

Structural Behavior of Mid-Rise Essential Facility using base isolators and SLB dissipators

Santiago Aguirre, Bachiller¹, Elio Vidal, Bachiller¹, and Guillermo Huaco PhD PE, Profesor¹
Universidad Peruana de Ciencias Aplicadas, Perú, u201619993@upc.edu.pe, u201523471@upc.edu.pe, pccighua@upc.edu.pe

Abstract - This article consists of analyzing a new high-tech anti-seismic control alternative for the construction of hospitals in Peru, which in its regulations requires the use of base isolation for essential buildings. For this, the structural evaluation of a building constructed with seismic isolators is chosen and the same with the implementation of the SLB (Shear Link Bozzo) energy dissipation system. The results analyzed for each anti-seismic control technique studied are: mezzanine drifts, floor accelerations, energy balance and analysis of plastic hinges, based on the philosophy of continuous functionality. Both seismic protection systems meet Peruvian codes and results are comparable. However energy balance for isolator does not release energy as expected, in the other side SLB system achieves.

Keywords: base isolation, energy dissipation, SLB dissipator, nonlinear time-history analysis, hospital structures.

Digital Object Identifier (DOI):
<http://dx.doi.org/10.18687/LACCEI2021.1.1.466>
ISBN: 978-958-52071-8-9 ISSN: 2414-6390

Comportamiento estructural de una edificación esencial de mediana altura usando aisladores de base y disipadores SLB

Santiago Aguirre, Bachiller¹, Elio Vidal, Bachiller¹, and Guillermo Huaco PhD PE, Profesor¹

¹Universidad Peruana de Ciencias Aplicadas, Perú, u201619993@upc.edu.pe, u201523471@upc.edu.pe, pccighua@upc.edu.pe

Resumen — Este artículo consiste en analizar una nueva alternativa de control antisísmico de alta tecnología para la construcción de hospitales en el Perú, que en su normativa exige el uso de aislamiento de base para edificaciones esenciales. Para ello, se opta por la evaluación estructural de una edificación construida con aisladores sísmicos y la misma con implementación del sistema de disipación de energía SLB (Shear Link Bozzo). Los resultados analizados, para cada técnica estudiada de control antisísmico, son: derivas de entrepiso, aceleraciones de piso, balance energético y análisis de rotulas plásticas, en base a la filosofía de funcionalidad continua. Se encuentra respuestas estructurales semejantes ambos cumpliendo los límites de los códigos de diseño peruanos. Respecto a balance energético los aisladores no cumplen lo esperado en disipación de energía más si los dispositivos SLB.

Palabras clave: aislamiento de base, disipación de energía, disipador SLB, análisis no lineal tiempo-historia, estructuras hospitalarias.

Abstract - This article consists of analyzing a new high-tech anti-seismic control alternative for the construction of hospitals in Peru, which in its regulations requires the use of base isolation for essential buildings. For this, the structural evaluation of a building constructed with seismic isolators is chosen and the same with the implementation of the SLB (Shear Link Bozzo) energy dissipation system. The results analyzed for each anti-seismic control technique studied are: mezzanine drifts, floor accelerations, energy balance and analysis of plastic hinges, based on the philosophy of continuous functionality. Both seismic protection systems meet Peruvian codes and results are comparable. However energy balance for isolator does not release energy as expected, in the other side SLB system achieves.

Keywords: base isolation, energy dissipation, SLB dissipator, nonlinear time-history analysis, hospital structures.

I. INTRODUCCIÓN

El Perú es uno de los países comprendidos entre una de las regiones de más alta actividad sísmica al formar parte del cinturón de fuego del Pacífico, en el cual se produce el 80% de los terremotos y más de la mitad de los tsunamis del mundo. Entre los terremotos más destructivos documentados en los últimos 80 años está el ocurrido en Lima en octubre de 1746 (8.4 Mw), el de Ancash en mayo de 1970 (7.8 Mw), el de Arequipa en junio de 2001 (6.9 Mw) y finalmente el terremoto de Pisco en agosto de 2007

(8.0 Mw). En el caso de los eventos de Arequipa y Pisco, se identificó que varios establecimientos de salud sufrieron daños físicos y algunos incluso llegaron al colapso [1,2]. De manera similar, los terremotos alrededor de todo el mundo han permitido observar la ocurrencia de daños y mal funcionamiento en los centros de salud [3]. Al respecto, se debe tener en cuenta el estudio predictivo sobre un potencial terremoto de 8.8 Mw con consecuencias de tsunamis en Lima [4]. Por lo mencionado, es fundamental que las estructuras esenciales, en específico los establecimientos de salud, sean capaces de resistir tales eventos sísmicos minimizando el daño estructural, no estructural y a los equipos, logrando la funcionalidad continua.

A partir de la actualización del 2016 de la NTP E.030 “Diseño Sismorresistente”, se hace obligatorio el uso del sistema de aisladores para las edificaciones categorizadas según el MINSA como esenciales A1 principalmente en las zonas sísmicas 3 y 4 [5], lo cual sería bueno si no se restringiera únicamente al empleo de esa técnica de control de respuesta sísmica (TCRS). Dicho impedimento, repercute y agrava otros problemas que afrontamos en nuestra realidad a nivel nacional, donde no se da la suficiente investigación técnica, numérica y experimental respecto a otras TCRS, lo cual se refleja en la inexistencia de normativas adicionales a la NTP E.031 “Aislamiento Sísmico”. Así mismo, se crea un monopolio en cuanto a soluciones antisísmicas para la construcción de las edificaciones mencionadas, favoreciendo a las empresas proveedoras de estos dispositivos, dando pie a posibles actos de corrupción.

