se necesitan para analizar estructuras y verificar el diseño sísmico.

II. b. Prevención de daño estructural en edificios escolares

La planeación, el diseño y la construcción de edificios escolares en zonas de riesgo ofrecen múltiples desafíos a los diferentes profesionales involucrados, debido a la importancia que tienen dichas construcciones en la vida usual de una comunidad y a la que adquieren en caso de desastre. A pesar de lo anterior, múltiples edificios escolares han sufrido graves daños, llegando incluso al colapso parcial o total de la estructura, como consecuencia de sismos intensos.

Los daños a la infraestructura escolar en México durante los sismos de septiembre de 2017 revelaron que el desempeño de muchas de estas estructuras está por debajo de un estándar aceptable, considerando el número de centros escolares que suspendieron actividades, en forma total o parcial, 16,136 al 16 de octubre de 2017 (Sánchez e Islas, 2017), ante dichos sismos. Hasta el 2 de noviembre de 2017 4,677 escuelas habían perdido 30 días de clases en los estados de Guerrero, Hidalgo, Morelos, Puebla, Tlaxcala, Estado de México y Ciudad de México. (Ramírez, 2017). Los daños materiales y las pérdidas humanas generadas por los siniestros de 2017 demostraron que todas las medidas de seguridad establecidas fueron sobrepasadas, por ende, se debe hacer una profunda evaluación para replantear las estrategias que no funcionaron como se esperaba.

En este contexto, se ha visto la necesidad de revisar las normas existentes para el diseño y la construcción de nuevos edificios escolares. Respecto a la reparación de las estructuras dañadas en México, el INIFED ha dedicado algunos trabajos a proveer información práctica en este aspecto, sin embargo, las estrategias no incluyen aún el enfoque basado en la confiabilidad para identificar la seguridad óptima de las reparaciones desde el punto de vista del costo mínimo esperado del ciclo de vida.

III. ESTADO DEL ARTE

El Dr. Esteva y su grupo han analizado formulaciones para determinar requerimientos para un desempeño apropiado del ciclo de vida bajo riesgo sísmico, incluyendo daño acumulado (Esteva et al, 2002) y las funciones de vulnerabilidad sísmica también se han explorado con el objetivo de proporcionar recomendaciones para el diseño y la mejora de las estructuras, incluidos los daños anteriores debido a terremotos o asentamientos pasados debido a cargas de gravedad (Esteva et al, 2002).

El Dr. Mauro Niño, también del Instituto de Ingeniería de la UNAM y su equipo, desarrollaron una metodología para realizar un análisis de costo-beneficio (C / B) para evaluar posibles opciones como la modernización o reconstrucción de estructuras centradas en mitigación de pérdidas físicas directas por acciones sísmicas. Ha evaluado los edificios de escuelas públicas ubicados en la Ciudad de México teniendo como parámetros la pérdida esperada, la pérdida anual esperada (EAL) y la máxima pérdida probable (PML). Este equipo también ha determinado los tiempos de recuperación estructural óptimos de escuelas tipo, necesarios para la evaluación de la resiliencia estructural, sometida a eventos sísmicos tomando como base, la implementación de medidas de reparación de daño estructural, cumpliendo con las

especificaciones del Reglamento de Construcciones del Distrito Federal (Morales, 2019).

El Dr. Jorge Ruíz García, de la Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo, realizó el diseño de tres edificios escolares con una planta típica con una altura de uno, dos y tres niveles con requisitos normativos sísmicos obsoletos. de la década de los noventas. Dichos modelos se sometieron a un conjunto de 22 secuencias sísmicas registradas en estaciones ubicadas en la zona de subducción de la costa del Pacífico mexicano, introduciendo curvas de fragilidad basadas en el desplazamiento de columnas de concreto que fallan en cortante, las cuales representaron la probabilidad de alcanzar o superar cuatro estados de daño, basados en pruebas experimentales para evaluar el desempeño sísmico de los modelos. Esta investigación reveló que los edificios escolares de dos y tres pisos exhiben mayores demandas de deriva interna en la planta baja que las exhibidas por el edificio escolar de un piso, lo que condujo a un mecanismo débil en el primer piso bajo algunos movimientos sísmicos principales. Además, se observó que las réplicas aumentaron el estado de daño en la planta baja debido al aumento del daño en las columnas confinadas de RC. Los hallazgos de esta investigación destacan la prioridad de implementar estrategias de modernización, principalmente para edificios escolares de tres pisos. (Ruíz, 2021).

A nivel internacional la Universidad de Nápoles ha propuesto una metodología de diseño de modernización integrada para la mejora estructural y energética de edificios escolares existentes. Proponen un enfoque de reacondicionamiento incremental que consiste en implementar intervenciones con un impacto creciente, aumento del rendimiento y aumento de costos y beneficios. Se discuten y comparan diferentes soluciones de modernización en términos de desempeño sísmico y energético, beneficios de la intervención, nivel de interrupción y costos directos de implementación. (Del Vecchio et al, 2020)

En la Universidad de Porto evalúa a través de una revisión exhaustiva de varias técnicas de reacondicionamiento sísmico, presentando estudios numéricos que tiene como objetivo evaluar la eficiencia relativa de dichas técnicas cuando se aplica a varias clases de edificios representativos de las ciudades portuguesas basándose en el análisis de costo-beneficio. (Sousa et al, 2020)

El University College London inquiriere varias medidas de mejoramiento para edificios escolares vulnerables en Filipinas. Específicamente, se analiza el desempeño sísmico de edificios que representan la tipología de edificaciones escolares existentes en dicho país, basado en el diseño sobre las disposiciones del código sísmico. El comportamiento sísmico de esas estructuras se evalúa mediante análisis estático y dinámico, identificando las deficiencias estructurales y proponiendo una serie de opciones de modernización para mejorar su capacidad general, rigidez y ductilidad (D'Áyala et al, 2020).

IV. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA, OBJETIVO E HIPÓTESIS

En este trabajo se exploran tres de las diez recomendaciones de rehabilitación presentadas en la guía técnica de rehabilitación sísmica de la infraestructura física educativa de México (INIFED), se eligieron considerando el daño mostrado en las tres estructuras elegidas y por ser las técnicas de reparación cuyos materiales son fácilmente asequibles en el país. Las escuelas elegidas se encuentran ubicadas en áreas de alto riesgo sísmico, y la formulación está basada en el riesgo y el costo mínimo esperado del ciclo de vida. Para ello se consideraron las incertidumbres inherentes al peligro y los componentes críticos de resistencia

Propuesta de rehabilitación por daños sísmicos. Evaluación de riesgo sísmico y estrategias de prevención.

estructural. Se analizan los estados límite que gobiernan la falla, bajo condiciones de resistencia y se evalúa una alternativa de reparación que no sólo permita a la estructura recobrar su nivel de confiabilidad inicial, sino reducir la probabilidad de falla de los elementos a intervenir. El costo se calcula en función de la técnica de reparación y también se integran las posibles consecuencias del colapso, como posibles muertes, pérdida de contenido y costo de pérdida asociado con la transferencia de actividades a otras instalaciones mientras se repara o reconstruye la escuela.

IV. a. Objetivos

Los objetivos de esta investigación son estudiar las condiciones generadoras de los daños en 3 escuelas durante los sismos de 2017 y recomendar la técnica de reparación con el menor costo esperado del ciclo de vida.

IV. b. Justificación

La recomendación obtenida utilizando este método permitiría que, ante eventos sísmicos futuros, se reduzca la probabilidad de falla en estructuras similares.

IV. c. Hipótesis

La recomendación propuesta hará que las probabilidades de falla bajo condiciones de daño disminuyan 5 veces con el costo menor en el largo plazo.

V. DESCRIPCIÓN METODOLÓGICA

La metodología utilizada para este trabajo requiere que se conozcan las características de los materiales y geométricas del edificio escolar, así como su ubicación para determinar el espectro de diseño, con esta información se realiza el análisis estructural y se obtienen los elementos mecánicos. El siguiente paso consiste en calcular los márgenes de seguridad de los elementos estructurales del edificio, se calculan sus probabilidades de falla de los elementos estructurales. Se analiza nuevamente la estructura considerando la reparación a los elementos con mayor probabilidad de falla y se calculan los nuevos márgenes de seguridad, índices de confiabilidad y probabilidades de falla y finalmente se evalúa la función del costo esperado en el ciclo de vida para la reparación propuesta. La figura 1 muestra el procedimiento del modelo de reparación propuesto en este trabajo.

