

Efectos de la escalera en el comportamiento dinámico de una estructura de 7 niveles de hormigón armado

Effects of the staircase on the dynamic behavior of a 7-story reinforced concrete structure

Jennifer Elizabeth Pino-Arguello¹[0009-0004-8386-5786], Raúl Alexis Salazar-Flores²[0000-0001-6483-2613],
Marcelo David Guerra-Valladares³[0000-0003-4119-4959], Alexis Iván Andrade-Valle⁴[0000-0003-1543-4381]

¹⁻⁴ Universidad Nacional de Chimborazo, Facultad de Ingeniería. Carrera de Ingeniería Civil. Av. Antonio José de Sucre km 1 1/2 vía a Guano. 060105. Riobamba – Chimborazo. Ecuador
{¹j.pino@unach.edu.ec, ²raul.salazar, ³marcelo.guerra, ⁴alexis.andrade}@unach.edu.ec

CITA EN APA:

Pino-Arguello, J. E., Salazar-Flores, R. A., Guerra-Valladares, M. D., & Andrade-Valle, A. I. (2025). Efectos de la escalera en el comportamiento dinámico de una estructura de 7 niveles de hormigón armado. *Tesla Revista Científica*, 5(2), e560. <https://doi.org/10.55204/trc.v5i2.e560>

Recibido: 2025-10-15

Revisado: 2025-10-16 al 2025-11-15

Corregido: 2025-11-20

Aceptado: 2025-12-02

Publicado: 2025-12-09

TESLA

Revista Científica

ISSN: 2796-9320



Los contenidos de este artículo están bajo una licencia de Creative Commons Attribution 4.0 International (CC BY 4.0)

Los autores conservan los derechos morales y patrimoniales de sus obras.

The contents of this article are under a Creative Commons Attribution 4.0 International (CC BY 4.0) license. The authors retain the moral and patrimonial rights of their works.

Resumen

Introducción: El hormigón armado es esencial en construcciones debido a su resistencia combinada de concreto y acero. Las escaleras de hormigón, al ser parte integral de la estructura, pueden modificar significativamente el comportamiento sísmico, alterando rigidez y generando torsión.

Objetivo: Analizar la influencia de las escaleras de hormigón armado y su viga de apoyo en la respuesta sísmica de un edificio de siete pisos, comparando tres configuraciones estructurales.

Métodos: Se realizaron simulaciones numéricas de tres configuraciones estructurales: sin escalera (M1), con escalera y viga (M2), y con escalera, viga y muro de corte (M3), evaluando parámetros dinámicos como vibración, excentricidad y derivas.

Resultados: El modelo M2 mostró mayor rigidez, pero también mayor excentricidad torsional. El M3, con muro de corte, redujo la excentricidad y mejoró el comportamiento sísmico, cumpliendo con los límites normativos.

Conclusiones: La inclusión de escaleras rígidamente conectadas aumenta la rigidez, pero puede generar irregularidades torsionales. Un muro de corte ayuda a mitigar estos efectos, mejorando la estabilidad sísmica de la estructura.

Palabras Clave: Hormigón armado, escaleras, comportamiento sísmico, rigidez estructural, torsión.

Abstract

Introduction: Reinforced concrete is essential in construction due to its combined strength of concrete and steel. Concrete stairs, as an integral part of the structure, can significantly modify seismic behavior by altering rigidity and generating torsion.

Objective: To analyze the influence of reinforced concrete stairs and their supporting beam on the seismic response of a seven-story building, comparing three structural configurations.

Methods: Numerical simulations were conducted for three structural configurations: without stairs (M1), with stairs and a beam (M2), and with stairs, beam, and shear wall (M3), evaluating dynamic parameters such as vibration, eccentricity, and drifts.

Results: The M2 model showed higher rigidity but also higher torsional eccentricity. The M3 model, with the shear wall, reduced eccentricity and improved seismic performance, meeting the regulatory limits.

Conclusions: The inclusion of rigidly connected stairs increases rigidity but can generate torsional irregularities. A shear wall helps mitigate these effects, improving the seismic stability of the structure.

Keywords: Reinforced concrete, stairs, seismic behavior, structural rigidity, torsion.

1. INTRODUCCIÓN

El Ecuador, ubicado en el Cinturón de Fuego del Pacífico, es un territorio expuesto a una elevada peligrosidad sísmica debido a la subducción de la placa de Nazca bajo la placa Sudamericana y a la presencia de sistemas de fallas activas que atraviesan el país (Chunga et al., 2010; Martínez & Angulo, 2016; Parra, 2015). En este contexto, las edificaciones de hormigón armado constituyen el sistema estructural predominante para viviendas y edificios de uso público (Díaz et al., 2015). El hormigón armado combina el concreto resistente principalmente a esfuerzos de compresión, con el acero de refuerzo capaz de absorber esfuerzos de tracción, lo que permite un comportamiento global relativamente dúctil y con capacidad de disipación de energía bajo sollicitaciones sísmicas, siempre que el diseño y el detallado sigan criterios sismorresistentes adecuados (Fardis, 2009; Paulay & Priestly, 1992).

El hormigón armado es utilizado principalmente en estructuras que deben soportar cargas tensionales y compresivas, ya que las barras de acero refuerzan la estructura y mejoran su resistencia a ambos tipos de esfuerzo. Se emplea en una variedad de aplicaciones, desde estructuras permanentes hasta componentes prefabricados, y es fundamental en el diseño de edificios de varios pisos y otros elementos que requieren alta resistencia y durabilidad (Castro & Battaglia, 2021; Winter & Nilson, 2021). En este tipo de estructuras, el comportamiento dinámico se caracteriza mediante parámetros como los periodos de vibración, la distribución de rigidez en planta, la excentricidad entre los centros de masa y rigidez y las derivas de entrepiso (Garrido et al., 2024), que condicionan el cumplimiento de los estados límite de servicio, seguridad de vida y prevención del colapso definidos en los reglamentos modernos de diseño sísmico (Federal Emergency Management Agency, 2012; American Society of Civil Engineers, 2022).

