

EVALUACIÓN DE VULNERABILIDAD SÍSMICA, ANÁLISIS ESTRUCTURAL Y DISEÑO DE REFORZAMIENTO DE UNA VIVIENDA EN QUITO—ECUADOR

Evaluation of seismic vulnerability, structural analysis and design of the reinforcement of a house in Quito—Ecuador

JOSÉ BUNGACHO^a, RAÚL BAQUERO^b Y LUIS HERNÁNDEZ^c

Recibido: 29/6/22 • Aprobado: 20/10/22

Cómo citar: Bungacho, J., Baquero, R., & Hernandez, L. (2022). Evaluación de vulnerabilidad sísmica, análisis estructural y diseño de reforzamiento de una vivienda en Quito—Ecuador. *Ciencia, Ingenierías y Aplicaciones*, 5(2), 63–79. <https://doi.org/10.22206/cyap.2022.v5i2.pp63-79>

Resumen

El presente artículo se orienta al reforzamiento de una vivienda construida de manera informal, de tres plantas, ubicada en la ciudadela Emprovit, sector Turubamba en el sur de la ciudad de Quito, Ecuador. Mediante visitas de campo y ensayos de laboratorio se obtuvieron todos los datos necesarios para el correcto desenvolvimiento del trabajo. El sistema estructural de la vivienda se basa en pórticos constituidos por columnas, losa alivianada en dos direcciones y vigas banda. Se hizo una evaluación de acuerdo con los parámetros establecidos por las normas NEC15 y ASCE 41-17, la cual dio como resultado que la vivienda tiene una vulnerabilidad sísmica alta, además, el análisis estructural arrojó que no posee un buen comportamiento dinámico. Adicional a esto, la edificación no cumple con un buen desempeño en el rango no lineal, por lo que es necesario un reforzamiento estructural. Se propuso dos alternativas de reforzamiento con el objetivo de soportar eventos sísmicos importantes, el enchapado de paredes y el encamisado de columnas. Se determinó que la alternativa con mejores resultados es el enchapado de paredes,

^a Ingeniero Civil, Centro de Investigación de la Vivienda, Escuela Politécnica Nacional, Facultad de Ingeniería Civil y Ambiental; Quito, Ecuador.
ORCID: 0000-0003-1625-1704, Correo-e: jose.bungacho1997@hotmail.com

^b Ingeniero Civil, Especialista del Centro de Investigación de la Vivienda, Escuela Politécnica Nacional, Facultad de Ingeniería Civil y Ambiental; Quito, Ecuador.
ORCID: 0000-0001-5937-7759, Correo-e: raul.baquero@epn.edu.ec

^c Ingeniero Civil PHD, director del Centro de Investigación de la Vivienda, Escuela Politécnica Nacional, Facultad de Ingeniería Civil y Ambiental; Quito, Ecuador.
ORCID: 0000-0002-5805-9318, Correo-e: luis.hernandezr@epn.edu.ec



ya que mejora su comportamiento lateral y dinámico, además de no superar el esfuerzo admisible del suelo; por el contrario, el encamisado de columnas, si bien mejora el comportamiento dinámico, el esfuerzo del suelo supera al admisible, por lo que es necesario un reforzamiento a la cimentación. Adicionalmente, con las secciones propuestas, las derivas no cumplen en relación con la normativa, razón por la cual se requieren secciones más grandes, que causan un costo de reforzamiento mucho más elevado y un impacto a la parte arquitectónica, debido a la reducción de espacios.

Palabras clave: *reforzamiento; enchapado; encamisado; derivas; vulnerabilidad sísmica; análisis estructural; análisis lineal; análisis no lineal.*

Abstract

The present article is oriented to the reinforcement of a house built informally with 3 floors located in the citadel Emprovit, Turubamba sector in the south of the city of Quito - Ecuador, which, through field visits and laboratory tests, obtained all the data necessary for the correct development of the work. The structural system of the house is based on frames assembled by columns, lightened slab in two directions and band beams. An evaluation was made in accordance with the parameters established by the NEC15 and ASCE 41-17 standards, in which it results that the house has a high seismic vulnerability, in addition, that the structural analysis resulted in that it does not have a good behavior. dynamic, in addition to this, the building does not perform well in the non-linear range, so structural reinforcement is necessary. Two strengthening alternatives may be needed in order to withstand major seismic events, wall cladding and column cladding. It will be extended that the alternative with the best results is the cladding of walls, since it improves its lateral and dynamic behavior, in addition to not exceeding the admissible stress of the soil, on the contrary, the cladding of columns, although it improves the dynamic behavior, the soil stress exceeds the admissible one, so it is necessary to reinforce the foundation, in addition to this, with the proposed sections, the drifts do not comply with the regulations, so larger sections are necessary, which will cause a much higher cost of reinforcement and an impact to the architectural part, due to the reduction of spaces.

