

CAPÍTULO 49.

REVISIÓN CRÍTICA DE LAS ESTRATEGIAS DE MITIGACIÓN DE FRAGILIDAD ESTRUCTURAL EN EDIFICACIONES DE HORMIGÓN ARMADO DE LIMA METROPOLITANA FRENTE A ESCENARIOS SÍSMICOS EXTREMOS

Víctor Homero Bardales Taculí¹
William Homero Bardales Chuquilín²
Wilson Misme Medina³

¹: Ingeniero Civil, Doctor en Ciencias.

 <https://orcid.org/0000-0002-6071-1352>

²: Ingeniero Civil, Magister en Recursos Hídricos.

 <https://orcid.org/0009-0002-2350-0123>

³: Ingeniero Civil, Magister en Ingeniería Civil.

 <https://orcid.org/0009-0002-7551-5626>

RESUMEN

Este capítulo de revisión narrativa evalúa la eficacia de las estrategias de mitigación de fragilidad estructural en edificaciones de hormigón armado de Lima Metropolitana ante escenarios sísmicos extremos. A través del análisis de 47 estudios publicados entre 1990 y 2024 se identificó que el 68 % de los inmuebles presenta fragilidad por cortante en columnas cortas, siendo el refuerzo local (camisas de acero y FRP) eficaz para alcanzar el nivel Life-Safety bajo eventos de 475 años, pero insuficiente para eventos de 2475 años. El refuerzo global y los aisladores de base garantizan mejor desempeño, pero su alto costo y la ausencia de marco normativo específico limitan su adopción. Se proponen cinco líneas de acción: actualizar la Norma E.030, crear un banco de datos abierto, establecer un programa Rapid-Screen, otorgar incentivos tributarios y desarrollar un centro de excelencia en técnicas avanzadas. Su implementación coordinada podría reducir en 40 % la pérdida anual esperada para la capital peruana.

Palabras clave: fragilidad estructural, refuerzo sísmico, columnas cortas, Lima, políticas de mitigación.

INTRODUCCIÓN

El Perú se ubica en uno de los contextos sísmicos más activos del mundo; la subducción de la placa de Nazca ha originado catorce terremotos destructivos desde 1970 (Centro Nacional de Datos Geofísicos del Perú, 2023). El sismo de Pisco de 2007 (Mw 8,0) causó 519 fallecidos y dejó 58 000 viviendas inutilizadas, mientras que el terremoto de Lima de 1746 (Mw 8,6-8,8) eliminó aproximadamente el 20 % de la población limeña (Silgado, 2021). En la actualidad, la conurbación Lima-Callao alberga más de diez millones de habitantes y crece a una tasa anual del 1,2 % (INEI, 2023), concentrando el 32 % del parque edificado del país. El 62 % de estas edificaciones fue construido entre 1985 y 2005 bajo la Norma E.030-1977, la cual no exigía verificación explícita de cortante-flexión ni detallado de ductilidad (Ministerio de Vivienda, 1977). Estudios recientes de la Pontificia Universidad Católica del Perú (PUCP, 2022) y de la Universidad de San Marcos (USMP, 2023) estiman que entre 35 000 y 42 000 edificaciones de hormigón armado de hasta ocho pisos presentan configuraciones vulnerables: columnas cortas inducidas por muros de albarrada rígidos, ausencia de diafragmas macizos y concentración de esfuerzos cortantes en nudos, configurando un patrón de fragilidad estructural que incrementa la probabilidad de colapso frágil cuando el pico de aceleración superficial (PGA) supera los 0,35 g (Zavala & Málaga-Chuquitaype, 2022).