Dentro de este marco, elementos que no siempre se conciben como parte del sistema resistente principal, como las escaleras de hormigón armado, pueden modificar de manera significativa la respuesta sísmica del edificio. En la práctica constructiva, las escaleras suelen ejecutarse como losas inclinadas con descansos intermedios, apoyadas en vigas longitudinales o directamente integradas a vigas y losas de entrepiso (Otero, 2007); cuando estas conexiones son esencialmente rígidas, la escalera actúa como un elemento de arriostramiento que incrementa la rigidez local, altera los modos de vibración e introduce posibles irregularidades torsionales en planta y en altura (Noorifard & Tabeshpour, 2018).

Observaciones post-sismo han mostrado, además, que la interacción escalera–estructura puede concentrar daños tanto en los componentes de la escalera, grietas por cortante en vigas de descanso, pandeo del refuerzo, fallas en los descansos como en elementos adyacentes del pórtico principal, donde se han documentado mecanismos de columna corta, altas demandas de corte y daño en juntas viga-columna (Li & Mosalam, 2013) (ver Figura 1). Dado que las escaleras son también rutas críticas de evacuación, su desempeño estructural afecta directamente la seguridad de los ocupantes durante y después de un evento sísmico (Wen et al., 2022).

Figura 1.

Grietas por cortante en ambos lados de la viga de descanso



Fuente: (Li & Mosalam, 2013)

En edificaciones de varios niveles, como los edificios de siete pisos de hormigón armado, la forma de modelar la escalera incluyendo su viga de apoyo y la posible presencia de muros de corte adyacentes, influye en la distribución de fuerzas internas, las derivas y la torsión global de la estructura. Un modelo “sin escalera” representa una idealización en la que la respuesta dinámica depende solo del sistema de pórticos y/o muros, mientras que un modelo “con escalera” incorpora la losa inclinada y su viga de apoyo, que pueden generar concentraciones de esfuerzo en columnas, vigas y diafragmas próximos (Noorifard & Tabeshpour, 2018). La incorporación de un muro de corte cercano al núcleo de la escalera introduce un mecanismo adicional de rigidez y disipación que puede reducir la excentricidad torsional o, si se dispone de manera inadecuada, agravarla (Gulkan & Sozen, 1999). Analizar comparativamente estas configuraciones es clave para comprender cómo la presencia de la escalera y sus detalles de conexión modifican la rigidez global, la torsión y las demandas de deformación en estructuras típicas de hormigón armado sometidas a acción sísmica.

En este contexto, el objetivo de esta investigación fue incorporar adecuadamente las escaleras en los modelos estructurales para evaluar de manera realista el desempeño sísmico de una edificación de siete niveles de hormigón armado situada en una región de alta peligrosidad sísmica como el Ecuador. Para ello, se comparan tres configuraciones: un modelo sin escalera, un modelo con escalera y viga de apoyo rígidamente vinculada al pórtico, y un modelo con escalera, viga de apoyo y muro de corte asociado. Sobre estas variantes se analizan parámetros como los periodos de vibración, la excentricidad entre centro de masa y rigidez, las derivas de entrepiso y los modos de vibración (Fardis, 2009; Priestley et al., 2007), con el fin de cuantificar el efecto de la escalera en la respuesta dinámica, identificar posibles mecanismos desfavorables y proponer criterios de modelación que contribuyan a un diseño sísmico más preciso y seguro en estructuras de hormigón armado.

2. METODOLOGÍA O MATERIALES Y METODOS

Se desarrolló un estudio cuantitativo con diseño experimental numérico y enfoque comparativo, basado en la modelación estructural de tres configuraciones de un edificio de siete niveles de hormigón armado. El estudio analiza la influencia de la escalera y su viga de apoyo en la respuesta dinámica de un

edificio de siete pisos de concreto armado, y evalúa la eficacia de un muro de corte como elemento de control torsional. Si bien existen diversos tipos de escaleras, en la práctica constructiva ecuatoriana es habitual incorporar una viga longitudinal de apoyo que sirve como elemento de soporte de los tramos o descansos, generando una conexión rígida con el sistema estructural principal. Este detalle constructivo, aunque funcional, puede inducir efectos torsionales significativos que justifican su análisis comparativo.

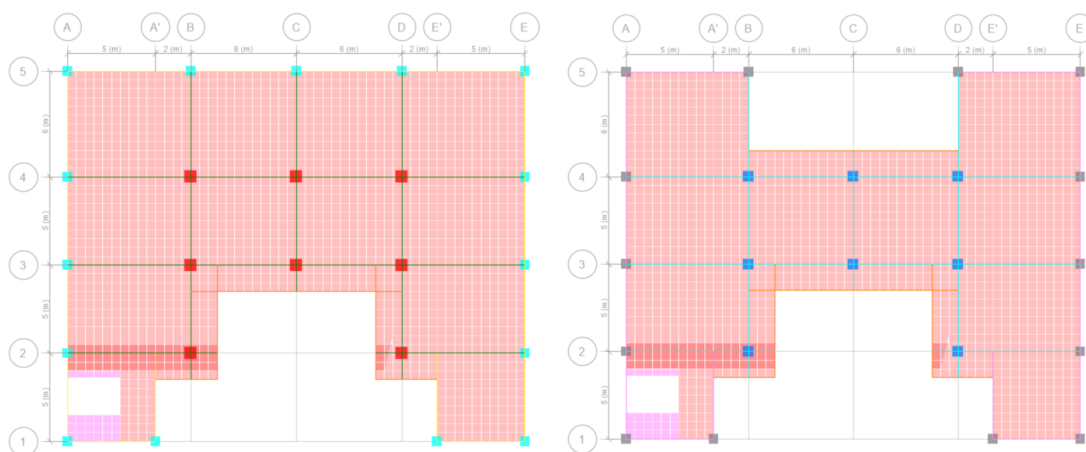
El análisis se realizó mediante modelación estructural en software especializado, comparando tres configuraciones: M1 (estructura sin escalera), M2 (estructura con escalera y viga de apoyo) y M3 (estructura con escalera, viga de apoyo y muro de corte). Todos los modelos mantienen las mismas propiedades de materiales, cargas muertas, cargas vivas y acción sísmica, variando únicamente la presencia y configuración de la escalera con la viga de apoyo y el muro de corte.

