

Influencia del aislamiento sísmico en el diseño sismorresistente de edificios con estructura de muros de concreto reforzado

Jorge A. Niño-Castaño¹ Bryan Chalarca² Daniel Bedoya-Ruiz¹

¹ Universidad Nacional de Colombia, Manizales, Colombia

² University School for Advanced Studies IUSS Pavia, Italia

Resumen

En América Latina se ha popularizado el uso de muros de concreto reforzado como sistema estructural para la construcción de edificaciones; sin embargo, este sistema se caracteriza por ser de baja ductilidad por lo cual su desempeño se ha visto comprometido durante diferentes sismos ocurridos en los últimos años. Esta investigación toma tres edificios reales con estructuras de muros en concreto reforzado, localizados en zonas de sismicidad alta y en un suelo tipo D, los cuales se diseñan según la normativa colombiana. Adicionalmente, se crean modelos numéricos no lineales para evaluar el comportamiento sísmico de los edificios ante sismos reales. Este mismo procedimiento es repetido para los tres edificios dotándolos con aisladores sísmicos y comparando su desempeño sísmico con el obtenido de los análisis de los edificios de base fija. Los resultados muestran que se mejora el desempeño de la estructura aislada ante la ocurrencia de los sismos pasando de un nivel de desempeño de protección de la vida a uno de ocupación inmediata, mientras se obtiene una reducción de hasta un 50% del acero de refuerzo y de hasta un 100% del uso de elementos de borde comparado con los edificios diseñados con base fija, conservando las ventajas constructivas y arquitectónicas del sistema de muros.

Palabras clave: muros de concreto, aislamiento sísmico, desempeño sísmico, elementos de borde, acero de refuerzo.

Cómo citar:

Niño-Castaño, J.A., Chalarca, B., Bedoya-Ruiz, D. Influence of seismic isolation on the seismic design of buildings with reinforced concrete wall structure. *Ingeniería y Competitividad*, 2024, 26(1) e-20212779.

<https://doi.org/10.25100/iyc.v26i1.12779>

Recibido: 06-02-23

Aprobado: 14-12-23

Correspondencia:

§joaninoca@unal.edu.co,
bryan.chalarca@iusspavia.it,
dabedoyar@unal.edu.co

Este trabajo está licenciado bajo una licencia internacional Creative Commons Reconocimiento-No Comercial-CompartirIgual4.0.



Conflicto de intereses:
Ninguno declarado

¿Por qué se realizó?

La baja ductilidad que caracteriza las estructuras compuestas por muros de concreto reforzado ha penalizado fuertemente el desempeño sísmico de estos en eventos sísmicos recientes. Por lo cual se hace necesario la implementación de sistemas de protección sísmica que permiten aumentar la capacidad y el desempeño sísmico final de sistemas estructurales de muros de concreto reforzado manteniendo los beneficios de dicho sistema estructural, tales como rapidez en la construcción, economía, y máximo aprovechamiento de áreas. Este estudio evalúa la implementación de aislamiento sísmico en diferentes edificaciones de muros de concreto reforzado, analizando no solo su desempeño sísmico esperado sino también las reducciones en cantidades de acero de refuerzo requeridas para obtener un diseño sismorresistente que cumpla con las nuevas tendencias normativas a nivel mundial.

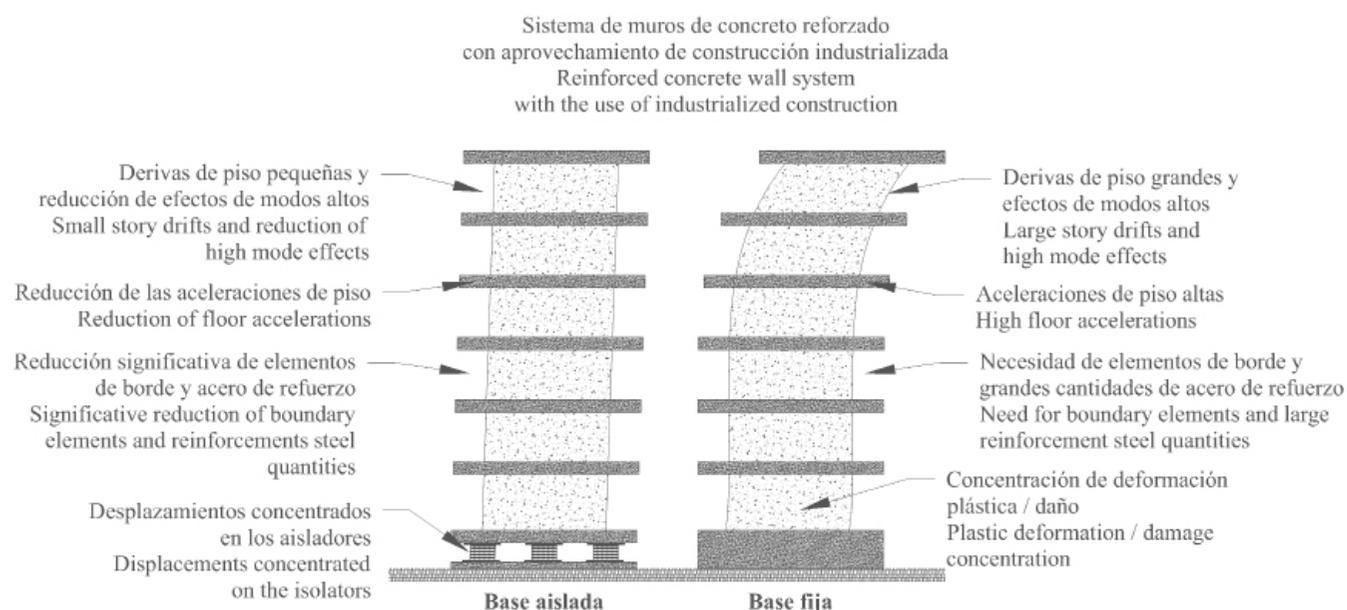
¿Cuáles fueron los resultados más relevantes?

Los resultados de la comparación del diseño sísmico entre los diferentes edificios con y sin uso del sistema de aislamiento sísmico demuestran que el uso de aislamiento sísmico en la base permite una reducción promedio del 50% del acero de refuerzo total necesario para cumplir los requisitos normativos. Adicionalmente, con la implementación del aislamiento sísmico se obtuvo una reducción de hasta un 100% en la necesidad de elementos de borde en los muros. En lo que respecta al desempeño sísmico, se observó que los edificios aislados, a pesar de requerir menos acero de refuerzo que los edificios con base fija, presentaron un desempeño sísmico mayor en términos de derivas de piso y aceleraciones de piso, con reducciones promedio del 85% y 54% para las derivas de piso y las aceleraciones pico, respectivamente.

¿Qué aportan estos resultados?

Los resultados de este estudio ayudan a evidenciar las ventajas de combinar un sistema constructivo bien conocido y difundido en el contexto latinoamericano y especialmente en el colombiano como los son los muros de concreto reforzado, con el uso de tecnologías para la protección sísmica como lo es el aislamiento en base. Adicionalmente se demuestra que, debido a la reducción en aceros de refuerzo, un edificio aislado no necesariamente será mucho más costoso que su contraparte con base fija, por lo cual se promueve la investigación e implementación del aislamiento sísmico en muros de concreto reforzado como solución para reducir costos constructivos y aumentar el desempeño sísmico de estructuras comunes.

Graphical Abstract



Introducción

En América Latina se ha popularizado el uso de muros de concreto reforzado como sistema estructural para la construcción de vivienda en altura debido a su economía, velocidad de construcción y máximo aprovechamiento de áreas; sin embargo, el sistema implementado se caracteriza por ser de baja ductilidad por la gran rigidez y esbeltez de los muros, motivo por el cual su desempeño se ve comprometido ante la respuesta a los diferentes sismos ocurridos.

