



**UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO**  
PROGRAMA DE MAESTRÍA Y DOCTORADO EN INGENIERÍA  
Ingeniería Civil – Estructuras

EDIFICIOS CON AISLADORES DE BASE DEL TIPO PÉNDULO DE FRICCIÓN  
SOMETIDOS A VIENTO TURBULENTO

TESIS  
QUE PARA OPTAR POR EL GRADO DE:  
MAESTRO EN INGENIERÍA

PRESENTA:  
JOSÉ MANUEL RAMÍREZ TAPIA

TUTOR:  
Dr. Adrián Pozos Estrada  
Instituto de Ingeniería UNAM

Ciudad de México, julio de 2021



Universidad Nacional  
Autónoma de México

Dirección General de Bibliotecas de la UNAM

**Biblioteca Central**



**UNAM – Dirección General de Bibliotecas**  
**Tesis Digitales**  
**Restricciones de uso**

**DERECHOS RESERVADOS ©**  
**PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL**

Todo el material contenido en esta tesis esta protegido por la Ley Federal del Derecho de Autor (LFDA) de los Estados Unidos Mexicanos (México).

El uso de imágenes, fragmentos de videos, y demás material que sea objeto de protección de los derechos de autor, será exclusivamente para fines educativos e informativos y deberá citar la fuente donde la obtuvo mencionando el autor o autores. Cualquier uso distinto como el lucro, reproducción, edición o modificación, será perseguido y sancionado por el respectivo titular de los Derechos de Autor.



## **JURADO ASIGNADO:**

Presidente: Dr. Escobar Sánchez José Alberto

Secretario: Dr. Díaz López Orlando Javier

1<sup>er.</sup> Vocal: Dr. Pozos Estrada Adrián

2<sup>do.</sup> Vocal: Dr. Gómez Martínez Roberto

3<sup>er.</sup> Vocal: Dr. Guerrero Bobadilla Héctor

Lugar donde se realizó la tesis: **Instituto de Ingeniería de la UNAM**

### **TUTOR DE TESIS:**

Dr. Adrián Pozos Estrada

-----  
**FIRMA**



## ***DEDICATORIA***

*A mi familia, por ser el pilar que siempre me ha mantenido en este camino.  
Martina y Manuel, que siempre me han impulsado para ser mejor cada día.  
V́ctor, por no dejar que me pierda y siempre mantenerme centrado.*



## AGRADECIMIENTOS

Agradezco enormemente a la **Universidad Nacional Autónoma de México**, por formarme profesionalmente.

Agradezco al **Dr. Adrián Pozos Estrada**, por su infinita paciencia y ayuda en la realización de este trabajo.

Reconozco el enorme trabajo y dedicación de cada uno de los profesores que aportaron a mi formación profesional en esta etapa de la maestría.

Agradezco al comité sinodal, el Dr. Héctor Guerrero Bobadilla, el Dr. José Alberto Escobar Sánchez, el Dr. Orlando Javier Díaz López y el Dr. Roberto Gómez Martínez, quienes ayudaron a enriquecer/mejorar este trabajo desde distintos puntos de vista.



## **RESUMEN**

Esta tesis tiene como objetivo analizar el comportamiento de dos edificios equipados con aisladores del tipo de péndulo de fricción cuando son sometidos a viento turbulento. Los edificios en estudio son de 10 y 20 niveles y se ubican hipotéticamente en Acapulco, sitio en donde los efectos de sismo y viento son importantes.

El estudio considera que los edificios deben ser diseñados ante la acción sísmica, con la finalidad de que los elementos estructurales cumplan con los estados límite último y de servicio. Para el diseño de los aisladores del tipo de péndulo de fricción, se realizaron análisis paso a paso con el empleo de 12 pares de acelerogramas, representativos del sitio en estudio.

Una vez definido el diseño de los edificios y de los aisladores del tipo de péndulo de fricción, los edificios equipados con los aisladores son sometidos a la acción del viento turbulento de diferentes intensidades. Para definir la intensidad del viento, se consideran escenarios hipotéticos en donde la velocidad regional del viento es caracterizada por intensidades de huracanes clasificados de acuerdo a la escala Saffir-Simpson.

Se presentan comparaciones de la respuesta en términos de desplazamientos laterales de los edificios sometidos a la acción del sismo y del viento turbulento.

## **ABSTRACT**

This thesis aims to analyze the behavior of two buildings equipped with friction pendulum type insulators when they are subjected to turbulent wind. The buildings under study have 10 and 20 levels and are hypothetically located in Acapulco, a site where the effects of earthquakes and wind are important.

The study considers that buildings should be designed in the face of seismic action, so that the structural elements comply with the ultimate limit and service states. For the design of the friction pendulum type insulators, step-by-step analyzes were performed using 12 pairs of accelerograms, representative of the site under study.

Once the design of the buildings and of the friction pendulum type isolators have been defined, the buildings equipped with the isolators are subjected to the action of turbulent wind of different intensities. To define the wind intensity, hypothetical scenarios are considered where the regional wind speed is characterized by hurricane intensities classified according to the Saffir-Simpson scale.

Comparisons of the response are presented in terms of lateral displacements of buildings subjected to the action of the earthquake and turbulent wind.

# CONTENIDO

<b>DEDICATORIA .....</b>	<b>III</b>
<b>AGRADECIMIENTOS .....</b>	<b>V</b>
<b>RESUMEN .....</b>	<b>VI</b>
<b>ABSTRACT .....</b>	<b>VI</b>
<b>CONTENIDO .....</b>	<b>VII</b>
<b>LISTA DE TABLAS .....</b>	<b>IX</b>
<b>LISTA DE FIGURAS .....</b>	<b>X</b>
<b>CAPÍTULO 1.....</b>	<b>1</b>
<b>INTRODUCCIÓN .....</b>	<b>1</b>
1.1 PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA .....	1
1.2 OBJETIVOS .....	1
1.2.1 Objetivo general .....	1
1.2.2 Objetivos específicos .....	1
1.3 LIMITACIONES .....	2
<b>CAPÍTULO 2.....</b>	<b>3</b>
<b>SISTEMAS DE PROTECCIÓN SÍSMICA .....</b>	<b>3</b>
2.1 TIPOS DE DISPOSITIVOS .....	3
2.2 FORMULACIÓN DEL COMPORTAMIENTO DINÁMICO DE UN SISTEMA DE UN GRADO DE LIBERTAD SIN Y CON DISIPADOR HISTERÉTICO .....	5
2.3 SISTEMA DE PÉNDULO DE FRICCIÓN.....	8
2.3.1 Caracterización del comportamiento del péndulo de fricción .....	12
<b>CAPÍTULO 3 MODELACIÓN MATEMÁTICA Y ANÁLISIS SÍSMICO .....</b>	<b>13</b>
3.1 CLASIFICACIÓN DE LAS ESTRUCTURAS.....	13
3.2 GEOMETRÍA.....	13
3.3 CARGAS DE DISEÑO Y COMBINACIONES.....	15
3.4 ELEMENTOS ESTRUCTURALES .....	16
3.5 CARACTERIZACIÓN DE LA FUERZA SÍSMICA Y REVISIÓN DE DISTORSIÓN Y DESPLAZAMIENTO DE LOS EDIFICIOS CON BASE RÍGIDA.....	18
3.5.1 Espectros de diseño .....	18
3.5.2 Distorsión límite de entrepiso .....	18
3.5.3 Revisión de la respuesta de los edificios en términos de distorsiones .....	19
3.6 EDIFICIOS EQUIPADOS CON AISLADORES DE FRICCIÓN.....	21
3.6.1 Diseño de los aisladores de fricción.....	21
3.6.2 Desplazamiento límite en el sistema aislado.....	21
3.6.3 Registros sísmicos empleados para el diseño de los aisladores de fricción .....	21
Las condiciones de procesamiento anteriores son consistentes con las empleadas para registros de aceleraciones de sismos en México.....	23
3.6.4 Espectros de respuesta .....	23
3.6.5 Determinación de los parámetros de los aisladores de fricción y desplazamientos calculados de los edificios equipados con aisladores de fricción .....	24

<b>CAPÍTULO 4 ANÁLISIS ANTE CARGA DE VIENTO DE LOS EDIFICIOS EQUIPADOS CON AISLADORES DE FRICCIÓN .....</b>	<b>28</b>
4.1 ANÁLISIS ANTE CARGAS ESTÁTICAS .....	28
4.1.1 Velocidad de diseño.....	28
4.1.2 Presión actuante .....	30
4.2 CASO DINÁMICO.....	36
4.2.1 Simulación de velocidades y fuerzas sintéticas del viento .....	36
4.2.2 Comparación de desplazamientos de los edificios con sistema de aislamiento de fricción sometidos a viento turbulento con velocidad media asociada a viento de huracán .....	41
4.2.2.1 Velocidades de huracán.....	41
<b>CAPÍTULO 5.....</b>	<b>45</b>
<b>CONCLUSIONES Y TRABAJOS FUTUROS.....</b>	<b>45</b>
5.1 CONCLUSIONES .....	45
5.2 RECOMENDACIONES Y TRABAJOS FUTUROS .....	45

## LISTA DE TABLAS

TABLA 2.1 PARÁMETROS PARA CARACTERIZAR EL COMPORTAMIENTO DEL PÉNDULO DE FRICCIÓN .....	12
TABLA 3.1 ANÁLISIS DE CARGA DE LA LOSA DE ENTREPISO.....	15
TABLA 3.2 ANÁLISIS DE CARGA DE LA LOSA DE AZOTEA.....	15
TABLA 3.3 COMBINACIONES DE CARGA .....	16
TABLA 3.4 ELEMENTOS ESTRUCTURALES PARA MODELO DE ESTUDIO 1 (10 NIVELES) .....	16
TABLA 3.5 ELEMENTOS ESTRUCTURALES PARA MODELO DE ESTUDIO 2 (20 NIVELES) .....	17
TABLA 3.6 ELEMENTOS ESTRUCTURALES PARA MODELO DE ESTUDIO 1 (10 NIVELES) .....	17
TABLA 3.7 ELEMENTOS ESTRUCTURALES PARA MODELO DE ESTUDIO 2 (20 NIVELES) .....	17
TABLA 3.8 REGISTROS SÍSMICOS.....	22
TABLA 3.9 AISLADORES DE PÉNDULO DE FRICCIÓN PARA MODELO DE ESTUDIO 1 (10 NIVELES) .....	24
TABLA 3.10 AISLADORES DE PÉNDULO DE FRICCIÓN PARA MODELO DE ESTUDIO 2 (20 NIVELES).....	25
TABLA 4.1 CÁLCULO DE FACTOR DE EXPOSICIÓN Y VELOCIDAD DE DISEÑO .....	29
TABLA 4.2 CARGA EN BARLOVENTO, SOTAVENTO Y MUROS LATERALES PARA EL MODELO DE ESTUDIO 1	32
TABLA 4.3 CARGA EN BARLOVENTO, SOTAVENTO Y MUROS LATERALES PARA EL MODELO DE ESTUDIO 2	34
TABLA 4.4 CÁLCULO DE FACTOR DE EXPOSICIÓN Y VELOCIDAD MEDIA PARA ANÁLISIS DINÁMICOS .....	37
TABLA 4.5 ESCALA SAFFIR-SIMPSON .....	41
TABLA 4.6 FACTORES DE CONVERSIÓN DE LA VELOCIDAD DE VIENTO PARA CONDICIONES CICLONES TROPICALES .....	42
TABLA 4.7 FACTORES DE RÁFAGA DE CONVERSIÓN DE VELOCIDADES .....	43

