


Estudio comparativo entre estructuras metálicas, utilizando riostras de pandeo restringido (BRB) y disipadores (SLB)

Diego D. Guilcaso Tipan ¹  Sofía A. Gordón Pinos ¹  David P. Guerrero Cuasapaz ¹ 

¹ Universidad Politécnica Salesiana, Departamento de Ingeniería Civil – Quito, Ecuador.

✉ Correspondencia: dguerrero@ups.edu.ec 📞 + 593 99 576 1929

DOI/URL: <https://doi.org/10.53313/gwj61057>

Resumen: Ecuador se encuentra en una zona de alto riesgo sísmico y al verse afectado por grandes terremotos ha optado por la implementación de nuevas tecnologías estructurales, una de estas son los disipadores de energía. Por esta razón es que el presente artículo tiene el objetivo de realizar un análisis comparativo entre disipadores sísmicos tipo SLB y riostras de pandeo restringido BRB, el cual parte de modelos base tomados de Yaguana et al. los cuales tienen una composición estructural metálica y ocupación esencial. Para visualizar los efectos de los dispositivos antes mencionados se modelaron en total seis edificaciones dividiéndolas en tres para cada disipador, luego se los sometieron a un análisis estático y análisis modal espectral. Teniendo en cuenta que los disipadores actúan en el rango no lineal se optó por un análisis Pushover considerando el reglamento FEMA y ASCE 41-13 con el fin de obtener la curva de capacidad y nivel de desempeño. Con los resultados obtenidos se ha demostrado que los disipadores SLB tienen un rendimiento superior, logrando una reducción del 50 % en la deriva en un edificio de cuatro niveles en comparación con los disipadores BRB, siendo esta una de las más representativas entre ambos disipadores.

Palabras claves: Análisis no lineal, Buckling Restrained Braces, Curva histerética, Pushover, Shear Link Bozzo, Rotula plástica.

Comparative study between steel structures using restricted buckling braces (BRB) and dissipators (SLB)

Abstract: Ecuador is located in an area of high seismic risk and, being affected by large earthquakes, has opted for the implementation of new structural technologies, one of these being energy dissipaters. For this reason, the objective of this paper is to carry out a comparative analysis between SLB type seismic dissipaters and BRB restrained buckling braces, which starts from base models taken from Yaguana et al. which have a metallic structural composition and essential occupation. To visualize the effects of the aforementioned devices, a total of six buildings were modeled, dividing them into three



Cita: Guilcaso Tipan, D. D., Gordón Pinos, S. A., & Guerrero Cuasapaz, D. P. (2023). Estudio comparativo entre estructuras metálicas, utilizando riostras de pandeo restringido (BRB) y disipadores (SLB). Green World Journal, 6(1), 57. <https://doi.org/10.53313/gwj61057>

Received: 29/Feb/2023

Accepted: 10/Apr/2023

Published: 18/Apr/2023

Prof. Carlos Mestanza-Ramón, PhD.
Editor-in-Chief / CaMeRa Editorial
editor@greenworldjournal.com

Editor's note: CaMeRa remains neutral with respect to legal claims resulting from published content. The responsibility for published information rests entirely with the authors.



© 2023 CaMeRa license, Green World Journal. This article is an open access document distributed under the terms and conditions of the license.
Creative Commons Attribution (CC BY).

for each dissipater, and then they were subjected to a static analysis and spectral modal analysis. Considering that the dissipaters act in the non-linear range, a Pushover analysis was chosen considering the FEMA and ASCE 41-13 regulations in order to obtain the capacity curve and performance level. With the results obtained, it has been demonstrated that SLB heatsinks have a superior performance, achieving a 50 % reduction in drift in a four-story building compared to BRB heatsinks, being one of the most representative between both heatsinks.

Keywords: Nonlinear Analysis, Buckling Restrained Braces, Hysteretic Curve, Pushover, Shear Link Bozzo, Plastic Rotula.

1. Introducción

Los disipadores sísmicos tienen como función absorber la mayor parte de energía sísmica, evitando sobreesfuerzos en los elementos estructurales y deformaciones inelásticas [1], verificando si el desempeño logra cumplir los requisitos de la norma vigente NEC-SE-DS 2015 [2], evitando el colapso de la estructura.

Los Dispositivos Shear Link Bozzo (SLB) son elementos de acero fabricados mediante una placa metálica vertical reforzada horizontalmente, como se muestra en la Figura 1. Este diseño permite reducir las fuerzas inducidas por terremotos de gran magnitud. Este sistema es único en su capacidad de disipar energía por corte y flexión, actuando como una articulación plástica. En caso de un fallo dúctil, la conexión SLB no representa un peligro para la seguridad total de la estructura. De esta manera, los efectos de los movimientos sísmicos son transferidos desde la estructura a estos puntos diseñados específicamente para ese propósito, evitando daños en las edificaciones [3].



Figura 1. Disipador SLB [4]

Las Riostras de Pandeo Restringido brindan una mayor ductilidad y funcionan únicamente en tensión y compresión. Su función principal es absorber energía sísmica y la disipa mediante la plastificación del metal con el calor, incluso llega a destruirse por completo, protegiendo a la estructura principal compuesta por columnas, vigas y viguetas, manteniendo un rango elástico y evitar cualquier tipo de daño.

El disipador mencionado anteriormente, como se puede ver en la Figura 2, representan una innovación en el diseño estructural. Mejoran la ductilidad y el hiperestatismo al mantener la estructura rígida. En caso de un evento sísmico de alto riesgo, estos dispositivos actúan en el rango no lineal, causando deformaciones en los dispositivos de amortiguación y minimizando el riesgo de daños graves en la estructura [5].

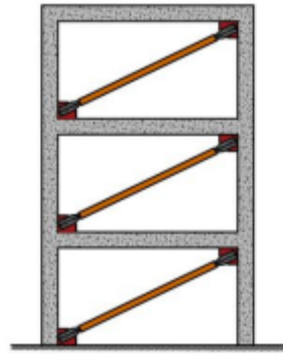


Figura 2. Riorstras de pandeo restringido (diagonal simple) [1]

En la Figura 3 se puede apreciar la composición de los disipadores BRB, se forma por una barra de acero, con un núcleo encamisado por un tubo repleto de hormigón, Este sistema está desacoplado axialmente del mecanismo de restricción, creando un espacio entre ellos. Esto permite que la expansión de Poisson del núcleo en compresión se acomode sin que el mecanismo de restricción se mueva significativamente. Como resultado, tiene una mayor resistencia a la compresión en comparación con la tensión [6].



Figura 2. Descripción general de una riorstra de pandeo restringido -BRB-

Figura 3. Composición de los BRB [7]

El análisis Pushover no lineal estático se lleva a cabo mediante la aplicación de cargas gravitacionales sobre una estructura previamente modelada, en las cuales se producen las primeras deformaciones, por consiguiente, actúan las cargas laterales que se van incrementando de manera secuencial en una dirección, debido a esto se forma la primera rotula plástica y se presenta en la estructura una redistribución de rigidez [8]. Aquel es un proceso que tiene como consecuencia el colapso de la estructura y permite identificar los problemas de desempeño sísmico a través de la curva de capacidad, que se puede observar en la Figura 4. De esta manera, se obtiene una comprensión más precisa del rendimiento de la estructura durante un sismo.

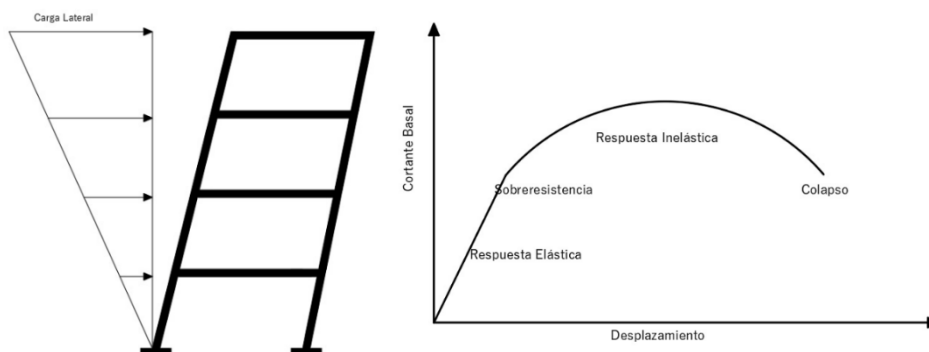


Figura 4. Proceso análisis Pushover

Teniendo en cuenta los aspectos antes mencionados, se llevará a cabo un análisis comparativo utilizando disipadores SLB de tercera generación [9], con una configuración tipo chevron y riorstras

de pandeo restringido (BRB), en forma diagonal, colocada en dos nudos del entrepiso. Y a su vez se someterá un análisis no lineal Pushover, para determinar el nivel de desempeño de la edificación.

