

Estudio sobre la respuesta sísmica de un edificio con aisladores sísmicos de base

Wilfredo Bonilla-García, BSCE
Maestría en Ingeniería en Ingeniería Civil
Héctor J. Cruzado, PhD
Departamento de Ingeniería Civil, Ingeniería Ambiental y Agrimensura
Universidad Politécnica de Puerto Rico

Resumen — *El aislamiento sísmico es una técnica que se ha utilizado en todo el mundo para proteger la construcción de estructuras, componentes no estructurales y contenidos de los efectos dañinos que causan los terremotos. Por lo general, esta técnica ha sido implementada en estructuras esenciales en zonas de alta incidencia sísmica y los resultados han sido satisfactorios. En este proyecto se estudió el comportamiento de un edificio, destinado a un hospital, sujeto a acciones sísmicas y se comparó su respuesta utilizando el método de diseño convencional y la metodología del aislamiento sísmico. Para el sistema de aislación sísmico se consideraron aisladores de base de goma con núcleo de plomo (LRB) y aisladores de goma de bajo amortiguamiento (LDRB). Para los casos estudiados, se compararon los periodos y la participación modal para los modos de vibración, el cortante basal generado para cada espectro de respuesta (DBE y MCE), los desplazamientos máximos de piso y desplazamientos relativos entre pisos, y las aceleraciones máximas de piso. En los resultados obtenidos se observó un incremento en el periodo fundamental de la estructura aislada para los primeros tres modos de vibración. Además, se observó una reducción en los desplazamientos relativos entre pisos, en las aceleraciones y cortante basal de la estructura aislada.*

Palabras claves — *Aislamiento de Base, Aisladores de Goma con Núcleo de Plomo, Aislamiento Sísmico, Reducción en la Demanda Sísmica.*

INTRODUCCIÓN

Durante sismos severos, las edificaciones pueden experimentar altas aceleraciones, esfuerzos y deformaciones, produciendo daños excesivos en

ésta. Evidencia de ello puede verse a través de la historia del mundo.

Hoy en día, en muchos proyectos de ingeniería, se utilizan técnicas modernas para controlar los efectos de los terremotos, entre ellas se destacan los sistemas de aislamiento de base. Estos sistemas modifican las características dinámicas de una estructura, reduciendo la demanda sísmica. Usualmente son implementados en regiones sísmicas para proteger estructuras importantes o que deban cumplir funciones esenciales después de ocurrido el terremoto. Entre los países que han implementado esta técnica, tanto en edificios como en puentes, se destacan Japón, Estados Unidos, Italia y Nueva Zelanda. Sin embargo, también existen proyectos de menor costo para viviendas económicas de los cuales hay casos construidos en Chile y China, entre otros.

En Puerto Rico, es de conocimiento general que la isla es propensa a movimientos sísmicos considerables. Sin embargo, el tema de aislación sísmica no es uno de discusión actualmente en el ámbito de la ingeniería.

Objetivos

El objetivo principal de este proyecto es evaluar y aplicar los últimos avances en relación al análisis y diseño de estructuras que sean capaces de resistir un sismo de gran intensidad y, luego de éste, seguir siendo operable sin daños mayores.

Los objetivos específicos de este proyecto son los siguientes:

- Estudiar y presentar los conceptos teóricos del diseño de estructuras implementando sistemas de aislamiento sísmico de base.
- Diseñar un sistema de aislamiento sísmico de base, evaluar un edificio con aisladores y compararlo con una estructura convencional.

- Generar una guía para futuros proyectos relacionados al tema de estudio.

METODOLOGÍA

Para llevar a cabo los objetivos de este proyecto, se determinó analizar y diseñar un edificio en hormigón armado destinado a un hospital. El edificio fue diseñado bajo dos filosofías distintas: método de diseño convencional y metodología de aislamiento sísmico. A continuación, en términos generales, se presentan los pasos seguidos para completar el proyecto.

- Análisis y diseño del edificio sin aislamiento sísmico: El edificio bajo estudio fue analizado y diseñado siguiendo los procedimientos y las recomendaciones para métodos convencionales de diseño de hormigón armado [1], [2], [3] y [4].
- Análisis y diseño del sistema de aislamiento sísmico de base: Estos dispositivos fueron diseñados siguiendo los procedimientos y las recomendaciones descritas en las referencias [2], [5], [6], [7], [8] y [9].
- Análisis y diseño del edificio con aislamiento sísmico de base: El edificio provisto de aisladores sísmicos fue analizado y diseñado siguiendo los procedimientos y las recomendaciones descritas en las referencias [2], [5], [6], [7], [8] y [9].
- Análisis comparativo del comportamiento de los edificios bajo estudio.

La modelación, el análisis y diseño de la estructura bajo estudio, se trabajó con el programa SAP2000 v14 [10]. Además, se utilizaron hojas de cálculos para diseños y corroboración de resultados.

SISTEMA DE PROTECCIÓN SÍSMICA

Han pasado cerca de tres décadas desde que las técnicas de control de respuesta sísmica empezaron a ser ampliamente implementadas en las estructuras civiles con el propósito de reducir o controlar los daños producidos por eventos sísmicos.