Keywords: *Strengthening; plating; jacketing; drifts; seismic vulnerability; structural analysis; lineal analysis; non-linear analysis.*

1. Introducción

Ecuador está ubicado en el denominado Cinturón de Fuego del Pacífico, formado por la interacción entre placas tectónicas y por procesos de subducción, aquí se generan los movimientos telúricos más grandes del planeta, lo que conduce a que en el país haya una acción sísmica muy alta, ejemplo de ello es el evento sísmico ocurrido en 1906, que alcanzó una magnitud de 8.8 (Mw). La *Norma Ecuatoriana de la Construcción* NEC15 está en vigencia, sin embargo, pese a que Ecuador es un país con alto riesgo sísmico no existen medidas estrictas que hagan cumplir con los lineamientos sismorresistentes que otorga dicha normativa (Quinde Martínez & Reinoso Angulo, 2016).

El estudio del reforzamiento de estructuras se hace sumamente importante dentro del país, en procura de corregir todas las deficiencias estructurales que se presenten en viviendas y edificios a nivel nacional y darle un mejor comportamiento ante un evento sísmico. En igual sentido, que sea amigable con las condiciones actuales de la edificación y sin dejar de lado la parte económica; todo esto con el propósito de disminuir la vulnerabilidad sísmica.

2. Análisis estructural

2.1. Recolección de datos estructurales

Para empezar con el estudio es necesaria la recolección de datos *in situ*, mediante equipos especializados, acelerómetros, pachómetros y martillo Smith.

La cimentación está realizada a base de zapatas aisladas, a una profundidad de 1.2 m, con unas dimensiones de 1 m para ambas direcciones y con un grosor de 30 cm. En cuanto al armado, se utilizó una parrilla de acero de 6 Φ 12 mm en cada dirección.

Existen dos tipos de columnas, para el primero cuentan con unas dimensiones de 30 x 20 cm y poseen el siguiente armado: tienen seis varillas longitudinales de Φ 12 mm con estribos de Φ 10 mm @ 15 cm en la zona cerca al nudo y @ 20 cm en la zona central para el segundo piso en

adelante, mientras que para la planta baja son estribos Φ 12 mm @ 15 cm en toda la longitud. Por otro lado, el segundo tipo de columnas poseen unas dimensiones de 20 x 20 cm y poseen el siguiente armado: seis varillas longitudinales de Φ 12 mm con estribos de Φ 10 mm @ 15 cm en toda su longitud.

Para los elementos horizontales se tienen vigas banda de 30 x 25 cm armada con seis varillas de Φ 12 mm con estribos de Φ 10 mm cada 20 cm en todo el vano.

2.2. Descripción del suelo

Se usa los resultados del ensayo triaxial UU no consolidado no drenado. Para el cálculo del esfuerzo admisible del suelo se usará la teoría de capacidad de carga según Terzaghi (Nij Patzán, 2009).

Tabla 1
Resultados del ensayo Triaxial UU

Parámetro	Valor
Humedad (%)	30.82
Densidad (g/cm ³)	1.69
Cohesión (g/cm ²)	0.17
Ángulo de fricción (°)	22.78

Para el cálculo del coeficiente de balasto se usó la ecuación de J. Bowles, en la cual se relaciona el factor de seguridad con el esfuerzo admisible del suelo y con un factor.

$$k = 40 \cdot FS \cdot \sigma_{ADM}$$

Tabla 2
Capacidad de carga

Parámetro	Valor	Unidad
Qu	65.781	T/m ²
FS	3	N.A.
Q adm	21.93	T/m ²
Coef. Balast	2631.22	T/m ³

3. Análisis de materiales

3.1. Hormigón

La resistencia del hormigón a compresión de la estructura fue conseguida gracias al ensayo de rebote que se realizó en campo, en el cual se hizo 10 disparos en cada punto. Utilizando un valor promedio de todas las lecturas, se tiene que la resistencia a compresión del hormigón es de $f'_c = 176 \text{ kg/cm}^2$ (Bungacho Pozo, 2022).