Una solución óptima, comprobada para el diseño sismorresistente en edificaciones comunes, son los disipadores de energía Shear Link Bozzo (SLB) que han sido incorporados en varios proyectos dentro del Perú y en muchos otros países [6]. Este dispositivo, del cual ya está próximo su cuarta generación, es tecnología peruana desarrollada por el Dr. Luis Bozzo Rotondo, por lo que es de muy fácil acceso y sus precios son mucho menores.

En estudios anteriores, realizan una comparación de respuestas estructurales y costo/beneficio de aisladores frente a riostras restringidas al pandeo (BRB), resultando que los aisladores permiten alcanzar un mejor desempeño y menores costos debido a la reducción de secciones [7]. En otros, determinan el desempeño sísmico de los aisladores

Digital Object Identifier (DOI):
<http://dx.doi.org/10.18687/LACCEI2021.1.1.466>
ISBN: 978-958-52071-8-9 ISSN: 2414-6390

elastoméricos de núcleo de plomo en un bloque hospitalario de dos niveles [8] y un pabellón de cuatro niveles [9], concluyendo ambas que el edificio tendría daño leve en los elementos estructurales y no estructurales luego de un sismo extremo. Respecto a los SLB, en [10] incorporan los SLB en un bloque con irregularidad en planta y elevación de la UFA-ESPE en Ecuador, incrementando el amortiguamiento y consiguiendo derivas menores al 0.25%. En [11] realizan ensayos de los SLB, de los que obtienen el proceso de deformación, el comportamiento de endurecimiento y colapso de estos. Otro estudio, propone la rehabilitación de un hospital en Cuba con SLB [12], permitiendo reducir la interferencia durante la rehabilitación y el tiempo de esta. En Lima, [13] evalúan el reforzamiento de un edificio irregular de 14 niveles que no cumple derivas. Finalmente, se elabora un detallado procedimiento de modelado, diseño y análisis de los disipadores a través de los métodos de iteración directa e iteración inversa o fuerza fija [14]. Es preciso mencionar, que en la literatura se cuenta con numerosas fuentes relacionadas con los distintos sistemas de aisladores (HDR, LDR, FPS, etc.), tanto en las edificaciones esenciales como en comunes, lo cual no ocurre con los SLB.

En atención a lo mencionado, lo que busca la presente investigación es proponer como alternativa la construcción de centros de salud con disipadores SLB y compararlo con el performance estructural de los aisladores de base, los cuales si bien evitando errores en diseño y fabricación presentados en casos pasados y tomando las consideraciones de [15] si lograrían satisfactoriamente la funcionalidad continua de la estructura, no debería ser la única técnica permitida, lo que es contrario a las demás normativas del mundo. A nivel nacional, ninguno de estos centros cuenta con SLB u otros disipadores.

II. DESCRIPCIÓN DE LOS CASOS DE ESTUDIO

La implementación de la propuesta con los disipadores SLB se realiza en una edificación esencial A1 de mediana altura en zona sísmica 4 y tipo de suelo 1 según lo establecido en la NTP E.030 2018. Esta edificación, ya construida, de 3 sótanos y 9 pisos ha sido diseñada con un sistema compuesto de aisladores y deslizadores, de este diseño se parte a realizar el modelo con los disipadores.

III. METODOLOGÍA

Para poder analizar el comportamiento estructural de la edificación con aislamiento de base y sistema de disipación SLB en primer lugar se eligió un hospital construido con la normativa nacional de aislamiento NTP E.031 2019. En segundo lugar, se define los registros sísmicos a elegir según la tipología del suelo del caso estudiado, corrigiéndolos y escalándolos mediante los softwares SeismoSignal y SeismoMatch respectivamente. En tercer lugar, se realiza una modelación con el software ETABS para la edificación construida con sistema de aislamiento y la propuesta con disipadores SLB, realizando los análisis estáticos y dinámicos según normativa NTP E.030 para la comprobación de irregularidades, periodos y modos de

vibración. Para la selección de los dispositivos el plugin DISSIP-SLB [16] que tiene automatizado el método de interacción directa. En cuarto lugar, se lleva a cabo un análisis tiempo historia-no lineal con el método Fast Nonlinear Analysis (FNA) en ambos modelos con los registros proporcionados anteriormente para conseguir las derivas de entrepiso, aceleraciones de piso, balance energético y análisis de rótulas plásticas para definir el nivel de funcionalidad de la edificación siguiendo lineamientos de ASCE 7-14, FEMA P58, ASCE 41-17.

A. Selección de registros sísmicos

Se seleccionaron 7 pares de registros sísmicos, que se aprecian en la Tabla I, en atención a la NTP E.031. Los criterios para la selección de registros fueron principalmente buscar estaciones que estén situados sobre el mismo tipo de suelo, velocidades de propagación de onda de corte dentro de lo dictado en la norma para cada suelo, distancia al epicentro y PGA por encima de 0.1g o 100gals. Solo en pocos casos fue posible verificar el cumplimiento de todos los criterios por falta de información de la estación y del evento sísmico. Cabe mencionar, que, se optó por trabajar con registros sísmicos de Chile, tomando en cuenta que ambos se caracterizan por exhibir altas frecuencias con bajos desplazamientos y por tener el mismo mecanismo de falla por subducción de la Placa tectónica de Nazca con la Placa Sudamericana.