Para mejorar el desempeño sísmico de este sistema estructural los reglamentos de construcción tienden a aumentar las exigencias de diseño, lo cual lleva a un incremento del costo de construcción de la edificación, y sin una garantía real de que se obtenga un desempeño mayor al esperado con la aplicación de estas acciones. Por todo lo anterior, y apoyados en el hecho que se ha aprovechado el sistema estructural de muros de concreto como un sistema industrializado con ventajas constructivas y arquitectónicas, se busca verificar la factibilidad de continuar usando este sistema industrializado de muros de concreto sin penalizar su implementación debido a sus limitantes estructurales. Se piensa que la forma de mejorar un diseño estructural de un edificio con sistema de muros de cortante es aumentando las cuantías de refuerzo, los elementos de borde, las secciones de los muros o utilizando otros tipos de materiales para sustituir el acero o el concreto; sin embargo, poco se ha hablado al respecto de controlar la demanda sísmica sobre la estructura mediante el uso de aisladores sísmicos en la base de la edificación, aprovechando que los edificios compuestos por muros de concreto son muy rígidos y que así la utilización del sistema de aislamiento es más efectivo, comparado con su implementación en sistemas estructurales más flexibles. El aislamiento sísmico desacopla el edificio del suelo permitiendo que se disminuya la demanda sísmica sobre la estructura. Esta investigación busca determinar cual es la influencia del uso de aisladores sísmicos en el diseño y detallado estructural y en el desempeño sísmico de la edificación.

Es importante reconocer que las investigaciones sobre el diseño de estructuras de muros de concreto reforzado y del uso de aisladores sísmicos han sido utilizadas para ser tenidas en cuenta en los códigos de diseño estructural de diferentes países. Inicialmente, estudios sobre los esfuerzos cortantes en muros de concreto ^[1, 2] formaron las bases del Reglamento ACI-318^[3], el cual sirve de referencia para la construcción en Colombia. Estos reglamentos han venido siendo modificados teniendo en cuenta los resultados de nuevos estudios, añadiendo nuevas exigencias al diseño y construcción de sistemas estructurales con muros de concreto ^[4-13]. En cuanto a los aisladores sísmicos, estos comienzan a ser descritos en diversos documentos que explican su uso, y que datan de la década de 1970 ^[14-16]. El desarrollo de estos sistemas ha permitido avances en su aplicación y construcción ^[17-19], así como guías regionales para su implementación ^[20-22]. El común denominador en estas investigaciones es que el uso de aisladores aumenta el desempeño sísmico de las estructuras aisladas. Sin embargo, la eficacia de su implementación se ve influenciada por la diferencia entre el periodo aislado y el periodo original de la estructura u otros factores que puedan interferir en la respuesta dinámica de la estructura, como lo son los suelos blandos. El presente estudio explora la implementación de aislamiento sísmico en edificios compuestos por muros de concreto reforzado e investiga la influencia del aislamiento sísmico en su diseño y detallado estructural. Para este fin se seleccionaron tres edificios reales de diferentes alturas, los cuales fueron diseñados el Reglamento Colombiano de Construcción Sismo Resistente NSR-10^[23]. Estos edificios fueron rediseñados considerando el uso de aislamiento sísmico y se compararon las diferencias en las cuantías de acero de refuerzo y elementos de borde. Adicionalmente, ambos conjuntos de edificios fueron modelados numéricamente y sometidos a análisis tiempo historia no lineales usando registros sísmicos reales para comparar su desempeño sísmico.

Casos de estudio, diseño estructural y análisis numérico

Casos de estudio

Los edificios considerados son de 8, 12 y 16 pisos con un área construida es de 2982.00 m², 4472.80 m² y 8385.60 m², y una altura de 19.60 m, 31.70 m y 39.58 m, respectivamente. Estos edificios son proyectos residenciales, los cuales están construidos o están siendo construidos en la actualidad. Los edificios están caracterizados por los siguientes periodos traslacionales: 0.39 s y 0.36 s para el edificio de 8 pisos, 0.70 s y 0.59 s para el edificio de 12 pisos, y 0.64 s y 1.21 s



para el edificio de 16 pisos. Las figuras 1 a la 3 muestran una proyección isométrica y la planta típica de cada uno de los edificios seleccionados.

Las cargas estáticas asignadas a los edificios son: el peso propio de los elementos estructurales; las cargas muertas sobre impuestas; la carga viva de entrepiso, la carga viva de cubierta y la carga de granizo. Estas cargas están descritas en la Tabla 1. Adicionalmente, se aplicaron cargas lineales en la localización de los áticos y antepechos, con un valor de 2.60 KN/m.

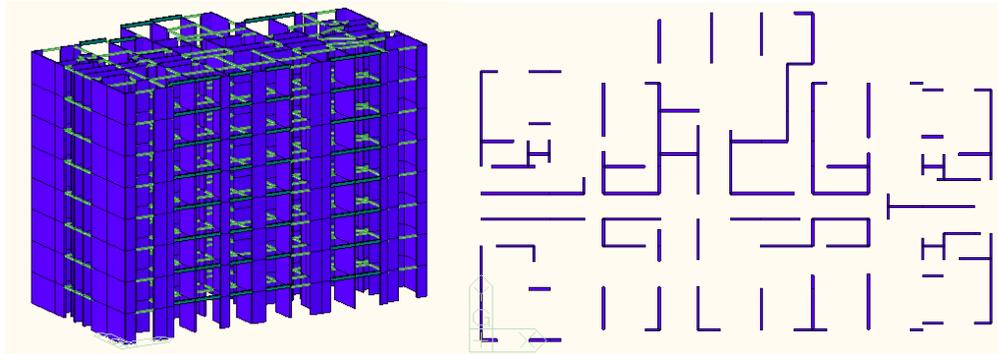


Figura 1. Vistas del edificio de 8 pisos.

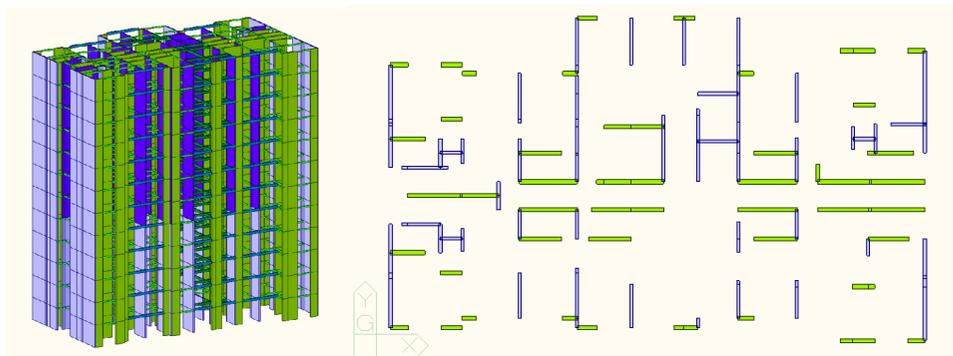


Figura 2. Vistas del edificio de 12 pisos.

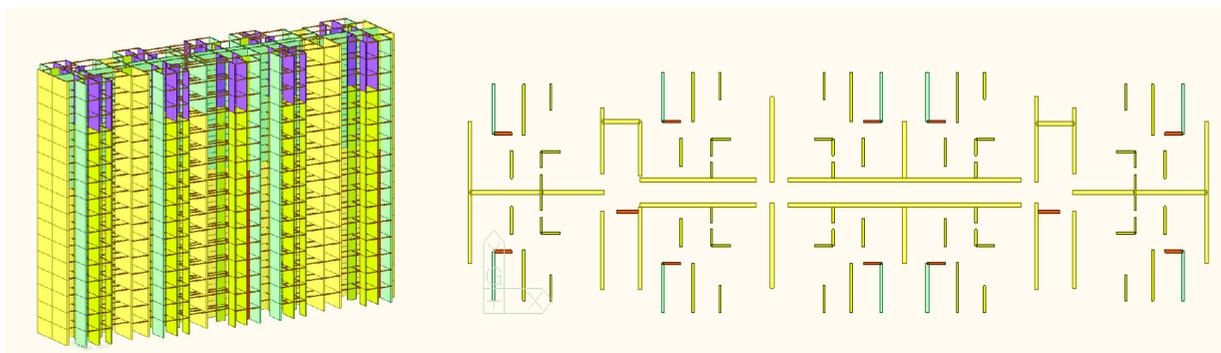


Figura 3. Vistas del edificio de 16 pisos.

