



Resilience of Structural Systems to Seismic Events: Determined as Economic Losses for Their Rehabilitation

Hector Aroquipa Velasquez

EasyChair preprints are intended for rapid dissemination of research results and are integrated with the rest of EasyChair.

February 27, 2021



XVII Congresso Internacional sobre Patologia e
Reabilitação das Construções

XVII Congreso Internacional sobre Patología y
Rehabilitación de las Construcciones

XVII International Conference on Pathology and
Constructions Rehabilitation

FORTALEZA (Brasil), 3 a 5 de junho de 2021

Resiliencia de sistemas estructurales ante eventos sísmicos: Determinadas como pérdidas económicas para su rehabilitación

Resilience of structural systems to seismic events: Determined as economic losses for their rehabilitation

Hector AROQUIPA¹

¹ Universidad Nacional Federico Villareal y Universidad Nacional del Altiplano, Lima, Perú, haroquipa@unap.edu.pe y 2018042316@unfv.edu.pe

Resumen: La presente investigación describe la metodología y resultados de la resiliencia que experimenta un conjunto de sistemas estructurales, aplicados a edificaciones escolares característicos del Perú (previas a 1997) denominados 780PRE (41,000 centro). Los últimos sismos ocurridos en el Perú han demostrado que los edificios educativos construidos antes de 1997 son altamente vulnerables. Sin embargo, las estructuras construidas con la norma del 2003 tienen mejor desempeño sísmico dado que mejora los requerimientos de rigidez y resistencia. En el presente trabajo se revisó el diseño de los edificios escolares 780PRE siguiendo las indicaciones de La Norma Peruana (NDSR-2016). No obstante, estas edificaciones, debido a que en su concepción se ostentó de códigos de diseño permisible a la flexibilidad (NDSR-97), no posee una capacidad y rigidez adecuada ante movimientos sísmicos ocasionales y llevándolos al colapso, estableciendo así que su grado de resiliencia es nulo. Por lo cual, se plantea varios niveles de reforzamiento incremental que mejoren el desempeño en función a la vulnerabilidad y su índice de resiliencia. La metodología considerada se divide en dos partes. La primera parte, es la obtención y evaluación de las funciones de vulnerabilidad para cada nivel de reforzamiento incremental; mediante la modelación 3D y simplificación a un sistema de un grado de libertad usando la curva de capacidad, y obtención de los parámetros de demanda sísmica (EDP) a través del método del análisis dinámico incremental (IDA) para un conjunto de registros sísmicos, definiendo las funciones de fragilidad para cada componente. La segunda parte, se centra en la evaluación económica mediante los indicadores de viabilidad de los reforzamientos según su índice de resiliencia (costos y tiempos de reparación y puesta en marcha). Los resultados muestran, en su estado original, evidencia la flexibilidad de las estructuras y presencia de columnas cortas en su rango elástico, fallando antes de fluir (38% y 75% de daños para sismos ocasionales y raros) con índice de resiliencia del 25 al 30%. Por otro lado, en los niveles de reforzamiento incremental mejoran su desempeño 172% y 165% en resistencia y rigidez respectivamente en su nivel final para sismos ocasionales (3.5% de daño) y raros (12.5% de daños). Consecuentemente, las estructuras son menos vulnerables y mejoran su índice de resiliencia al 85%, siendo estas viables y altamente rentables en el reforzamiento.

Palavras-chave: Resiliencia, Vulnerabilidad, Reforzamiento Incremental, y Viabilidad económica.

1. Introducción.

En la actualidad, el estudio de la vulnerabilidad sísmica es una actividad principal en la evaluación del riesgo sísmico, asimismo, estos resultados cuantifican el grado de resiliencia del sistema estructural o un conjunto de sistemas estructurales, la definición de planes de mejoramiento de la infraestructura expuesta, la cuantificación de la fragilidad social asociada a las pérdidas físicas en edificaciones y la resiliencia de las comunidades. La cuantificación de los daños estructurales para la obtención de la vulnerabilidad sísmica se

puede realizar a partir de la tipificación de los portafolios de edificaciones en edificaciones arquetipo (L. Yamin et al., 2014; Yamín Lacouture, 2016). De esta manera, se pueden representar los daños en un portafolio entero a través de curvas de vulnerabilidad representativas por ende poder determinar el grado de resiliencia de un tipo de edificación sometido a un evento sísmico característico (Aroquipa & Yamin, 2016). Respecto al análisis estructural y la cuantificación detallada de la vulnerabilidad, distintas referencias presentan metodologías analíticas consistentes para el desarrollo de curvas de vulnerabilidad basada en pérdidas económicas (L. Yamin et al., 2014; Yamín Lacouture, 2016) y a partir de ello poder determinar el grado de resiliencia de los sistemas estructurales.

Los avances que se realizan continuamente en el diseño de estructuras se aplican básicamente a las estructuras nuevas, y en menor medida a la rehabilitación-reforzamiento de estructuras existentes. Sin embargo, el número de estructuras existentes es considerablemente mayor en comparación con el número de estructuras en proceso de concepción y/o construcción. Además, para reducir las pérdidas debida a los sismos, es necesario mejorar el comportamiento de las existentes, dado que en su mayoría son estructuras vulnerables (Mahini et al., 2016). Adicionalmente, un número representativo de las edificaciones existentes pertenecen a portafolios de edificaciones indispensables como lo son los centros educativos, centros de salud, instituciones gubernamentales, etc. Considerando esto, deben definirse soluciones de reducción de la vulnerabilidad estructural (Yépez et al., 1996) las cuales pueden proyectarse hacia infraestructuras específicas.