Formulación

La probabilidad de falla del edificio se considera como la falla del marco crítico, y la probabilidad de falla del marco se define aquí como la probabilidad de que un efecto de carga, o efecto de combinación de carga, exceda la resistencia de varios miembros estructurales críticos; es decir, que el estado límite del marco G_f (margen de seguridad) se supere de alguna manera (Esteva et al, 2002). La combinación de carga incluye el código típico de cargas muertas y vivas y los efectos sísmicos locales.

$$P_f(G_f < 0) \quad (1)$$

Donde G_f representa el evento para el cual el esfuerzo de actuación excede los esfuerzos de resistencia en una combinación de miembros estructurales que

causa la inestabilidad global del marco. La probabilidad de falla de marco se calcula, de manera simplificada, de la siguiente manera:

a. La probabilidad de falla incondicional (total) P_f se obtiene a través de la convolución de las probabilidades de falla condicional para las intensidades sísmicas del escenario dado " a_i " y las respectivas probabilidades de ocurrencia de estas intensidades (Ang y Tang, 2007).

$$P_{fT} = \int a P(G_f < 0|a) P(a) da \quad (2)$$

b. Si el modo de falla crítico es de flexión, el estado límite corresponde a:

$$G_i = 1 - M_{acti}/M_{ri} \quad (3)$$

donde M_{acti} y M_{ri} son el momento de actuación y resistencia del miembro i (De León y Guadarrama, 2020). Si el modo de falla crítica es el corte, el estado límite corresponde a:

$$G_i = 1 - V_{acti}/V_{ri} \quad (4)$$

donde V_{acti} y V_{ri} son el cortante actuante y resistente del miembro i (De León y Guadarrama, 2020).

c. Si el estado límite corresponde a la combinación crítica de carga axial y momento flector que ocurre simultáneamente en un miembro:

$$G_i = 1 - P_{acti}/P_{ri} + M_{acti}/M_{ri} \quad (5)$$

Donde P_{acti} es la carga axial que actúa y P_{ri} es la fuerza axial resistente, para la combinación más crítica de cargas axiales y momentos que ocurren simultáneamente en todas las columnas del edificio (De León y Guadarrama, 2020).

d. La incertidumbre se considerará tanto en los elementos mecánicos actuantes como en los resistentes (Bojorquéz et al, 2017). Las cuatro variables se considerarán aquí como lognormales (De León, 2010).

e. Comúnmente, para efectos sísmicos (Rosenblueth, 1986), el coeficiente de variación (CV) de 1/3 se ha utilizado para los efectos de carga, cortante, la carga axial y el momento flexionante, por lo que se supondrá aquí que tienen un $CV = 0.3$. Además, se considera que la fuerza axial de resistencia, cortante resistente y el momento flexionante resistente tienen un $CV = 0.15$. Y los valores esperados de P_{act} y M_{act} se consideran las respuestas estructurales correspondientes al escenario de pseudoaceleraciones espectrales, que se toman como valores medios de la demanda.

Propuesta de rehabilitación por daños sísmicos. Evaluación de riesgo sísmico y estrategias de prevención.

En general la probabilidad de falla P dada cierta intensidad de sismo i $P_{fi} = P(F|a_i)$, a_i = intensidad sísmica i (De León y Guadarrama, 2020).

La probabilidad de falla, condicional a la intensidad sísmica a_i , se obtiene del análisis de las respuestas máximas y de:

$$P(F|a_i) = P(D > R|a_i) \quad (6)$$

Donde D es la máxima demanda sísmica para la intensidad a_i y R la resistencia correspondiente (ambas aleatorias). Aplicando el teorema de la probabilidad total (Ang et al, 2007):

$$Pf = \sum P(F|a_i)P(a_i) \quad (7)$$

Una vez obtenidas las respuestas máximas en la estructura, para el escenario i , se obtiene la $P_{fi} = P(F|a_i)$, empleando técnicas de Simulación de Monte Carlo (Ang y Tang, 2007) y los valores de los parámetros estadísticos (coeficientes de variación de los efectos sísmicos y de las propiedades mecánicas de la estructura) (De León e Ismael, 2019), (INIFED, 2016).

Para realizar el cálculo del valor actual del costo del ciclo de vida previsto se utilizará el método aplicado en (Ang y De León, 1997), donde el ciclo de vida $E(LC)$ se compone del costo inicial C_i y el valor presente del costo futuro esperado debido a potenciales reparaciones/reconstrucciones de la escuela, una vez que ocurran los sismos esperados en el ciclo de vida de la estructura.

El costo de reparación se estimó a través de un análisis de costo unitario clásico. El costo de las consecuencias del colapso se calcula de la siguiente manera:

$$C_D = C_c + C_f + C_e + C_{in} \quad (8)$$

Donde:

C_c es el costo del contenido del edificio, C_e es el costo de la pérdida de funcionalidad, C_{in} el costo de las lesiones y C_f el costo de las muertes (De León y Guadarrama, 2020).

La estimación de la pérdida de contenido considera el número de escritorios con sillas, computadoras, pantallas, equipo de proyección y equipo de laboratorio. Los costos típicos están incluidos de proveedores escolares mexicanos (<https://todooficina.com/equipamiento/>). El costo de la lesión se obtiene utilizando una tasa de $0.0168 / m^2$ obtenida por De León en trabajos anteriores (De León y Guadarrama, 2020) y obteniendo el costo promedio actual de una lesión del Instituto Mexicano del Seguro Social.

VI. CASOS DE ESTUDIO

Para los estudios de caso presentados en este trabajo, se utilizaron los valores teóricos de las propiedades de los materiales que constan en los planos estructurales, originales y de reparación, a los que se tuvieron acceso. La guía técnica de rehabilitación sísmica de la infraestructura física educativa de México, recomienda el uso métodos de inspección visual, acústicos, radiográficos y de ultrasonido para determinar los valores de las propiedades de los materiales que fuesen utilizados para el análisis y diseño de reparaciones y rehabilitaciones.

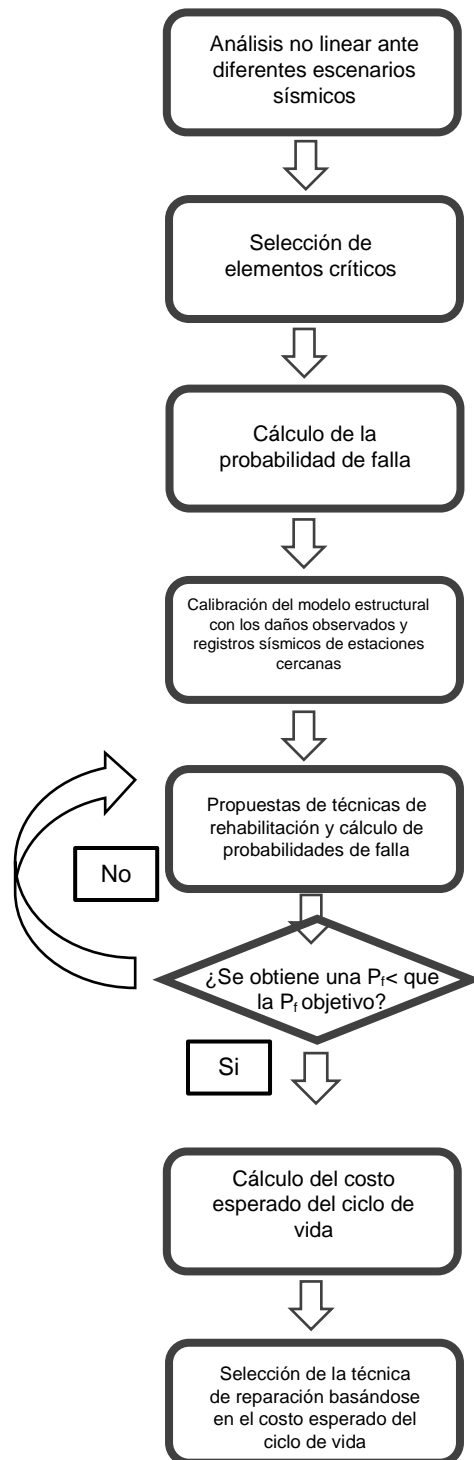


Figura 1 Procedimiento del modelo de reparación propuesto (Guadarrama y De León, 2021).