Tabla 1: Cargas estáticas aplicadas sobre los modelos estructurales

Elemento	Carga Muerta (D) KN/m ²	Carga Viva (L) KN/m ²	Carga Viva de cubierta (L) KN/m ²	Cargas de granizo (S) KN/m ²
Entrepiso de apartamentos	4.16	1.80		
Cubiertas livianas	1.00		0.50	1.00
Escaleras	7.64	3.0		
Cubierta foso de ascensor	4.80		1.80	1.00

Modelación numérica

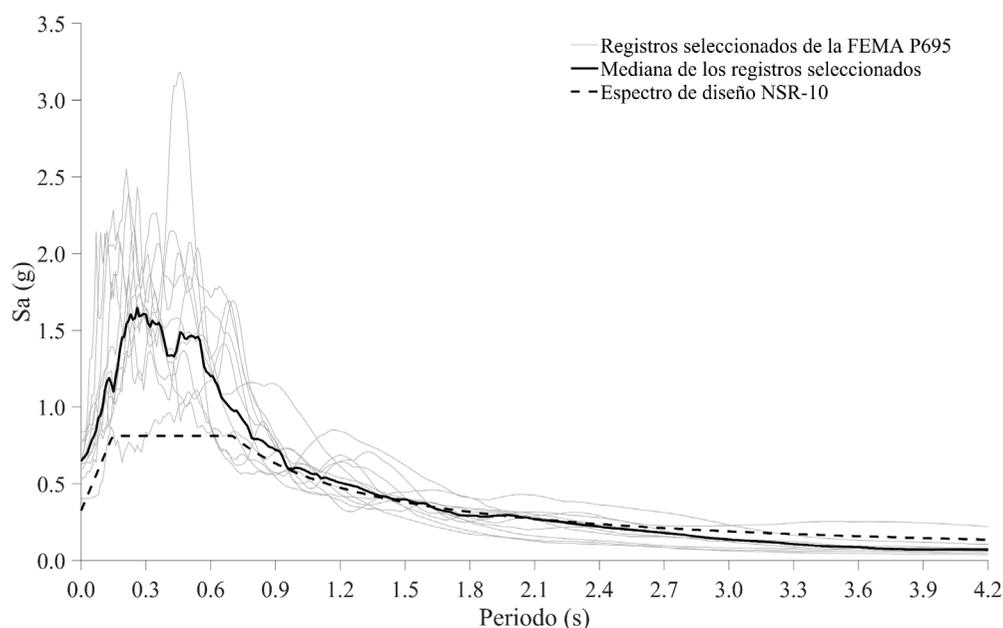
Los tres edificios seleccionados fueron modelados utilizando el software MIDAS Gen^[24] el cual permite la ejecución de análisis modales, así como de análisis no lineales tiempo historia. La configuración de las características para la ejecución de los diferentes análisis comienza con la definición de la combinación de carga gravitacional igual a 1.0 (D) + 0.25 (L), la inclusión de efectos P-Delta, y la definición del tipo y de las propiedades de las rótulas plásticas. Estas rótulas son caracterizadas por modelos inelásticos de histéresis de los materiales, asignando el modelo japonés de especificación estándar del concreto^[25] con una resistencia f'_c igual a 21 MPa para el edificio de 8 pisos, entre 21 y 35 MPa para el edificio de 12 pisos, y de 35 MPa para el edificio de 16 pisos; adicionalmente, se asignó una deformación pico unitaria del concreto de 0.002 recomendada por el ACI 318^[3] para el análisis no lineal. En el caso del acero de refuerzo se asignó el modelo de Park & Paulay (1975)^[26] con un f_y de 420 MPa, f_u de 550 MPa, un módulo de elasticidad E de 200 GPa, y deformaciones unitarias ϵ_y de 0.0021, ϵ_{sh} de 10 veces ϵ_y 0.021 y ϵ_{su} de 0.09^[27].

Amenaza sísmica

Las cargas sísmicas aplicadas a los edificios seleccionados, con y sin aislamiento, fueron calculadas según los criterios del reglamento NSR-10^[23]. De acuerdo a este se procedió a generar el espectro de diseño asumiendo las siguientes características para el sitio: 1) los edificios están ubicados en zona de amenaza sísmica alta. 2) el grupo de uso es I con un coeficiente de importancia de 1.0. 3) el suelo es tipo D. 4) la aceleración pico efectiva, A_a , y la velocidad pico efectiva, A_v , son ambas iguales a 0.25, 5) los coeficientes de amplificación F_a y F_v son iguales a 1.30 y 1.90, respectivamente, y 6) el amortiguamiento inherente de la estructura es asumido como 5% del amortiguamiento crítico. Adicionalmente, se seleccionaron 11 pares de sismos del conjunto de registros para eventos lejanos a la falla propuesto por la FEMA P695^[28] (ver Tabla 2) para evaluar el comportamiento sísmico de la estructura mediante el análisis dinámico no lineal tiempo historia. Estos sismos fueron escalados según las directrices del capítulo 16 del ASCE 7-16^[29] para una intensidad correspondiente a la del sismo máximo considerable, MCE, equivalente a 1.5 veces el sismo de diseño, DBE. En Niño Castaño (2023)^[22] se puede encontrar más información sobre la selección y escalado de los registros sísmicos. La figura 4 muestra el espectro de diseño y los espectros de aceleraciones de los 11 pares de sismos seleccionados y su espectro mediano.

Tabla 2. 11 pares de sismos seleccionados de la FEMA P695^[28].

Numero FEMA	Magnitud	Año	Nombre del sismo	Estación de monitoreo	Fuente
3-4	6.7	1994	Northridge	Canyon Country-WLC	USC
5-6	7.1	1999	Duzce, Turkey	Bolu	ERD
7-8	7.1	1999	Hector Mine	Hector	SCSN
13-14	6.9	1995	Kobe, Japan	Nishi-Akashi	CUE
15-16	6.9	1995	Kobe, Japan	Shin-Osaka	CUE
23-24	7.3	1992	Landers	Coolwater	SCE
27-28	6.9	1989	Loma Prieta	Gilroy Array #3	CDMG
29-30	7.4	1990	Manjil, Iran	Abbar	BHRC
35-36	7.0	1992	Cape Mendocino	Rio Dell Overpass	CDMG
41-42	6.6	1971	San Fernando	-A - Hollywood Stor	CDMG
43-44	6.5	1976	Friuli, Italy	Tolmezzo	--

Figura 4. Espectros de aceleraciones de diseño y de los 11 pares de registros seleccionados de la FEMA P695^[28]

Diseño de los edificios y del aislamiento sísmico:

El diseño de los edificios base fija seleccionados se realizó con base en los resultados de un análisis espectral elástico y el detallado estructural (armado de acero de los elementos) correspondiente al de un sistema con capacidad especial de disipación de energía para zonas de amenaza sísmica alta. Por otra parte, el diseño de los edificios equipados con los sistemas de aislamiento se realizó siguiendo las exigencias del capítulo 17 del ASCE 7-16^[29], las cuales son resumidas a continuación:

1. Se asume un desplazamiento de activación de los aisladores, D_Y .
2. Se asume un desplazamiento máximo en el centro de rigidez del sistema de aislamiento D_M .
3. Se asume la fuerza de activación del sistema de activación, F_Y que está entre el 5 y 10% del peso total de la estructura.
4. Se calculan los valores de la rigidez inicial, k_1 y de la rigidez después de la fluencia, k_2 así:

$$k_1 = \frac{F_Y}{D_Y}; k_2 = k_1/10 \quad (2.1)$$

5. Se calcula el valor máximo de la fuerza, F_D , en los aisladores para un desplazamiento D_M ,

$$F_D = F_Y + k_2 * (D_M - D_Y) \quad (2.2)$$

y el esfuerzo de fluencia del aislador, Q_M como:

$$Q_M = D_Y * (k_1 - k_2) \quad (2.3)$$

Con la información anterior obtenemos los siguientes datos:

6. Rigidez horizontal efectiva del sistema de aislamiento, k_M , definida como:

$$k_M = \frac{F_D}{D_M} \quad (2.4)$$

7. Con este valor de la rigidez horizontal efectiva y con el valor de la energía disipada en el sistema de aislamiento, E_M , durante un ciclo completo de respuesta, es posible hallar el amortiguamiento efectivo del sistema de aislamiento, β_M , para un desplazamiento D_M , al igual que el período del sistema aislado, T_M .

$$E_M = 4Q_M * (D_M - D_Y) \quad (2.5)$$

$$\beta_M = \frac{E_M}{2\pi * k_M * D_M^2} \quad (2.6)$$

$$T_M = 2\pi \sqrt{\frac{W}{k_M g}} \quad (2.7)$$

donde W es el peso de la superestructura considerando el diafragma a nivel del aislamiento y g es la constante de gravedad.

8. Con el valor T_M se entra al espectro de desplazamiento de diseño y se verifica que el desplazamiento D_M coincida con el valor dado al amortiguamiento efectivo, β_M , calculado en el paso 7. Si este valor no coincide se regresa al paso 2 para iterar hasta que no haya diferencia en el valor del amortiguamiento efectivo entre iteraciones, tomando el valor de la rigidez horizontal efectiva del sistema de aislamiento de la última iteración k_M como la rigidez total necesaria para llegar al desplazamiento objetivo. La figura 5 ilustra los ciclos de histéresis del sistema de aislamiento de los tres edificios seleccionados.
9. Se hace la corrección basal siguiendo las exigencias del ASCE 7-16^[29] con el 90% de $V_b = k_M * D_M$, tomando el espectro de diseño con un amortiguamiento del 5%.

Finalmente, para el detallado de los muros de concreto reforzado se utiliza un factor de reducción R_I igual a tres octavos del valor R utilizado en estructuras de base fija, en este caso $R_I = \left(\frac{3}{8}\right) 5 = 1.875$, valor que cumple con la exigencia de no ser menor que 1.0 ni mayor que 2.0.

Para el diseño del sistema de aislamiento sísmico de los tres edificios se utilizó un desplazamiento de activación igual a 30 mm para todos los casos y los desplazamientos objetivos se establecieron como 195 mm, 280 mm y 300 mm para los edificios de 8, 12 y 16 pisos, respectivamente. Con estos valores se obtuvieron cifras de rigidez y amortiguamiento equivalentes iguales a 14.38 kN/mm y 31.3% para el edificio de 8 pisos, 15.54 kN/mm y 27.9% para el edificio de 12 pisos, y 32.53 kN/mm y 26.9% para el edificio de 16 pisos. A su vez,



los periodos aislados de los edificios fueron calculados como 3.17 s, 3.57 s, y 3.61 s para los edificios de 8, 12 y 16 pisos, respectivamente.

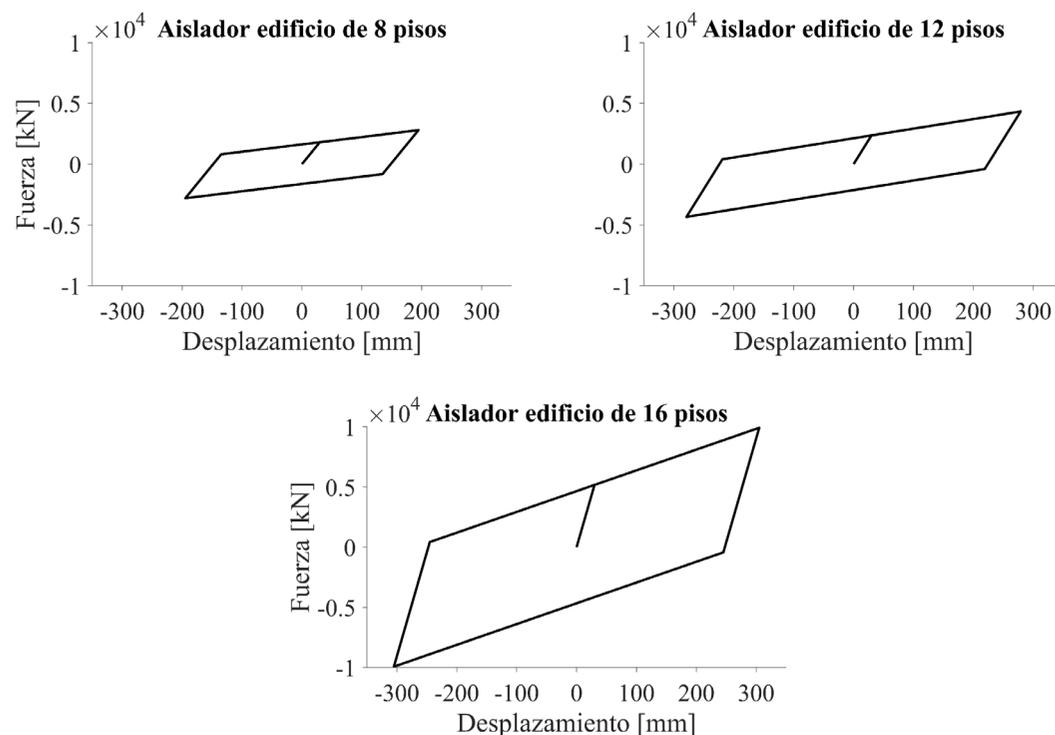


Figura 5. Histéresis del aislamiento de cada uno de los tres edificios

Resultados y discusión

Los edificios estudiados fueron diseñados y detallados considerando un sistema tradicional de base fija, así como la implementación de un sistema de aislamiento sísmico. Es importante resaltar que, para facilitar la comparación de los resultados, fueron usadas las mismas distribuciones de muros (i.e., igual arquitectura) y concretos en ambas configuraciones de edificios (i.e., aislados y de base fija), por lo que a nivel de detallado solo variaron las cuantías de acero de refuerzo considerando los refuerzos de alma de los muros, así como sus respectivos elementos de borde en caso de que fueran necesarios. En lo que respecta al concreto, los edificios requirieron un volumen igual a 396.1, 811.4, y 2092.2 m³ de concreto para los muros de los edificios de 8, 12, y 16 pisos, respectivamente.

Elementos de borde y aceros de refuerzo:

Para las estructuras de muros de concreto reforzado los códigos de diseño estructural exigen unas cantidades de acero de refuerzo que varían en función de la demanda de fuerza cortante que asume cada muro, requiriendo a su vez una cantidad mínima de acero en caso tal de que la demanda estructural no sea significativa. Adicionalmente, en ciertas condiciones, se necesita la inclusión de elementos de borde que aporten ductilidad al sistema estructural. Los elementos de borde se configuran con refuerzos de acero, longitudinales y transversales, ubicados en los extremos del muro y que son adicionales al acero de refuerzo requerido en el detallado del alma del muro. Estos elementos de borde aumentan la ductilidad de los muros, incrementando así la capacidad al colapso durante eventos sísmicos. Dado que la implementación del aislamiento sísmico disminuye la demanda sobre la estructura, el número de muros que requieren elementos de borde se reduce significativamente. La figura 6 muestra la comparación del número de secciones de muros que requieren elementos de borde de cada edificio estudiado con ambas configuraciones. En el caso del edificio de 8 pisos, 258 secciones de muros requieren elementos de borde cuando el edificio es diseñado con base fija, y solamente 7 secciones de muros requieren elementos de borde cuando el edificio es diseñado

con aislamiento de base. Igual sucede con el edificio de 12 pisos, donde 301 secciones de muros requieren elementos de borde en la estructura de base fija, y en el caso de la estructura aislada no es necesario adicionarlos. Finalmente, para el edificio de 16 pisos con base fija, 382 muros requieren elementos de borde, mientras que en la configuración con base aislada solo 16 secciones de muros necesitan el elemento de borde. Es decir, la reducción de la necesidad del uso de elementos de borde está entre un 98% y un 100% con el uso de los aisladores sísmicos de base. Esta reducción del número requerido de elementos de borde es uno de los factores principales por los que se reduce la cantidad total de acero de refuerzo de los muros.