El presente estudio, se enfoca en caracterizar el comportamiento sísmico del portafolio de edificaciones escolares (concebido como edificaciones indispensables) y las posibles alternativas de reforzamiento utilizando una técnica novedosa en términos costos-eficientes la cual se denomina “reforzamiento incremental” (FEMA, 2012). Como caso de estudio, se escogieron las edificaciones de concreto reforzado características de la infraestructura educativa del Perú, denominados 780-PRE (sistema modular de aulas de 7,80 m x 7,80 m, construidos antes de 1997). En este país, alrededor de 40,000 centros educativos fueron construidos utilizando dicho sistema (Universidad de los Andes, 2016). Por otro lado, al lograr mejorar el comportamiento estructural indirectamente se estaría determinado el grado de resiliencia, dependiendo esta de la intensidad del evento sísmico, que para lo cual se determina los costos de reparación, reposición y tiempos de interrupción.

La revisión de estas edificaciones se realizó utilizando la normativa peruana con la cual se diseñó (NDSR-97), la normativa actual (NDSR-2016) y mediante las referencias internacionales de referencia para el análisis no lineal estático (American Society of Civil Engineers, 2014). La metodología utilizada se resume en las siguientes actividades: 1) modelación de la edificación como un sistema de múltiples grados de libertad (MDoF); 2) definición y modelación del comportamiento no lineal de los elementos estructurales mediante plasticidad concentrada (Agency, 2006; UNISDR, 2005); 3) Cálculo de la curva de capacidad de la edificación bajo estudio; 4) Cálculo de los puntos de comportamiento para la amenaza sísmica definida (Caneva et al., 2004); 5) Definición de la intensidad media de colapso (Andrić & Lu, 2017; Omar D Cardona et al., 2003) utilizando metodología simplificada (Chopra & Chintanapakdee, 2004; Chopra & Goel, 2002). 6) Determinación de las funciones de vulnerabilidad; 7) estimación de riesgo sísmico por ende el grado de resiliencia sísmica. Esta metodología fue aplicada para los siguientes modelos: la edificación original teniendo en cuenta la interacción de los pórticos con los muros de albañilería (OCM); edificación original sin interacción pórticos-muros (OSM); y las fases de reforzamiento incremental propuestas, fase 1 - dos (2) marcos de acero (RA 2M), fase 2 – cuatro (4) marcos de acero (RA 4M) y fase 3 – seis (6) marcos de acero (RA 6M).

2. Metodología.

2.1. Descripción del Edificio Característico

El edificio de estudio (780-PRE) es una estructura con un sistema estructural específico para cada dirección principal. En la dirección transversal el sistema de resistencia sísmica se basa en muros de mampostería confinada; en la dirección longitudinal, en pórticos resistentes a momentos de concreto reforzado. La dirección longitudinal es la “dirección débil” de la edificación puesto que presenta problemas de comportamiento sísmico debido a la alta flexibilidad, baja resistencia de los materiales de diseño y la

presencia de columna corta generada por la interacción entre la columna con los muros no estructurales. Tal fenómeno fue evidenciado en el sismo de Ica (Ica, Perú – Mw=7.9) (Tavera et al., 2007), en el cual se presentaron daños severos sobre las columnas en la dirección flexible de estas estructuras.

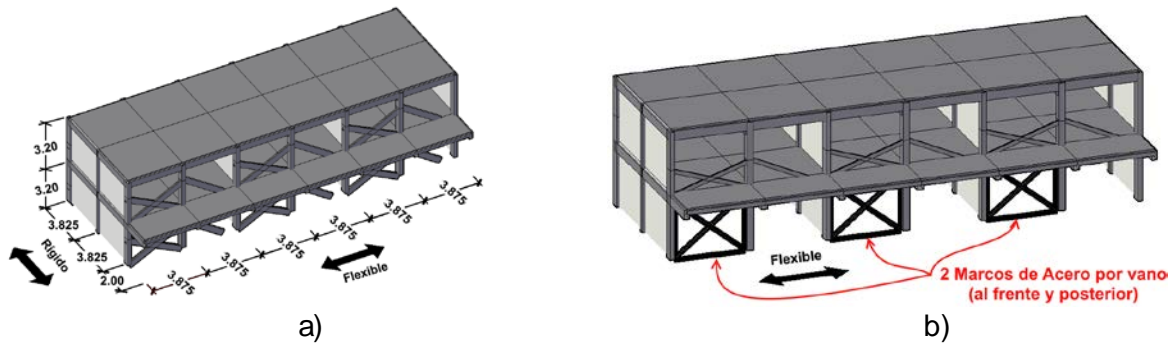


Figura 1. Esquemas del modelo estructural en dirección longitudinal; a) Modelo OCM y b) Modelo RA6M.

La edificación se modeló en el software SAP2000® (CSI, 2014) mediante elementos tipo frame para las columnas y vigas del sistema de resistencia sísmica. La interacción de los pórticos con los muros de mampostería se modela mediante el método del puntal equivalente, utilizando las recomendaciones del capítulo 11 de la normativa ASCE 41-13 para la rigidez y resistencia. El comportamiento no lineal de los componentes estructurales (viga y columna) y no estructurales (muros de mampostería), se considera mediante rótulas de plasticidad concentrada como se indica en el capítulo 10 del ASCE 41-13. Para el caso de los puntales equivalentes de mampostería, la no linealidad es considerada mediante rótulas axiales (Carrillo, 2004; S Otani, 1974; Shunsuke Otani, 2000). La capacidad máxima de los elementos a flexión, cortante y axial fueron calculados a partir de las normas de diseño del Perú. Los valores de resistencia de los materiales utilizados en el modelo son los especificados típicamente en los diseños de estas edificaciones escolares. La Figura 1 a) presenta el esquema del modelo estructural para la condición original considerando los puntales de mampostería.