2. Materiales y métodos

Esta investigación se basó en los modelos de Yaguana et al. [10], los cuales comprendieron seis edificaciones en total, distribuidas equitativamente entre SLB y BRB. Estas edificaciones presentan una altura de 18 m, 36 m y 54 m, y cuentan con una regularidad en planta y elevación. Además, se encuentran establecidas sobre un suelo tipo "D", con un factor de reducción de resistencia sísmica $R=8$. Ubicados en la ciudad de Quito (Ecuador), consideradas edificaciones de uso esencial. En la Tabla 1 se aprecia las características geométricas de los modelos analizados y en la Figura 5 se observa a la edificación analizada en planta.

Tabla 1. Características de los modelos analizados

Descrip.	Edificio 1-	Edificio 3-	Edificio 5-	Unidad
	2	4	6	
	SLB/BRB	SLB/BRB	SLB/BRB	
Número de vanos	5	5	5	U
Luz de vanos	9	9	9	M
Altura entrepiso	4,5	4,5	4,5	M
Altura total	18	36	54	M
Número de pisos	4	8	12	Nivel
Área planta tipo	2025	2025	2025	m ²

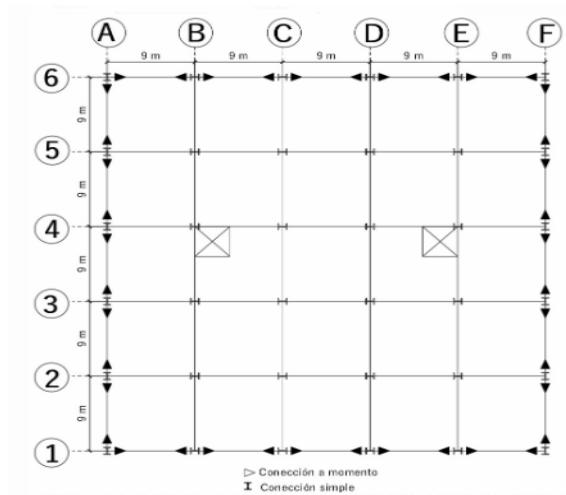


Figura 5. Planta genérica de edificio con pórticos de acero estructural.

Los componentes de los edificios tales como las columnas, vigas principales, viguetas y losas con placa colaborante, están fabricadas en acero. Estas propiedades se pueden consultar en la Tabla 2.

Tabla 2. Características físicas de los materiales

Material	Valor
f'c (Losa)	240 kg/cm ²
fy (Deck)	2600 kg/cm ²
fy (ASTM 36)	2531,35 kg/cm ²
fy (ASTM 572 Gr.50)	3515,35 kg/cm ²
γ Hormigón	2400 kg/m ³
γ Acero	7850 kg/m ³
E acero	2100000 kg/cm ²

Se utilizó una carga permanente de entrepiso de 3,51 kN/m² y para cubierta un valor de 0,19 kN/m² considerando instalaciones eléctricas, de saneamiento, de gas, etc. De igual manera se utilizó una carga viva de entrepiso de 2,90 kN/m² destinada para quirófanos convencionales y laboratorios, por último, para cubierta una carga de 0,70 kN/m² puesto que es inaccesible, estos valores fueron obtenidos de la NEC-SE-CG [2], previo a un análisis de cargas.

En la Figura 6 se aprecia la configuración estructural en elevación.

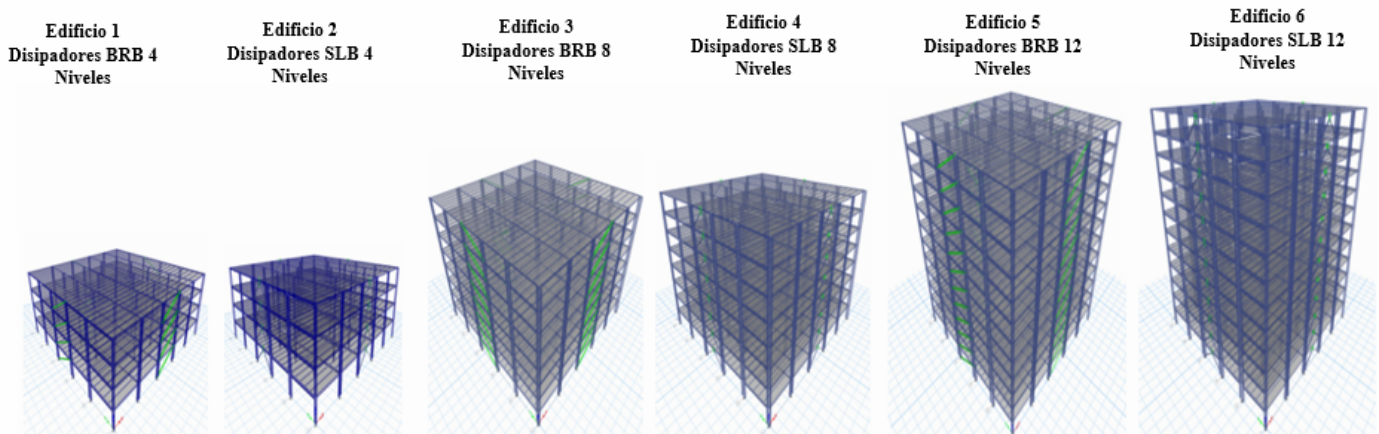


Figura 6. Modelaciones de cuatro, ocho y doce Pisos con disipadores SLB y BRB (Etabs 19)

2.1. Verificación del diseño sismorresistente

Se realizó las verificaciones respectivas a las modelaciones propuestas por Yaguana et al. [10] basada en la NEC-SE-DS [2] la cual se tomará en cuenta los criterios siguientes: Espectro de diseño elástico e inelástico, masa modal participativa, periodos de vibración, derivas de piso inelásticas, desplazamientos y cortantes máximos. Se determinó que los modelos propuestos por Yaguana et al. [10] cumplen con los estándares de diseño necesarios.

2.2. Torsión inducida

Los edificios están diseñados para uso esencial, por lo tanto, se ha planteado una distribución irregular de sobrecarga permanente en cada nivel de la estructura, aquella distribución se puede observar en la Figura 7, que pertenece a la sobrecarga de entrepiso de todos los niveles.

basándonos en la NEC-SE-CG [2] se tomó en cuenta la siguiente sobrecarga adicional: 1.08 kN/m^2 en los cuales se colocará quirófanos de alta tecnología y en los paneles restantes serán utilizados como pasillos, para el tránsito peatonal. Además, la Figura 8 muestra que la distribución de sobrecargas adicionales en la terraza será de $1,96 \text{ kN/m}^2$, debido a la presencia de equipos complementarios, tales como sistemas de ventilación, reservas de agua y oxígeno, entre otros.

El objetivo de agregar sobrecargas a las estructuras es generar torsión inducida. Para controlar su comportamiento en translación y rotación.

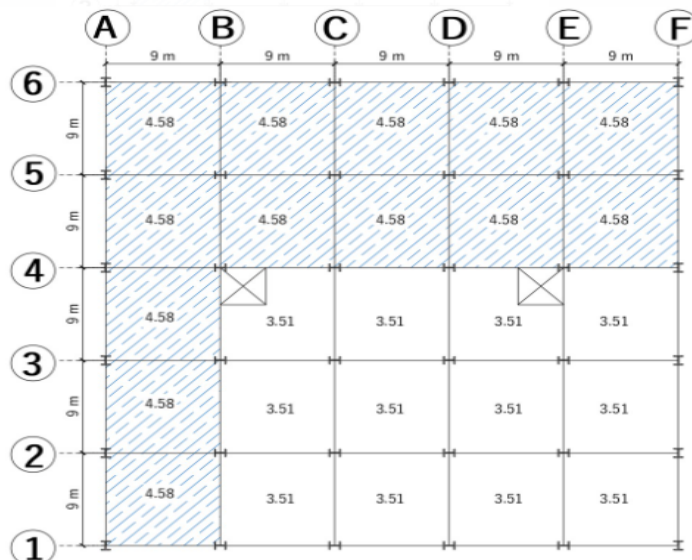


Figura 7. Distribución de sobrecarga permanente de entrepiso

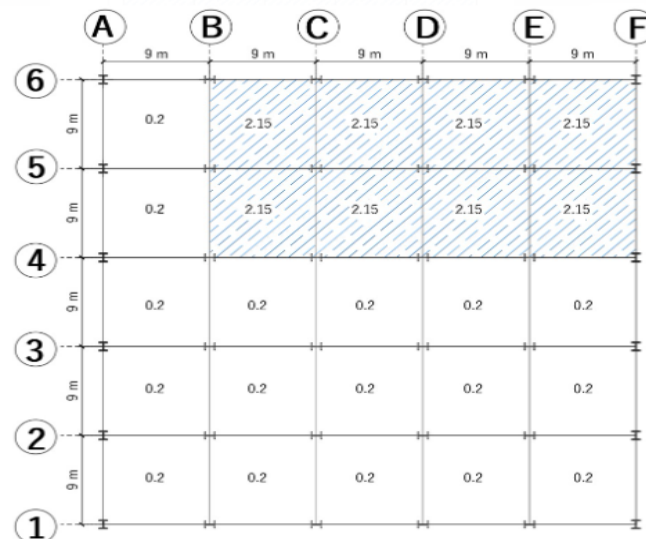


Figura 8. Distribución de sobrecarga muerta en la cubierta

2.3. Modelos estructurales utilizando disipadores SLB

Este sistema estructural funcionó como un pórtico arriostrado, compuesto por elementos concéntricos (SCBF), gracias a las barras de refuerzo conectadas en la parte inferior del dispositivo. Esta configuración brinda una capacidad significativa de deformación inelástica al trabajar en conjunto de riostras y dispositivo SLB [11].