TABLA I
REGISTROS SÍSMICOS SELECCIONADOS

País	Evento Sísmico	Fecha	Dirección	PGA corregido (gal)
P E R Ú	Lima	17/10/1966	N-S	267.85
			E-W	175.42
	Huacho	3/10/1974	N-S	169.37
			E-W	190.36
	Lima	11/09/1974	N-S	88.56
			E-W	109.76
Áncash-Huaraz	31/05/1970	N-S	99.51	
		E-W	104.28	
C H	Illapel	16/09/2015	N-S	286.56
			E-W	343.92
I L E	Iquique	1/04/2014	N-S	573.93
			E-W	496.36
	Maule	27/02/2010	N-S	444.46
			E-W	451.80

B. Tratamiento de registros

Posterior a la selección, los registros han sido corregidos por línea base y filtrado por el software SeismoSignal para eliminar las frecuencias posiblemente ocasionadas por ruido o por otro tipo de vibración ajeno al movimiento sísmico, esto debido a que el acelerógrafo es un instrumento de alta sensibilidad. Luego, se decidió llevar a cabo el recorte de los 7 pares obteniendo la duración significativa acumulada

(desde el 5% al 95%) con el empleo de la Intensidad de Arias, esto debido a la extensión de los registros y para reducir el tiempo computacional que demanda el análisis no lineal. Finalmente, se utiliza la técnica del Spectral Matching, para escalar los registros al espectro normativo por medio del software SeismoMatch. El resumen de coeficientes sísmicos y el espectro de respuesta inelástico se muestran en la Tabla II y Fig. 1, respectivamente.

TABLA II
COEFICIENTES SÍSMICOS PARA ELABORACIÓN DE ESPECTRO

Coefficiente sísmico	Valor
Z	0.45
U	1.00
S	1.00
Ro	1
Ia	1
Ip	1
R	1
Tp	0.4
Tl	2.5

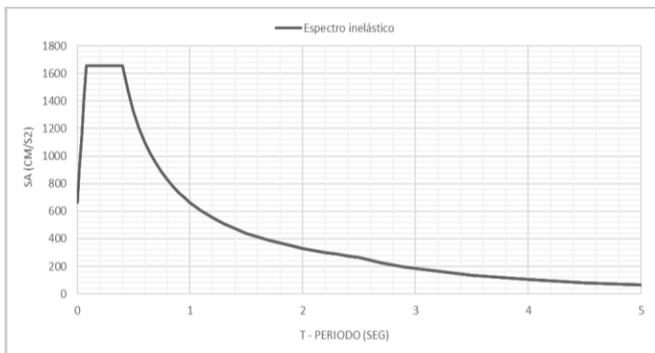


Fig. 1 Espectro de respuesta inelástico según NTP E.030.

C. Modelado y análisis de casos

Las propiedades mecánicas usadas para el concreto de los elementos estructurales, en el modelo de aisladores y disipadores, corresponden a resistencias a la compresión de 280, 350 y 420 kg/cm², con acero de refuerzo A615 Grado 60.

1) Caso con sistema de aislamiento

Al ubicarse el sistema de aislamiento entre el primer y segundo sótano, el modelo computacional de ETABS solamente abarca el modelado de los aisladores y deslizadores sobre los cuales se sitúa el primer sótano más los 9 niveles restantes como se muestra en la Fig. 2.

En el cuadro de columnas del proyecto se especifican 23 tipos de columnas, en su mayoría con secciones de 0.25x0.60m, 0.25x0.75m, 0.30x0.60m y 0.80x0.80m. Con

respecto a las vigas, las secciones predominantes son la de 0.30x0.70m, 0.4x1.0m y 0.30x1.2m, con luces máximas de 8.15cm. Todas las losas del modelo son macizas en su mayoría con espesor de 20cm.

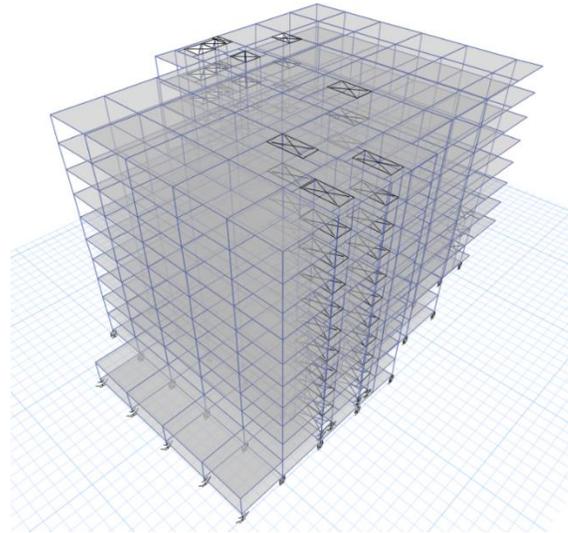


Fig. 2 Modelo tridimensional con base aislada en Etabs v18.

La ubicación de los dispositivos y la asignación de cargas de uso se realiza en base a lo indicado en los planos del proyecto, en concordancia con la NTP E.020 "Cargas".

En la Tabla III, se muestra la cantidad y propiedades de los dispositivos usados en el modelo para el sismo máximo esperado (SME):

TABLA III
PROPIEDADES DE AISLADORES Y DESLIZADORES PARA EL SME

Descripción	Etiqueta de identificación				
	AS1	AS2	SL1	SL2	
Cantidad	31	20	18	5	
Dirección	U2 Y U3				
Lineal	Rigidez efectiva "Keff" (Ton/m)	181.21	147.369	23.30	15.20
	Amortiguamiento equivalente ξ (%)	4.2	4.5	63.6	63.6
No Lineal	Pendiente elástica del aislador "K1" (Ton/m)	1691.47	1369.65	45887.5	26348.7
	Fuerza de fluencia "Fy" (Ton)	4.491	3.872	-	-
	Pendiente post-fluencia "k2" (Ton/m)	169.147	136.965	-	-
	Ratio	0.10	0.10	-	-
	Coefficiente de fricción ($v \leq 1\text{mm/s}$)	-	-	0.04	0.04
	Coefficiente de fricción ($v \geq 150\text{mm/s}$)	-	-	0.1	0.1
	Rate parameter	-	-	0.6	0.6
	Radio de curvatura	-	-	0	0
Dirección	U1				
Rigidez vertical "kv" (Ton/m)	300000	254000			

Del análisis modal-espectral se obtuvo que los periodos fundamentales de vibración para la estructura con base fija es de 2.009s y con la base aislada se incrementó a 3.955s, este último es el que se utiliza para escalar los registros en el intervalo de 0.2T y 1.25T como lo establece la NTP E.031.