# LISTA DE FIGURAS

FIGURA 2.1 ESQUEMA DE ESTRUCTURA CON SISTEMA DE CONTROL ACTIVO. MODIFICADO DE DOCUMENTOS TÉCNICOS CORPORACIÓN DE DESARROLLO TECNOLÓGICO (2011) .....	3
FIGURA 2.2 ESQUEMA DE ESTRUCTURA CON SISTEMA DE CONTROL SEMIACTIVO. MODIFICADO DE DOCUMENTOS TÉCNICOS CORPORACIÓN DE DESARROLLO TECNOLÓGICO (2011) .....	4
FIGURA 2.3 EJEMPLO DE UN SISTEMA PASIVO. MODIFICADA DE CHOMBO (2018) .....	4
FIGURA 2.4 REPRESENTACIÓN DE UN SISTEMA DE 1 GRADO DE LIBERTAD .....	5
FIGURA 2.5 IDENTIFICACIÓN DE LA ENERGÍA ELÁSTICA E INELÁSTICA EN EL CICLO DE HISTÉRESIS DE UN SISTEMA ESTRUCTURAL .....	7
FIGURA 2.6 EJEMPLOS DE AISLADORES DE BASE .....	8
FIGURAS 2.7 PRINCIPIO DE COMPORTAMIENTO DE UN SISTEMA DE PÉNDULO DE FRICCIÓN .....	9
FIGURA 2.8 CICLO HISTERÉTICO DE UN SISTEMA DE PÉNDULO DE FRICCIÓN. (AGUILAR HERNÁNDEZ, 2020) .....	10
FIGURA 2.9 PÉNDULO DE AISLAMIENTO DESLIZANTE INSTALADO EN CLÍNICA DE ECUADOR (FUENTE: PRESENTACIÓN XXII CNIS 2019, MONTERREY, NUEVO LEÓN) .....	11
FIGURA 2.10 CORTE TRANSVERSAL DE UN SISTEMA DE PÉNDULO DE FRICCIÓN Y SU DESLIZAMIENTO DURANTE UN EVENTO SÍSMICO .....	11
FIGURA 3.1 MODELADO EN ISOMÉTRICO Y PLANTA DE MODELO DE ESTUDIO1 .....	14
FIGURA 3.2 MODELADO EN ISOMÉTRICO Y PLANTA DE MODELO DE ESTUDIO 2 .....	14
FIGURA 3.3 ESPECTROS DE DISEÑO. MODELO DE 10 NIVELES: $Q=2$ , $RO=2$ , $A=1$ , $P=1.25$ ; MODELO DE 20 NIVELES: $Q=2$ , $RO=2$ , $A=0.9$ , $P=1.25$ . EL PORCENTAJE DE AMORTIGUAMIENTO EMPLEADO EN AMBOS ESPECTROS ES DE 2% .....	18
FIGURA 3.4 PERFIL DE DISTORSIÓN DE ENTREPISO: (A) MODELO 1 DE BASE RÍGIDA; (B) MODELO 2 DE BASE RÍGIDA .....	19
FIGURA 3.5 PERFIL DE DESPLAZAMIENTOS MÁXIMOS: (A) MODELO 1 DE BASE RÍGIDA; (B) MODELO 2 DE BASE RÍGIDA .....	21
FIGURA 3.6 ESPECTROS DE PSEUDOACELERACIÓN .....	23
FIGURA 3.7 ESPECTROS DE DESPLAZAMIENTO .....	24
FIGURA 3.8 PERFIL DE DESPLAZAMIENTOS DE LOS EDIFICIOS DEBIDO A LA APLICACIÓN DE LAS ACELERACIONES DE LA TABLA 3.8: (A) MODELO DE ESTUDIO 1; (B) MODELO DE ESTUDIO 2 .....	26
FIGURA 4.1 IDENTIFICACIÓN DE ALGUNAS ÁREAS TRIBUTARIAS EN MODELO DE ESTUDIO 1 (10 NIVELES). LAS ÁREAS TRIBUTARIAS SE MUESTRAN EN LAS ZONAS SOMBREADAS. ....	31
FIGURA 4.2 PERFIL DE DESPLAZAMIENTO ANTE UNA CARGA DE VIENTO ESTÁTICO .....	36
FIGURA 4.3 SIMULACIÓN DE SEÑALES SINTÉTICAS DE VIENTO .....	38
FIGURA 4.4 PERFIL DE DESPLAZAMIENTOS ANTE CARGAS DE VIENTO DINÁMICAS .....	39

<b>FIGURA 4.5 COMPARACIÓN ENTRE DESPLAZAMIENTOS: (A) MODELO DE ESTUDIO 1 (10 NIVELES); (B) MODELO DE ESTUDIO 2 (20 NIVELES).....</b>	<b>40</b>
<b>FIGURA 4.6 DESPLAZAMIENTOS ASOCIADOS CON VELOCIDADES DE HURACÁN: (A) MODELO 1; (B) MODELO 2 .....</b>	<b>44</b>

# **CAPÍTULO 1**

## **INTRODUCCIÓN**

### **1.1 PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA**

El uso de sistemas de protección sísmica ha tomado gran relevancia a nivel mundial para garantizar el confort y el resguardo tanto de la estructura como de su contenido. En México hay regiones en donde los efectos del sismo y viento son importantes, como es el caso de las costas del Pacífico mexicano. Lo anterior plantea un reto para el diseñador de edificios equipados con sistemas novedosos de aislamiento sísmico, como es el caso de los aisladores de base del tipo péndulo de fricción. Con base en lo anterior, el presente trabajo busca responder la siguiente pregunta: ¿qué desplazamientos presentarían edificios de 10 y 20 niveles equipados con aisladores de base del tipo péndulo de fricción cuando son sometidos a los efectos del viento turbulento de diferentes intensidades?

La información presentada en este trabajo está dividida en cinco capítulos, donde al inicio se realizará el planteamiento del problema definiendo los objetivos generales y específicos, así como las limitaciones a las que está sujeta la investigación. Una breve descripción de los sistemas de protección sísmica y las ecuaciones que definen el comportamiento de los péndulos de fricción se encuentra en el capítulo 2.

Dividiremos el diseño de los péndulos de fricción en dos partes, primero presentando los modelos de estudio, los desplazamientos obtenidos cuando se tiene una base rígida y después de plantear una metodología que se basa en las recomendaciones descritas en las Normas Técnicas Complementarias para Diseño por Sismo (2017), se procede a realizar el diseño de los aisladores del tipo péndulo de fricción. Una vez obtenidas las características de estos, en el capítulo 4 estableceremos una metodología para determinar los desplazamientos que puedan presentarse sobre los modelos, una vez que son sometidos a cargas de viento, plantearemos distintos escenarios que permitan una mejor comprensión de este fenómeno.

Por último, en el capítulo 5 atenderemos las conclusiones a las que hemos podido llegar, así como una serie de recomendaciones que deberán atenderse para poder lograr un mejoramiento en futuros trabajos en los que determinar el efecto de un viento turbulento sobre una edificación que cuente con aislamiento de base sea de interés.

### **1.2 OBJETIVOS**

#### **1.2.1 Objetivo general**

Establecer una metodología que permita evaluar de manera correcta los efectos del viento turbulento sobre edificios que cuentan con aisladores de base del tipo péndulo de fricción.

#### **1.2.2 Objetivos específicos**

Establecer criterios de diseño para evaluar los efectos del viento sobre un diseño pensado para mejorar el comportamiento sísmico.

Obtener la respuesta dinámica al emplear una serie de análisis con fuerzas de viento turbulento.

Encontrar una relación entre los desplazamientos alcanzados por el sismo y los obtenidos ante viento turbulento con intensidades variables.

### **1.3 LIMITACIONES**

La investigación se centra en el estudio de dos edificios, uno de 10 niveles y el otro de 20 niveles. Considerando que los periodos fundamentales sobre este tipo de aisladores de base se deben solamente a la longitud del péndulo y no a la masa del edificio, se consideran dos tipos de materiales para los elementos estructurales, concreto reforzado y acero estructural.

La modelación de los edificios se realiza mediante un programa computacional comercial, realizando análisis lineales.



## CAPÍTULO 2

### SISTEMAS DE PROTECCIÓN SÍSMICA

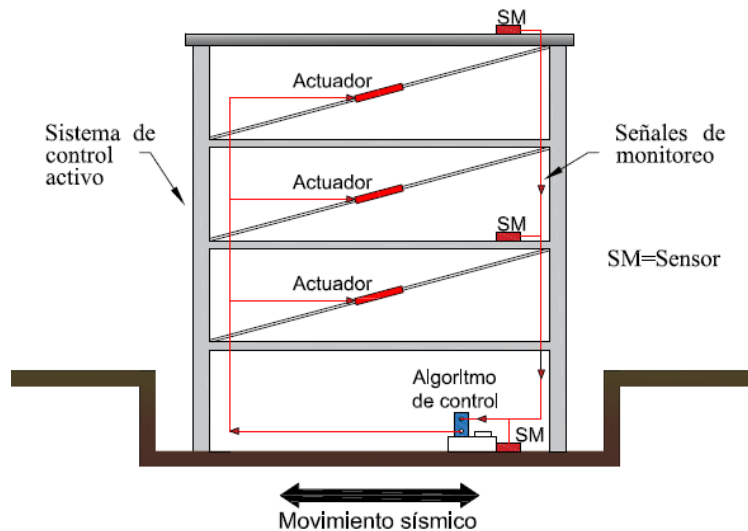
#### 2.1 TIPOS DE DISPOSITIVOS

Para garantizar la seguridad y el contenido de una estructura cuando ésta es sometida a cargas sísmicas o eólicas, es necesario satisfacer una serie de objetivos, los cuales se enlistan a continuación:

- Proteger la operación de la estructura durante e inmediatamente después de sismos severos.
- Mejorar el confort de los ocupantes durante eventos eólicos o sísmicos.
- Protección adicional de elementos estructurales y no estructurales, como el mobiliario o equipamiento eléctrico.
- Control de las deformaciones.