Dado que la modelación de este dispositivo SLB se realiza utilizando un enfoque de Link, la verificación del índice demanda/capacidad se llevó a cabo mediante dos métodos de prediseño: el método directo e inverso, tal y como lo dicta el manual de análisis y diseño que utiliza disipadores sísmicos tipo SLB [12].

En la Tabla 3 se indica el procedimiento y cumplimiento de selección de disipadores por medio del método de iteración directa, el cual se basa en iterar una serie de análisis de tipo lineal, llevando así a asignar dispositivos según la fuerza cortante obtenida por cada iteración, hasta que el cortante obtenido cumpla con la índice demanda/capacidad de 1,50 con la fuerza de fluencia del disipador [12]. Este procedimiento se lo llevo a cabo para cada uno de los edificios, cabe recalcar que para fines prácticos se indica el cálculo en un solo eje de elevación, del edificio de cuatro niveles.

Tabla 3. Proceso de selección de disipadores SLB método directo, edificio 4 niveles

Edificación	Elevación (m)	Link	Iteración Inicial			Iteración Final			Control	
			V (kN)	SLB	Fy (kN)	V (kN)	SLB	Fy (kN)	D/C	
Edificación 4 Niveles	18	K1	3578,79	3xSLB4 40_8	1537,45	2028,11	3xSLB4 40_9	1673,12	1,21	OK
	13,5	K2	846,05	SLB3 6_2/1,25	28,48	4838,29	3xSLB4 65_12	3584,18	1,35	OK
	9	K3	856,49	SLB3 6_2/1,25	28,48	5799,71	3xSLB4 65_14	4069,56	1,43	OK
	4,5	K4	3816,09	3xSLB4 40_10	1803,94	2877,24	3xSLB4 50_12	2652,23	1,08	OK

En la Tabla 4 se indica el procedimiento y cumplimiento de ajuste en selección de disipadores por medio del método de iteración inversa, el cual consiste en limitar la fuerza cortante en el tamaño de los dispositivos, calculando una rigidez ficticia y ajustando lo máximo posible la capacidad resistente de los elementos que llega a soportar el disipador, evitando así su fallo antes que pueda alcanzar su fuerza de cortante máximo.

En cada paso a seguir, se debe verificar la rigidez ficticia obtenida utilizando la ecuación (1).

$$Kf = 1.15 \frac{Fy}{defdisp} \quad (1)$$

Donde:

Fy: fuerza de fluencia del dispositivo

1,15: factor de seguridad adicional

defdisp: desplazamiento del dispositivo

Kf: rigidez ficticia

Lo indicado anteriormente se realiza con el fin de obtener un mejor ajuste de desempeño sísmico en estos dispositivos.

Para que cumpla las condiciones mencionadas del índice demanda/capacidad debe encontrarse entre 1,10 y 1,40 para que el disipador no se sobredimensione.

Tabla 4. Proceso de selección de disipadores SLB método inverso, edificio 4 niveles

Edificación	Elevación (m)	Link	Iteración Inicial				Iteración Final				K1 (kN/cm)	Kf (kN/cm)
			SLBF	V2 (KN)	D/C	Dy (cm)	SLBF	V2 (KN)	D/C	Dy (cm)		
Edificación 4 Niveles	18	K1	3xSLB4 40_9	2028,11	1,21	0,07	3xSLB4 40_9	1997,37	1,19	OK	27764,58	27684,69
	13,5	K2	3xSLB4 65_12	4838,29	1,35	0,08	3xSLB4 65_12	4972,21	1,39	OK	53599,51	53047,65
	9	K3	3xSLB4 65_14	5799,71	1,43	0,08	3xSLB4 40_10	5651,70	1,39	OK	58353,98	25927,92
	4,5	K4	3xSLB4 50_12	2930,90	1,08	0,06	3xSLB4 65_12	2954,14	1,11	OK	49594,53	66018,69

2.4. Modelos estructurales utilizando riostras de pandeo restringido (BRB)

Este sistema estructural funcionó como un pórtico arriostrado con pandeo restringido (BRBF), ubicado diagonalmente en este caso. Esta configuración brinda una capacidad significativa de deformación inelástica, gracias principalmente a la elasticidad de las barras de refuerzo en tracción y compresión [13].

Los BRB funcionan de manera autónoma, como un sistema de arriostramiento, sin necesidad de conectores adicionales para estabilizar el pórtico principal. El núcleo de acero es uniforme en cuanto a su grado de plastificación [13], como se muestra en la Figura 9.



Figura 9. Conexión articulada por pasador [14]

Para este caso se implementaron disipadores Star BRB [15] debido a que se modela como un elemento tipo Frame, la verificación del índice demanda/capacidad, tendrán valores aproximados a 1,00 como se puede apreciar en la Figura 10, la cual permite visualizar si la sección es óptima o no.

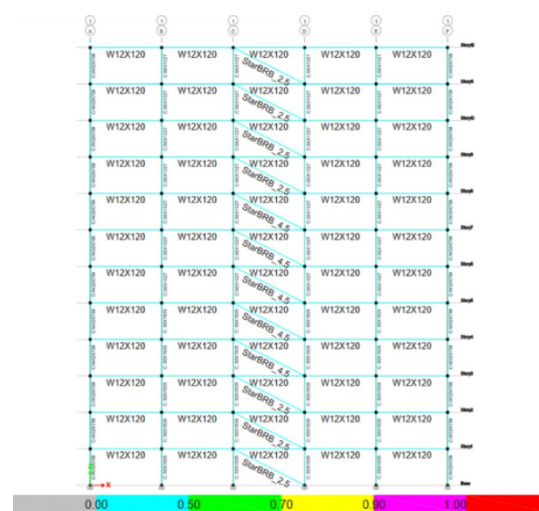


Figura 10. Índice demanda/capacidad 12 niveles, eje 1 (Etabs 19).

2.5. Curva Histerética

Su principal objetivo es indicar las deformaciones inelásticas del material, buscando un comportamiento histerético estable a través de la representación de fuerza vs desplazamiento. La curva histerética se compone de tres regímenes los cuales son: Elástico, plástico y daño.

La curva histerética se genera a raíz de la disipación de energía por parte de dispositivos como los BRB y SLB. La plastificación sufre la influencia de un evento sísmico cuando alcanza el rango no lineal. Normalmente actúa de manera elástica, lo que le permite resistir las cargas laterales y los movimientos vibratorios provocados por los sismos y el viento. Sin embargo, en caso de terremotos severos, se comporta de manera inelástica y disipa la energía sísmica [16].

La principal ventaja que produce una riostra BRB ante los sistemas convencionales es que produce un mayor nivel de ductilidad y absorción de energía, esto se produce debido a que la configuración de encamisado permite que tenga un mejor desarrollo tanto tracción como a compresión producto de la ausencia de pandeo o inestabilidades, lo que genera ciclos de histéresis estables y continuos en ambas direcciones de carga generando capacidades axiales idénticas como se indica en la Figura 11, en comparación con los sistemas típicos de protección contra sismos, no se observa una disminución significativa en la rigidez o resistencia [17].

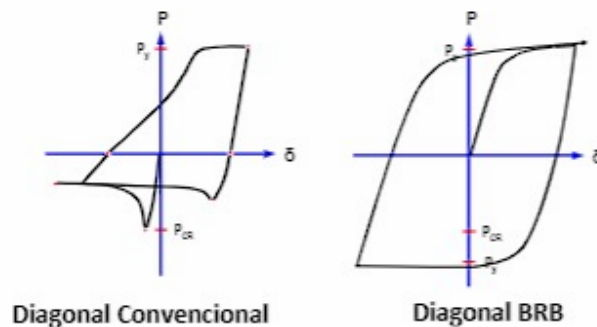


Figura 11. Curva histerética BRB [15]

Los disipadores SLB tienen como ventaja llevar a cabo un porcentaje histerético que ofrece el acero en el rango inelástico, el cual disipa la energía que se introduce en el sistema, disminuyendo su respuesta estructural en los elementos principales que se presenta en la estructura [18].