2) Caso con disipadores SLB

Este modelo se realizó considerando que ya no existiría un nivel de aislamiento, por ende, el sótano que pertenecía a la superestructura pasaría a estar confinado por el terreno y moverse con este, por ello el modelo lo constituyen los 9 niveles restante como se presenta en la Fig. 3.

En este caso para poder lograr una edificación competente se realizó cambios de sección en los elementos estructurales, las columnas de 0.80x0.80m se cambiaron por secciones de 1.00x1.00m y en el caso de las vigas de 0.30x0.70m se redujo a dimensiones de 0.25x0.50m, se usaron muros desacoplados con espesor de 0.15m y 0.20m con resistencias a la compresión de 350kg/cm², los paños de losas no sufren alteraciones en sus dimensiones, por lo que las longitudes de eje a eje de viga se mantienen igual que el proyecto original.

Las cargas asignadas se mantienen igual que al modelo con aisladores. Los disipadores se ubican en los pórticos donde se tenga menor interferencia con el diseño original y donde se pueda conseguir una mejor distribución de fuerzas cortantes, a fin de que los disipadores reciban gran parte de esta y así mejorar el comportamiento de la estructura.

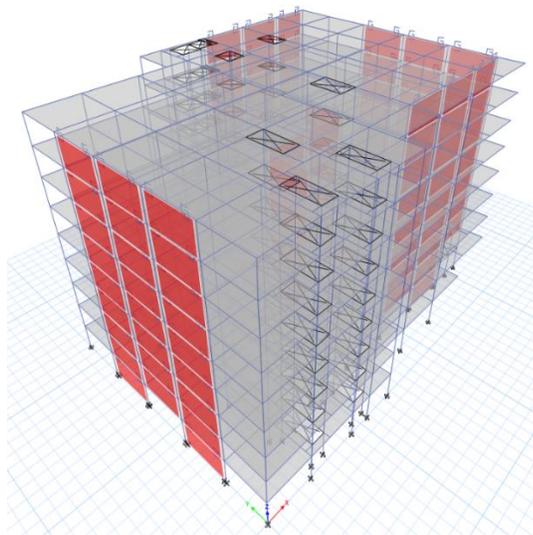


Fig. 3 Modelo tridimensional con disipadores SLB en Etabs v18.

El proceso de selección de dispositivos se llevó a cabo según lo descrito en [6] y [14] para el método de iteración directa, el cual se realiza con el análisis modal-espectral y se verifica con el no lineal tiempo-historia. Es importante mencionar que se verificó: demanda/capacidad menor a 1.5, capacidad de corte de los muros desacoplados según el ACI 318-19, desplazamiento de dispositivos menores a 30mm o 35mm pues se produciría la rotura o agotamiento de estos.

En la Tabla IV, se muestra la cantidad y propiedades de los dispositivos de disipación SLB empleados en este modelo:

TABLA IV
DISPOSITIVOS RESULTANTES DEL PROCESO DE ITERACIÓN

Disipadores	Cantidad	K1 (kN/cm)	K2 (kN/cm)	Fy (kN)
2xSLB3 25_8	6	14382.84	114.57	861.40
2xSLB3 30_7	14	16212.14	253.84	922.60
2xSLB3 30_8	18	17680.00	271.96	1016.00
2xSLB3 40_6	7	19686.00	299.84	1057.40
SLB2 15_4	8	2290.27	42.03	149.70
SLB2 20_4	19	3105.53	53.03	188.30
SLB2 20_5	2	3520.20	58.63	218.40
SLB3 25_3	11	4046.67	70.69	238.20
SLB3 25_4	8	4783.20	81.04	279.60
SLB3 25_5	4	5447.47	90.85	319.00
SLB3 25_6	10	6064.13	99.65	357.10
SLB3 25_7	6	6644.13	107.41	394.50
SLB3 25_8	8	7191.47	114.57	430.70
SLB3 30_7	16	8106.07	126.92	461.30
SLB3 30_8	17	8840.00	135.98	508.00
SLB3 40_6	8	9843.00	149.92	528.70
SLB3 40_7	21	10988.00	165.19	595.40
SLB3 40_8	40	12091.27	179.81	660.90
SLB3 50_6	1	12328.87	181.80	644.40
SLB3 50_7	19	13844.20	202.03	730.30
SLB3 50_8	25	15312.67	221.80	814.70
Σ	268			

Con la selección y disposición final de los dispositivos, se realiza el análisis modal-espectral para conocer los periodos de la estructura, resultando en un periodo de 1.695s con base fija y una reducción a 0.712s con la incorporación de SLB.

D. Análisis No Lineal Tiempo-Historia

Con los 7 pares de registros escalados se realiza el análisis dinámico no lineal Tiempo-Historia con el método FNA y así obtener derivas, aceleraciones de piso y el balance energético considerando el comportamiento no

lineal de los dispositivos y de los elementos estructurales con sus respectivos refuerzos de acero. Por tal motivo, se asignan rótulas plásticas en base a la norma ASCE 41-17, la cual sugiere que estas deben ser localizadas a una distancia entre 0.4 y 0.5 veces del peralte del elemento estructural. En la presente investigación, las rótulas se asignaron al 5% y al 95% de la longitud del elemento, tanto en vigas como en columnas, con parámetros asignados de forma predefinida por Etabs con las especificaciones de la ASCE 41-13. En vigas, solo se considera que soportan momentos en la dirección longitudinal (M3), mientras que, en columnas las rótulas se configuran como fibras que soportan fuerza axial y momentos en ambas direcciones (P-M2-M3).