4. Evaluación estructural

Para la evaluación estructural se usó el método propuesto por la ASCE 41-17. El método consiste en dos formularios en los cuales se describe todas las características posibles de la edificación, con la finalidad de calcular, mediante una suma algebraica, un índice que represente la vulnerabilidad sísmica de la estructura (Benjamín & Lockhart, 2011), por lo que se dice que la estructura tiene una vulnerabilidad sísmica **ALTA**.

5. Modelación de la estructura

Para la correcta modelación se debe hacer un cálculo a mano de todas las cargas muertas posibles, incluyendo mampostería, ventanas, bloques de alivianamiento, masillado, pisos, entre otros, para cada piso dependiendo de su distribución arquitectónica. Para la carga viva se usó lo especificado en la *Norma Ecuatoriana de la Construcción*, al ser una estructura de uso residencial se tomó el valor de 0.2 T/m^2 .

Para una mejor exactitud en los resultados, es importante modelar la mampostería, para este caso se empleó el método de Macro-modelado (Paredes, 2015). Para los paneles con aberturas, ya sea por puertas o ventanas, se siguieron las recomendaciones de la ASCE.

Para determinar el factor de reducción de resistencia sísmica se utilizan las tablas en el punto 6.3.4. de la norma NEC-SE-DS, en la cual se menciona que los pórticos resistentes a momento con vigas banda poseen un $R = 5$, mientras que cuando hay secciones de dimensión menor a la

especificada en la norma NEC-SE-HM se utiliza un $R=3$. La vivienda estudiada entra en estas dos categorías por lo que se decide tomar un valor intermedio entre las dos, es decir, un $R = 4$.

Una vez modelada la estructura, se hace un análisis estático, de acuerdo con los parámetros de la NEC15 de peligro sísmico, además, se hace un análisis dinámico, por lo que se ingresa el espectro de respuesta, que se determina a partir de parámetros establecidos en la misma norma. Asimismo, se hará un ensayo de vibraciones ambientales, el cual ayudará a calibrar el modelo computacional.

Tabla 3
Resultados del ensayo de vibraciones ambientales

	Frecuencia [Hz]	Periodo [s]	Observación
ft (E-O)	4.77	0.210	E-O
ft (N-S)	5.42	0.185	N-S + torsión
f torsión	6.7	0.149	N-S + torsión

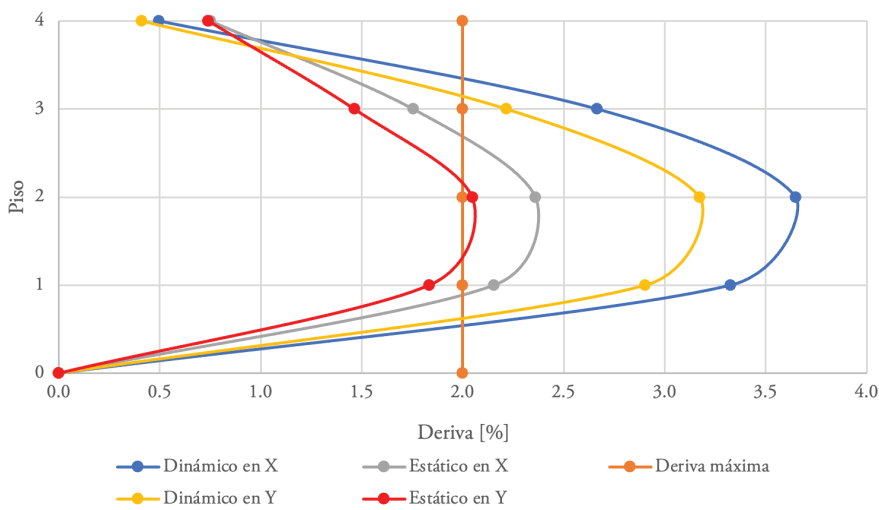
6. Análisis lineal

Para realizar un análisis de una estructura existente, se deben usar las combinaciones escritas en el punto 4.4 de la *Norma Ecuatoriana de la Construcción* en su capítulo de rehabilitación y evaluación de estructuras (NEC-SE-RE).

6.1. Derivas

Las derivas máximas según NEC15 en edificaciones sin reforzar son del 2 %, mientras que, reforzado, no pueden ser superiores al 1 %, tanto en el análisis estático como en el dinámico en X y en Y, al rigidizar la estructura.

Figura 1
Derivas inelásticas sin reforzar sin mampostería



6.2. Modos de vibración

El modelo fue calibrado para que los resultados sean lo más parecido posible a los resultados del ensayo de vibraciones ambientales. Es necesario realizar el reforzamiento con el objetivo de tener movimiento traslacional en los dos primeros modos y movimiento torsional en tercer modo de vibración.