En términos generales, los sistemas de control de respuesta sísmica pueden clasificarse en cuatro categorías principales: sistemas pasivos, sistemas activos, sistemas híbridos y sistemas semi-activos. Los sistemas de control pasivo se basan en elementos que responden de forma inercial a la acción sísmica. Estos sistemas en particular, no precisan de aporte energético para su funcionamiento. Los sistemas activos, híbridos y semi-activos están formados por actuadores de fuerza y/o elementos pasivos, con controladores a tiempo real y dispositivos a base de sensores instalados en la estructura.

Sistema de Aislación para el Caso de Estudio

En el presente trabajo se eligió estudiar un sistema de protección pasivo, en particular el sistema de aislamiento sísmico de base. Este sistema ha sido ampliamente investigado y probado en laboratorios y ha demostrado ser muy efectivo en sus aplicaciones.

Los sistemas de aislamiento sísmico de base se clasifican básicamente en dos tipos: base flexible y base deslizante. Para el caso de estudio se consideró un sistema de base flexible. Entre estos se determinó utilizar como dispositivo principal un aislador de goma con núcleo de plomo. Estos aisladores tienen una gran rigidez en la dirección vertical, pero son flexibles en la dirección horizontal. Entre sus características se menciona que la relación de la deformación lateral entre el espesor de la lámina de goma alcanza niveles de hasta el 200%, existe una relación lineal entre el cortante y la deformación lateral, y el amortiguamiento varía entre 15% y 35% [8]. En la Figura 1 se ilustra el esquema de un aislador de base flexible.



Figura 1

Aislador Sísmico de Base Flexible [11]

Concepto del Aislamiento Sísmico

El aislamiento sísmico es una estrategia de diseño basada en la premisa de que es posible separar una estructura de los movimientos del suelo mediante la introducción de elementos flexibles entre la estructura y su fundación. Los aisladores reducen notablemente la rigidez del sistema estructural, haciendo que el periodo fundamental de la estructura aislada sea mucho mayor en comparación con el de la misma estructura con base fija [5].

En la Figura 2 se ilustra una comparación de la respuesta sísmica para un edificio con base fija y otro aislado sísmicamente en la base. En esta figura se puede observar que para el edificio sin aislación, al tener su base rígida, el edificio oscila curvando la estructura y provocando así daños en los materiales que posee. Mientras que para el edificio con aisladores se puede observar que este tiende a quedarse quieto al estar suspendido sobre los aisladores y separado de su entorno, que se mueve horizontalmente.

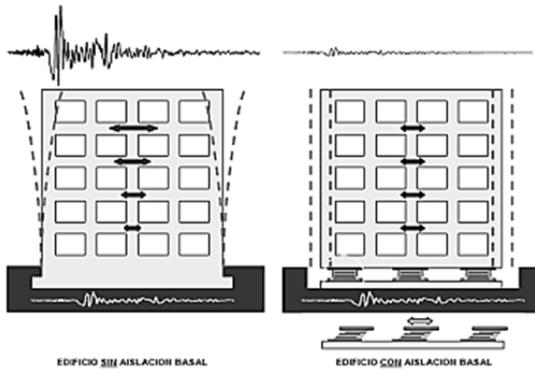


Figura 2

Efecto del Aislamiento Sísmico de Base [12]

El sistema de aislamiento basal es mayormente recomendado en estructuras rígidas sobre terrenos firmes. Una de las situaciones principales en la aplicación de este sistema en estructuras con una elevada altura en relación a su ancho, son los elevados momentos de vuelco que pueden suponer la pérdida de equilibrio. Además, al incrementarse la altura las ventajas obtenidas con el aislamiento disminuyen, ya que el periodo de vibración fundamental aumenta.

Modelo Matemático de los Aisladores de Base

El análisis de estructuras aisladas considerando aisladores de base se realiza como un sistema bilineal. El modelo bilineal, usado para expresar la relación entre la fuerza cortante y el desplazamiento lateral, puede definirse por tres parámetros básicos: Rigidez Elástica, k_e , Rigidez Post-fluencia, k_p , y la Fuerza Característica, Q . Estos tres parámetros reflejan adecuadamente las características mecánicas de los aisladores de una forma simple y suministra una estimación satisfactoria del comportamiento no lineal de un aislador. En la Figura 3 se ilustra un modelo bilineal idealizado. A partir del mismo se desarrollan las ecuaciones descritas a continuación.

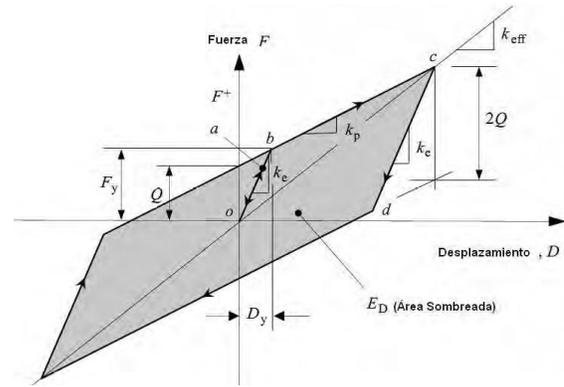


Figura 3

Modelo Bilineal de una Unidad de Aislamiento [8]

