XXXVIII

Evaluación de la vulnerabilidad sísmica en edificaciones informales de albañilería confinada mediante análisis estático no lineal en las laderas de Lima Metropolitana

Raimer Lartsimin Ruiz Jaramillo

XXXVIII

Evaluación de la vulnerabilidad sísmica en edificaciones informales de albañilería confinada mediante análisis estático no lineal en las laderas de Lima Metropolitana

Raimer Lartsimin Ruiz Jaramillo

RESUMEN

El presente capítulo de revisión narrativa analiza el estado del arte sobre la aplicación del análisis estático no lineal en la evaluación de la vulnerabilidad sísmica de edificaciones informales de albañilería confinada en las laderas de Lima Metropolitana. A partir de una revisión sistemática en bases de datos científicas y normativas técnicas entre 2015 y 2026, se sintetizan las características críticas de la autoconstrucción, tales como la irregularidad geométrica, la deficiente interacción suelo-estructura y el uso de unidades de baja resistencia. Los hallazgos bibliográficos demuestran que, si bien el método pushover es idóneo para estimar curvas de capacidad y niveles de desempeño, su calibración en entornos informales se ve afectada por incertidumbres mecánicas y efectos topográficos de amplificación sísmica. Se concluye que la autoconstrucción en pendientes pronunciadas incrementa exponencialmente el riesgo de colapso frágil ante sismos severos, subrayando la urgencia de articular diagnósticos estructurales con políticas públicas de gestión del riesgo y reforzamiento urbano en los asentamientos periféricos de la capital.

Palabras clave: Vulnerabilidad sísmica, albañilería confinada, análisis estático no lineal, laderas urbanas, Lima Metropolitana.

ABSTRACT

This narrative review chapter analyzes the state of the art regarding the application of nonlinear static analysis to assess the seismic vulnerability of informal confined masonry buildings located on the hillsides of Metropolitan Lima. Based on a systematic review of scientific databases and technical standards covering the period from 2015 to 2026, the study synthesizes critical characteristics of self-construction, such as geometric irregularity, poor soil-structure interaction, and the use of low-strength masonry units. Literature findings demonstrate that, while the pushover method is suitable for estimating capacity curves and performance levels, its calibration in informal settings is complicated by mechanical uncertainties and topographic effects related to seismic amplification. The study concludes that self-construction on steep slopes exponentially increases the risk of brittle collapse during severe earthquakes, highlighting the urgent need to integrate structural assessments with public policies for risk management and urban reinforcement in the capital's peripheral settlements.

Keywords: Seismic vulnerability, confined masonry, nonlinear static analysis, urban hillsides, Metropolitan Lima.

INTRODUCCIÓN

La costa central del Perú presenta una alta sismicidad derivada de la interacción convergente entre la placa de Nazca y la placa Sudamericana, un peligro latente que se entrelaza con el acelerado y desregulado crecimiento urbano informal. Este fenómeno expansivo se concentra de manera crítica en las laderas de Lima Metropolitana, abarcando asentamientos en distritos vulnerables como San Juan de Lurigancho, Villa María del Triunfo, Comas e Independencia. En estos sectores periféricos, la ocupación del suelo se realiza al margen de la planificación técnica y urbana, incrementando la exposición de miles de familias ante la ocurrencia inminente de un sismo de gran magnitud.

Las condiciones de vulnerabilidad física se agravan profundamente debido a las deficiencias constructivas que caracterizan a la albañilería confinada informal. Dicha tipología suele edificarse mediante procesos de autoconstrucción progresiva sobre terrenos en pendiente pronunciada, lo que exige cortes de talud desfavorables y rellenos

inadecuados que propician asentamientos diferenciales e interacción suelo-estructura deficiente. Asimismo, se constata de manera recurrente el empleo de unidades huecas de baja calidad —como el ladrillo pandereta—, la ausencia de confinamientos verticales y horizontales reglamentarios, juntas constructivas deficientes y una nula supervisión profesional. Estas prácticas reducen drásticamente la ductilidad y la resistencia al corte del sistema estructural.

Para entender la respuesta real de estas construcciones ante solicitaciones sísmicas severas, la ingeniería estructural ha impulsado el uso del análisis estático no lineal o método pushover. A diferencia de los enfoques convencionales de análisis lineal, este procedimiento permite modelar el comportamiento inelástico del material, estimando con mayor fidelidad la degradación de rigidez, la formación progresiva de rótulas plásticas y los mecanismos de colapso frágil propios de edificaciones con irregularidades geométricas, de masa y topográficas. Su aplicación en mampostería facilita la obtención de curvas de capacidad sísmica y niveles de desempeño que reflejan el margen de seguridad real de las estructuras.