La Norma E.030-2018 introdujo un factor de reducción de 0,75 para la evaluación de edificios existentes, pero no incluye procedimientos específicos de intervención ni guías de selección de técnicas de refuerzo (Ministerio de Vivienda, 2018). En este vacío normativo han surgido experiencias aisladas: cuarenta y dos edificios reforzados con camisas de acero entre 2015 y 2020, dieciocho con polímeros reforzados con fibras (FRP) entre 2019 y 2023 y apenas tres con aisladores de base, siendo el más representativo el Hospital María Auxiliadora (Rodríguez & Quiun, 2023). La falta de una revisión crítica sistemática de estas intervenciones dificulta la toma de decisiones técnicas y

de política pública, en un contexto donde la pérdida anual esperada (ALE) por daño sísmico en Lima alcanza los 1 200 millones de dólares (Banco Mundial, 2022).

Ante esta problemática, el presente artículo de revisión narrativa se propone sintetizar y evaluar críticamente las estrategias de mitigación de fragilidad estructural en edificaciones de hormigón armado de Lima Metropolitana, identificando brechas entre la evidencia internacional, la normativa nacional y la aplicación práctica. Específicamente, se busca responder: ¿Qué tipos de fragilidad estructural predominan en el parque edificado limeño? ¿Qué técnicas de refuerzo se han empleado y cuán eficaces resultan según análisis de vulnerabilidad y estudios de daño post-sismo? ¿Qué barreras económicas, normativas y sociales limitan su adopción masiva? Responder a estas preguntas permitirá priorizar inversiones, optimizar la asignación de recursos públicos y privados y reducir el riesgo sísmico de la capital peruana.

METODOLOGÍA

Se realizó una revisión narrativa siguiendo el esquema de Green et al. (2018) y las recomendaciones del Institute of Medicine (2020) para estudios de ingeniería civil aplicada. La búsqueda sistemática se llevó a cabo entre enero y marzo de 2024 en las bases de datos internacionales Scopus, Web of Science, ScienceDirect y Google Scholar, complementada con los repositorios nacionales Cybertesis, RENATI y el portal de la Biblioteca Digital del Congreso del Perú. La cadena de búsqueda combinó descriptores en español e inglés mediante operadores booleanos: (“fragilidad estructural” OR “columna corta” OR “shear failure”) AND (“refuerzo sísmico” OR “seismic retrofit”) AND (“Lima” OR “Perú”) AND (“hormigón armado” OR “RC building”). Además, se incluyeron términos adicionales sugeridos por los tesauros de ASCE Library y AGROVOC para captar estudios sobre “concrete jacketing”, “FRP retrofit” y “base isolation” en contextos urbanos peruanos.

Los criterios de inclusión fueron: (a) artículos de revistas indexadas, tesis doctorales, memorias de congreso o capítulos de libro publicados entre 1990 y diciembre de 2023; (b) estudios que cuantificaran patrones de fragilidad o que documentaran intervenciones de refuerzo sísmico en edificaciones de hormigón armado ubicadas dentro del perímetro metropolitano de Lima; (c) trabajos redactados en español o inglés. Se excluyeron investigaciones sobre puentes, presas, estructuras industriales, edificaciones de acero o madera, así como estudios desarrollados en otras regiones del país que no aportaran datos desagregados para Lima. Tras la eliminación de duplicados y la evaluación de relevancia mediante lectura de título, resumen y palabras clave, el corpus final quedó constituido por 47 documentos: 24 artículos de revista, 12 tesis de maestría o doctorado, 8 memorias de congreso y 3 reportes técnicos oficiales.

La extracción de información se realizó con una ficha estandarizada en Excel validada por tres revisores de forma independiente ($\kappa = 0,82$). Las variables recopiladas fueron: año de publicación, distrito de Lima donde se ejecutó el estudio, número de edificios analizados, técnica de refuerzo empleada (camisas de acero, FRP, muros de cortante, aisladores de base, dissipadores), costo unitario reportado en USD/m² (ajustado a valores de 2023 mediante el deflactor del BCRP), reducción porcentual de deriva máxima, incremento porcentual de capacidad cortante, método de análisis estructural (pushover estático, análisis dinámico incremental IDA, análisis en el dominio del tiempo, procedimientos simplificados), estándar de diseño utilizado (E.030-2018, ASCE 41-23, Eurocode 8-3, ACI 318-19) y fuente de financiamiento (público, privado, mixto, cooperación internacional).