La rigidez efectiva k_{eff} , en la región de post-fluencia puede ser expresada en términos de la rigidez post-fluencia k_p y la fuerza característica Q con el correspondiente desplazamiento lateral D de esta manera se tiene:

$$k_{eff} = k_p + \frac{Q}{D} \quad (1)$$

El desplazamiento de fluencia D_y , también se deriva de k_p , k_e , y Q :

$$D_y = \frac{Q}{k_e - k_p} \quad (2)$$

La fuerza de fluencia F_y , en el desplazamiento de fluencia D_y , se determina a través de la siguiente ecuación:

$$F_y = Q + k_p D_y \quad (3)$$

El amortiguamiento efectivo β_{eff} se define como:

$$\beta_{eff} = \frac{E_D}{2\pi k_{eff} D^2} \quad (4)$$

Definimos E_D como la energía disipada por ciclo. E_D es considerada como el área del ciclo de histéresis, limitada por el desplazamiento lateral $-D$ y $+D$ en cada ciclo.

$$E_D = 4Q \times (D - D_y) \quad (5)$$

Sustituyendo (5) en (4), obtenemos la siguiente ecuación:

$$\beta_{eff} = \frac{4Q(D - D_y)}{2\pi k_{eff} D^2} = \frac{2Q(D - D_y)}{\pi k_{eff} D^2} \quad (6)$$

Características Mecánicas de los Aisladores de Base con Núcleo de Plomo

La fuerza característica Q de los aisladores con núcleo de plomo es controlada principalmente por la fuerza cortante del núcleo de plomo. El cortante de fluencia ocurre en el núcleo de plomo a bajos niveles de esfuerzo cortante. Sin embargo, el comportamiento histérico del aislador es bastante estable, inclusive cuando este es sometido a muchos ciclos de carga [8].

La siguiente ecuación muestra la relación que existe entre la fuerza característica Q y el producto del esfuerzo de fluencia f_{y1} del plomo por el área de plomo A_1 , este dato es característico para el aislador con núcleo de plomo:

$$Q = A_1 f_{y1} \quad (7)$$

La rigidez post-fluencia k_p puede describirse a través de la siguiente ecuación:

$$k_p = \frac{A_b G_f L}{b t} \quad (8)$$

Donde: A_b es el área de la goma, t es el grosor total de la goma, f_L es 1.5 y G es el módulo de cortante tangente de la goma (este se determina a través de pruebas dinámicas de cortante).

La rigidez elástica k_e no es fácil de calcular, pero a través de la siguiente ecuación empírica se puede obtener un valor que es aceptable. La rigidez elástica se define como un múltiplo de la rigidez post-fluencia, esto se puede escribir como $k_e = x k_p$, siendo x un valor entre 6.5 y 10. Por lo tanto:

$$6.5 k_p \leq k_e \leq 10 k_p \quad (9)$$

En base a esta condición podemos conocer el desplazamiento de fluencia D_y sustituyendo los valores encontrados en (2), obtenemos la siguiente ecuación:

$$D_y = \frac{Q}{(x-1)k_p} \quad (10)$$

Sustituyendo los datos encontrados hasta el momento en (6) podemos encontrar el amortiguamiento efectivo para un aislador con núcleo de plomo:

$$\beta_{eff} = \frac{2Q[(x-1)k_p D - Q]}{\pi(x-1)k_p (k_p D + Q)D} \quad (11)$$

Con estas características se puede establecer un modelo bilineal y puede ser usado para realizar un análisis no lineal de la estructura que utiliza aisladores con núcleos de plomo.

ANÁLISIS Y DISEÑO DE UN EDIFICIO SIN AISLAMIENTO SÍSMICO

Esta sección presenta los criterios para la estructura convencional del caso de estudio.

Descripción del Edificio y Sistema Estructural

El edificio bajo estudio fue asumido para ser localizado en la ciudad de Ponce, Puerto Rico. El mismo consta de 7 niveles de altura, un nivel soterrado y está destinado a ser un hospital. Posee una planta rectangular de 175-ft x 125-ft, con 8 ejes

en la dirección longitudinal y 6 ejes en la dirección transversal. El edificio tiene dos escaleras y cuatro ascensores públicos, más cuatro ascensores de carga.

El sistema estructural resistente a fuerzas laterales consiste de pórticos especiales resistentes a momento de hormigón armado en ambas direcciones. Las secciones consideradas para vigas son de sección 24 x 26 in². Las columnas en los primeros dos niveles son de sección 26 x 26 in² y las restantes columnas son de sección 24 x 24 in², con una altura típica entre pisos de 12 ft. Las losas estructurales de piso constan de 8 in de espesor. Además, se ubicaron paredes de hormigón armado de 8 in de espesor en las zonas donde se encuentran las escaleras y ascensores. En la Figura 4 se ilustra la planta típica de piso para el caso de estudio.

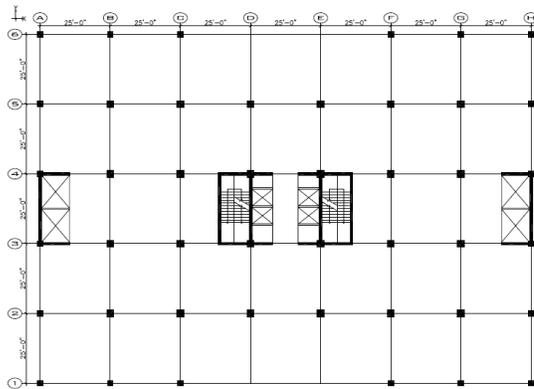


Figura 4
Planta Típica para el Caso de Estudio

Análisis y Diseño del Edificio Convencional

El edificio bajo estudio fue analizado y diseñado siguiendo los procedimientos y las recomendaciones para métodos convencionales de diseño [1], [2], [3] y [4].