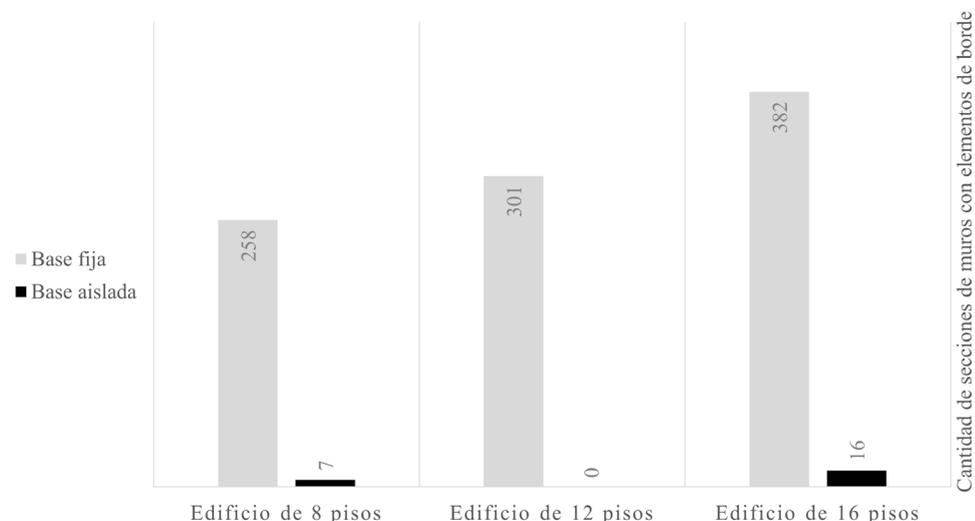


Figura 6: Cantidad de muros con elementos de borde. Edificios con base fija y con base aislada.

Para cuantificar la influencia del aislamiento sísmico en el diseño y detallado estructural en los edificios seleccionados, especialmente la reducción del acero de refuerzo necesario para los elementos de borde, los aceros de refuerzo resultantes de ambas configuraciones son comparados en términos de peso total de acero de refuerzo requerido para los muros de concreto, así como en cuantía volumétrica, la cual relaciona el peso del acero de refuerzo con el volumen de concreto de los muros. La tabla 3 reporta las cantidades de acero calculadas para ambas configuraciones de los edificios de 8, 12, y 16 pisos. Cabe resaltar que en el edificio de 16 pisos es posible tener una cuantía volumétrica de acero menor comparada con la obtenida en los edificios de menor altura, dado que, en estos últimos, las cantidades mínimas de acero exigidas por la norma tienden a gobernar el detallado del acero aumentando la cuantía volumétrica, mientras que en el primero se puede optimizar más el uso del acero en el detallado final, logrando así reducir la cuantía volumétrica. Los diseños muestran que las cantidades de acero de refuerzo de los muros de concreto reforzado de los edificios con base aislada se reducen en un 45.30% para el edificio de 8 pisos, el 59.06% para el edificio de 12 pisos y el 47.93% para el edificio de 16 pisos, comparado con las cantidades de acero obtenidas para los edificios con base fija, por lo que se obtiene en una disminución en promedio de aproximadamente un 50% del acero de refuerzo en los muros.

Tabla 3: Cantidades totales de acero para ambas configuraciones de los edificios estudiados.

	Edificio de 8 pisos		Edificio de 12 pisos		Edificio de 16 pisos	
	Base fija	Base aislada	Base fija	Base aislada	Base fija	Base aislada
Peso total del acero de los muros de concreto [kg]	71749	39245		45237	198641	103441
Cuantía volumétrica del acero [kg/m³]		99.06	136.18	55.75	94.94	49.44
Disminución porcentual	-45.30%		-59.06%		-47.93%	

Comparación del detallado del acero de refuerzo

Otra forma de evaluar la influencia del aislamiento sísmico en el diseño y detallado estructural de los edificios seleccionados es tomando los 10 muros más solicitados en cada una de las edificaciones seleccionadas. Esta selección se realizó según la relación del cortante de cada muro del primer piso con el cortante basal. Las tablas 4, 5 y 6 muestran la comparación de la distribución del acero de refuerzo de los edificios de 8, 12 y 16 pisos, respectivamente. La planta del edificio de 8 pisos se caracteriza por una gran cantidad de muros cortos que deben ser reforzados con barras de acero. Es así como el promedio de cuantías de acero tanto vertical como horizontal es de 0.48% para las dos configuraciones evaluadas, es decir, base fija y base aislada. La diferencia entre estos radica en que, en los diez muros más exigidos en la primera planta, en general no se hace necesaria la utilización de elementos de borde en el edificio de base aislada, mientras que en el edificio de base fija sí es necesario el diseño de elementos de borde con una cuantía de acero promedio equivalente al 2.0%. Para el refuerzo de los muros con barras de acero se tuvo en cuenta que no se aplicaran separaciones verticales y horizontales mayores a 250 mm; siendo esta la razón por la cual la cuantía de refuerzo es la misma para ambas configuraciones, pues se limita la separación máxima entre barras de acero aun cuando los cálculos realizados resulten en separaciones mayores. En el caso del edificio de 12 pisos, la cuantía de refuerzo vertical promedio para los muros más solicitados en el primer piso es del 0.71% para la configuración con base fija contra un 0.28% para los mismos muros cuando se diseñan bajo el escenario del aislamiento en la base, lo que corresponde a una disminución de la cuantía de aproximadamente un 61%. En el caso del refuerzo horizontal, la diferencia entre la cuantía detallada en la estructura con base fija contra la base aislada es de aproximadamente un 16%. Finalmente, en el edificio de 16 pisos es posible observar una disminución de aproximadamente un 60% para la cuantía vertical y de un 15% en la cuantía horizontal entre la estructura de base fija y la aislada en la base para los 10 muros más solicitados. Se debe tener en cuenta que el detallado de los muros se realiza siguiendo las exigencias de la NSR-10^[23], donde las cuantías de detallado de los elementos estructurales no pueden ser inferiores a las mínimas permitidas, por lo que se puede presentar coincidencia en las cuantías de los muros menos solicitados tanto en el sistema de base fija como en el de base aislada. Adicional a esto, ambas configuraciones de los edificios deben soportar las mismas cargas gravitacionales las cuales contribuyen a unas cantidades de acero de refuerzo iguales para ambos casos.

Tabla 4: Promedios de cuantías de acero en los 10 muros más solicitados del edificio de 8 pisos.

Descripción	Número de capas de refuerzo	Cuantía de acero vertical promedio ρ_v [%]	Cuantía de acero horizontal promedio ρ_h [%]	Longitud total de los elementos de borde [m]	Cuantía de acero promedio del elemento de borde [%]
Base fija	2	0.48	0.48	5.67	2.00
Base aislada	2	0.48	0.48	-	-
	0.00%	-61.38%	-16.20%	-100.00%	-100.00%

Tabla 5. Promedios de cuantías de acero en los muros más solicitados del edificio de 12 pisos.