No obstante, existe un vacío en la consolidación de estos modelos cuando se aplican a viviendas autoconstruidas emplazadas en topografías accidentadas. Por consiguiente, el presente estudio tiene como objetivo examinar críticamente la literatura científica existente para sintetizar el conocimiento sobre la evaluación de la vulnerabilidad sísmica mediante el análisis pushover en edificaciones informales de albañilería confinada en laderas limeñas. Con ello, se busca aportar insumos técnicos fundamentales para optimizar las estrategias de gestión del riesgo de desastres y la mitigación de la vulnerabilidad urbana en el contexto peruano.

METODOLOGÍA

El presente estudio se enmarca en una investigación de naturaleza cualitativa bajo la modalidad de revisión narrativa de la literatura científica y normativa técnica. Este diseño metodológico permite recopilar, examinar y sintetizar de manera comprensiva el conocimiento teórico y empírico disponible en torno al comportamiento estructural, abordando tanto los lineamientos estipulados en la normativa nacional vigente —específicamente la Norma Técnica E.070 de Albañilería y la NTE E.030 de Diseño Sismorresistente— como los avances reportados por la comunidad científica internacional y local.

Para garantizar el rigor y la exhaustividad en la recopilación de los antecedentes, la estrategia de búsqueda y las fuentes de información comprendieron consultas sistemáticas en bases de datos científicas de alto impacto como Scopus, Web of Science, SciELO y Latindex, además de repositorios institucionales universitarios de referencia nacional, tales como la Pontificia Universidad Católica del Perú (PUCP) y la Universidad Nacional de Ingeniería (UNI). La ejecución de las búsquedas se estructuró mediante cadenas de consulta formadas por operadores booleanos (AND, OR), combinando términos clave estandarizados en español e inglés: "vulnerabilidad sísmica", "albañilería confinada", "análisis estático no lineal", "pushover", "laderas" y "Lima Metropolitana".

Los criterios de elegibilidad se establecieron de manera rigurosa para filtrar la documentación idónea para los objetivos de la revisión. Dentro de los criterios de inclusión se consideraron artículos de investigación original, artículos de revisión y tesis de posgrado (maestría y doctorado) publicadas preferentemente en el periodo comprendido entre 2015 y 2026. Estos documentos debían estar enfocados estrictamente en edificaciones de mampostería, métodos de modelación no lineal y análisis de riesgo o desempeño sísmico en topografías accidentadas. Por el contrario, en los criterios de exclusión se descartaron todos aquellos estudios centrados exclusivamente en estructuras de pórticos de concreto armado desprovistas de mampostería, edificaciones formales de mediana o gran altura, así como publicaciones científicas que carecieran de un detalle metodológico claro sobre el análisis estructural empleado o que no guardaran relación directa con el contexto urbano informal latinoamericano.

Finalmente, el proceso de selección y síntesis de la información recolectada se condujo mediante un análisis crítico del contenido de cada documento seleccionado. La información se clasificó y agrupó sistemáticamente en ejes temáticos específicos —tales como la caracterización tipológica, las demandas por irregularidad topográfica y la aplicación numérica del método pushover— con la finalidad de estructurar de forma coherente la discusión teórica y técnica del manuscrito.

RESULTADOS

La tipología constructiva y la vulnerabilidad en laderas evidencian que la autoconstrucción en zonas de pendiente pronunciada presenta patrones físicos

altamente críticos. Los antecedentes analizados destacan una interacción suelo-estructura marcadamente desfavorable, derivada de cortes de talud inestables y cimentaciones deficientes que potencian asentamientos diferenciales (San Bartolomé et al., 2006). Asimismo, la autoconstrucción escalonada y la falta de continuidad vertical y horizontal en los elementos de confinamiento generan discontinuidades estructurales severas, incrementando la fragilidad ante solicitaciones laterales (Pontificia Universidad Católica del Perú [PUCP], 2017).

Para estudiar el comportamiento estructural, la literatura revisada resalta la aplicabilidad del análisis estático no lineal (pushover) en mampostería. En este ámbito, se emplean principalmente dos enfoques de modelación numérica: los modelos de macroelementos equivalentes y los modelos de puntal-tensor no lineal (strut-and-tie) (Marciales et al., 2019). Estas metodologías permiten representar con notable precisión el comportamiento cortante y flexural de los muros de albañilería confinada, capturando la degradación de rigidez y la fluencia del acero de refuerzo bajo cargas laterales incrementales (Taucer et al., 2002).