Especialmente los disipadores SLB prevalecen la deformación por corte en el rango plástico y así disipa energía mediante el alma del dispositivo, Tal como se puede notar en la Figura 12.

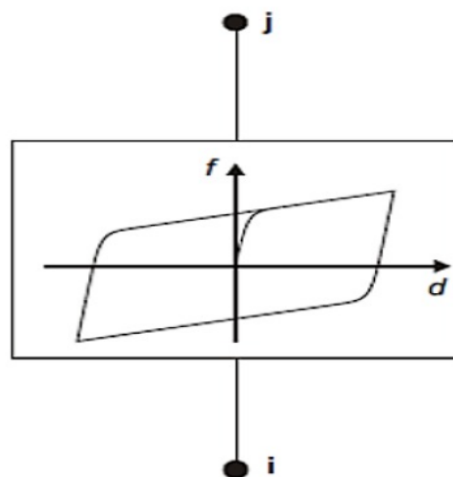


Figura 12. Curva histerética SLB [19]

2.6. Análisis estático no lineal (Pushover)

Se realizó un análisis no lineal y se tomó las recomendaciones del ASCE/SEI 41-13 [20]. Este análisis sirve para determinar la curva de capacidad de la estructura. Se aplica un patrón de cargas laterales que se van incrementando mediante el alcance de un estado límite, llamado punto de desempeño o condición de falla. Cabe destacar que se produce una reducción de rigidez relevante y resistencia, la estructura llega a incursionar en el rango inelástico en proporción a la ductilidad [21].

Actualmente, existen varias técnicas de análisis no lineal disponibles. Una de las más utilizadas es el método de coeficiente de desplazamiento, que se presenta en el FEMA-356 [22]. Este procedimiento numérico permite estimar la demanda de desplazamiento a través de la representación de una curva bilineal, como se muestra en la figura 13. Se utilizan diversos factores o coeficientes para encontrar el desplazamiento objetivo, haciendo que este método sea una opción efectiva en la resolución de problemas no lineales [21].

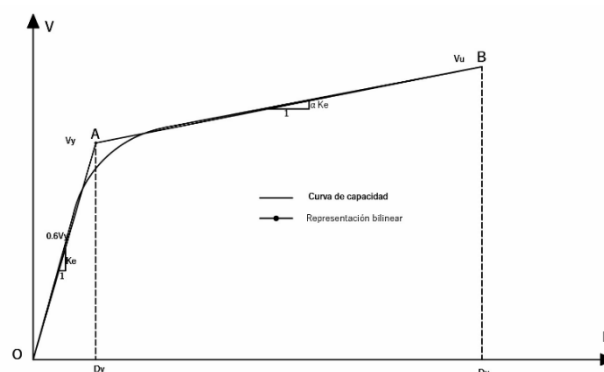


Figura 13. Representación bilineal de la Curva de Capacidad (FEMA 273) [23]

Por otro lado, el método del espectro de capacidad, aquel consiste en comparar la curva de capacidad y el espectro de diseño, para la determinación del punto de desempeño de la estructura bajo la acción sísmica, cuyo diagrama corresponde a aceleración vs desplazamientos espectral [24].

En esta investigación, se adoptó el método Pushover para analizar la variación de carga y deformación lateral durante una acción sísmica.

Este método nos brinda la ventaja de visualizar la secuencia de aparición de grietas, rotulas plásticas y fallos en elementos, hasta el colapso total de la estructura más allá del rango inelástico [25].

Los niveles de desempeño corresponden a una combinación de los niveles utilizados para los elementos estructurales, estos niveles se designarán alfanuméricamente con un número que represente el nivel de desempeño estructural y una letra que represente el nivel de desempeño no estructural, como se indica en la Tabla 5 y el Figura 14, se muestra un esquema del comportamiento de una estructura y su influencia a nivel de reparación.

Tabla 5. Niveles de desempeño

Niveles de desempeño del objetivo			
Niveles de desempeño no estructural	Ocupación inmediata	Seguridad de vida	Seguridad limitada
Operacional	Operacional 1-A	no recomendado	no recomendado
Ocupacional inmediata	Ocupación inmediata 1-B	3-B	no recomendado
Seguridad de vida	1-C	Seguridad de vida 3-C	5-C

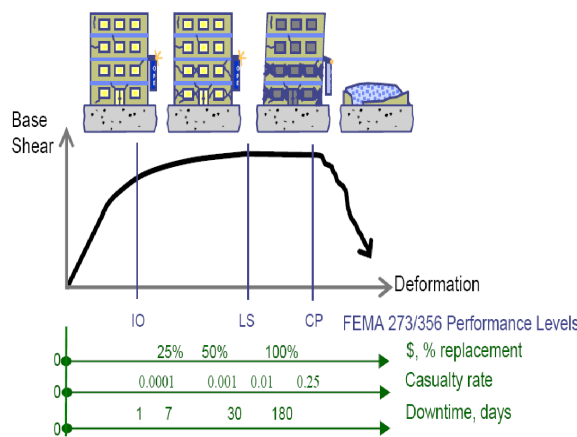


Figura 14. Curva de ocupación [26]

El punto de desempeño nos indica la capacidad sísmica de la estructura, cuando esta es igual a la demanda sísmica impuesta de un sismo [27].

Para la determinación de punto de desempeño, se utilizó el proceso de linealización equivalente, establecido en el FEMA 356 [22], obtenido por medio del paquete computacional Etabs 19.

3. Resultados y Discusión

Con el fin de comparar el desempeño de estructuras metálicas que utilizan riostras de pandeo restringido (BRB) y disipadores (SLB), se obtuvieron resultados sobre los requerimientos de diseño para ambos sistemas [19].

3.1. Periodos de vibración

En este estudio, se determinaron los periodos de vibración mediante un análisis estático y modal espectral. Los valores obtenidos para los disipadores SLB en edificaciones de cuatro, ocho y doce niveles se presentan en la Tabla 6, respectivamente, mientras que en la Tabla 7 se indican los valores obtenidos de los disipadores BRB, en las edificaciones de cuatro, ocho y doce niveles respectivamente.

La Norma Ecuatoriana de la Construcción indica que el periodo obtenido no debe ser mayor a un 30 % a un valor calculado aproximado por el método 1, el cual se puede observar que se cumple [2].

Tabla 6. Resultados de Periodos de vibración disipadores (SLB)

Niveles	Modo	Periodo (s)	UX	UY
Edificio 4 niveles	1	0,549	0,799	0,000
	2	0,523	0,000	0,815
	3	0,336	0,002	0,112
Edificio 8 niveles	1	1,198	0,000	0,746
	2	1,136	0,711	0,000
	3	0,791	0,002	0,000
Edificio 12 niveles	1	1,605	0,699	0,000
	2	1,473	0,000	0,723
	3	1,141	0,002	0,000

Tabla 7. Resultados de Periodos de vibración disipadores (BRB)

Niveles	Modo	Periodo (s)	UX	UY
Edificio 4 niveles	1	0,700	0,000	0,800
	2	0,635	0,789	0,000
	3	0,427	0,789	0,000
Edificio 8 niveles	1	1,163	0,718	0,000
	2	1,102	0,000	0,744
	3	0,766	0,002	0,000
Edificio 12 niveles	1	1,606	0,701	0,000
	2	1,499	0,000	0,729
	3	1,140	0,002	0,000

La implementación de estos dispositivos ha demostrado resultados interesantes en cuanto a los periodos obtenidos. Se puede apreciar que, en edificios de ocho y doce niveles, los periodos son similares tanto con disipadores SLB como con disipadores BRB. Sin embargo, en el caso de la edificación de 4 niveles, se registró un aumento del 21 % en el periodo, pasando de 0,549 s con disipadores SLB a 0,7 s con disipadores BRB. Además, cabe destacar que ambos tipos de disipadores produjeron importantes cambios en los modos de vibración tanto para rotación como para traslación.

3.2. Derivas inelásticas

Las derivas de piso permiten controlar los desplazamientos laterales, protegiendo a los elementos que forman la estructura.

La normativa ecuatoriana NEC-SE-DS [2] dicta que la deriva máxima para cualquier piso no excederá el 2 % de la altura de piso.

Los resultados obtenidos se pueden ver claramente en la Figura 15 y en la Tabla 8. Se observa que, en el edificio de cuatro pisos, el uso de los disipadores sísmicos SLB produce una reducción significativa tanto en el eje X-X como en el eje Y-Y, con un decremento del 27 % y 50 %, respectivamente.