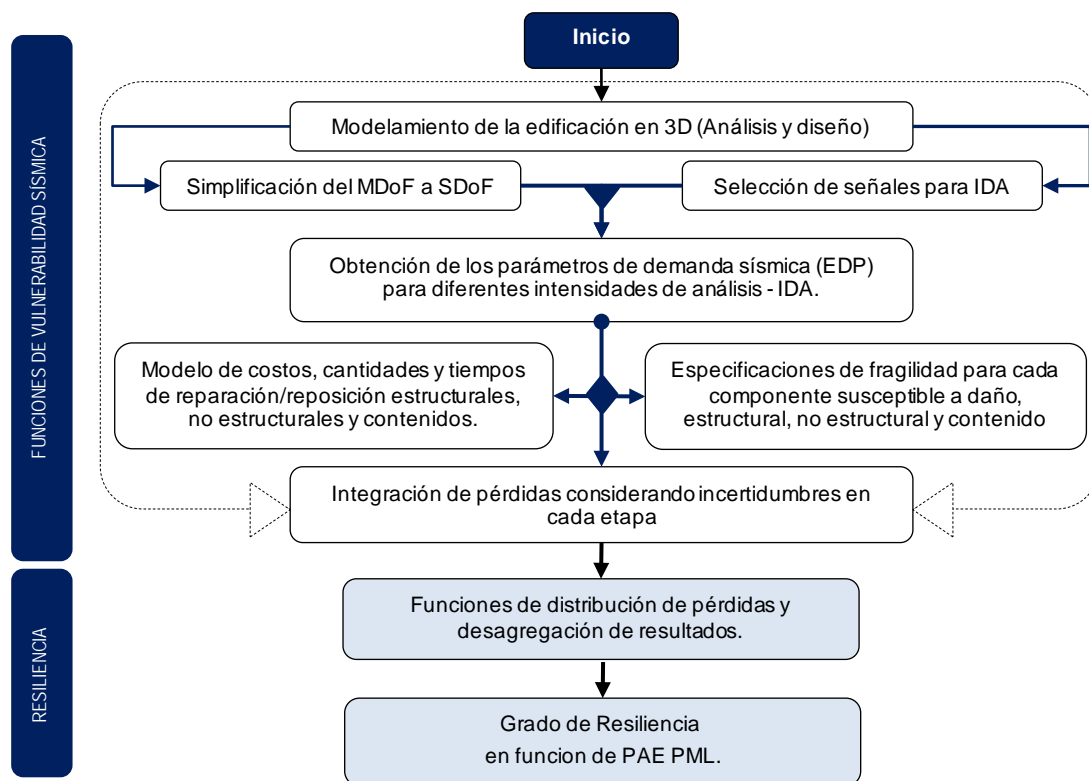


Figura 2. Metodología para obtener el grado de resiliencia

2.2. Metodología implementada

La metodología seguida es como sigue: se analiza el comportamiento de la edificación como un sistema de múltiples grados de libertad (MDoF), refinado para los propósitos del trabajo, para la edificación original con muros (OCM), edificación original sin muros (OSM), y las de reforzamiento con marcos de acero que son de 2 marcos (RA 2M), 4 Marcos (RA 4M) y 6 marcos (RA 6M). planteadas estas últimas como reforzamiento incremental. Seguidamente se hace la simplificación a un sistema de un grado de libertad para los 5 modelos (SDoF) (H, Aroquipa et al, 2017), se seleccionan un conjunto de señales que mejor representen la sismicidad del lugar, se define los componentes susceptibles a daño y las respectivas funciones de fragilidad con sus respectivos costos y tiempos de reparación – reposición, determina los parámetros de demanda de ingeniería (EDP), determina las funciones de vulnerabilidad, se establece la amenaza (según registros sísmicos) exposición y vulnerabilidad para luego determinar el riesgo sísmico en la plataforma CAPRA (Omar Darío Cardona et al., 2014). Para aplicar el método simplificado de evaluación propuesto, se debe de seguir el procedimiento que muestra la figura 2.

2.3. Metodología para el análisis de riesgo

La evaluación probabilista de riesgo se realizó utilizando la plataforma CAPRA-GIS (Barbat et al., 2015; O. D. D. Cardona et al., 2012; Latina, 2009; L. E. Yamin et al., 2014) , para lo cual, se toma la base de datos más reciente disponible en el país, amenaza sísmica y exposición, habiendo obtenido las funciones de vulnerabilidad de las edificaciones, que hacen parte de la base de datos para la evaluación del riesgo sísmico del país, en cuanto a centros educativos tipo 780PRE. en CAPRA-GIS los componentes mencionados se integran-convolución de la amenaza con la vulnerabilidad de los elementos expuestos, con el fin de evaluar el riesgo o las consecuencias potenciales. Así mismo, los análisis desarrollados permiten estimar las pérdidas económicas esperadas asociadas a los eventos sísmicos probables y a la vulnerabilidad de las edificaciones. La valoración del riesgo se presenta en términos de: porcentaje de afectación física de las edificaciones (en términos de valor anual esperado o para un escenario específico), pérdida anual esperada (PAE), pérdida económica máxima probable (PML), todo ello para cada tipo y portafolio estudiado (Omar D. Cardona et al., 2010; Omar D Cardona et al., 2003)

3. Resultados.

Como se puede observar el modelo OCM presenta una falla frágil; el sistema OSM, evidencia la alta flexibilidad de la estructura y una ductilidad limitada, tal como se predijo con anterioridad. Por otro lado, los niveles de reforzamiento incremental propuestos (RA2M, RA4M y RA6M), muestran el progreso de mejora de la resistencia, rigidez y ductilidad del sistema estructural. Adicionalmente, se consiguen los objetivos de comportamiento propuestos para el “punto de comportamiento objetivo”, previniendo el colapso de la edificación desde el Nivel 1 de reforzamiento.