Posterior se evaluaron los principales parámetros dinámicos del sistema: periodos de vibración, excentricidad entre el centro de masa y rigidez, derivas de entrepiso y modos de vibración. Estos indicadores permiten cuantificar el efecto de la escalera y su viga en la rigidez y comportamiento dinámico, así como la capacidad del muro de corte para mitigar dichas irregularidades.

En la Figura 2 se muestra las plantas de nivel del edificio, representadas por los niveles N1, N2, N3, N4, N5, N6 y N7. Los colores y distribuciones reflejan la ubicación de cada nivel y su configuración estructural en los tres modelos. Esta comparación permite observar cómo varían las distribuciones y configuraciones en cada modelo en relación a la influencia de las escaleras y el muro de corte.

Figura 2.

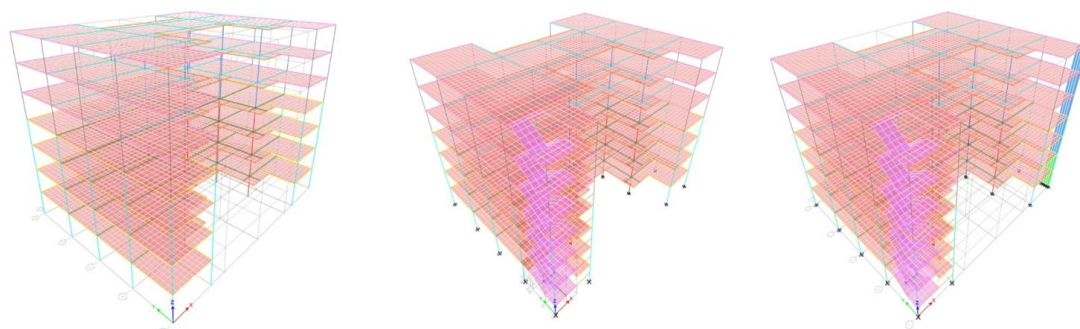
Planta de nivel N1, N2, N3, N4 - N5, N6, N7



En la Figura 3 se muestran las representaciones tridimensionales de los tres modelos estudiados: M1 (estructura sin escalera), M2 (estructura con escalera y viga de apoyo) y M3 (estructura con escalera, viga de apoyo y muro de corte). Cada modelo está representado con una estructura en 3D para ilustrar visualmente cómo los elementos y las configuraciones afectan la estructura en términos de comportamiento dinámico y rigidez. Esta comparación en 3D facilita la visualización de las diferencias entre las tres configuraciones.

Figura 3.

Modelo M1, estructura sin escalera, Modelo M2, estructura con escalera y viga de apoyo, Modelo M3, estructura con escalera, viga de apoyo, muro de corte.



2.1 Configuración arquitectónica y estructural

En los tres modelos analizados, los entrepisos tienen una altura de 3.0 m, el sistema de piso se resolvió mediante una losa alivianada bidireccional de 0.30 m de espesor. Debido a la irregularidad en planta, se procedió a modelar dicha losa como un diafragma semirrígido, lo que permite representar de manera más realista los desplazamientos del diafragma y los efectos torsionales asociados. Las cargas gravitacionales aplicadas correspondieron a 0.20 tonf/m² para carga viva y 0.40 tonf/m² para carga muerta, mientras que el sistema resistente está conformado por pórticos de concreto armado con una resistencia a la compresión de $f'c = 240$ kgf/cm², módulo de elasticidad de $E_c = 209141.1$ kgf/cm² y esfuerzo de fluencia del acero de refuerzo de $f_y = 4200$ kgf/cm².

2.2 Características geométricas y secciones estructurales

En el modelo M1 se utilizaron columnas exteriores de 55 × 55 cm, columnas interiores de 70x 70 cm, 60 x 60 cm y vigas de 40 × 60 cm, 30 × 55 cm y 50 × 70 cm, constituyendo la configuración base de la estructura sin elementos adicionales. Las losas mantienen la geometría definida previamente, sin modificaciones en su espesor ni distribución. Este modelo representa la sección estructural inicial sobre la cual se comparan los demás casos.

En el modelo M2 se conservaron las mismas dimensiones de columnas y vigas utilizadas en M1; sin embargo, se incorporó una escalera formada por dos tramos inclinados y un descanso intermedio de 0.20 m de espesor. Este descanso se apoya sobre una viga de 30 × 30 cm, que se añadió específicamente para soportar el sistema de escalera.

En el modelo M3 las columnas fueron modificadas, adoptando una sección mayor de columnas exteriores de 65 × 65 cm, columnas interiores de 80x 80 cm, 70 x 70 cm. Además, se incluyó un muro de corte cuya geometría varía en altura: presenta un espesor de 0.20 m. Estas variaciones se aplicaron únicamente a los elementos mencionados, manteniéndose las demás dimensiones iguales a las de los modelos previos.

2.3. Análisis modal y espectral

Para la evaluación de la rigidez lateral del sistema y la determinación de las derivas máximas se emplearon las inercias agrietadas de los elementos estructurales, tal como exige la NEC-15, con el fin de

considerar la reducción de rigidez producida por el agrietamiento del concreto tanto en su condición inicial como ante la acción sísmica. La normativa establece el uso de un 50% de la inercia bruta para vigas, un 80% para columnas y un 60% para muros estructurales que al ser una estructura sin subsuelos solo se aplicó a las dos primeras plantas de la edificación, valores que fueron aplicados en el modelo para representar de manera más realista la rigidez efectiva del pórtico. En cuanto a las losas, debido a que la NEC-15 no especifica un factor de agrietamiento, se adoptó un valor de 0.35 siguiendo la recomendación del ACI 318-19 para elementos en flexión. Este criterio permitió mantener consistencia con las reducciones aplicadas a vigas, columnas, losas y muros de corte, asegurando una estimación adecuada del comportamiento flexional y del aporte del diafragma en la rigidez global de la estructura.