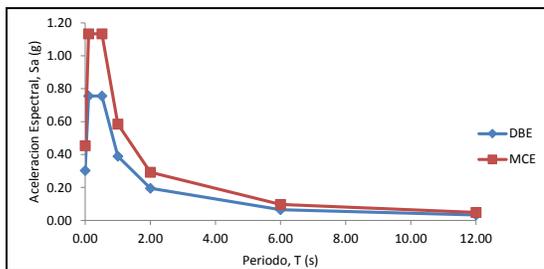


Figura 5
Espectros de Respuesta

La Figura 5 ilustra el espectro de respuesta de diseño y espectro de respuesta para el sismo máximo considerable aplicados en el análisis dinámico.

ANÁLISIS Y DISEÑO DE UN EDIFICIO CON AISLAMIENTO SÍSMICO

Esta sección presenta los criterios de análisis y diseño para el edificio bajo estudio provisto de aisladores sísmicos de base.

Descripción del Edificio y Sistema Estructural

Para la estructura aislada se consideraron las mismas características que para la estructura convencional. La diferencia estriba en el sistema de aislación sísmico y sus componentes.

El sistema de aislación propuesto consiste de dos tipos de aisladores de base. Se utilizaron aisladores de goma con núcleo de plomo (LRB) en el perímetro de la estructura. Esto para atender los efectos de torsión que puedan generarse. El resto de los dispositivos utilizados consisten en aisladores de goma de bajo amortiguamiento (LDRB).

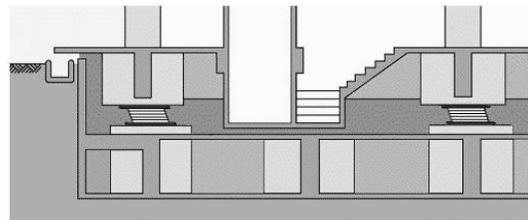


Figura 6
Detalle Conceptual del Sistema de Aislación [13]

Los dispositivos que componen el sistema de aislación fueron situados en la parte superior de las columnas del sótano, de esta manera se provee de un sistema de acceso a los aisladores, para su inspección y posible reemplazo según sea el caso. La configuración estructural contempla un diafragma inmediatamente sobre los aisladores, para permitir que los desplazamientos en los aisladores sean iguales y que las cargas del sismo se distribuyan de acuerdo a su rigidez. Referente a los ascensores y las escaleras, las paredes que componen estas áreas fueron consideradas en el peso de la estructura y no parte del sistema

resistente. Cabe mencionar que las paredes pueden inducir rotaciones importantes a los aisladores. Se recomienda dotar a las vigas sobre los aisladores de suficiente peralte para limitar dichas rotaciones. En la Figura 6 se ilustra un detalle conceptual del sistema.

El sistema de aislación consta de 44 aisladores de base en total. Estos se componen de 16 aisladores con núcleo de plomo y 28 aisladores de bajo amortiguamiento. La configuración en planta de los aisladores se ilustra en la Figura 7.

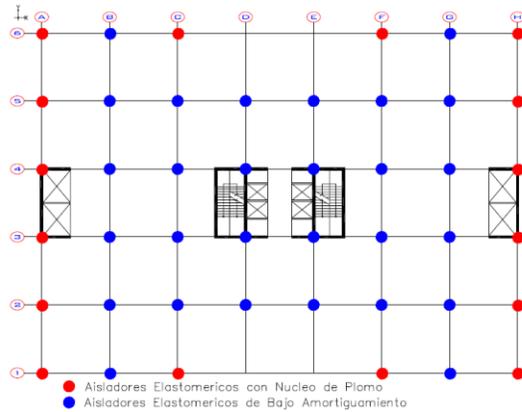


Figura 7

Configuración en Planta de los Aisladores de Base

Parámetros para el Diseño Preliminar basado en el Procedimiento Fuerza Horizontal Equivalente

Este método emplea ecuaciones simples para determinar la respuesta de una estructura aislada. Las ecuaciones se basan en los movimientos del terreno definidos para un periodo de un segundo. A pesar de ser considerado un método lineal de análisis, las ecuaciones incorporan los valores del amortiguamiento para implícitamente contar con las propiedades no lineales del aislador, asumiendo a la superestructura rígida mientras que los desplazamientos principales ocurren en el plano de aislación. Este método es discutido en el ASCE/SEI 7-05 Sección 17.5 [2]. A continuación se presentan las ecuaciones correspondientes para el procedimiento de la fuerza horizontal equivalente.

- Desplazamiento de diseño D_D :

$$D_D = \frac{g S_{DI} T_D}{4\pi^2 B_D} \quad (12)$$

Donde: g es la aceleración de la gravedad; S_{DI} es la aceleración espectral de diseño correspondiente a un amortiguamiento de 5% y un periodo de un segundo; T_D es el periodo efectivo de una estructura sísmicamente aislada, en el desplazamiento de diseño en la dirección de consideración; y B_D es el coeficiente numérico relacionado con el amortiguamiento efectivo del sistema de aislamiento para el desplazamiento de diseño. Este último se obtiene directamente, o por interpolación lineal, del ASCE/SEI 7-05 Tabla 17.5-1 [2].