3.1 Análisis PushOver

El análisis pushover se presenta de manera resumida para la totalidad de las estructuras definidas en el numeral 1 del presente artículo. Los puntos de comportamiento para distintas aceleraciones del terreno y para el “punto de comportamiento objetivo” se presentan en la Figura 3b. La Figura 3c evidencia la verificación adicional realizada para garantizar que la capacidad a cortante de las columnas no se sobrepase para el “punto de comportamiento objetivo”. No se encuentran en esta última los valores de referencia para los modelos OCM y OSM dado que la edificación no alcanza este nivel de comportamiento. La Figura 3d presenta la variación de la rigidez y resistencia global de la edificación a medida que se van realizando las modificaciones sobre la estructura. La estructura base para el análisis es la OCM, que es la condición de la mayoría de los locales escolares del Perú (Universidad de los Andes, 2016). Dado que el primer paso recomendado es dilatar los muros de mampostería de los pórticos, la estructura sin presencia de muros (OSM) es el segundo estado. Seguido de esta, se encuentran los tres niveles de reforzamiento.

3.2 Análisis No Lineal Simplificado

Otra medida de comparación entre la estructura original y los niveles de reforzamiento es la intensidad media para la cual se consigue el colapso. Para calcular la intensidad media de colapso es necesario tener en cuenta la incertidumbre de la amenaza, el comportamiento dinámico de la estructura, la degradación cíclica de los componentes de la edificación, entre otros (Vargas Alzate, 2013). La incertidumbre en la amenaza se consigue mediante la selección de N señales sísmicas consistentes con la amenaza sísmica donde se encuentra la edificación. Estas señales son escaladas utilizando un parámetro de intensidad sísmica (PGA, Sa(T1), entre otros) de manera progresiva para realizar el análisis dinámico no lineal contra el tiempo de la estructura, considerando la degradación cíclica. Este método se conoce como el análisis incremental dinámico “AID” (Meslem et al., 2015) y permite estimar el colapso de las edificaciones. Se requiere definir el “paso” con el cual se realiza el escalamiento para obtener mejor precisión de la intensidad para la cual ocurre el colapso.

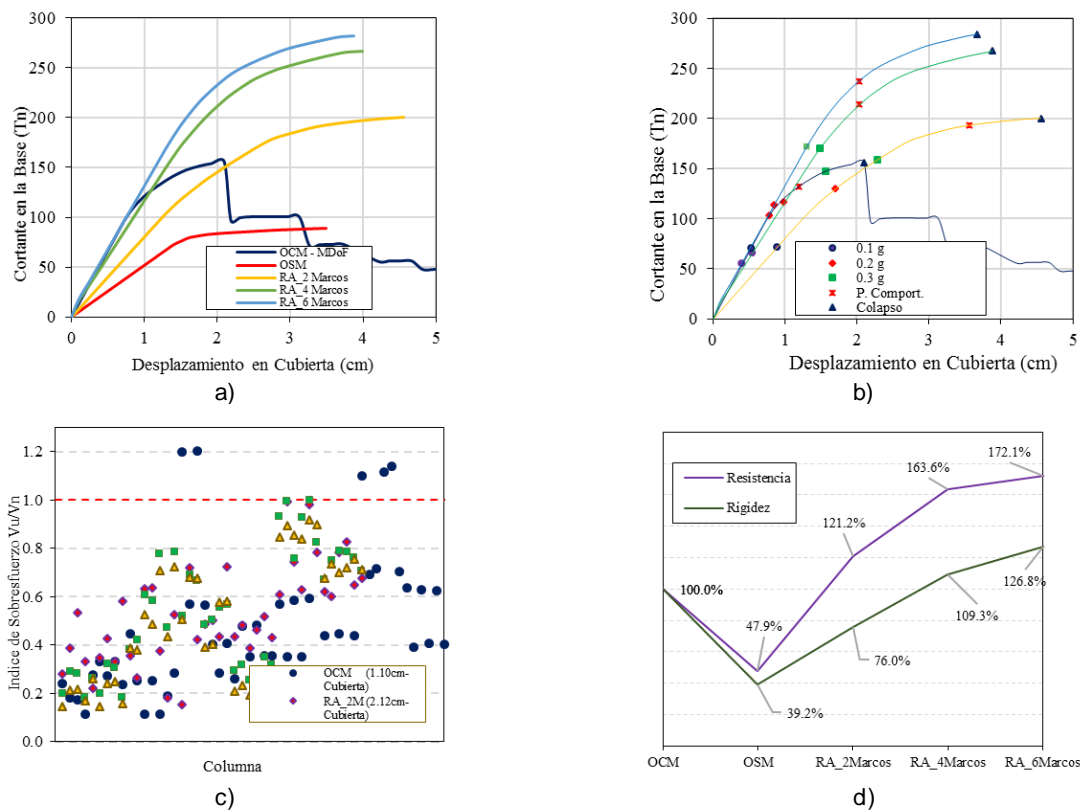


Figura 3. Esquemas del modelo estructural en dirección longitudinal; a) Push-over estructuras, b) Puntos de comportamiento, c) Índices de sobre esfuerzo en punto de comportamiento y d) Variación rigidez y resistencia global.

3.3. Cálculo de la intensidad media de colapso

Se procede a realizar los AID sobre cada una de las estructuras para cada una de las señales sísmicas escaladas. El parámetro de intensidad sísmica utilizado en la presente investigación para el escalamiento de señales es el Sa(T1). Se escalaron las señales para cada edificación de acuerdo a su periodo estructural. El “paso” de Sa(T1) definido es de 0.05 g, desde 0 g hasta 2 g, obteniendo un total de 40 intensidades para cada señal de análisis. De esta manera, se requirió procesar un total de 4400 señales para el total de edificaciones (40 intensidades de escalamiento x 22 señales seleccionadas x 5 modelos de análisis).

De cada análisis realizado se obtiene la deriva máxima de cubierta para la respuesta del modelo SDoF. A partir de los valores de intensidad sísmica para el cual ocurre el colapso se calcula el valor la intensidad media de colapso, incluyendo la desviación estándar asociada. Este sirve para caracterizar cada una de las estructuras, lo anterior se puede observar en la Figura 6.