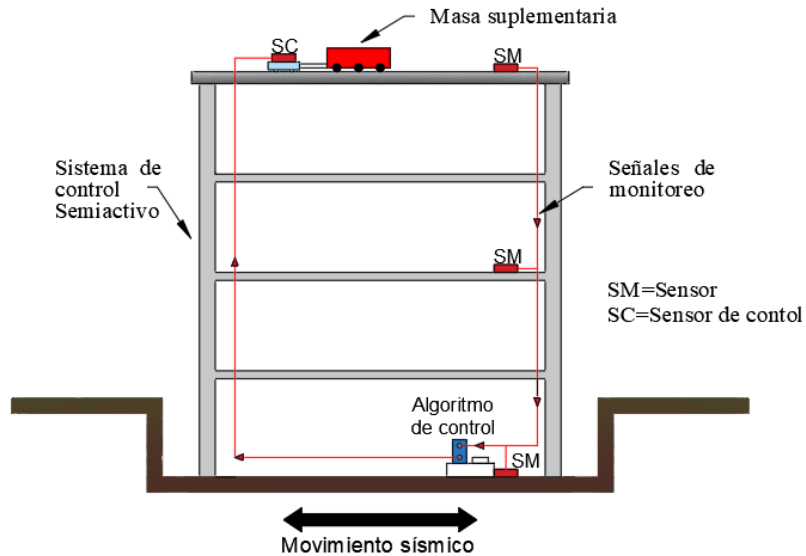
Para lograr estos objetivos se han desarrollado una extensa gama de dispositivos, los cuales pueden clasificarse en 4 grandes grupos: pasivos, semiactivos, híbridos y activos. A continuación, (Corporación de Desarrollo Tecnológico - Cámara Chilena de la Construcción, 2011) (Corporación de Desarrollo Tecnológico - Cámara Chilena de la Construcción, 2011) se realiza una breve descripción de cada uno de ellos.

*Sistemas activos:* Los sistemas activos de protección sísmica son sistemas complejos que incluyen sensores de movimiento, sistemas de control y procesamiento de datos, y actuadores dinámicos. Estos sistemas monitorean la respuesta sísmica de la estructura en tiempo real, detectando movimientos y aplicando las fuerzas necesarias para contrarrestar los efectos sísmicos. El actuar de los sistemas activos se resume de la siguiente forma: las excitaciones externas y la respuesta de la estructura son medidas mediante sensores, principalmente acelerómetros, instalados en puntos estratégicos de la estructura. Un algoritmo de control procesa, también en tiempo real, la información obtenida por los instrumentos, y determina las fuerzas necesarias que deben aplicar los actuadores para estabilizar la estructura.



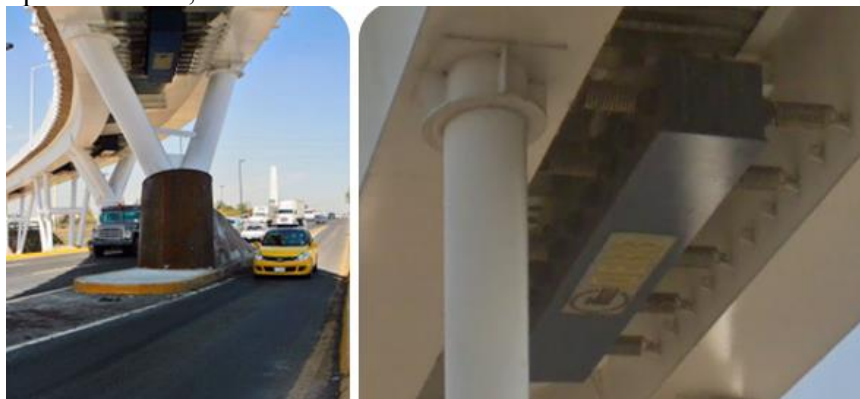
**Figura 2.1** Esquema de estructura con sistema de control activo. Modificado de Documentos técnicos corporación de desarrollo tecnológico (2011)

*Sistemas semiactivos:* Los sistemas semiactivos de protección sísmica, al igual que los activos, cuentan con un mecanismo de monitoreo en tiempo real de la respuesta estructural; sin embargo, a diferencia de los sistemas activos no aplican fuerzas de control directamente sobre la estructura. Los sistemas semiactivos actúan modificando, en tiempo real, las propiedades mecánicas de los dispositivos de disipación de energía. Ejemplos de estos sistemas son los amortiguadores de masa semiactivos, los dispositivos de fricción con fricción controlable. La Figura 2.2 muestra ¿???



**Figura 2.2 Esquema de estructura con sistema de control semiactivo. Modificado de Documentos técnicos corporación de desarrollo tecnológico (2011)**

*Sistemas pasivos:* Los sistemas pasivos son los dispositivos de protección sísmica más comúnmente utilizados en la actualidad. A esta categoría corresponden los sistemas de aislamiento de base y los disipadores de energía. Los sistemas pasivos permiten reducir la respuesta dinámica de las estructuras a través de sistemas mecánicos especialmente diseñados para disipar energía por medio de calor. La Figura 2.3 presenta un ejemplo de un sistema pasivo (masa sólida sintonizada) que se encuentra instalada en el puente Álamo, en Jalisco.



**Figura 2.3 Ejemplo de un sistema pasivo. Modificada de Chombo (2018)**

*Sistemas híbridos:* Los sistemas de control híbrido son sistemas que emplean una combinación de sistemas pasivos y activos. Por ejemplo, una estructura acondicionada con amortiguadores viscoelásticos y un amortiguador activo de masa en la parte superior del edificio; o una estructura aislada en la base con actuadores controlados activamente para mejorar su comportamiento.

## 2.2 FORMULACIÓN DEL COMPORTAMIENTO DINÁMICO DE UN SISTEMA DE UN GRADO DE LIBERTAD SIN Y CON DISIPADOR HISTERÉTICO

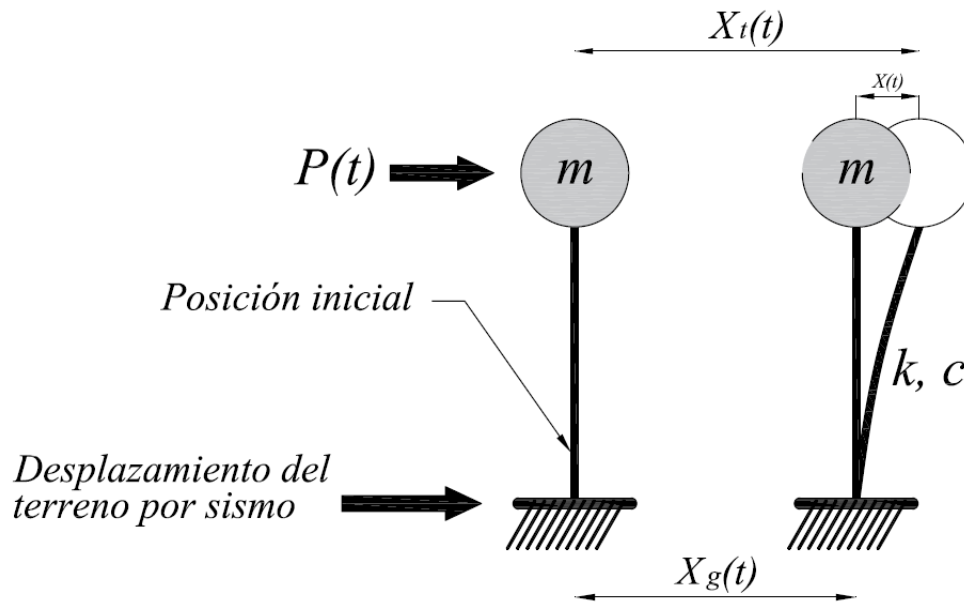
El sistema de un grado de libertad es la idealización de una estructura de un nivel, está conformado por una masa concentrada ( $m$ ) sobre un soporte sin masa que proporciona rigidez ( $k$ ) que se supone axialmente indeformable y un amortiguador viscoso ( $c$ ) que disipa la energía de vibración. Si el sistema se somete a un desplazamiento en el suelo  $X_g(t)$  y a una carga  $P(t)$  que puede o no ser dependiente del tiempo, la respuesta de éste consiste en determinar el desplazamiento de la masa en cualquier instante del tiempo,  $X_i(t)$ , respecto a su posición inicial. Este parámetro se calcula en función del desplazamiento del terreno y del desplazamiento de la masa con respecto a su base  $X(t)$ :

$$X_i(t) = X_g(t) + X(t) \quad (2.1)$$

En estas condiciones, la ecuación de equilibrio dinámico se define como:

$$m\ddot{X} + c\dot{X} + kX = -m\ddot{X}_g + P \quad (2.2)$$

Los parámetros empleados en la ecuación de movimiento se identifican en la Figura 2.5.



**Figura 2.4 Representación de un sistema de 1 grado de libertad**

Housner (Housner, 1956) (Housner, 1956) propone utilizar el concepto de energía para determinar el comportamiento y la respuesta de una estructura ante cargas dinámicas, de acuerdo con:

$$E_K + E_D + E_S = E_I \quad (2.3)$$

donde:

$$E_K = \int m\dot{x}dx = \frac{m\dot{x}^2}{2} \quad (2.4)$$

es la energía cinética de la masa  $m$ ;

$$E_D = \int c\dot{x}dx = \int c\dot{x}^2 dt \quad (2.5)$$

es la energía disipada por el amortiguamiento inherente de la estructura;

$$E_S = \int kxdx = \frac{kx^2}{2} \quad (2.6)$$

es la energía de deformación elástica del sistema;  $E_I$  es la energía impuesta por las cargas dinámicas, que se compone de  $E_{IS}$  y  $E_{IW}$ , que representan la energía impuesta por el sismo y la energía impuesta por el viento, respectivamente.  $E_I$  se define como:

$$E_I = E_{IS} + E_{IW} \quad (2.7)$$

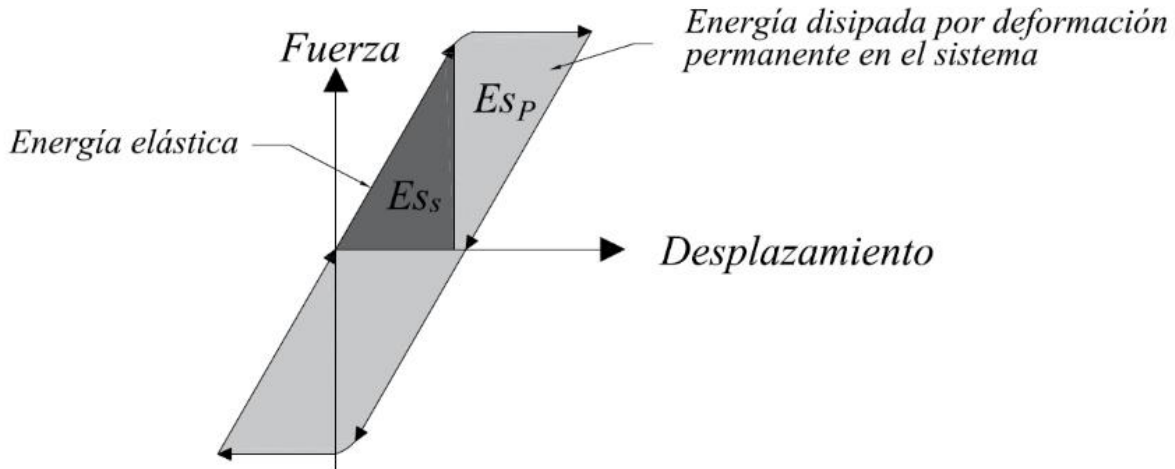
$$E_{IS} = - \int m\ddot{x}_g dx \quad (2.8)$$

$$E_{IW} = \int P_{(t)} dx \quad (2.9)$$

En el caso de que el sistema responda en el intervalo inelástico el valor de  $E_S$  deberá distinguir la participación de la estructura dentro del intervalo elástico y el inelástico. Esto se logra introduciendo la función  $f_s(x)$  que incluye la respuesta elástica y la inelástica histerética en el cálculo de la energía total proporcionada por la estructura:

$$E_S = \int f_x(x) dx = E_{S_S} + E_{S_P} \quad (2.10)$$

donde  $E_{S_P}$  es la energía disipada por efectos histeréticos de deformación plástica y daño de los elementos estructurales y  $E_{S_S}$  es la energía de deformación elástica no disipada. La Figura 2.6 ilustra el ciclo de histéresis en un sistema estructural, en donde se distinguen la energía elástica e inelástica.



