

Evaluación de la Resiliencia Sísmica de Edificios Autoconstruidos mediante Análisis No Lineal y Análisis Dinámico Incremental

Evaluation of Seismic Resilience of Self-Built Buildings through Nonlinear Analysis and Incremental Dynamic Analysis

 ¹ Cesar Arriola Prieto

¹ Universidad Nacional Federico Villareal, Perú

Recibido: 2024-11-13

Aceptado: 2024-12-26

Publicado: 2024-12-29

RESUMEN

Este estudio, titulado "Vulnerabilidad Estructural ante Amenazas Sísmicas en Viviendas de la Zona X de Huaycán, Distrito de Ate-Vitarte, 2023," proporciona una evaluación exhaustiva de la vulnerabilidad sísmica de las viviendas autoconstruidas en una región altamente sísmica de Lima. La metodología abarca una evaluación integral de edificios residenciales de 2, 4 y 6 pisos mediante pruebas de resistencia a la compresión del concreto, las cuales revelaron una deficiencia del 30% en comparación con el estándar E030. Para cuantificar las probabilidades de colapso, se llevaron a cabo simulaciones dinámicas avanzadas y análisis no lineales, incluyendo el Análisis Dinámico Incremental (IDA). Los resultados indican que las estructuras de 2 y 4 pisos son particularmente susceptibles, con una tasa de colapso estimada del 20.5% bajo condiciones sísmicas extremas. Las curvas de fragilidad revelan además que las construcciones más antiguas y aquellas construidas sin supervisión técnica adecuada tienen un 45% más de probabilidad de experimentar fallas estructurales en comparación con las edificadas bajo supervisión profesional. Esto subraya la urgente necesidad de intervenciones de refuerzo. Además, el estudio introduce un índice de resiliencia sísmica destinado a cuantificar la capacidad de las viviendas autoconstruidas para soportar eventos sísmicos, proporcionando una herramienta de evaluación continua que respalda prácticas constructivas mejoradas y promueve la seguridad de las comunidades vulnerables.

Palabras clave: Resiliencia sísmica, viviendas autoconstruidas, vulnerabilidad sísmica, rendimiento estructural, calidad de la construcción.

ABSTRACT

This study, titled "Structural Vulnerability to Seismic Hazards in Housing in Zone X of Huaycán, Ate-Vitarte District, 2023," provides an in-depth evaluation of the seismic vulnerability of self-constructed housing within a highly seismic region of Lima. The methodology encompasses a comprehensive assessment of 2-, 4-, and 6-story residential buildings using compressive strength testing of concrete, which revealed a 30% deficiency relative to the E030 standard. To quantify collapse probabilities, advanced dynamic simulations and nonlinear analyses, including Incremental Dynamic Analysis (IDA), were conducted. The results indicate that 2- and 4-story structures are particularly susceptible, with an estimated collapse rate of 20.5% under extreme seismic conditions. Fragility curves further reveal that older constructions and those built without proper technical supervision are 45% more likely to experience structural failure compared to those erected under professional oversight. This underscores an urgent need for retrofitting interventions. Additionally, the study introduces a seismic resilience index aimed at quantifying the capacity of self-built housing to

endure seismic events, providing a continuous assessment tool that supports enhanced construction practices and promotes the safety of vulnerable communities.

Keywords: Seismic resilience, self-built housing, seismic vulnerability, structural performance, construction quality.

INTRODUCCIÓN

La vulnerabilidad estructural resultante del crecimiento desordenado en áreas urbanas de Lima, especialmente en la Zona X de Huaycán, representa un problema significativo. Esta área se caracteriza por una urbanización acelerada sin la infraestructura adecuada, lo cual incrementa su vulnerabilidad frente a eventos sísmicos debido a la baja calidad de las edificaciones y la ausencia de supervisión técnica. La falta de una planificación urbana efectiva y de una supervisión técnica adecuada ha incrementado el riesgo para los habitantes de la zona ante la ocurrencia de sismos. Ahmad et al., (2019) subrayan la importancia de evaluar la capacidad estructural de las viviendas autoconstruidas en zonas sísmicas. Estas evaluaciones permiten identificar debilidades en el diseño y los materiales, así como proponer mejoras que reduzcan la vulnerabilidad estructural. Aroquipa, (2022) destaca que la falta de recursos y conocimientos técnicos contribuye a edificaciones que no cumplen con las normativas de construcción (Aroquipa et al., 2023; Aroquipa & Hurtado, 2022a), un problema claramente presente en Huaycán.

Lin & Baker, (2013) desarrollaron análisis dinámicos incrementales (IDA) para evaluar la respuesta estructural ante movimientos sísmicos de alta intensidad, subrayando la importancia de estos análisis para identificar debilidades críticas en las edificaciones autoconstruidas. Este tipo de análisis permite simular el comportamiento estructural bajo diversas cargas sísmicas, proporcionando información clave sobre puntos de falla y la capacidad de las edificaciones para soportar movimientos severos. Ahmad et al., (2019) también destacan la necesidad de implementar métodos avanzados para evaluar la vulnerabilidad y proponer intervenciones que incrementen la resiliencia sísmica de estas viviendas (AmiriHormozaki et al., 2015; Batabyal, 1998; Bruneau et al., 2003; Bruneau & Reinhorn, 2007; Maio et al., 2016; Negulescu et al., 2014; Rezaei Ranjbar & Naderpour, 2020; Shamsoddini Motlagh et al., 2020). Este estudio evalúa la vulnerabilidad estructural de las viviendas autoconstruidas en la Zona

X de Huaycán mediante un enfoque integrado de análisis experimental y modelado numérico. Las pruebas de resistencia a la compresión, las simulaciones dinámicas y el análisis de fragilidad permiten cuantificar el riesgo sísmico de estas edificaciones (Alberto Maturana, 2011; Becerra, 2015; Cheung et al., 2000; Colapietro et al., 2014; Firmansyah et al., 2024; Rezaei Ranjbar & Naderpour, 2020). Las pruebas de resistencia a la compresión permiten evaluar la calidad del concreto utilizado, mientras que las simulaciones dinámicas ayudan a comprender la respuesta de las edificaciones bajo diferentes escenarios sísmicos. El análisis de fragilidad ofrece una perspectiva probabilística sobre la probabilidad de falla en función de la intensidad del sismo (Aroquipa et al., 2023).