El análisis modal constituyó la base para la evaluación dinámica de los tres modelos, permitiendo obtener los modos de vibración, sus frecuencias naturales y los factores de participación modal. Este procedimiento es fundamental para el análisis modal espectral, el cual requiere un espectro de diseño para transformar las propiedades dinámicas en demandas sísmicas. Se empleó el espectro elástico de la NEC-15 correspondiente a la zona de Riobamba y suelo tipo D. Con este espectro se determinaron las aceleraciones espectrales para cada modo y se combinaron para obtener el cortante basal dinámico, el cual fue reducido mediante el factor de reducción de fuerza sísmica $R = 8$ establecido para sistemas estructurales de pórticos dúctiles. El proceso metodológico se sintetiza en la figura 4

3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

3.1 Análisis de la rigidez.

Al comparar los periodos de vibración de los modelos M1 y M2 se observa que la incorporación de la escalera produce un aumento de rigidez en la estructura, ya que todos los periodos disminuyen respecto al modelo de referencia. El periodo del Modo 1 pasa de 1.052 s a 1.038 s (reducción de aproximadamente 1.3 %), el del Modo 2 de 1.007 s a 0.998 s (disminución cercana al 0.9 %) y el del Modo 3 de 0.980 s a 0.924 s (reducción del orden del 5.7 %) (ver Tabla 1). Estas variaciones indican que la estructura M2 es globalmente más rígida que la M1, siendo el efecto más marcado en el tercer modo de vibración.

Tabla 1.

Coordenadas del centro de masa, centro de rigidez y excentricidad por nivel

	Modo 1			Modo 2			Modo 3		
	Periodo (s)	Ux	Uy	Periodo (s)	Ux	Uy	Periodo (s)	Ux	Uy
Estructura M1	1.052	0.758	0.000	1.007	0	0.768	0.980	0.005	0
Estructura M2	1.038	0.748	0.001	0.998	0.005	0.673	0.924	0.096	0.771
Estructura M3	0.973	0.742	0.001	0.896	0.001	0.747	0.831	0.003	0.002

3.2 Análisis de la excentricidad

En esta sección se presenta el análisis de la excentricidad entre el centro de masa y el centro de rigidez para las tres configuraciones estructurales estudiadas. La excentricidad en planta constituye un indicador clave para identificar potenciales efectos torsionales, especialmente en edificaciones con variaciones geométricas o diferencias en la distribución de rigidez lateral.

La Tabla 2 resume las coordenadas del centro de masa y del centro de rigidez para los niveles N3 y N5 de cada estructura, junto con las excentricidades resultantes en ambas direcciones. Se observa que el modelo M1 presenta las menores excentricidades, reflejando una configuración geométrica y de rigidez más equilibrada, lo cual se debe a que en este modelo no se considera la presencia de la escalera, evitando así variaciones locales en la rigidez lateral. En contraste, el modelo M2 incorpora la escalera dentro de la configuración estructural, lo que introduce asimetrías e incrementos apreciables en la excentricidad. Finalmente, el modelo M3 incluye tanto la escalera como un muro de corte adicional, elemento que redistribuye la rigidez de forma más uniforme; como resultado, el muro contribuye a mejorar el comportamiento dinámico global y a reducir las excentricidades elevadas presentes en el modelo M2, logrando un balance torsional más favorable.

Tabla 2.

Coordenadas del centro de masa, centro de rigidez y excentricidad por nivel.

	Nivel	Centro de masa		Centro de rigidez		Excentricidad	
		X (m)	Y (m)	X (m)	Y (m)	X (m)	Y (m)
Estructura M1	N3	13	11.3392	13	11.2842	0	0.055
	N5	13	10.995	13	11.3219	0	0.3269
Estructura M2	N3	13.0458	11.376	12.4788	10.8194	0.567	1.6594
	N5	13.0548	11.0392	12.4006	10.8419	0.6542	0.1973
Estructura M3	N3	13.1865	11.4749	13.741	10.9935	0.5545	0.4814
	N5	13.2067	11.1418	13.3692	10.9457	0.1625	0.1961

Para evaluar si las excentricidades obtenidas se mantienen dentro de niveles aceptables desde el punto de vista del control torsional, se adopta como referencia el criterio ingenieril comúnmente utilizado, según el cual la excentricidad en cada dirección no debería superar aproximadamente el 5% de la longitud en planta (Noorifard & Tabeshpour, 2018). Este valor permite identificar configuraciones susceptibles a amplificar la torsión inducida por cargas laterales

En la Tabla 3 se aprecia que, al comparar las excentricidades obtenidas con el umbral de referencia del 5 % de la longitud en planta (1.25 m en X y 1.05 m en Y), la situación más crítica corresponde al modelo M2 en el nivel N3, donde la excentricidad en la dirección Y alcanza 1.65 m, es decir, aproximadamente un 7.9 % de la longitud en planta (21 m) y por tanto supera el valor de control adoptado. Este incremento se relaciona directamente con la presencia de la escalera en uno de los extremos, que concentra rigidez en esa zona y desplaza el centro de rigidez hacia el núcleo de la escalera, mientras el centro de masa permanece próximo al centro geométrico. El resultado es un brazo de palanca importante entre ambos centros, que incrementa el momento torsor bajo acciones sísmicas y puede conducir a amplificaciones torsionales de los desplazamientos y a una mayor demanda de derivas en los pórticos más alejados de la escalera.