Tabla 4
Modos de vibración del modelo

Modo	Periodo [s]	UX	UY	RZ
1	0.212	0.455	0.2723	0.0167
2	0.201	0.274	0.4787	0.003
3	0.085	0.016	0.05	0.7068

7. Análisis no lineal

Para el análisis no lineal se hará uso de los parámetros recomendados en ASCE 41-17.

Figura 2

Punto de desempeño para un sismo de 225 años de período de retorno

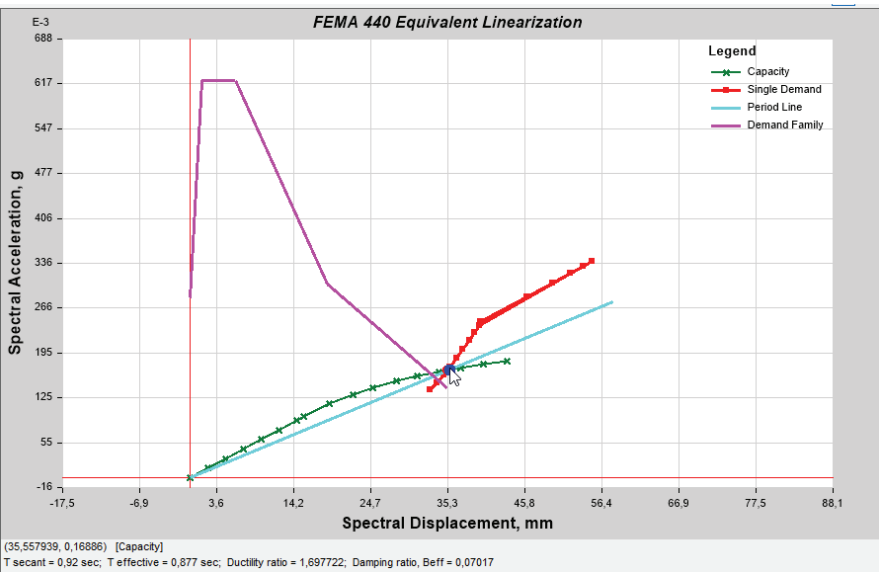


Figura 3

Nivel de desempeño para un sismo de 225 años de período de retorno

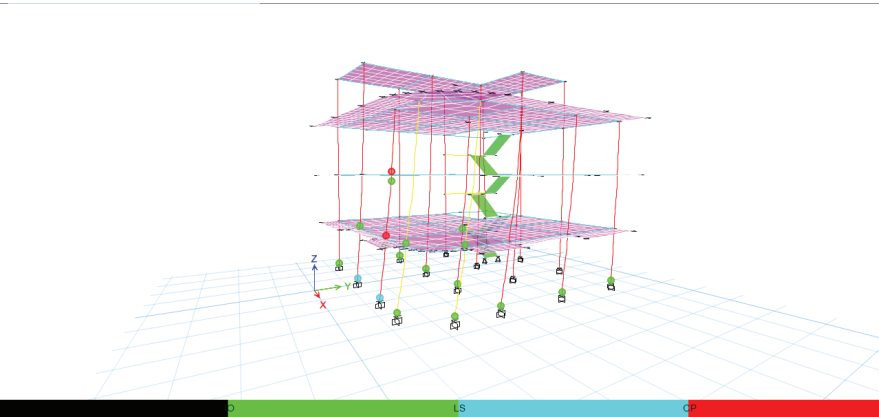
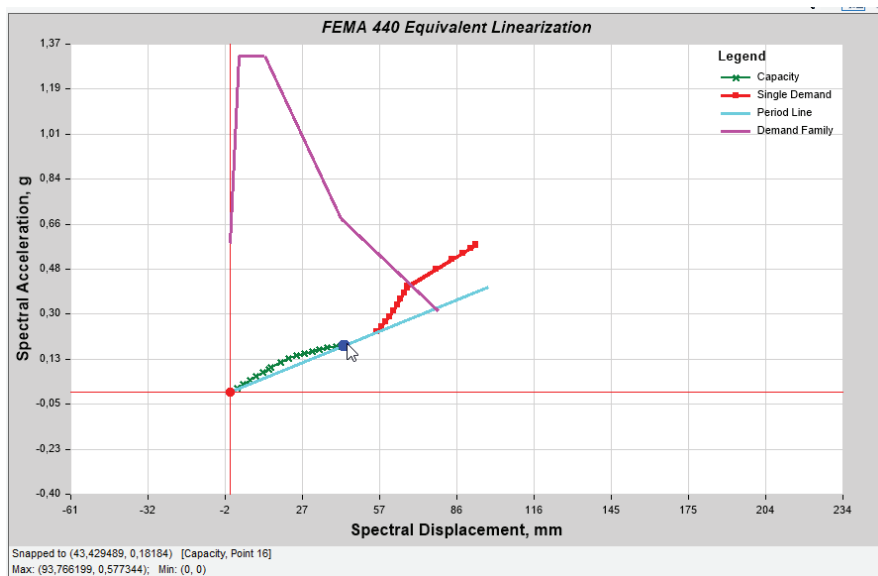
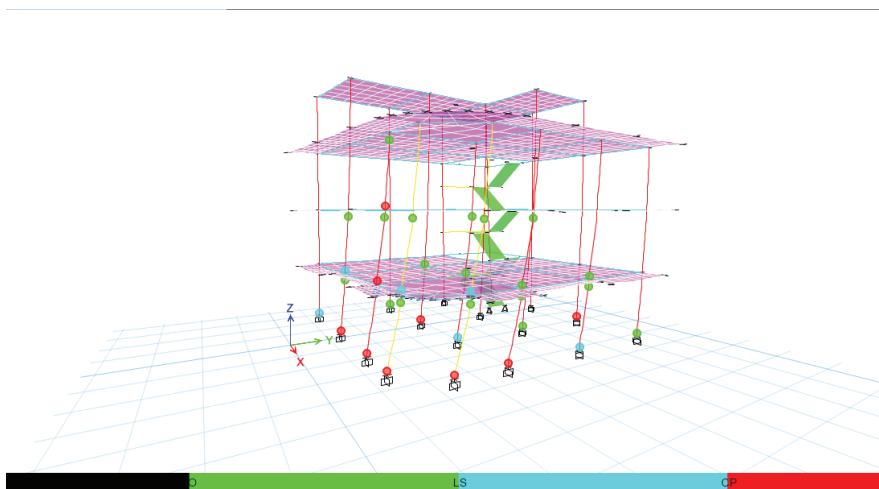