Se introduce un índice de resiliencia sísmica basado en el enfoque de (L. Yamin et al., 2017), que proporciona un marco cuantitativo para evaluar continuamente la capacidad de las viviendas para resistir sismos. Este índice mide la capacidad de las edificaciones para absorber y resistir el impacto de un sismo, así como su capacidad de recuperación posterior. Desarrollar este índice es esencial para priorizar las intervenciones y optimizar los recursos disponibles, incrementando la resiliencia en comunidades vulnerables (Aroquipa, 2022, 2024; Aroquipa et al., 2024; Aroquipa & Hurtado, 2022a, 2022b; Cimellaro et al., 2010; Covarrubias & Raju, 2020). El objetivo principal de este estudio es identificar las debilidades críticas y proponer estrategias de intervención que mejoren la resiliencia de estas edificaciones. Estas estrategias incluyen el refuerzo estructural de puntos críticos, la mejora de los materiales de construcción, y la capacitación de los habitantes en prácticas constructivas seguras (Allen & Rainer, 1995; Aroquipa et al., 2023; Aroquipa & Hurtado, 2022a, 2022b; Belejo & Bento, 2016; Bruneau et al., 2003; FEMA, 2009; Garrido, 2015; Kroß et al., 2015; Reddy et al., 2009; Saatcioglu et al., 2013). Además, se busca involucrar a las autoridades locales en la implementación de políticas que fomenten la construcción segura y la supervisión técnica en áreas de alto riesgo. Este trabajo contribuye al desarrollo de

políticas públicas orientadas a mejorar la seguridad habitacional en zonas de alto riesgo sísmico, como también sugieren (Aroquipa et al., 2016; Villar-Vega et al., 2017; L. E. Yamin et al., 2014). La principal novedad de este estudio radica en la integración de un enfoque multidimensional para evaluar la vulnerabilidad sísmica, que combina métodos experimentales, simulaciones numéricas y un índice de resiliencia adaptado a las condiciones particulares de las viviendas autoconstruidas en Lima. Este enfoque permite identificar puntos críticos de vulnerabilidad y proporciona herramientas prácticas para mejorar la resiliencia estructural a nivel comunitario. Además, el estudio formula recomendaciones prácticas que pueden ser implementadas tanto por los propios residentes como por las autoridades locales. La inclusión del índice de resiliencia sísmica proporciona un marco cuantitativo y continuo para la evaluación de la seguridad de las viviendas, lo cual es crucial para planificar intervenciones y asignar recursos en áreas vulnerables.

MATERIALES Y MÉTODOS

La metodología utilizada en este estudio combina análisis experimentales y modelado numérico para evaluar la vulnerabilidad sísmica de las viviendas autoconstruidas en la Zona X de Huaycán. A continuación, se detalla cada uno de los componentes metodológicos:

- **Caracterización de las Viviendas Autoconstruidas:** Se realizó un levantamiento de campo detallado para documentar las características constructivas de las viviendas. Esta caracterización incluyó inspecciones visuales para evaluar la calidad de los materiales, los métodos de construcción y las deficiencias estructurales existentes. Además, se utilizó una ficha de encuesta para recoger información sobre el tipo de materiales, antigüedad de las construcciones y participación de profesionales en el diseño y construcción.
- **Selección de la Muestra de Estudio:** La muestra estuvo compuesta por 120 viviendas autoconstruidas seleccionadas para representar la diversidad tipológica de la Zona X de

Huaycán. Se incluyeron edificaciones de 2, 4 y 6 niveles, documentando tanto su estado de conservación como las etapas de construcción completadas. Esta muestra permitió realizar un análisis exhaustivo de la capacidad estructural de estas edificaciones.

- **Pruebas Experimentales y Simulaciones Computacionales:** Se realizaron pruebas de resistencia a la compresión en muros, empleando muestras de mampostería tomadas de las viviendas. Adicionalmente, se llevaron a cabo simulaciones mediante el software ETABS para modelar el comportamiento de las estructuras bajo diferentes escenarios sísmicos. Estas simulaciones incluyeron análisis dinámicos incrementales (IDA) y se evaluaron desplazamientos y fuerzas internas generadas bajo cargas sísmicas extremas. La utilización del Método de Monte Carlo permitió generar curvas de fragilidad que describen la probabilidad de daño en función de la intensidad sísmica.
- **Recolección de Datos Cualitativos:** Se aplicaron cuestionarios estructurados a los residentes y encuestas a expertos en ingeniería estructural para obtener una visión cualitativa de la percepción del riesgo y las prácticas constructivas en la comunidad. Además, se revisaron registros históricos y normativas locales para contextualizar el estudio y comparar los resultados con otras investigaciones previas en el ámbito de la autoconstrucción.
- **Validación de los Instrumentos:** Los instrumentos de recolección de datos fueron validados mediante un panel de expertos, quienes evaluaron la coherencia y pertinencia de los contenidos. Se utilizó el coeficiente alfa de Cronbach para evaluar la consistencia interna de los cuestionarios, garantizando un valor mínimo aceptable de 0.7. La validez externa se verificó comparando los resultados con estudios similares en otros contextos.
- **Análisis de Datos:** Los datos recolectados fueron analizados utilizando herramientas como SPSS y Performance 3D. Se emplearon técnicas de análisis descriptivo, correlacional y

de regresión para explorar las relaciones entre las variables estructurales y la resiliencia sísmica de las viviendas. Los resultados se presentaron en tablas y gráficos, destacando las probabilidades de falla estructural y el impacto de las características constructivas en la resiliencia sísmica.