Propuesta de rehabilitación por daños sísmicos. Evaluación de riesgo sísmico y estrategias de prevención.

Sin embargo, a cuatro años de los sismos las escuelas seleccionadas para este trabajo, ya fueron reparadas, por lo que los valores que se hubiesen obtenido no serían representativos de las condiciones previas a los eventos sísmicos.

VI. a. DESCRIPCIÓN DE LAS ESCUELAS

VI. a.1 Escuela 1, Municipio de Tétela del Volcán, Morelos.

El edificio escolar (figura 2) se encuentra en el Municipio de Tétela del volcán, Morelos a una distancia aproximada de 118.0 km desde la Ciudad de México. Consta de un nivel y dos aulas de 7.0 x 7.0 m, está construido de marcos de concreto y muros divisorios de mampostería, cuyas columnas son de 0.45 x 0.30 m, vigas de 0.35 x 0.25 m y ancho de muros de 12 cm (Guadarrama y De León, 2021).

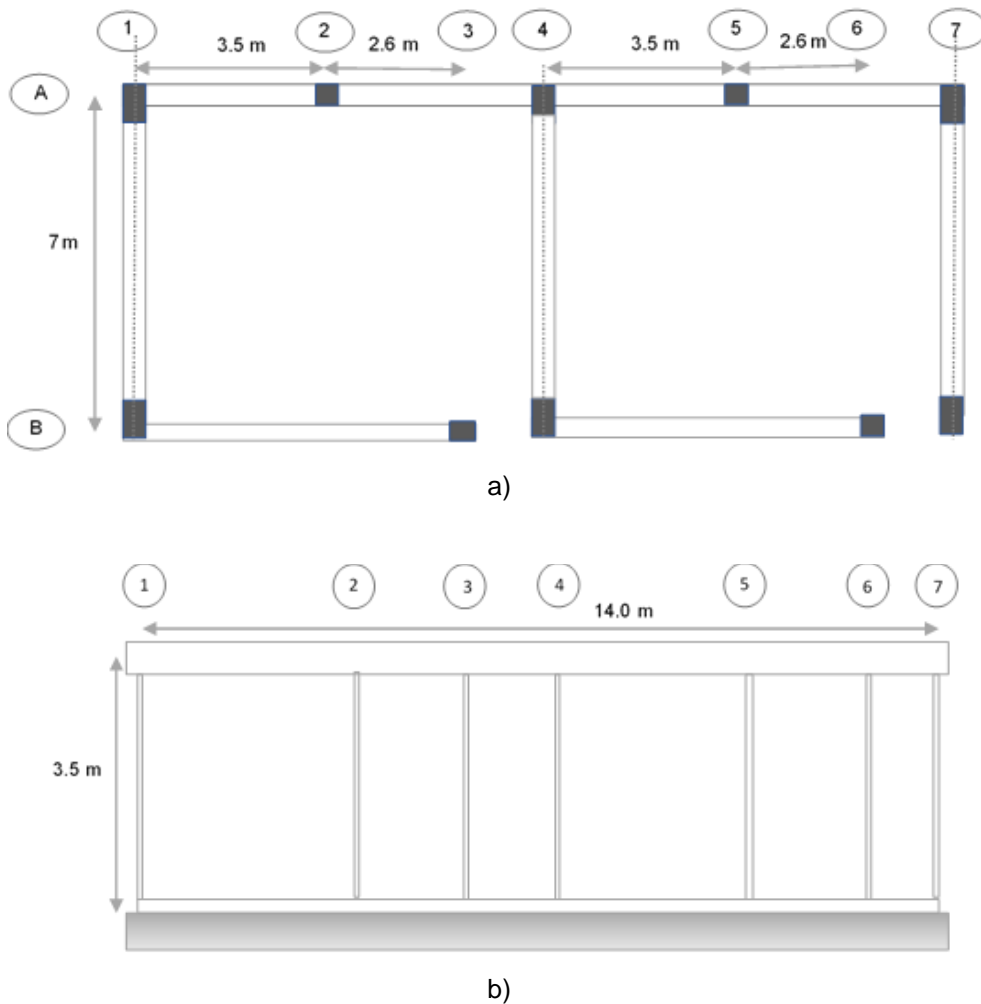


Figura 2 a) Planta b) Alzado de la escuela en el municipio de Tetela del Volcán

Las propiedades de los materiales son: resistencia del concreto 250 kg/cm^2 , esfuerzo de fluencia del acero de refuerzo de $4,200 \text{ kg/cm}^2$ y resistencia a la compresión de la mampostería de 14.99 kg/cm^2 . La carga viva para la escuela se consideró de 100 kg/m^2 (Gobierno de la Ciudad de México, 2017).

VI. a.2 Escuela 2, Municipio de Tehuacán, Puebla.

El edificio escolar (figura 3 y figura 4) se encuentra en el Municipio de Tehuacán, Puebla a una distancia aproximada de 255.0 km desde la Ciudad de México. Consta de dos niveles con claros de 5.0 m, está construido de marcos de concreto y muros divisorios de mampostería, cuyas columnas son de $0.65 \times 0.45 \text{ m}$, vigas de $0.55 \times 0.30 \text{ m}$ y ancho de muros de 12 cm (Guadarrama y De León, 2021).

Las propiedades de los materiales son: resistencia del concreto 250 kg/cm^2 , esfuerzo de fluencia del acero de refuerzo de $4,200 \text{ kg/cm}^2$ y resistencia a la compresión de la mampostería de 14.99 kg/cm^2 . La carga viva para la escuela se consideró de 100 kg/m^2 (Gobierno de la Ciudad de México, 2017).

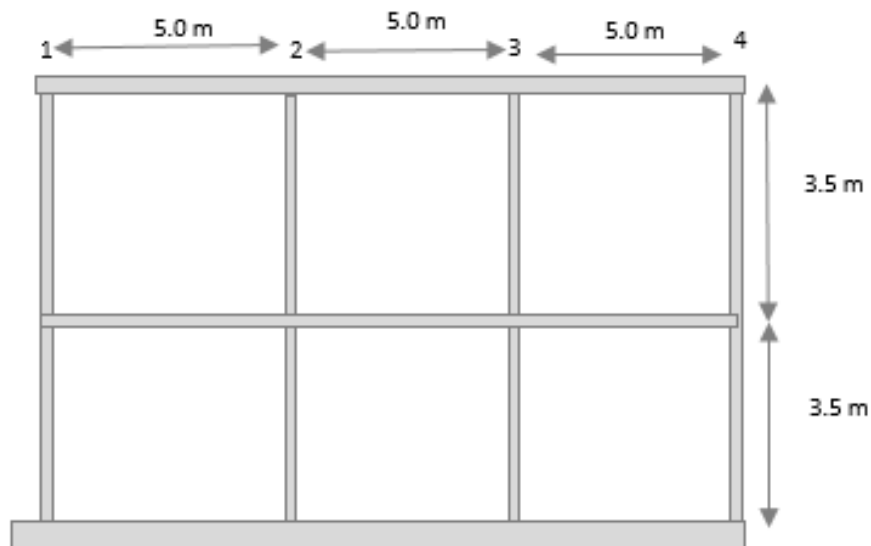


Figura 3 Alzado de la escuela en el municipio de Tehuacán.

Propuesta de rehabilitación por daños sísmicos. Evaluación de riesgo sísmico y estrategias de prevención.