Es importante mencionar, que cuando se trabaja con rótulas, el programa ETABS define estados plásticos A, B, C, D y E según la deformación de la sección bajo la carga sísmica que se produce. Así mismo, define otros límites adicionales de IO (Ocupación inmediata), LS (Seguridad de Vida) y CP (Prevención al Colapso), a cada uno de estos se les asigna un color como se podrá apreciar e interpretar en los resultados que se muestran al final de este artículo. Dichos límites se pueden ver en la Fig. 4.

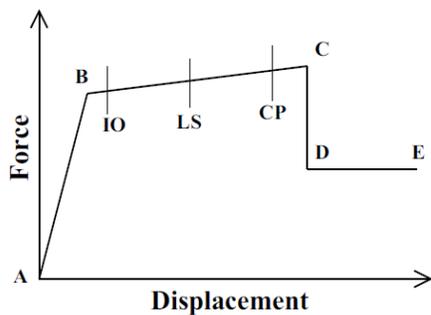


Fig. 4 Estados plásticos de las rótulas según la deformación que presentan

IV. RESULTADOS

Como parte del análisis de los resultados obtenidos las derivas se presentan en las direcciones X e Y de la edificación con sistema de aislamiento y con disipadores SLB, de la misma manera, las aceleraciones máximas promedio por piso empleando el promedio de las 7 señales sísmicas analizadas para ambos casos.

A. Con sistema de aislamiento

Las siguientes figuras muestran las derivas y aceleraciones de la estructura con aislamiento de base. La Fig. 5 muestra las derivas promedio de los 14 casos sísmicos analizados y en la Fig. 6 se aprecian las aceleraciones máximas promedio de estos. Podemos ver que las derivas no exceden el valor límite normativo de 0.005 y las aceleraciones se encuentran por debajo de 0.20g, criterio utilizado para funcionalidad continua [15].

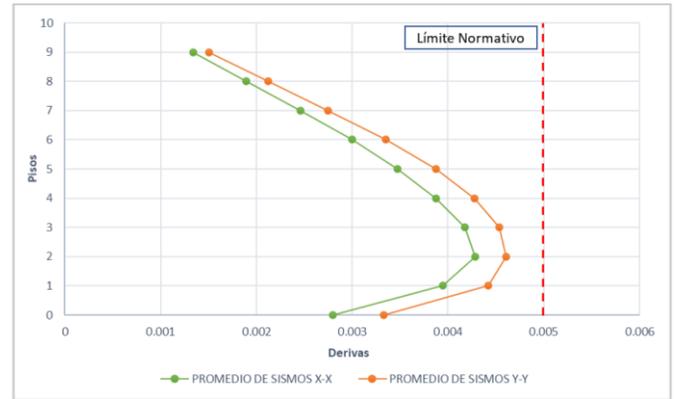


Fig. 5 Derivas promedio por cada piso de todos los registros para estructura aislada.

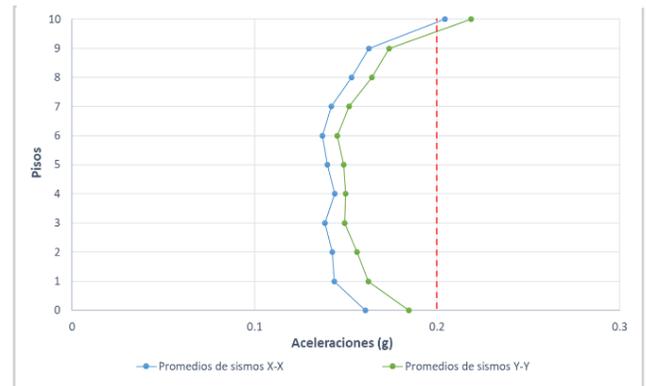


Fig. 6 Aceleraciones promedio por cada piso de todos los registros para estructura aislada.

Para el análisis de las rótulas plásticas se identificó las columnas y vigas con mayores deformaciones, las cuales se dan en el sótano 1. La columna más solicitada tiene un momento máximo de 142 tonf-m, como se aprecia en la Fig. 7, con sección de 80x80cm y $f'c=280\text{kg/cm}^2$, el cual se ubica en la Fig. 8 en la gráfica de momento curvatura y no incursiona en la no linealidad. De manera similar, en la Fig. 9, se visualiza la rótula de viga que resiste un momento máximo de 21.23 tonf-m con sección de 30x70cm y $f'c=280\text{kg/cm}^2$. En el análisis general de la estructura se identifica que todas las rotulas están en un rango por debajo del rango IO por lo que se estaría asegurando la operatividad inmediata de la estructura.

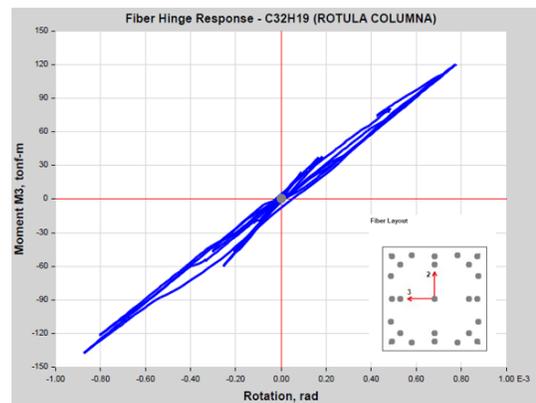


Fig. 7 Respuesta de fibra más crítica en columnas para estructura aislada.