Descripción	Número de capas de refuerzo	Cuantía de acero vertical promedio ρ_v [%]	Cuantía de acero horizontal promedio ρ_h [%]	Longitud total de los elementos de borde [m]	Cuantía de acero promedio del elemento de borde [%]
Base fija	2	0.71	0.33	6.34	1.81
Base aislada	2	0.28	0.28	-	-
Disminución porcentual	-0.00%	-61.38%	-16.20%	-100.00%	-100.00%

Tabla 6: Promedios de cuantías de acero en los muros más solicitados del edificio de 16 pisos.

Descripción	Número de capas de refuerzo	Cuantía de acero vertical promedio ρ_v [%]	Cuantía de acero horizontal promedio ρ_h [%]	Longitud total de los elementos de borde [m]	Cuantía de acero promedio del elemento de borde [%]
Base fija	2	0.52	0.25	7.63	1.47
Base aislada	2	0.21	0.21	-	-
Disminución porcentual	-0.00%	-59.51%	-15.02%	-100.00%	-100.00%

Respuesta sísmica

En la sección anterior se observó como la implementación del aislamiento sísmico permite reducir considerablemente el número de elementos de borde y las cantidades de acero de refuerzo requeridos para el diseño de edificios en muros de concreto reforzado. Estas reducciones permiten balancear el incremento en los costos de construcción que conlleva el uso de los aisladores. Sin embargo, es importante verificar la respuesta sísmica de ambas configuraciones para observar si la implementación de los aisladores sísmicos también contribuye a una mejor respuesta sísmica, o por el contrario, debido a la reducción de los aceros de refuerzo, la respuesta sísmica es similar o superior a la obtenida en los edificios con



base fija. Para realizar esta comparación, se realizaron análisis dinámicos no lineales tiempo historia usando los 11 pares de registros de eventos sísmicos equivalentes a la intensidad MCE explicados en la sección 2.3. De estos análisis fueron obtenidas las derivas de piso máximas y las aceleraciones pico de piso para cada par de acelerogramas en cada configuración de los edificios seleccionados, después los valores medianos de las derivas y aceleraciones fueron calculados y comparados entre sí para evaluar la respuesta sísmica de los edificios. Adicionalmente, tomando en cuenta los valores sugeridos por el reporte Vision 2000^[30], se evaluó el nivel de desempeño sísmico según los estados límites de protección de la vida u ocupación inmediata.

Los perfiles de los valores medianos de las derivas de piso, aceleraciones pico de piso y cortantes de piso son mostrados en las figuras 7, 8 y 9, respectivamente. Los resultados muestran que, en términos de derivas de piso, los edificios equipados con el sistema de aislamiento sísmico mostraron una reducción de un 85% en promedio y con un perfil de derivas uniforme comparado con el perfil de derivas de los edificios con base fija en el cual las derivas tienden a incrementarse con la altura. El desempeño de las estructuras de muros de concreto reforzado se encuentra dentro de los objetivos de diseño de seguridad de vida para los edificios con base fija, mientras que el aislamiento en la base permite alcanzar un desempeño de ocupación inmediata. En cuanto a las aceleraciones pico de piso, se observan dos tendencias importantes: por un lado, la implementación del aislamiento sísmico permitió una reducción en general de las aceleraciones pico de piso comparado con los edificios de base fija. Y por otro lado, los edificios equipados con aislamiento sísmico muestran un perfil de aceleraciones pico de piso uniforme, reduciendo el efecto de posibles irregularidades y modos altos en la respuesta sísmica. Es importante resaltar los efectos del aislamiento sísmico sobre las aceleraciones de piso, las cuales representan la demanda sísmica sobre elementos no estructurales y contenidos sensibles a las aceleraciones, los cuales pueden llegar a representar más del 90% del costo total de una edificación^[31]. La reducción en la demanda sobre los elementos no estructurales, generada por el aislamiento sísmico, permite aumentar el desempeño sísmico de los edificios asegurando y protegiendo la vida e integridad de sus ocupantes, el patrimonio y fomentando una infraestructura resiliente a terremotos. Por último, como se destaca en la figura 9, al equipar los edificios con el sistema de aislamiento, se obtiene una reducción promedio en los cortantes máximos de piso de aproximadamente un 60%, evidenciando una fuerte reducción de la demanda sísmica al incrementar el periodo fundamental y el amortiguamiento de la estructura, portándola a periodos donde se espera una aceleración espectral menor.

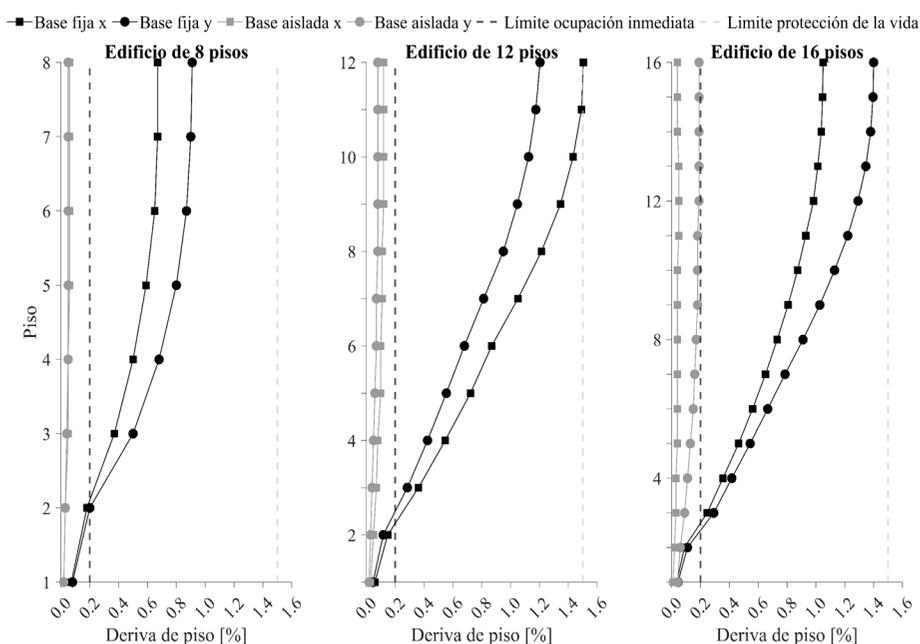


Figura 7: Mediana de las derivas máximas de piso de la intensidad MCE.

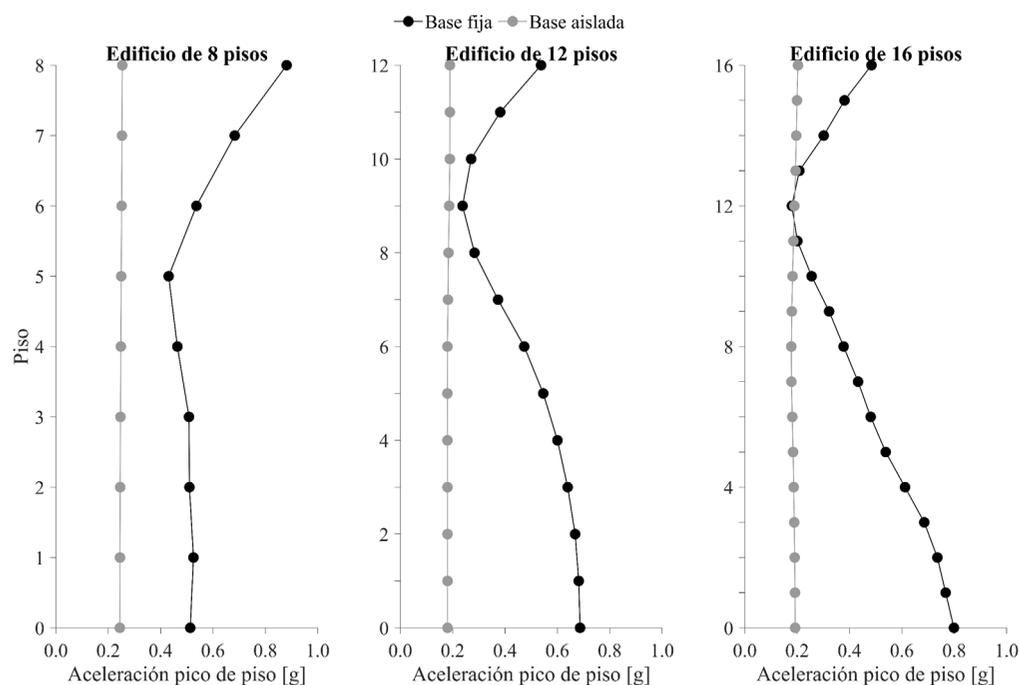


Figura 8: Mediana de las aceleraciones pico de piso de la intensidad MCE.