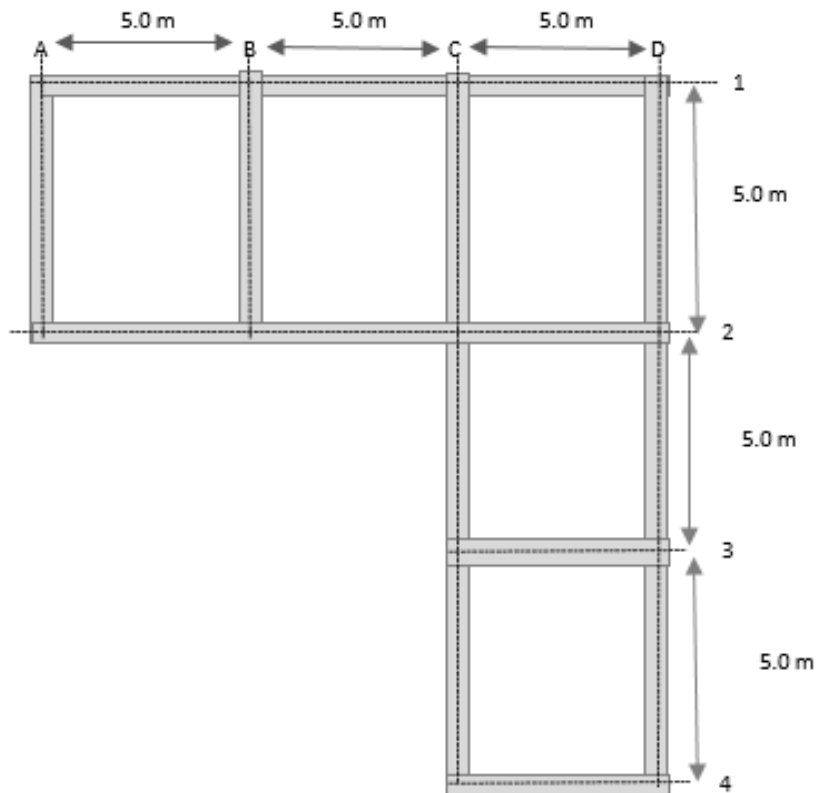


Figura 4 Planta de la escuela en el municipio de Tehuacán.

VI. a.3 Escuela 3, Municipio de Atlatlahucan, Morelos.

El edificio escolar (figura 5 y figura 6) se encuentra en el Municipio de Atlatlahucan, Morelos a una distancia aproximada de 91.3 km desde la Ciudad de México. Consta de dos niveles con claros de 5.0 m y 7.5m, está construido de marcos de concreto y muros divisorios de mampostería, cuyas columnas son de 0.55 x 0.45 m, vigas de 0.45 x 0.30 m y ancho de muros de 12 cm (Guadarrama y De León, 2021).

Las propiedades de los materiales son: resistencia del concreto 250 kg/cm², esfuerzo de fluencia del acero de refuerzo de 4,200 kg/cm² y resistencia a la compresión de la mampostería de 14.99 kg/cm². La carga viva para la escuela se consideró de 100 kg/m² (Gobierno de la Ciudad de México, 2017).

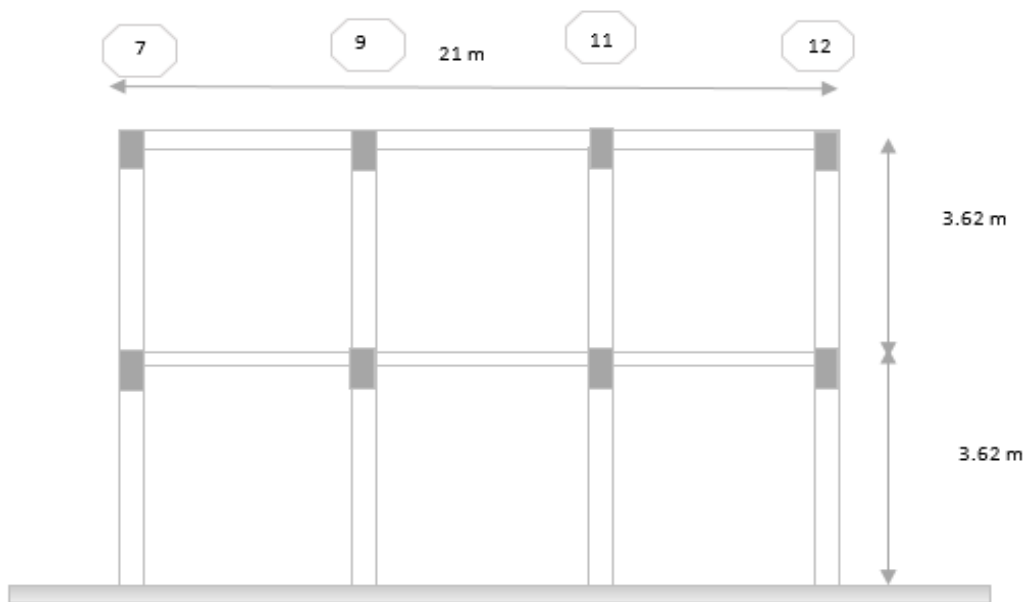


Figura 5 Planta de la escuela en el municipio de Atlatlahuacan.

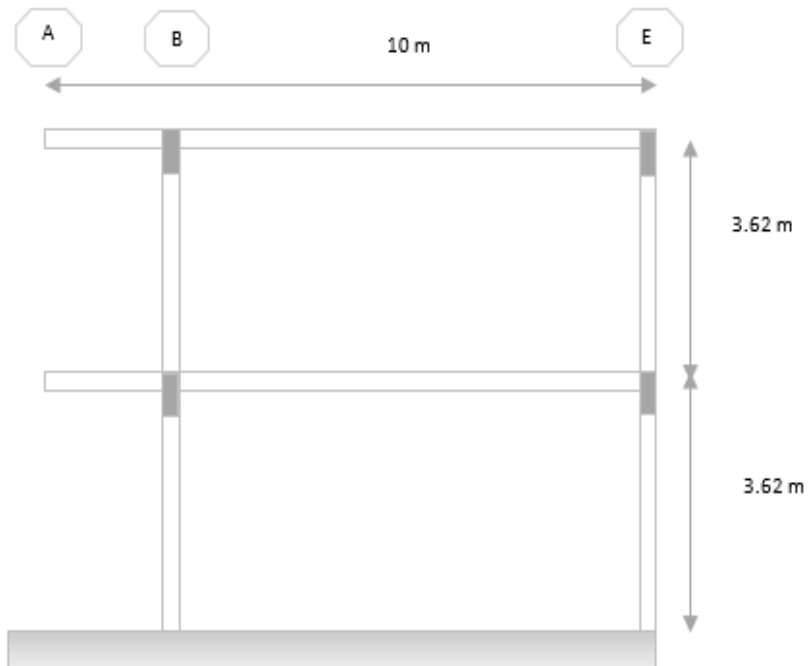


Figura 6 Alzado de la escuela en el municipio de Atlatlahuacan.

Propuesta de rehabilitación por daños sísmicos. Evaluación de riesgo sísmico y estrategias de prevención.

VI. b. Daños observados

VI. b.1 Tetela del Volcán.

Los daños principales se presentaron en las columnas 2A y 3B, como se puede apreciar en la figura 7. También se presentaron daños en los muros de los ejes 1, 4 y 7. En los muros se presentaron. En la losa se observaron agrietamientos menores a 7 mm cerca de los muros afectados. Las instalaciones pluviales se desprendieron de los muros, la instalación eléctrica no se vio afectada. Se encontraron vidrios rotos y anaqueles caídos (Guadarrama y De León, 2021).



Figura 7 Daños observados en la escuela ubicada en Tetela del Volcán

VI. b.2 Tehuacán.

En esta escuela se presentaron daños en los muros de los ejes 1, 7, A y D. En los muros se presentaron agrietamientos de hasta 5 mm a 45° de la base hacia arriba. En las traveses de los ejes 1, 3 y 5 se observaron grietas de 1 cm; Las columnas no presentaron daños En la losa se observaron agrietamientos menores a 1 mm cerca de los muros afectados. Las instalaciones pluviales se desprendieron de los muros, la instalación eléctrica no se vio afectada, algunas de las lámparas se desprendieron de la losa, quedando suspendidas de los cables de la instalación eléctrica. Se encontraron vidrios rotos y anaqueles caídos. En la figura 8 se pueden observar algunos de los daños registrados (Guadarrama y De León, 2021).