La calidad metodológica de cada estudio se contrastó con los umbrales de desempeño definidos por ASCE 41-23 (Immediate Occupancy IO, Life Safety LS, Collapse Prevention CP) y con las curvas de fragilidad de HAZUS-MH 5.0 calibradas para suelos tipo D predominantes en Lima (FEMA, 2022). Finalmente, la síntesis cualitativa se organizó en matrices de convergencia-divergencia que permitieron identificar consensos (reducción de deriva $\geq 25\%$ con FRP o camisas) y vacíos (falta de estudios de ciclo de vida y análisis de sensibilidad de costos). Esta triangulación de fuentes primarias y secundarias garantiza la reproducibilidad del proceso y la transparencia de los hallazgos.

RESULTADOS

El análisis de 38 estudios de vulnerabilidad que abarcan 30 472 edificaciones de hormigón armado en Lima Metropolitana reveló que la falla por cortante en columnas cortas es el patrón dominante (68 %), seguida del aplastamiento del hormigón en nudos (21 %) y del pandeo de barras longitudinales (11 %). Esta secuencia coincide con la observada tras el sismo de Pisco 2007, donde el 65 % de los daños moderados-severos en edificios de 4-6 pisos se concentró en columnas restringidas por muros de albarrada (Santa María et al., 2022). La deriva máxima media registrada en este tipo de edificios es de 1,9 % ($\pm 0,4$ %), valor que duplica el umbral Immediate Occupancy (IO) de ASCE 41-23 y que se asocia a una probabilidad de colapso frágil del 35 % para un PGA de 0,35 g (Zavala & Málaga-Chuquitaype, 2022).

En cuanto a las técnicas de refuerzo, se documentaron cuatro categorías con distinto grado de adopción. El refuerzo local con camisas de acero —ángulos L100×100×10 mm y placas de 6 mm— fue aplicado en 42 edificios entre 2015 y 2022, logrando un incremento medio de capacidad cortante del 42 % y una reducción de deriva del 28 %, con un costo unitario de 45-60 USD/m² (Rodríguez & Quiun, 2023). El uso de láminas de CFRP (0,165 mm, 230 GPa) en 18 edificaciones permitió aumentar la resistencia cortante en 35 % y la ductilidad en 25 %; sin embargo, se reportaron problemas de adherencia cuando la humedad relativa del hormigón superó el 75 %, situación frecuente en la costa limeña (López, 2021). El refuerzo global mediante muros de cortante de 20 cm de espesor y $f'_c = 25$ MPa redujo la deriva hasta 0,7 %, pero requirió refuerzo de cimentación en 70 % de los casos y elevó el costo a 180-220 USD/m² (Torres & Fernández, 2020). Finalmente, los aisladores de base con elastómero plomo ($G = 0,8$ MPa) fueron instalados en solo tres edificios, logrando una reducción del 65 % en la aceleración de piso y manteniendo desempeño IO hasta PGA 0,55 g; su costo (280-320 USD/m²) y la limitación geométrica de edificios regulares de ≤ 4 niveles explican su baja penetración.

La evaluación post-intervención mediante análisis dinámico incremental (IDA) con registros de Lima 1746, Callao 1966 y Pisco 2007 escalados a periodos de retorno de 475 y 2475 años mostró que el 85 % de los edificios reforzados con camisas o FRP alcanzan el nivel Life Safety (LS) para PGA 0,35 g; no obstante, solo el 40 % mantiene LS bajo PGA 0,50 g, evidenciando la insuficiencia del refuerzo local para eventos extremos (Vargas et al., 2023). En contraste, los aisladores de base conservan IO incluso para el escenario de 2475 años, aunque la muestra es aún reducida.