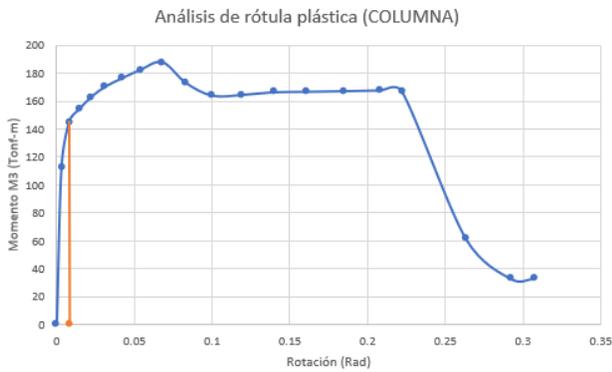


Fig. 8 Momento de curvatura de columna más crítica para estructura aislada.

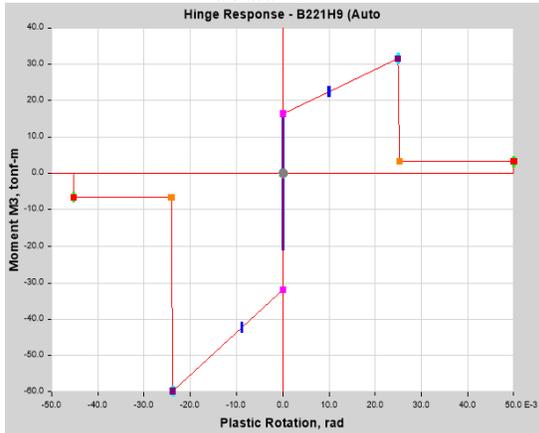


Fig. 9 Rótula más crítica de viga para estructura aislada.

En la Tabla V se puede identificar el balance energético de los 14 casos sísmicos analizados obteniendo un promedio de 40.27% de energía disipada por los aisladores.

TABLA V
BALANCE ENERGÉTICO DE ESTRUCTURA AISLADA

Registros de análisis	E.T (tnf-m)	E.D.A (tnf-m)	%
Caso 1 La Molina 1974	3150	1250	39.68%
Caso 1 Huacho 1974	5950	2513	42.24%
Caso 1 Ancash 1970	4800	1450	30.21%
Caso 1 Lima 1966	4800	1630	33.96%
Caso 1 Plate Boundary 2014	4570	1800	39.39%
Caso 1 El Pedregal 2015	5300	2290	43.21%
Caso 1 Talca 2010	4375	2150	49.14%
Caso 2 La Molina 1974	3148	1270	40.34%
Caso 2 Huacho 1974	5900	2500	42.37%
Caso 2 Ancash 1970	4800	1580	32.92%
Caso 2 Lima 1966	4788	1750	36.55%
Caso 2 Plate Boundary 2014	4600	1900	41.30%
Caso 2 El Pedregal 2015	5450	2350	43.12%
Caso 2 Talca 2010	4393	2166	49.31%
Promedio			40.27%

Nota: Porcentaje de energía disipada por el sistema de aislamiento (E.D.A) respecto a la energía total (E.T) para cada caso.

B. Con disipadores SLB

De manera análoga al caso con aisladores, en la Fig. 10 y Fig. 11 se muestran los valores de derivas y aceleraciones de piso promedio de la estructura con disipación SLB ante los 14 casos sísmicos analizados, respectivamente. Podemos ver que tanto las derivas se encuentran por debajo del límite del código peruano de edificaciones y en tanto las aceleraciones se mantienen entre 0.8g y 1.7g por lo que se debe tener mayor consideración de los equipos móviles en esta edificación.

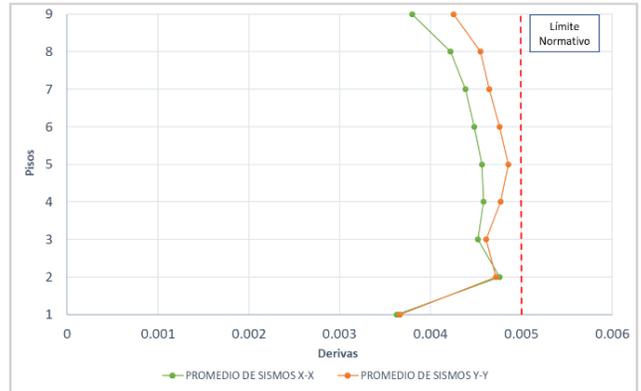


Fig. 10 Derivas promedio por cada piso de todos los registros para estructura con SLB.

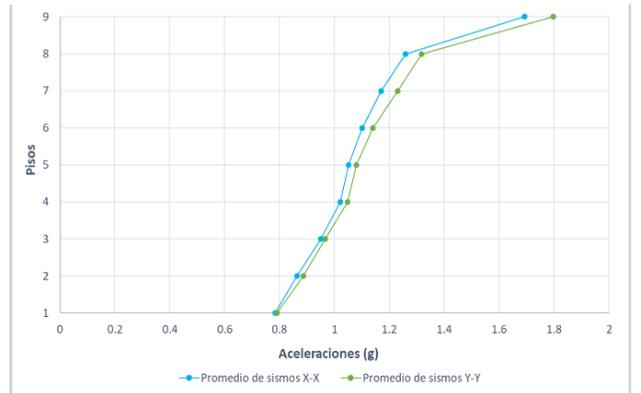


Fig. 11 Aceleraciones promedio por cada piso de todos los registros para estructura con SLB.