**Figura 2.5 Identificación de la energía elástica e inelástica en el ciclo de histéresis de un sistema estructural**

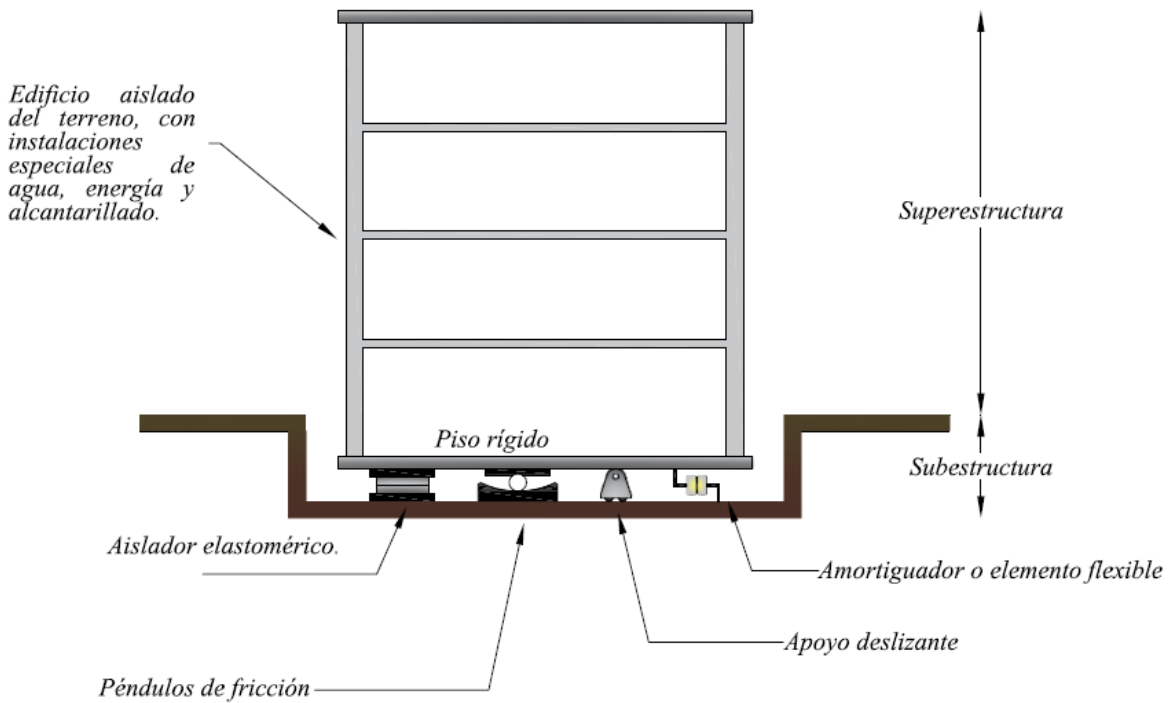
Cuando se utilizan dispositivos especiales disipadores o amortiguadores de energía (dependientes de la velocidad, la deformación o aceleración), se debe introducir un término en la ecuación de energía que permita distinguir la participación de estos dispositivos en el balance de energía. Este término se identifica como  $E_p$  y se calcula por medio del operador de integro-diferenciación representativo de la disipación de energía proporcionada por dispositivos adicionales.

$$E_p = \int \Gamma \dot{x} dx \quad (2.11)$$

La contribución de la energía obtenida por los disipadores o amortiguadores se suma al lado izquierdo de la ecuación de balance de energía, para quedar:

$$E_K + E_D + E_{S_s} + E_{S_p} + E_p = E_I \quad (2.12)$$

Con base en lo anterior, se pueden plantear dos metodologías para controlar la respuesta de una estructura. La primera contempla aumentar el valor de  $E_p$ , la disipación de energía por histéresis de la estructura disminuye y la participación de los componentes estructurales es menor, el nivel de daño en la estructura se reduce y se concentra en los dispositivos adicionales, que son elementos totalmente identificados y fáciles de reemplazar. Mientras que la segunda metodología considera modificar la energía de entrada al sistema, término  $E_I$ , al lado derecho de la ecuación; algunos sistemas de control de respuesta sísmica trabajan de esta forma y se conocen con el término de aislamiento basal. Algunos dispositivos aisladores de base se ilustran en la Figura 2.6, entre los que figura el sistema de péndulo de fricción, cuyo comportamiento se describe con mayor detalle en la siguiente sección.



**Figura 2.6 Ejemplos de aisladores de base**

### 2.3 SISTEMA DE PÉNDULO DE FRICCIÓN

Consideremos una estructura rígida de peso  $W$  soportada por un sistema de péndulo de fricción (FPS, por sus siglas en inglés) que puede ser desplazada horizontalmente una cantidad  $\Delta$  sobre una superficie cóncava esférica de radio  $R$ . La fuerza requerida para desplazar el soporte es  $F$  y la fuerza normal es  $N$ , aquí suponemos que no se genera resistencia por fricción durante el deslizamiento. En un FPS real donde la fricción se desarrolla durante el deslizamiento,  $F$  corresponde al exceso de la fuerza de fricción requerida para iniciar el movimiento

El dispositivo consiste en un “deslizador” que se mueve sobre una superficie esférica cóncava (Figura 2.7). Cualquier movimiento de la base producirá un desplazamiento del deslizador a lo largo de esta superficie disipando energía por fricción. Como este desplazamiento ocurre sobre una superficie curva, la fuerza vertical transmitida por el deslizador provee una componente tangencial que tiende a centrar el sistema.

El equilibrio horizontal está dado por:

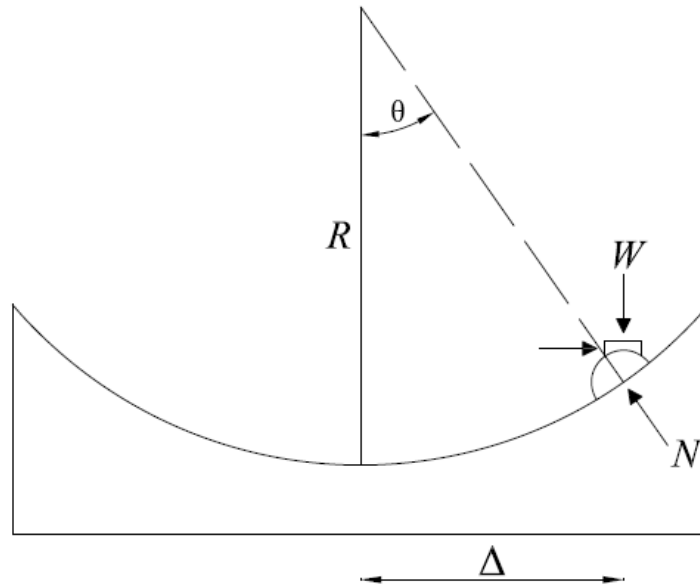
$$F = N \sin \theta \quad (2.13)$$

El equilibrio vertical está dado por:

$$W = N \cos \theta \quad (2.14)$$

Sustituyendo la ecuación (2.14) en la ecuación (2.13):

$$F = W \tan \theta \quad (2.15)$$



**Figuras 2.7 Principio de comportamiento de un sistema de péndulo de fricción**

La tangente del ángulo  $\theta$  se puede obtener como:

$$\tan \theta = \frac{\Delta}{R} \quad (2.16)$$

Al sustituir la ecuación (2.16) en la ecuación (2.15) conduce a una relación lateral de fuerza-desplazamiento para un sistema de péndulo deslizante:

$$F = \frac{W}{R} \Delta \quad (2.17)$$

A partir de la ecuación (2.17), la rigidez lateral del aislador de base de péndulo de fricción resulta en  $k=W/R$ . Por lo que el período natural  $T$  está dado por:

$$T = 2\pi \sqrt{\frac{W}{gk}} = 2\pi \sqrt{\frac{R}{g}} \quad (2.18)$$

donde  $g$  es la aceleración de la gravedad.

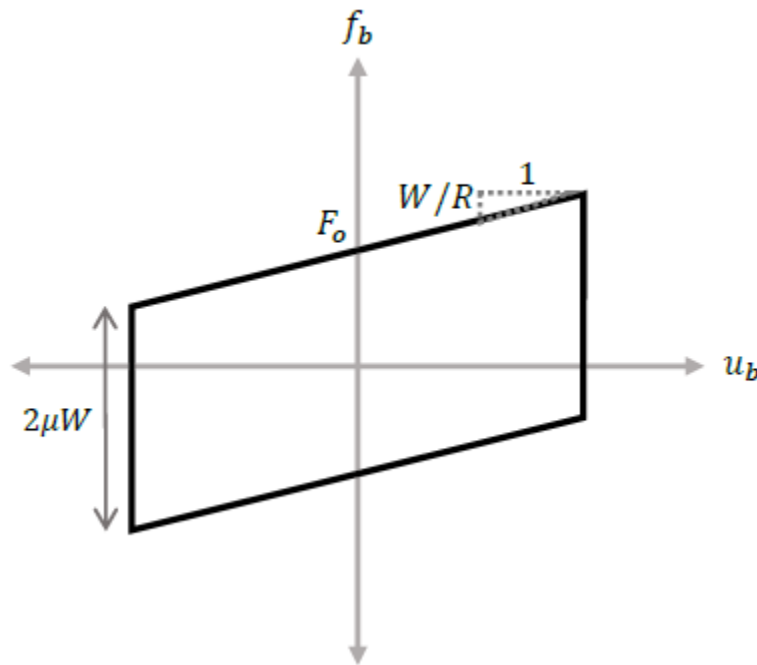
La ecuación (2.18) indica que la frecuencia natural de una estructura rígida aislada con un FPS depende solamente del radio de la superficie de deslizamiento.

Esta propiedad presenta una significativa ventaja del FPS ya que se puede lograr un período objetivo independientemente de la masa de la superestructura.