En contraste, las excentricidades en la dirección X de los tres modelos se mantienen por debajo de 0.67 m, muy inferiores al límite de 1.25 m, por lo que el comportamiento torsional en esa dirección se considera controlado. De igual manera, las excentricidades en Y para los modelos M1 y M3 cumplen holgadamente el valor de referencia: en M1 se obtienen valores de 0.055 m y 0.327 m (aprox. 0.3–1.6 % de la longitud en planta), mientras que en M3, aun considerando la escalera, la incorporación del muro de

corte redistribuye la rigidez y reduce la excentricidad en Y a 0.48 m y 0.20 m (alrededor de 2.3 % y 0.9 %), corrigiendo la condición crítica observada en M2. Esto indica que, mientras el modelo M2 presenta una configuración potencialmente problemática desde el punto de vista torsional, el modelo M3 demuestra que la inclusión estratégica de elementos de rigidez adicionales permite mejorar el comportamiento dinámico global y mantener las excentricidades dentro de rangos aceptables, disminuyendo el riesgo de concentraciones de daño en los bordes más flexibles de la planta.

Tabla 3.

Excentricidad máxima admisible en función de la longitud en planta

	Excentricidad máxima			
	Longitud X(m)	Excentricidad X(m)	Longitud Y (m)	Excentricidad Y (m)
Estructura M1	25	1.25	21	1.05
Estructura M2	25	1.25	21	1.05
Estructura M3	25	1.25	21	1.05

3.3. Análisis de modos de vibración

Estructura M1

Los resultados del análisis modal muestran una clara diferenciación entre modos traslacionales y torsionales. El Modo 3 presenta una razón de participación modal en rotación alrededor del eje Z (RZ) igual al 99.96 %, lo cual evidencia que este modo corresponde al modo torsional dominante de la estructura. La contribución torsional en los Modos 1 y 2 es inferior al 3 %, indicando que estos modos son esencialmente traslacionales en direcciones X e Y, respectivamente. Este comportamiento confirma que la estructura concentra su respuesta torsional en un único modo significativo, lo cual es consistente con edificaciones regulares o moderadamente irregulares en planta.

Tabla 4.

Resultados de análisis modal estructura M1

Resultados de análisis modal estructura M1												
Case	Mode	Period (seg)	UX	UY	UZ	SumUX	SumUY	SumUZ	RX	RY	RZ	Porcentaje torsional Rz (%)
Modal	1	1.052	0.7579	0	0	0.7579	0	0	0	0.2511	0.0058	2.26%
Modal	2	1.007	0	0.7684	0	0.7579	0.7684	0	0.2451	0	0	0.00%
Modal	3	0.98	0.0051	0	0	0.763	0.7684	0	0	0.0003	0.7714	99.96%

Estructura M2

La Tabla 5 presenta las razones de participación modal del modelo estructural que incluye la escalera, permitiendo evaluar el efecto de este elemento en la distribución dinámica de masas y en la contribución torsional de cada modo. Se observa que el Modo 1, con un período de 1.036 s, presenta contribuciones predominantes en la dirección X (UX = 0.748) y una participación torsional relativamente baja (5.39 % en Rz), lo cual indica un comportamiento principalmente traslacional. En el Modo 2, con un período de 0.998 s, la mayor participación se concentra en la dirección Y (UY = 0.6734), acompañada de un incremento significativo en la componente rotacional (29.90 % en Rz), evidenciando un acoplamiento entre traslación y torsión inducido por la asimetría que introduce la escalera en la rigidez del sistema.

Tabla 5.

Resultados de análisis modal estructura M2

Resultados de análisis modal estructura M2												
Case	Mode	Period (seg)	UX	UY	UZ	SumUX	SumUY	SumUZ	RX	RY	RZ	Porcentaje torsional Rz (%)
Modal	1	1.036	0.748	0.0011	0	0.748	0.0011	0	0.0004	0.242	0.0138	5.39%
Modal	2	0.998	0.0054	0.6734	0	0.7534	0.6745	0	0.213	0.0025	0.0919	29.90%
Modal	3	0.924	0.0099	0.0968	0	0.7633	0.7713	0	0.0286	0.0065	0.6739	95.05%

Finalmente, el Modo 3, con un período de 0.924 s, muestra una participación torsional dominante (95.05 % en Rz), caracterizándolo claramente como el modo torsional principal del sistema. El valor elevado de Rz, junto con las contribuciones moderadas en UX y UY, confirma que la inclusión de la escalera incrementa la rigidez en una de las direcciones principales, concentrando la torsión en un modo específico. Este comportamiento revela que la escalera actúa como un elemento que altera la simetría de rigidez en planta, modificando la forma de vibrar del edificio y redistribuyendo la energía modal entre modos traslacionales y torsionales.

Estructura M3

La Tabla 6 muestra las razones de participación modal del modelo estructural luego de la incorporación del muro de corte. Los resultados evidencian una reducción significativa de la torsión estructural, especialmente si se compara con el modelo sin muro. La participación torsional del Modo 1 y Modo 2 disminuye a valores cercanos al 1 %, lo cual indica que ambos modos pasan a comportarse prácticamente como modos traslacionales puros, sin acoplamiento torsional relevante. Aunque el Modo 3 continúa siendo el modo torsional dominante, su porcentaje se mantiene alrededor del 99 %, pero ahora concentrado en un único modo, lo cual es consistente con un sistema más rígido y mejor balanceado en planta.

Estos resultados confirman que el muro de corte incrementa la rigidez lateral y reduce la asimetría de rigidez, logrando una distribución modal más favorable y disminuyendo la susceptibilidad a torsión en los modos inferiores. Por tanto, la inclusión del muro mejora notablemente el comportamiento dinámico del edificio frente a acciones sísmicas.

Tabla 6.