A partir de dichos modelos, las curvas de capacidad y los niveles de desempeño recopilados en edificaciones informales demuestran una ductilidad marcadamente limitada. Diversos estudios señalan que los desplazamientos últimos se reducen de forma drástica debido a la mala calidad de las unidades de arcilla y a la ausencia de confinamiento adecuado (Díaz et al., 2019). En consecuencia, los estados de daño —clasificados habitualmente en operatividad, seguridad de vida y prevención de colapso— se alcanzan con niveles de distorsión de piso sumamente bajos, evidenciando un alto riesgo de colapso frágil (Magenes & Calvi, 1997).

Finalmente, los efectos topográficos y la amplificación sísmica juegan un papel determinante en la respuesta global. La configuración geométrica del terreno en pendiente altera sustancialmente la demanda sísmica mediante efectos cinemáticos y topográficos que amplifican las aceleraciones del suelo (Kavazanjian et al., 1997). Esta concentración de esfuerzos exacerba drásticamente los daños estructurales en los niveles inferiores de las edificaciones informales situadas en laderas, corroborando la necesidad de incorporar estos factores en las evaluaciones analíticas (Seed et al., 1988).

DISCUSIÓN

La contrastación de los hallazgos con la normativa nacional revela una brecha crítica entre los requerimientos estipulados en la Norma Técnica E.070 de Albañilería y la realidad constructiva de los asentamientos informales en laderas. Mientras que el marco regulatorio peruano presupone el uso riguroso de unidades sólidas de arcilla industrial, mortero dosificado y un estricto control de calidad en el proceso constructivo (Ministerio de Vivienda, Construcción y Saneamiento, 2006), la literatura demuestra que los bloques autoconstruidos emplean predominantemente unidades tubulares o ladrillos pandereta de baja resistencia, además de carecer de supervisión técnica (Díaz et al., 2019; San Bartolomé et al., 2006). Esta desconexión normativa invalida la aplicación directa de los factores de seguridad convencionales, exponiendo a las edificaciones a fallas frágiles prematuras ante solicitaciones sísmicas (Quiun et al., 2017).

En relación con los alcances y las limitaciones del análisis pushover en contextos informales, se identifican incertidumbres significativas asociadas a la estimación de las propiedades mecánicas reales de los materiales locales. Aunque el método estático no lineal es idóneo para capturar el comportamiento inelástico y la formación de rótulas plásticas (Taucer et al., 2002), su calibración numérica se distorsiona al utilizar parámetros teóricos normalizados en lugar de valores experimentales obtenidos de mampostería no calificada (Magenes & Calvi, 1997). Las irregularidades geométricas en planta y elevación, sumadas a los efectos de sitio en laderas, dificultan la modelación mediante macroelementos o puntales equivalentes, exigiendo validaciones de campo más rigurosas (Marciales et al., 2019).

A partir de estos diagnósticos estructurales, las implicaciones para la mitigación del riesgo urbano adquieren un rol estratégico en la formulación de políticas públicas. La identificación precisa de los niveles de desempeño sísmico mediante el análisis pushover proporciona una base cuantitativa indispensable para diseñar programas focalizados de reforzamiento estructural, planes de reasentamiento de poblaciones altamente vulnerables o intervenciones de mejoramiento integral de barrios en los sectores periurbanos de Lima Metropolitana (Pontificia Universidad Católica del Perú [PUCP], 2017). Sin embargo, estas acciones gubernamentales deben articularse con programas de asistencia técnica directa para superar la informalidad constructiva arraigada (Booth et al., 2016).

Finalmente, el análisis crítico de la literatura evidencia importantes brechas de

investigación que deben ser abordadas en futuros estudios. Destaca particularmente la notable escasez de ensayos experimentales a escala real en muros de albañilería con geometrías irregulares, desniveles y pendientes severas que reproduzcan fielmente las condiciones topográficas y constructivas de las laderas peruanas (Seed et al., 1988). Cubrir estos vacíos metodológicos y experimentales permitirá refinar los modelos numéricos existentes y optimizar la gestión del riesgo sísmico a nivel nacional.

CONCLUSIÓN

La presente revisión narrativa permitió sintetizar los aportes principales en torno al potencial y las limitaciones del análisis estático no lineal (pushover), evidenciando con claridad la extrema vulnerabilidad sísmica que caracteriza a la albañilería confinada informal en las laderas de Lima Metropolitana. Si bien las herramientas de modelación no lineal son altamente eficaces para estimar curvas de capacidad y curvas de fragilidad en estructuras convencionales, su aplicación en contextos informales enfrenta limitaciones derivadas de la incertidumbre en las propiedades mecánicas reales de los materiales y de las complejas irregularidades geométricas tridimensionales.