En realidad, las fuerzas de fricción están presentes durante el desplazamiento y deben superarse antes de que el apoyo pueda deslizarse. La Figura 2.8 muestra una respuesta de histéresis típica de un FPS donde hay una cantidad de fricción en el movimiento deslizante. El sistema está cerca de la unidad rígida hasta que se supera esta fuerza de fricción. Entonces, el incremento en la fuerza es proporcional a la rigidez lateral del FPS. La fuerza requerida para superar la fricción inicial es igual a  $\mu W$  donde  $\mu$  es el coeficiente de fricción.

Debido a esta fricción de ruptura inicial, la rigidez efectiva del aislador depende del coeficiente de fricción  $\mu$  (los valores comerciales para estos coeficientes oscilan entre el 4% y el 12%) y el desplazamiento máximo del aislador  $D_{MAX}$ . Esta rigidez efectiva  $k_{eff}$  es mayor a la descrita en la ecuación (2.17) y está dado por:

$$k_{eff} = W \left( \frac{1}{R} + \frac{\mu}{D_{MAX}} \right) \quad (2.19)$$

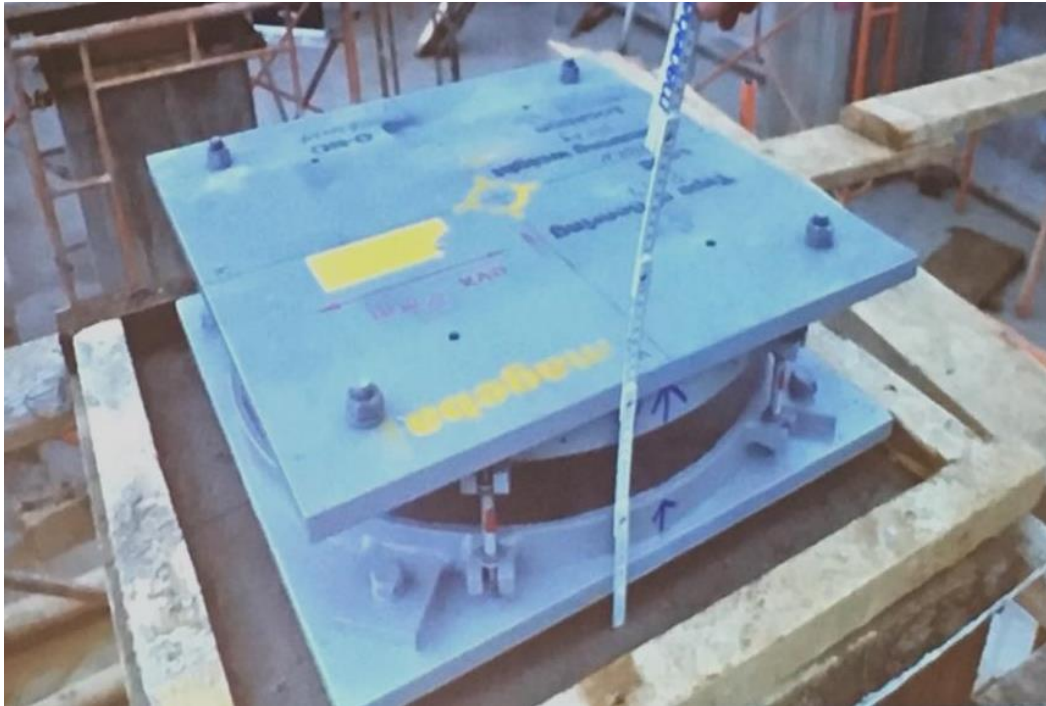


**Figura 2.8 Ciclo histéretico de un sistema de péndulo de fricción. (Aguilar Hernández, 2020)**

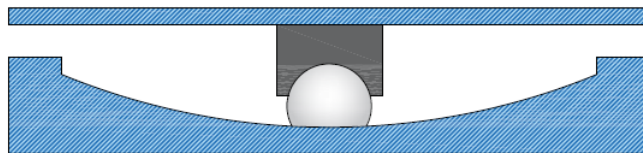
El deslizador es de forma lenticular esférico de modo que un área está en contacto con la superficie cóncava y no solo un punto, como será el caso de un deslizador friccional enteramente esférico. Esto evita que la superficie esférica de acero se raye e impida el desplazamiento libre del aislador.

El péndulo puede ser colocado tanto en su posición basal como invertida, mejorando así la posibilidad de mantener limpia la superficie esférica a pesar de que existe un sello de goma alrededor del aislador que evita el ingreso de polvo y agua. La figura 2.9 muestra un péndulo de aislamiento deslizante instalado en obra y la Figura 2.10 ilustra el desplazamiento del péndulo de fricción y su deslizamiento durante un evento sísmico.

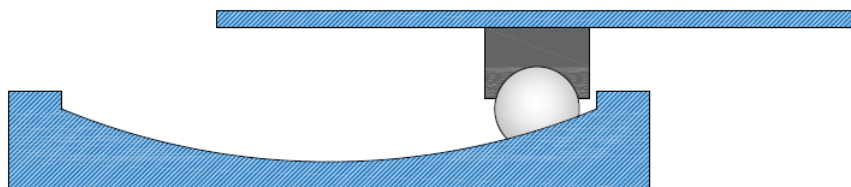




**Figura 2.9** Péndulo de aislamiento deslizante instalado en clínica de Ecuador (Fuente: Presentación XXII CNIS 2019, Monterrey, Nuevo León)



*Sección transversal del apoyo de péndulo simple*



*Apoyo de péndulo simple en el máximo sismo esperado*

**Figura 2.10** Corte transversal de un sistema de péndulo de fricción y su deslizamiento durante un evento sísmico

### 2.3.1 Caracterización del comportamiento del péndulo de fricción

Los parámetros para caracterizar el comportamiento del péndulo de fricción se resumen en la Tabla 2.1.

**Tabla 2.1 Parámetros para caracterizar el comportamiento del péndulo de fricción**

Parámetro	Ecuación
Fuerza horizontal resistente	$F_H = \frac{W}{R} * D + \mu * W(\text{sgn } v)$
Periodo de un péndulo	$T = 2\pi \sqrt{\frac{R}{g}}$
Rigidez efectiva	$K_{eff} = \frac{W}{R} + \frac{\mu * W}{D}$
Periodo efectivo	$T_{eff} = 2\pi \sqrt{\frac{RD}{g(D + \mu R)}}$
Amortiguamiento efectivo	$\xi_{eff} = \frac{2}{\pi} * \left( \frac{4 * R}{(D + \mu * R)} \right)$
Relación entre el periodo y el radio	$R = \frac{g * T^2}{(2\pi)^2} \approx 0.25T^2$
Desplazamiento vertical debido al deslizamiento	$\delta_V = R - \sqrt{R^2 - D^2}$

Notas: D es el desplazamiento horizontal, R es el radio de curvatura,  $\mu$  es el coeficiente de fricción dinámica y  $v$  es la velocidad en el desplazamiento horizontal. Para que exista el recentrado estático debe cumplirse que la relación D/R debe ser mayor que  $\mu$ .

## CAPÍTULO 3 MODELACIÓN MATEMÁTICA Y ANÁLISIS SÍSMICO

Para el desarrollo de este trabajo se desarrollaron dos modelos, el primer modelo es un edificio de acero estructural de 20 niveles. La geometría y estructuración original de este modelo fue propuesta por Canto y Alamilla (2010); posteriormente la estructuración fue modificada por Nogales Martínez (2019) con elementos de acero estructural con el fin de estudiar los efectos de viento turbulento sobre el mismo. Por otra parte, con base en la literatura se observó que los péndulos de aislamiento deslizantes presentan un mejor desarrollo para edificaciones bajas (Christopoulos & Filiatrault, 2006), por lo que, para el segundo modelo, las dimensiones del primer modelo se modificaron y se emplearon elementos estructurales de concreto reforzado para modelar un edificio de 10 niveles.

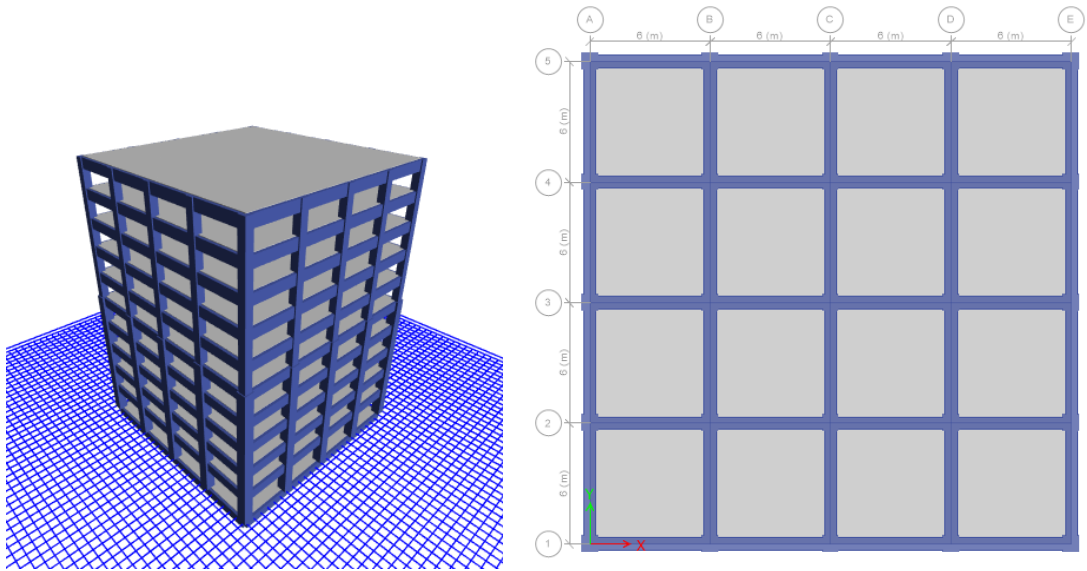
### 3.1 CLASIFICACIÓN DE LAS ESTRUCTURAS

Se considera que los edificios modelados son para uso habitacional, albergando departamentos. El Manual de Obras Civiles para diseño por viento (Comisión Federal de Electricidad, 2008) clasifica este tipo de estructuras según su importancia como grupo B.