Resultados de análisis modal estructura M3

Resultados de análisis modal estructura M3												
Case	Mode	Period (seg)	UX	UY	UZ	SumUX	SumUY	SumUZ	RX	RY	RZ	Porcentaje torsional Rz (%)
Modal	1	0.973	0.742	0.001	0	0.742	0.001	0	0.0003	0.269	0.0034	1.25%
Modal	2	0.896	0.0012	0.747	0	0.7432	0.7479	0	0.2666	0.0005	0.0032	1.18%
Modal	3	0.831	0.0038	0.0024	0	0.747	0.7503	0	0.0021	0.0032	0.7493	99.30%

3.4 Análisis de derivas de piso

Las derivas inelásticas de piso para los modelos M1, M2 y M3 se realizaron en los puntos extremos del eje 3 para X y eje D para Y, los cuales se muestran en las Figura 5, 6 y Tabla 7. Todos los análisis de

derivas inelásticas de piso para los modelos M1, M2 y M3 cumplen con el criterio de control establecido, lo que nos indica que las estructuras modeladas son estables frente a las solicitaciones sísmicas o de viento consideradas, al mantenerse las derivas de entrepiso por debajo del límite permisible.

Figura 5.

Ejes en donde se calcularon las derivas

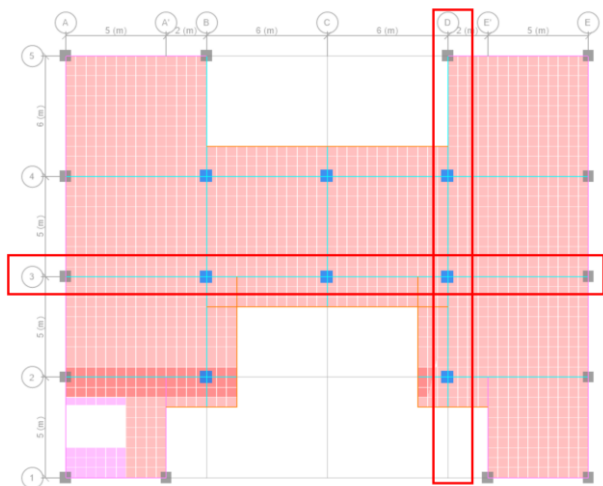


Figura 6.

Pórtico y nudo donde se realizó el control de las derivas en sentido X e Y

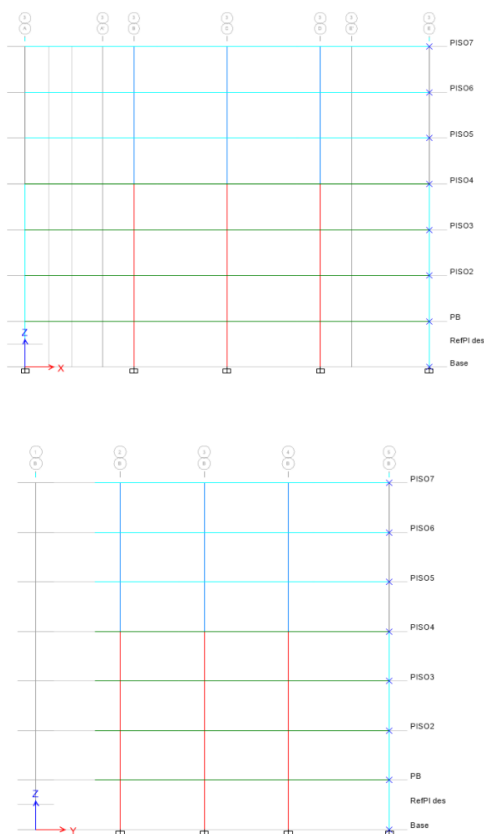


Tabla 7. Derivas de piso agrietadas inelásticas en sentido X e Y de los modelos M1, M2 y M3

Piso	Nivel (m)	H(mm)	M1						M2						M3					
			Sentido X			Sentido Y			Sentido X			Sentido Y			Sentido X			Sentido Y		
			U _x (mm)	ΔE	ΔM	U _y (mm)	ΔE	ΔM	U _x (mm)	ΔE	ΔM	U _y (mm)	ΔE	ΔM	U _x (mm)	ΔE	ΔM	U _y (mm)	ΔE	ΔM
Piso 7	21	3000	50.57	0.0017	0.0104	50.84	0.0032	0.0194	48.836	0.0017	0.01	48.368	0.0015	0.0091	53.005	0.0019	0.0112	45.596	0.0015	0.009
Piso 6	18	3000	45.362	0.0026	0.0154	41.117	0.0023	0.0136	43.846	0.0025	0.0147	43.794	0.0023	0.014	47.394	0.0027	0.0161	41.117	0.0023	0.0136
Piso 5	12	3000	37.675	0.0028	0.017	34.332	0.0025	0.0152	36.476	0.0027	0.0164	36.816	0.0026	0.0159	39.343	0.003	0.0179	34.332	0.0025	0.0152
Piso 4	9	3000	29.178	0.0026	0.0159	26.723	0.0024	0.0143	28.289	0.0026	0.0154	28.872	0.0025	0.0153	30.409	0.0028	0.0168	26.723	0.0024	0.0143
Piso 3	6	3000	21.239	0.0028	0.0169	19.572	0.0025	0.0148	20.6	0.0027	0.0164	21.226	0.0028	0.0165	22	0.003	0.0178	19.572	0.0026	0.0154
Piso 2	3	3000	12.793	0.0027	0.0162	11.886	0.0025	0.0149	12.4	0.0026	0.0158	12.953	0.0027	0.0162	13.099	0.0028	0.0169	11.886	0.0025	0.0149
PB	0	3000	4.683	0.0016	0.0094	4.413	0.0015	0.0088	4.52	0.0015	0.009	4.855	0.0016	0.0097	4.673	0.0016	0.0093	4.413	0.0015	0.0088
Base	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0