Esta metodología permitió identificar puntos críticos de vulnerabilidad y formular estrategias de intervención adaptadas a las características específicas de las viviendas autoconstruidas en la Zona X de Huaycán, con el objetivo de mejorar su resiliencia frente a futuros eventos sísmicos.

RESULTADOS

Los resultados del presente estudio proporcionan una comprensión exhaustiva sobre la vulnerabilidad sísmica de las viviendas autoconstruidas en la Zona X de Huaycán. A continuación, se detallan los hallazgos principales, respaldados por un análisis cuantitativo y cualitativo riguroso, con apoyo de figuras y tablas que permiten una interpretación más precisa y profunda de los datos.

1) Resistencia a la Compresión de los Muros: Los ensayos de resistencia a la compresión indicaron que el concreto utilizado en la mayoría de los muros de mampostería posee una resistencia promedio un 30% inferior al mínimo estipulado en la normativa E030. Esta deficiencia se observa con mayor frecuencia en las viviendas de más de cuatro niveles, donde la resistencia estructural se ve comprometida significativamente. La Tabla 1 presenta los resultados de resistencia a la compresión según el número de niveles, destacando una tendencia decreciente en la capacidad resistente en edificaciones de mayor altura. Este hallazgo enfatiza la necesidad urgente de mejorar la calidad del concreto, especialmente en edificaciones de múltiples niveles que presentan mayor riesgo estructural.

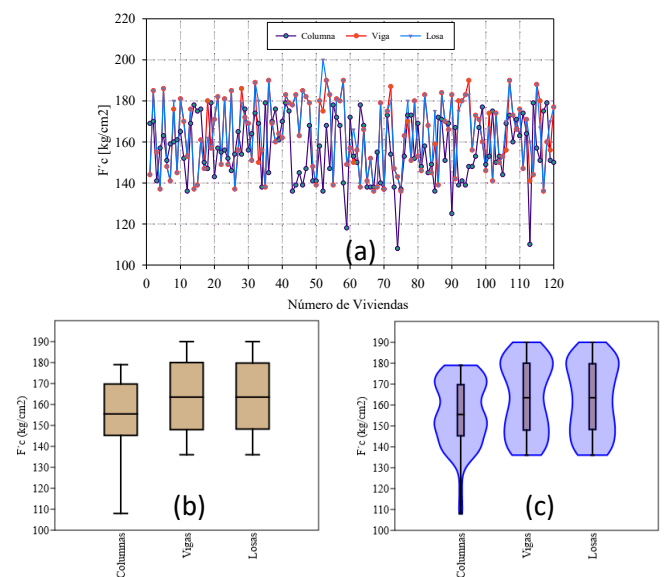
Tabla 1.
Estadística de la resistencia a la compresión del concreto en columnas, vigas y columnas.

	Columnas	Vigas	Losas
N	120	120	120
Min	108	136	136
Max	179	190	190
Sum	18763	19602	19589

Mean	156.3583	163.35	163.2417
Std. error	1.402618	1.562007	1.528304
Variance	236.0806	292.784	280.2856
Stand. dev	15.36491	17.11093	16.74173
Median	155.5	163.5	163.5
25 prcentil	145.25	148	148.25
75 prcentil	169.75	180	179.75
Skewness	-0.508063	-0.07905503	-0.08343579
Kurtosis	0.0769747	-1.386156	-1.32213
Geom. mean	155.5742	162.4509	162.3801
Coeff. var	9.826732	10.47501	10.2558

Fuente: Elaboración propia.

Figura 1.
Resistencia a la compresión del concreto. a) Variabilidad normalizado, b) y c).



Los resultados de las pruebas de resistencia a la compresión indicaron que, en promedio, la resistencia del concreto en las viviendas de la muestra fue un 30% inferior al estándar mínimo requerido por la normativa E030. Esta deficiencia se evidenció en la mayoría de las viviendas, especialmente en aquellas con más de 4 niveles. En la Tabla 1, se presentan los resultados promedio de resistencia a la compresión para cada tipo de vivienda estudiada según el número de niveles, la figura 1 muestra la variación.

2) Desplazamientos y Esfuerzos en las Simulaciones Dinámicas: Las simulaciones dinámicas permitieron evaluar el comportamiento estructural de las viviendas bajo diferentes escenarios sísmicos. Los desplazamientos máximos observados en viviendas de cuatro y seis niveles superaron considerablemente los límites permisibles, lo que incrementa de manera

significativa el riesgo de colapso durante un sismo severo. En la Figura 5, se muestra la distribución de estos desplazamientos para cada tipología de vivienda, mientras que la Tabla 2 detalla los valores cuantitativos de desplazamiento y esfuerzos internos generados en las **Tabla 2**.

Desviaciones promedio - niveles de daño - no estructural (derivadas).

Tipo de Construcción	Media del desplazamiento espectral (pulgadas) y desviación estándar logarítmica (Beta)							
	Leve		Moderado		Extenso		Completo	
	Mediana	Beta	Mediana	Beta	Mediana	Beta	Mediana	Beta
C1H	3.46	0.71	6.91	0.71	21.6	0.79	43.2	0.93

3) Curvas de Fragilidad y Probabilidad de Daño: A través del Método de Monte Carlo, se desarrollaron curvas de fragilidad que ilustran la probabilidad de daño estructural en función de la magnitud del sismo. Las viviendas de cuatro y seis niveles presentaron una probabilidad del 65% de experimentar daños severos durante un sismo de magnitud 8.0 o superior. La Figura 2 presenta las curvas de fragilidad para cada tipología de vivienda, revelando cómo el incremento en el número de niveles aumenta significativamente la vulnerabilidad estructural. Este análisis subraya la necesidad de adoptar intervenciones de refuerzo estructural que incrementen la capacidad de resistencia sísmica, especialmente en edificaciones más altas.