- Periodo efectivo T_D para el desplazamiento de diseño:

$$T_D = 2\pi \sqrt{\frac{W}{k_{Dmin} g}} \quad (13)$$

Donde: g es la aceleración de la gravedad, k_{Dmin} es la rigidez mínima efectiva del sistema de aislamiento para el desplazamiento de diseño en dirección horizontal y W es el peso sísmico sobre el sistema de aislación.

- Desplazamiento máximo D_M :

$$D_M = \frac{g S_{MI} T_M}{4\pi^2 B_M} \quad (14)$$

Donde: g es la aceleración de la gravedad; S_{MI} es la aceleración espectral de diseño correspondiente a un amortiguamiento de 5% y un periodo de un segundo; T_M es el periodo efectivo de una estructura sísmicamente aislada, en el desplazamiento máximo en la dirección de consideración; y B_M es el coeficiente numérico relacionado con el amortiguamiento efectivo del sistema de aislamiento para el desplazamiento máximo.

- Periodo efectivo T_M para el desplazamiento máximo:

$$T_M = 2\pi \sqrt{\frac{W}{k_{M \min} g}} \quad (15)$$

Donde: g es la aceleración de la gravedad, $k_{M \min}$ es la rigidez mínima efectiva del sistema de aislamiento para el desplazamiento máximo en dirección horizontal y W es el peso sísmico sobre el sistema de aislación.

- Desplazamiento de diseño total D_{TD} :

$$D_{TD} = D_D \left[1 + \frac{12e}{b^2 + d^2} y \right] \quad (16)$$

Donde: D_D es el desplazamiento de diseño en el centro de rigidez del sistema de aislación en dirección bajo consideración; e es la excentricidad horizontal entre el centro de masa de la estructura y su centro de rigidez del sistema de aislación, más la excentricidad accidental, tomada como el 5% de la dimensión más larga de la estructura perpendicular a la dirección en que está considerando la fuerza; y es la distancia entre el centro de rigidez del sistema de aislamiento y el elemento seleccionado, medido perpendicularmente a la dirección en la que fue cargado el sismo que se está considerando; b es la dimensión más pequeña de la estructura medida perpendicular a d ; y d es la dimensión más larga de la estructura.

- Desplazamiento máximo total D_{TM} :

$$D_{TM} = D_M \left[1 + \frac{12e}{b^2 + d^2} y \right] \quad (17)$$

Donde: D_M es el desplazamiento máximo en el centro de rigidez del sistema de aislación en dirección bajo consideración. Para la definición de los demás términos referirse a (16).

- Fuerza lateral de diseño V_b , para elementos estructurales bajo el sistema de aislación:

$$V_b = k_{D \max} D_D \quad (18)$$

Donde: $k_{D \max}$ es la rigidez máxima efectiva en el centro de rigidez del sistema de aislación en la dirección bajo consideración y D_D es el desplazamiento de diseño en el centro de rigidez

del sistema de aislación en dirección bajo consideración.

- Fuerza lateral de diseño V_s , para elementos estructurales sobre el sistema de aislación:

$$V_s = \frac{k_{D \max} D_D}{R_I} \quad (19)$$

Donde: R_I es el coeficiente numérico relacionado con el tipo de sistema de resistencia sísmica sobre el sistema de aislación. Para la definición de los demás términos referirse a (18).

Este coeficiente está limitado a, $1 \leq R_I = \frac{3}{8} R \leq 2$

donde R es el coeficiente de capacidad de disipación de energía.

La fuerza lateral de diseño V_s , no debe ser menor que ninguna de las siguientes condiciones de acuerdo con la Sección 17.5.4.3 del ASCE/SEI 7-05 [2].

1. La fuerza sísmica requerida por la Sección 12.8 del ASCE/SEI 7-05 para una estructura con base empotrada con el mismo peso efectivo, pero con el periodo de la estructura aislada.
 2. El cortante basal debido a la carga de viento.
 3. La fuerza sísmica requerida para activar el sistema de aislamiento multiplicado por 1.5.
- Distribución de la Fuerza lateral:

$$F_x = V_s \frac{w_x h_x}{\sum_i^n w_i h_i} \quad (20)$$

Donde: V_s es la fuerza lateral total de diseño en elementos sobre el sistema de aislación; w_x es el peso correspondiente al nivel x ; h_x es la altura sobre el nivel de la base; w_i es el peso correspondiente al nivel i ; y h_i es la altura sobre el nivel i .

En cuanto a los parámetros para evaluar las derivas, el estándar establece que no debe excederse $0.015h_{sx}$ cuando se emplean el método de la fuerza horizontal equivalente y el procedimiento de espectro de respuesta, mientras que, para el procedimiento de respuesta en el tiempo, el límite es $0.02h_{sx}$. Donde h_{sx} es la altura de piso del nivel x .

Parámetros para Procedimientos Dinámicos

El ASCE/SEI 7-05 [2] establece dos métodos de análisis dinámicos, análisis espectral y el de respuesta en el tiempo. Estos métodos son discutidos en detalle en la Sección 17.6 de dicho estándar. En la Sección 17.6.4, se discuten las restricciones para las fuerzas y desplazamientos laterales calculados mediante un método de análisis dinámico. Estas restricciones están controladas por los valores obtenidos mediante el método de la fuerza horizontal equivalente. La Tabla 1 resume los parámetros mínimos para los procedimientos dinámicos [6]. Respecto a los desplazamientos, el estándar establece las siguientes ecuaciones para determinar los valores mínimos permisibles para el desplazamiento de diseño y el desplazamiento máximo.