El análisis comparativo de las derivas obtenidas para los tres modelos evidencia diferencias claras en el comportamiento lateral de la estructura. En el modelo M1, correspondiente a la edificación sin escalera, se registran las mayores derivas en ambos sentidos, alcanzando valores máximos cercanos a 0.0030–0.0032, lo que refleja la mayor flexibilidad global del sistema aporticado. Al incorporar la escalera en el modelo M2 se observa una reducción ligera pero consistente de las derivas, con máximos próximos a 0.0027–0.0028, mostrando que la escalera aporta rigidez adicional, aunque su efecto no es dominante, por lo que el comportamiento sigue siendo principalmente flexible. Finalmente, el modelo M3, que incluye la escalera y un muro de corte, presenta las menores derivas del estudio, reduciéndolas a rangos de 0.0019–0.0026, lo cual confirma el rol decisivo del muro de corte en aumentar la rigidez lateral, controlar la torsión y limitar las deformaciones de entrepiso. En conjunto, los resultados muestran que la transición M1 → M2 → M3 implica un incremento progresivo de rigidez y una disminución significativa de las derivas, siendo M3 el modelo que ofrece el mejor desempeño sísmico.

Discusión de resultados

La incorporación de escaleras con viga intermedia en edificios de hormigón armado, una práctica común en la construcción ecuatoriana, ha mostrado generar alteraciones significativas en el comportamiento sísmico de las estructuras, especialmente en cuanto a la rigidez y la torsión. En este estudio, se analizó el impacto de este detalle constructivo sobre la respuesta sísmica de un edificio de siete pisos, comparando tres configuraciones estructurales: sin escalera (M1), con escalera y viga de apoyo (M2), y con escalera, viga de apoyo y muro de corte (M3).

Los resultados mostraron que, al agregar la escalera con viga de apoyo en el modelo M2, la estructura experimenta un aumento en su rigidez global, lo cual se refleja en la disminución de los periodos de vibración. En el Modo 1 (traslacional), el periodo fundamental se redujo de 1.052 a 1.038 segundos, y en el Modo 3 (torsional), la reducción alcanzó un 5.7%. Esta mayor rigidez, sin embargo, también trajo consigo un aumento en la excentricidad torsional, lo que incrementó el riesgo de desplazamientos excesivos en los puntos alejados del centro de rigidez (CR). Este fenómeno resalta la importancia de considerar la interacción escalera-estructura en la evaluación sísmica, ya que, a pesar de la mayor rigidez, la torsión puede inducir demandas adicionales de ductilidad en las columnas como lo mencionan Noorifard & Tabeshpour (2018).

Cuando se incorporó el muro de corte en el modelo M3, se logró mitigar las irregularidades torsionales, reduciendo la excentricidad crítica a un valor de 0.4814 metros, cumpliendo con los límites establecidos por la normativa NEC-SE-DS 2015. Además, la participación torsional en los modos traslacionales se redujo considerablemente, lo que confirma que el muro de corte estabiliza la estructura y permite que la escalera trabaje en conjunto con el sistema sísmico principal. Si bien la inclusión de la escalera y el muro de corte aumentó ligeramente las derivas de piso, los valores obtenidos fueron inferiores al límite de 2% especificado por la normativa, demostrando que esta solución estructural mejora el comportamiento sísmico global del edificio.

Una posible alternativa para reducir los efectos negativos de la escalera sobre el comportamiento sísmico es la implementación de una escalera autoportante, en la que la escalera se aísla de la estructura principal. Esto se logra mediante la incorporación de juntas de separación entre los descansos de la escalera y las vigas de la estructura principal, lo que permite que ambos elementos oscilen de forma independiente durante un sismo. Esta solución ha sido ampliamente estudiada y es especialmente útil en edificios de altura media, como se observa en los estudios de Li y Mosalam (2013), quienes documentaron el impacto de la interacción entre escaleras y estructuras principales durante eventos sísmicos.

El uso de materiales como el neopreno para aislar los tramos de la escalera de la estructura principal ha mostrado ser una opción económica y eficiente para mejorar la flexibilidad de las escaleras, evitando la rigidez excesiva que podría comprometer el comportamiento sísmico del edificio (Wen et al., 2022). Esta técnica, que permite una mayor independencia en las oscilaciones de la estructura y la escalera, es una de

las alternativas más recomendadas para reducir el riesgo torsional y mejorar la respuesta sísmica global del edificio.

4. CONCLUSIONES

Este estudio demuestra que la inclusión de la escalera y su viga de apoyo altera significativamente la respuesta dinámica de una estructura de siete pisos de concreto armado. Al rigidizar la estructura, se desplaza hacia la zona de la meseta en el espectro de diseño, lo que aumenta las aceleraciones espectrales (S_a) y la fuerza cortante basal experimentada durante un sismo. Esto subraya la importancia de no omitir la escalera en los modelos estructurales, ya que hacerlo podría subestimar la fuerza sísmica real que enfrentará el edificio.

La investigación también mostró que la escalera con viga de apoyo actúa como un elemento adicional en la estructura, generando irregularidades torsionales excesivas, con una excentricidad superior al 5%. Esto implica que la interacción de la escalera con el sistema estructural puede inducir rotaciones, aumentando la demanda de ductilidad en las columnas, lo que resalta la necesidad de considerar su impacto en el diseño sísmico.

Además, el estudio validó que los muros de corte son efectivos para contrarrestar los efectos torsionales negativos. El modelo que integró la escalera, viga de apoyo y muro de corte (M3) mostró un equilibrio entre el centro de masa y el centro de rigidez, mejorando la estabilidad dinámica y reduciendo las irregularidades torsionales.

Los modos de vibración también fueron significativamente afectados por la presencia de la escalera. En el modelo sin escalera (M1), los modos traslacionales y torsionales estaban desacoplados, mientras que en el modelo con escalera (M2), se observó un acoplamiento de estos modos, evidenciado por una participación torsional del 29.9% en el Modo 2. Este fenómeno implica que la estructura experimentará rotaciones bajo carga sísmica, lo que incrementa la demanda de ductilidad en las columnas.