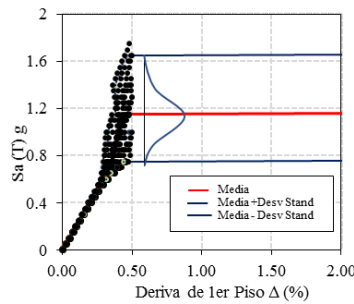


Figura 6. Intensidad media de colapso para el modelo RA 2M.

Teniendo en cuenta lo anterior, las máximas derivas de cubierta para cada intensidad sísmica seleccionada, para cada estructura se puede observar en La Figura 4. Se define el colapso de la edificación cuando la curva AID se horizontaliza; es decir, el colapso se asume dado que la edificación presenta excesivas derivas a partir de una intensidad sísmica y no resiste la demanda impuesta por la aceleración del terreno. Se puede identificar que las alternativas de reforzamiento planteadas son adecuadas pues mejoran considerablemente el comportamiento sísmico de la edificación. Así mismo, se evidencia que la alternativa de 6 marcos no representa una mejoría considerable comparando con la alternativa de 4 marcos. Esto indica que este último nivel puede ser innecesario técnicamente.

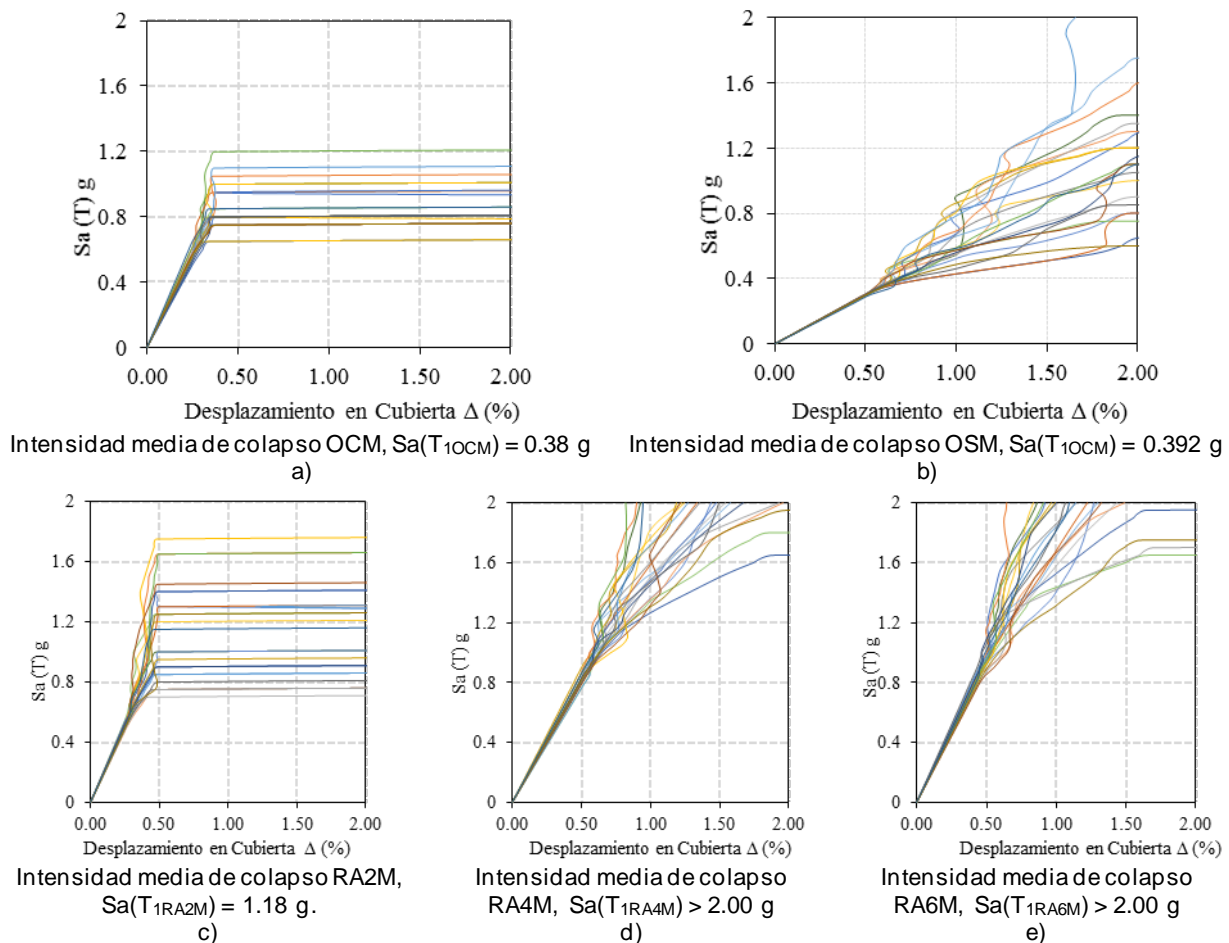


Figura 4. Análisis incremental dinámico. a) Modelo original con muros, b) Modelo original sin muros, c) Modelo reforzado dos marcos, d) Modelo reforzado cuatro marcos y e) Modelo reforzado seis marcos.

Los resultados muestran, en su estado original, evidencia la flexibilidad de las estructuras y presencia de columnas cortas en su rango elástico, fallando antes de fluir (38% y 75% de daños para sismos ocasionales y raros). Por otro lado, en los niveles de reforzamiento incremental mejoran su desempeño 172% y 165% en resistencia y rigidez respectivamente en su nivel final para sismos ocasionales (3.5% de daño) y raros (12.5%

de daños). Consecuentemente, las estructuras son menos vulnerables y se reducen el riesgo sísmico, siendo estas viables y altamente rentables en el reforzamiento.