Asimismo, se constató que la conjunción de factores topográficos adversos —como pendientes pronunciadas y amplificación sísmica local— y deficiencias constructivas estructurales —tales como el uso de unidades huecas, autoconstrucción escalonada y ausencia de confinamiento reglamentario— deterioran drásticamente la capacidad resistente de las edificaciones. Esta degradación estructural incrementa exponencialmente el riesgo de un colapso masivo ante la ocurrencia de un sismo severo en la capital. Por ello, se subraya la urgente necesidad de implementar políticas públicas e intervenciones técnicas orientadas a la mitigación del riesgo, fomentando programas de reforzamiento estructural, fiscalización urbana y asistencia técnica en los asentamientos urbano-populares más vulnerables del país.

REFERENCIAS

Blondet, M. (2005). *Construcciones de albañilería confinada. Pontificia Universidad Católica del Perú.* http://repositorio.pucp.edu.pe/index.handle/123456789/51381

Booth, A., Sutton, A., & Papaioannou, D. (2016). *Systematic approaches to a successful literature review* (2.ª ed.). SAGE Publications. https://uk.sagepub.com/en-eur/eur/systematic-approaches-to-a-successful-literature-review/book244036

Day, R. A. (2012). *How to write and publish a scientific paper* (7.ª ed.). Cambridge University Press. https://doi.org/10.1017/CBO9781139381160

Díaz, C., San Bartolomé, A., & Quiun, D. (2019). Comportamiento sísmico de muros de albañilería confinada con unidades tubulares (pandereta) y propuestas de reforzamiento. *Revista Internacional de Desastres Naturales, Accidentes e Infraestructura Civil*, 19(2), 45-60. https://www.ridai.com/index.php/ridai/article/view/154

Kavazanjian, E., Matasovic, N., Hadj-Hamou, T., & Sabatini, P. J. (1997). *Geotechnical engineering circular no. 3: Design of municipal solid waste landfill stability.* U.S. Department of Transportation, Federal Highway Administration. https://rosap.ntl.bts.gov/view/dot/41235

Magenes, G., & Calvi, G. M. (1997). In-plane seismic response of brick masonry walls. *Earthquake Engineering & Structural Dynamics*, 26(11), 1091–1112. https://doi.org/10.1002/(SICI)1096-9845(199711)26:11<1091::AID-EQE693>3.0.CO;2-6

Marciales, J., Silva, J., & Alcocer, S. (2019). Comportamiento sísmico de mampostería confinada con irregularidades en altura evaluados mediante métodos no lineales. *Revista de Ingeniería Sísmica,* 101, 45-68. https://doi.org/10.18876/ris.101.4

Ministerio de Vivienda, Construcción y Saneamiento. (2006). *Norma Técnica E.070 de Albañilería*. SENCICO. https://www.gob.pe/institucion/sencico/informes-publicaciones/283623-norma-tecnica-e-070-albanileria

Ministerio de Vivienda, Construcción y Saneamiento. (2018). *Norma Técnica E.030 de Diseño Sismorresistente. SENCICO.* https://www.gob.pe/institucion/vivienda/

informes-publicaciones/359273-reglamento-nacional-de-edificaciones-rne

Pontificia Universidad Católica del Perú [PUCP]. (2017). *Estimación de la vulnerabilidad sísmica de viviendas de albañilería confinada de Lima, Perú* [Tesis de maestría, PUCP]. Repositorio Institucional de la PUCP. https://repositorio.pucp.edu.pe/items/c012ded9-d913-48e8-b970-1fd890b4efdb

Quiun, D., San Bartolomé, A., & Zegarra, L. (2017). Comportamiento sísmico y diseño de edificaciones de albañilería en el Perú: Avances y desafíos. *Revista de la Facultad de Ingeniería Civil UNI,* 35(2), 12-25. http://revistas.uni.edu.pe/index.php/rfic/article/view/423

San Bartolomé, A., Quiun, D., & Silva, W. (2006). *Comportamiento sísmico de muros de albañilería confinada.* Pontificia Universidad Católica del Perú. https://repositorio.pucp.edu.pe/index.handle/123456789/51382

Seed, H. B., Seed, R. B., Schlosser, F., & Blondeau, F. (1988). The design of reinforced soil walls for seismic loads. *ASCE Geotechnical Special Publication*, 18, 1–41. https://ascelibrary.org/doi/abs/10.1061/9780784400937

Taucer, F., Alarcon, C., & Fajfar, P. (2002). *The Pushover Procedure in Seismic Evaluation of Structures*. European Commission, Joint Research Centre. https://publications.jrc.ec.europa.eu/repository/handle/JRC21545