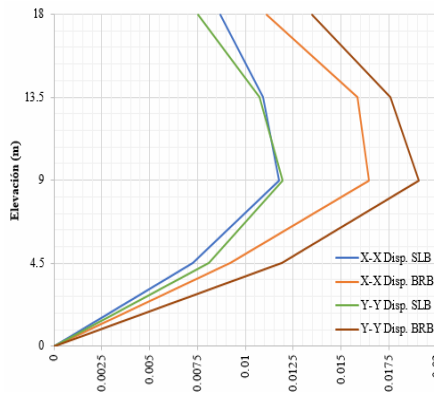


Figura 15. Derivas inelásticas SLB – BRB 4 niveles

Tabla 8. Comparativa BRB y SLB 4 niveles

Deriva Inelástica Máxima			
Eje	BRB	SLB	% Reducción
X	0,0165	0,0120	27
Y	0,0190	0,0095	50

Los resultados obtenidos en el edificio de ocho pisos, según se muestra en la Figura 16 y la Tabla 9, indican un descenso del 4 % en el eje X-X cuando se utilizan los disipadores sísmicos SLB, aunque no es una reducción particularmente significativa. Sin embargo, para el eje Y-Y, los disipadores BRB logran una reducción del 19 %, lo que demuestra un mejor rendimiento.

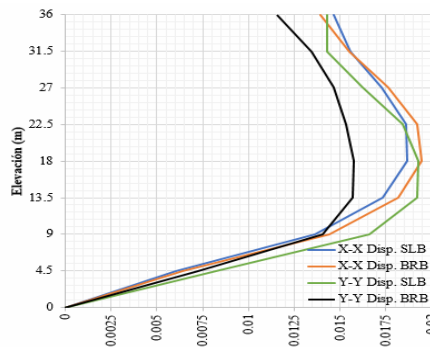


Figura 16. Derivas inelásticas SLB – BRB 8 niveles

Tabla 9. Comparativa BRB y SLB 8 niveles

Deriva Inelástica Máxima			
Eje	BRB	SLB	%
X	0,0195	0,0187	4 Reducción
Y	0,0157	0,0193	19 Incremento

En el caso del edificio de doce pisos, como se muestra en la Figura 17 y en la Tabla 10, se nota que no hay una gran diferencia en los pórticos situados en los ejes X-X y Y-Y. La diferencia obtenida es de solo 1 % en ambos casos, lo que indica que la eficacia en el control del desplazamiento es similar.

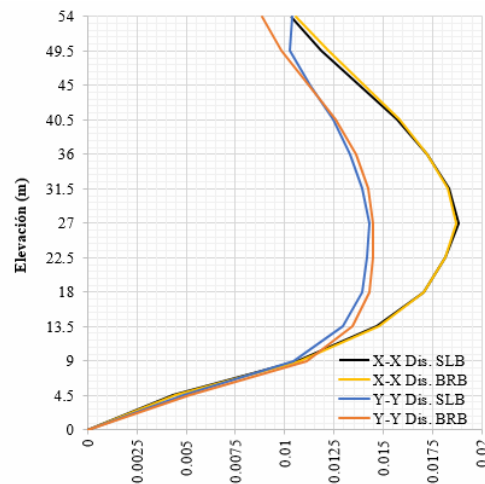


Figura 17. Derivas inelásticas SLB – BRB 12 niveles

Tabla 10. Comparativa BRB y SLB 12 niveles

Eje	Deriva Inelástica Máxima		
	BRB	SLB	% Reducción
X	0,019	0,019	1
Y	0,015	0,014	2

Los disipadores sísmicos SLB demuestran ser efectivos en cada una de las estructuras edilicias. Con su implementación, se asegura la prevención del exceso de desplazamiento durante un terremoto y se cumple con los estándares sísmicos establecidos por la normativa mencionada anteriormente.

3.3. Periodos de vibración

Los desplazamientos son valores referentes a la respuesta máxima que espera la estructura frente a un sismo de gran magnitud [19].

De los valores obtenidos en el edificio de cuatro niveles como se observa en la Figura 18 y en la Tabla 11 se tiene una reducción significativa utilizando dispositivos SLB para el eje X-X con una reducción del 27 % con respecto al valor obtenido por parte de los disipadores BRB, para el eje Y-Y se obtiene un mayor control de los disipadores SLB notándose una reducción del 38 % con respecto al disipador BRB.

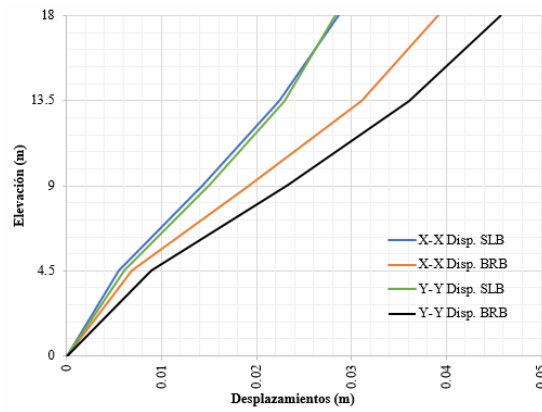


Figura 18. Desplazamientos máximos de piso SLB-BRB 4 niveles

Tabla 11. Comparación BRB y SLB 4 niveles

Eje	Desplazamientos Máxima (m)		
	BRB	SLB	% Reducción
X	0,0392	0,0287	27
Y	0,0457	0,0283	38

En el caso del edificio de ocho pisos, los resultados obtenidos para los dispositivos SLB y los disipadores BRB se pueden apreciar en la Figura 19 y la Tabla 12. Se encuentra una variación del 3 % en el eje X-X, con un mejor resultado para los dispositivos SLB. Sin embargo, es importante mencionar que la diferencia entre ambos no es significativa. Por otro lado, en el eje Y-Y se encuentra una reducción del 14 % con un mejor resultado para los disipadores BRB.

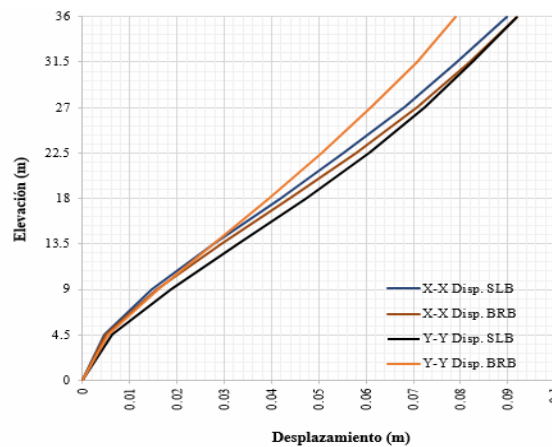


Figura 19. Desplazamientos máximos de piso SLB-BRB 8 niveles

Tabla 12. Comparación BRB y SLB 8 niveles

Eje	Desplazamientos Máximo (m)		
	BRB	SLB	%
X	0,0921	0,0898	3 Reducción
Y	0,0789	0,0920	14 Incremento

Para la edificación de doce pisos, como se puede ver en la Figura 20 y la Tabla 13, la variación obtenida es prácticamente la misma en ambos ejes, X-X y Y-Y, con un valor de 1 % de diferencia. Por lo tanto, la efectividad en el control de desplazamiento es igual en ambos casos.

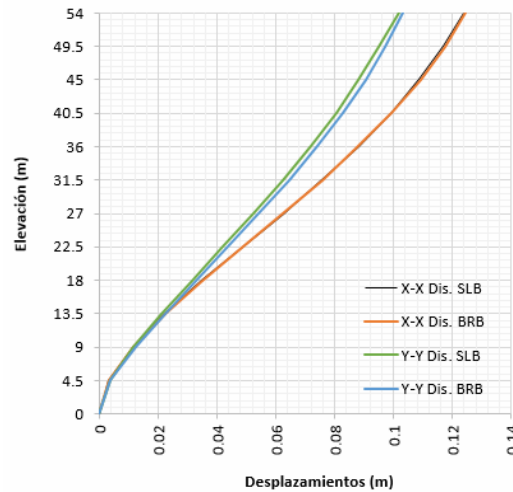


Figura 20. Desplazamientos máximos de piso SLB-BRB 12 niveles

Tabla 13. Comparación BRB y SLB 12 niveles

Eje	Desplazamientos Máxima (m)		
	BRB	SLB	% Reducción
X	0,125	0,124	1
Y	0,103	0,102	1

A partir de los datos recopilados, se pudo evidenciar que los dispositivos SLB tienen un desempeño superior en términos de control de desplazamiento. Sin embargo, tanto la implementación de los disipadores SLB como la de los BRB han logrado cumplir con el objetivo propuesto, alcanzando una disminución en los desplazamientos y, en consecuencia, una mejora en el comportamiento de la estructura.

3.4. Cortantes máximos

Se entiende por cortante basal a la acumulación de fuerzas a lo largo de cada nivel o piso las cuales se generan en la base de la estructura, el objetivo de obtener estas fuerzas es observar los esfuerzos que producen las mismas y de esta manera poder diseñar pórticos que sean resistentes a sismos [28].