Figura 4*Punto de desempeño para un sismo de 975 años de período de retorno***Figura 5***Punto de desempeño para un sismo de 975 años de período de retorno*

Para un sismo de 225 años de período de retorno el nivel de desempeño no puede superar la seguridad de vida, mientras para un sismo de

975 años de período de retorno no puede superar la prevención al colapso, pero, como se evidencia, en ninguno de los dos casos la estructura ha cumplido, por tanto, son necesarios la intervención y el diseño de un reforzamiento estructural para aumentar la capacidad de la vivienda ante un evento sísmico.

8. Reforzamiento

Se procederá a emplear dos métodos de reforzamiento: enchapes de mampostería y encamisado de columnas.

8.1. Enchapado de mampostería

El enchapado consiste en dar cualidades de un muro estructural a un panel de relleno de mampostería. La configuración en planta que se brinde a los enchapes es de suma importancia, para no causar patologías estructurales adicionales como torsión en planta en el primer modo de vibración.

Figura 6

Esquema general del enchape

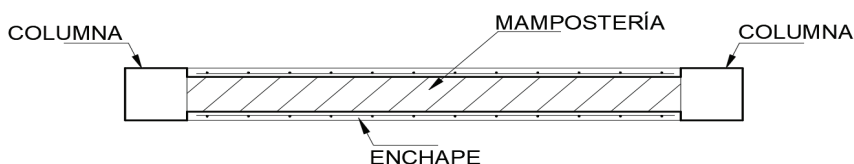
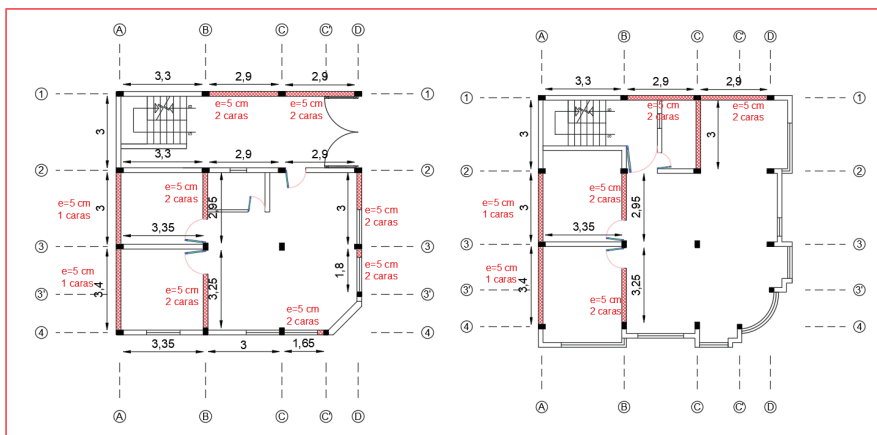
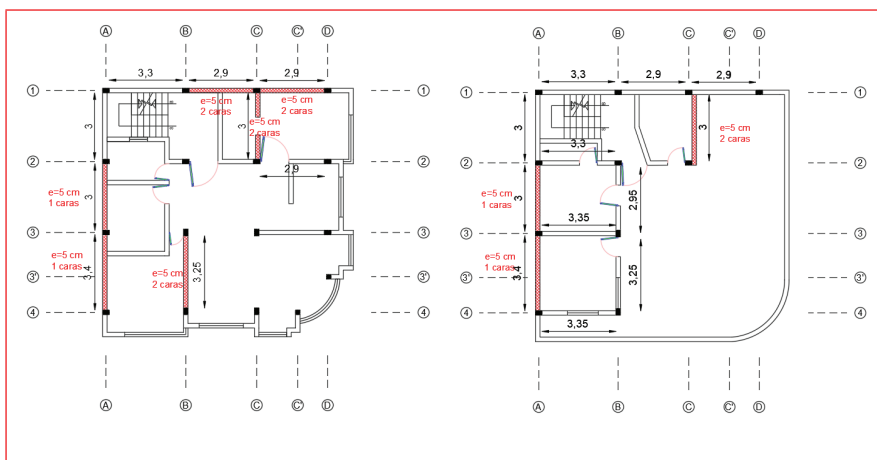