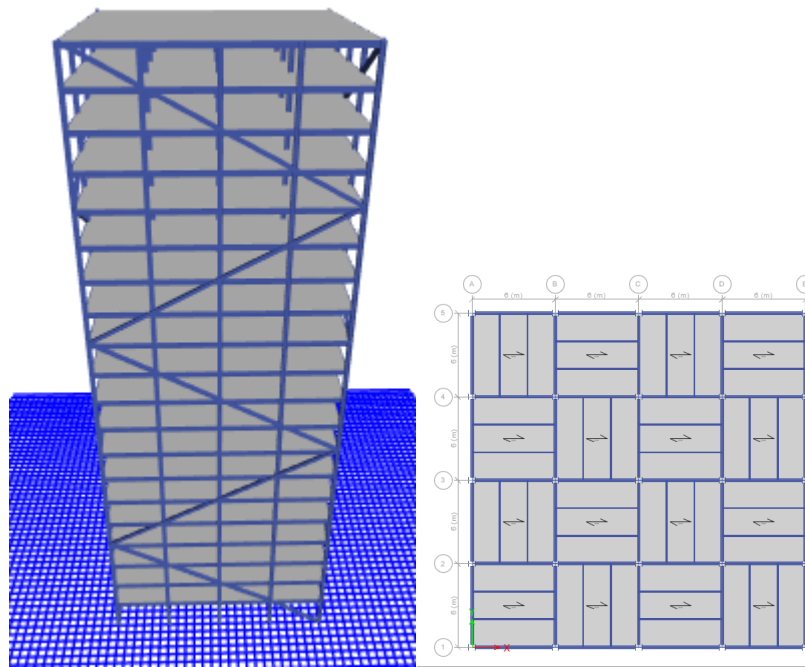
### 3.2 GEOMETRÍA

El primer modelo de estudio consta de 10 niveles estructurados por marcos rígidos de concreto reforzado. El primer entrepiso cuenta con una altura de 4.00 m y los restantes cuentan una altura de 3.20 m, medidos entre los ejes de las losas. La planta del edificio es cuadrada con dimensiones de 24.00 m x 24.00 m y la separación típica entre los marcos rígidos es de 6 m. El material de las columnas, vigas principales, así como las secundarias es de concreto reforzado con una resistencia a la compresión,  $f'c$ , igual a 350 kg/cm<sup>2</sup>. La Figura 3.1 muestra algunas imágenes del modelo en estudio 1.

El segundo modelo de estudio consta de 20 niveles estructurados por marcos rígidos de acero. El primer entrepiso cuenta con una altura de 4.00 m y los restantes cuentan con una altura de 3.20 m, medidos entre los ejes de las losas. La planta del edificio es cuadrada con dimensiones de 24.00 m x 24.00 m y la separación típica entre los marcos rígidos es de 6 m. El material de las columnas, vigas principales, así como las secundarias es acero estructural A572Gr50, el cual tiene una resistencia nominal a la fluencia,  $f_y$ , igual a 3515 kg/cm<sup>2</sup> y una resistencia última a la fractura,  $f_u$ , igual a 4570 kg/cm<sup>2</sup>. La Figura 3.2 muestra algunas imágenes del modelo en estudio 2.



**Figura 3.1 Modelado en isométrico y planta de modelo de estudio 1**



**Figura 3.2 Modelado en isométrico y planta de modelo de estudio 2**

### 3.3 CARGAS DE DISEÑO Y COMBINACIONES

Las Tablas 3.1 y 3.2 resumen las cargas verticales empleadas para el diseño de los edificios. Las cargas vivas se tomaron del Reglamento de Construcciones para el Municipio de Acapulco de Juárez, Guerrero (H. Ayuntamiento constitucional Acapulco de Juárez, 2002). En el artículo 202 de este Reglamento se indica que para las cargas vivas máximas y las cargas vivas instantáneas se tomarán igual a  $170 \text{ kg/m}^2$  y  $90 \text{ kg/m}^2$  en el caso de entresijos y  $40 \text{ kg/m}^2$  y  $20 \text{ kg/m}^2$  en la azotea, respectivamente.

**Tabla 3.1 Análisis de carga de la losa de entresijo**

Concepto	Peso ( $\text{kg/m}^2$ )
Losacero Ternium 4	220
Acabados y pisos	160
Plafón e instalaciones	40
Carga adicional por reglamento	40
Muros divisorios	120
Total	580

**Tabla 3.2 Análisis de carga de la losa de azotea**

Concepto	Peso ( $\text{kg/m}^2$ )
Losacero Ternium 4	220
Acabados, rellenos, impermeabilizante e instalaciones	40
Carga adicional por reglamento	40
Muros divisorios	120
Total	420

La siguiente Tabla 3.3 resume las combinaciones de carga y los factores de carga empleados. Las combinaciones de carga y factores de carga son consistentes con la información indicada en el Reglamento de Construcciones para el Municipio de Acapulco de Juárez, Guerrero (H. Ayuntamiento constitucional Acapulco de Juárez, 2002).

**Tabla 3.3 Combinaciones de carga**

No	Combinación
1	$1.4 CM + 1.4 CV_m$
2	$1.1 CM + 1.1 CV_a + 1.1 S_x + 0.33 S_y$
3	$1.1 CM + 1.1 CV_a + 1.1 S_x - 0.33 S_y$
4	$1.1 CM + 1.1 CV_a - 1.1 S_x + 0.33 S_y$
5	$1.1 CM + 1.1 CV_a - 1.1 S_x - 0.33 S_y$
6	$1.1 CM + 1.1 CV_a + 0.33 S_x + 1.1 S_y$
7	$1.1 CM + 1.1 CV_a + 0.33 S_x - 1.1 S_y$
8	$1.1 CM + 1.1 CV_a - 0.33 S_x + 1.1 S_y$
9	$1.1 CM + 1.1 CV_a - 0.33 S_x - 1.1 S_y$
10	$1.1 CM + 1.1 CV_a + 1.1 V_x$
11	$1.1 CM + 1.1 CV_a - 1.1 V_x$
12	$1.1 CM + 1.1 CV_a + 1.1 V_y$
13	$1.1 CM + 1.1 CV_a - 1.1 V_x$

Notas:  $CM$ : carga muerta,  $CV_m$ : carga viva máxima,  $CV_a$ : carga viva instantánea,  $S_x$ : sismo en dirección  $x$ ,  $S_y$ : sismo en dirección  $y$ ,  $V_x$ : viento en dirección  $x$  y  $V_y$ : viento en dirección  $y$ .

### 3.4 ELEMENTOS ESTRUCTURALES

Las Tablas 3.4 y 3.5 presentan las dimensiones de columnas, traveses y contravientos empleados en la estructuración de los edificios. El diseño fue gobernado por las acciones sísmicas, por lo que la revisión de la capacidad de los elementos estructurales y los desplazamientos y distorsiones se revisó considerando esta acción. Más detalles de la caracterización de la acción sísmica y la respuesta en términos de desplazamientos y distorsiones de los edificios con base rígida, del diseño de los aisladores de fricción y del comportamiento de los edificios con aisladores de fricción se presentan en las siguientes secciones.

**Tabla 3.4 Elementos estructurales para modelo de estudio 1 (10 niveles)**

Nivel	Columnas	Traveses principales
1 al 5	100 cm x 100 cm	115 cm x 60 cm
6 al 10	85 cm x 85 cm	115 cm x 60 cm

**Tabla 3.5 Elementos estructurales para modelo de estudio 2 (20 niveles)**

Nivel	Columnas	Trabes Principales	Trabes Secundarias	Contraventeo
1 al 10	W 14 x 311	W 21 x 55	W 12 x 22	HSS 14 x 14 x 1/2
11 al 20	W 14 x 342	W 21 x 55	W 12 x 22	HSS 14 x 14 x 1/2

Para identificar las formadas modales, periodos y frecuencias se realizó un análisis modal para cada uno de los edificios, los resultados de estos análisis se resumen en las Tablas 3.6 y 3.7.

**Tabla 3.6 Elementos estructurales para modelo de estudio 1 (10 niveles)**

Modo	Periodo (s)	Frecuencia (Hz)	Descripción
T <sub>Y1</sub>	0.582	1.720	Correspondiente al movimiento en el eje Y
T <sub>X1</sub>	0.582	1.720	Correspondiente al movimiento en el eje X
T <sub>R1</sub>	0.498	2.009	Correspondiente al movimiento torsional
T <sub>Y2</sub>	0.204	4.902	Correspondiente al movimiento en el eje Y
T <sub>X2</sub>	0.204	4.902	Correspondiente al movimiento en el eje X
T <sub>R2</sub>	0.178	5.617	Correspondiente al movimiento torsional

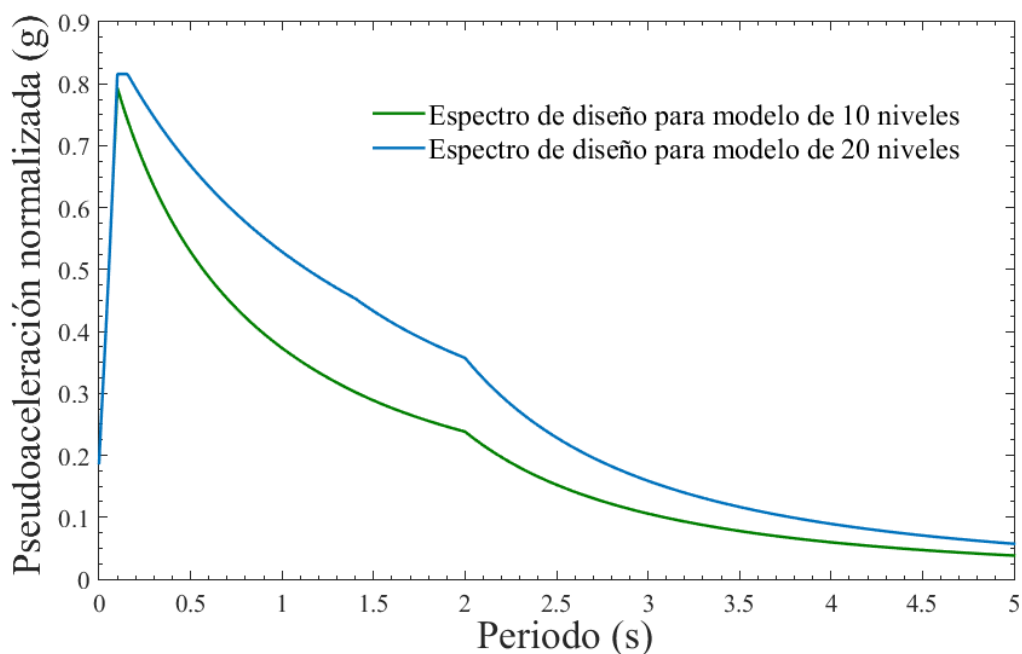
**Tabla 3.7 Elementos estructurales para modelo de estudio 2 (20 niveles)**

Modo	Periodo (s)	Frecuencia (Hz)	Descripción
T <sub>Y1</sub>	1.817	0.551	Correspondiente al movimiento en el eje Y
T <sub>X1</sub>	1.772	0.564	Correspondiente al movimiento en el eje X
T <sub>R1</sub>	1.089	0.918	Correspondiente al movimiento torsional
T <sub>Y2</sub>	0.606	1.65	Correspondiente al movimiento en el eje Y
T <sub>X2</sub>	0.586	1.705	Correspondiente al movimiento en el eje X
T <sub>R2</sub>	0.369	2.713	Correspondiente al movimiento torsional

## 3.5 CARACTERIZACIÓN DE LA FUERZA SÍSMICA Y REVISIÓN DE DISTORSIÓN Y DESPLAZAMIENTO DE LOS EDIFICIOS CON BASE RÍGIDA

### 3.5.1 Espectros de diseño

Para la caracterización de la acción sísmica se optó por emplear las recomendaciones del Manual de Diseño de Obras Civiles: Diseño por Sismo (Comisión Federal de Electricidad, 2015). De acuerdo con este documento, se determinó que la ubicación de los edificios en estudio se asociaba con una zona sísmica D y un tipo de terreno II. Como se mencionó anteriormente, el uso habitacional de los edificios los clasifica como estructuras del grupo B. Para caracterizar los espectros de diseño se emplearon los valores de factor de comportamiento sísmico ( $Q$ ), factor de sobrerresistencia ( $R_o$ ), factor correctivo por irregularidad ( $\alpha$ ) y factor por redundancia ( $\rho$ ) indicados en la Figura 3.3.