- Desplazamiento de diseño total D_{TD} :

$$D_{TD} = \frac{D_D}{\sqrt{1 + \left(\frac{T}{T_D}\right)^2}} \left[1 + \frac{12e}{b^2 + d^2} y \right] \quad (21)$$

- Desplazamiento máximo total D_{TM} :

$$D_{TM} = \frac{D_M}{\sqrt{1 + \left(\frac{T}{T_M}\right)^2}} \left[1 + \frac{12e}{b^2 + d^2} y \right] \quad (22)$$

Donde: T es el periodo de la estructura de base fija, conforme con la Sección 12.8.2 del ASCE/SEI 7-05 [2]. Para la definición de los demás términos referirse a (16) y (17).

Tabla 1
Parámetros Mínimos para Procedimientos Dinámicos

Design Parameter	ELF Procedure	Dynamic Procedure	
		Response Spectrum	Response History
Design displacement - D_D	$D_D = (g/4\pi^2)(S_D T_D / B_D)$	-	-
Total design displacement - D_T	$D_T \geq 1.1 D_D$	$\geq 0.9 D_T$	$\geq 0.9 D_T$
Maximum displacement - D_M	$D_M = (g/4\pi^2)(S_M T_M / B_M)$	-	-
Total maximum displacement - D_{TM}	$D_{TM} \geq 1.1 D_M$	$\geq 0.8 D_{TM}$	$\geq 0.8 D_{TM}$
Design shear - V_S (at or below the isolation system)	$V_S = k_{Dmax} D_D$	$\geq 0.9 V_S$	$\geq 0.9 V_S$
Design shear - V_r (“regular” superstructure)	$V_r = k_{Dmax} D_D / R_f$	$\geq 0.8 V_r$	$\geq 0.6 V_r$
Design shear - V_i (“irregular” superstructure)	$V_i = k_{Dmax} D_D / R_f$	$\geq 1.0 V_i$	$\geq 0.8 V_i$
Drift (calculated using R_f for C_d)	$0.015 h_{cx}$	$0.015 h_{cx}$	$0.020 h_{cx}$

Proceso de Diseño para Aisladores de Base

El diseño de aisladores de base es un proceso iterativo. De acuerdo con las bibliografías consultadas, no existe un método de diseño único. No obstante, las referencias [5], [7], [8] y [9] ofrecen guías que son de gran ayuda para establecer un punto de partida. En nuestro caso, la Tabla 2 ilustra las propiedades de los aisladores utilizados en este proyecto y la Tabla 3 ilustra los parámetros para modelar los mismos en el programa SAP2000 [10]. Las Figuras 8 y 9 ilustran una vista en 3D y 2D respectivamente del modelo en SAP2000.

Tabla 2
Parámetros de Diseño de los Aisladores

Parámetros	Tipo de Aislador	
	LRB	LDRB
Numero de Aisladores	--	16
Diametro de los Aisladores	in	45.5
Diametro del Nucleo de Plomo	in	8
Num. de capas de goma, N	--	17
Grosor de las capas de goma, t	in	0.65
Cantidad de las laminas de acero	--	16
Grosor para las laminas de acero, t_s	in	0.1250
Grosor de las laminas en los extremos (2 capas)	in	1.75
Altura del nucleo de plomo, t_p	in	13.00
Altura total del Aislador, h	in	16.50

Tabla 3
Parámetros para Modelar los Aisladores

Parámetros	Tipo de Aislador	
	LRB	LDRB
Rigidez Vertical por Aislador, K_v	k/in	19,619.5
Rigidez Efectiva, K_{eff}	k/in	12.62
Rigidez en rango elástico, K_e	k/in	108.28
Rigidez en rango plástico, K_p	k/in	10.20
Fuerza de fluencia, F_y	kips	75.35
Amortiguamiento	%	18.27
Relación (K_p/K_e)		0.09

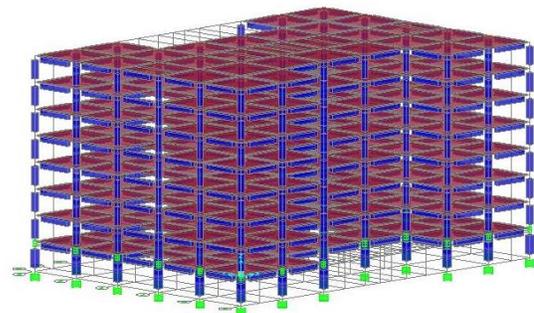


Figura 8
Vista 3D del Caso de Estudio

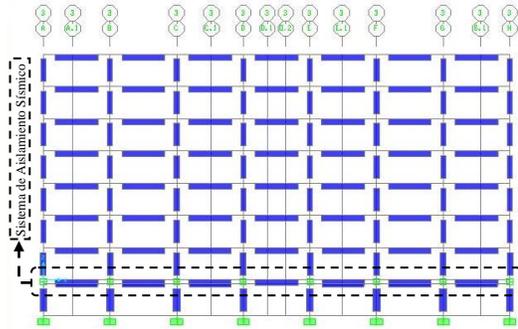


Figura 9
Vista 2D del Eje 3 del Caso de Estudio

ANÁLISIS Y DISCUSIÓN DE RESULTADOS

En las Tablas 4 a la 8 se presentan los resultados obtenidos para los casos de estudio. Estas tablas presentan una comparativa entre los parámetros evaluados.