3.4. Evaluación de las métricas y variabilidades del RI

El riesgo de pérdidas económicas se expresa en términos de la curva de excedencia de perdidas, de la pérdida anual esperada (perdida máxima probable – PML) para diferentes periodos de retorno, de la probabilidad específica de excedencia (E. de R. N.-A. Latina, 2011) y mediante la pérdida anual esperada (PAE) o prima anual justa. los resultados obtenidos, normalizados al valor máximo del PAE de una condición OCM, reduce al 5.4% y 4% con reforzamientos RA-4Marcos y RA-6Marcos.

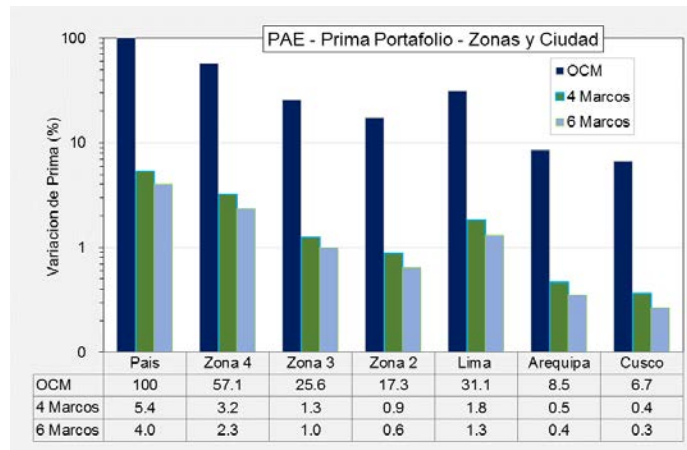
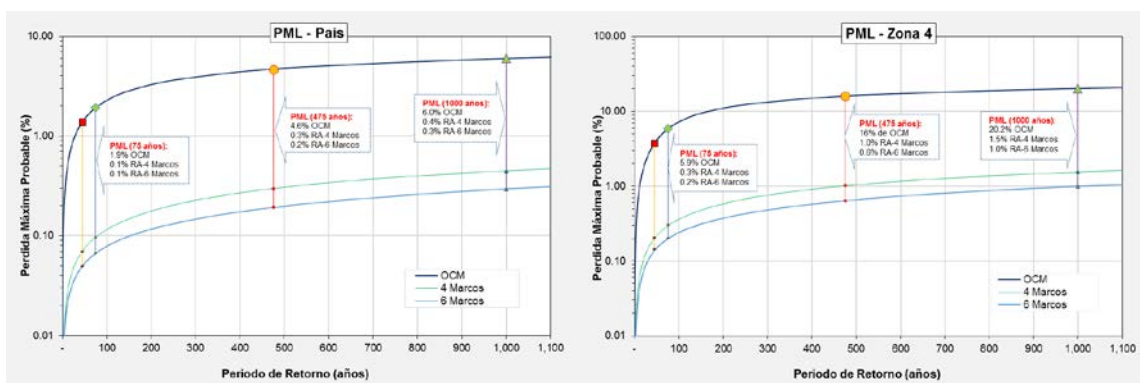


Figura 5. Reducción del PAE para los niveles de reforzamiento respecto a OCM por país, zonas y ciudades de análisis.

Como se indicó anteriormente, las curvas calculadas, figura 6, tiene toda la información necesaria para caracterizar el proceso de ocurrencia de eventos que produzcan pérdidas, para la edificación analizada y los niveles de reforzamiento. Donde, para una condición OCM normalizado en el valor expuesto total ya sea por país, zona o ciudad; la reducción del riesgo es adecuada de la condición OCM a la RA. Pero también, muestra desventajas económicas en el análisis a nivel país, puesto que la PML-país, para un periodo de retorno de 475 años OCM es de 4.6%, desarrollada los reforzamientos son del orden del 0.3% y 0.2% para RA-4Marcos y RA-6Marcos. Sin embargo, los resultados reflejan mejor las PML según la zona de exposición y concentración de estos tipos de edificaciones.



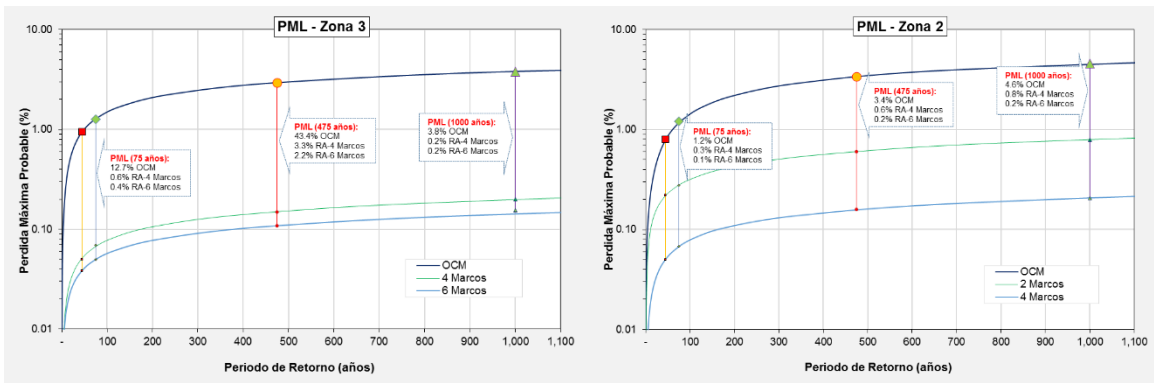


Figura 6. Reducción del PML para los niveles de reforzamiento respecto a OCM por país y zonas