Los resultados obtenidos en la edificación de cuatro niveles, según se muestra en la Figura 21 y la Tabla 14, indican que la fuerza cortante en la base en ambas direcciones X-X y Y-Y es ligeramente menor tanto para el disipador SLB como el BRB, siendo esta reducción del 1 %.

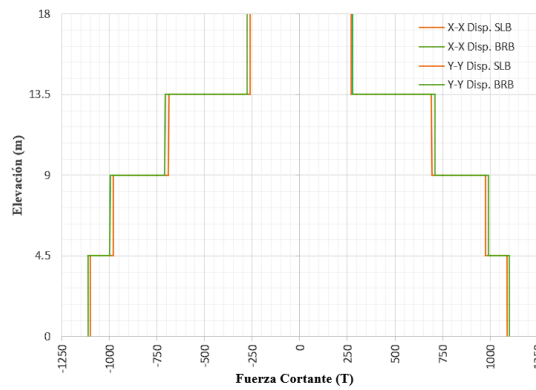


Figura 21. Cortantes máximos de piso SLB-BRB 4 niveles

Tabla 14. Comparación BRB y SLB 4 niveles

Eje	Fuerza Cortante (T)		% Reducción
	BRB	SLB	
X	1102,29	1090,09	1,10
Y	1112,05	1098,74	1,20

En la evaluación de la edificación de ocho niveles, según se muestra en la Figura 22 y Tabla 15, la reducción de la fuerza cortante en la base en la dirección X-X es casi despreciable. Aun así, los disipadores SLB muestran una ligera mejoría en su desempeño, con una reducción del 0.1 %. Por otro lado, en la dirección Y-Y, el resultado es similar, pero con el dispositivo BRB logrando una reducción decimal de 0.2 %.

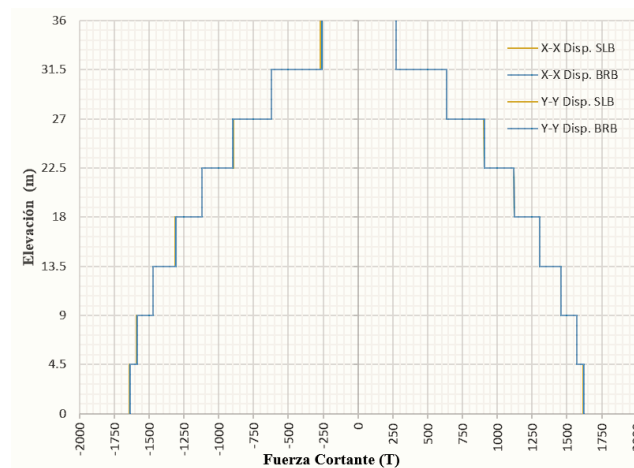


Figura 22. Cortantes máximos de piso SLB-BRB 8 niveles

Tabla 15. Comparación BRB y SLB 8 niveles

Eje	Fuerza Cortante (T)		% Reducción
	BRB	SLB	
X	1620,63	1619,37	0.1
Y	1638,25	1642,11	0.2

En el análisis de la edificación de doce niveles, según se aprecia en la Figura 23 y Tabla 16, se encontró que la reducción de la fuerza cortante en la base en la dirección X-X es prácticamente despreciable. Sin embargo, los disipadores SLB exhiben una reducción del 0.2 % y, aunque

pequeña, su rendimiento es mejor. En la dirección Y-Y, la situación es similar, pero en este caso, es el dispositivo BRB el que obtiene una reducción del 0.4 %, demostrando un desempeño superior.

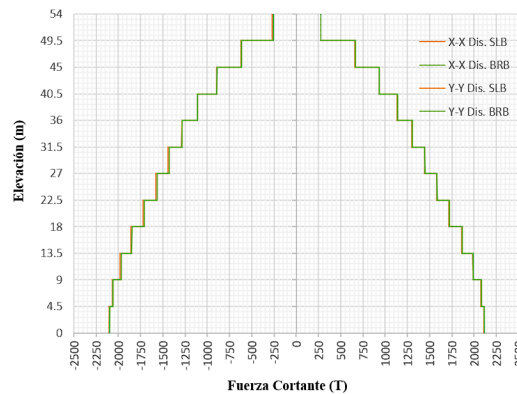


Figura 23. Cortantes máximos de piso SLB-BRB 12 niveles

Tabla 16. Comparación BRB y SLB 12 niveles

Eje	Fuerza Cortante (T)			
	BRB	SLB	%	
X	2116,25	2111,32	0,2	Reducción
Y	2097,12	2106,50	0,4	Incremento

Tras la revisión de los datos recopilados, se puede distinguir que los disipadores SLB presentan un desempeño superior, aunque la diferencia sea mínima, pero es importante tener en cuenta que ambos dispositivos logran satisfactoriamente el objetivo de disminuir la fuerza cortante.

3.5. Análisis no lineal Pushover

El procedimiento Pushover busca evaluar el comportamiento de un sistema estructural mediante análisis estáticos consecutivos para estimar sus demandas de resistencia y deformación. De esta manera, se puede predecir la fuerza sísmica y la demanda de deformación en la estructura, considerando la redistribución de las fuerzas internas que ocurre cuando la estructura es sometida a fuerzas inerciales que superan el límite elástico, genera la Curva de Capacidad, que representa el desplazamiento lateral en función de la fuerza aplicada, proporcionando al diseñador información valiosa sobre el comportamiento de la estructura [29].

Mediante el uso de los parámetros del FEMA 356 [21], se logró generar las curvas de capacidad correspondientes.

En la evaluación de la edificación de cuatro niveles, como se muestra en la Figura 24, en la dirección X-X con disipadores SLB resulta en una fuerza cortante de 3118,67 T antes de presentar la primera falla, mientras que con los disipadores BRB, la primera falla se produce con una fuerza cortante de 5066.17 T. En la dirección Y-Y presenta una situación similar, con la aplicación de disipadores SLB logra sostener una fuerza de 3961.47 T antes de fallar, y con disipadores BRB se alcanza a sostener fuerza de 5182.44 T.

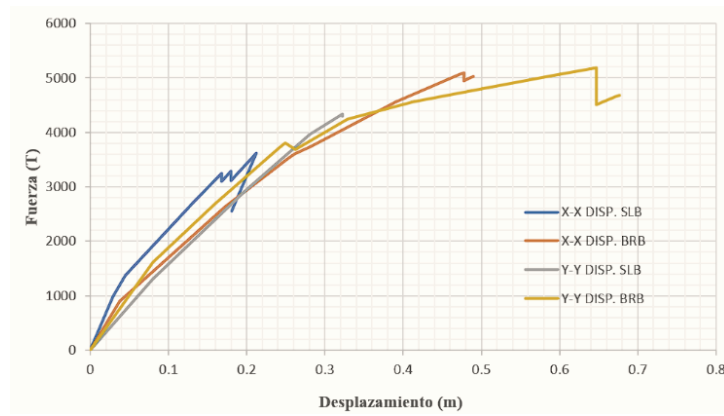


Figura 24. Fuerza vs desplazamiento SLB-BRB 4 niveles

Por tanto, se puede apreciar que el sistema BRB tiene una mayor capacidad en el rango inelástico antes de alcanzar los primeros fallos estructurales.

La edificación de ocho niveles, como se aprecia en la Figura 25, muestra que el eje X-X con la implementación de disipadores SLB soporta una fuerza de 10436,36 T antes de alcanzar los primeros fallos estructurales. Por otro lado, los dispositivos BRB alcanzan las primeras fallas con una fuerza de 10475,36 T. En el caso del eje Y-Y, empleando disipadores SLB logran sostener una fuerza de 7886,45 T sin producir fallas, mientras que los dispositivos BRB experimentan las primeras fallas con una fuerza de 5845,49 T.

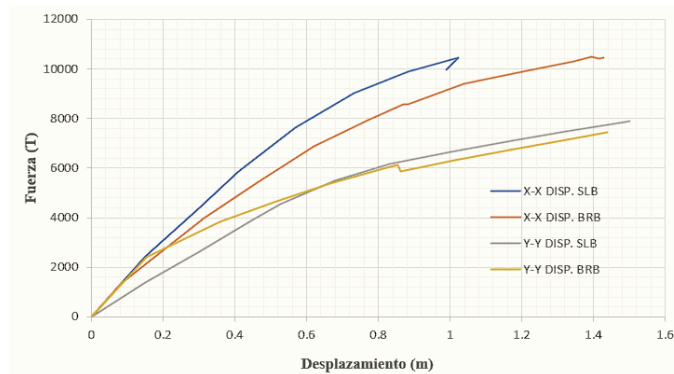


Figura 25. Fuerza vs desplazamiento SLB-BRB 8 niveles

Antes de alcanzar los primeros fallos estructurales, el sistema BRB en la dirección X-X tiene una mayor capacidad de rango inelástico. Sin embargo, es importante tener en cuenta que los daños causados en este sistema no afectan de una manera crítica. Por otro lado, el sistema SLB en la dirección Y-Y presenta una mayor capacidad de rango inelástico, lo que indica una mayor resistencia a las fuerzas externas antes de producirse fallos estructurales.