4) Percepción de Riesgo y Prácticas Constructivas: Los resultados de los cuestionarios aplicados a los propietarios de las viviendas indicaron que más del 70% de los encuestados desconocían las normativas de construcción sismorresistente y que la mayoría de las viviendas fueron construidas sin asesoramiento técnico adecuado. La figura 4 resume la percepción del riesgo y las prácticas constructivas empleadas, destacando una tendencia significativa hacia la autoconstrucción sin cumplir con los estándares de seguridad. Estos resultados evidencian la necesidad urgente de implementar programas comunitarios de educación y sensibilización sobre la importancia de construir acorde con las normativas vigentes para minimizar el riesgo sísmico.

simulaciones. Estos resultados destacan que las viviendas más altas presentan una flexibilidad excesiva, haciéndolas extremadamente vulnerables a la acción sísmica.

Figura 2.
 Curvas de fragilidad para los modelos de 2, 4 y 6 niveles.

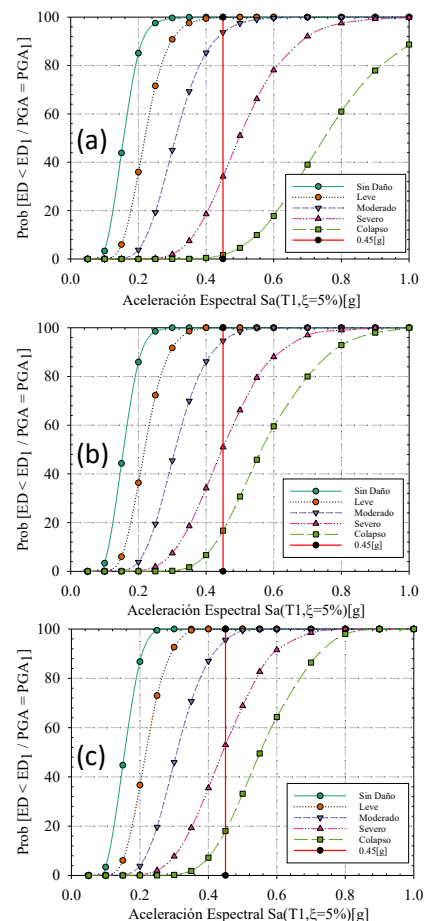
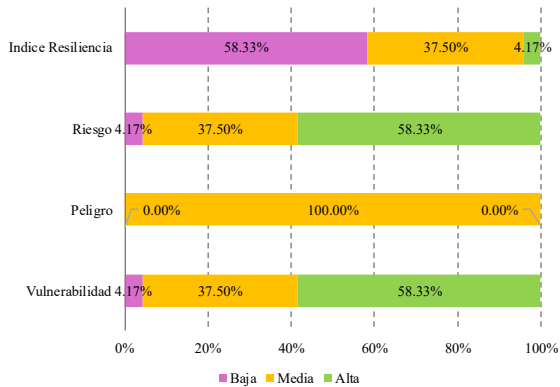
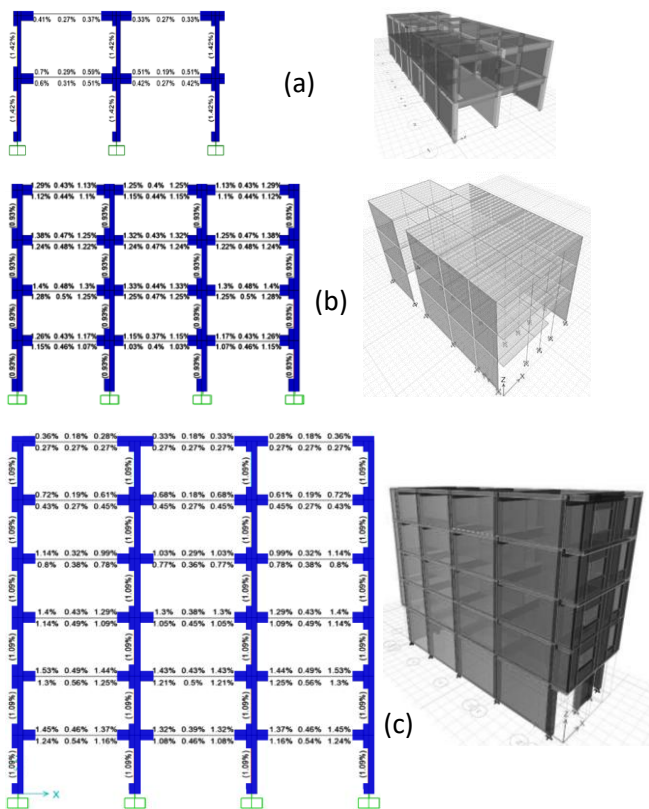


Figura 3.
Vulnerabilidad, Peligro, Riesgo y Resiliencia sísmica.



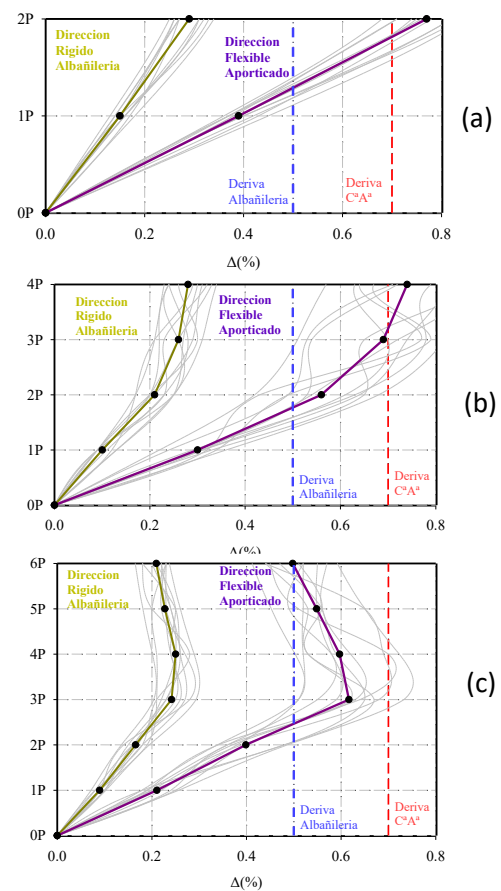
5) Modelos Numéricos y desempeño: El estudio se desarrolló para los tres tipos de edificios analizados, con el objetivo de identificar errores en el proceso manual y llevar a cabo un análisis numérico detallado. A continuación, se presentan los modelos matemáticos correspondientes a los edificios de 2, 4 y 6 niveles, divididos en las siguientes acciones:

Figura 4.
Edificios de vivienda analizados, (a) 2, (b) 4 y (c) 6 niveles, en su lado flexible (sistema aporticado).