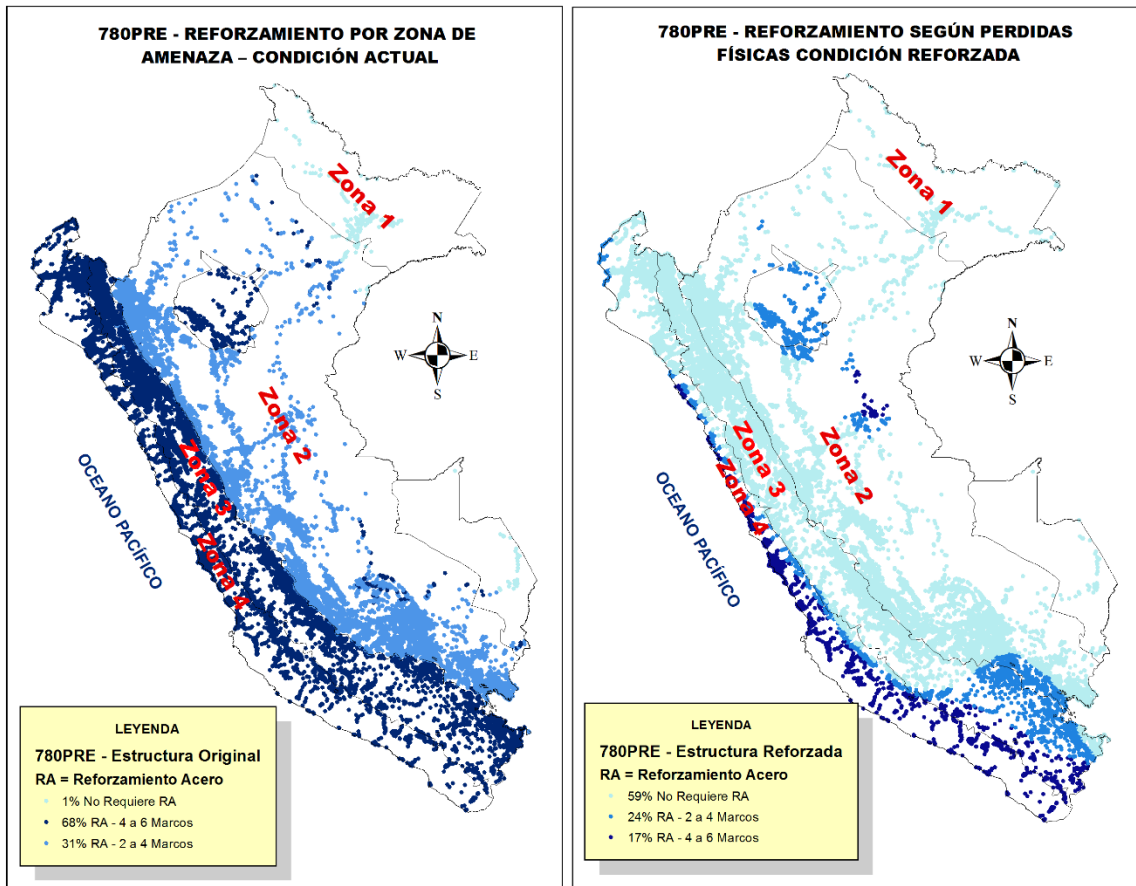


Figura 7. Mapa de Reducción del PML para los niveles de reforzamiento respecto a OCM por país y zonas

4. Conclusiones

El portafolio de edificaciones escolares en Perú tipo 780PRE tiene una alta vulnerabilidad lo que representa un riesgo significativo para la comunidad. Se identificó que este tipo de estructuras, cuando presentan dilataciones en los muros no estructurales, tienen problemas de alta flexibilidad, esto se refleja en un mecanismo de colapso dúctil. Por otro lado, cuando estos no se encuentran dilatados, presentan problemas de columna corta dando como resultado un mecanismo de falla frágil. Por lo anterior se define que esta infraestructura al ser reforzado incrementalmente se obtiene los grados de resiliencia satisfactorios al 180%. Para la evaluación de las alternativas propuestas que verifica que se cumplan los puntos de comportamiento establecidos en la norma peruana y que la intensidad media de colapso sea aceptable con relación a la demanda sísmica establecida.

Además, los resultados de las evaluaciones del riesgo probabilista de portafolios de edificaciones representativos con la metodología propuesta permite la verificación del comportamiento de tipos constructivos específicos ante eventos sísmicos, el análisis de la eficacia de regulaciones específicas de la normativa de diseño sismo resistente, la cuantificación de pérdidas económicas esperadas en escenarios específicos y la estimación de variables probabilistas de riesgo como son la pérdida anual esperada, la curva de excedencia de pérdidas y las pérdidas máximas probables para diferentes periodos de retorno. Estos parámetros proporcionan información útil para la toma de decisiones a nivel de instituciones del estado y la empresa privada incluyendo, entre otros, planes de contingencia y de atención de emergencias, la cuantificación de pérdidas anuales esperadas para efectos de categorización relativa del riesgo, la priorización de intervenciones en programas de reducción del riesgo, la cuantificación de medidas de protección financiera y transferencia del riesgo, la estimación de las pérdidas máximas probables y de las pérdidas anuales esperadas del portafolio, el análisis beneficio-coste de opciones de mitigación del riesgo y, en general, cualquier otra aplicación relacionada con la gestión del riesgo sísmico.

Agradecimiento

A todas las personas que colaboraron en el desarrollo de la investigación de manera directa o indirecta, en especial al asesor de investigación Luis Yamin.