Del análisis en la edificación de doce niveles como se muestra en la Figura 26, se nota que para el eje X-X usando dispositivos SLB presentan una capacidad de corte de 19756,60 T antes de producir las primeras fallas estructurales, mientras que los dispositivos BRB experimentan dichas fallas con una fuerza de 17629,37 T. En el eje Y-Y, se observa con la aplicación de dispositivos SLB las primeras fallas estructurales con una fuerza de 9455,17 T, mientras que empleando dispositivos BRB logran mantener una capacidad de corte de 9605,01 T sin experimentar fallas.

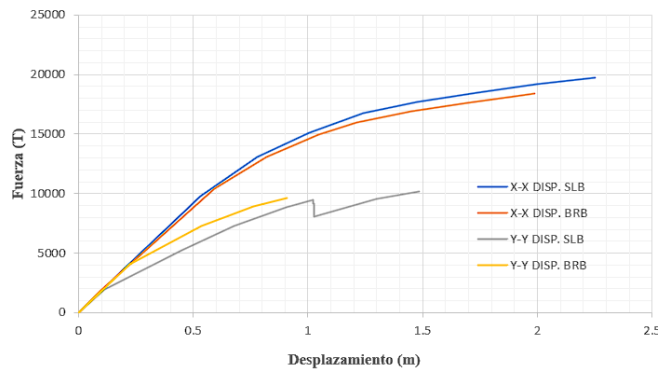


Figura 26. Fuerza vs desplazamiento SLB-BRB 12 niveles

Por tanto, se puede ver que en los disipadores BRB como en los SLB, se produce la falla de elementos, pero los daños podrían ser considerados como reversibles en esta edificación.

3.5.1. Punto de desempeño

El análisis no lineal ha permitido determinar los puntos de desempeño de las estructuras de cuatro, ocho y doce niveles en ambos ejes X-X y Y-Y, como se muestra en la Tabla 16. El objetivo principal es visualizar el desplazamiento máximo que cada estructura experimenta bajo una demanda sísmica [27]. Además, se puede apreciar el rendimiento de la estructura de ocho niveles a través de las Figuras 27 y 28 para los ejes Y-Y y X-X, respectivamente. Estas figuras fueron elegidas como representativas para ilustrar el comportamiento general que una estructura puede presentar, de acuerdo con el FEMA 356 [30]. Cabe destacar que se elaboraron gráficas correspondientes a cada una de las edificaciones.

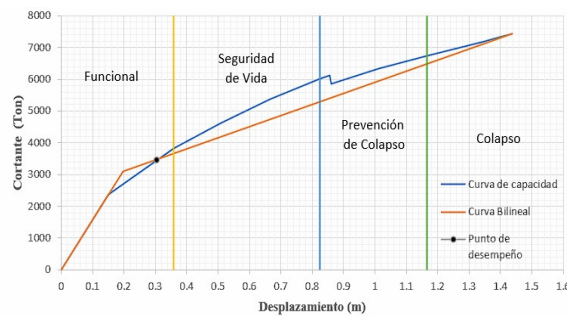


Figura 27. Punto de desempeño en Y-Y 8 niveles (BRB)

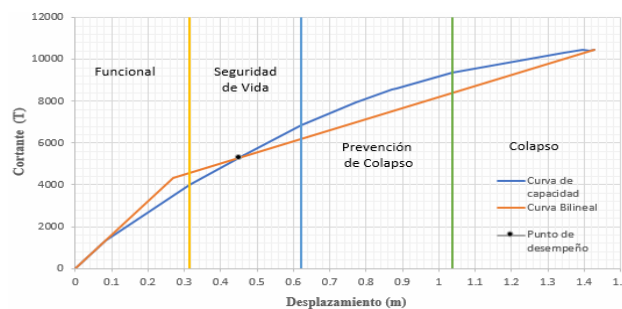


Figura 28. Punto de desempeño en X-X 8 niveles (BRB)

Tabla 17. Niveles de Desempeño

	Disip.	Pushover Sentido	Punto de Desempeño		Nivel de Desempeño
			V (Ton)	D (m)	
Edificio 4 Niveles	SLB	X	3249,76	0.18	Colapso
		Y	3682,89	0.26	Prevención de colapso
	BRB	X	3678,47	0.27	Seguridad de Vida
		Y	3639,03	0.24	Seguridad de Vida
Edificio 8 Niveles	SLB	X	4117,53	0.28	Funcional
		Y	4825,57	0.57	Funcional
	BRB	X	5299,43	0.45	Seguridad de Vida
		Y	3458,28	0.31	Funcional
Edificio 12 Niveles	SLB	X	6582,29	0,36	Funcional
		Y	7180,13	0,66	Funcional
	BRB	X	10311,3	0,59	Seguridad de Vida
		Y	5685.83	0,38	Funcional

Los datos recopilados en la tabla 17 muestran que la mayoría de las estructuras han tenido un desempeño adecuado después de un sismo, como era de esperarse. No obstante, se puede apreciar que la aplicación de dispositivos BRB ha mejorado significativamente el desempeño de las edificaciones en la mayoría de los casos. Sin embargo, hay una excepción: se registró el colapso de una edificación de cuatro niveles, que fue la única en presentar este resultado perjudicial.

3.6. Reducción de peso estructural por incorporación de dispositivos

Una de las principales ventajas de la incorporación de los dispositivos SLB y BRB es que fortalecen la resistencia estructural y mejoran la ductilidad. Gracias a ello, se puede optimizar la estructura al disminuir las secciones de vigas y columnas, lo que se traduce en una reducción del peso propio de la estructura.

Este estudio partió de los pesos originales proporcionados por las modelaciones de Yaguana et al. [10] para los edificios de cuatro, ocho y doce niveles, considerando que los pórticos exteriores funcionan como un sistema SMF. Se determinó que es posible optimizar las estructuras mediante la reducción de secciones sin afectar su desempeño estructural. La implementación de dispositivos SLB o BRB resultó en una reducción promedio del 6 % con relación al peso original de las edificaciones. A pesar de ello, cuando se compararon los pesos entre dispositivos BRB y SLB, no se encontró una diferencia significativa en la reducción de peso, resultando en una disminución promedio del 1% en todos los edificios, como se ilustra en la Figura 29 y la Tabla 18.

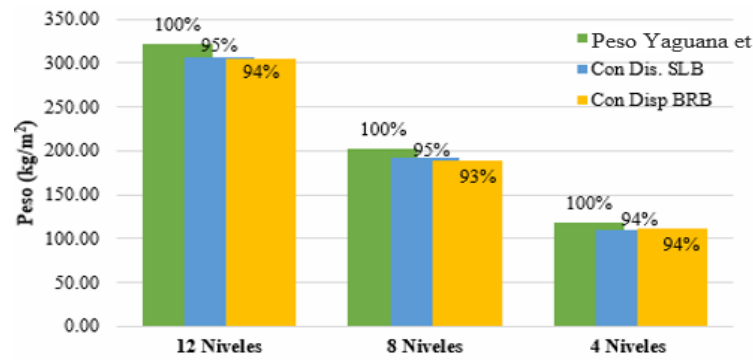


Figura 29. Porcentaje reducción de pesos 4, 8 y 12 niveles

Tabla 18. Peso total estructural

	12 Niveles	8 Niveles	4 Niveles
Peso Yaguana.et (kg/m²)	322,32	202,73	117,93
Con Disipadores SLB (kg/m²)	306,97	192,28	110,38
Con Disipadores BRB (kg/m²)	304,36	188,82	112,15

4. Conclusiones

Tras la implementación de los dispositivos SLB y BRB, se ha notado una reducción en parámetros importantes como periodos, derivas, desplazamientos y cortantes máximos en las estructuras evaluadas. Sin embargo, el dispositivo Shear Link Bozzo (SLB) resultó ser el más efectivo en todos los aspectos mencionados. Cabe destacar que, a pesar de ello, en una sola edificación, el desempeño del SLB fue perjudicial, afectando directamente la reducción de daños a elementos estructurales y el riesgo a la pérdida de vidas humanas. En conclusión, basándonos en los resultados obtenidos en esta investigación el dispositivo SLB se comporta mejor ante la acción sísmica.