Figura 8 Daños observados en la escuela ubicada en Tehuacán

VI. b.3 Atlatlahuacán.

En esta escuela se presentaron daños en los muros de los ejes 3, 4, A y D. En los muros se presentaron agrietamientos de hasta 5 mm a 45° de la base hacia arriba. En las columnas de los ejes 3 y 4 se observaron grietas de 1 cm. En la losa se observaron agrietamientos menores a 7 mm cerca de las trabes afectadas. Las instalaciones pluviales se desprendieron de los muros, la instalación eléctrica no se vio afectada. Se encontraron vidrios rotos y anaqueles caídos. En la figura 9 se pueden apreciar algunos de los daños documentados (Guadarrama y De León, 2021).

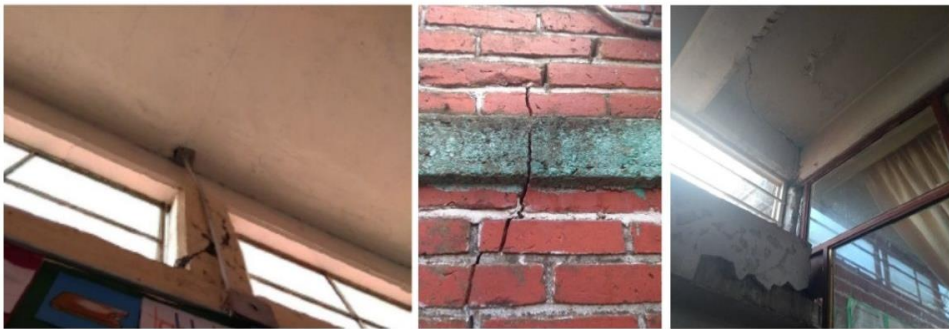


Figura 9 Daños observados en la escuela ubicada en Atlatlahuacan.

VI. c. Peligro sísmico

La estimación del peligro sísmico se realizó siguiendo el Manual de Diseño [11] que recomienda calcular la intensidad sísmica de la roca a través de los espectros de peligro uniforme. En la figura 10 aparece el diagrama PRODISIS para una de las escuelas y en la figura 11, aparecen el registro acelerográfico utilizado. (CFE, 2015).

Los registros acelerográficos proporcionados han sido producto de las labores de instrumentación y procesamiento de la Unidad de Instrumentación Sísmica del Instituto de Ingeniería de la UNAM (II-UNAM, 2021).

VII. RESULTADOS

VII. a. Análisis preliminares

Con los resultados de estos análisis preliminares, se identificaron los miembros críticos, el modo de falla gobernante y se calibraron las propiedades mecánicas del miembro dañado, usando los daños observados durante el terremoto de 2017 como comparativa, así como las recomendaciones indicadas por el INIFED en sus guías técnicas. Las tablas de la guía técnica permiten mediante la observación del daño de cada elemento estructural clasificar la severidad usando mediciones de ancho de grieta, de desplazamientos residuales y descripciones de daño. Así como estimar, según el tipo e intensidad del daño, la rigidez, resistencia y/o capacidad de deformación lateral remanentes de un componente y/o de la estructura en su conjunto. (Alcocer, 2021). Los elementos críticos fueron aquellos

Propuesta de rehabilitación por daños sísmicos. Evaluación de riesgo sísmico y estrategias de prevención.

que superaron el valor máximo del índice de confiabilidad (β) de la norma ISO 2394 (2015). General principles on reliability for structures.

Posteriormente, se realizó el análisis no lineal de la estructura utilizando los registros sísmicos de la estación más cercana a la ubicación de la escuela. Se generaron los diagramas momento – curvatura.

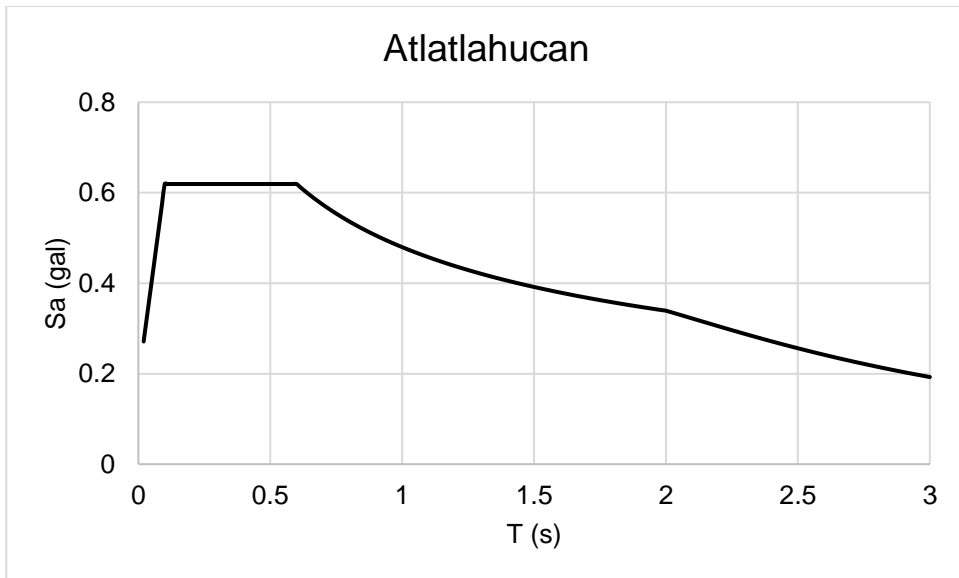


Figura 10 Espectro de peligro uniforme de Atlatlahuacan.

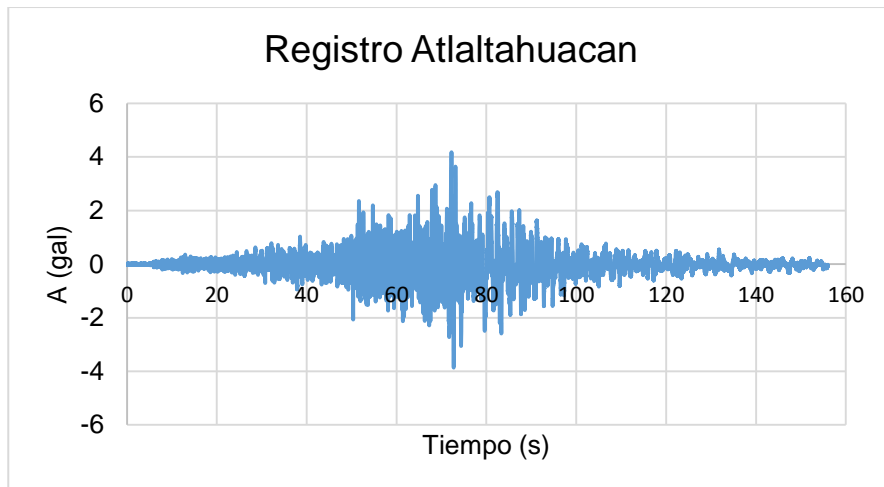


Figura 11 Registro recabado en la estación más cercana a Atlatlahuacan.

Se utilizó el modelo histerético trilineal que presenta una mejor aproximación de las características de rigidez de los elementos sometidos a flexión. Se consideró un amortiguamiento del 5% para estructuras de concreto. Para las columnas se analizó la fuerza combinada bajo flexión biaxial, con carga axial, para secciones rectangulares, con soluciones basadas en capacidades de la sección sobre los ejes principales (Furlong y Hsu, 2004), y que está publicado en (ASCE 41-13, 2019).

Para la escuela ubicada en Atlatlahuacan, los resultados para algunas columnas se presentan en la Tabla 1 y para algunas de las vigas, en la Tabla 2. Para las vigas el cortante resistente es 29 ton y el momento flector resistente es 29.77 ton-m, para las condiciones de daño (Guadarrama y De León, 2021).

Tabla 1. Resultados de cortante y momento flexionante actuante para algunas columnas en la escuela de Atlatlahuacan (Guadarrama y De León, 2021).

Elemento	P_{act} kN	(T_f)	M_{act} kN-m	(T_f-m)
1	61.12	6.23	217.02	22.15
2	55.46	5.66	216.88	22.13
3	57.31	5.84	202.52	20.66
4	57.82	5.90	202.51	20.66
5	55.58	5.67	202.13	20.63
6	55.55	5.67	202.13	20.63
7	57.14	5.83	203.79	20.79
8	57.18	5.83	203.79	20.79
9	71.49	7.29	250.28	25.54
10	68.99	7.04	240.52	24.54

Tabla 2 Resultados para algunas vigas en la escuela de Atlatlahuacan (Guadarrama y De León, 2021).