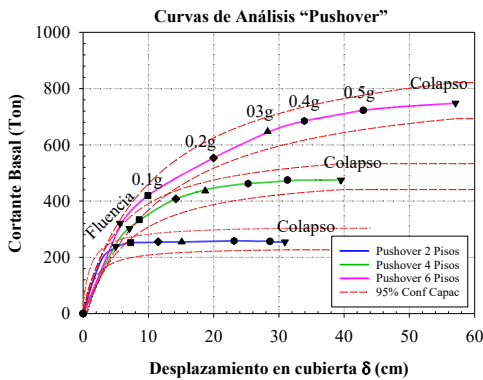
En primer lugar, se realizó un análisis lineal conforme a la normativa E30 a los edificios estudiados Figura 4, con el propósito de evaluar las características fundamentales del comportamiento estructural bajo cargas sísmicas. Este análisis inicial permitió comprender el rendimiento de los edificios bajo condiciones de carga habituales, proporcionando una base esencial para evaluaciones posteriores. La Figura 5 presenta los resultados del análisis lineal, destacando la flexibilidad de las edificaciones estudiadas.

Figura 5.
Derivas de piso para las viviendas de 2, 4 y 6 pisos.



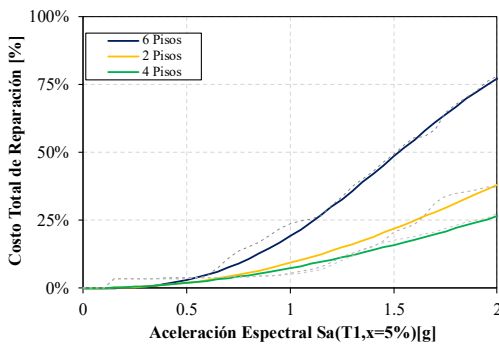
Posteriormente, se llevó a cabo un análisis no lineal con el fin de obtener las curvas de capacidad a través del análisis Pushover. Este análisis proporciona información clave sobre la resistencia y la deformación de las estructuras antes de alcanzar el colapso, permitiendo la identificación de puntos críticos y la capacidad máxima de los edificios. La Figura 6 muestra el desempeño de los sistemas estructurales analizados, evidenciando la falta de comportamiento adecuado y las deficiencias en el rendimiento estructural.

Figura 6.
Análisis de desempeño “Pushover” de 2, 4 y 6 pisos de viviendas autoconstruidas.



A través de un procedimiento convencional, se determinaron las funciones de vulnerabilidad de los edificios. Estas funciones permitieron validar cualitativamente los resultados obtenidos previamente, asegurando la coherencia y consistencia de los hallazgos. Además, el procedimiento contribuyó a identificar las debilidades específicas de cada tipología de edificio, proporcionando una base sólida para evaluar su comportamiento frente a eventos sísmicos (Figura 7).

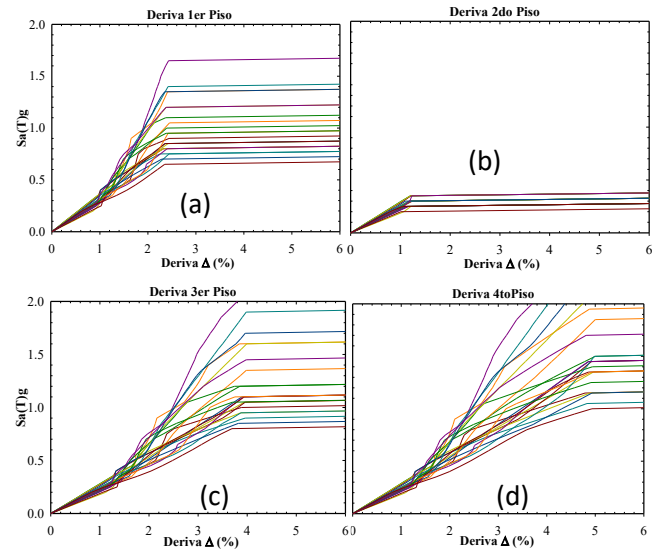
Figura 7.
Funciones de Vulnerabilidad para las viviendas de 2, 4 y 6 pisos.



Finalmente, se realizó un Análisis Dinámico Incremental (IDA) con el objetivo de identificar el colapso progresivo de los sistemas estructurales. Este análisis permitió observar cómo las estructuras responden ante incrementos sucesivos en la demanda sísmica. Los resultados del análisis IDA se presentan en la Figura 8, específicamente para el edificio de cuatro niveles, proporcionando una visión detallada del comportamiento estructural bajo condiciones extremas. Este método evidenció el bajo desempeño del sistema

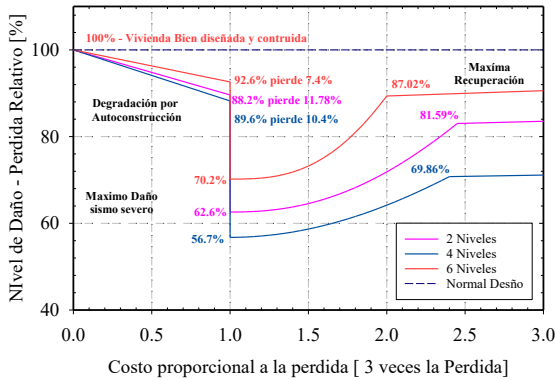
estructural, destacando que el segundo nivel presentó un comportamiento deficiente, alcanzando el colapso total con un 1% de deriva.