columna mas solicitada toma un momento máximo de 418 tonf-m, como se aprecia en la Fig. 12, con sección de 100x100cm y $f'c=280\text{kg/cm}^2$, el cual se ubica en la Fig. 13 en la gráfica de momento curvatura un poco por encima de su resistencia, por lo que entra al rango no lineal. En el caso de vigas, la rótula más exigida de la Fig. 14 tiene un momento máximo de 7.533 tonf-m con sección de 25x50cm y $f'c=280\text{kg/cm}^2$. Ambos casos se encuentran en el rango B, sin sobrepasar el nivel de IO. Por tanto, en el análisis general, al determinar que el resto de los elementos estructurales se encuentran por debajo de este último nivel, también se estaría asegurando la operatividad inmediata de la estructura. Adicionalmente, se verifica que ninguno de los dispositivos supera los 30cm de desplazamiento por lo que no sería necesario su reemplazo y/o reparación, teniendo remanente ante posteriores movimientos sísmicos.

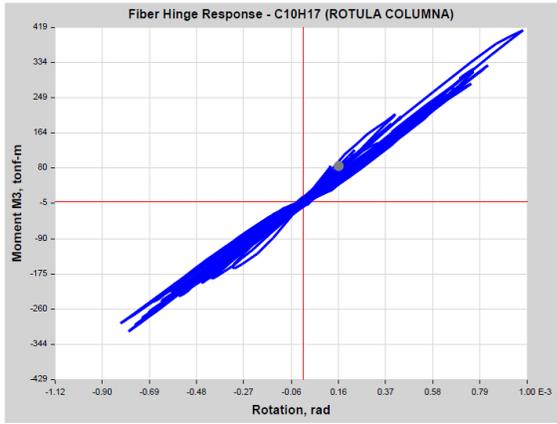


Fig. 12 Respuesta de fibra más crítica en columnas para estructura con SLB.

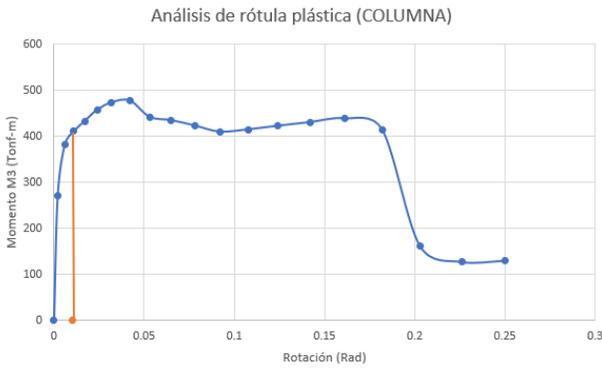


Fig. 13 Momento de curvatura de columna más crítica para estructura con SLB.

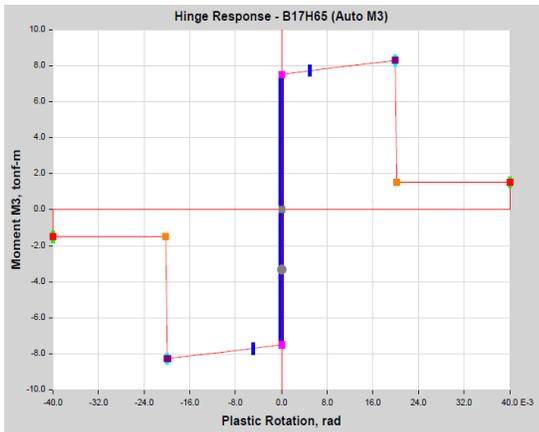


Fig. 14 Rótula más crítica de viga para estructura con SLB.

En la Tabla VI se puede identificar el balance energético de los 14 casos sísmicos analizados obteniendo un promedio de 32.14% de energía disipada por los disipadores SLB.

TABLA VI
BALANCE ENERGÉTICO DE ESTRUCTURA CON SLB

Registros de análisis	E.T (tonf-m)	E.D.D (tonf-m)	%
Caso 1 La Molina 1974	11027	3501	31.75%
Caso 1 Huacho 1974	19899	6653	33.43%
Caso 1 Ancash 1970	15348	4887	31.84%
Caso 1 Lima 1966	7875	2295	29.14%
Caso 1 Plate Boundary 2014	11078	3521	31.78%
Caso 1 El Pedregal 2015	12901	4211	32.64%
Caso 1 Talca 2010	17692	6106	34.51%
Caso 2 La Molina 1974	11048	3518	31.84%
Caso 2 Huacho 1974	20104	6703	33.34%
Caso 2 Ancash 1970	15537	4927	31.71%
Caso 2 Lima 1966	8107	2358	29.09%
Caso 2 Plate Boundary 2014	10966	3496	31.88%
Caso 2 El Pedregal 2015	12842	4174	32.50%
Caso 2 Talca 2010	17858	6171	34.56%
Promedio			32.14%

Nota: Porcentaje de disipación de energía de los disipadores SLB (E.D.D) respecto a la energía total (E.T) para cada caso.

V. CONCLUSIONES

Tanto el sistema de aislamiento como el de disipación con SLB, en ambos hospitales se logra obtener un rango de operatividad inmediata ya que por el análisis de rotulas plásticas todas se mantienen debajo del rango de IO, incluso muchos por debajo del estado límite B (fluencia).

Solo en el caso del hospital INEN con sistema SLB se forman 4 rotulas en las columnas que entran al rango IO, pero al ser estas en poca cantidad se espera que la estructura en general se mantenga en un rango operacional.