Tabla 4
Modos de Vibración, Periodo y Participación Modal

Modo de Vibración	Modelo sin Aislación				Modelo con Aislación			
	Periodo	SumUX	SumUY	SumRZ	Periodo	SumUX	SumUY	SumRZ
	Sec	--	--	--	Sec	--	--	--
1	1.267787	0	0.7313	0.3516	2.997801	0	0.9697	0.4658
2	1.243271	0.7324	0.7313	0.5312	2.987339	0.9704	0.9697	0.7049
3	0.420979	0.7324	0.8262	0.5768	2.377269	0.9704	0.9697	0.969
4	0.413883	0.8271	0.8262	0.6	0.456473	0.9704	0.9753	0.9716
5	0.25027	0.8271	0.8631	0.6178	0.349914	0.9752	0.9753	0.9738
6	0.247088	0.8638	0.8631	0.6269	0.183317	0.9752	0.9753	0.9738
7	0.209544	0.8638	0.8631	0.7685	0.090045	0.9752	0.9753	0.9738
8	0.177311	0.8638	0.8804	0.778	0.085039	0.9752	0.9753	0.9738
9	0.175696	0.8808	0.8804	0.7826	0.080472	0.9752	0.9753	0.9738
10	0.156536	0.8808	0.8804	0.7826	0.077635	0.9752	0.9753	0.9738
11	0.136713	0.8808	0.8886	0.7864	0.073415	0.9752	0.9753	0.9738
12	0.136273	0.881	0.8893	0.7864	0.071269	0.9752	0.9753	0.9738
13	0.135909	0.8895	0.8893	0.7885	0.033119	0.9752	0.9753	0.9738
14	0.109966	0.8898	0.891	0.7906	0.02646	0.9752	0.9753	0.9738
15	0.107433	0.8956	0.8944	0.7907	0.026288	0.9752	0.9753	0.9738
16	0.107086	0.8988	0.8988	0.8024	0.025186	0.9752	0.9753	0.9738
17	0.094083	0.8988	0.8988	0.8056	0.023558	0.9752	0.9753	0.9738
18	0.060718	0.8988	0.8988	0.8106	0.022943	0.9752	0.9753	0.9738
19	0.032061	0.8989	0.8989	0.8197	0.020811	0.9752	0.9753	0.9738
20	0.015249	0.8999	0.9792	0.8744	0.019611	0.9752	0.9753	0.9738
21	0.014868	0.9791	0.9804	0.8892	0.018776	0.9752	0.9753	0.9738

Tabla 5
Cortante Basal

Sismo	Modelo sin Aislación				Modelo con Aislación				Reducción			
	Cortante Basal (Kips)				Cortante Basal (Kips)				Cortante Basal (%)			
	X	Y	Fx	Fy	X	Y	Fx	Fy	X	Y	Fx	Fy
DBE	2673	803	2629	1539	1420	437	1432	434	88.24	83.75	83.59	254.61
MCE	4316	1300	4258	1318	2653	814	2678	808	62.68	59.71	59.00	63.12

Tabla 6
Desplazamientos de Piso

Nivel	Modelo sin Aislación		Modelo con Aislación		Incremento	
	Desplazamientos (in)		Desplazamientos (in)		Desplazamientos (%)	
	X	Y	X	Y	X	Y
8	1.953	1.989	3.768	3.791	48.16	47.53
7	1.844	1.876	3.733	3.753	50.61	50.02
6	1.647	1.674	3.668	3.685	55.11	54.56
5	1.375	1.397	3.571	3.584	61.51	61.03
4	1.038	1.054	3.445	3.452	69.86	69.45
3	0.647	0.656	3.287	3.288	80.33	80.05
2	0.282	0.284	3.102	3.095	90.91	90.83
1	0.000	0.000	2.903	2.890	100.00	100.00

Tabla 7
Desplazamientos de Entrepiso "Drifts"

Nivel	Modelo sin Aislación		Modelo con Aislación		Reducción	
	Drifts (in)		Drifts (in)		Drifts (%)	
	X	Y	X	Y	X	Y
8	0.0028	0.0029	0.0003	0.0003	760.02	732.06
7	0.0050	0.0051	0.0006	0.0006	729.06	705.64
6	0.0069	0.0071	0.0009	0.0009	676.41	657.98
5	0.0086	0.0087	0.0012	0.0012	629.26	611.18
4	0.0100	0.0101	0.0015	0.0015	585.48	569.35
3	0.0093	0.0095	0.0017	0.0018	439.66	429.52
2	0.0072	0.0072	0.0018	0.0019	291.36	281.36
1	0.0000	0.0000	0.0269	0.0268	100.00	100.00

Tabla 8
Aceleraciones de Piso

Nivel	Modelo sin Aislación		Modelo con Aislación		Reducción	
	Aceleraciones (ft/sec2)		Aceleraciones (ft/sec2)		Aceleraciones (ft/sec2)	
	X	Y	X	Y	X	Y
8	5.723	5.691	1.505	1.520	280.17	274.51
7	4.563	4.518	1.471	1.481	210.21	205.07
6	4.216	4.165	1.412	1.416	198.69	194.16
5	4.348	4.336	1.338	1.337	224.95	224.40
4	4.498	4.489	1.272	1.268	253.55	254.14
3	4.270	4.264	1.256	1.256	240.07	239.62
2	3.202	3.197	1.317	1.333	143.04	139.81
Interfaz de Aislación (0+00)	0.000	0.000	1.466	1.505	100.00	100.00
Interfaz de Aislación (0+16.5)	0.000	0.000	0.476	0.462	100.00	100.00
-1	0.000	0.000	0.000	0.000	0.00	0.00