La principal limitación de esta investigación radica en las riostras de pandeo restringido (BRB), cuyo estudio se ve obstaculizado por su patentamiento, lo que limita el acceso a información específica sobre su comportamiento y, por ende, dificulta el desarrollo de técnicas de análisis y diseño más eficientes. Si bien los resultados obtenidos nos brindan una perspectiva valiosa sobre el comportamiento de las variables estudiadas, es importante considerar también la dimensión económica del problema. Para ello, es necesario realizar un análisis más amplio que permita integrar los aspectos técnicos y económicos, a fin de poder tomar una decisión informada y eficiente.

Contribución de autores: idea y conceptualización, P.G., D.G. y S.G.; metodología, P.G., D.G. y S.G.; software, D.G., S.G. y P.G.; validación, D.G., S.G. y P.G.; investigación, D.G., S.G. y P.G.; redacción, D.G., S.G.; Revisión, P.G.; supervisión, P.G.

Financiamiento: Los autores financiaron a integridad el estudio.

Conflictos de interés: Los autores declaran no tener ningún conflicto de intereses.

Referencias

- [1] C. Ruiz, A. Torres, "Análisis Comparativo del Comportamiento Sísmico Dinámico de Estructuras Esenciales con Aisladores de Base del Tipo Elastomérico con Núcleo de Plomo LRB y Disipadores Tipo Contraventeos Restringidos al Pandeo BRB, y su Incidencia en la Relación Costo/Beneficio del Sistema Estructural" Proyecto de titulación, Universidad Técnica de Ambato Ambato, Ecuador. 2018.
- [2] Miduvi, "Norma Ecuatoriana de la construcción NEC-SE-DS". Peligro sísmico. 2015
- [3] F. Enciso, "Análisis Comparativo del Diseño Sísmico de una Estructura con Muros Continuos y con Muros Desacoplados Incorporando Disipadores SLB en la Ciudad de Huancayo" Proyecto de titulación, Universidad Nacional del Centro del Perú, Huancayo, Perú. 2018.
- [4] S. Aguirre, V. Barazorda, "Propuesta de Diseño de Dos Hospitales, en Zona Sísmica Tres y Cuatro, Usando Disipadores SLB en el Perú; Como Alternativa a los Aisladores Sísmicos Exigidos Por la NTP E.030" Proyecto de titulación, Universidad Peruana de Ciencias Aplicadas, Lima, Perú. 2022
- [5] C. Bacury, "Optimización de Edificios con Disipadores de Energía Pasivos utilizando Algoritmos Genéticos Desarrollados en Python 3 Adaptados a Etabs" Proyecto de titulación, Escuela Politécnica Nacional, Quito, Ecuador. 2022
- [6] A. Santos, K. Soriano, "Estudio del Desempeño de Disipadores con Diagonales de Arriostamiento de Pandeo Restringido para una Estructura de Acero y su Comparación con el Desempeño de una Estructura de Acero sin Diagonales y con Diagonales" proyecto de titulación, Universidad Estatal Península de Santa Elena, La Libertad, Ecuador. (2021)
- [7] Caracterización experimental de riostras de pandeo restringido a escala sometidas a cargas cíclicas, Román Cancelado. 2019
- [8] D. Galarza, "Evaluación del Desempeño Sísmico del Edificio de la Ocus Mediante Comparación del Análisis estático no Lineal (Pushover), Análisis estático Modal (Pushover Multimodal) y Dinámico No-Lineal (Historia de Respuesta)" Proyecto de titulación, Universidad Técnica de Ambato, Ambato, Ecuador. 2019
- [9] Tedi Perú, "Prediseño de Disipadores Shear Link Bozzo para la Protección sísmica de Edificios", 19 de oct. de 2021 [video en línea]. Disponible en <https://www.youtube.com/watch?v=6FfsSSqeJDQ&t=7858s>
- [10] K. Yaguana, B. Borja, D. Guerrero "Análisis de vibración por acción de caminado en Edificios Metálicos Empleando Pórticos Resistencias a Momento" Proyecto de titulación, Universidad Politécnica Salesiana, Quito, Ecuador 2021
- [11] Specification For Structural Steel Buildings ANSI/AISC 360-16
- [12] Análisis y diseño utilizado disipadores sísmicos tipo SLB, Luis Bozzo Estructuras y Proyectos S.I. 2019
- [13] J. Avecillas, "Análisis de Factibilidad de la Implementación de Riostras de Pandeo Restringido Como Dispositivos Disipadores de Energía" Proyecto de titulación, Universidad de Cuenca, Cuenca, Ecuador. 2015
- [14] M. Aguaguiña, "Análisis y Diseño Sísmico de Edificios Altos de Construcción Compuesta y Recomendaciones de Estudios Experimentales de Conexiones, Arriostamientos y Cruciformes Sujetos a Cargas Dinámicas, para la Ciudad de Guayaquil" Proyecto de titulación, Escuela Superior Politécnica del Litoral, Guayaquil, Ecuador. 2015
- [15] Arriostamientos Restringidos por Pandeo Star Seismic™ en el Software de Diseño Integrado de Edificios ETABS, Star seismic, 2003
- [16] J. Gómez, "Pruebas Experimentales en un Marco de Concreto Reforzado Equipado con Disipadores de Energía Sísmica" Proyecto de titulación, Universidad Nacional Autónoma de México, Cd, Mx, México. 2018
- [17] M. Medalla, C. Peña, "Aplicación Industrial de Riostras de Pandeo Restringido Chile" Escuela de ingeniería. 2015

- [18] C. Quispe, "Reforzamiento Sísmico mediante el Uso de Disipadores Histeréticos Tipo Shear Link Bozzo en un Edificio de 14 Niveles en la Ciudad de Lima" Proyecto de titulación, Universidad Ricardo Palma, Lima, Perú 2019
- [19] J. Brito, R. Terán, "Influencia Estructural de Disipadores SLB para Muros Desacoplados en Estructuras de Concreto Armado y Arriostramientos en Estructuras Metálicas" Revista Técnica de la Facultad de Ingeniería vol. 45 N°3
- [20] Sismic Evaluation and Retrofit of Existing Buildings, ASCE/SEI 41-13
- [21] J. Zamora, "Análisis Comparativo del Desempeño Sísmico en Edificios de Hormigón de Mediana Altura Aplicando Riostras de Pandeo Restringido en la Ciudad de Ambato", Proyecto de titulación, Universidad Técnica de Ambato, Ambato, Ecuador. 2021
- [22] Federal Emergency and Management Agency, Prestandard and Commentary for the Seismic Rehabilitation of Building. November
- [23] K. Dunn, "Rehabilitación Estructural de la Facultad de Ingeniería Mediante Aisladores Sísmicos" Proyecto de titulación, Universidad Católica de Santiago de Guayaquil, Guayaquil, Ecuador. 2016
- [24] A. Zabala, "Modelado y Análisis Pushover de la Respuesta Sísmica de Estructuras de Acero" Proyecto de titulación, Universidad Politécnica de Cartagena" Cartagena, Colombia. 2017
- [25] K. Alcántara, C. Nalvarte, "Desempeño Estructural Aplicando la Norma ATC-40 Para el Reforzamiento del Pabellón "Monoblock" del Instituto Nacional de Salud del Niño (Breña-Lima)" Proyecto de titulación, Universidad de San Martín de Porres, Lima, PERÚ. 2016
- [26] D. Alexandra, "Evaluación del Desempeño Sísmico del Edificio de la Ocus Mediante Comparación del Análisis Estático no Lineal (Pushover), Análisis Estático Modal (Pushover Multimodal) y Dinámico No lineal." Proyecto de titulación, Ambato, Ecuador, 2019.
- [27] P. Torres, A. Matango, "Evaluación y Comparación del Reforzamiento de la PUCE Sede Bahía, Mediante la Utilización de Disipadores Tipo Shear-Link Respecto a un Reforzamiento con Muros de Corte" Proyecto de titulación, Escuela Politécnica Nacional, Quito, Ecuador, Oct, 2017.
- [28] C. Saavedra, "Verificación del Cortante Basal Según Covenin 1756-2001" [online]. 2016 Disponible en: <https://saavedraonline.wordpress.com/2016/10/29/verificacion-del-cortante-basal-segun-covenin-1756-2001/>
- [29] S. Fuentes, "Desempeño Sísmico de un Edificio de Cinco Niveles de Concreto Armado Mediante el Análisis de Concreto Armado Mediante el Análisis Estático no Lineal Pushover" Proyecto de Titulación, Universidad Nacional Santiago Antúnez de Mayolo, Perú, 2018.
- [30] H. Bohórquez, "El Punto de Desempeño en Pórticos Resistentes", Slideshare, [online]: Disponible en: <https://es.slideshare.net/habohorquez/el-punto-de-desempeo-en-porticos-resistentes-a>



© 2023 by the authors. Submitted for possible open access publication under the terms and conditions of the Creative Commons Attribution (CC BY) license <http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>