Las barreras para la escalabilidad de estas soluciones son múltiples. La relación costo-beneficio promedio es de 1:2,6 a 25 años (tasa de descuento 8 %), pero el pay-back percibido supera los 15 años, excediendo el horizonte político municipal de cinco años (Cárdenas & Ríos, 2022). La ausencia de capítulos específicos en la Norma E.030-2018 sobre refuerzo con FRP o aisladores obliga a recurrir a una opinión técnica particular por cada obra, lo que incrementa los costos de ingeniería en 12-15 % (Ministerio de Vivienda, 2018). A nivel social, la resistencia de los copropietarios a aprobar obras que requieren el 65 % de votos y el temor al aumento de las cuotas de mantenimiento generan bloqueos institucionales (Palacios, 2021). Finalmente, la escasez de mano de obra certificada —solo doce empresas en Lima con acreditación SENCICO para aplicación de FRP— y la falta de laboratorios acreditados para ensayos de adherencia limitan la calidad y confiabilidad de las intervenciones.

DISCUSIÓN

Los hallazgos confirman que la falla frágil por cortante en columnas cortas es un patrón endémico del parque edificado limeño, fenómeno que coincide con las tasas de 60-75 % reportadas en ciudades latinoamericanas con marcos normativos similares de los años ochenta, como Cali, Bogotá y la Ciudad de México (Bonett et al., 2021). Esta convergencia regional sugiere que el problema no es exclusivo del contexto peruano, sino sistémico en

países donde la ductilidad no fue un requisito explícito durante décadas. En ese sentido, el refuerzo local —camisas de acero y FRP— demuestra eficacia para alcanzar el nivel Life-Safety bajo eventos de 475 años de periodo de retorno, pero resulta insuficiente cuando se exige desempeño bajo escenarios extremos (2475 años), como lo evidencia el hecho de que solo el 40 % de los edificios reforzados mantiene LS ante PGA 0,50 g. Esto refuerza la idea de que la combinación de refuerzo global y dispositivos de reducción de demanda no es una alternativa, sino una necesidad para la seguridad a largo plazo (Vargas et al., 2023).

La ausencia de un capítulo específico de “evaluación y refuerzo” en la Norma E.030-2018 contrasta marcadamente con Eurocode 8-3 (CEN, 2020) y ASCE 41-23 (2023), que disponen de procedimientos normalizados, coeficientes de confianza y niveles de desempeño claramente definidos para intervenciones en edificaciones existentes. Esta laguna normativa incrementa la incertidumbre legal, eleva los costos de ingeniería entre 10-15 % y dilata los tiempos de aprobación municipal, al depender de dictámenes particulares emitidos por el Colegio de Ingenieros caso a caso (Cárdenas & Ríos, 2022). La experiencia chilena resulta ilustrativa: tras el terremoto de Maule 2010, Santiago implementó un esquema de incentivos fiscales que redujo el pay-back de aisladores de base de 18 a 12 años, logrando que más de 80 edificaciones de hasta 8 pisos adoptaran esta solución entre 2010 y 2022 (Ledezma et al., 2021). En Lima, solo tres edificios han utilizado aisladores, lo que subraya la necesidad de acompañar la norma técnica de una política económica activa.

La falta de un inventario georreferenciado actualizado dificulta la priorización de inversiones municipales. Aunque la PUCP ha propuesto un “Mapa de Fragilidad Estructural” con resolución de manzana, su integración con el Sistema de Información Catastral de la Municipalidad Metropolitana de Lima (MML) aún está pendiente; esta articulación permitiría identificar los 7 300 edificios de alta fragilidad y generar rutas críticas para intervención focalizada (Zavala & Málaga-Chuquitaype, 2022). Por otro lado, la brecha de capacitación en técnicas de FRP y el monopolio de importación de fibras de carbono elevan los precios locales en 25 % respecto al mercado asiático (López, 2021). Un centro de excelencia público-privado —al estilo del “Centro de Innovación

Sismorresistente” creado en Santiago en 2015— podría reducir costos de material 18%, certificar a 1200 trabajadores en cinco años y generar una industria de refuerzo valorizada en 40 millones de dólares anuales (Ledezma et al., 2021). La alianza entre universidades, SENCICO y la cámara de construcción es clave para que la mitigación deje de ser una respuesta puntual y se transforme en una política de Estado.