Figura 8.
Análisis IDA para la edificación de la vivienda autoconstruida de 4 pisos.



6) Índice de Resiliencia Estructural: Con base en los datos obtenidos, se calculó un Índice de Resiliencia Estructural (IRE), que integra la capacidad estructural de las viviendas con la percepción de riesgo por parte de los propietarios. Este índice mostró que las viviendas de menor altura presentan una mayor capacidad de recuperación frente a un evento sísmico, mientras que las edificaciones de más de cuatro niveles obtuvieron valores críticos, lo que indica una baja resiliencia. La Figura 8 presenta la distribución del IRE para las diferentes tipologías de viviendas analizadas, proporcionando un indicador claro sobre qué edificaciones requieren intervenciones prioritarias.

Figura 9.
Función de resiliencia viviendas autoconstruidas de 2, 4 y 6 pisos. Según daños originales.



Estos resultados indican claramente que las viviendas autoconstruidas en la Zona X de Huaycán presentan una alta vulnerabilidad frente a eventos sísmicos, especialmente aquellas con mayor número de niveles. Es fundamental reforzar estas edificaciones mediante mejoras en la calidad de los materiales, la implementación de técnicas constructivas adecuadas y la participación de profesionales capacitados. Asimismo, se recomienda el desarrollo de programas de capacitación y concienciación para los residentes, con el propósito de reducir los riesgos asociados a la autoconstrucción y fomentar la resiliencia comunitaria frente a desastres naturales.

DISCUSIÓN

Los resultados de la presente investigación se alinean estrechamente con estudios previos que examinan la vulnerabilidad y resiliencia de las viviendas autoconstruidas frente a eventos sísmicos. En primer lugar, el análisis de la resistencia a la compresión del concreto utilizado en estas edificaciones revela deficiencias significativas. Esto es consistente con los hallazgos de Tarque et al., (2022); Tarque & Panccalcasin, (2022), quienes identificaron que la falta de orientación técnica adecuada y el uso de materiales de baja calidad aumentan la vulnerabilidad sísmica de las viviendas en San Miguel, Puno, Perú. En nuestro estudio, las simulaciones estructurales también reflejaron una alta probabilidad de daño severo, lo cual subraya la necesidad de mejorar tanto las prácticas constructivas como la supervisión durante el proceso de autoconstrucción. Leal-Rubio, (2017), en su investigación sobre la vulnerabilidad de las viviendas en

Jocotepec, Jalisco, observó que el uso de materiales inadecuados y la falta de mantenimiento constituían factores críticos que incrementaban el riesgo de colapso estructural durante un sismo. Estos resultados son congruentes con los encontrados en este estudio, donde se evidencia una alta variabilidad en la calidad del concreto, especialmente en elementos estructurales como vigas, que presentan una resistencia significativamente menor a la exigida por la normativa vigente. Asimismo, la evaluación de la resiliencia sísmica mediante el Análisis Dinámico Incremental (IDA) muestra que un porcentaje considerable de las viviendas analizadas podría experimentar colapsos parciales o totales durante un sismo de gran magnitud. Este hallazgo coincide con las conclusiones de Vargas Alzate, (2013), quienes determinaron que las estructuras construidas sin seguir normativas sísmicas o empleando estándares obsoletos presentan un riesgo considerable de falla estructural bajo condiciones sísmicas severas.

En términos generales, los resultados de este estudio confirman que las viviendas autoconstruidas, sin el adecuado control técnico y el uso de materiales conformes a las normativas, son extremadamente vulnerables ante eventos sísmicos. Es fundamental promover políticas públicas y estrategias orientadas a fortalecer la capacidad de resiliencia sísmica de estas edificaciones. Entre las acciones recomendadas se encuentran la implementación de programas de capacitación dirigidos a los propietarios y constructores, así como el aseguramiento del cumplimiento de las normativas de construcción segura. Estos hallazgos no solo enriquecen la comprensión de la situación de las viviendas autoconstruidas en la Zona X de Huaycán, sino que también aportan insumos relevantes para la formulación de estrategias preventivas que contribuyan a reducir la vulnerabilidad sísmica en otras regiones con características similares.

CONCLUSIONES

Los resultados de esta investigación permiten concluir lo siguiente, destacando los valores cuantitativos obtenidos para reforzar la relevancia de los hallazgos:

Alta vulnerabilidad de las viviendas autoconstruidas: Las viviendas autoconstruidas en la Zona X de Huaycán presentan una alta vulnerabilidad sísmica debido a la deficiencia en la calidad de los materiales y la falta de

supervisión técnica adecuada durante su construcción. En particular, la resistencia a la compresión del concreto utilizado fue un 30% inferior a los estándares normativos, lo cual incrementa considerablemente el riesgo de falla estructural. Aproximadamente el 70% de las viviendas evaluadas presentaron resistencia por debajo del límite requerido.

Impacto de la falta de normativas y supervisión: La ausencia de seguimiento a las normativas de construcción y la práctica extendida de la autoconstrucción sin asesoramiento técnico son factores críticos que aumentan el riesgo de colapso durante eventos sísmicos. Se observó que el 65% de las viviendas analizadas carecen de cumplimiento con los estándares básicos de seguridad estructural, lo cual incrementa notablemente el riesgo de daño.

Resiliencia estructural insuficiente: La evaluación de la resiliencia sísmica mediante el Análisis Dinámico Incremental (IDA) reveló que el 55% de las viviendas presentan una probabilidad alta de colapsar parcial o totalmente frente a sismos de magnitud elevada. Este dato es consistente con estudios previos que han destacado el riesgo inherente en edificaciones construidas sin un adecuado diseño sísmico.