Figura 7*Vista en planta de la ubicación de los enchapes***Figura 8***Vista en planta de la ubicación de los enchapes*

Una vez escogida la ubicación correcta para los enchapes, se hace una verificación manual por corte.

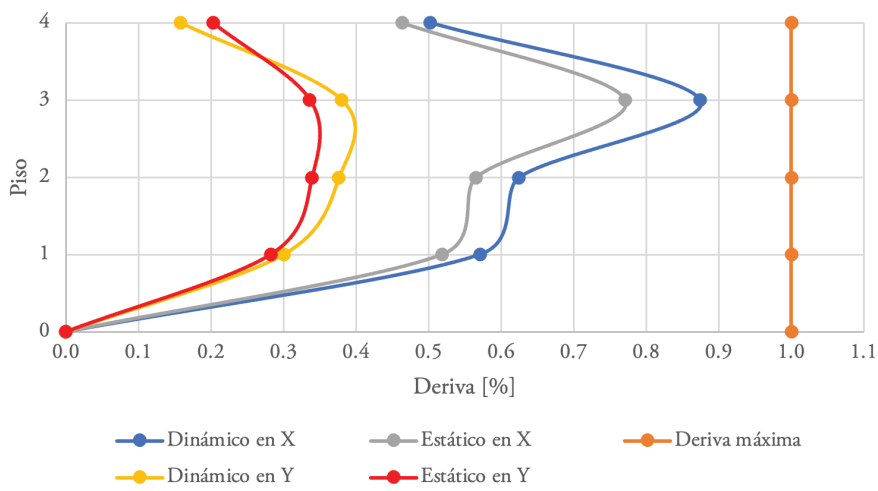
Tabla 5
Verificación manual del esfuerzo a corte de los enchapes

Nº	Muro	Pisos	Pt	Alpha	Vc [T]	Vs [T]	Vn	ΦVn	Vu (Etabs)	Vu < ΦVn	Vu < ΦVn [%]
1	Eje A 3-4	Piso 1 - Piso 4	0.00307	0.53	10.66	26.13	36.79	22.08	17.85	OK	80.85
2	Eje A 2-3	Piso 1 - Piso 5	0.00317	0.53	9.41	23.76	33.16	19.90	17.85	OK	89.70
3	Eje B 3-4	Piso 1 - Piso 3	0.00307	0.53	20.38	49.89	70.27	42.16	18.75	OK	44.47
4	Eje B 2-3	Piso 1 - Piso 3	0.00306	0.53	18.50	45.14	63.64	38.18	18.75	OK	49.10
5	Eje D 2-3	Piso 1	0.00317	0.8	28.40	47.52	75.91	45.55	37.95	OK	83.32
6	Eje D 3-3'	Piso 1	0.00317	0.8	17.04	28.51	45.55	27.33	24.59	OK	89.97
7	Eje C 1-2	Piso 2 - Piso 4	0.00317	0.53	18.81	47.52	66.33	39.80	34.08	OK	85.63
8	Eje 1 C-D	Piso 1 - Piso 3	0.00311	0.53	18.19	45.14	63.33	38.00	15.85	OK	41.71
9	Eje 1 B-C	Piso 1 - Piso 3	0.00311	0.53	18.19	45.14	63.33	38.00	15.85	OK	41.71
10	Eje 4 C-C'	Piso 1	0.00317	0.783	15.30	26.13	41.44	24.86	4.05	OK	16.29