A continuación comentarios sobre los resultados obtenidos:

- **Periodos y Participación Modal:** En la Tabla 4, se observó que para la estructura con el sistema de aislación, en los primeros tres modos, los periodos naturales incrementaron en relación con la estructura convencional. Producto de la flexibilización del sistema. Además, se observó que el primer modo es de traslación y ocurre en la dirección de Y. El segundo modo ocurre en X, mientras que el tercer modo tiene una mayor participación modal en Z, lo que implica que es un modo torsional. En los modos 1 y 2, se observó una contribución torsional, siendo mayor en el modo 1. También se observó que los períodos aislados corresponden a los tres primeros modos y éstos corresponden a la totalidad de la respuesta. Cabe mencionar que la relación entre los dos periodos traslacionales es prácticamente 1, lo cual es característico de las estructuras que cuentan con un sistema de aislación y que el período torsional difiere de los períodos traslacionales en una relación de 1.26. En términos generales, esto refleja una buena distribución en planta de los aisladores, aunque no es la óptima ya que en el modo 1 se observó una importante contribución torsional.

- Cortante Basal: En la Tabla 5, se observó que para la estructura con el sistema de aislación el cortante basal obtuvo una reducción. Para el caso del DBE, se observó sobre un 80% de reducción.
- Desplazamiento de Piso: En la Tabla 6, se observó que para la estructura con el sistema de aislación los desplazamientos laterales se amplificaron. Esto en el orden de un 47% en la azotea y un 100% en la base.
- Desplazamiento Entrepisos “Drift”: En la Tabla 7, se observó que para la estructura con el sistema de aislación los desplazamientos relativos tuvieron una reducción significativa.
- Aceleraciones de Piso: En la Tabla 8, se observó que para la estructura con el sistema de aislación las aceleraciones tuvieron una reducción significativa. No obstante, en la interfaz de aislación se amplificaron.
- Evaluar una combinación diferente de aisladores de base y/o variar el tipo de suelos.
- Evaluar la cercanía de una falla sísmica.
- Evaluar un sistema estructural resistente a fuerzas laterales diferente.
- Realizar un estudio económico sobre el uso de aisladores sísmicos de base.

REFERENCIAS

- [1] American Concrete Institute, “*Building Code Requirements for Structural Concrete and Commentary*”, ACI Committee 318-08, 2008.
- [2] American Society of Civil Engineers, “*ASCE Standard Minimum Design Loads for Buildings and other Structures*”, ASCE standard ASCE 7-05, 2006.
- [3] American Society of Civil Engineers, “*Seismic Rehabilitation of Existing Buildings*”, ASCE standard ASCE/SEI 41-06, 2007.
- [4] International Code Council, *International Building Code*, 2009.
- [5] F. Naeim and J. M. Kelly, “*Design of seismic isolated structures: from theory to practice*,” John Wiley & Sons, Inc., 1999.
- [6] Federal Emergency Management Agency, “*NEHRP Recommended Provisions for Seismic Regulation of New Buildings and Other Structures and its Commentary*”, FEMA 450, Washington D.C., 2006.
- [7] Federal Emergency Management Agency, “*NEHRP Recommended Provisions: Design Examples*”, FEMA 451, Washington D.C., 2006.
- [8] F. Y. Cheng, H. Jiang and K. Lou, “*Smart Structures: Innovative Systems for Seismic Response Control*”, Taylor & Francis Group, LLC, 2008.
- [9] Holmes Consulting Group Ltd, “*Base Isolation of Structures: Design Guidelines*”, 2001.
- [10] Computer and Structures, Inc., “*CSI Analysis Reference Manual*”, Berkeley CA, 2009.
- [11] J. C. De La Llera, “*Aisladores Sísmicos en el Hospital Militar*” Chile, 2002.
- [12] J. C. De La LLera, “*Aislamiento Sísmico: Concepto y Aplicación*” SIRVE S.A., 2013.
- [13] Zaoqiang Dacheng Rubber Co., Ltd, “*High damping rubber bearing and Lead rubber bearing for earthquake resistance*”, 2014.

CONCLUSIÓN

Los hallazgos de este trabajo muestran que el edificio provisto de aisladores sísmicos tuvo un mejor comportamiento ante acciones sísmicas referente al edificio con base fija. Para el edificio aislado, se observó un aumento en el periodo fundamental para los primeros dos modos de vibración en un promedio de 58% y un 82% para el tercer modo. Además se observó una reducción en el cortante basal mayor al 80% considerando el espectro de respuesta de diseño. En los desplazamientos laterales se observó un aumento producto de la flexibilización del sistema. Esto en el orden de un 47% en la azotea y un 100% en la base. En cuanto a los desplazamientos relativos, se observó una reducción significativa al igual que en las aceleraciones de piso.

RECOMENDACIONES PARA TRABAJOS

FUTUROS

A continuación se presentan algunos temas de interés en relación con el estudiado en este proyecto: