

PONTIFICIA UNIVERSIDAD CATÓLICA DEL PERÚ

FACULTAD DE CIENCIAS E INGENIERÍA



PONTIFICIA
**UNIVERSIDAD
CATÓLICA**
DEL PERÚ

PROTECCIÓN DE UNA EDIFICACIÓN EXISTENTE CON DISIPADORES DE ENERGÍA

Tesis para optar el Título de Ingeniero Civil, que presentan los bachilleres:

**Luisa Joselinne Morales Díaz
Juan José Contreras Bálaro**

**ASESORES: Juan Alejandro Muñoz Peláez
Marcos Tinman Behar**

Lima, Noviembre del 2012

Resumen

En la actualidad existen en el mercado dispositivos de disipación de energía que podrían ser empleados en el reforzamiento de edificaciones importantes en el país.

En este trabajo se discuten los objetivos que debe alcanzar un proyecto de reforzamiento y se revisan las estrategias y técnicas utilizadas para el reforzamiento de edificaciones.

Se hace una breve presentación de los dispositivos de disipación de energía y se explica el funcionamiento de los disipadores de fluido viscoso. Para estimar la respuesta dinámica de los edificios con sistemas de amortiguamiento, se explican procedimientos con análisis tiempo-historia y por medio de métodos espectrales.

Se resume una metodología para desarrollar el reforzamiento de edificaciones empleando disipadores, y se desarrolla como ejemplo el diseño del sistema de protección para una edificación educativa.

Los resultados del trabajo muestran que con el sistema de protección diseñado, la edificación estudiada podría alcanzar un amortiguamiento efectivo del orden del 25%, y la deriva y las sollicitaciones internas se reducirían por un factor del orden de 0.6.

El costo de los dispositivos para la edificación presentada se estimó en US\$ 45 por metro cuadrado de área construida.



Dedicatoria

A mis padres, Rossana y José, por todo el apoyo que me han brindado.

A mis hermanos, Rosa y Pedro, por su infaltable cariño.

A mis abuelitos, a quienes llevo siempre en mi corazón.

Y a Aurelio, por su gran amor que me motivaba a seguir.

Luisa



Dedicatoria

A Dios por sus bendiciones.

*A mi familia por su guía y
enseñanzas y en especial a mi abuelo Max.*

Juan

Agradecimientos

Un agradecimiento muy especial al ingeniero Alejandro Muñoz, por su apoyo y preocupación en este trabajo. Sin su ayuda, esta tesis no hubiera podido ser culminada.

Al ingeniero Antonio Zeballos, quien nos explicó el funcionamiento de los disipadores de fluido viscoso.

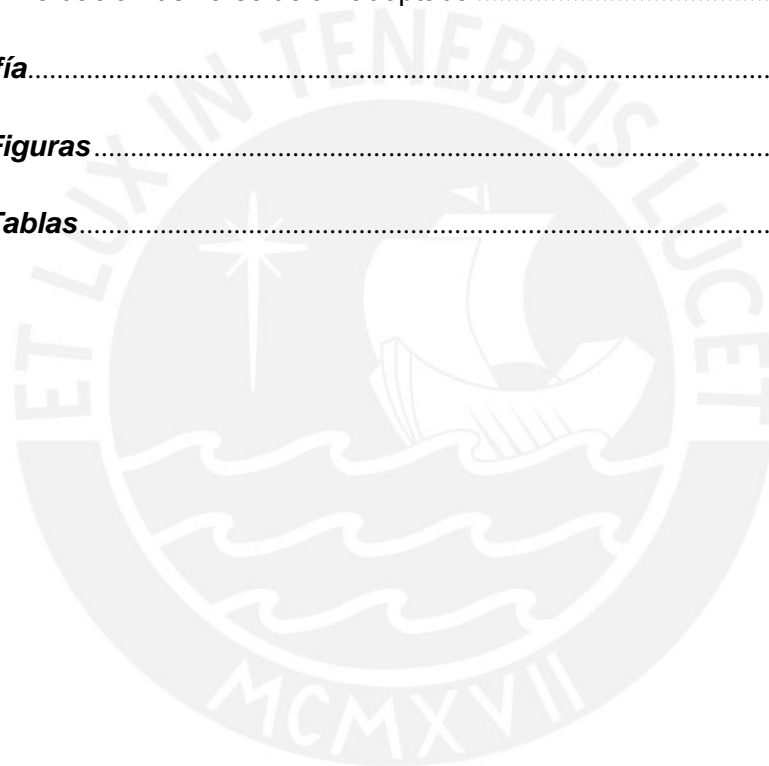
A la ingeniera Maribel Burgos, de la empresa CDV, quien nos enseñó como modelar la edificación con disipadores, y a Víctor Cueva quien nos apoyó con información técnica.

Asimismo, agradecemos al ingeniero Zegarra, por la explicación de su propuesta de reforzamiento del Pabellón B mediante el uso de arriostres metálicos.

Índice

Índice	v
Introducción	1
Capítulo 1 Reforzamiento de Edificaciones	3
1.1 Objetivos de un proyecto de intervención estructural	3
1.2 Relación daño - deriva	5
1.3 Estrategias de la Intervención	6
1.4 Reforzamientos Tradicionales Existentes	7
1.5 Sistemas Modernos Pasivos de Protección Sísmica	7
1.5.1 Aisladores de Base	8
1.5.2 Disipadores de Energía	10
Capítulo 2 Disipadores de Energía de Fluido Viscoso	13
2.1 Funcionamiento	13
2.2 Detalles de los Dispositivos	15
2.3 Configuraciones de los Dispositivos	16
Capítulo 3 Respuesta de Edificios con Dispositivos de Disipación de Energía ..	19
3.1 Representación de las Solicitaciones Sísmicas	19
3.2 Evaluación del amortiguamiento efectivo	19
3.2.1 Vibración Libre	19
3.2.3 Determinación formal del amortiguamiento	20
3.3 Evaluación de la respuesta frente a señales sísmicas	25
3.4 Análisis Espectral con espectros reducidos por amortiguamiento	26
Capítulo 4 Metodología para la reducción de la vulnerabilidad con Disipadores	29
4.1 Metodología General	29
4.2 Metodología para el Diseño del Sistema de Disipación de Energía	30
Capítulo 5 Arquitectura y Estructura del Pabellón B	29
5.1 Arquitectura del Pabellón B	32
5.2 Sistema Estructural	33
5.3 Evaluación de la edificación existente	33
5.3.1 Evaluación cualitativa	33
5.3.2 Evaluación cuantitativa con la norma actual	34
5.3.2.1 Modelo Matemático	34
5.3.2.2 Análisis para cargas de gravedad	35
5.3.2.3 Análisis sísmico	35
5.3.2.4 Revisión del diseño de algunos elementos	36
Capítulo 6 Propuesta de protección empleando disipadores de fluido viscoso ..	40
6.1 Propuestas de intervención existentes	40

6.1.1	Propuesta de los ingenieros Ottazzi, Muñoz y Pérez.....	40
6.1.2	Propuesta del Ingeniero Zegarra.....	40
6.2	Reforzamiento del Pabellón B.....	41
6.2.1	Introducción	41
6.2.2	Objetivo del reforzamiento	41
6.2.3	Secuencia de Reforzamiento para el Pabellón B.....	42
6.2.4	Esquema del reforzamiento propuesto	50
6.2.5	Respuesta tiempo- historia del Edificio Reforzado.....	52
6.2.6	Evaluación del Amortiguamiento añadido	55
6.2.7	Combinaciones y envolventes de diseño.....	56
6.2.8	Reforzamiento de columnas	62
	Evaluación de la solución adoptada.....	62
	Bibliografía.....	65
	Lista de Figuras.....	67
	Lista de Tablas.....	69



Introducción

En el Perú existen actualmente sistemas de disipación de energía entre los que se encuentran los disipadores de fluido viscoso. Estos dispositivos han sido utilizados en varios países tales como Chile y México para la protección sísmica de edificaciones, logrando reducir en un gran porcentaje las demandas sísmicas de éstas. En el país existe una gran cantidad de edificaciones vulnerables que podrían ser reforzadas empleando éste sistema.

En el trabajo se exponen las estrategias para el reforzamiento de edificaciones. Se analiza el funcionamiento de los disipadores y la respuesta de los edificios amortiguados. Se desarrolla una estrategia general para el uso de disipadores de fluido viscoso y finalmente se presenta un ejemplo de aplicación para el reforzamiento de una edificación educativa.

Organización del documento

En el primer capítulo, se presentan los objetivos que debe alcanzar un proyecto de reforzamiento y se revisan los métodos, tradicionales y modernos, empleados para el reforzamiento de edificaciones.

En el segundo capítulo, se explica el funcionamiento de los disipadores de fluido viscoso y los factores de los que depende su eficiencia. Se presentan las distintas configuraciones en las que pueden ser utilizados los dispositivos y la eficiencia vinculada a cada una.

El tercer capítulo explica las formas de representación de solicitaciones sísmicas. Se presentan los métodos para estimar el amortiguamiento efectivo, y se realizan comparaciones del cambio de la respuesta antes y después de adicionarle disipadores de energía de fluido viscoso.

En el cuarto capítulo, se desarrolla la metodología que se debe seguir para reducir la vulnerabilidad de las edificaciones por medio de disipadores de energía.

En el quinto capítulo, se presentan las características del edificio a reforzar, se analizan sus deficiencias de manera cualitativa y se desarrolla un modelo matemático para el análisis con la Norma vigente de Diseño Sismorresistente.

El sexto capítulo enfoca las diversas propuestas de reducción de la vulnerabilidad para la edificación que se interviene. Primero se presenta las propuestas por métodos convencionales y luego se desarrolla un reforzamiento con disipadores de energía de fluido viscoso. Por último, se evalúan las ventajas de la edificación reforzada por este último método.



Capítulo 1

Reforzamiento de Edificaciones

1.1 Objetivos de un proyecto de intervención estructural

El objetivo básico de la Ingeniería Sismorresistente y de una intervención estructural en particular es la reducción de la vulnerabilidad del sistema con el fin de salvar vidas humanas.

Enfoques recientes como el de la Agencia Federal para el Manejo de Emergencias de Estados Unidos (FEMA) y la Asociación Norteamericana de Ingenieros Civiles (ASCE) proponen la definición de objetivos múltiples considerando diferentes niveles de desempeño para diferentes escenarios sísmicos. Éstos objetivos determinarán en gran medida el costo y la viabilidad del proyecto de rehabilitación, así como los beneficios que se obtendrían al reducir los daños de la propiedad y el nivel de interrupción de la edificación ante futuros terremotos.

Una de las propuestas más difundidas corresponde al FEMA, el cual considera un objetivo de rehabilitación que puede ser básico, mejorado o limitado. Para definirlo, establece niveles que de desempeño de menor a mayor daño pueden ser: Operativo, Ocupación Inmediata, Resguardo de Vida o Prevención del Colapso, para sismos de diseño con eventos asociados a periodos de retorno de 72, 225, 474 y 2475 años.

La Tabla 1 muestra los objetivos discretos que corresponden al nivel de desempeño deseado en cada sismo de diseño. [FEM2000].

Tabla 1: FEMA 356- Niveles de desempeño esperado por peligro sísmico.
Fuente: FEMA 356 [FEM2000]

		Niveles de Desempeño Esperado para Edificios			
		Operativo	Ocupación Inmediata	Resguardo de Vida	Prevención del Colapso
Nivel de Peligro Sísmico	50% en 50 años (T=72 años)	a	b	c	d
	20% en 50 años (T=225 años)	e	f	g	h
	10% en 50 años (T=475 años)	i	j	k	l
	2% en 50 años (T=2475 años)	m	n	o	p

En la tabla 2, se muestran los objetivos de rehabilitación obtenidos por la elección de los distintos objetivos discretos.

Tabla 2: Niveles de Objetivos de Rehabilitación
Fuente: FEMA 356 [FEM2000]

k+p	Objetivo Básico de Seguridad(BSO)
k+p+(a,e,i,b,f,j, ó n)	Objetivo Mejorado
Sólo o, n ó m	Objetivo Mejorado
Sólo k ó p	Objetivo Limitado
c,g,d,h,l	Objetivo Limitado

Para la elección de los objetivos discretos es necesario conocer el nivel de daño esperado aceptado en cada nivel de desempeño. La tabla 3 describe las características de estos niveles.

Tabla 3: Descripción de los niveles de desempeño
Fuente: FEMA 356 [FEM2000]

	Prevención del Colapso	Resguardo de Vida	Ocupación Inmediata	Operativo
Daños Globales	Severo	Moderado	Ligero	Muy ligero
General	Poca rigidez y resistencia residual, pero funcionan las columnas y muros portantes. Grandes derivas permanentes. Algunas salidas quedan bloqueadas. La edificación está cerca al colapso.	Hay más rigidez y resistencia residual en todos los pisos. Los elementos portantes funcionan. No hay fallas fuera del plano de las paredes o vuelco de parapetos. Daños en tabiques. Hay algo de deriva permanente. Puede estar fuera de una reparación económica.	No hay deriva permanente. La estructura conserva la resistencia y rigidez original. Grietas menores en fachadas, tabiques y techos, así como en elementos estructurales. Elevadores pueden ser reiniciados. Se mantiene operable la protección contra incendios.	No hay deriva permanente. La estructura conserva la resistencia y rigidez original. Grietas menores en fachadas, tabiques y techos, así como en elementos estructurales. Todos los sistemas importantes para el funcionamiento normal se mantienen funcionales.
Componentes no estructurales	Daño extensivo.	No hay riesgo de colapso de la edificación, pero muchos sistemas arquitectónicos, mecánicos y eléctricos están dañados.	Equipos y equipamientos están seguros, mas no pueden funcionar debido a fallas mecánicas o pérdida de utilidades.	El daño producido es insignificante. Energía y otros servicios públicos están disponibles.

1.2 Relación daño - deriva

Para asociar el daño esperado con el desplazamiento de entrepiso de la estructura, una de las opciones es utilizar las tablas del Hazus (Hazards-United States), el cual es un programa desarrollado por el FEMA.

Las tablas relacionan la deriva asociada a diferentes niveles de daño con un sistema estructural dado y el nivel de diseño considerado para el edificio.

Para ello, comprende dieciséis tipos de sistemas estructurales como muros de albañilería, pórticos de concreto armado, armaduras de acero entre otros, dividiéndolos por su cantidad de pisos en bajos, altos o medianos. Para describir el estado final de los componentes estructurales y no estructurales de cada sistema estructural considera cuatro niveles de daño, los cuales van desde leve, moderado, amplio hasta completo.

Considera cuatro niveles de exigencia de diseño para un nivel Alto, Moderado, o Bajo de Código de Normas Sísmicas, o para un diseño sin normas sísmicas, referido a edificaciones construidas antes de la utilización de algún código sismorresistente para su diseño.

La tabla 4 corresponde a los límites de deriva para obtener los diferentes niveles de comportamiento para un edificio de pórticos (C1) según Hazus:

Tabla 4: Niveles de tipo de daño por exigencias de diseño de Código Bajo
Fuente: HAZUS [HAZ1999]

		Deriva de Entrepiso en el Límite para el Estado de daño			
Tipo	Número de Pisos	Leve	Moderado	Severo	Completo
C1L	De 1 a 3 pisos	0.0050	0.0080	0.0200	0.0500
C1M	De 4 a 7 pisos	0.0033	0.0053	0.0133	0.0333
C1H	De ocho pisos a más	0.0025	0.0040	0.0100	0.0250

1.3 Estrategias de la Intervención

Existe evidencia, a partir de los sismos que han ocurrido, que el daño de las estructuras por efecto de los sismos está relacionado estrechamente con el desplazamiento lateral y la deriva de entrepiso, por lo cual uno de los objetivos principales es disminuir los desplazamientos de entrepiso.

Una de las formas de controlar la deriva es incrementando la rigidez lateral por medio de nuevos elementos o incrementar las secciones de los elementos existentes.

Es frecuente también tener que incrementar la resistencia de los elementos estructurales mediante su reforzamiento localizado.

Existen en la actualidad sistemas mecánicos de disipación sísmica como son los aisladores de base y los dispositivos disipadores de energía. En ambos casos las derivas de entrepiso disminuyen y por tanto también las demandas sísmicas sobre los elementos y el daño.

1.4 Reforzamientos Tradicionales Existentes

El reforzamiento tradicional se ha orientado a la corrección de las formas inadecuadas junto al incremento de resistencia y rigidez del sistema estructural.

Existen formas inadecuadas en los edificios que afectan su comportamiento durante los sismos severos y que es necesario corregir en un proceso de intervención estructural.

Probablemente el caso más frecuente de daño severo y colapso sea el de piso blando. Cuando un edificio tiene este problema es necesario rigidizar el nivel flexible por medio de nuevos muros o diagonales de acero.

El caso de columna corta es de particular importancia para muchas edificaciones educativas en muchos países. Como parte de una intervención será necesario separar los tabiques de las columnas y rigidizar el edificio.

Dentro de las técnicas para incrementar la resistencia y rigidez lateral de las edificaciones está la adición de nuevos muros, de concreto o albañilería, la inclusión de nuevos elementos como diagonales de acero o el enchaquetado de columnas y vigas.

1.5 Sistemas Modernos Pasivos de Protección Sísmica

Son sistemas compuestos de elementos mecánicos que no requieren control externo para su funcionamiento. Existen 2 tipos: los aisladores de base y los disipadores de energía.

1.5.1 Aisladores de Base

Son dispositivos flexibles que se colocan generalmente debajo de la cimentación para disminuir las solicitaciones sísmicas sobre el edificio. Con estos dispositivos el desplazamiento relativo de entrepiso del edificio se reduce considerablemente mientras el suelo se mueve bajo la cimentación aislada. De esta manera se reduce además las fuerzas internas de los elementos.

El conjunto de la estructura y los aisladores tienen un periodo fundamental más largo que el de la estructura fija, esto permite que para sitios de suelo bueno, las demandas se reduzcan al salir de la zona de demandas elevadas correspondiente a periodos cortos. La figura 1 muestra la reducción de la demanda con el incremento de periodo.

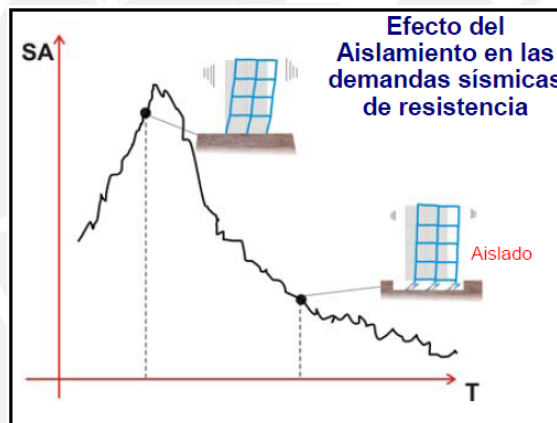


Figura 1: Disminución de la demanda sísmica por medio de aisladores
Fuente: Apuntes de Ingeniería Antisísmica [MUÑOZ2009]

Existen 2 tipos de aisladores: los aisladores elastoméricos y los deslizantes.

Los aisladores elastoméricos son aquellos compuestos de un elastómero de caucho natural o neopreno que proveen de gran flexibilidad lateral y usan láminas finas de acero que dan rigidez vertical para soportar las cargas del edificio. Dentro de esta clase existen los apoyos de caucho natural NRB (Figura 2), de caucho con núcleo de plomo (LRB) (Figura 3) y de caucho con alta disipación de energía (HDR).



Figura 2: Aislador de Caucho Natural (NRB)
Fuente: Universidad de Buffalo [BUF1997]

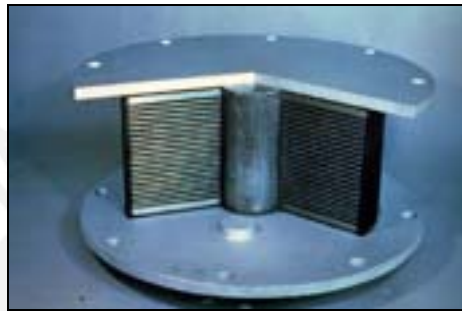


Figura 3: Aislador Caucho con Núcleo de Plomo (LRB)
Fuente: Sumitomo Mitsui Construction [SMC1997]

Los aisladores deslizantes están compuestos de dos superficies hechas de teflón y acero inoxidable que permiten el deslizamiento de la estructura y la disipación de energía a través de las fuerzas de fricción producidas. Existen diferentes tipos como son el pendular friccionante (Figura 4), elástico friccionante, TASS, etc.

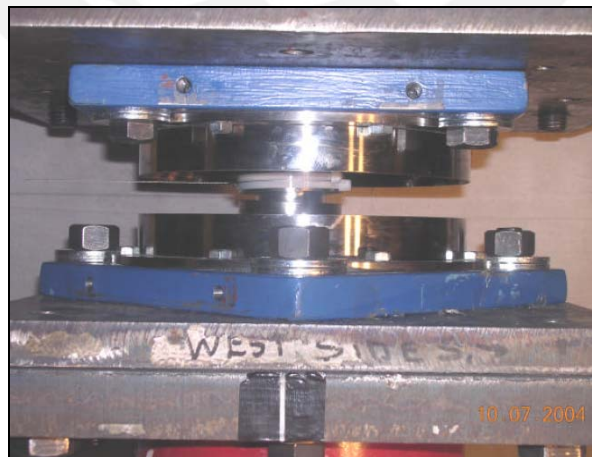


Figura 4: Aislador de péndulo friccionante
Fuente: Universidad de Buffalo [MCC2004]

1.5.2 Disipadores de Energía

Son dispositivos mecánicos que se instalan en el edificio y disipan la energía sísmica que entra al sistema. Debido a que no modifican significativamente la rigidez lateral, el periodo fundamental del conjunto no varía considerablemente.

Tipos de dispositivos

Existen disipadores histeréticos, que trabajan por medio de ciclos de desplazamiento inelástico; disipadores viscoelásticos, que funcionan en base al desplazamiento y la velocidad; y disipadores de fluido-viscoso, que actúan de manera proporcional a la velocidad.

Disipadores histeréticos

Los disipadores histeréticos son aquellos que trabajan por medio del desplazamiento de entrepiso de la estructura y pueden ser de fluencia ó friccionantes.

Los dispositivos por fluencia disipan energía introduciendo comportamiento inelástico en el metal mediante ciclos de deformación inelástica por flexión, corte, torsión o extrusión (Figura 5). En estos dispositivos la fuerza del disipador (F) y el desplazamiento de entrepiso (Δ) guardan una relación como la mostrada en la figura 6.

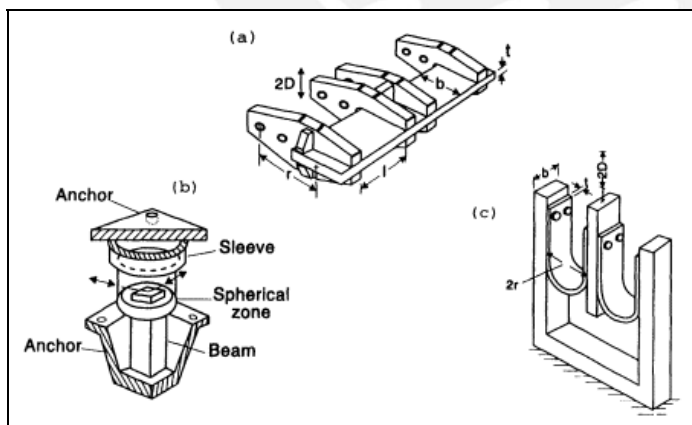


Figura 5: Geometría de los disipadores metálicos.
 a) Viga a torsión b) Viga a Flexión c) Placas en U
 Fuente: Passive Energy Dissipation Systems in Structural Engineering [SOO1997]

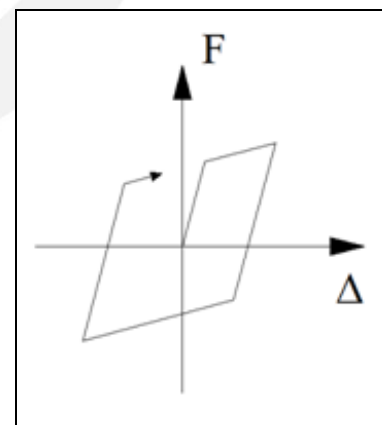


Figura 6: Comportamiento idealizado de los disipadores de fluencia

Los disipadores por flexión llevan a la sección transversal del dispositivo a la fluencia de manera uniforme. Unos de los más conocidos son los dispositivos ADAS (Added Damping and Stiffness) que poseen una sección en forma de X (Figura 7).

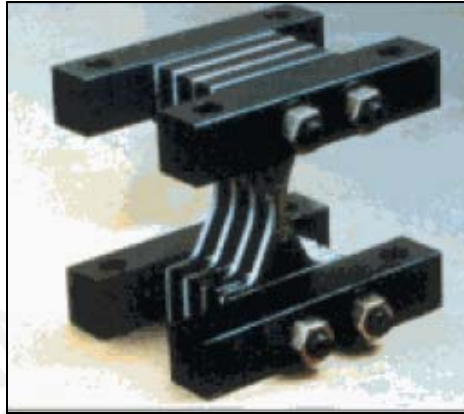


Figura 7: Dispositivo ADAS (flexión)
Fuente Universidad de Buffalo [BUFF0001]

Los disipadores friccionantes son aquellos que funcionan en base al desplazamiento relativo (Δ) de 2 placas que están unidas con pernos de alta resistencia. Son diseñados para actuar a partir de una fuerza determinada (F) y limitan la cantidad de energía que puede ingresar al sistema (Figura 8). Una de las marcas que comercializa este tipo de disipadores es Pall Dinamycs (Figura 9).

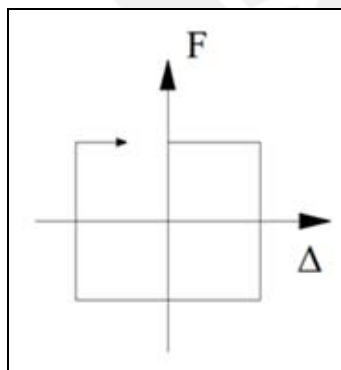


Figura 8: Comportamiento idealizado de los disipadores friccionantes.

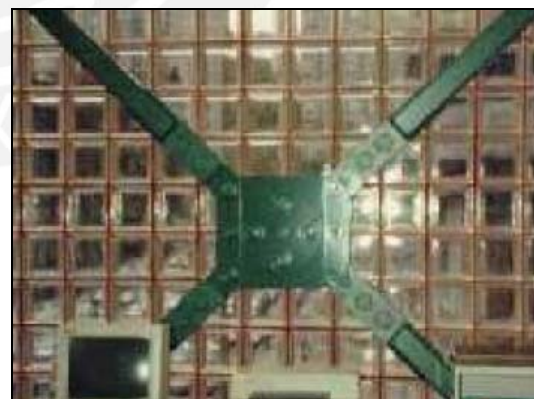


Figura 9: Disipadores Pall
Fuente: Concordia University [CON0002]

Disipadores viscoelásticos

Los disipadores viscoelásticos son dispositivos cuyo funcionamiento depende de la velocidad $\dot{\Delta}$ y del desplazamiento (Δ) (Figura 10). Disipan energía a través de la deformación por corte de un material viscoelástico, sólido o líquido, que se encuentra

entre 2 superficies. Estos materiales pueden ser polímeros o caucho. Un ejemplo muy conocido de dispositivos son los muros disipadores WVD (Figura 11).

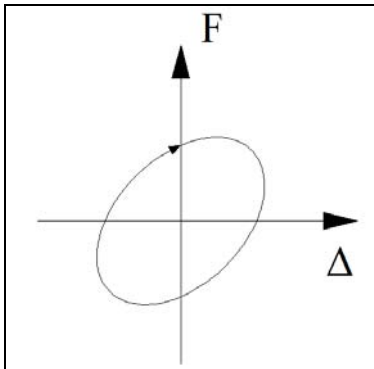


Figura 10: Comportamiento idealizado de los disipadores viscoelásticos.



Figura 11: Muro Disipadores WVD (Wall Viscous Damper)

Fuente: Dynamic Isolation System [DIS0003]

Disipadores de fluido viscoso

Los disipadores de fluido viscoso generan una fuerza (F) que es proporcional a la velocidad $\dot{\Delta}$ (Figura 12); lo hacen por medio de un pistón con el cual se aplica presión a un fluido de silicona en su interior. Los más conocidos son los disipadores producidos por Taylor Devices (Figura 13).

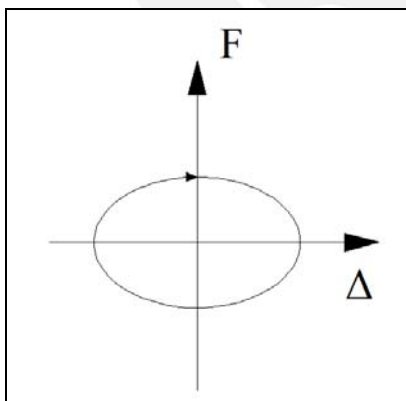


Figura 12: Comportamiento idealizado de los disipadores de fluido viscoso.

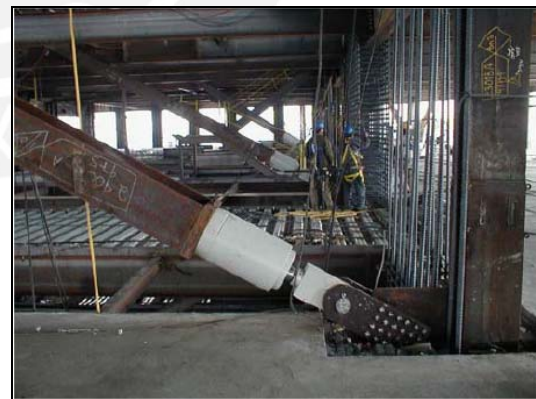


Figura 13: Disipadores Taylor en el reforzamiento del edificio Torre Mayor

Fuente: Taylor Devices [TAY0004]

Capítulo 2

Disipadores de Energía de Fluido Viscoso

2.1 Funcionamiento

Estos dispositivos generan una fuerza (F) que depende de una constante de amortiguamiento (C), la velocidad relativa de sus extremos (\dot{X}) y de un exponente alfa (α) mediante la siguiente expresión:

$$F = C \cdot \dot{X}^\alpha \quad \dots \text{(Ecuación 1)}$$

Se denomina “Disipador Viscoso Lineal” cuando la constante α toma el valor de 1, en ese caso F aumenta linealmente con la velocidad. Se le “Disipador Viscoso No Lineal” cuando la constante α toma valores distintos a 1.

La figura 14 muestra la relación entre la fuerza del disipador (F) y su desplazamiento relativo (X) para dispositivos no lineales con distintos valores de la constante α colocados en una estructura de masa $M= 2.5 \text{ ton seg}^2/\text{m}$ y rigidez $K=10000 \text{ ton/m}$ que al inicio de la vibración tiene las condiciones de $X_0=4\text{cm}$ y $\dot{X}_0=150 \text{ cm/seg}$ y cuenta con disipadores con $C= 10 \text{ ton-s/m}$.

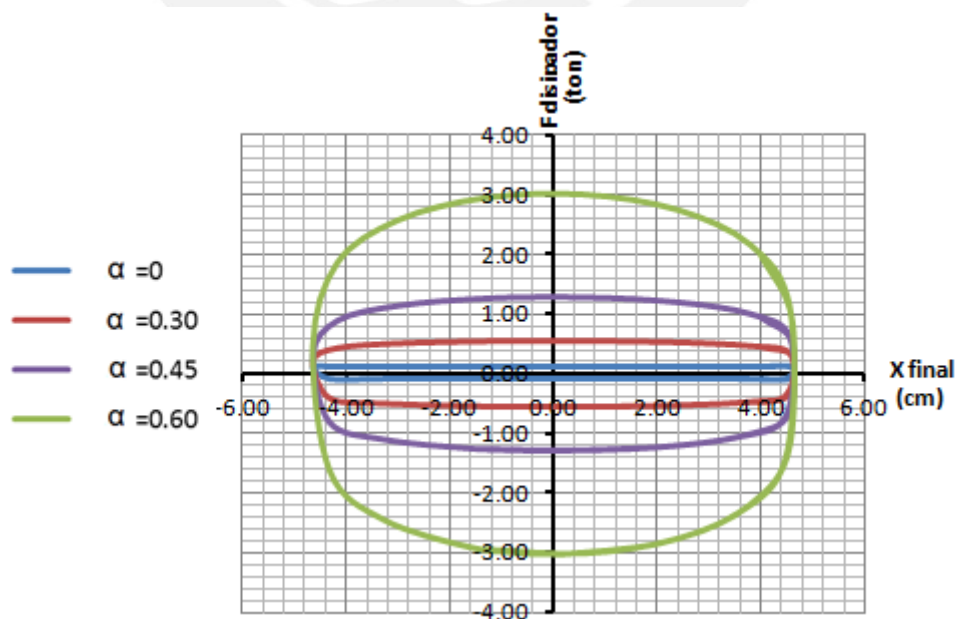


Figura 14: Relación Fuerza-Desplazamiento en Dispositivos de Fluidos Viscoso con distintos valores de α

Se observa que relación Fuerza del disipador- Desplazamiento toma una forma similar a la de una elipse. Para dispositivos no lineales, las fuerzas de amortiguamiento se van reduciendo conforme disminuye la constante α . A menor valor del α la elipse va tomando una forma rectangular, lo que indica que el disipador empieza a tener un comportamiento similar al de un disipador de fluencia.

Según el fabricante, Taylor Devices, este exponente está ligado a la dimensión de los orificios del pistón, por lo que sólo puede tomar valores de 0.3 a 2. Sin embargo, en reforzamientos de edificaciones usualmente se adopta valores de 0.3 a 1.

La fuerza del disipador es mayor cuando la estructura se encuentra en su posición de equilibrio ($X=0$), esto se debe a que en este punto la edificación tiene su valor máximo de velocidad. Una fuerza elevada puede traer el efecto de aumentar las axiales de las columnas adyacentes al dispositivo.

La figura 15 muestra para la misma estructura anterior la relación entre la fuerza del disipador (F) y su desplazamiento relativo (X) para dispositivos no lineales con distintos valores de la constante C (ton-s/cm) y $\alpha=0.6$. Se aprecia que conforme aumenta la constante C también lo hace la fuerza del disipador.

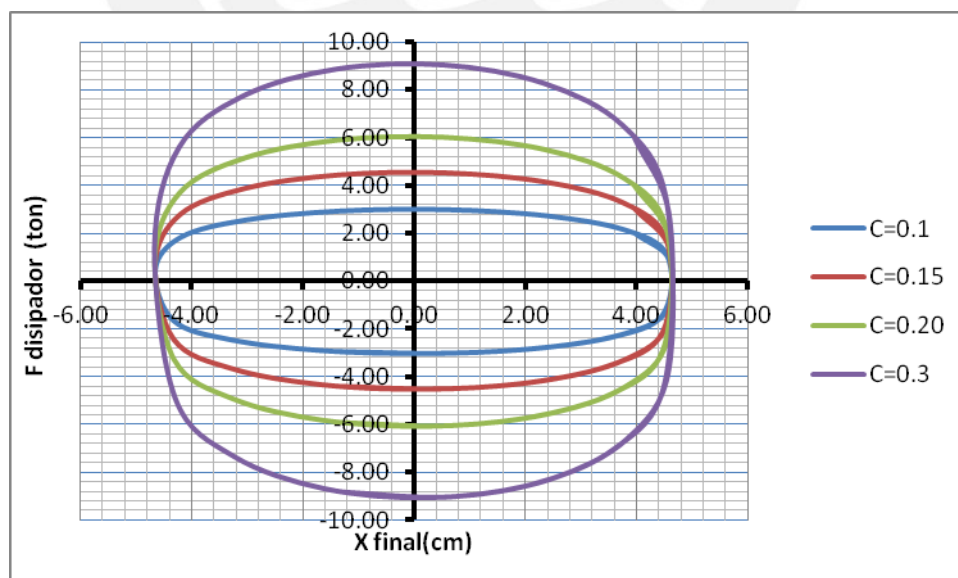


Figura 15: Relación Fuerza-Desplazamiento en Dispositivos de Fluidos Viscoso No lineales con distintos valores de C y $\alpha=0.6$

El efecto del amortiguamiento de los disipadores se ve reflejado en el decremento de la energía histerética debido al aumento de la energía disipada por amortiguamiento. La figura 16 muestra la relación entre la energía de entrada al sistema, causada por el movimiento sísmico; la energía disipada por el amortiguamiento inherente de la estructura; y la energía que disipa los dispositivos en la estructura.

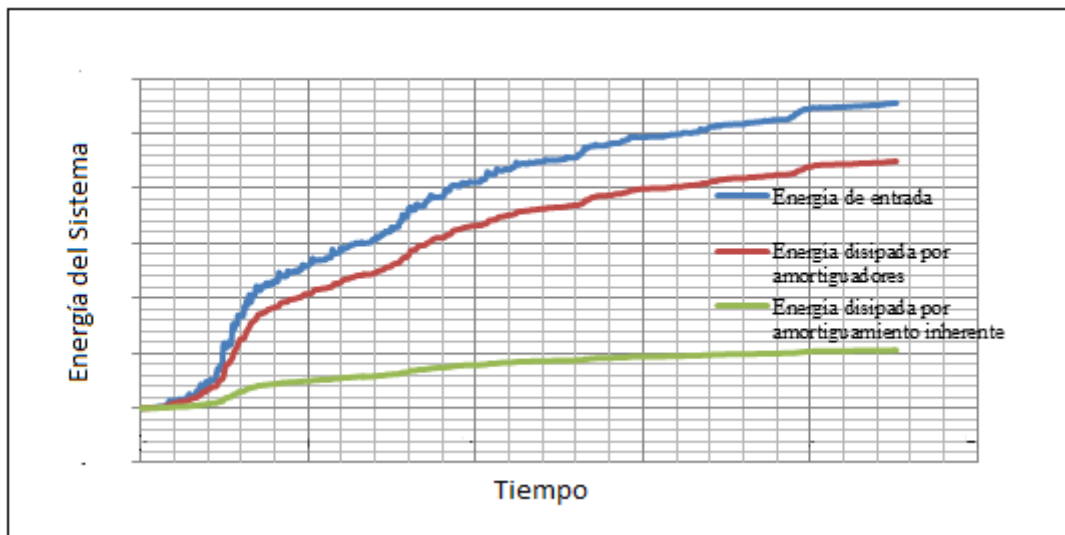


Figura 16: Energía disipada por los disipadores en una edificación

En términos prácticos con esta fuerza disipadora se puede alcanzar un amortiguamiento efectivo del orden del 25% - 30% del crítico.

2.2 Detalles de los Dispositivos

Los disipadores de Fluido Viscoso son cilindros huecos que se encuentran divididos en tres cámaras. En su interior tienen un fluido que es de baja viscosidad, inerte, no combustible, no inflamable, no tóxico y además que no se degrada con el paso del tiempo.

Estos disipadores disipan energía debido a la fricción entre el fluido y los orificios de pistones que tienen en su interior. El movimiento de la edificación empuja el pistón hacia el interior del cilindro, comprimiendo el fluido de la cámara 2. Por los orificios de la cabeza del pistón pasa flujo de la cámara 2 a la 1, generando una fuerza de amortiguamiento que buscará igualar la presión en ambas cámaras. Al ser la presión

en la cámara 2 mayor que en la cámara 3, por la válvula de control pasa líquido a la cámara 3, lo que evita que el pistón tenga un efecto de rebote.

En la Figura 17 se muestra un esquema del funcionamiento de los disipadores.

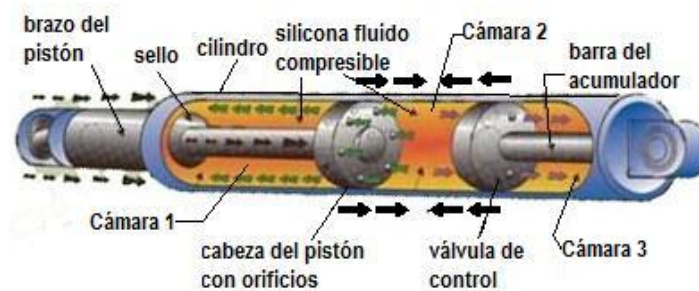


Figura 17: Funcionamiento del disipador de energía de fluido viscoso.

Fuente: "Here is how it works" [TAY1998]

2.3 Configuraciones de los Dispositivos

Existen diversas maneras de colocar los disipadores. Cada una de ellas puede lograr una eficiencia diferente. La eficiencia (f) se mide en función de la fuerza en el dispositivo en relación a la velocidad (o desplazamiento) de entrepiso.

Las disposiciones más comunes son las de Chevron, Diagonales y Scissor Jack.

Configuración Chevron Brace

La configuración Chevron Brace (Figura 18) puede lograr una eficiencia de 1, es decir toda la capacidad del disipador sirve para controlar el movimiento lateral de la estructura. Para lograrlo es necesario que los arriostres que lo sostienen tengan una alta resistencia lateral.

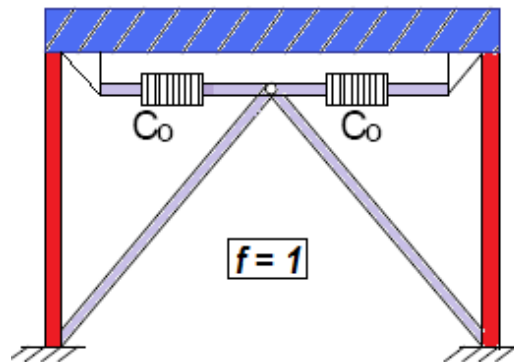


Figura 18: Configuración Chevron Brace.

Fuente: "Seismic Protective Systems: Passive Energy Dissipation"[SYM2002]

También se puede realizar esta configuración con los disipadores cerca del suelo (Figura 19) a fin de facilitar su instalación y su inspección.



Figura 19: Configuración Chevron Brace Invertida.

Fuente: "Seismic Protective Systems: Passive Energy Dissipation"[SYM2002]

Configuración Diagonal

La configuración Diagonal (Figura 20) es la más económica, debido a que sólo requiere de tubos metálicos para la instalación de los disipadores. Sin embargo es la que tiene la menor eficiencia. La componente horizontal de la fuerza que se genere es la que brindará amortiguamiento. La eficiencia depende del ángulo de inclinación del brazo metálico que va a sostener al disipador, mediante la expresión $f = \cos(\theta)$.

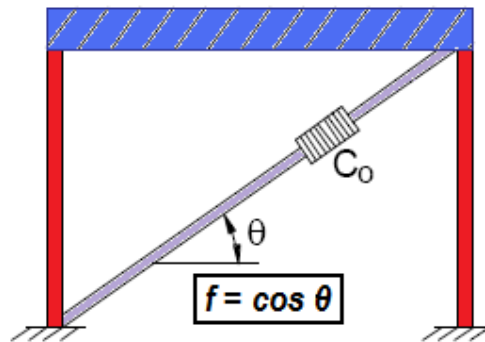


Figura 20: Configuración Diagonal.

Fuente: "Seismic Protective Systems: Passive Energy Dissipation"[SYM2002]

Configuración Scissor Jack

La configuración Scissor Jack (Figura 21) aumenta el desplazamiento del pistón para un desplazamiento de entrepiso, razón por la cual tiene una eficiencia mayor a la unidad. La eficiencia depende del ángulo de inclinación del disipador (Ψ) y del ángulo de la armadura (θ) según la relación $f = \cos(\Psi)/\text{tg}(\theta)$.

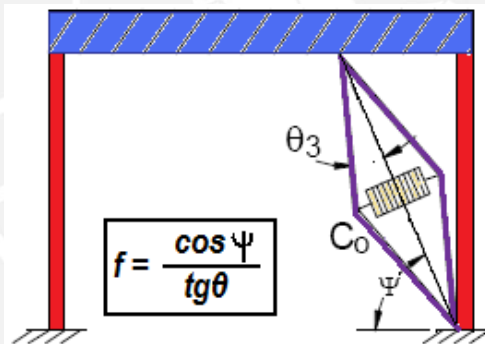


Figura 21: Configuración Scissor Jack.

Fuente: "Seismic Protective Systems: Passive Energy Dissipation"[SYM2002]

Otra ventaja de esta configuración es que ocupa un menor espacio, lo que no impide colocar una puerta o una ventana en su lado.

Esta configuración tiene un mayor precio, por lo que para tomar una decisión de cuál de las tres configuraciones utilizar será necesario comparar el costo asociado a la instalación y el costo de los disipadores a utilizarse.

Capítulo 3

Respuesta de Edificios con Dispositivos De Disipación de Energía

3.1 Representación de las Solicitaciones Sísmicas

Las solicitaciones sísmicas para propósitos de diseño estructural se pueden representar por fuerzas equivalentes, espectros o historias de aceleración.

Los espectros generalmente corresponden al promedio estadístico de espectros de la región y área del proyecto. Generalmente los espectros se escalan para representar los eventos de un determinado periodo de retorno.

Las señales de aceleración que se emplean para un proyecto específico deben ser representativas de las condiciones de sismicidad y suelo del proyecto. Los registros disponibles deben ser por tanto escalados hacia una aceleración máxima de diseño correspondiente al periodo de retorno del evento que se considere.

3.2 Evaluación del amortiguamiento efectivo

El amortiguamiento efectivo es el inherente más el añadido por los dispositivos de disipación. Para estimar el amortiguamiento efectivo se puede emplear alguno de los siguientes procedimientos.

3.2.1 Vibración Libre

La estructura se somete a una fuerza de impacto o a un movimiento en su base de muy corta duración y se estudia la historia de desplazamientos en vibración libre. Se evalúa el desplazamiento X_i para un instante t_i , y otro desplazamiento X_n para un instante n periodos después. Se calcula el logaritmo natural del cociente de estos

desplazamientos “ δ ” con el cual se puede estimar el amortiguamiento efectivo “ β ” usando la expresión:

$$\delta = \frac{2\pi\beta_{efectivo}}{\sqrt{1 - \beta_{efectivo}^2}} \quad \dots \text{(Ecuación 2)}$$

El amortiguamiento estimado con este procedimiento es el asociado al modo fundamental de vibración y al uso de disipadores lineales debido a que la disipación de energía dada por este tipo de dispositivos es proporcional para cualquier señal.

3.2.2 Señales y respuesta espectral

Se obtienen los espectros de las señales sísmicas utilizadas para diferentes porcentajes de amortiguamiento. Se calcula la respuesta de la estructura a cada uno de estos espectros y los resultados se comparan con los valores máximos del análisis tiempo historia. Se identifica el espectro que proporciona los valores más cercanos a los de respuesta en el tiempo y el amortiguamiento de este espectro se toma como el efectivo. Restando el amortiguamiento inherente se puede estimar el amortiguamiento añadido.

3.2.3 Representación del proceso de disipación de energía como un sistema de amortiguamiento añadido

El amortiguamiento añadido puede estimarse empleando el trabajo que hacen los dispositivos en un ciclo de movimiento armónico adoptando un modo de vibración.

En particular, para dispositivos de fluido viscoso lineales el amortiguamiento añadido ($\beta_{añadido}$) depende del periodo (T), de la masa de cada piso (m_i), de la constante de amortiguamiento (C_j), de la inclinación respecto a la horizontal (θ_j) y del modo de vibración por medio de los desplazamientos de nivel y los relativos ϕ_i , ϕ_{ir} .

$$\beta_{añadido} = \frac{T \sum_j C_j \cdot \phi_{ir}^2 \cdot \cos^2(\theta_j)}{4\pi \cdot \sum_i M_i \cdot \phi_i^2} \quad \dots \text{(Ecuación 3 - 1)}$$

Esta fórmula se obtiene mediante el siguiente desarrollo:

Se considera un sistema de un grado de libertad equipado con un disipador viscoso lineal y sometido a un movimiento sinusoidal forzado. Su respuesta en el tiempo se da mediante la siguiente relación:

$$x(t) = X_0 \cdot \text{Sen}(\omega t)$$

Donde X_0 y ω son la amplitud y la frecuencia angular de la onda respectivamente. La velocidad se obtiene como:

$$\dot{x}(t) = \frac{\partial x}{\partial t} = \omega X_0 \text{Cos}(\omega t)$$

Esta onda mantendrá una amplitud constante, es decir, no decrecerá, debido a que la onda de movimiento no sufre variación en el tiempo.

Representación del Trabajo Realizado por el Dispositivo de Fluido Viscoso

Siendo la fuerza de amortiguamiento del disipador $F = -C\dot{x}$ se tiene que:

$$F = -C \cdot \dot{x}(t) = -C \cdot \omega \cdot X_0 \cdot \text{Cos}(\omega t)$$

En un ciclo, el trabajo realizado por el disipador será el siguiente:

$$\begin{aligned}
 W_{DFV} &= \int_0^T F dx = \int_0^T -C\dot{x} dt \\
 W_{DFV} &= \int_0^T -C \cdot \dot{x}^2 dt = \int_0^T -C\omega^2 X_0^2 \cos^2(\omega t) dt \\
 &= -C \cdot \omega^2 X_0^2 \cdot \left[\frac{t}{2} + \frac{\text{Sen}(2\omega t)}{4\pi} \right]_0^T \\
 &= -C \cdot \omega^2 \cdot X_0^2 \left[\frac{T}{2} + \frac{\text{Sen}(2\omega T)}{4\pi} \right]
 \end{aligned}$$

Como el periodo de la onda (T) es igual $2\pi / \omega$, se puede simplificar la expresión como:

$$\begin{aligned}
 &= -C \cdot \omega \cdot X_0^2 \cdot \left[\frac{\pi}{\omega} + \frac{\text{Sen}(4\pi)}{4} \right] \\
 &= -C \cdot \omega \cdot X_0^2 \cdot \pi
 \end{aligned}$$

Por lo que se concluye que:

$$W_{DFV} = C \cdot \omega \cdot X_0^2 \cdot \pi \dots (I)$$

Asimismo, se puede expresar el amortiguamiento añadido por los disipadores como una fracción del amortiguamiento crítico de la estructura según la expresión:

$$\beta_{añadido} = \frac{C}{C_{cr}}$$

En donde el amortiguamiento crítico (C_{cr}) es igual a:

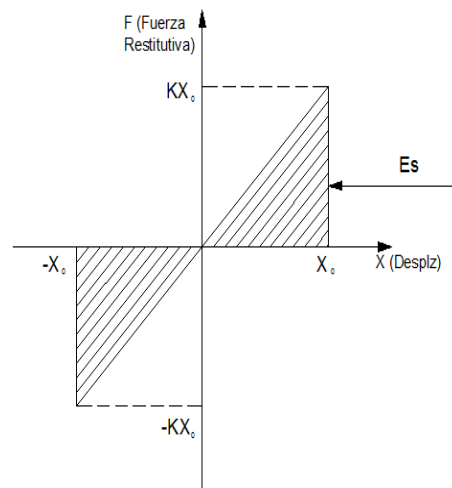
$$C_{cr} = \sqrt{4KM} = 2\sqrt{KM} = 2 \sqrt{K \left(\frac{K}{\omega_0^2} \right)} = 2 \frac{K}{\omega_0}$$

Donde M , K y ω_0 son la masa, la rigidez y la frecuencia natural del sistema respectivamente.

Reemplazando en la expresión (I) se tiene:

$$W_{DFV} = 2 \frac{K}{\omega_0} \cdot \beta_{añadido} \cdot \omega \cdot X_0^2 \cdot \pi \dots (II)$$

La expresión $K \cdot X_0^2$ se puede interpretar como la energía máxima elástica disipada por el sistema para un ciclo completo de vibración (E_s):



$$E_s = K \cdot X_0^2$$

Con lo

que se puede reordenar la ecuación (II) como:

$$W_{DFV} = 2 \cdot (K \cdot X_0^2) \frac{\omega}{\omega_0} \cdot \beta_{añadido} \cdot \pi$$

$$W_{DFV} = 2 \cdot (E_s) \frac{\omega}{\omega_0} \cdot \beta_{añadido} \cdot \pi$$

De esta expresión, el amortiguamiento generado por el disipador se puede expresar como:

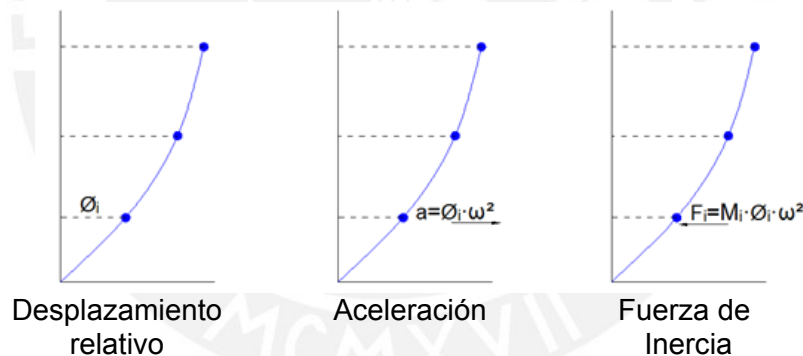
$$\beta_{\text{amortado}} = \frac{W_{DFV}}{2\pi E_S} \cdot \frac{\omega_0}{\omega}$$

Dada una estructura sometida a fuerzas sísmicas, la amplitud de su oscilación será mayor cuando la frecuencia de las ondas sísmicas sea similar a la suya. Por ello, se puede considerar que las frecuencias de la estructura y del sismo son iguales ($\omega_0 = \omega$), con lo que:

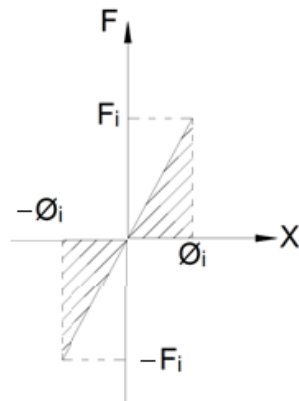
$$\beta_{\text{amortado}} = \frac{W_{DFV}}{2\pi E_S} \quad \dots(II)$$

Incorporación del amortiguamiento en el análisis espectral

Dada una estructura vibrando con la forma, frecuencia y amplitud del modo fundamental.

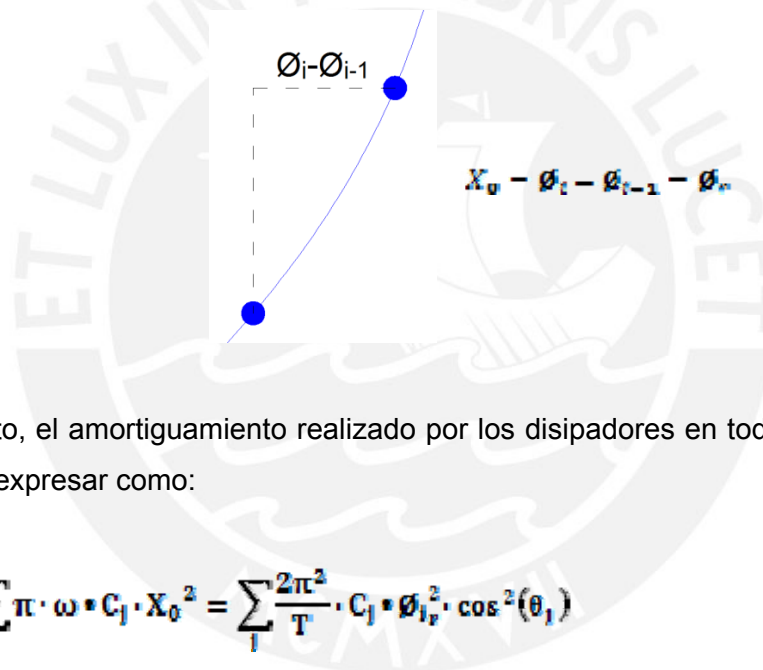


La energía máxima de deformación elástica generada por la fuerza restitutiva es igual a:



$$E_S = \sum_i F_i \cdot \phi_i = \sum_i M_i \cdot \phi_i^2 \cdot \omega^2 \quad \dots(IV)$$

En cada piso "i" el desplazamiento relativo de la estructura será igual a:



Por lo tanto, el amortiguamiento realizado por los disipadores en todos los pisos W_{DFV} se puede expresar como:

$$W_{DFV} = \sum_i \pi \cdot \omega \cdot C_j \cdot X_0^2 = \sum_i \frac{2\pi^2}{T} \cdot C_j \cdot \phi_{i_r}^2 \cdot \cos^2(\theta_j)$$

$$W_{DFV} = \frac{2\pi^2}{T} \sum_j C_j \cdot \phi_{i_r}^2 \cdot \cos^2(\theta_j)$$

Y la energía de deformación elástica dada por la ecuación (IV):

$$E_S = \sum_i M_i \cdot \phi_i^2 \cdot \omega^2 = \frac{4\pi^2}{T^2} \sum_j M_i \cdot \phi_i^2$$

Donde θ_j es el ángulo de inclinación de cada disipador.

Con el amortiguamiento equivalente hallado anteriormente, podemos obtener el amortiguamiento generado por los disipadores en base a la ecuación (III):

$$\beta_{añadido} = \frac{W_{DFV}}{2 \cdot \pi \cdot E_S} = \frac{\frac{2\pi^2}{T} \sum_j C_j \cdot \theta_{1r}^2 \cdot \cos^2(\theta_j)}{2\pi \cdot \frac{4\pi^2}{T^2} \sum_i M_i \cdot \theta_i^2}$$

$$\beta_{añadido} = \frac{T \sum_j C_j \cdot \theta_{1r}^2 \cdot \cos^2(\theta_j)}{4\pi \cdot \sum_i M_i \cdot \theta_i^2}$$

Para los dispositivos de fluido viscoso no lineales, el proceso de disipación de energía depende de la velocidad máxima y también del desplazamiento máximo. El desplazamiento máximo se representa por Δ , el amortiguamiento añadido se puede estimar mediante la siguiente expresión:

$$\beta_{añadido} = \frac{\sum_j \lambda \cdot C_j \cdot \theta_{1r}^{1+\alpha} \cdot \cos^{1+\alpha}(\theta_j)}{2\pi \cdot A^{1-\alpha} \omega^2 \sum_i M_i \cdot \theta_i^2} \dots \text{(Ecuación 3 - 2)}$$

Donde C es el coeficiente de amortiguamiento, A la amplitud, m la masa, ω la frecuencia angular, α el exponente de la velocidad, y λ la expresión: $2^{2+\alpha} \frac{\Gamma(1+\frac{\alpha}{2})}{\Gamma(2+\alpha)}$ donde Γ es la función matemática Gamma.

3.3 Evaluación de la respuesta frente a señales sísmicas

Se desarrolla un modelo elástico del edificio con los dispositivos ubicados en los pórticos donde se sabe que la respuesta de la estructura original es mayor. Se somete al modelo a sollicitaciones de aceleración y como resultado se obtienen las historias de respuesta del edificio.

Con fines de comparación se desarrolla el análisis de la estructura sin ningún sistema de disipación y el de la estructura con dispositivos de amortiguamiento. Para evaluar la eficacia de los dispositivos (η) se puede emplear los cocientes entre los desplazamientos máximos de la respuesta para el caso de la estructura inicial y la estructura protegida con disipadores de energía.

$$\eta = \frac{\Delta_{máx \text{ sin reforzamiento}}}{\Delta_{máx \text{ con reforzamiento}}} \dots \text{(Ecuación 4)}$$

3.4 Análisis Espectral con espectros reducidos por amortiguamiento

Para fines de diseño o evaluación estructural, las solicitaciones sísmicas sobre edificios con disipadores pueden representarse por un espectro correspondiente al amortiguamiento inherente más el amortiguamiento logrado por los dispositivos.

Existen procedimientos sencillos para obtener espectros correspondientes a un mayor amortiguamiento en base a un espectro inicial calculado para un amortiguamiento inherente que va entre el 5 al 7 %. Estos procedimientos emplean factores de reducción de deriva (B) que dependen directamente del amortiguamiento efectivo (β) y de la zona del espectro.

$$B = \frac{S_a(T, 5\%)}{S_a(T, \beta)}$$

Se define además un factor de amplificación (A_β), el cual es el valor por el cual se escala el espectro sin amortiguamiento de una determinada señal para obtener el espectro amortiguado para un amortiguamiento β .

En 1982, Newmark y Hall propusieron una fórmula para obtener estos valores, basados en registros de diferentes sismos y que podía utilizarse para valores de amortiguamiento efectivo de hasta del 100%.

$$A_\beta = 2.31 - 0.41 \cdot \ln(\beta_{\text{efectivo}})$$

En el año 2000, el Programa Nacional para la Reducción de Peligro Sísmico (NEHRP) hizo una investigación propia, con la cual se obtuvieron valores similares, lo cual corroboraba los estudios antes realizados.

Con lo cual el factor B queda expresado como:

$$B = \frac{S_a \cdot A_g(\beta_{FEM})}{S_a \cdot A_g(\beta_{efectivo})} = \frac{A_g(\beta_{FEM})}{A_g(\beta_{efectivo})}$$

$$B = \frac{2.31 - 0.41 \cdot \ln(5)}{2.31 - 0.41 \cdot \ln(\beta_{efectivo})}$$

$$B = \frac{1.65}{2.31 - 0.41 \ln(\beta_{efectivo})} \quad \dots \text{(Ecuación 5)}$$

El FEMA 356 por su parte, propone factores de reducción independientes para la zona de aceleración constante y para la zona de disminución del espectro de aceleraciones. La tabla 5 muestra estos factores.

Tabla 5: Factores de reducción (B) según FEMA 356

Amortiguamiento Efectivo β (%)	Zona de Aceleración Constante (B_s)	Zona de Disminución (B_1)
≤ 2	0.8	0.8
5	1.0	1.0
10	1.3	1.2
20	1.8	1.5
30	2.3	1.7
40	2.7	1.9
≥ 50	3.0	2.0

La figura 22 muestra un espectro de diseño correspondiente a 5 % de amortiguamiento con una plataforma de aceleración máxima de 1g que se extiende hasta 0.4 de periodo, junto al espectro reducido por un amortiguamiento añadido de 30% utilizando los factores propuestos en el FEMA 356, con un valor de plataforma de 0.43g.

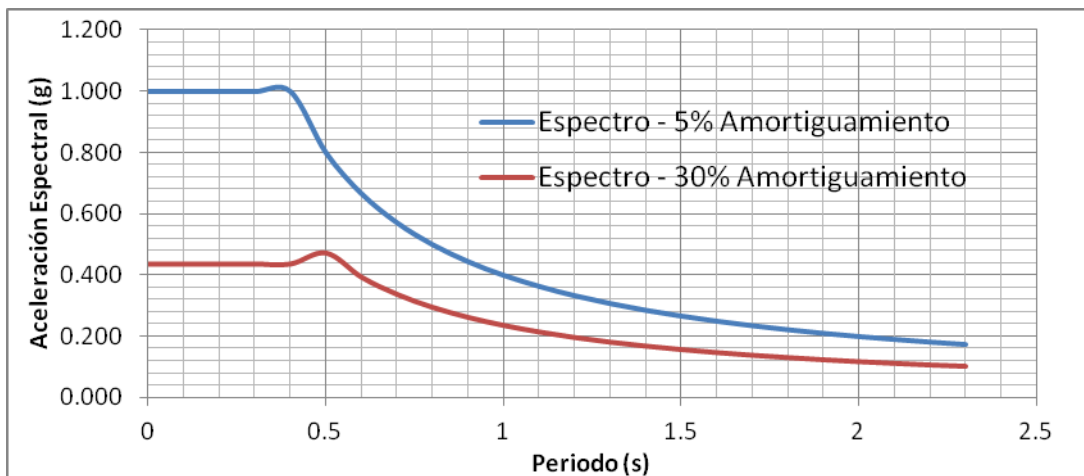


Figura 22: Espectro al 5% y al 30% de amortiguamiento crítico.

Con los valores propuestos por el FEMA se puede apreciar que la zona de aceleración constante es la más beneficiada, ya que los factores de reducción tienden a ser mayores en esta zona.

Capítulo 4

Metodología para la reducción de la vulnerabilidad con Disipadores

4.1 Metodología General

Cuando se determina que es necesario intervenir un edificio para reducir su vulnerabilidad y se decide emplear disipadores, el siguiente procedimiento puede servir para ordenar el proceso de diseño.

- 1) Estudiar la forma estructural para establecer si existen problemas de mala conformación tales como columnas cortas, piso blando, etc.
- 2) Desarrollar el análisis sísmico de la edificación empleando la norma sismorresistente vigente con el objetivo de conocer si la edificación tiene la resistencia y rigidez exigidos.
- 3) Precisar los niveles de desempeño que se espera lograr frente a múltiples escenarios sísmicos.
- 4) Establecer la deriva máxima que se pretende aceptar para cada nivel de desempeño (deriva objetivo, Δ_{obj}). Por ejemplo, si el nivel de desempeño que se desea obtener es un daño leve para un edificio de concreto armado de 8 pisos o más para un código bajo, utilizando los valores propuestos por Hazus en la tabla 4, se tomaría una deriva objetivo de 2.5%.
- 5) Luego, es necesario elegir el procedimiento de análisis y lograr una representación de las solicitaciones sísmicas mediante señales de aceleración o espectros.
- 6) Desarrollar el análisis del edificio sin disipadores y obtener su máxima deriva ($\Delta_{m\acute{a}x}$) para cada sismo de diseño.

- 7) Determinar los factores de reducción de deriva (B) que se deben lograr con los dispositivos para mantener la deriva por debajo de las derivas objetivo. Los factores de reducción se calculan como el cociente entre la deriva máxima obtenida de la estructura sin reforzar y la deriva objetivo.

$$B = \frac{\Delta_{m\acute{a}x}}{\Delta_{obj}} \quad \dots \text{(Ecuación 6)}$$

- 8) Determinar el amortiguamiento efectivo necesario ($\beta_{efectivo}$) empleando la ecuación 5.
- 9) Definir una configuración de dispositivos y estimar un primer valor de C utilizando la ecuación 3.
- 10) Diseñar del sistema de disipación, (ubicación y propiedades de los dispositivos), hasta lograr los objetivos de desempeño tal como se muestra en el diagrama de flujo del acápite 4.2.
- 11) Realizar el diseño detallado del reforzamiento y conexión de los nuevos dispositivos.

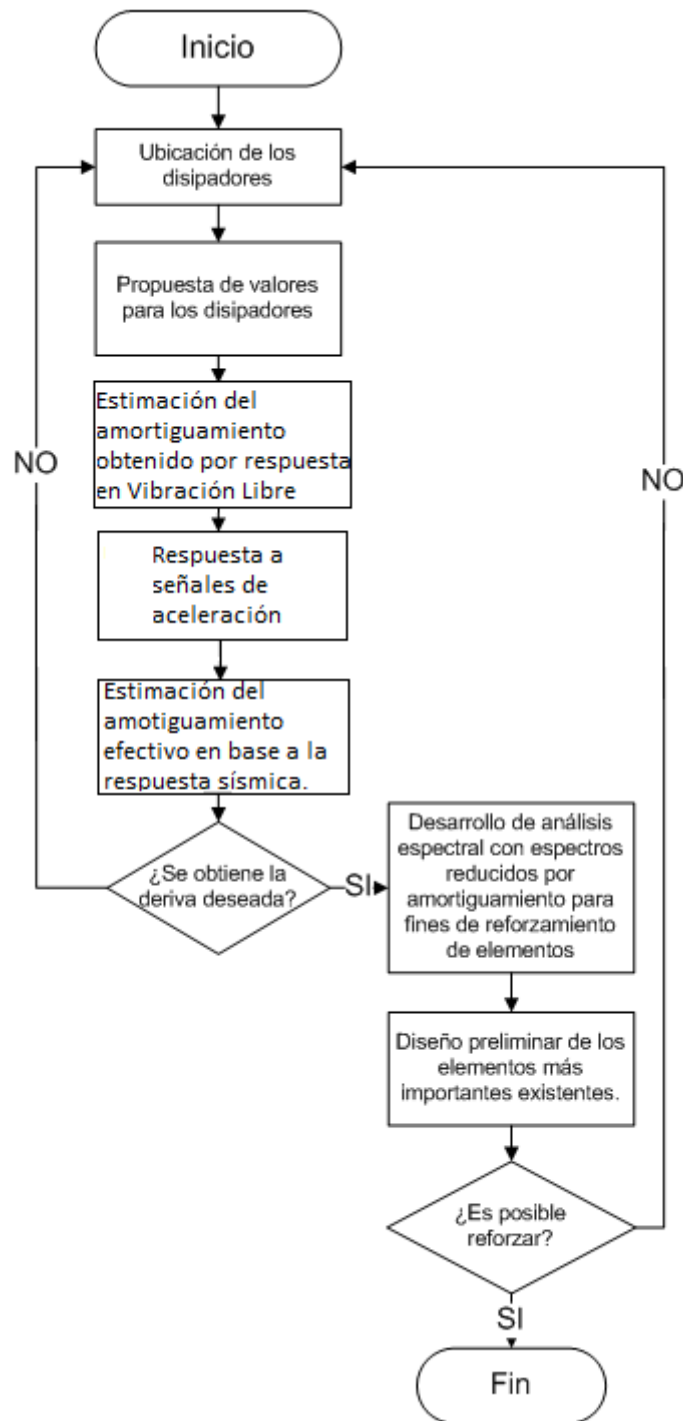
4.2 Metodología para el Diseño del Sistema de Disipación de Energía

Esquema del Procedimiento

El diseño del reforzamiento con un sistema de disipación de energía es un proceso iterativo que busca encontrar la configuración apropiada que permita controlar la respuesta de la estructura para lograr los objetivos de diseño.

El proceso iterativo se resume en el siguiente esquema:

DIAGRAMA DE FLUJO DE LA METODOLOGÍA PARA EL DISEÑO DEL SISTEMA DE DISIPACIÓN DE ENERGÍA



Capítulo 5

Arquitectura y Estructura del Pabellón B

El Pabellón B de la Pontificia Universidad Católica del Perú es un edificio construido hace 50 años, cuando todavía no existía en el país el concepto de diseño de estructuras sismorresistentes. Debido a esto y a las técnicas de construcción de la época se identifican ciertos problemas como una falta de rigidez lateral en su sentido más largo y el problema de columna corta.

Para la arquitectura y estructura del Pabellón B se utilizaron los estudios realizados por la Dirección Académica de Investigación (DAI) en el año 2001.

5.1 Arquitectura del Pabellón B

El Pabellón B (Figura 23) tiene una forma en planta rectangular que mide 45 x 12.5 m, salvo en el primer techo donde tiene un pasadizo que lo conecta con el Pabellón A.

El edificio tiene cuatro pisos conectados mediante dos escaleras.

Dentro de sus ambientes hay aulas de clase, un baño por piso, una biblioteca en el segundo piso, y oficinas administrativas en el primer piso.



Figura 23: Elevación del Pabellón B

5.2 Sistema Estructural

El sistema estructural del Pabellón B (Figura 24) está compuesto en su sentido longitudinal por pórticos de vigas y columnas de concreto armado y en el sentido transversal por muros de albañilería.

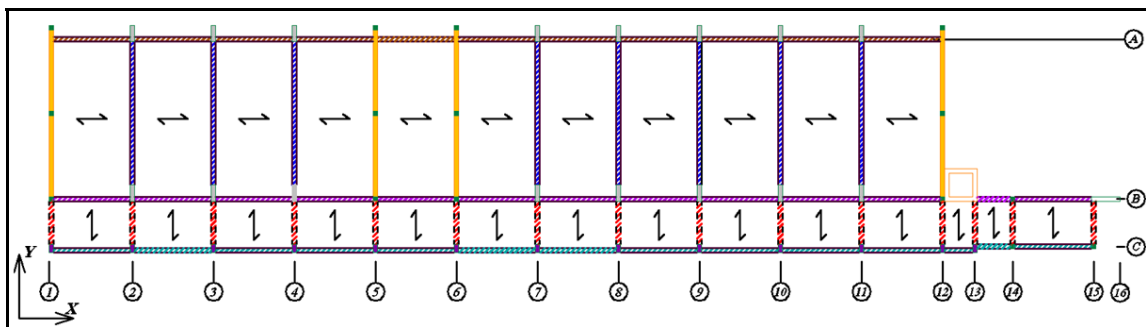


Figura 24: Planta del Pabellón B

El sistema de piso está conformado por losas aligeradas de 20cm de peralte aproximadamente y la cimentación consiste en zapatas aisladas de concreto armado.

Los materiales utilizados en el edificio son concreto armado de $f'c = 350 \text{ kg/cm}^2$, acero de refuerzo de $f_y = 2800 \text{ kg/cm}^2$ y albañilería con un $f'm = 30 \text{ kg/cm}^2$.

5.3 Evaluación de la edificación existente

5.3.1 Evaluación cualitativa

En la dirección longitudinal flexible los tabiques de albañilería se encuentran adosados a las columnas, restringiendo su capacidad de deformación, lo cual genera el problema de columna corta (Figura 25a).

Este pabellón luce como una edificación flexible, es decir que existe una falta de rigidez lateral por lo cual es probable que existan daños excesivos al sistema estructural ante un sismo severo. Asimismo, este comportamiento agudiza el problema de columna corta.

Para la dirección transversal rígida debido a la forma alargada (Figura 25b), y la distribución irregular de los muros de albañilería, existe un problema de torsión en planta.

La forma alargada en planta también podría significar una flexibilidad importante en el diafragma.

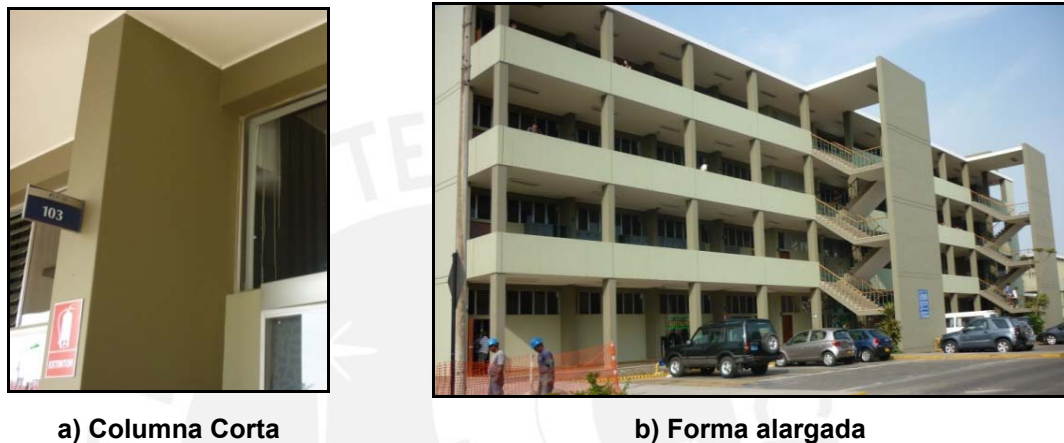


Figura 25: Pabellón B - PUCP

5.3.2 Evaluación cuantitativa con la norma actual

5.3.2.1 Modelo Matemático

Para representar el edificio (Figura 26) se utilizó el programa ETABS. Se realizó un modelo elástico de los elementos. Las vigas y columnas fueron modeladas como elementos unidireccionales “Frames”, y los muros y techos como elementos bidireccionales “Wall” y “Slab” respectivamente.

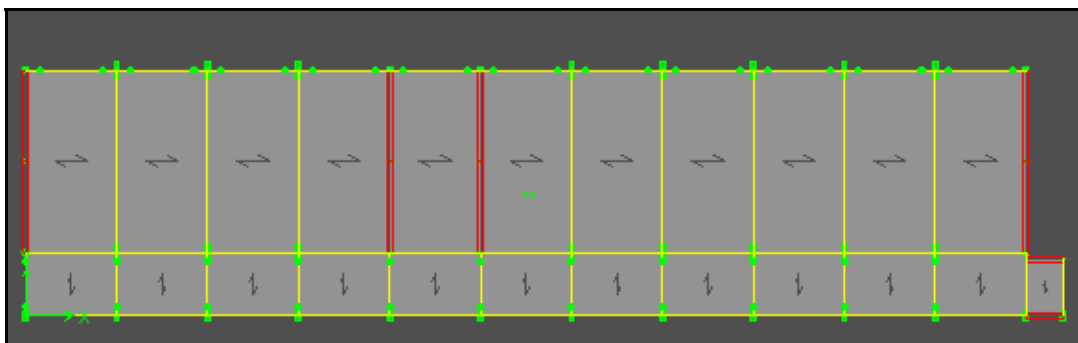


Figura 26: Modelo Matemático del Pabellón B

Se consideró los techos como diafragmas rígidos y se asignó uno por cada piso. Asimismo, se utilizaron como elementos transmisores de cargas de gravedad, y se les colocó las fuerzas distribuidas por unidad de área.

5.3.2.2 Análisis para cargas de gravedad

Se estimó el peso propio del aligerado en 400 kg/cm^2 . Se consideró una sobrecarga de 250 kg/cm^2 correspondiente a la norma NTE-E.020 para la zona de aulas de educación y 400 kg/cm^2 para la zona de pasadizos. En el techo del último piso se consideró 100 kg/cm^2 .

5.3.2.3 Análisis sísmico

Para el análisis sísmico se utilizó el espectro definido por la norma NTE-E.030 (Figura 27), considerando un factor de zona de $Z=0.4$, un factor de uso $U=1.5$ y un perfil de suelo tipo S1 $S=1$. Para la dirección longitudinal de pórticos se empleó un factor de reducción $R=6$ y para la dirección transversal de muros de albañilería se empleó $R=3$.

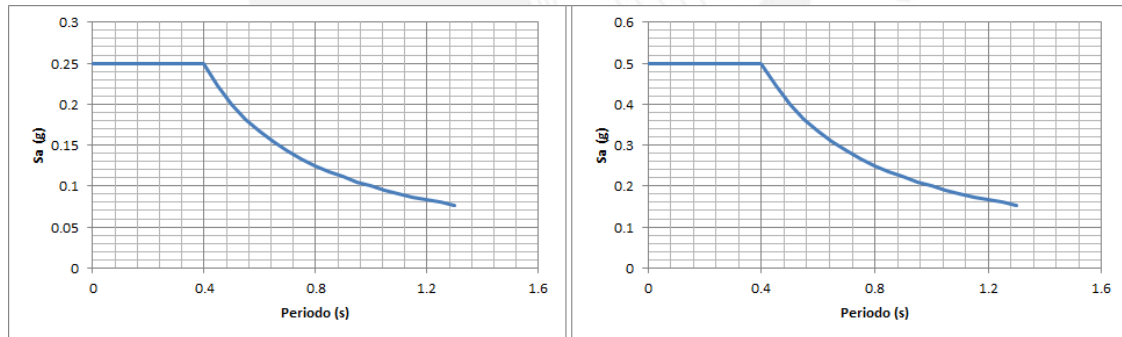


Figura 27: Espectros utilizados para el análisis sísmico

Por ser una edificación esencial, la masa considerada para el análisis es el 100% de la carga muerta más el 50% de la carga viva.

La tabla 6 muestra los resultados del análisis por superposición espectral correspondientes a los valores máximos de deriva e índice de giro.

Tabla 6: Deriva e índice de giro del edificio sin reforzar

PISO	Derivas(‰)	Deriva Permisible	Índice de Giro	Derivas(‰)	Deriva Permisible	Índice de Giro
------	------------	-------------------	----------------	------------	-------------------	----------------

		(‰)			(‰)	
Sismo en XX			Sismo en YY			
4	9	7‰	1.12	5	5‰	1.66
3	10		1.08	6		1.65
2	12		1.02	6		1.68
1	10		1.01	5		1.91

La deriva máxima obtenida para la dirección de muros fue de 6‰ y para la dirección de pórticos fue de 12‰. Esto confirma la poca rigidez de la dirección flexible y descalifica el sistema estructural para esta dirección. En cuanto a la dirección de muros la deriva obtenida excede también el máximo permitido por la Norma Peruana de Diseño Sismorresistente.

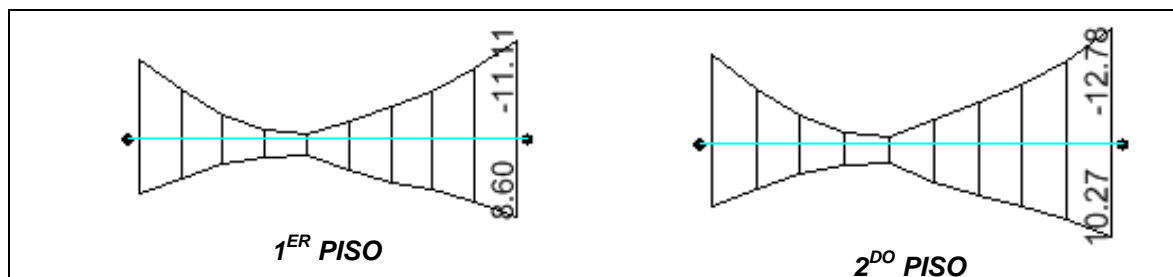
El índice e giro obtenido para el caso de sismo en YY (1.91) muestra la tendencia del edificio a presentar un comportamiento torsional.

5.3.2.4 Revisión del diseño de algunos elementos

Las combinaciones de diseño para vigas y columnas utilizadas son las establecidas en la norma NTE-E.060 de diseño de concreto armado.

Vigas

Las figuras 28 y 29 muestran las envolventes para momento flector de las vigas más cargadas en cada sentido del análisis.



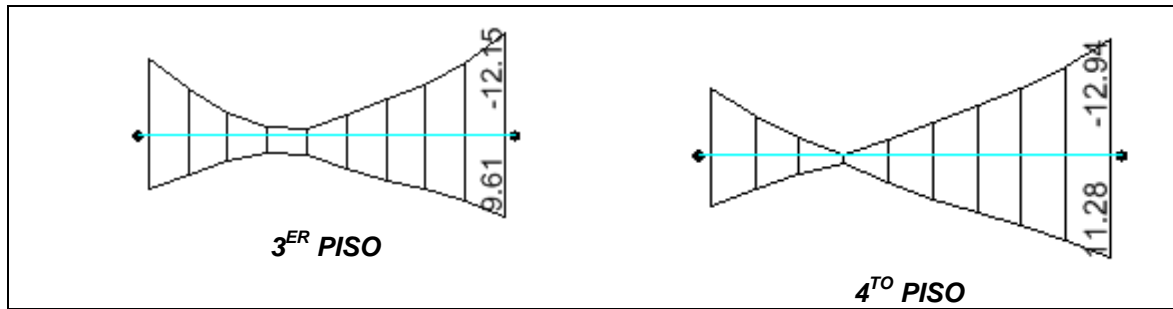


Figura 28: Envolvente de momentos de viga edificio sin reforzar - Sentido X-X

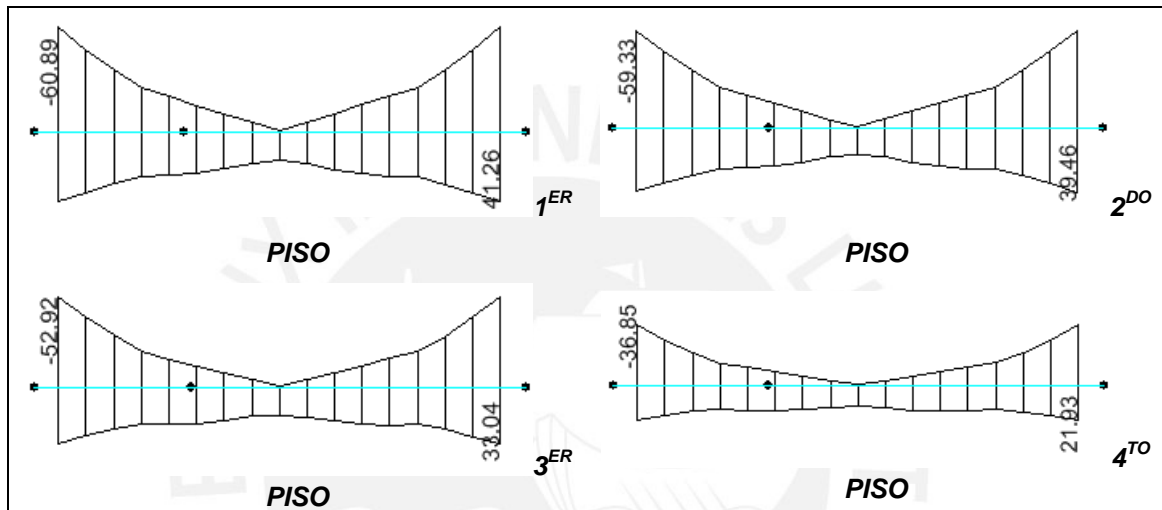


Figura 29: Envolvente de momentos de viga edificio sin reforzar - Sentido Y-Y

En la tabla 7 se puede observar la relación entre la demanda y la capacidad instalada para momentos flectores en las vigas más resaltantes para la dirección longitudinal (X-X) y transversal (Y-Y).

Tabla 7: Demanda vs Capacidad de Vigas del Edificio Sin Reforzar

Dirección	PISO	Demanda		Capacidad		Demanda/Capacidad	
		Mu- (tn-m)	Mu+ (tn-m)	ϕM_n - (tn-m)	ϕM_n + (tn-m)	M- Capacidad	M+ Capacidad
X-X	1	11.11	8.6	4.8	3	2.3	2.9
	2	12.78	10.27	4.8	4.3	2.7	2.4
	3	12.15	9.61	4.8	4.3	2.5	2.2
	4	12.94	11.28	4	2.9	3.2	3.9
Y-Y	1	60.89	41.26	20.8	15.6	2.9	2.6
	2	59.33	39.46	20.8	15.6	2.9	2.5
	3	52.92	33.04	20.8	15.6	2.5	2.1
	4	36.85	21.93	22.4	13.6	1.6	1.6

Estos resultados indican que las vigas tienen una elevada deficiencia de capacidad.

Columnas

Según el análisis de los diagramas de interacción de las columnas principales del pabellón (Figuras 30 y 31), la capacidad resistente de las columnas es menor que las demandas por sismo.

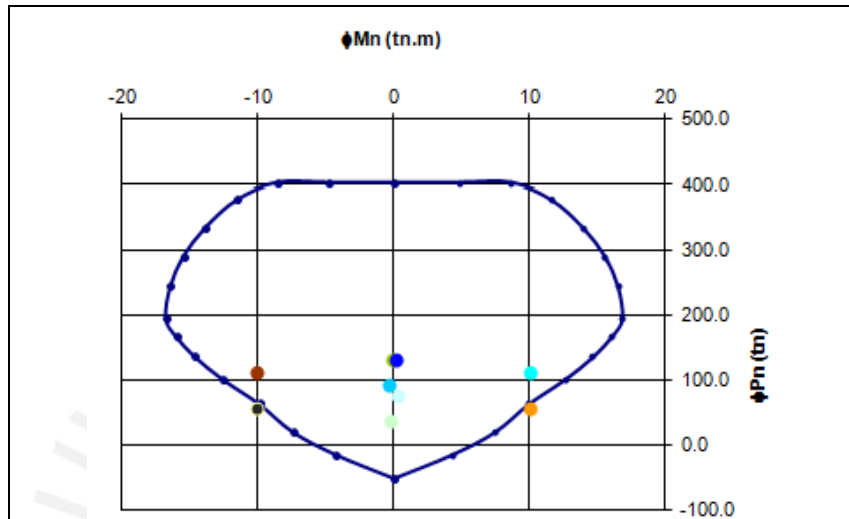


Figura 30: Envoltorio de fuerzas edificio sin reforzar - Columna 25x90

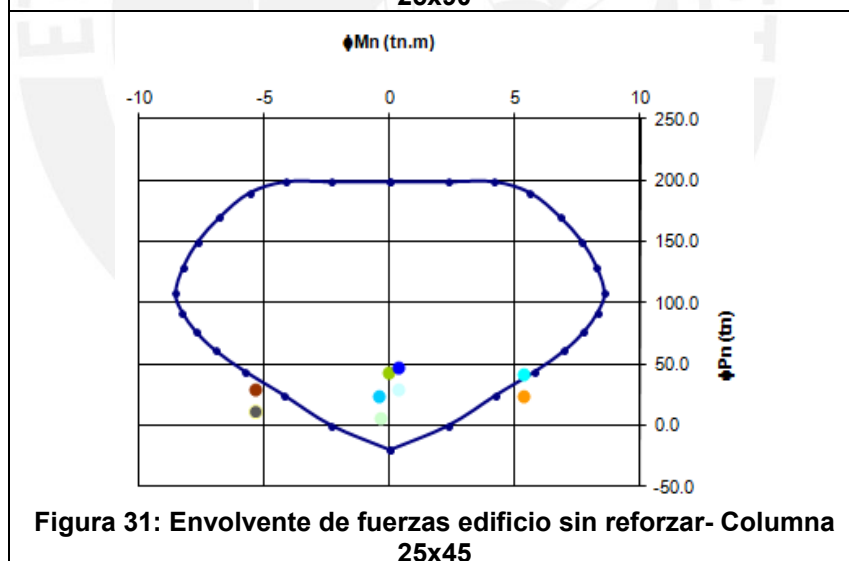


Figura 31: Envoltorio de fuerzas edificio sin reforzar- Columna 25x45

Como se puede apreciar en los diagramas de interacción, el refuerzo de las columnas es insuficiente para poder soportar las solicitaciones.

Para el estribaje de las columnas se utilizó acero de diámetro 1/4" espaciado a cada 20cm [PER2002], lo cual incumple con las disposiciones de diseño vigentes. No existe

además una zona de confinamiento adecuada según lo establecido en la norma de diseño.

Por estos motivos es de esperar que las columnas tengan una ductilidad limitada.

5.3.2.5 Resultado de la evaluación estructural

De la evaluación estructural se concluye que:

- La estructura tiene la resistencia apropiada para las solicitaciones de gravedad.
- Existen problemas de columna corta, tendencia torsional y diafragma alargado.
- Se obtuvieron derivas de 12‰ y 6‰ para la dirección longitudinal y transversal respectivamente. Ambos valores exceden los límites permitidos por la norma vigente 7‰ para estructuras de concreto armado y 5‰ para la albañilería.
- Según HAZUS [HAZ1999], en edificios de similares características a los del edificio estudiado (sistema estructural, año de construcción) para estos niveles de deriva se esperaría un daño extenso en la estructura.
- A partir de un índice de giro de 1.3 según la norma sismorresistente la estructura califica como irregular, el valor obtenido es de 1.9, lo que muestra la tendencia a un comportamiento torsional.
- La capacidad resistente de los elementos es insuficiente y el detallado es inadecuado.
- El edificio no satisface los niveles de seguridad establecidos por la norma vigente de diseño sismorresistente y es en consecuencia de esperar un nivel elevado de daño en un terremoto severo.

Capítulo 6

Propuesta de protección empleando disipadores de fluido viscoso

6.1 Propuestas de intervención existentes

Existe una propuesta de intervención desarrollada por los ingenieros Juan Pérez, Gianfranco Ottazzi y Alejandro Muñoz en base a muros de concreto armado. El ingeniero Luis Zegarra desarrolló también una propuesta alternativa utilizando arriostres metálicos.

6.1.1 Propuesta de los ingenieros Ottazzi, Muñoz y Pérez.

Este trabajo, desarrollado en el año 2002, propone el uso de muros de concreto armado en ambas direcciones. El objetivo de estos muros es reducir la deriva en la dirección flexible y reducir la demanda sobre los elementos existentes tanto de la dirección de pórticos como de muros.

Para la inclusión de muros se tendría que reubicar doce puertas y eliminar veinticuatro paños de ventanas.

Según los autores de este trabajo el costo total del reforzamiento para el año 2002 habría sido de aproximadamente US\$345,000 (S/. 3.67 por dólar). Esto representa un promedio de \$150 por metro cuadrado de área construida.

6.1.2 Propuesta del Ingeniero Zegarra

El Ingeniero Zegarra propuso un reforzamiento basado en la incorporación de elementos metálicos de arriostre, los cuales serían colocados tanto en el eje longitudinal (entre las columnas) como en el eje transversal (en los muros). Con ello, buscó que los elementos metálicos limitaran el desplazamiento de la estructura hasta tal punto que la demanda de los elementos estructurales sea similar a la capacidad de los elementos adicionados.

Esta propuesta no fue concluida a nivel de planos de obra, razón por la cual no hay un estimado de costos.

6.2 Reforzamiento del Pabellón B

6.2.1 Introducción

La propuesta de Pérez es muy intrusiva, y con un proceso constructivo que generaría la interrupción de los servicios del Pabellón. Por ello, se buscó una intervención con un menor tiempo de obra y de mayor simplicidad de ejecución.

En nuestro país ya tenemos representantes de los sistemas de disipación de energía, e incluso hay algunas iniciativas de su uso en edificios. Es por ello que se tomó en consideración esta estrategia para nuestro reforzamiento.

Se optó por colocar disipadores de energía en la dirección longitudinal debido a la efectividad de estos dispositivos en edificaciones flexibles.

Para la dirección transversal se estudió la posibilidad de aplicar estos elementos; sin embargo, estos no resultaron muy eficientes debido a la baja velocidad del movimiento de la estructura por ser más rígida. Es por ello que para esta dirección, se decidió colocar un refuerzo convencional con diagonales de acero.

6.2.2 Objetivo del reforzamiento

El objetivo es lograr que la estructura sólo alcance daño moderado ante la acción de un evento de 500 años de periodo de retorno.

Dado que se trata de un edificio antiguo, construido sin criterios de diseño sismorresistente, para la dirección de pórticos la deriva asociada al daño moderado se estimó en 5.3‰ [HAZ1999]. Se define como deriva objetivo de esta intervención el valor de 5‰.

6.2.3 Secuencia seguida para el Reforzamiento del Pabellón B

Respuesta de la Estructura sin Reforzar a señales peruanas.

Debido a que esta es una edificación antigua, para el análisis se sigue la recomendación del FEMA de utilizar secciones agrietadas en los elementos estructurales como vigas y columnas (Tabla 8):

Tabla 8: Valores de rigidez efectiva (Tomado de la Tabla 6-5 del FEMA 356)

Componente	Rigidez a la Flexión	Rigidez al Corte	Rigidez Axial
Vigas no pretensadas	$0.5E_cI_g$	$0.4 E_cA_w$	---
Columnas con compresión debido al diseño por cargas de gravedad $\geq 0.5Ag^f c$	$0.7E_cI_g$	$0.4 E_cA_w$	E_cA_g
Columnas con compresión debido al diseño por cargas de gravedad $\leq 0.3Ag^f c$ o con tensión	$0.5E_cI_g$	$0.4 E_cA_w$	E_cA_s

Para el desarrollo del análisis se utiliza un modelo elástico con el objetivo de obtener un aproximado de las fuerzas que se generarían en los elementos estructurales del edificio. Se usaron los registros de los sismos ocurridos en Octubre de 1966 en Lima, en Mayo de 1970 en Ancash y en Octubre de 1974 en Lima, los cuales se escalaron a 0.4g.

En la tabla 9 se muestra la respuesta de la edificación para cada sismo mencionado.

Tabla 9: Desplazamientos y derivas de la estructura sin reforzar con el análisis tiempo-historia.

STORY	Sismo Octubre 66		Sismo Mayo 70		Sismo Octubre 74	
	Desplazamiento (cm)	Deriva (‰)	Desplazamiento (cm)	Deriva (‰)	Desplazamiento (cm)	Deriva (‰)
PISO4	6.9	5.9	8.1	5.9	5.7	5.4
PISO3	4.7	5.3	5.9	6.7	3.7	5.5
PISO2	2.7	4.1	3.5	5.8	1.6	3.4
PISO1	1.2	3.0	1.3	3.2	0.4	0.9

Este edificio fue diseñado hace algunas décadas utilizando un código sin exigencias de diseño sismorresistente; dado que se ha definido como deriva objetivo 5‰ y el edificio alcanza una deriva de 6.7‰, es de esperar que el desempeño sea inadecuado y con un daño importante.

Determinación del factor de reducción de deriva

Para lograr la deriva objetivo la respuesta frente a los tres acelerogramas empleados, deben reducirse por los factores (B) mostrados en la tabla 10.

Tabla 10: Factores de reducción para obtener la deriva objetivo (Δ_{obj})

	Sismo Octubre 66	Sismo Mayo 70	Sismo Octubre 74
Deriva Máxima ($\Delta_{máx}$)	5.9 ‰	6.7 ‰	5.5 ‰
$B = \Delta_{máx}/\Delta_{obj}$	1.18	1.34	1.1

Con los valores de B, se estima el amortiguamiento efectivo ($\beta_{efectivo}$) empleando la ecuación (4). Se obtuvieron los valores mostrados en la Tabla 11.

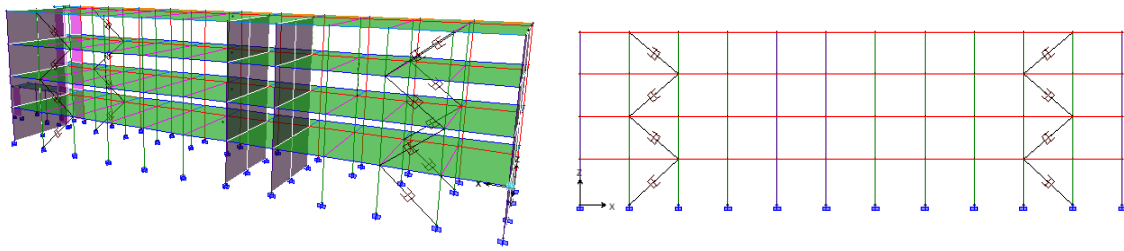
Tabla 11: Amortiguamiento efectivo necesario para lograr la deriva objetivo

	Sismo Octubre 66	Sismo Mayo 70	Sismo Octubre 74
$\beta_{efectivo}$	10%	14%	8%

Diseño de los dispositivos de disipación de energía

Ubicación de los disipadores

Los disipadores se ubicaron en la zona de ventanas de la edificación, cuidando de no interrumpir los accesos. Como primera prueba se emplearon 4 disipadores por piso, en total 16, para estimar los máximos valores de porcentaje de amortiguamiento que se pueden obtener y en forma de diagonal para evitar esforzar las vigas del edificio, según se muestra en la Figura 32.



Vista en 3D del Pabellón B

Vista en elevación

Figura 32: Ubicación de los disipadores

Propuesta de valores para los disipadores

Se empieza hallando una estimación de la constante C de los disipadores utilizando las ecuaciones (3) y (4) y un amortiguamiento efectivo de 14%. La tabla 12 muestra el procedimiento para calcular este valor.

Tabla 12: Estimación de C en base al primer modo de vibración.

Nivel	Número de Disipadores	Mi (Tn-s ² /m)	T (S)	φi	φir	θj	(1) # _{dissip} T (φir) ² cos ² (θ)	(2) 4π.Mi.φi ²	
4	4	39.420	1.11	1.00	0.18	42	0.080	495.4	
3	4	51.630	1.11	0.82	0.26	42	0.164	435.2	
2	4	51.630	1.11	0.56	0.30	42	0.217	203.8	
1	4	53.970	1.11	0.26	0.26	42	0.170	47.0	
							Σ	0.631	1181.4

βefectivo	βañadido	(3) = (1)/(2)	C= βañadido/(3) (tn-s/m)
0.14	0.09	5.34 x 10 ⁻⁴	170

Se obtuvo un valor de C=170 ton-s/m, el cual se redondeó a C=200 ton-s/m (2KN-s/mm). Se utilizó disipadores lineales (α=1) para esta primera iteración.

Estimación del amortiguamiento obtenido por Respuesta en Vibración Libre

Se excitó la estructura mediante un pulso de corta duración y se analizó su respuesta en vibración libre. La figura 33 muestra el desplazamiento del cuarto piso.

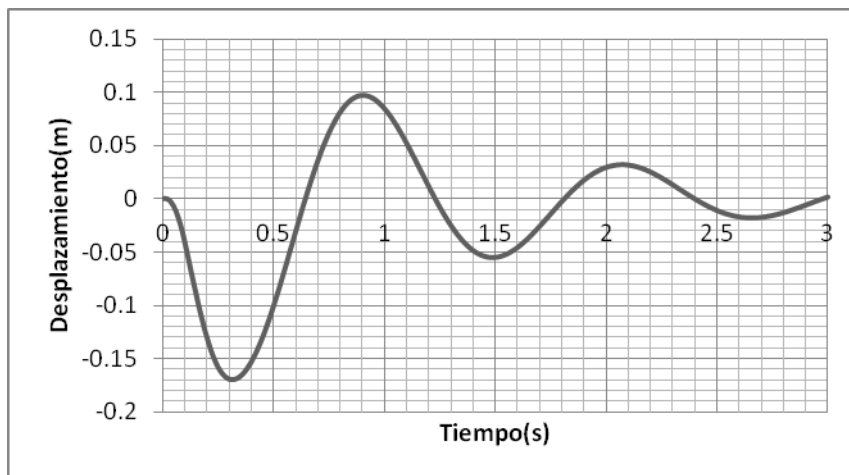


Figura 33: Decremento del desplazamiento de la estructura en función del tiempo. (Tomado del análisis con ETABS).

Del análisis de esta fase de vibración libre se calculó el amortiguamiento efectivo obtenido en base a la ecuación (2)

$$\ln\left(\frac{0.17}{0.055}\right) = \frac{2(1)\pi\beta_{\text{efectivo}}}{\sqrt{1 - \beta_{\text{efectivo}}^2}}$$

Con la cual se obtuvo un amortiguamiento efectivo del orden del 17%.

Evaluación de la estructura frente a los sismos de diseño

Para evaluar la eficacia de los dispositivos, se sometió al edificio a los sismos de diseño en su estado actual y con el reforzamiento propuesto para lo cual se obtuvieron los siguientes resultados:

Las figuras 34 (a) (b) y (c) muestran el desplazamiento en la azotea sometida a los sismos de diseño para los casos con y sin dispositivos de amortiguamiento.

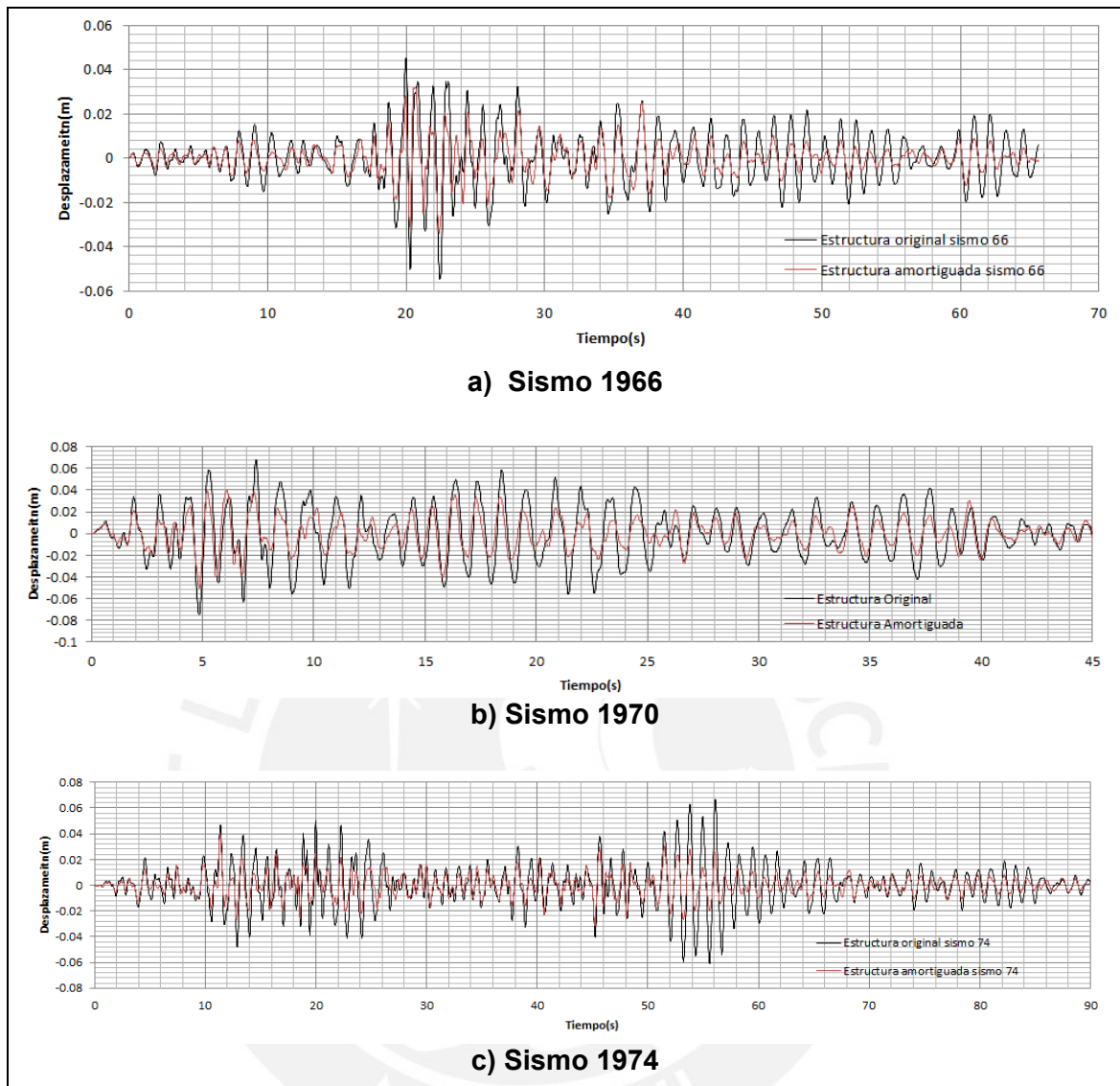


Figura 34: Desplazamiento de la azotea para los distintos sismos de diseño.

La tabla 13 muestra la eficacia obtenida con el uso de disipadores para los tres casos de señales sísmicas.

Tabla 13: Evaluación de la eficacia para las señales de diseño

	Sismo Octubre 66	Sismo Mayo 70	Sismo Octubre 74
Tiempo Transcurrido (s)	22	4.9	11.4
Desplazamiento Máximo Sin Reforzamiento (cm)	5.5	7.5	4.6
Desplazamiento Máximo Con Reforzamiento (cm)	3.5	4.9	3.8
Eficacia (η)	1.6	1.5	1.2

Respuesta a señales de aceleración.

La deriva máxima obtenida como respuesta a las señales sísmicas se presenta en la Tabla 14. El valor máximo fue de 4.1‰, valor que resultó menor que el valor de la deriva objetivo.

Tabla 14: Derivas para cada señal sísmica del edificio reforzado.

	Sismo Octubre 66	Sismo Mayo 70	Sismo Octubre 74
STORY	Deriva (‰)	Deriva (‰)	Deriva (‰)
PISO4	1.7	2.4	1.9
PISO3	3.1	3.2	3.1
PISO2	2.7	4.1	3.1
PISO1	1.6	3.3	2

Estimación del Amortiguamiento Efectivo en base a la respuesta sísmica

Para cada señal empleada se construyeron espectros de diferente amortiguamiento. Para ello, primero se tuvo que obtener el desplazamiento máximo como respuesta a las señales de la estructura (Tabla 15).

Tabla 15: Desplazamientos máximos para cada señal sísmica del edificio reforzado.

	Sismo Octubre 66	Sismo Mayo 70	Sismo Octubre 74
STORY	Desplazamiento (cm)	Desplazamiento (cm)	Desplazamiento (cm)
PISO4	3.5	4.9	3.8
PISO3	2.8	4.1	3.1
PISO2	1.7	2.9	2
PISO1	0.7	1.4	0.8

Luego se calculó la respuesta para los diferentes espectros y se eligió el espectro representativo como aquel para el que se obtuvo el desplazamiento similar a la respuesta en el tiempo.

La Tabla 16 muestra los resultados del amortiguamiento efectivo obtenido para cada acelerograma.

Tabla 16: Amortiguamiento obtenido para cada sismo.

Sismo	Desplazamiento máximo (cm)	Amortiguamiento Efectivo (%)
Octubre 66	3.5	14%
Mayo 70	4.9	18%
Octubre 74	3.8	15%
Valor Promedio	4.1	16%

Desarrollo de análisis espectral con espectros reducidos por amortiguamiento para fines de reforzamiento de elementos.

En función a los resultados obtenidos en los análisis, el amortiguamiento promedio se estimó en 15%. Se creó un espectro reducido (Figura 35) para este amortiguamiento con los valores del FEMA ($B_s=1.55$, $B_1=1.35$) empleando la forma del espectro de la norma peruana.

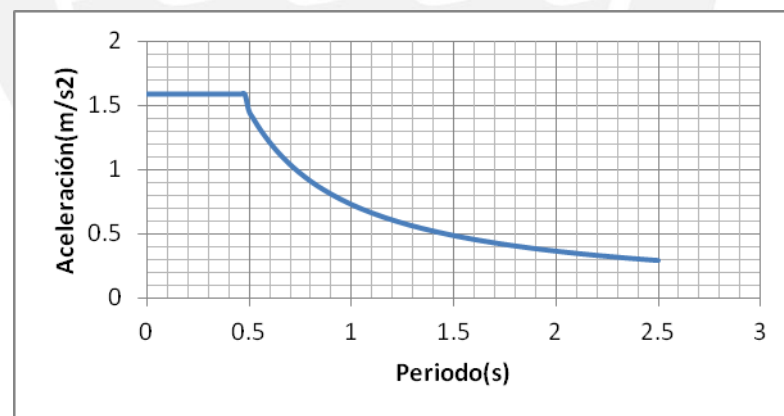


Figura 35: Espectro reducido para 15% de Amortiguamiento

Diseño preliminar de los elementos más importantes existentes.

Con el espectro reducido se realizó el análisis sísmico de la estructura con el fin de ubicar los elementos que tendrían que ser reforzados, tales como vigas y columnas. La Figura 36 muestra las envolventes para momento flector de la viga más cargada en para el sentido longitudinal X-X luego de aplicarse el reforzamiento con disipadores.

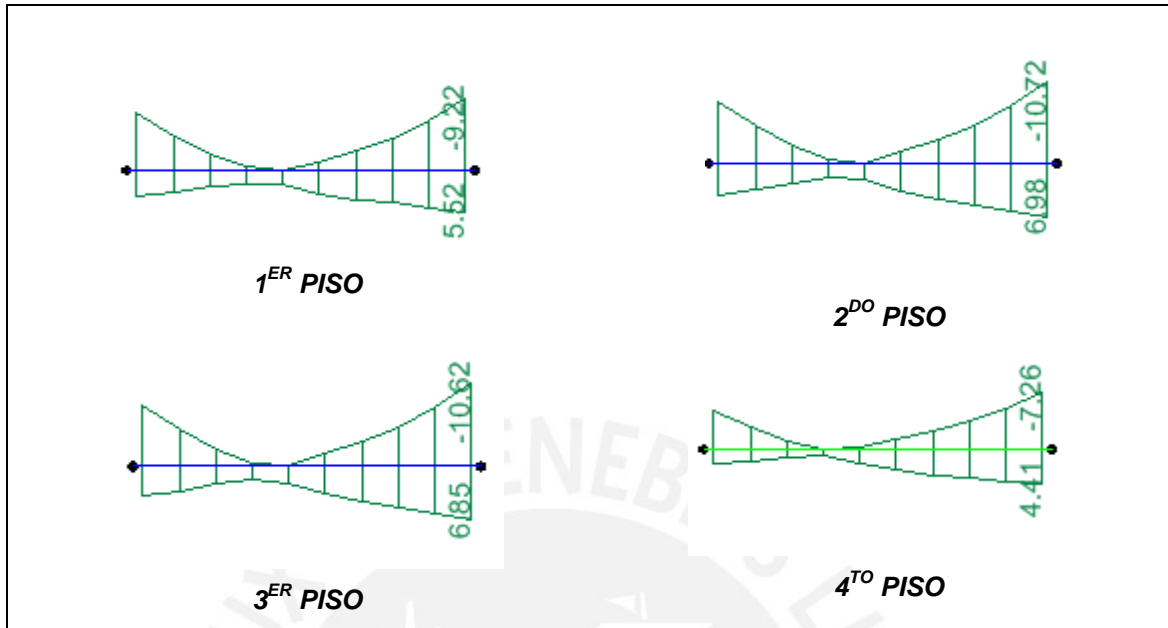


Figura 36: Demanda de momento de viga más resaltante eje X-X del edificio reforzado con disipadores $C=200 \text{ ton-s/m}$, $\alpha=1$

En la tabla 17 se puede observar la relación luego del reforzamiento para la demanda y la capacidad instalada para momentos flectores en las vigas más resaltantes para la dirección longitudinal (X-X).

Tabla 17: Demanda vs Capacidad de vigas del edificio reforzado con disipadores $C=200 \text{ ton-s/m}$, $\alpha=1$

Dirección	PISO	Demanda M_u- (tn-m)	Demanda M_u+ (tn-m)	Capacidad ϕM_n- (tn-m)	Capacidad ϕM_n+ (tn-m)	Demanda/Capacidad M-	Demanda/Capacidad M+
X-X	1	9.22	5.52	4.76	4.27	1.94	1.29
	2	10.72	6.98	4.76	4.27	2.25	1.63
	3	10.62	6.85	4.76	4.27	2.23	1.60
	4	7.26	4.41	4.00	2.92	1.82	1.51

Se puede notar que la relación demanda vs capacidad ha disminuido. La tabla 18 muestra los porcentajes de variación para cada piso de una viga del edificio sin reforzar con el edificio reforzado.

Tabla 18: Variación Demanda vs Capacidad entre edificio reforzado y sin reforzar

Nivel	Edificio Sin Reforzar		Edificio Reforzado	
	Demanda/ Capacidad	Demanda/ Capacidad	Demanda/ Capacidad	Demanda/ Capacidad
	M-	M+	M-	M+
4to Piso	2.3	2.9	1.94	1.29
3er Piso	2.7	2.4	2.25	1.63
2do Piso	2.5	2.2	2.23	1.6
1er Piso	3.2	3.9	1.82	1.51

Según el análisis de los diagramas de interacción de las columnas principales del pabellón (Figuras 37 y 38), se concluye que la capacidad resistente de las columnas es menor que las demandas por sismo.

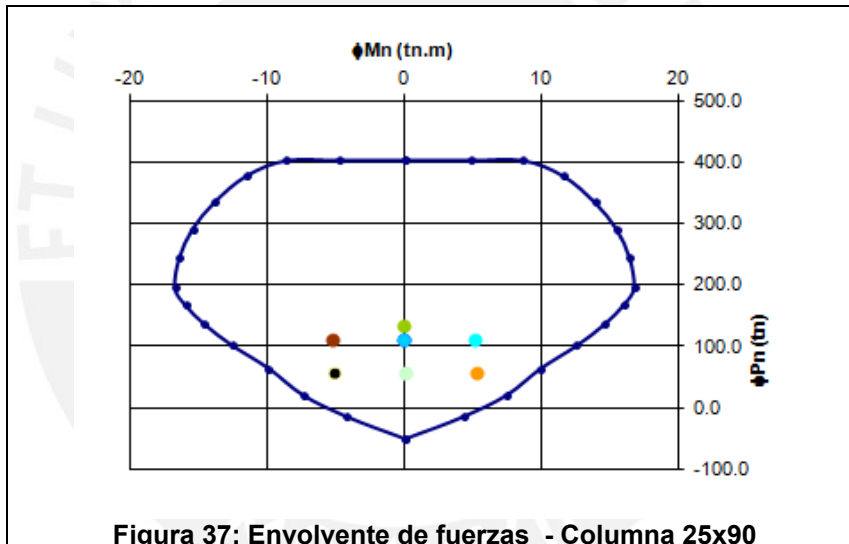


Figura 37: Envolvente de fuerzas - Columna 25x90

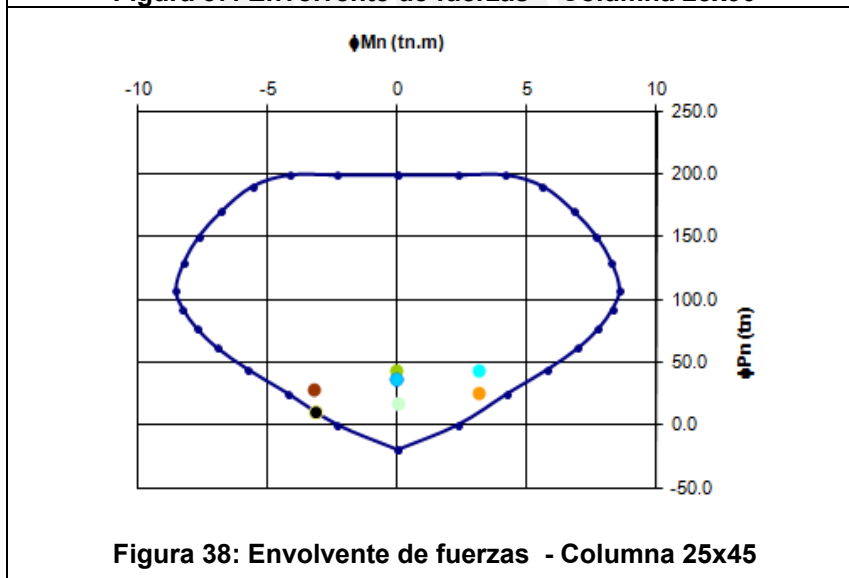
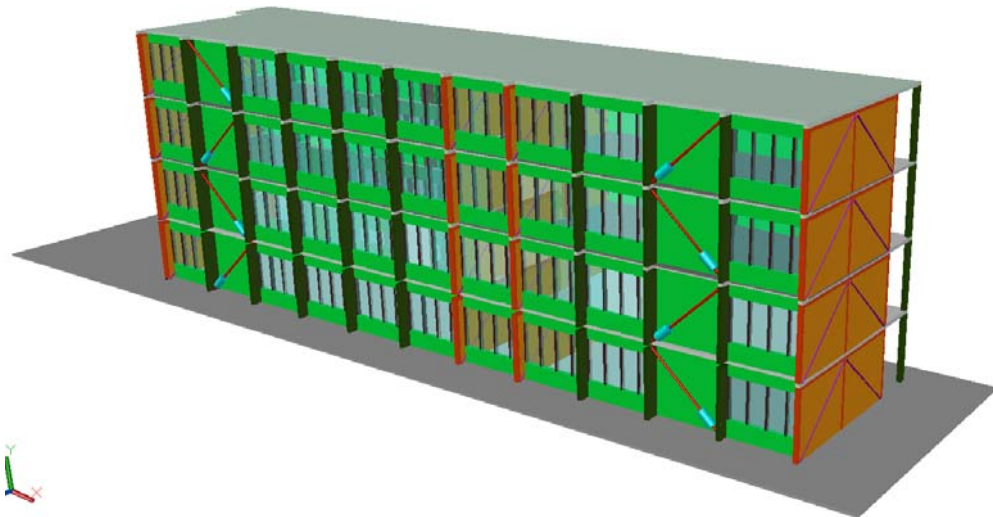


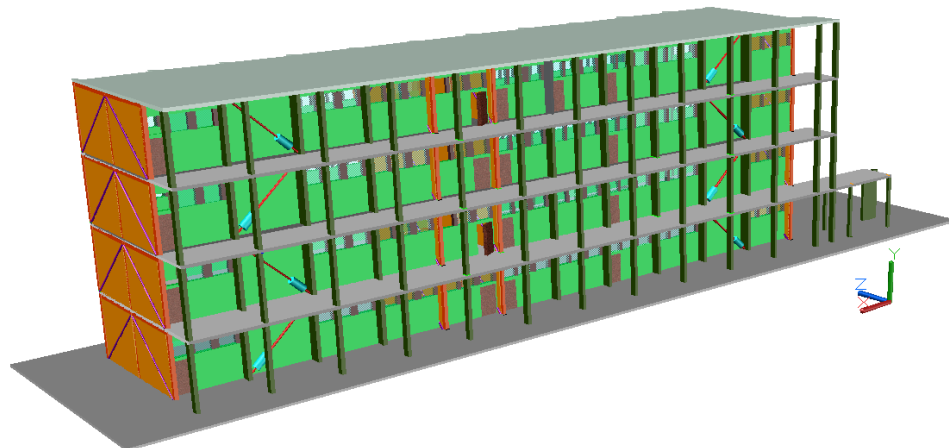
Figura 38: Envolvente de fuerzas - Columna 25x45

6.2.3 Esquema del reforzamiento propuesto

La propuesta final (Figura 39) consta en un reforzamiento con disipadores de energía en el sentido longitudinal, y para la dirección transversal arriostres metálicos a ambos lados de los muros.



Elevación Principal del Pabellón B



Elevación Secundaria del Pabellón B

Figura 39: Modelo en 3D del reforzamiento propuesto.

Sentido Longitudinal(X-X)

Se iteró con valores de $C = 200, 300, 400, 500, 600$ y 700 Tn-s/m y de $\alpha = 0.7, 0.9$ y 1 . Este rango limitado de α se empleó para lograr que las fuerzas en las columnas por desplazamientos laterales estuvieran desacopladas con las fuerzas provenientes de los disipadores.

Se eligieron los siguientes valores: $C = 500 \text{ Tn-s/m}$, $\alpha = 0.9$, Fuerza máxima = 50 Tn. En el mercado local sólo se encuentran de marca Taylor. Se colocaron cuatro dispositivos por piso en configuración diagonal. La Figura 40 muestra su distribución en elevación.

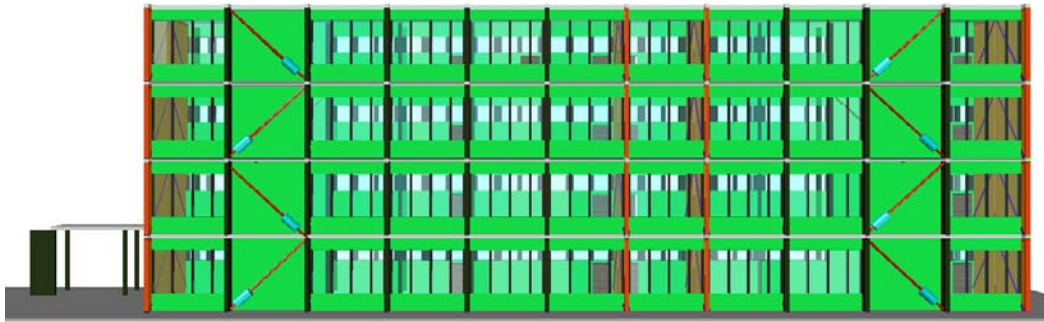


Figura 40: Elevación longitudinal con la ubicación propuesta de los disipadores.

Sentido Transversal (Y-Y)

Los arriostres metálicos tendrán diferentes dimensiones. En los dos primeros pisos serán tubos circulares HSS 8.625x0.375 y en el tercer y cuarto piso serán de HSS 7.5x0.375. Estos arriostres se ubicaron en ambos lados de los cuatro muros de albañilería presentes en la edificación.

La figura 41 muestra la forma de ubicación de los arriostres en cada lado del muro.

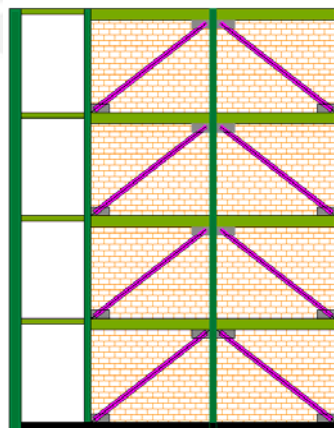


Figura 41: Vista de reforzamiento de muros con arriostres metálicos a cada lado.

6.2.4 Respuesta Tiempo- Historia del Edificio Reforzado

Los desplazamientos y deriva máximos obtenidos como respuesta a las señales sísmicas de la estructura reforzada se muestran en la Tabla 19. La deriva máxima es de 3.6‰, la cual es menor a la deriva objetivo.

Tabla 19: Máximos desplazamientos y deriva por piso del edificio reforzado.

STORY	Sismo Octubre 66		Sismo Mayo 70		Sismo Octubre 74	
	Desplazamiento (cm)	Deriva (‰)	Desplazamiento (cm)	Deriva (‰)	Desplazamiento (cm)	Deriva (‰)
PISO4	3.6	1.8	4.3	2.1	3.6	1.8
PISO3	3.0	2.7	3.6	2.8	2.9	2.7
PISO2	2.0	2.9	2.5	3.6	2.0	2.9
PISO1	0.9	2.2	1.2	2.9	0.9	2.1

Utilizando las 3 señales sísmicas, se construyó la envolvente de fuerzas internas. Para efectos de diseño las fuerzas internas se tuvieron que dividir por el factor de reducción $R=6$ y multiplicarse por el factor de uso $U=1.5$. Así, las fuerzas obtenidas son comparables con los resultados dados por el análisis con el espectro normativo.

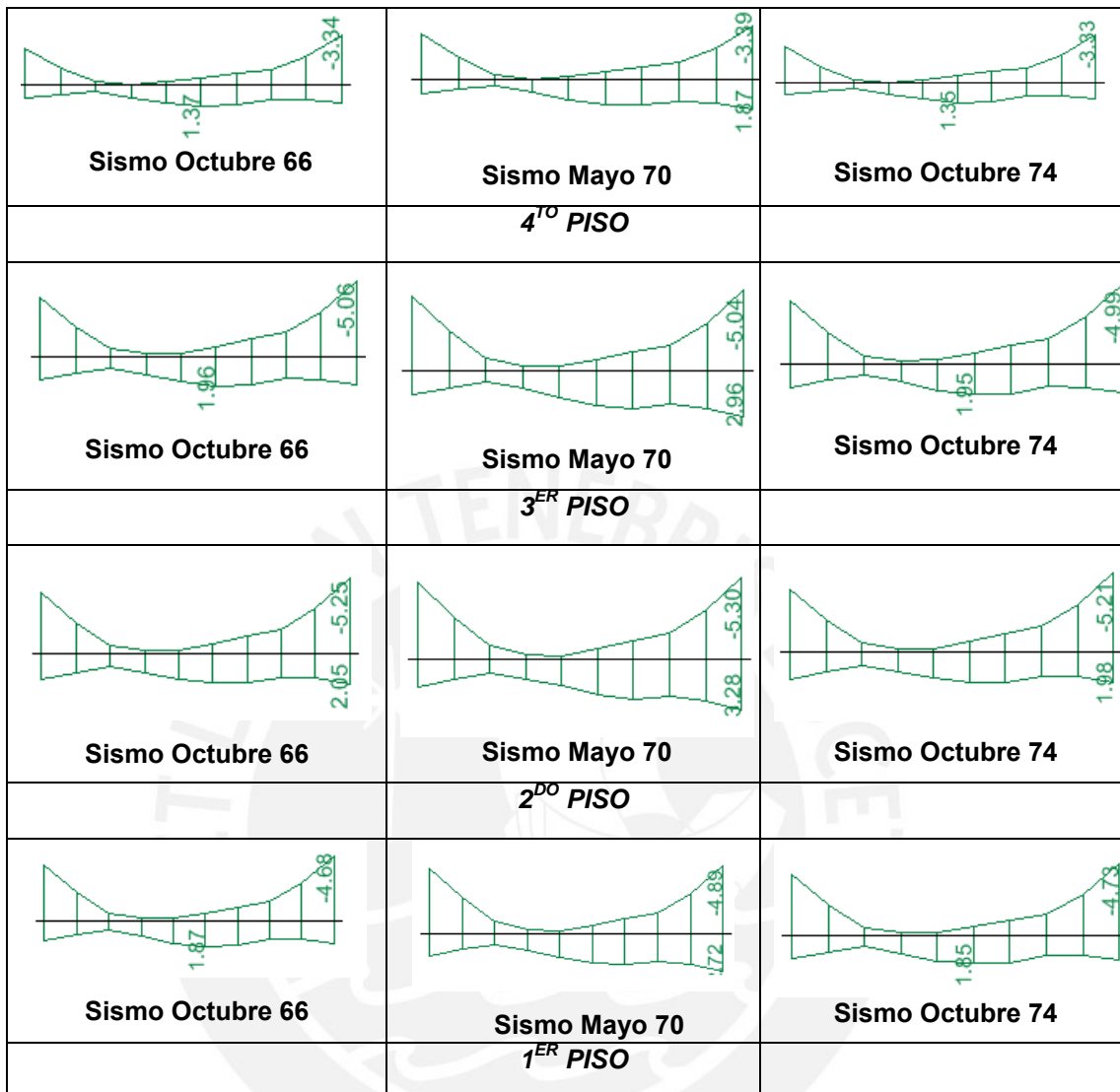


Figura 42: Envolvente de momentos de la viga más cargada según el análisis tiempo-historia(X-X)

Para las sollicitaciones sísmicas de la viga, la demanda es menor que la capacidad de la viga (Tabla 20). Con ello se espera que las vigas presenten un comportamiento dúctil ante un evento sísmico moderado.

Tabla 20: Demanda vs Capacidad de la viga del edificio reforzado según análisis Tiempo-Historia.

DIRECCION	PISOS	ϕM_n- (ton-m)	ϕM_n+ (ton-m)	Demanda Mu-	Demanda Mu+	Demanda/ Capacidad	Demanda/ Capacidad
X-X	PISO 1	4.76	4.27	4.89	1.72	1.03	0.40
	PISO 2	4.76	4.27	5.30	3.18	1.11	0.74
	PISO 3	4.76	4.27	5.05	2.96	1.06	0.69
	PISO 4	4.00	2.92	3.39	1.87	0.85	0.64

6.2.5 Evaluación del Amortiguamiento añadido

Según vibración libre.

La figura 43 muestra el decremento de los desplazamientos para la edificación en vibración libre.

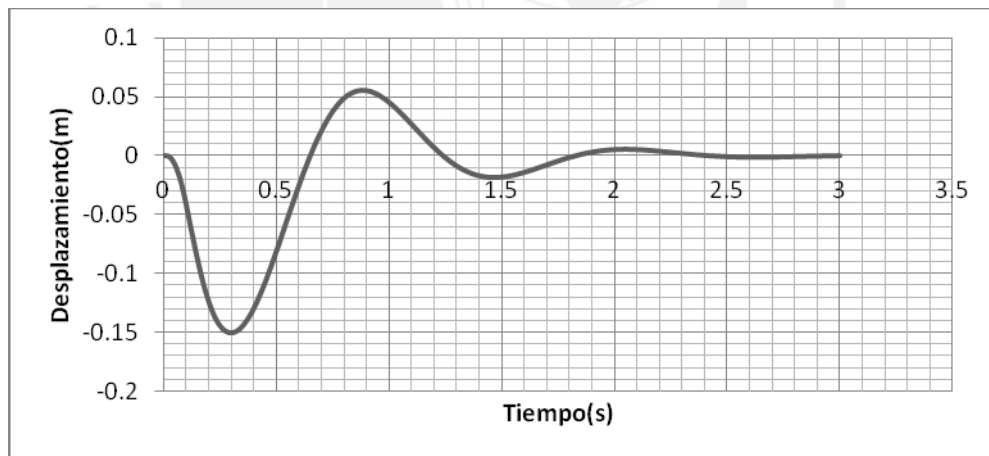


Figura 43: Historia de desplazamiento del edificio reforzado

Del análisis de esta fase de vibración libre se calculó el amortiguamiento efectivo obtenido en base a la ecuación (2), con lo que se estimó en 25%.

$$\ln\left(\frac{15.3}{2.8}\right) = \frac{2(1)\pi\beta_{efectivo}}{\sqrt{1-\beta_{efectivo}^2}}$$

Según la respuesta de los acelerogramas.

Para hallar el amortiguamiento se tuvo que calcular el espectro representativo con la respuesta del análisis tiempo- historia. Para ello se comparó el desplazamiento máximo de la respuesta en el tiempo con las distintas respuestas espectrales. La Tabla 21 muestra los resultados del amortiguamiento efectivo obtenido para cada acelerograma.

Tabla 21: Amortiguamiento efectivo por sismo del edificio reforzado.

Sismo	Desplazamiento máximo (cm)	Amortiguamiento (%)
Octubre 66	3.6	15%
Mayo 70	4.3	24%
Octubre 74	3.6	20%

Tomando un promedio de los valores obtenidos para las 3 señales, se ha obtenido un amortiguamiento efectivo del 20%.

Utilizando el modo fundamental de vibración.

Con el valor de $C = 500 T_n - s/m$, el modo fundamental y la inclinación de los disipadores, de la ecuación (3-2) se obtuvo un amortiguamiento efectivo aproximado de 30%.

Haciendo un promedio de los 3 valores obtenidos por los diferentes métodos de cálculo del amortiguamiento efectivo, se puede estimar que el amortiguamiento efectivo logrado para el edificio en estudio es del 25%.

6.2.6 Combinaciones y envolventes de diseño

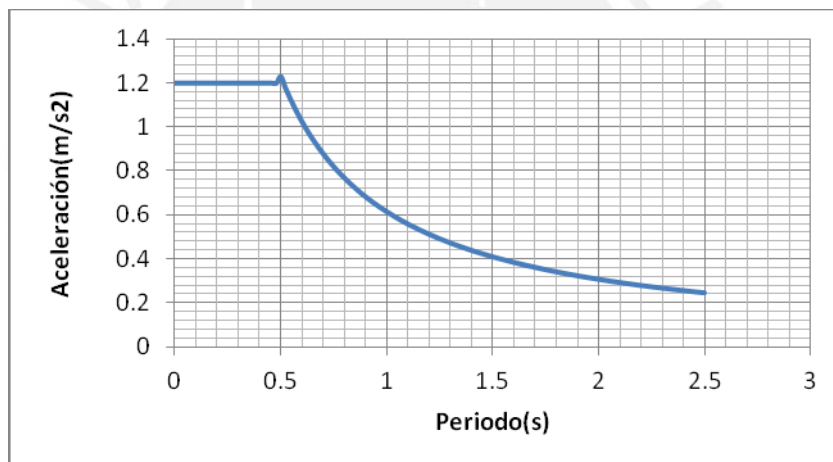
Para las combinaciones de diseño se emplea un espectro reducido por amortiguamiento y ductilidad.

Para el Sentido Longitudinal(X-X)

Utilizando el amortiguamiento obtenido, se emplean los factores de reducción propuestos por el FEMA 356 [FEM2000] para reducir el espectro de diseño de manera que esté acorde con el amortiguamiento añadido a la estructura. Para un valor promedio obtenido del 25% le corresponden factores de reducción espectral para la plataforma y para la zona descendente de $B_s = 2.05$ y $B_1 = 1.6$ respectivamente.

Con estos valores se construyó el espectro de diseño mostrado en la figura 44.

Figura 44: Espectro de diseño para reforzamiento



Se calculó la respuesta espectral y se obtuvieron valores de deriva e índices de giro que se muestran en la tabla 22.

Tabla 22: Derivas e índice de giro del edificio reforzado(X-X)

PISO	Derivas(‰)	Índice de Giro
4	3.8	1.07
3	4.6	1.04
2	5.4	1.02
1	4.5	1

Estos valores son coincidentes con los obtenidos en el análisis tiempo- historia en un promedio del 75%. La tabla 23 muestra el porcentaje de variación de deriva para cada piso.

Tabla 23: Derivas obtenidas por el análisis espectral y por el tiempo-historia

PISO	Derivas(‰) según espectro	Derivas(‰) según tiempo-historia	Discrepancia $\Delta TH/\Delta Espectral$ (%)
4	3	2	67
3	4	3	75
2	5	4	80
1	4	3	75

Con los resultados del análisis espectral se realizaron las combinaciones y se consideró el factor de uso 1.5. Para la viga más representativa del proyecto se construyeron las envolventes, como se muestra en la figura 45,

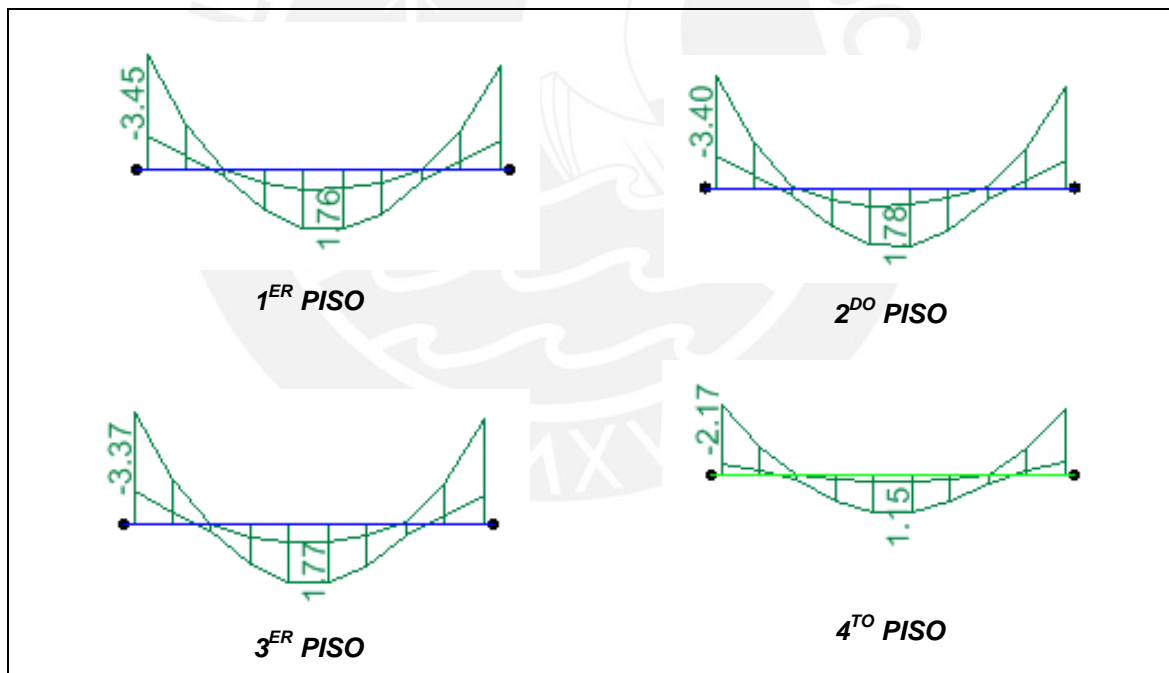


Figura 45: Envolvente de momentos de la viga más cargada(X-X) según el análisis espectral

Se concluye que la demanda de la viga es menor que su capacidad (Tabla 24), por lo que se esperaría un comportamiento adecuado de los elementos ante un evento sísmico.

Tabla 24: Demanda vs Capacidad de la viga del edificio reforzado según análisis espectral reducido.

Dirección	PISO	Demanda Mu- (tn-m)	Demanda Mu+ (tn-m)	Capacidad ϕ Mn- (tn-m)	Capacidad ϕ Mn+ (tn-m)	Demanda/Capacidad M-	Demanda/Capacidad M+
X-X	1	3.45	1.76	4.76	4.27	0.73	0.41
	2	3.40	1.78	4.76	4.27	0.71	0.42
	3	3.37	1.77	4.76	4.27	0.71	0.41
	4	2.17	1.15	4.00	2.92	0.54	0.39

Estos valores de envolvente, son concordantes con los obtenidos en el análisis tiempo- Historia en promedio en un 80% (Tabla 25).

Tabla 25: Demanda de vigas por análisis tiempo- historia y por espectro reducido

PISO	Tiempo Historia (a)	Espectro Reducido (b)	Discrepancia (b/a)
Momento Positivo	1.96	1.78	0.91
Momento Negativo	5.33	3.45	0.65

Los valores obtenidos son menores a la demanda por momento flector, y junto con los resultados del análisis tiempo historia, dados en la tabla 16, muestran que la resistencia es suficiente, y que el diseño es satisfactorio.

Para las columnas se construyó el diagrama de interacción y en él se ubicaron los valores de P y M correspondiente a las combinaciones y a las fuerzas generadas por los disipadores. Las figuras 46 y 47 muestran el diagrama de interacción de las dos columnas más cargadas. La capacidad resistente de las columnas resultó ser mayor que la demanda combinada.

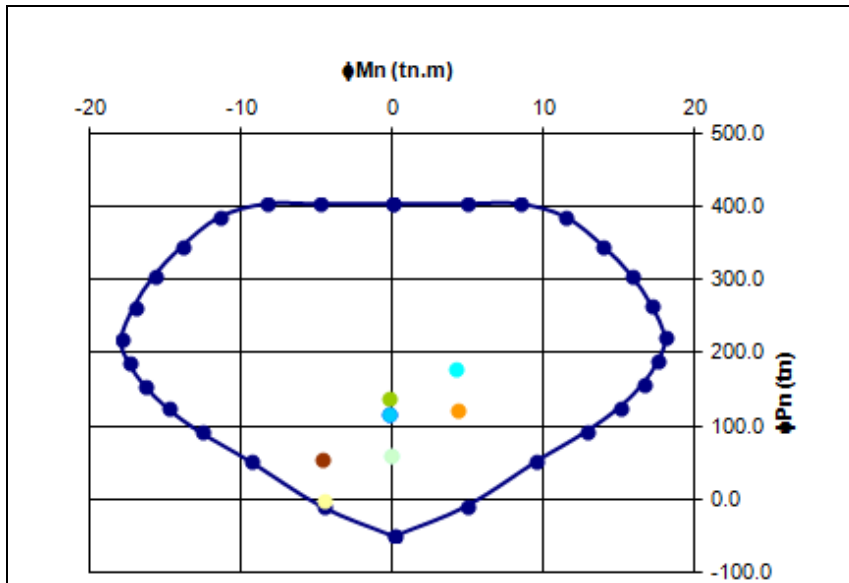


Figura 46: Envolvente de fuerzas - Columna 25x90

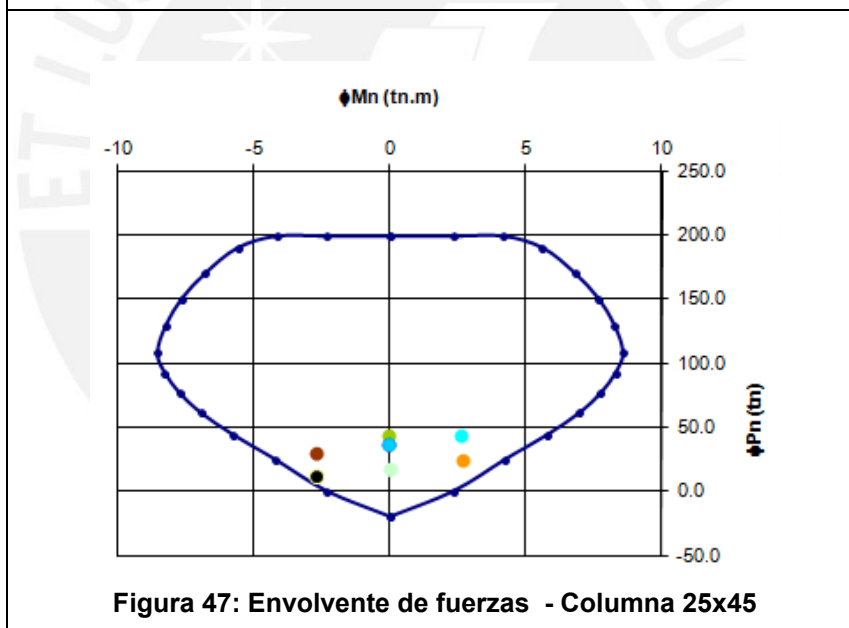


Figura 47: Envolvente de fuerzas - Columna 25x45

Sentido transversal (Y-Y)

Luego de colocar los arriostres se obtuvieron los desplazamientos y derivas máximos (Tabla 26). Para la albañilería se comprueba que la deriva es menor que la permisible por nuestra norma.

Tabla 26: Desplazamiento y deriva máxima en el sentido transversal luego del reforzamiento.

Piso	Desplazamiento (cm)	Deriva ‰
PISO4	1.9	2.6
PISO3	1.2	2.5
PISO2	0.6	1.8
PISO1	0.1	0.4

Con los resultados del análisis espectral se realizaron las combinaciones de carga. Para las vigas se construyeron las envolventes, tal como se muestra en la figura 48, para la viga más representativa del sentido transversal.

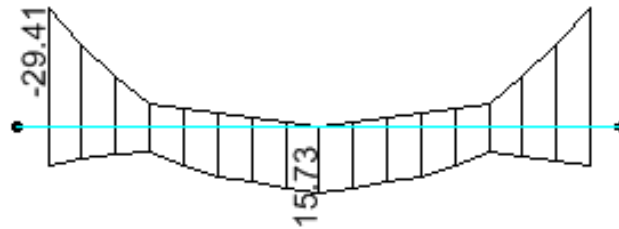


Figura 48: Envoltorio de momentos de la viga Y-Y más esforzada de la estructura reforzada.

Para las solicitaciones sísmicas de la viga, la demanda es mayor que la capacidad en el extremo superior (Tabla 27). Sin embargo, se puede hacer una redistribución de momentos, disminuyendo los momentos negativos y transfiriéndolos a la zona de positivos como lo permite el capítulo 8.4 de la norma técnica E60 de Concreto Armado [NTE1999].

Tabla 27: Demanda vs Capacidad de la viga Y-Y más cargada del edificio reforzado.

VIGA	PISO	ϕM_n - (ton-m)	ϕM_n+ (ton-m)	Demanda Mu-	Demanda Mu+	Demanda/ Capacidad	Demanda/ Capacidad
V-01 (extremos)	PISO 1	20.78	13.57	24.31	3.69	1.2	0.3
	PISO 2			28.04	7.66	1.3	0.6
	PISO 3			29.41	9.03	1.4	0.7
	PISO 4	22.40	13.57	23.34	7.63	1.0	0.6
V-01 (centro)	PISO 1	9.87	29.49	2.56	15.78	0.3	0.5
	PISO 2			5.12	15.67	0.5	0.5
	PISO 3			5.91	15.73	0.6	0.5
	PISO 4	9.87	26.11	4.83	12.53	0.5	0.5

6.2.7 Reforzamiento de columnas

Los disipadores escogidos podrán generar una fuerza máxima de 50 Ton. Según el análisis tiempo historia, los dispositivos generan una fuerza axial de 60 Ton en las columnas, y debido a ello la capacidad de la sección se lleva al límite del diagrama de interacción (Figura 46), por ello se optó por reforzar las columnas para que puedan resistir de manera satisfactoria las solicitaciones agregadas. El reforzamiento propuesto se presenta en la Figura 49.

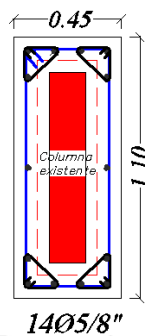


Figura 49: Reforzamiento propuesto para las columnas.

Este será aplicado a las siguientes columnas (Figura 50):

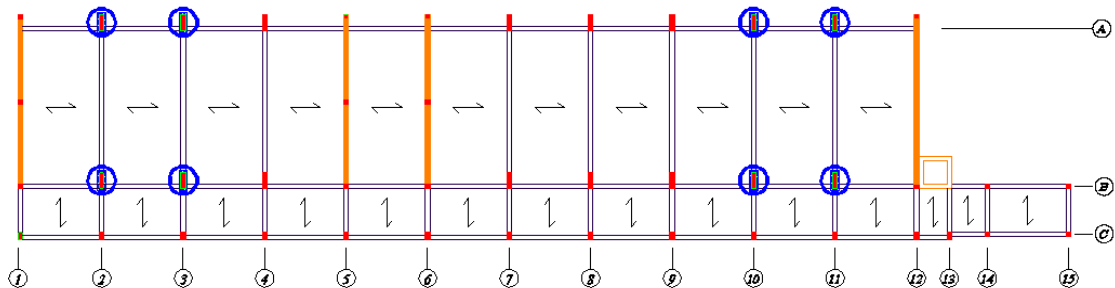


Figura 50: Ubicación de las columnas a reforzar.

6.2.8 Evaluación de la solución adoptada

Sentido Longitudinal

Luego de realizar el análisis de la estructura reforzada se obtiene una deriva máxima de 4%, con lo que concluye que según Hazus [HAZ1999] el edificio presentará un daño moderado frente a un evento sísmico, debido a que su deriva se mantiene por debajo del 5%.

Las columnas reforzadas tienen una capacidad resistente, mayor a la combinación de la demanda combinada por el sismo, las cargas vivas, muertas y las añadidas debido al funcionamiento de los disipadores.

Las vigas, luego de una redistribución de momentos, tienen una capacidad menor a la demanda, lo que concluye que no presentarán una falla frágil ante un evento sísmico.

Sentido Transversal

Los resultados del análisis del edificio utilizando como refuerzo los arriostres metálicos indican que la deriva se mantiene en el orden de 3‰. Al comparar con la deriva permisible dada por la norma NTE-E070 de 5‰, podemos concluir que se ha mejorado el desempeño de la estructura frente al evento sísmico severo.

Al igual que en el sentido longitudinal, las vigas de no presentarán una falla frágil ante un evento sísmico.

Capítulo 7

Conclusiones y Recomendaciones

- El edificio sin reforzar alcanzaría una deriva del 12% ante el sismo de diseño de 500 años de periodo de retorno. Dadas las características estructurales propias de la época en la que se construyó el edificio, la estructura quedaría seriamente dañada de alcanzar esta deriva.
- Los resultados de este trabajo muestran que es posible lograr un amortiguamiento efectivo del orden del 25% en edificaciones educativas de poca altura proyectada sin criterios efectivos de diseño sismorresistente.
- Utilizando dispositivos de fluido viscoso la deriva máxima se mantendría por debajo de 5% y por tanto es de esperar que el daño en un terremoto severo se mantenga controlado y el edificio pueda ser luego reparado.
- Las demandas de resistencia por parte del espectro reducido por amortiguamiento añadido son mayores que las obtenidas por el análisis tiempo historia.
- El costo de cada uno de los dispositivos para esta estructura está en \$6000.00, por lo cual, para los 16 disipadores requeridos el precio es de \$96,000.00 sin incluir el reforzamiento localizado ni los elementos de fijación y transferencia de cargas.
- Se recomienda que, dadas las condiciones del Pabellón B, su importancia, y su posibilidad de daño severo ante un evento sísmico, éste sea reforzado a la brevedad posible.

Bibliografía

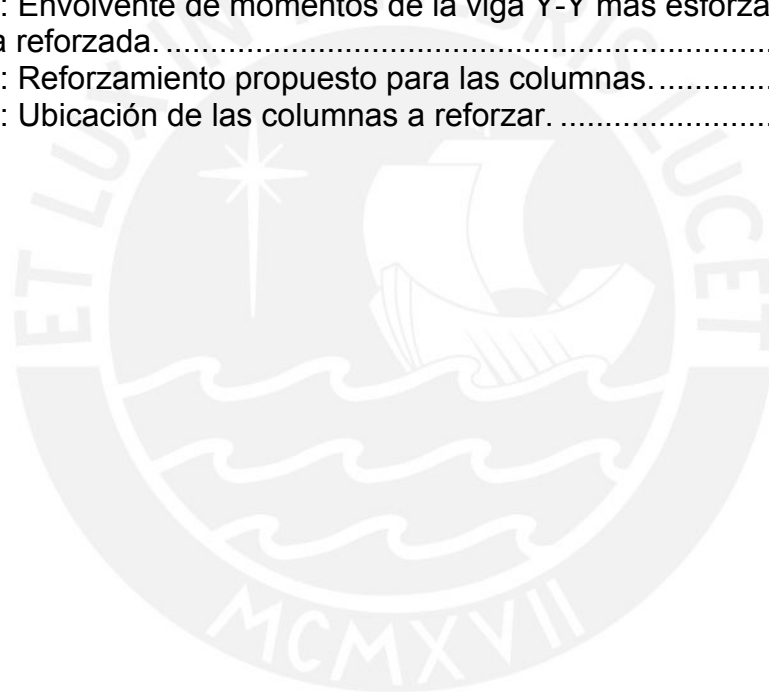
- [FEM2000] American Society of Engineers. "FEMA 356 - Prestandard and Commentary for the Seismic Rehabilitation of Building". Federal Emergency Management Agency. Washington, EE.UU. 2000.
- [NTE1999] Ministerio de Vivienda, Construcción y Saneamiento. "Norma Técnica de Edificación E060 Concreto Armado". Lima, Perú. 2009.
- [HAZ1999] Federal Emergency Management Agency FEMA. "Earthquake Loss Estimation Methodology". Washington DC.1999.
- [MUÑOZ2009] Alejandro Muñoz Peláez: Apuntes del Curso de Ingeniería Antisísmica. Pontificia Universidad Católica del Perú. Lima, Perú. 2009.
- [BUF1997] Universidad de Buffalo. Testing of Elastomeric Bearings.
URL: <http://nees.buffalo.edu/seesl/a17.html>
- [SMC1997] Sumitomo Mitsui Construction. Lead Rubber Isolator Device.
URL: http://www.smcon.co.jp/english/thchnology/base_isolation.html
- [MCC2004] Michael C. Constantinou. "Passive Energy Dissipation Systems in Structural Engineering". John Wiley and Sons, Ltd. 1997.
- [SOO1997] T.T. Soong, G.F. Dargush. "Friction Pendulum Doble Concave Bearing". Universidad de Buffalo. 2004.
- [BUF0001] Universidad de Buffalo. Devices and Models of Metallic Dampers.
URL: http://civil.eng.buffalo.edu/technion/Lecture5_12_Devices_and_Models.ppt
- [CON0002] Universidad de Concordia. Department of Building Civil and Environmental Engineering.
URL: http://www.bcee.concordia.ca/department/About_Department.htm

- [DIS0003] Dynamic Isolation Systems.
URL: www.dis-inc.com/products.html
- [TAY0004] Douglas P. Taylor. "Seismic Dampers for the Torre Mayor Project". Taylor Devices Inc. New York.
- [TAY1998] Taylor Devices. "Here is how it works".
URL: <http://www.taylordevices.com/Tech-Paper-archives/literature-pdf/54-%20HowItWorks.pdf>
- [SYM2002] Symans, Michael. Presentación: "Seismic Protective Systems: Passive Energy Dissipation". Rensselaer Polytechnic Institute. 2002.
- [NYH1982] N.M. Newmark, W.J. Hall. "Earthquake Spectra and Design". Earthquake Engineering Research Institute. Berkeley, California, 1982.
- [OMR2000] Ramirez, Oscar M. "Development and evaluation of simplified procedures for analysis and design of buildings with passive energy dissipation systems". MCEER, Buffalo, New York, 2000.
- [PER2002] Pérez Arzola, Juan Carlos. "Vulnerabilidad Sísmica y Reforzamiento del Pabellón B de la Facultad de Ciencias e Ingeniería". Tesis para optar el título de Ingeniero Civil. Lima, Pontificia Universidad Católica del Perú, Facultad de Ciencias e Ingeniería. 2002

Lista de Figuras

Figura 1: Disminución de la demanda sísmica por medio de aisladores.....	8
Figura 2: Aislador de Caucho Natural (NRB)	9
Figura 3: Aislador Caucho con Núcleo de Plomo (LRB)	9
Figura 4: Aislador de péndulo friccionante	9
Figura 5: Geometría de los disipadores metálicos.	10
Figura 6: Comportamiento idealizado de los disipadores de fluencia	10
Figura 7: Dispositivo ADAS (flexión)	11
Figura 8: Comportamiento idealizado de los disipadores friccionantes.....	11
Figura 9: Disipadores Pall	11
Figura 10: Comportamiento idealizado de los disipadores viscoelásticos.....	12
Figura 11: Muro Disipadores WVD.....	12
Figura 12: Comportamiento idealizado de los disipadores de fluido viscoso. .	12
Figura 13: Disipadores Taylor en el reforzamiento del edificio Torre Mayor	12
Figura 14: Relación Fuerza-Desplazamiento en Dispositivos	13
Figura 15: Relación Fuerza-Desplazamiento en Dispositivos	14
Figura 16: Energía disipada por los	15
Figura 17: Funcionamiento del disipador de energía de fluido viscoso.....	16
Figura 18: Configuración Chevron Brace	17
Figura 19: Configuración Chevron Brace Invertida.	17
Figura 20: Configuración Diagonal.....	18
Figura 21: Configuración Scissor Jack.....	18
Figura 22: Espectro al 5% y al 30% de amortiguamiento crítico.	28
Figura 23: Elevación del Pabellón B	32
Figura 24: Planta del Pabellón B.....	33
Figura 25: Pabellón B - PUCP.....	34
Figura 26: Modelo Matemático del Pabellón B.....	34
Figura 27: Espectros utilizados para el análisis sísmico	35
Figura 28: Envolvente de momentos de viga edificio sin reforzar - Sentido X-X	37
Figura 29: Envolvente de momentos de viga edificio sin reforzar - Sentido Y-Y	37
Figura 30: Envolvente de fuerzas edificio sin reforzar - Columna 25x90	38
Figura 31: Envolvente de fuerzas edificio sin reforzar- Columna 25x45	38
Figura 32: Ubicación de los disipadores	44
Figura 33: Decremento del desplazamiento de la estructura en función del	45
Figura 34: Desplazamiento de la azotea para los distintos sismos de diseño. 46	
Figura 35: Espectro reducido para 15% de Amortiguamiento.....	48
Figura 36: Demanda de momento de viga más resaltante eje X-X del edificio reforzado con disipadores $C=200 \text{ ton-s/m}$, $\alpha=1$	49
Figura 37: Envolvente de fuerzas - Columna 25x90	50

Figura 38: Envoltorio de fuerzas - Columna 25x45	50
Figura 39: Modelo en 3D del reforzamiento propuesto.	51
Figura 40: Elevación longitudinal con la ubicación propuesta de los disipadores.	52
Figura 41: Vista de reforzamiento de muros con arriostres metálicos a cada lado.	52
Figura 42: Envoltorio de momentos de la viga más cargada según el análisis tiempo- historia(X-X)	54
Figura 43: Historia de desplazamiento del edificio reforzado	55
Figura 44: Espectro de diseño para reforzamiento	57
Figura 45: Envoltorio de momentos de la viga más cargada(X-X) según el análisis espectral.....	58
Figura 46: Envoltorio de fuerzas - Columna 25x90	60
Figura 47: Envoltorio de fuerzas - Columna 25x45	60
Figura 48: Envoltorio de momentos de la viga Y-Y más esforzada de la estructura reforzada.	61
Figura 49: Reforzamiento propuesto para las columnas.....	62
Figura 50: Ubicación de las columnas a reforzar.	62



Lista de Tablas

Tabla 1: FEMA 356- Niveles de desempeño esperado por peligro sísmico.....	4
Tabla 2: Niveles de Objetivos de Rehabilitación	4
Tabla 3: Descripción de los niveles de desempeño	5
Tabla 4: Niveles de tipo de daño por exigencias de diseño de Código Bajo	6
Tabla 5: Factores de reducción (B) según FEMA 356	27
Tabla 6: Deriva e índice de giro del edificio sin reforzar.....	35
Tabla 7: Demanda vs Capacidad de Vigas del Edificio Sin Reforzar	37
Tabla 8: Valores de rigidez efectiva (Tomado de la Tabla 6-5 del FEMA 356)	42
Tabla 9: Desplazamientos y derivas de la estructura sin reforzar con el análisis tiempo- historia.....	42
Tabla 10: Factores de reducción para obtener la deriva objetivo (Δ_{obj})	43
Tabla 11: Amortiguamiento efectivo necesario para lograr la deriva objetivo ..	43
Tabla 12: Estimación de C en base al primer modo de vibración.	44
Tabla 13: Evaluación de la eficacia para las señales de diseño	46
Tabla 14: Derivas para cada señal sísmica del edificio reforzado.....	47
Tabla 15: Desplazamientos máximos para cada señal sísmica del edificio reforzado.....	47
Tabla 16: Amortiguamiento obtenido para cada sismo.	48
Tabla 17: Demanda vs Capacidad de vigas del edificio.....	49
Tabla 18: Variación Demanda vs Capacidad entre edificio reforzado y sin reforzar.....	50
Tabla 19: Máximos desplazamientos y deriva por piso del edificio reforzado..	53
Tabla 20: Demanda vs Capacidad de la viga del edificio reforzado según análisis Tiempo- Historia.	55
Tabla 21: Amortiguamiento efectivo por sismo del edificio reforzado.	56
Tabla 22: Derivas e índice de giro del edificio reforzado(X-X)	57
Tabla 23: Derivas obtenidas por el análisis espectral y por el tiempo-historia .	58
Tabla 24: Demanda vs Capacidad de la viga del edificio reforzado según análisis espectral reducido.....	59
Tabla 25: Demanda de vigas por análisis tiempo- historia y por espectro reducido	59
Tabla 26: Desplazamiento y deriva máxima en el sentido transversal luego del reforzamiento.	61
Tabla 27: Demanda vs Capacidad de la viga Y-Y más cargada del edificio reforzado.....	61