Elemento	V_{act} kN	(T_f)	M_{act} kN-m	(T_f-m)
1	20.05	2.05	114.06	11.63
2	22.34	2.28	114.21	11.65
3	17.02	1.74	96.79	9.87
4	18.72	1.91	106.51	10.86
5	21.21	2.16	115.35	11.76
6	16.29	1.66	92.68	9.45
7	18.50	1.89	105.22	10.73
8	20.55	2.10	112.35	11.46
9	15.80	1.61	89.90	9.17
10	21.32	2.17	121.28	12.37

VII. b. Probabilidad de falla bajo condiciones de daño

A partir de las respuestas máximas, se calculó la probabilidad de falla para cada elemento con el procedimiento descrito anteriormente; La Tabla 3 muestra los resultados de la escuela Atlatlahuacan para la demanda sísmica del terremoto del 19 de septiembre de 2017 (Guadarrama y De León, 2021).

Tabla 3. Índices de confiabilidad para condiciones dañadas en algunos elementos de la escuela de Atlatlahuacan (Guadarrama y De León, 2021).

Columna	P_{act}/P_r	M_{act}/M_r	β
1	0.03	0.42	3.03
2	0.03	0.42	3.04
9	0.04	0.48	2.56
10	0.04	0.46	2.69
Viga	V_{act}/V_r	M_{act}/M_r	β
1	0.07	0.37	3.40
10	0.07	0.39	3.19

Aplicando las ecuaciones (2) a (7) se obtiene la probabilidad de falla, para condiciones dañadas para cada elemento. Se realizaron 10,000 simulaciones utilizando el Método de Monte Carlo. Dado que las escuelas pertenecen a un grupo importante de estructuras, para este trabajo se utiliza un criterio conservador por lo que la P_F global se igualará a la P_f máxima de los elementos, para cada una de las tres escuelas. Estos resultados se muestran en la Tabla 4, (Guadarrama y De León, 2021).

Tabla 4. Probabilidades de falla máximas para cada una de las tres escuelas. (Guadarrama y De León, 2021).

Escuela	P_f
Atlatlahuacan	0.032
Tetela del Volcán	0.041
Tehuacán	0.026

VII. c. Alternativas de rehabilitación

El costo de reparación y mejoramiento C_R para un daño moderado se estimó para cada elemento de concreto dañado empleando mortero epóxico. Para un daño medio, el costo de reparación de los elementos de concreto se estima considerando la demolición y reconstrucción empleando la misma sección transversal o mayor considerando los costos de los elementos agregados; y para daños severos, el costo de reparación se estimó como si los miembros de concreto dañados con mayor probabilidad de falla fueran demolidos y reconstruidos con una sección transversal más grande y estimando el costo de los elementos agregados. Para todos los casos se consideró que los muros dañados serían demolidos y reconstruidos. Estos costos se calcularon con un análisis de costo unitario clásico.

En las siguientes subsecciones, se describen estrategias de rehabilitación para la escuela de Atlatlahuacan, como ejemplo (Guadarrama y De León, 2021).

VII. c.1. Rehabilitación uno

La estrategia de reacondicionamiento uno, para Atlatlahuacan, consistió en el refuerzo de las columnas 9 y 10 y vigas 1 y 10. Para las columnas se agregaron 4 ángulos de acero A-36 6" x 6" x 3/8" y para las vigas 4 ángulos se agregaron en las esquinas de A-36 2"X2"X3/8" / 8 5 "; la figura 12 muestra un boceto, (Guadarrama y De León, 2021).

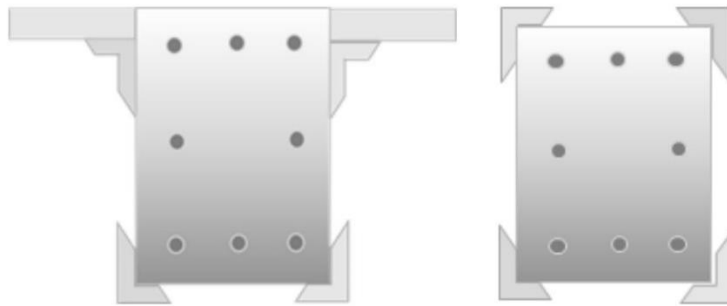


Figura 12 Propuesta de rehabilitación uno, refuerzo con ángulos de acero. (Guadarrama y De León, 2021)

Tabla 5. Propiedades geométricas de las secciones propuestas para la escuela en Atlatlahuacan, (Guadarrama y De León, 2021).

	Columna	Viga	Unidades
A	0.276	0.1646	m ²
J	9.14E-03	2.45E-03	m ⁴
I33	9.15E-03	3.77E-03	m ⁴
I22	3.80E-03	8.79E-03	m ⁴
S33(+cara)	2.86E-02	1.13E-01	m ³
S33(-cara)	2.86E-02	1.13E-01	m ³
S22(+cara)	1.90E-02	1.30E-02	m ³
S22(-cara)	1.90E-02	1.30E-02	m ³
Z33	4.35E-01	1.88E-02	m ³
Z22	2.84E-02	9.09E-03	m ³
r33	1.82E-01	1.67E-01	m
r22	1.17E-01	8.08E-02	m

Las propiedades geométricas (área A, constante de torsión J, momentos de inercia I, módulo de sección S, módulo de plástico Z y radio de giro r) se calcularon

Propuesta de rehabilitación por daños sísmicos. Evaluación de riesgo sísmico y estrategias de prevención.

para las nuevas secciones y se utilizaron para realizar los nuevos análisis. La Tabla 5 muestra estas propiedades, (Guadarrama y De León, 2021).

VII. c.2. Rehabilitación dos

La estrategia de modernización dos consistió, para las columnas 9 y 10, en el incremento del tamaño de la sección a 65 x 45 cm y, para las vigas 1 y 10 incrementar a 45 X 40 cm; vea la figura 13 para el croquis y la Tabla 6 para las propiedades estructurales, (Guadarrama y De León, 2021).

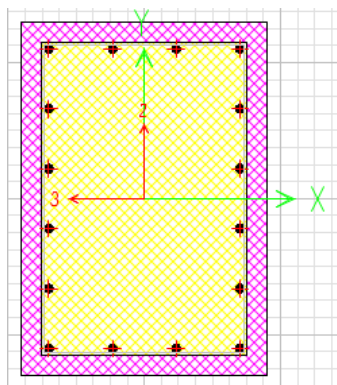


Figura 13 Propuesta de rehabilitación dos para las columnas de Atlatlahuacan, (Guadarrama y De León, 2021).

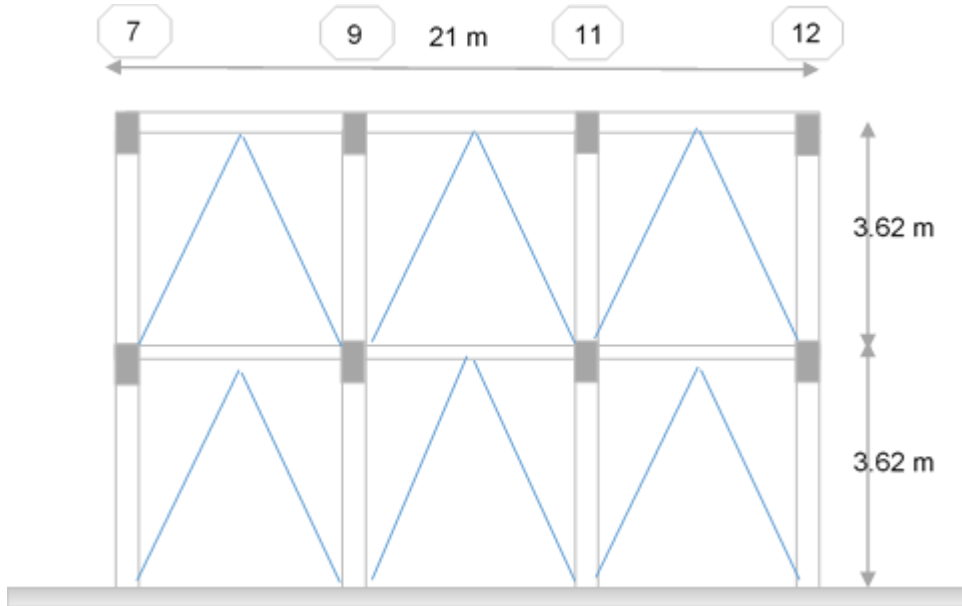
Tabla 6. Propiedades geométricas de las secciones propuestas para la escuela en Atlatlahuacan. (Guadarrama y De León, 2021).