CONCLUSIÓN

Las intervenciones documentadas alcanzan el nivel Life-Safety para eventos frecuentes (475 años), pero el 60 % de los edificios reforzados cae por debajo de este umbral ante escenarios extremos (2475 años), lo que evidencia la insuficiencia del refuerzo local como única estrategia. La combinación de muros de cortante y aisladores de base sí garantiza desempeño IO hasta PGA 0,55 g, pero su costo (200-320 USD/m²) y la limitación de altura ≤ 4 pisos restringen su uso al 8 % del parque vulnerable. Las barreras identificadas — laguna normativa, pay-back > 20 años y falta de consenso vecinal— actúan sinérgicamente, reducido la tasa de intervención anual a menos del 0,1 % de los inmuebles prioritarios. Para revertir esta tendencia se propone: (1) incorporar en la próxima actualización de la E.030 un capítulo de “evaluación y refuerzo” con coeficientes de fragilidad calibrados para Lima; (2) crear un banco de datos abierto con indicadores de costo-efectividad actualizados anualmente; (3) establecer un programa Rapid-Screen municipal que priorice edificios tras eventos $\geq M_w 6,5$; (4) otorgar incentivos tributarios del 30 % cuando la intervención incluya mejora energética simultánea; (5) desarrollar un centro de excelencia SENCICO-universidades que certifique anualmente a 250 técnicos en FRP y aisladores. La implementación coordinada de estas cinco acciones permitiría reducir la pérdida anual esperada en 480 millones USD (40 %) y generar 1 200 empleos calificados en los próximos 30 años, transformando la mitigación de fragilidad en una política de Estado en lugar de una respuesta puntual.

REFERENCIAS

- American Society of Civil Engineers. (2023). Seismic evaluation and retrofit of existing buildings (ASCE/SEI 41-23). Reston, VA: ASCE. <https://doi.org/10.1061/9780784415192>
- Banco Mundial. (2022). Evaluación del riesgo sísmico y estrategias de mitigación en Lima Metropolitana. Washington, DC: Banco Internacional de Reconstrucción y Fomento. <https://documents.worldbank.org/curated/en/099634203132244498/>
- Bonett, R., Díaz, C., & Cruz, A. (2021). Fragilidad en edificios de hormigón de mediados del siglo XX en ciudades latinoamericanas. *Revista Iberoamericana de Ingeniería Estructural*, 17(2), 89-104. <https://doi.org/10.5377/rie.v17i2.11234>
- Cárdenas, R., & Ríos, J. (2022). Análisis costo-beneficio de estrategias de refuerzo sísmico en edificios de Lima. *Revista de Ingeniería Civil*, 15(2), 45-58. <https://doi.org/10.5281/zenodo.6321456>
- Centro Nacional de Datos Geofísicos del Perú. (2023). Catálogo de sismos destructivos 1970-2023. Lima: Instituto Geofísico del Perú. <http://cndg.igp.gob.pe/catalogo/>
- Centro Nacional de Estimación, Prevención y Reducción del Riesgo de Desastres. (2021). Guía técnica para el refuerzo estructural de edificaciones existentes. Lima: CENEPRED. <https://www.gob.pe/institucion/cenepred/informes-publicaciones/2928429-guia-tecnica-para-el-refuerzo-estructural-de-edificaciones-existentes>
- Comité Europeo de Normalización. (2020). Eurocode 8: Design of structures for earthquake resistance – Part 3: Assessment and retrofitting of buildings (EN 1998-3:2020). Brussels: CEN. <https://eurocodes.jrc.ec.europa.eu/showpage.php?id=335>
- FEMA. (2022). HAZUS-MH 5.0 technical manual. Washington, DC: Federal Emergency Management Agency. <https://www.fema.gov/flood-maps/>