También se hace una verificación de flexocompresión. Es importante que el control por corte ($V_u < \Phi V_n$) sea menor al 90 %. Para esta verificación se debe ingresar las combinaciones de carga correspondientes, al ser un reforzamiento no se pueden usar las combinaciones descritas en la NEC de diseño sismorresistente, sino se debe usar las combinaciones escritas en el punto 4.4. de la *Norma Ecuatoriana de la Construcción* en su capítulo de rehabilitación (NEC-SE-RE).

8.1.1. Derivas

Figura 9
Derivas inelásticas del modelo reforzado por enchape



Se observa que en el modelo reforzado las derivas están por debajo del límite permitido por la normativa.

8.1.2. Modos de vibración

Tabla 6
Modos de vibración con reforzamiento y con mampostería

Modo	Periodo [s]	UX	UY	RZ
1	0.27	0.6383	0.035	0.04
2	0.236	0.04	0.7098	0.002
3	0.109	0.05	0.01	0.6473

Tabla 7
Modos de vibración con reforzamiento y sin mampostería

Modo	Periodo [s]	UX	UY	RZ
1	0.329	0.6	0.0039	0.04
2	0.248	0.015	0.7413	0.002
3	0.193	0.1247	0.0218	0.6142

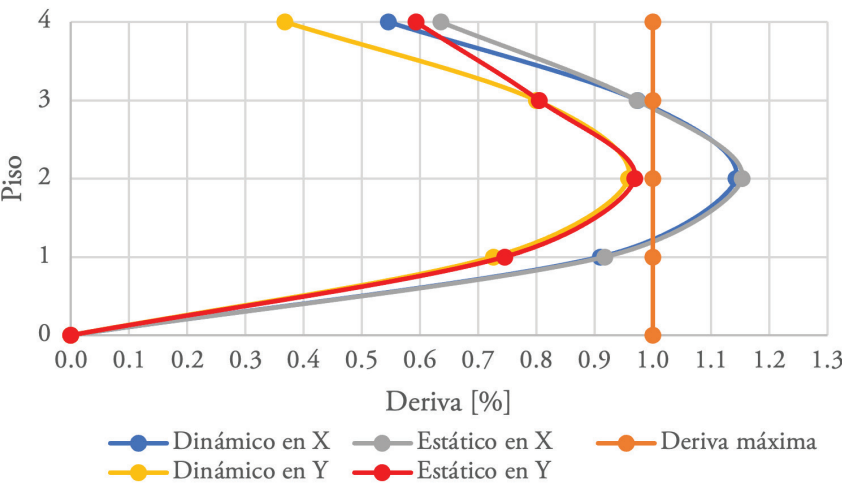
8.2. Encamisado de elementos estructurales

Para esta opción se usará específicamente el encamisado de columnas, que consiste en el aumento de la sección de los elementos originales.

La cuantía del nuevo elemento será la suficiente para cumplir con lo establecido por la norma NEC15 en su apartado de hormigón armado (NEC-SE-HM) en el punto 4.3.3.

8.2.1. Derivas

Figura 10
Derivas inelásticas del modelo reforzado por encamisado



8.2.2. Modos de vibración

Tabla 8
Modos de vibración con reforzamiento y con mampostería

Modo	Periodo [s]	UX	UY	RZ
1	0.272	0.4613	0.2338	0.0361
2	0.429	0.243	0.511	0
3	0.317	0.033	0.0145	0.68864

Tabla 9
Modos de vibración con reforzamiento y sin mampostería

Modo	Periodo [s]	UX	UY	RZ
1	0.47	0.7353	0.0015	0.0173
2	0.429	0.0071	0.6647	0.0977
3	0.317	0.0149	0.0957	0.6528

Para la revisión de flexocompresión se verifican los radios de capacidad, de los cuales se puede observar que todas las columnas están por debajo de uno, es decir, la sección es suficiente para soportar las demandas de la estructura.