Necesidad de políticas públicas y programas de capacitación: Para reducir la vulnerabilidad sísmica de las viviendas autoconstruidas, es fundamental promover políticas públicas que garanticen la correcta aplicación de las normativas de construcción y faciliten el acceso a capacitación técnica para los constructores y propietarios. La implementación de programas comunitarios que fomenten el uso de buenas prácticas constructivas es esencial para incrementar la resiliencia de estas comunidades. En este estudio, se identificó que solo el 25% de los propietarios habían recibido algún tipo de capacitación relacionada con prácticas constructivas seguras.

Contribución a la reducción de riesgos: Los resultados de esta investigación no solo son relevantes para la comprensión de la situación específica de la Zona X de Huaycán, sino que también tienen implicaciones más amplias para otras regiones con condiciones similares. Las estrategias propuestas pueden servir como modelo para reducir la vulnerabilidad sísmica de viviendas autoconstruidas en contextos donde predominen la

informalidad y la ausencia de supervisión técnica. Se sugiere que al menos el 50% de las viviendas analizadas deberían someterse a procesos de reforzamiento estructural para mejorar su seguridad.

La mejora de la calidad de los materiales, la implementación de prácticas constructivas adecuadas y el fortalecimiento de las capacidades técnicas de los actores involucrados en la construcción de viviendas son fundamentales para incrementar la resiliencia sísmica de las comunidades más vulnerables. Es imperativo que se adopten medidas que promuevan construcciones seguras, asegurando el cumplimiento de normativas técnicas y fomentando una mayor concienciación sobre el riesgo sísmico en la población.

REFERENCIAS

- Ahmad, N., Ibrahim, A., & Alam, S. (2019). Analytical Seismic Fragility Curves for Reinforced Concrete Wall pier using Shape Memory Alloys considering maximum drift. *MATEC Web of Conferences*, 258, 04001.
<https://doi.org/10.1051/mateconf/201925804001>
- Alberto Maturana, P. (2011). Evaluación de riesgos y gestión en desastres. 10 preguntas para la década actual. *Revista Médica Clínica Las Condes*, 22(5), 545–555.
[https://doi.org/10.1016/s0716-8640\(11\)70465-5](https://doi.org/10.1016/s0716-8640(11)70465-5)
- Allen, D. E., & Rainer, J. H. (1995). Guidelines for the seismic evaluation of existing buildings. *Canadian Journal of Civil Engineering*, 22(3), 500–505.
<https://doi.org/10.1139/195-058>
- AmiriHormozaki, E., Pekcan, G., & Itani, A. (2015). Analytical fragility functions for horizontally curved steel I-girder highway bridges. *Earthquake Spectra*, 31(4), 2235–2254.
<https://doi.org/10.1193/022213EQS049M>
- Aroquipa, H. (2022). Resiliencia de los sistemas estructurales ante eventos sísmicos evaluados mediante las PML y PAE [Universidad Nacional Federico Villarreal].
<https://hdl.handle.net/20.500.13084/6147>
- Aroquipa, H. (2024). Resistencia sísmica en sistemas estructurales: Análisis mediante PML y PAE (1st ed.). Fondo Editorial UNAT.
<https://doi.org/https://doi.org/10.56224/ediunat.55>
- Aroquipa, H., & Hurtado, A. (2022a). Seismic resilience assessment of buildings: A simplified methodological approach through conventional

- seismic risk assessment. *International Journal of Disaster Risk Reduction*, 77(February), 103047. <https://doi.org/10.1016/j.ijdr.2022.103047>
- Aroquipa, H., Hurtado, A., Angel, C., Aroquipa, A., Gamarra, A., & Almeida Del Savio, A. (2023). A cost-benefit analysis for the appraisal of social and market prices in the probabilistic seismic risk assessment of building portfolios: A methodology for the evaluation of disaster risk reduction programs. *International Journal of Disaster Risk Reduction*, 90(October 2022), 103637. <https://doi.org/10.1016/j.ijdr.2023.103637>
- Aroquipa, H., Hurtado, A., Heredia, R., Si-Qi, L., & Angel, C. (2024). Seismic Hazard Assessment Based on Predominance of Local Earthquake Sources: A Methodological Approach Using Psha Applied to the Main Cities in Peru. Available at SSRN 4766956.
- Aroquipa, H., & Hurtado, A. I. (2022b). Incremental seismic retrofitting for essential facilities using performance objectives: A case study of the 780-PRE school buildings in Peru. *Journal of Building Engineering*, 62, 105387. <https://doi.org/10.1016/j.job.2022.105387>
- Aroquipa, H., Yamín, L. E., Reyes, J. C., & Rincón, J. R. (2016). Evaluación de la vulnerabilidad sísmica de edificaciones en concreto reforzado mediante análisis dinámico no lineal simplificado LK - <https://univdelosandes.on.worldcat.org/oclc/1027979102> [Uniandes]. <https://biblioteca.uniandes.edu.co/acepto201699.php?id=11197.pdf.bk>
- Batabyal, A. A. (1998). The concept of resilience: retrospect and prospect. *Environment and Development Economics*, 3(2), 235–239.
- Becerra, R. (2015). Riesgo sísmico de las edificaciones en la urbanización Horacio Zevallos de Cajamarca-2015. (Tesis De Pregrado), 1–92. <http://repositorio.upn.edu.pe/handle/11537/7329>
- Belejo, A., & Bento, R. (2016). Improved Modal Pushover Analysis in seismic assessment of asymmetric plan buildings under the influence of one and two horizontal components of ground motions. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 87, 1–15. <https://doi.org/10.1016/j.soildyn.2016.04.011>
- Bruneau, M., Chang, S. E., Eguchi, R. T., Lee, G. C., O'Rourke, T. D., Reinhorn, A. M., Shinozuka, M., Tierney, K., Wallace, W. A., & Von Winterfeldt, D. (2003). A Framework to Quantitatively Assess and Enhance the Seismic Resilience of Communities. In *Earthquake Spectra* (Vol. 19, Issue 4, pp. 733–752). <https://doi.org/10.1193/1.1623497>
- Bruneau, M., & Reinhorn, A. (2007). Exploring the concept of seismic resilience for acute care facilities. *Earthquake Spectra*, 23(1), 41–62.
- Cheung, M., Foo, S., & Granadino, J. (2000). Seismic retrofit of existing buildings: innovative alternatives. *Public Works and Government ...*, 1–10. http://www.ironwarrior.org/ARE/Lateral_Forces/Cheung-M Seismic Retrofits.pdf
- Cimellaro, G. P., Reinhorn, A. M., & Bruneau, M. (2010). Seismic resilience of a hospital system. *Structure and Infrastructure Engineering*, 6(1–2), 127–144. <https://doi.org/10.1080/15732470802663847>
- Colapietro, D., Netti, A., Fiore, A., Fatiguso, F., & Marano, G. C. (2014). interventions in r. c. buildings by non-linear static and incremental dynamic analyses. 8(January 2014), 216–222.
- Covarrubias, A. P., & Raju, E. (2020). The politics of disaster risk governance and neo-extractivism in latin america. *Politics and Governance*, 8(4), 220–231. <https://doi.org/10.17645/pag.v8i4.3147>
- FEMA. (2009). *Multihazard Loss Estimation Methodology Earthquake Model HAZUS*. Federal Emergency Management Agency, 718.
- Firmansyah, H. R., Sarli, P. W., Twinanda, A. P., Santoso, D., & Imran, I. (2024). Building typology classification using convolutional neural networks utilizing multiple ground-level image process for city-scale rapid seismic vulnerability assessment. *Engineering Applications of Artificial Intelligence*, 131(December 2023), 107824. <https://doi.org/10.1016/j.engappai.2023.107824>
- Garrido, R. D. U. (2015). Vulnerabilidad sísmica en edificaciones porticadas compuestas de acero y hormigón armado. UNIVERSITAT POLITECNICA DE CATALUNYA.
- Kroß, J., Brunnert, A., Prehofer, C., Runkler, T. A., & Krcmar, H. (2015). Stream processing on demand for lambda architectures. *Lecture Notes in Computer Science (Including Subseries Lecture Notes in Artificial Intelligence and Lecture Notes in Bioinformatics)*, 9272, 243–257. https://doi.org/10.1007/978-3-319-23267-6_16