	Columna	Viga	Unidades
A	0.2925	0.175	m ²
J	0.0133	4.07E-03	m ⁴
I33	0.0103	3.64E-03	m ⁴
I22	4.93E-3	1.78E-03	m ⁴
S33(+cara)	0.0317	1.46E-02	m ³
S33(-cara)	0.0317	1.46E-02	m ³
S22(+cara)	0.0219	1.1E-02	m ³
S22(-cara)	0.0219	1.1E-02	m ³
Z33	0.0475	2.19E-02	m ³
Z22	0.0329	1.53E-02	m ³
r33	0.1876	1.44E-01	m
r22	0.1299	1.01E-02	m

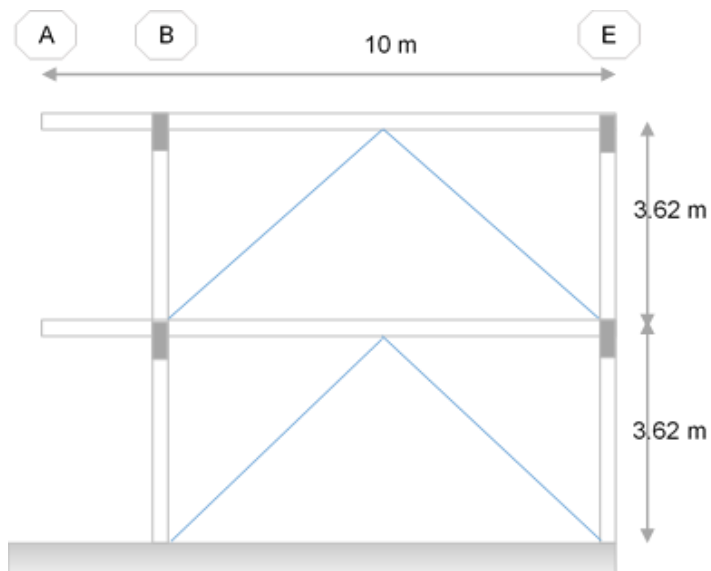
VII. c.3. Rehabilitación tres

La estrategia de modernización tres consistió en la adición de arrostriamientos en las bahías críticas; vea las figuras 14 y 15 para las vistas y la

sección transversal de los arriostramientos y la Tabla 7 para las propiedades estructurales del arriostramiento. Las secciones tubulares se verificaron contra pandeo local y global, (Guadarrama y De León, 2021).



a)



b)

Figura 14 Distribución de arriostramiento. a) Alzado posterior b) alzado lateral

Propuesta de rehabilitación por daños sísmicos. Evaluación de riesgo sísmico y estrategias de prevención.

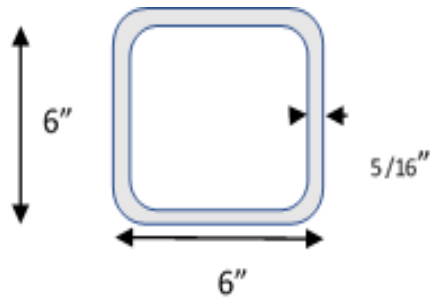


Figura 15 Sección del arrostriamiento propuesta

Tabla 7. Propiedades geométricas de las secciones propuestas para la escuela en Atlatlahuacan. (Guadarrama y De León, 2021).

Propiedades geométricas		
A	4.58 E-3	m ²
J	2.39 E-05	m ⁴
I33	1.60 E-05	m ⁴
I22	1.60 E-05	m ⁴
S33	2.1 E-04	m ³
S22	2.10E-04	m ³
Z33	2.48E-04	m ³
Z22	2.48E-04	m ³
r33	0.059	m ³
r22	0.059	m ³

VII. d. Costo de rehabilitación

El costo de las tres alternativas de modernización se estimó mediante procedimientos clásicos de costo unitario, incluidos materiales, mano de obra y otros costos pertinentes; La Tabla 8 muestra los resultados. (Guadarrama y De León, 2021).

Tabla 8. Costo normalizado de trabajos de rehabilitación para cada escuela. (Guadarrama y De León, 2021).

	Tehuacán	Atlatlahuacan	Tétela del Volcán
R₁	0,010	0,006	0,017
R₂	0,006	0,005	0,011
R₃	0,015	0,008	0,028

VII. e. Probabilidades de falla reducidas después de la rehabilitación.

Para el primer reacondicionamiento se utilizaron ángulos de acero, para la segunda se propuso un incremento en la sección de concreto y acero de refuerzo; y para el tercero se propuso la colocación de arriostamiento. Reevaluando las respuestas estructurales y las probabilidades de falla local, para las tres escuelas y las tres alternativas de modernización, se calcularon las nuevas probabilidades de falla global; vea los resultados en la Tabla 9, (Guadarrama y De León, 2021). Se corroboró que el índice de confiabilidad de los elementos rehabilitados fuese menor que 3 de acuerdo a la norma ISO 2394.

Tabla 9. Probabilidades de falla calculadas tomando en cuenta la rehabilitación. (Guadarrama y De León, 2021).

Escuela	P_f		
	Propuesta 1	Propuesta 2	Propuesta 3
Atlatlahuacan	0.00289	0.00295	0.00293
Tetela del volcán	0.00287	0.00287	0.00292
Tehuacán	0.002312	0.00262	0.00263

VIII. DISCUSIÓN

VIII. a. Costo de las consecuencias de falla y elección de la técnica de reparación.

El costo de las consecuencias de daños / fallas, C_D , incluye el costo de los contenidos dañados, C_C , el costo de trasladar las actividades educativas a otras instalaciones mientras se realizan las reparaciones / reconstrucción C_e , el costo de las lesiones con C_{in} , y el costo de las posibles muertes, C_F , (se utilizó un horario hábil debido a que es de nuestro interés conocer el caso crítico) y, de acuerdo con la ecuación (8). (Guadarrama y De León, 2021).

La modernización elegida corresponde al costo mínimo esperado del ciclo de vida entre todas las alternativas propuestas; es decir, $E(C_L)$ se evalúa para estas alternativas, a través de la ecuación (8) donde el valor presente del costo de daño/falla C_D^p se obtiene en términos de los costos de daño/falla C_D y el factor de valor presente PVF :

$$PVF = (1 - \exp(-rT))/r \quad (9)$$

donde $r = 8\%$ es la tasa de interés anual neta y $T = 50$ años la vida útil del diseño de la escuela, (De León et al, 2021).

La Tabla 10 muestra los costos normalizados del ciclo de vida esperados para las alternativas propuestas, (Guadarrama y De León, 2021).

Propuesta de rehabilitación por daños sísmicos. Evaluación de riesgo sísmico y estrategias de prevención.

Tabla 10. Costos normalizados estimados del ciclo de vida esperado para las alternativas de reparación de cada escuela. (Guadarrama y De León, 2021).