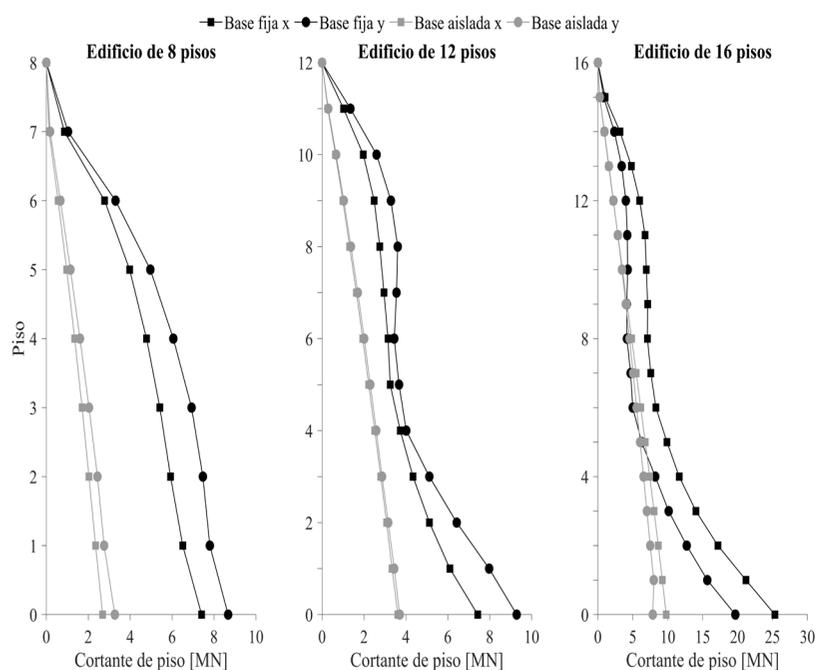


Figura 9: Mediana de las cortantes máximas de piso de la intensidad MCE.

Conclusiones

Muchas investigaciones y normativas sismorresistentes han buscado la manera de mejorar el comportamiento sísmico de edificios con estructura de muros de concreto reforzado, resultando en un aumento de las secciones mínimas de los muros, mayores cantidades de acero de refuerzo, y generando elementos de borde con diferentes configuraciones. Adicionalmente, se ha propuesto el uso de otros materiales para reemplazar el refuerzo del muro convencional, uso de sistemas de presforzado del concreto, etc., pero muy pocas se han centrado en investigar cómo disminuir la demanda sísmica sobre los muros de concreto, que por su alta rigidez estructural tiende a ser mucho mayor comparada con otros sistemas estructurales. En los diseños estructurales habituales es necesario aumentar la ductilidad

de los muros de concreto reforzado mediante el detallado de elementos de borde, lo que conlleva a un aumento de las cantidades de acero y con ello el aumento de los costos de la edificación. La implementación de aisladores sísmicos permite reducir la demanda sísmica sobre la edificación al desacoplar parcialmente la estructura del terreno. Sin embargo, su uso se ha enfocado en estructuras apertadas, en edificaciones con usos especiales y en edificios patrimoniales, donde se ha comprobado su efectividad y altos beneficios, pero poco se ha investigado su implementación en estructuras de muros de concreto, especialmente, en muros de ductilidad limitada. El presente estudio investigó la influencia del aislamiento sísmico en el diseño, detallado y respuesta sísmica de tres edificios reales compuestos por muros de concreto reforzado. Estos edificios fueron diseñados y detallados estructuralmente considerando una base fija, así como una base aislada. Con el fin de medir la influencia del aislamiento sísmico en el detallado estructural, ambos diseños fueron comparados considerando el número de muros que requieren elementos de borde, así como las cantidades totales de acero de refuerzo. Adicionalmente, los 10 muros más solicitados en cada edificio fueron comparados para analizar con mayor detalle las diferencias en la distribución del acero de refuerzo. Finalmente, fueron llevados a cabo análisis no lineales tiempo historia con 11 pares de acelerogramas obtenidos de eventos reales y escalados según los requisitos normativos; de estos análisis se obtuvieron los valores medianos de las derivas de piso máximas y de las aceleraciones pico de piso, evaluando el desempeño sísmico estructural observado.

Los resultados muestran que en el edificio de 8 pisos es posible disminuir en un 45% el acero necesario en los muros al utilizar el aislamiento en la base del edificio, para el edificio de 12 pisos la disminución es del 59% y para el de 16 pisos del 48%; es decir que, en promedio, podría esperarse una reducción aproximada del 50% del acero necesario comparado con las edificaciones no aisladas. Esta disminución del acero de refuerzo requerido se da principalmente por la reducción de los elementos de borde requeridos por los muros en los edificios aislados. Dicha reducción varía entre un 98% y un 100% de los muros que requieren elementos de borde. Adicionalmente, el acero necesario para el refuerzo del alma del muro se reduce en aproximadamente un 60% para el acero vertical y 16% para el acero horizontal debido a la reducción de las fuerzas cortantes inducidas por el sismo que actúan sobre los edificios aislados. Por otra parte, a pesar de la reducción significativa de las cantidades de acero de refuerzo, los edificios aislados mostraron un mejor desempeño sísmico exhibiendo derivas de piso y aceleraciones de piso menores que las observadas en los edificios de base fija a una intensidad equivalente a la del sismo máximo considerado. Estas reducciones fueron en promedio del 85% y del 54% para las derivas y aceleraciones de piso, respectivamente; permitiendo incrementar el desempeño sísmico estructural de los edificios de un nivel de protección de vida a uno de ocupación inmediata. Es importante resaltar que, aunque el uso de aisladores reduce los desplazamientos relativos de la estructura, aumenta su desplazamiento absoluto concentrado en el nivel del sistema de aislamiento, por lo cual este parámetro es de suma importancia para el cálculo del sistema aislamiento para evitar interacciones con estructuras vecinas, así como para el diseño y construcción de los sistemas complementarios del edificio, tales como acometidas de servicios públicos, accesos, escaleras, ascensores, etc. Finalmente, es necesario destacar que en este estudio no se presenta el diseño y detallado final del sistema de aislamiento sísmico, tales como el diseño del diafragma rígido, ubicación y diseño individual de cada aislador y/o deslizador. Es importante aclarar que, para dicho proceso, se deben cumplir los requisitos en cuanto a estabilidad local y global de la edificación y del sistema de aislamiento.

Los resultados de este estudio permiten validar la factibilidad del uso de sistemas de aislamiento sísmico en edificios con estructura de muros de concreto reforzado, en especial, en aquellas construidas utilizando el sistema industrializado de muros de ductilidad limitada, permitiendo una reducción en las cantidades de acero de refuerzo y a la vez preservando las bondades constructivas y arquitectónicas del sistema. Un nuevo enfoque de diseño sísmico para edificaciones en muros de concreto reforzado utilizando aislamiento en la base, podría asegurar y proteger la vida e integridad de sus ocupantes, así como también su patrimonio.