En cuanto a la disipación de energía, en base a la literatura, los porcentajes obtenidos para el sistema aislado se encuentran debajo de lo esperado que suele oscilar entre un 65% y 85%, lo cual conlleva a mayores solicitaciones para la estructura, pudiéndose atribuir a su característica de perdida de efectividad en edificios de mediana altura, a pesar de cumplir satisfactoriamente en los demás resultados. De forma contraria, el porcentaje disipado por los SLB si se encuentra dentro del 30% y 60% que suelen tomar estos dispositivos, teniendo en cuenta que por mecanismo o naturaleza de esta TCRS es natural que la estructura reciba una parte considerable de la energía total.

Se logra verificar la eficiencia de los disipadores SLB para el control de derivas, pero se hace necesario llevar a cabo un plan de contingencia para el diseño de los equipos móviles que se verían afectados por el aumento de rigidez de la estructura que influencia en las aceleraciones de piso. La Organización Panamericana de la Salud (OPS) en su libro "Fundamentos para la mitigación de desastres en

establecimientos de salud” propone algunas alternativas para tal fin.

VI. RECOMENDACIONES

Dado los resultados del estudio, una combinación de aislamiento de piso, que teóricamente es mejor al aislamiento de base ya que controla los 3 componentes de movimiento, junto con los disipadores SLB se podría lograr la combinación de los factores más destacables de estas técnicas; conllevando a tener una estructura altamente económica, competente estructuralmente y con bajas aceleraciones de piso que no repercuta a un daño considerable de los equipos móviles en las estructuras esenciales.

Para el recorte de registros, como alternativa a lo realizado en esta tesis, se podría recortar preferentemente al final del registro y no al inicio pues se afecta la respuesta no lineal. En este caso, se puede emplear la Intensidad de Arias para recortar al final y para el inicio usar la técnica del “Time Taper”.

Si se cuenta con el tiempo y el equipo computacional adecuado se recomienda optar por el empleo del Método de Integración Directa No lineal Tiempo-Historia que proporcionan los softwares estructurales, permitiendo tener resultados más precisos, al simular todos los comportamientos inelásticos de los materiales.

REFERENCIAS

- [1] OPS, Terremoto de Pisco-Perú. A Dos Años del Sismo, Crónica y Lecciones Aprendidas en el Sector Salud, Organización Panamericana de la Salud, Lima, PER, 2010.
- [2] Elnashai, A., Alva-Hurtado, J., Pineda, O., Kwon, O. S., Moran-Yanez, L., Huaco, G., & Pluta, G. (2008). The Pisco-Chincha Earthquake of August 15 2007. No. 08-01, <http://hdl.handle.net/2142/9460>
- [3] Achour, N., Miyajima, M., Kitaura, M., & Price, A. (2011). Earthquake-Induced Structural and Nonstructural Damage in Hospitals. *Earthquake Spectra*, 27(3), 617–634. <https://doi.org/10.1193/1.3604815>.
- [4] H. Tavera, “Actualización del escenario por sismo, tsunamis y exposición en la región central del Perú,” *Cenepred*, pp. 1–26, 2017.
- [5] MVCS (2018). Norma Técnica E.030 Diseño Sismorresistente. Lima – Perú.
- [6] Bozzo, L., Ramirez, J., Muñoz, E., Gonzales, H. & Medina, M. (2019). Manual SLB Devices Dic19. Barcelona, España.
- [7] Ruiz C., Torres A. (2018). *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*. (Tesis de pregrado, Universidad Técnica de Ambato, Facultad de Ingeniería Civil y Mecánica. Ambato, Ecuador).
- [8] Del Rosario, M. (2018). *Desempeño sísmico de aisladores: Estudio de un hospital de concreto armado*. (Tesis de pregrado, Pontificia Universidad Católica del Perú, Facultad de Ciencias e Ingeniería. Lima, Perú).
- [9] Zanelli, C., Mercedes P. (2019). *Diseño estructural de un pabellón de hospital con aisladores sísmicos*. (Tesis de pregrado, Pontificia Universidad Católica del Perú, Facultad de Ciencias e Ingeniería. Lima, Perú).
- [10] Aguiar, R., Bozzo, L., Coyago, H., & Andino, C. (2016). Análisis sísmico de bloque estructural 4 de UFA-ESPE con disipadores de energía Shear Link Bozzo. *Ciencia*, 18(2).
- [11] Nuzzo, I., Losanno, D., Caterino, N., Serino, G., & Bozzo Rotondo, L. M. (2018). Experimental and analytical characterization of steel shear links for seismic energy dissipation. *Engineering Structures*, 172, 405–418. doi: 10.1016/j.engstruct.2018.06.005
- [12] Quispe, C., García, U. (2019). Reforzamiento sísmico mediante el uso de disipadores histeréticos tipo Shear Link Bozzo en un edificio de 14 niveles en la ciudad de Lima. (Tesis de pregrado, Universidad Ricardo Palma, Facultad de Ingeniería. Lima, Perú).
- [13] Valdés, V., Pupo, D., Fernández, R., Martínez, R. and Recarey, C. (2019) New Proposal for Seismic Rehabilitation of Hospitals in Cuba. *Open Access Library Journal*, 6, 1-5. doi: 10.4236/oalib.1105825.
- [14] Bozzo, L., Gonzales, H., Pantoja, M., Muñoz, E. & Ramirez, J. (2019). Modeling, analysis and seismic design of structures using energy dissipators SLB. *Tecnia*, 29(2), 81-90. <https://dx.doi.org/10.21754/tecnia.v29i2.713>
- [15] Zayas, V. (2017). Estándar de Aislamiento Sísmico para la Funcionalidad Continua. *I Congreso Internacional de Estructuras de Edificación, Lima-Perú*.
- [16] Muñoz, E., (2019). Plugin para diseño de edificios con disipadores SLB. Lima-Perú.