	Tehuacán	Atlatlahuacan	Tétela del Volcán
R₁	0,036	0,070	0,125
R₂	0,041	0,072	0,128
R₃	0,041	0,071	0,131

IX. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

- Se propone un procedimiento basado en la confiabilidad y los costos del ciclo de vida esperado para comparar la efectividad de las alternativas de rehabilitación en escuelas ubicadas en zonas con peligro sísmico, (Guadarrama y De León, 2021).
- El procedimiento considera, de manera explícita, el costo de las consecuencias de las fallas y las incertidumbres involucradas haciendo énfasis en las del peligro sísmico, (Guadarrama y De León, 2021)
- La rehabilitación escogida depende del nivel de exposición sísmica por lo cual una selección más conservadora corresponde al alto nivel sísmico y al nivel de las consecuencias de la falla, (Guadarrama y De León, 2021).
- La probabilidad de falla se redujo al menos 10 veces respecto a la probabilidad de falla calculada bajo condiciones de falla.
- La probabilidad de falla bajó de 0.032 hasta 0.00289 en Atlatlahuacan, en Tétela del Volcán de 0.041 hasta 0.00287, y en Tehuacán de 0.026 a 0.002312. (Guadarrama y De León, 2021).
- Para las escuelas consideradas aquí, en donde gobernó como modo de falla el momento flexionante, el esquema de modernización que menor costo presentó fue la rehabilitación con ángulos de acero (propuesta 1). (Guadarrama y De León, 2021).
- En la escuela de Tetela del Volcán se recomienda verificar que exista una junta de celotex o algún material similar entre los muros y las columnas, para evitar el daño por efecto de columna corta. (Guadarrama y De León, 2021).
- Se recomienda extender el procedimiento para considerar otros tipos de estructuras escolares y otras zonas sísmicas a las aquí estudiadas, para generar recomendaciones para todo el país. (Guadarrama y De León, 2021).

X. REFERENCIAS.

Alcocer S. (2021) *Rehabilitación sísmica de la infraestructura física educativa de México. Guía Técnica*. II-UNAM, INIFED, Banobras.

Alcocer S. (2021) *Evaluación postsísmica de la infraestructura física educativa de México. Vol. II-UNAM, INIFED, Banobras.*

http://www.resilienciasismica.unam.mx/docs/Evaluacion_Guia_TecnicaDIGITAL130221.pdf

Ang, A.H.-S. y Tang W. H. (2007). *Probability Concepts in Engineering Planning and Design Emphasis on Applications to Civil and Environmental Engineering*, Vol. I, 2nd. Edition. John Wiley and Sons, ISBN-13: 978-0471720645.

Ang, A.H.-S. y De Leon, D., *Determination of optimal reliabilities for design and upgrading of structures*. Structural Safety, Vol. 19A, pp. 91-103, 1997.

American Society of Civil Engineers (ASCE/SEI 41-13, 2019), *Seismic evaluation and retrofit of existing buildings*, Page 255, Virginia, USA. DOI: 10.1061/9780784412855

Bazán, E. y Meli, R. (2001), *Diseño sísmico de edificios*, Ed. Limusa, Distrito Federal, México.

Bojórquez, J, S E Ruiz, B Ellingwood, A Reyes-Salazar y E Bojórquez (2017), "Reliability-based optimal load factors for seismic design of buildings", *Engineering and Structures*, No. 151. pp. 527-539. <https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2017.08.046>.

Bozzo, L. M. y Barbat, A. H. (2004), *Diseño sismorresistente de edificios*. Técnicas convencionales y avanzadas, Ed. Reverté, Barcelona, España.

D'Ayala D., Nassirpour A. and Galasso C. (2020) *Comparative analysis of retrofitting strategies to reduce seismic loss of school facilities*. Procs. of the 17th. World Conference on Earthquake Engineering, Sendai, Japan.

Del Vecchio C., Frascadore R., Menna C., Mauro G. M., Di Ludovico M., Di Sarno L., Bianco N., Prota A. and Dolce M. (2021). *Towards the seismic and energy retrofitting of existing school buildings via an integrated design procedure*. Procs. of the 17th. World Conference on Earthquake Engineering, Sendai, Japan.

De León-E. D. e Ismael-H. E. (2019) *Reliability-based procedure for optimal repair of steel frame-masonry walls structures for schools with seismic damage*. Enviado a Earthquakes and structures, Techno Press.

De León-E. D. (2010) *Basis for Risk Management of bridges exposed to seismic loading*. Procs. of the 5th. IABMAS, Philadelphia, Pennsylvania, USA

De León-E. D y Guadarrama, A.D. (2020) *Towards a resilient design and retrofit of schools in Mexico*. Procs. 17th World Conference on Earthquake Engineering, Sendai, Japan.

De León-E. D, Ang. Alfredo y Guadarrama, A.D. (2021). Reliability-based selection of retrofit Works for schools under seismic hazard. *Natural Hazards Review*. Aceptado.

Esteva, L. y Díaz, L. O. J., García-Pérez J., Sierra G. e Ismael E. (2002), "Life-cycle optimization in the establishment of performance-acceptance parameters for seismic design", *Structural Safety*, 24 (2- 4: Volumen especial), pp. 187-204.

Furlong, R.W., C-T Hsu y S.A. Mirza, (2004), *Analysis and design of concrete columns for biaxial bending*, *ACI Materials Journal*. 101. 413-423. DOI:10.14359/13101

Gobierno de la Ciudad de México (2017) *Normas Técnicas Complementarias, Reglamento de Construcciones para la Ciudad de México*. México.

Gobierno del Estado de Morelos. (2020) *Reglamento de construcción y seguridad estructural para el estado de Morelos*. Cuernavaca, Morelos.

Propuesta de rehabilitación por daños sísmicos. Evaluación de riesgo sísmico y estrategias de prevención.

Guadarrama, A.D. y De León-E, D. (2021) Propuesta de rehabilitación por daños sísmicos. Evaluación de riesgo sísmico y estrategias de prevención. (2021). Ingeniería Estructural Revista de las Fuerzas Armadas Ecuatorianas. En revisión.

Gutiérrez, C., Quaas, R., Ordaz, M., Guevara, E., Muriá, D. y Krishna, S. (2011), *Sismos*. Serie Fascículos, 5a ed., Centro Nacional de Prevención de Desastres, Distrito Federal, México.

González Costa Zacarias, *Verificación de la fiabilidad estructural en estructuras ejecutadas mediante metodología probabilista*. Universidad de Coruña. 2016.

Hernández U., Pérez R. L. E., Aguilera M. D., Alarcón N. A., Albavera C. M., Arzola, I., Fortunio J., García C. J., Hernández G., García A. M. N., Picazo G. Y., González D. P. N., Ramírez A. R., Ruedas M. A. R. (2016). C.1.3: *Manual de Diseño de Obras Civiles*, CFE.

Instituto de Ingeniería de la UNAM. Base de datos de registros acelerográficos de la RAII-UNAM. (2021). <https://aplicaciones.iingen.unam.mx/AcelerogramasRSM/RedAcelerografica.aspx>

Instituto Nacional de la Infraestructura Física Educativa (2016). *Guía para elaborar o actualizar el Programa Escolar de Protección Civil*. <http://www.seducoahuila.gob.mx/proteccioncivilescolar/assets/guia-programa-escolar-de-proteccion-civil.pdf>.

Morales González, Edwin. (2019) *Tiempos de recuperación estructural para la evaluación de la resiliencia sísmica en escuelas del sector público*, tesis que para obtener el título de Licenciado en Ingeniería Civil.

Ramírez, R. (2017). *El sistema escolar ante los sismos de septiembre de 2017*. Bibliotecadigital.senado.gob.mx

Ruiz-García, Jorge. (2021). *Seismic performance of nonconforming Mexican school buildings under mainshock-aftershock sequences*. Conference: The 2021 World Congress on Advances in Structural Engineering and Mechanics (ASEM21)At: GECE, Seoul, Korea.

Rosenblueth E. (1986) *Optimum reliabilities and optimum design*, *Structural Safety* 3(2), pp. 69-83.

Sánchez Correa, M e Islas Arredond0, I.(2017). Recuento de los daños 7S y 19S: a un mes de la tragedia. Senado de la República. Bibliotecadigitalbd.senado.gob.mx

Singh, S. y Ordaz, M. G. (1994), *Sismicidad y movimientos fuertes en México: Una visión actual*, Centro Nacional de Prevención de Desastres, Distrito Federal, México.

Sousa I., Falcão M. R., Castro J. M. and Bento R. (2020). *Assessment of retrofitting techniques for seismically vulnerable RC buildings in Portugal*. Procs. of the 17th. World Conference on Earthquake Engineering, Sendai, Japan.

Technical Committee ISO/TC 98/SC 2. (2015), *General principles on reliability for structures ISO 2394*. Ginebra, Suizterland

Valdés González, Jesús. (2007) *Metodología para la estimación del peligro sísmico con base en la teoría de vibraciones aleatorias*. Ciencia Ergo-Sum, Vol. 15-1. Pag. 73-82. Universidad Autónoma del Estado de México. Toluca, México.