Referencias

- Agency, F. E. M. (2006). *Techniques for the seismic rehabilitation of existing buildings*. FEMA.
- American Society of Civil Engineers. (2014). *Seismic Evaluation and Retrofit of Existing Buildings*. <https://doi.org/10.1061/9780784412855>
- Andrić, J. M., & Lu, D. G. (2017). Fuzzy methods for prediction of seismic resilience of bridges. *International Journal of Disaster Risk Reduction*, 22, 458–468. <https://doi.org/10.1016/j.ijdrr.2017.01.001>
- Aroquipa, H., & Yamin, L. (2016). *Evaluación de la vulnerabilidad sísmica de edificaciones en concreto reforzado mediante análisis dinámico no lineal simplificado* [Uniandes]. <http://hdl.handle.net/1992/13900>
- Barbat, A. H., Vargas, Y. F., Pujades, L. G., & Hurtado, J. E. (2015). Evaluación probabilista del riesgo sísmico de estructuras con base en la degradación de rigidez. *Revista Internacional de Métodos Numéricos Para Cálculo y Diseño En Ingeniería*. <https://doi.org/10.1016/j.rimni.2014.11.001>
- Caneva, A., Centro, R., Nariño, U. A., Jesús, E. De, Hurtado, S., Geografía, D. De, & Valle, U. (2004). *DE LA AMENAZA SÍSMICA PARA BOGOTÁ*.
- Cardona, O. D. D., Ordaz, M. G. G., Reinoso, E., Yamín, L. E. E., & Barbat, A. H. H. (2012). CAPRA - comprehensive approach to probabilistic risk assessment: international initiative for risk management effectiveness. *In Proceedings of the 15th World Conference on Earthquake Engineering - WCEE, 1*(SEPTEMBER), 1–10. http://www.iitk.ac.in/nicee/wcee/article/WCEE2012_0726.pdf
- Cardona, Omar D., Ordaz Schroder, M. G., Reinoso, E., Yamín, L., & Barbat Barbat, H. A. (2010). *Comprehensive approach for probabilistic risk assessment (CAPRA): international initiative for disaster risk management effectiveness*. <http://upcommons.upc.edu/handle/2117/10548>
- Cardona, Omar D, Hurtado, J. E., Duque, G., Moreno, A., Chardon, A. C., Velasquez, L. S., & Prieto, S. D. (2003). The notions of disaster risk: conceptual framework for integrated management. *Information and Indicators Program for Disaster Risk Management. Inter-American Development Bank, Manizales*.
- Cardona, Omar Darío, Ordaz, M. G., Mora, M. G., Salgado-Gálvez, M. A., Bernal, G. A., Zuloaga-Romero, D., Marulanda Fraume, M. C., Yamín, L., & González, D. (2014). Global risk assessment: A fully probabilistic seismic and tropical cyclone wind risk assessment. *International Journal of Disaster Risk Reduction*, 10(PB), 461–476. <https://doi.org/10.1016/j.ijdrr.2014.05.006>

- Carrillo, W. J. (2004). Modelación del comportamiento inelástico de pórticos de concreto con mampostería no reforzada. *Universidad de Los Andes*.
- Chopra, A. K., & Chintanapakdee, C. (2004). Evaluation of modal and FEMA pushover analyses: Vertically “regular” and irregular generic frames. *Earthquake Spectra*, 20(1), 255–271.
- Chopra, A. K., & Goel, R. K. (2002). A modal pushover analysis procedure for estimating seismic demands for buildings. *Earthquake Engineering and Structural Dynamics*, 31(3), 561–582. <https://doi.org/10.1002/eqe.144>
- FEMA. (2012). *Next-Generation Methodology for Seismic Performance Assessment of Buildings. Report No. FEMA P-58. Prepared by the Applied Technology Council (ATC) for the Federal Emergency Management Agency*.
- Latina, E. de R. N. A. (2009). ERN-AL. *Informe Técnico ERN-CAPRA-T1-5. Vulnerabilidad de Edificaciones e Infraestructura*.
- Mahini, S. S., Hadigheh, S. A., & Setunge, S. (2016). *Seismic resilience of retrofitted reinforced concrete buildings*. November, 222–230. <https://doi.org/10.14264/uql.2016.870>
- Meslem, A., Vamvatsikos, D., Porter, K., & Rossetto, T. (2015). *Guidelines for Analytical Vulnerability Assessment of Low / Mid-Rise Buildings*. FEBRUARY.
- Otani, S. (1974). Inelastic analysis of R/C frame structures. *Structural Division, ASCE*, 100, 1433–1449.
- Otani, Shunsuke. (2000). *Seismic Vulnerability Assessment Methods for Buildings in Japan*.
- Tavera, H., Bernal, I., & Salas, H. (2007). El sismo de Pisco del 15 de Agosto, 2007 (7.9 Mw) Departamento de Ica-Perú. *Informe Preliminar*.
- UNISDR, U. (2005). Hyogo framework for action 2005–2015: Building the resilience of nations and communities to disasters. *Extract from the Final Report of the World Conference on Disaster Reduction (A/CONF. 206/6)*, 380.
- Vargas Alzate, Y. F. (2013). *Análisis estructural estático y dinámico probabilista de edificios de hormigón armado. Aspectos metodológicos y aplicaciones a la evaluación del daño*.
- Yamin, L. E., Hurtado, A. I., Barbat, A. H., & Cardona, O. D. (2014). Seismic and wind vulnerability assessment for the GAR-13 global risk assessment. *International Journal of Disaster Risk Reduction*, 10(PB), 452–460. <https://doi.org/10.1016/j.ijdrr.2014.05.007>
- Yamin, L., Pulido, J., Hurtado, A., Reyes, J., Rincon, R., & Barbat, A. (2014). Evaluation of Seismic Code Specifications Using Static Nonlinear Analyses of Archetype Buildings. *10th U.S. National Conference on Earthquake Engineering*. <https://doi.org/10.4231/D3GT5FG3R>
- Yamín Lacouture, L. E. (2016). Riesgo sísmico de edificaciones en términos de pérdidas económicas mediante integración de costos de reparación de componentes [Universitat Politècnica de Catalunya]. In *TDX (Tesis Doctorals en Xarxa)*. <https://upcommons.upc.edu/handle/2117/96210#.X3j02iq6JR0.mendeley>
- Yépez, F., Barbat, H. A., & Canas, J. A. (1996). *Evaluación probabilista de la vulnerabilidad y riesgo sísmico de estructuras de hormigón armado por medio de simulación* [Centre Internacional de Mètodes Numèrics en Enginyeria (CIMNE)]. <https://upcommons.upc.edu/handle/2117/27736#.X3kFqQdIDVo.mendeley>