**Figura 3.3 Espectros de diseño. Modelo de 10 niveles:  $Q=2$ ,  $R_o=2$ ,  $\alpha=1$ ,  $\rho=1.25$ ; modelo de 20 niveles:  $Q=2$ ,  $R_o=2$ ,  $\alpha=0.9$ ,  $\rho=1.25$ . El porcentaje de amortiguamiento empleado en ambos espectros es de 2%**

### 3.5.2 Distorsión límite de entrepiso

Se conoce como distorsión de entrepiso al cociente entre la diferencia de desplazamientos laterales de dos niveles consecutivos de la estructura entre la altura de dicho entrepiso. Este valor está relacionado con el daño estructural.

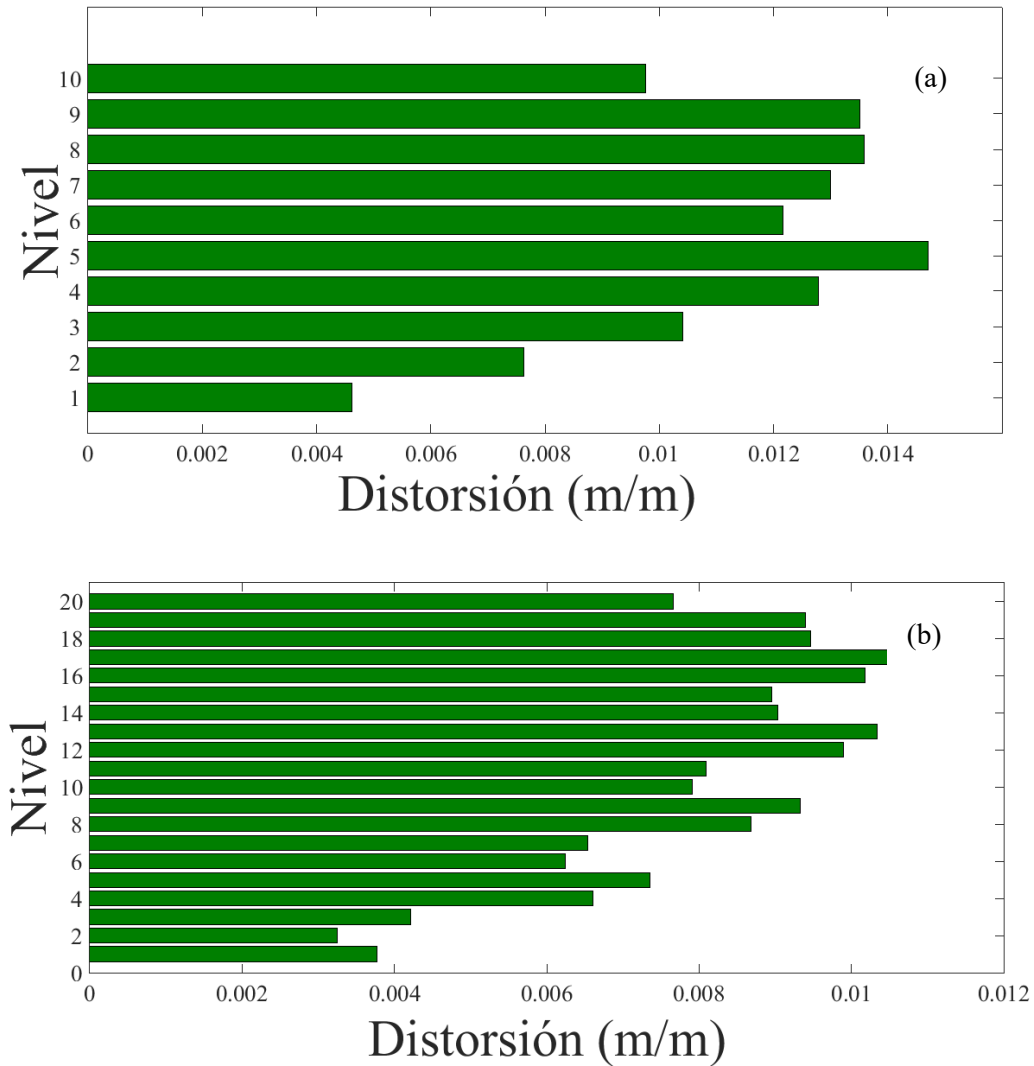
Para la revisión de la distorsión de entrepiso, se adoptó una distorsión máxima igual a 0.015, según lo especificado en el Manual de Diseño de Obras Civiles: Diseño por Sismo (Comisión Federal de



Electricidad, 2015) para estructuras compuestas por marcos de acero, de concreto reforzado o compuestos de ambos materiales con ductilidad limitada.

### 3.5.3 Revisión de la respuesta de los edificios en términos de distorsiones

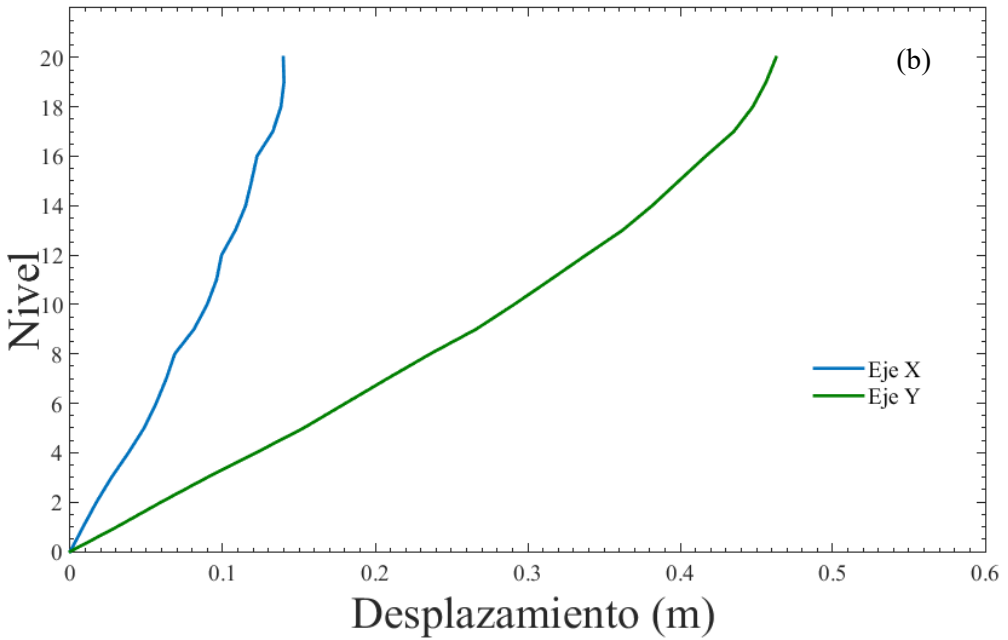
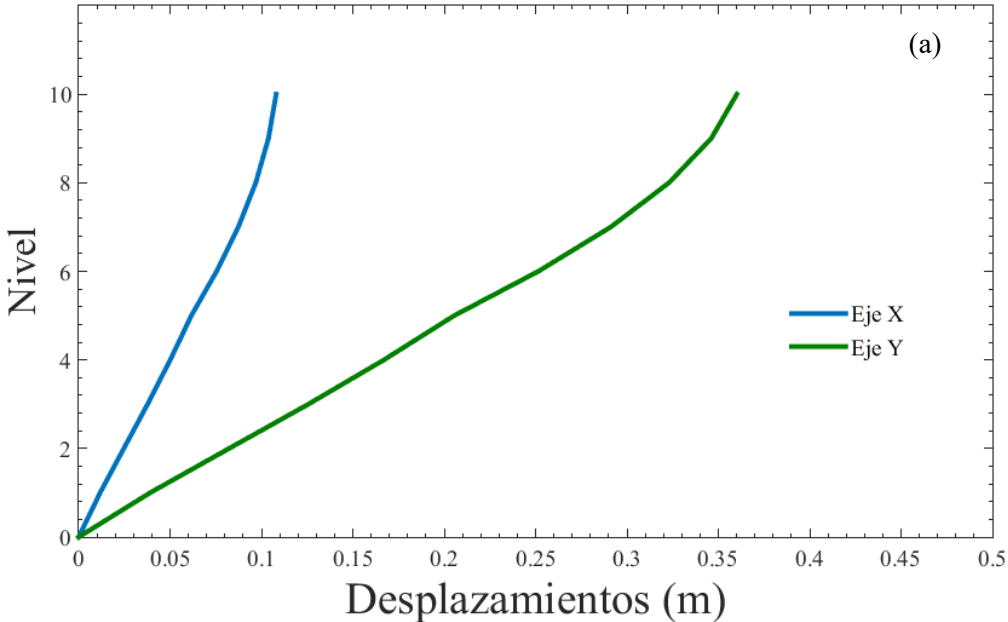
Las distorsiones por nivel de los edificios sometidos a la acción sísmica caracterizada por los espectros de diseño de la Figura 3.3 se presentan en la Figura 3.4.



**Figura 3.4 Perfil de distorsión de entrepiso: (a) Modelo 1 de base rígida; (b) Modelo 2 de base rígida**

Se observa en la Figura 3.4 que las distorsiones por entrepiso en direcciones  $x$  e  $y$  para los edificios de 10 y 20 niveles son inferiores al límite adoptado. Para el caso del edificio de 10 niveles, las distorsiones que presenta el edificio en la dirección  $y$  son ligeramente menores al límite, mientras que las distorsiones máximas del edificio de 20 niveles son aproximadamente 30% menores al valor límite.

Los perfiles de desplazamientos máximos en direcciones  $x$  e  $y$  para ambos edificios se presentan en la Figura 3.5. Se observa que para el edificio de 10 niveles en la dirección  $y$ , el desplazamiento máximo en la parte alta es cercano a 1% la altura total del edificio, mientras que para el edificio de 20 niveles, el desplazamiento máximo en la dirección  $y$  es alrededor de 0.7% la altura total del edificio. La diferencia entre los desplazamientos máximos observada se debe principalmente a la estructuración empleada en cada edificio.



**Figura 3.5 Perfil de desplazamientos máximos: (a) Modelo 1 de base rígida; (b) Modelo 2 de base rígida**

## **3.6 EDIFICIOS EQUIPADOS CON AISLADORES DE FRICCIÓN**

### **3.6.1 Diseño de los aisladores de fricción**

[Los aisladores fueron modelados siguiendo los pasos incluidos en el trabajo de Aguilar Hernández (2020), los cuales se resumen a continuación:

- a) Se utilizaron elementos resorte tipo aislador de fricción.
- b) Se asignó la propiedad direccional fija en la dirección axial del aislador, y se activó la no-linealidad en la dirección horizontal.
- c) Las propiedades no lineales que requiere el programa son la rigidez inicial del aislador, los coeficientes de fricción máximo y mínimo, respectivamente, el parámetro de velocidad y el radio de curvatura.