9. Análisis de factibilidad de reforzamiento y selección de la opción óptima

Para la elección de la mejor alternativa de reforzamiento se comparan los resultados expuestos. En cuanto a las derivas, se puede observar que el reforzamiento por enchapado de mampostería logra una estructura mucho más rígida con menos desplazamiento en relación con el reforzamiento de encamisado. A continuación, se muestra las derivas máximas para cada caso.

Tabla 10
Máximas derivas inelásticas de las alternativas de reforzamiento

	Alternativa 1	Alternativa 2
	Deriva inelástica [%]	Deriva inelástica [%]
S estático x	0.77	1.15
S dinámico x	0.87	1.14
S estático y	0.34	0.96
S dinámico y	0.37	0.95

El comportamiento modal de la estructura para ambas situaciones se mantiene con un movimiento de traslación en los modos de vibración uno y dos, mientras que tiene un movimiento de rotación en el tercero, cabe mencionar que el comportamiento es mejor en el encamisado de columnas.

10. Conclusiones

Con base en los parámetros establecidos por la FEMA (Federal Emergency Management Agency) de Estados Unidos para la evaluación de estructuras, se concluye que la vivienda estudiada tiene una vulnerabilidad sísmica alta.

Asimismo, dado los resultados lineales y no lineales también se concluye que la vivienda posee varios problemas en su comportamiento estructural, lo cual puede significar un peligro a la integridad de sus ocupantes, por lo que es necesario un reforzamiento que mejore su respuesta sísmica.

De acuerdo con la ASCE 41-17 para el análisis no lineal de una estructura existente, es necesario hacerla con un sismo de 225 y 975 años de período de retorno, mas no con el sismo establecido por la NEC; para este caso, en un evento con un período de retorno de 975 años, la estructura no se tiene un punto de desempeño, por lo que se corrobora que es necesario una intervención para mejorar su respuesta sísmica a través de un reforzamiento.

Basado en un análisis técnico, se puede afirmar que la opción mejor posicionada de reforzamiento es la mampostería enchapada, ya que es una alternativa económica que mejora de gran manera el comportamiento modal y de derivas, además de que no afecta la cimentación, debido a que el esfuerzo en el suelo se reparte a través de las cadenas, y hasta cierto punto no es necesario realizar un reforzamiento a la cimentación.

Referencias

- ASCE. (2017). Seismic Evaluation and Retrofit of Existing Buildings. In *Seismic Evaluation and Retrofit of Existing Buildings*. <https://doi.org/10.1061/9780784414859>
- Benjamín Hernández, J., & Lockhart Castro, S. (2011). Metodología para la evaluación de la vulnerabilidad sísmica de edificaciones de hormigón armado existente. *Ciencia y Sociedad*, 36(2), 256-275. <https://revistas.intec.edu.do/index.php/ciso/article/view/907/html>
- Bungacho Pozo, J. I. (2022). *Evaluación de la vulnerabilidad sísmica, análisis estructural y diseño de reforzamiento de una vivienda de tres pisos ubicado en el sur de Quito-Ecuador*. Escuela Politécnica Nacional.
- FEMA. (2014). Rapid visual screening of buildings for potential seismic hazards. FEMA P-154. NCEE 2014 - 10th U.S. National Conference on Earthquake Engineering: Frontiers of Earthquake Engineering, January. <https://doi.org/10.4231/D3M90238V>
- MIDUVI. (2015d). *NEC15-Riesgo Sísmico, Evaluación, Rehabilitación de Estructuras*. In MIDUVI (Ed.), Dirección de Comunicación Social, MIDUVI. MIDUVI, CAMICON. <https://www.habitatyvivienda.gob.ec/wp-content/uploads/downloads/2015/02/NEC-SE-RE-Riesgo-sismico.pdf>
- Nij Patzán, J. E. (2009). *Guía práctica para el cálculo de capacidad de carga en cimentaciones superficiales, losas de cimentación, pilote y pilas perforadas*. [Trabajo de grado. Universidad de San Carlos de Guatemala].
- Paredes, R. (2015). *Influencia de los elementos no estructurales en la respuesta dinámica de un edificio. Aproximación Teórica-Experimental*. Escuela Politécnica Nacional.
- Quinde Martínez, P., & Reinoso Angulo, E. (2016). Seismic hazard assessment for Ecuador and design spectra proposed for the City of Cuenca. *Ingeniería Sísmica*, 26(94), 1–26.