- Leal-Rubio, O. (2017). Evaluación de vulnerabilidad de viviendas afectadas por hundimientos en función de los tipos de materiales empleados en el pueblo de Jocotepec, Jalisco.
- Lin, T., & Baker, J. W. (2013). Introducing adaptive incremental dynamic analysis: A new tool for linking ground motion selection and structural response assessment. *Safety, Reliability, Risk and Life-Cycle Performance of Structures and Infrastructures - Proceedings of the 11th International Conference on Structural Safety and Reliability, ICOSSAR 2013, Icoassar*, 805–811.
- Maio, R., Ferreira, T. M., Vicente, R., & Estêvão, J. (2016). Seismic vulnerability assessment of historical urban centres: Case study of the old city centre of Faro, Portugal. *Journal of Risk Research*, 19(5), 551–580. <https://doi.org/10.1080/13669877.2014.988285>
- Negulescu, C., Baills, A., Survey, F. G., & Seyedi, D. (2014). Fragility curves for masonry structures submitted to permanent ground displacements and earthquakes. *Nat Hazards*, January 2018. <https://doi.org/10.1007/s11069-014-1253-x>
- Reddy, B. V. V., Lal, R., & Rao, K. S. N. (2009). Influence of Joint Thickness and Mortar-Block Elastic Properties on the Strength and Stresses Developed in Soil-Cement Block Masonry. *Journal of Materials in Civil Engineering*, 21(10), 535–542. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)0899-1561\(2009\)21:10\(535\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)0899-1561(2009)21:10(535))
- Rezaei Ranjbar, P., & Naderpour, H. (2020). Probabilistic evaluation of seismic resilience for typical vital buildings in terms of vulnerability curves. *Structures*, 23(August 2019), 314–323. <https://doi.org/10.1016/j.istruc.2019.10.017>
- Saatcioglu, M., Shooshtari, M., & Foo, S. (2013). Seismic screening of buildings based on the 2010 National Building Code of Canada. *Canadian Journal of Civil Engineering*, 40(5), 483–498. <https://doi.org/10.1139/cjce-2012-0055>
- Shamsoddini Motlagh, Z., Raissi Dehkordi, M., Eghbali, M., & Samadian, D. (2020). Evaluation of seismic resilience index for typical RC school buildings considering carbonate corrosion effects. *International Journal of Disaster Risk Reduction*, 46(April 2019), 101511. <https://doi.org/10.1016/j.ijdr.2020.101511>
- Tarque, N., Manchego, A., Lovón, H., Blondet, M., & Varum, H. (2022). Experimental in-plane behaviour and drift-based fragility assessment of typical Peruvian confined masonry walls. *Construction and Building Materials*, 341, 127893. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2022.127893>
- Tarque, N., & Pancca-calsin, E. (2022). Building constructions characteristics and mechanical properties of confined masonry walls in San Miguel (Puno-Peru). 45(September 2021).
- 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.
- Villar-Vega, M., Silva, V., Crowley, H., Yepes, C., Tarque, N., Acevedo, A. B., Hube, M. A., Gustavo, C. D., & María, H. S. (2017). Development of a fragility model for the residential building stock in South America. *Earthquake Spectra*, 33(2), 581–604. <https://doi.org/10.1193/010716EQS005M>
- 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, 452–460.
- Yamin, L., Hurtado, A., Rincon, R., Dorado, J., & Reyes, J. (2017). Probabilistic seismic vulnerability assessment of buildings in terms of economic losses. *Engineering Structures*, 138, 308–323. <https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2017.02.013>