Agradecimientos

Este trabajo ha sido posible gracias al apoyo de la Universidad Nacional de Colombia - Sede Manizales y a la empresa VIURE Ingeniería Civil SAS.

Referencias

- [1] Hirosawa, M. Past experimental results on reinforced concrete shear walls and analysis on them. Kenchiku Shiryo, No. 6, Building Research Institute, Ministry of Construction; 1975.
- [2] Barda, F., Hanson, J. M., & Corley, W. G. Shear strength of low-rise walls with boundary elements; 1976. 20 pp.
- [3] American Concrete Institute. Building Code Requirements for Structural Concrete (ACI 318-19).2019. ISBN: 978-1-64195-056-5. DOI: 10.14359/51716937
- [4] Moehle, J. (2014). Seismic Design of Reinforced Concrete Buildings. In A Historian Looks Back. McGraw-Hill Education; 2014. Disponible en: <https://doi.org/10.5948/upo9781614445067.021>
- [5] Segura, C., & Wallace, J. W. Seismic Performance Limitation of Slender Reinforced Concrete Structural Walls. University of California; 2018. Disponible en <https://escholarship.org/uc/item/9b96p1qq>
- [6] Abdullah, S. A., & Wallace, J. W. Drift capacity of reinforced concrete structural walls with special boundary elements. ACI Structural Journal. 2019; 116(1), 183–194. Disponible en <https://doi.org/10.14359/51710864>
- [7] Welt, T. S., Massone, L. M., Lafave, J. M., Lehman, D. E., McCabe, S. L., & Polanco, P. (2017). Confinement Behavior of Rectangular Reinforced Concrete Prisms Simulating Wall Boundary Elements. Journal of Structural Engineering (United States). 2017; 143(4), 1–12. Disponible en [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)ST.1943-541X.0001682](https://doi.org/10.1061/(ASCE)ST.1943-541X.0001682)
- [8] Arroyo, Orlando, Feliciano, Dirsá, Carrillo, Julián, Hube, Matías A. Seismic performance of mid-rise thin concrete wall buildings lightly reinforced with deformed bars or welded wire mesh. Engineering Structures. 2021; 1-12. Disponible en <https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2021.112455>
- [9] Segura, C.L., Arteta, C.A., Araujo, G., and Wallace, J.W. Flexural compression capacity of thin reinforced concrete structural walls. Proceedings of the 11th National Conference in Earthquake Engineering, Earthquake Engineering Research Institute, Los Angeles, CA.; 2018. Disponible en: https://www.researchgate.net/publication/326131426_FLEXURAL_COMPRESSION_CAPACITY_OF_THIN_REINFORCED_CONCRETE_STRUCTURAL_WALLS
- [10] Aaleti, S., Brueggen, B. L., Johnson, B., French, C. E., & Sritharan, S. Cyclic response of reinforced concrete walls with different anchorage details: Experimental investigation. Journal of Structural Engineering (United States). 2013 139(7), 1181–1191. Disponible en: [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)ST.1943-541X.0000732](https://doi.org/10.1061/(ASCE)ST.1943-541X.0000732)
- [11] Hardisty, J. N., Villalobos, E., Richter, B. P., & Pujol, S. Lap Splices in Unconfined Boundary Elements Tests indicate that a currently allowed detail provides insufficient toughness. January 2015; 51–58.
- [12] Lu, Y., Henry, R. S., Gultom, R., & Ma, Q. T. Cyclic Testing of Reinforced Concrete Walls with Distributed Minimum Vertical Reinforcement. 2013; 1–17. Disponible en: [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)ST.1943-541X.0001723](https://doi.org/10.1061/(ASCE)ST.1943-541X.0001723).
- [13] Sritharan, S., Beyer, K., Henry, R. S., Chai, Y. H., Kowalsky, M., & Bull, D. Understanding poor seismic performance of concrete walls and design implications. Earthquake Spectra. 2014; 30(1), 307–334. Disponible en: <https://doi.org/10.1193/021713EQS036M>

- [14] Lindley, P. B. Engineering Design with Natural Rubber. 1970.
- [15] Megget, L. M. Analysis and Design of a Base-Isolated Reinforced Concrete Frame Building. pdf. The New Zealand National Society for Earthquake Engineering, Vol. 11, No. 4, December 1978; 245–254. Disponible en: <https://doi.org/10.5459/bnzsee.11.4.245-254>
- [16] Kelly, J. M., Skinner, R. I., Heine, A. J. Mechanisms of Energy Absorption in Special Devices for Use in Earth-quake Resistant Structures. Bulletin of N.Z. Society for Earthquake Engineering, Vol. 5 No. 3, September 1972; 63–88. Disponible en: <https://doi.org/10.5459/bnzsee.5.3.63-88>
- [17] Naeim, F., & Kelly, J. M. Design of Seismic Isolated Structures: From Theory to Practice. Earthquake Spectra. 1999; 16(3), 709–710. Disponible en: <https://doi.org/10.1193/1.1586135>
- [18] L.P., C., Davidson, B. J., & Buckle, I. G. Retrofit of the William Clayton building using additional damping. NZSEE 2001 Conference.
- [19] Colunga, A. T. Diseño Sísmico Simplificado de Estructuras con Muros de Mampostería Aisladas Sísmicamente. Revista Internacional de Ingeniería de Estructuras Vol. 22(1), 2017. DOI:10.24133/riie.v22i1.627. Disponible en https://www.researchgate.net/publication/337655043_Metodo_simplificado_para_el_diseno_de_estructuras_con_base_en_muros_de_carga_aisladas_sismicamente
- [20] Piscal, C. Tesis doctoral. New Design Considerations for Seismic Isolated Buildings in Colombia. Universitat Politècnica de Catalunya. Departament d'Enginyeria Civil i Ambiental 2018. Disponible en: <http://hdl.handle.net/10803/663457>
- [21] Melkumyan, M. 25 Years of Creation, Development and Implementation of Seismic Isolation in Armenia. In International Journal of Trend in Scientific Research and Development. 2019; 3, 3). South Asia Management Association.. Disponible en: <https://doi.org/10.31142/ijtsrd22983>
- [22] Niño Castaño J. Nuevo enfoque de diseño sísmico para edificaciones en muros de concreto reforzado utilizando aislamiento en base. Manizales: Universidad Nacional de Colombia; 2023.
- [23] Asociación Colombiana de Ingeniería Sísmica. Reglamento Colombiano de Construcción Sismo Resistente NSR-10. 2010.
- [24] MIDAS Gen. New York: MIDASoft Inc; 2023.
- [25] JSCE Guidelines for Concrete No. 15. Standard Specifications for Concrete Structures. 2007.
- [26] Park, R. and Paulay, T. Reinforced Concrete Structures. John Wiley and Sons, Inc. Canada, July 1975. Disponible en: <http://www3.interscience.wiley.com/>
- [27] Yun, X., & Gardner, L. Stress-strain curves for hot-rolled steels. Journal of Constructional Steel Research. 2017; 133, 36–46. Disponible en: <https://doi.org/10.1016/j.jcsr.2017.01.024>
- [28] Federal Emergency Management Agency. Quantification of Building Seismic Performance Factors, FEMA P695, Washington, D.C.; 2009.
- [29] American Society of Civil Engineers ASCE. ASCE 7-16 Minimum Design Loads for Buildings and Other Structures. 2017.
- [30] Structural Engineers Association of California, Sacramento, Estados Unidos. SEAOC. Performance-based seismic engineering of buildings, Vision 2000 Report. 1995.
- [31] Miranda, E., Taghavi, S. Estimation of seismic demands on acceleration-sensitive non-structural components in critical facilities. Memorias del seminario ATC-29-2 Seismic Design, Estados Unidos. 2003. Disponible en: https://www.academia.edu/31490458/Estimation_of_Seismic_Acceleration_Demands_in_Building_Components