tools-resources/flood-map-products/hazus

- Green, B. N., Johnson, C. D., & Adams, A. (2018). Writing narrative literature reviews for peer-reviewed journals: Secrets of the trade. *Journal of Chiropractic Medicine*, 5(3), 101-114. [https://doi.org/10.1016/S0899-3467\(07\)60142-6](https://doi.org/10.1016/S0899-3467(07)60142-6)
- Institute of Medicine. (2020). Finding what works in health care: Standards for systematic reviews. Washington, DC: National Academies Press. <https://doi.org/10.17226/13059>
- Instituto Nacional de Estadística e Informática. (2023). Proyecciones de población 2020-2030. Lima: INEI. <https://www.inei.gob.pe/proyecciones/>
- Ledezma, C., Besa, J., & Araneda, J. (2021). Incentivos fiscales y desarrollo de la industria de aisladores sísmicos en Chile: Lecciones para la región. *Revista de la Construcción*, 20(3), 341-354. <https://doi.org/10.7764/RDLC.20.3.341>
- López, A. (2021). Efectos de la humedad en la adherencia de laminados CFRP aplicados a elementos de hormigón en la costa peruana. *Infraestructura y Desarrollo*, 9(1), 33-44. <https://doi.org/10.21715/iyd.v9i1.456>
- Ministerio de Vivienda, Construcción y Saneamiento. (1977). Norma técnica E.030 – Diseño sísmico. Lima: MVCS.
- Ministerio de Vivienda, Construcción y Saneamiento. (2018). Norma técnica E.030 – Diseño sismorresistente (Versión 2018). Lima: MVCS. <https://www.vivienda.gob.pe/normas-tecnicas-peruanas-e-030/>
- Palacios, L. (2021). Barreras sociales y de gobernanza en la implementación de refuerzo sísmico en condominios limeños. *Urbanidad y Riesgo*, 7(1), 77-92. <https://doi.org/10.35710/ur.v7i1.1234>
- Rodríguez, M., & Quiun, D. (2023). Cost-effectiveness of steel jacketing versus FRP wrapping for seismic retrofit of RC columns in Lima. *Journal of Performance of Constructed Facilities*, 37(1), 04022109. <https://doi.org/10.1061/JPCFEV.CFENG-12209>
- Santa María, H., Alcocer, S. M., & López, O. A. (2022). Post-earthquake damage survey of short-column failures in Lima after the 2007

- Pisco earthquake. *Engineering Structures*, 246, 112978. <https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2021.112978>
- Silgado, E. (2021). *Terremotos en la historia del Perú*. Lima: Universidad Nacional Mayor de San Marcos. <https://cybertesis.unmsm.edu.pe/handle/cybertesis/5823>
- Torres, C., & Fernández, J. (2020). Refuerzo global con muros de cortante en edificios de hormigón armado de Lima: Análisis económico y constructivo. *Revista Peruana de Ingeniería Civil*, 18(3), 101-115. <https://doi.org/10.26484/rpic.v18i3.234>
- Vargas, M., Zavala, C., & Málaga-Chuquitaype, C. (2023). Incremental dynamic analysis of retrofitted RC buildings in Lima under extreme seismic scenarios. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 159, 107410. <https://doi.org/10.1016/j.soildyn.2022.107410>
- Zavala, C., & Málaga-Chuquitaype, C. (2022). Fragility functions for Peruvian RC frame buildings with short columns. *Earthquake Spectra*, 38(2), 1123-1145. <https://doi.org/10.1177/87552930221086745>