En general el estudio resalta la importancia de modelar adecuadamente las escaleras en los edificios y de compensar su rigidez con elementos estructurales adicionales, como muros de corte. Aunque este enfoque puede aumentar los costos de construcción, es esencial para garantizar un comportamiento sísmico adecuado y la seguridad estructural en regiones sísmicamente activas. Estos hallazgos aportan nuevas perspectivas para los profesionales de la ingeniería estructural y pueden influir en la mejora de las normas y estándares de diseño sísmico.

FINANCIACIÓN

Los autores financiaron completamente la investigación.

CONFLICTO DE INTERESES

Los autores declaran que no existe ningún conflicto de intereses con su investigación.

CONTRIBUCIÓN DE AUTORÍA

Participar activamente en:	Autor 1.	Autor 2	Autor 3	Autor 4
Conceptualización	X	X	X	X
Análisis formal	X	X	X	X
Adquisición de fondos	X			
Investigación	X	X	X	X
Metodología		X		
Administración del proyecto	X		X	
Recursos	X	X	X	X
Redacción –borrador original	X			X
Redacción –revisión y edición		X	X	
La discusión de los resultados	X	X	X	X
Revisión y aprobación de la versión final del trabajo.	X	X	X	X

REFERENCIAS

- American Concrete Institute. (2019). *Building code requirements for structural concrete (ACI 318-19) and commentary*. American Concrete Institute.
- American Society of Civil Engineers. (2022). ASCE/SEI 7-22: *Minimum design loads and associated criteria for buildings and other structures*. <https://www.asce.org/publications-and-news/codes-and-standards/asce-sei-7-22>
- Castro, M. E., & Battaglia, M. (2021). *Recursos P/El Diseño De Estructuras Resistentes. T.3 2* Edición: Hormigón Armado*. CP67. <https://books.google.es/books?id=RndHEAAAQBAJ&dq>
- Chunga, K., Michetti, A. M., Gorshkov, A. I., Panza, G. F., Soloviev, A., & Martillo, C. (2010). Aplicación del método de zonación morfo-estructural para identificar nudos sísmogénicos en la región costera y cadenas montañosas de los andes septentrionales del Ecuador. *Acta oceanográfica del Pacífico*. <http://hdl.handle.net/1834/4209>
- Comisión Técnica Ecuatoriana de Sismología. (2015). *Norma Ecuatoriana de la Construcción: NEC-15 (Vol. 1)*. Quito, Ecuador: Secretaría Nacional de Planificación y Desarrollo.
- Díaz, C., Cornadó, C., & Vima, S. (2015). El uso del hormigón armado en los sistemas estructurales de los edificios residenciales modernos del Área Metropolitana de Barcelona. *Actas del Noveno Congreso Nacional y Primer Congreso Internacional Hispanoamericano de Historia de la Construcción*, 531-540. <https://doi.org/10.13140/RG.2.1.3719.4328>
- Fardis, M. N. (2009). *Seismic Design, Assessment and Retrofitting of Concrete Buildings* (Vol. 8). Springer Netherlands. <https://doi.org/10.1007/978-1-4020-9842-0>
- Garrido, C. A., Fernández-Dávila, V. I., Garrido, C. A., & Fernández-Dávila, V. I. (2024). Comportamiento sísmico de edificios irregulares en planta considerando sistemas de aislación con excentricidad de rigidez. *Ingeniería*, 34(2), 9-20. <https://doi.org/10.15517/ri.v34i2.55859>
- Gulkan, P., & Sozen, M. A. (1999). Procedimiento para determinar la vulnerabilidad sísmica de las estructuras de edificación. *Structural Journal*, 96(3), 336-342. <https://doi.org/10.14359/666>
- Li, B., & Mosalam, K. M. (2013). Seismic Performance of Reinforced-Concrete Stairways during the 2008 Wenchuan Earthquake. *Journal of Performance of Constructed Facilities*, 27(6), 721-730. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)CF.1943-5509.0000382](https://doi.org/10.1061/(ASCE)CF.1943-5509.0000382)
- Martínez, P. D. Q., & Angulo, E. R. (2016). Estudio de peligro sísmico de Ecuador y propuesta de espectros de diseño para la ciudad de Cuenca. *Revista Ingeniería Sísmica*, 94, 1-26. <https://doi.org/10.18867/ris.94.274>
- Noorifard, A., & Tabeshpour, M. R. (2018). Effects of staircase on the seismic behavior of RC moment frame buildings. *Architecture Civil Engineering Environment*, Vol. 11(4). <https://doi.org/10.21307/ACEE-2018-058>
- Otero, M. C. (2007). *El pliegue complejo: La escalera*. Netbiblo. <https://books.google.es/books?id=LoJZqAthj6MC&dq>
- Parra, H. A. (2015). *Desarrollos metodológicos y aplicaciones hacia el cálculo de la peligrosidad sísmica en el ecuador continental y estudio de riesgo sísmico en la ciudad de Quito* [Tesis Doctoral, E.T.S.I. en Topografía, Geodesia y Cartografía (UPM)]. <https://oa.upm.es/39353/>
- Paulay, T., & Priestly, M. (1992). *Seismic Design of Reinforced Concrete and Masonry Buildings*. John Wiley & Sons, Ltd. <https://doi.org/10.1002/9780470172841>
- Priestley, M. J., Calvi, G., & Kowalsky, M. J. (2007). Displacement-based seismic design of structures. *New Zealand Conference on Earthquake Engineering*. <https://research.iusspavia.it/handle/20.500.12076/1375>
- Wen, M., Tian, H., Wang, W., Chen, B., & Fu, H. (2022). Research on Seismic Performance of Frame Structure with Beam Staircases. *Buildings*, 12(8), 1106. <https://doi.org/10.3390/buildings12081106>
- Winter, G., & Nilson, A. H. (2021). *Proyecto de estructuras de hormigón*. Reverte.