Debido a las características de los dispositivos, es conveniente realizar análisis dinámicos paso a paso.

### **3.6.2 Desplazamiento límite en el sistema aislado**

Para este trabajo se considera que el desplazamiento máximo permitido ( $D_{\text{último}}$ ) es igual al desplazamiento obtenido de los espectros elásticos de desplazamiento ( $S_d$ ), para el periodo de la estructura aislada, multiplicado por un factor de seguridad de 1.3, como se indica en la siguiente ecuación:

$$D_{\text{último}} = 1.3 S_d \quad (3.1)$$

### **3.6.3 Registros sísmicos empleados para el diseño de los aisladores de fricción**

Para el análisis de la estructura aislada, el Manual de Diseño de Obras Civiles: Diseño por Sismo (Comisión Federal de Electricidad, 2015) sugiere lo siguiente:

Deberán cuidarse los siguientes aspectos con el fin de mantener el mismo nivel de riesgo, y que el modelo inelástico de la estructura y de los aisladores sea representativo de su comportamiento:

- Se utilizarán al menos cuatro pares de acelerogramas horizontales de eventos registrados. Los acelerogramas deberán ser escalados para los diferentes niveles de intensidad.
- Cada par de componentes horizontales se escalará de forma que la raíz cuadrada de la suma de los cuadrados del espectro con 5% de amortiguamiento, no sea menor que 1.3 veces el espectro del sismo de diseño para el mismo amortiguamiento, y que no difiera en más del 10% en la banda de periodos comprendida entre 1.0 s y 3.0 s.

$$a_{es}(T) = \sqrt{a_{c1}(T)^2 + a_{c2}(T)^2} \quad (3.2)$$

donde  $a_{es}$  es la ordenada del espectro que caracteriza la intensidad de la excitación sísmica y  $a_{c1}$  y  $a_{c2}$  las ordenadas espectrales correspondientes a espectros elásticos de pseudo-aceleración como fracción de la gravedad.

- La duración de los acelerogramas debe ser congruente con las características del foco del sismo de proyecto, y en el caso de sistemas ubicados a distancias inferiores a 15 km de una falla activa importante, deberán incorporar fenómenos de campo cercano.
- Deberán considerarse los efectos de fricción, carga vertical, bilateral y/o velocidad de carga, en los casos en que el sistema aislante se vea afectado por estos parámetros.
- Las características de deformación de los elementos en los que se admite cierta plastificación se aproximarán lo más fielmente posible al comportamiento inelástico real.

Las sugerencias anteriores son consistentes con lo indicado en las Normas Técnicas Complementarias para Diseño por Sismo de la Ciudad de México (2017) en donde se indica que:

- Si se emplea el método de análisis dinámico no lineal paso a paso, deben utilizarse parejas de acelerogramas de temblores reales, de movimientos simulados, o de combinaciones de estos. Cuando el periodo  $T_s$ , en el sitio sea menor que 2 s, deben usarse no menos de ocho parejas de movimientos representativos. Para  $T_s$ , igual o mayor que 2 s, deben usarse no menos de doce parejas.

Para este estudio se optó por emplear doce parejas de acelerogramas de temblores reales. Los registros de los acelerogramas fueron tomados de la Base de datos de registros acelerográficos de la Red Acelerográfica del Instituto de Ingeniería (RAII-UNAM: <https://aplicaciones.iingen.unam.mx/AcelerogramasRSM/>). La Tabla 3.8 muestra los registros empleados, los cuales fueron seleccionados de acuerdo a la localización del sitio de estudio y la similitud de sus espectros de respuesta con el espectro de diseño que se utilizó para el dimensionamiento de los elementos estructurales.

**Tabla 3.8 Registros sísmicos**

No.	Estación				
	Archivo	Nombre	Clave	Latitud (N)	Longitud (W)
1	ACAC1404	Acapulco Centro Cultural	ACAC	16.8485	99.8516
2	ACAC9509	Acapulco Centro Cultural	ACAC	16.8485	99.8516
3	ACAD1404	Acapulco Escuela Diana	ACAD	16.8623	99.8715
4	ACAD1709	Acapulco Escuela Diana	ACAD	16.8623	99.8715
5	ACAN9509	Acapulco La Salle	ACAN	16.8660	99.8630
6	ACAP8509	Acapulco Pellandini	ACAP	16.8360	99.9140
7	ACAR1404	Acapulco Renacimiento	ACAR	16.8888	99.8350
8	ACAS8509	Acapulco SP	ACAS	16.8580	99.8940
9	ACAZ1404	Acapulco La Zanja	ACAZ	16.7885	99.7902
10	AZIH8509	Aeropuerto Zihuatanejo	AZIH	17.6065	101.4653
11	CALT8110	Ciudad Altamirano	CALT	18.3580	100.6580
12	CAYA8509	Cayaco	CAYA	17.0450	100.2660

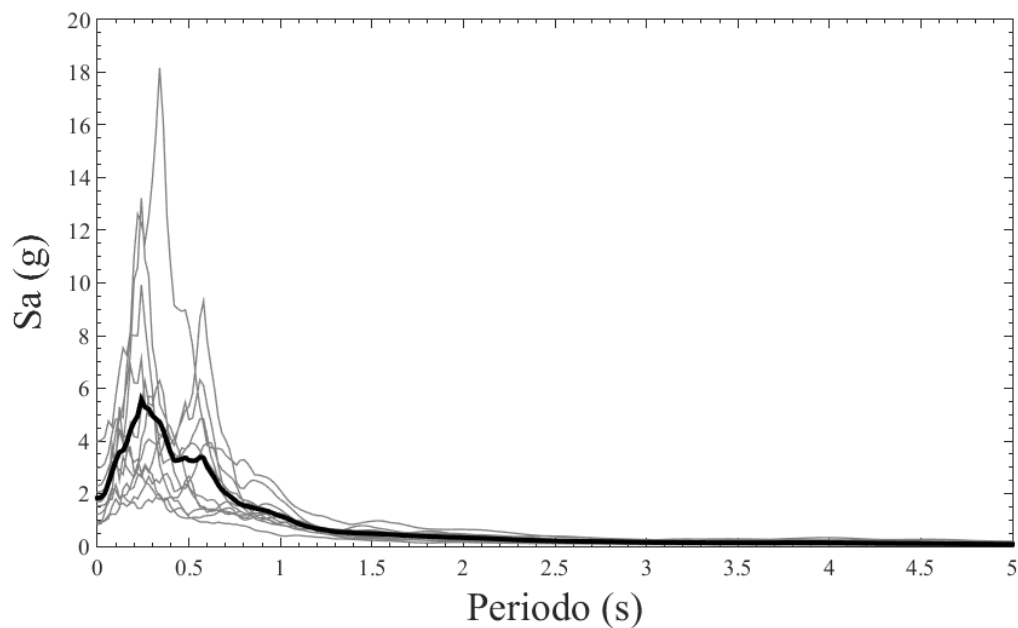
Los registros originales fueron procesados con ayuda del programa PRISM (2020), en el que se consideró lo siguiente:

- a) Recorte de la señal tomando en cuenta la intensidad de Arias; en un intervalo del 1 al 97%
- b) Corrección de línea base de primer orden
- c) Filtrado tipo pasabanda de 4 polos para eliminar frecuencias menores a 0.1 y mayores a 20 Hz

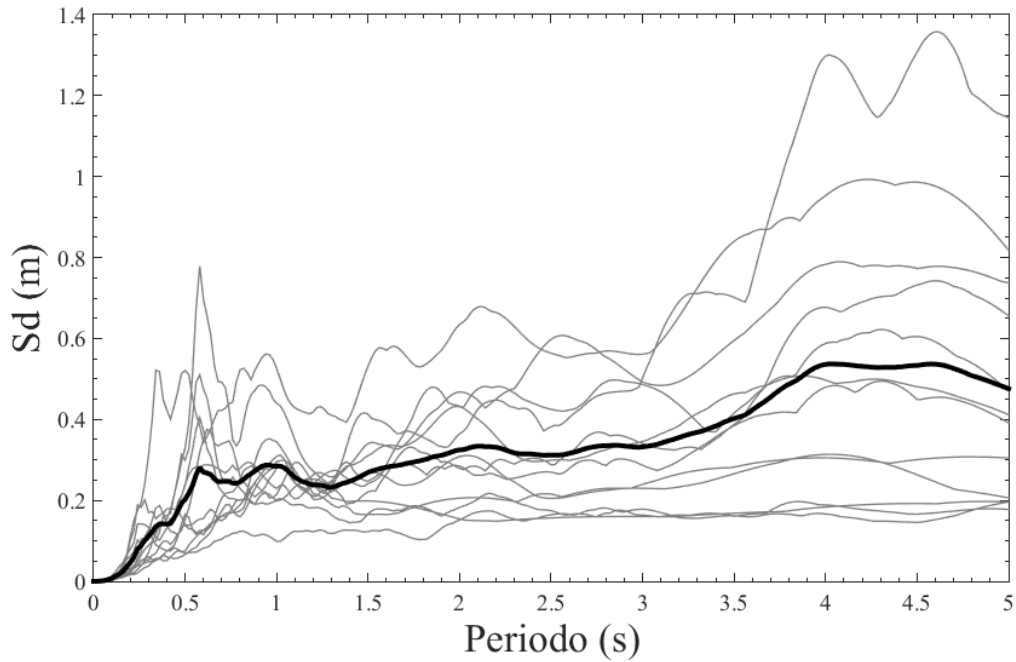
Las condiciones de procesamiento anteriores son consistentes con las empleadas para registros de aceleraciones de sismos en México.

### 3.6.4 Espectros de respuesta

Las Figuras 3.6 y 3.7 se muestran los espectros de pseudoaceleración y desplazamiento para un amortiguamiento crítico del 5% y un periodo entre 0 y 5 s. En escalas de grises se presentan los espectros de respuesta de cada uno de los acelerogramas empleados y en línea negra el promedio de ellos. Para la determinación de los espectros de respuesta, los acelerogramas fueron escalados para cumplir con la condición impuesta por la ecuación (3.2).



**Figura 3.6 Espectros de pseudoaceleración**



**Figura 3.7 Espectros de desplazamiento**

### 3.6.5 Determinación de los parámetros de los aisladores de fricción y desplazamientos calculados de los edificios equipados con aisladores de fricción

Se realizaron análisis paso a paso para evaluar el comportamiento de los edificios equipados con aisladores de fricción. Las Tablas 3.9 y 3.10 presentan un resumen del periodo teórico calculado, la rigidez efectiva calculada para cada aislador, el desplazamiento espectral asociado con el periodo de la estructura, el diámetro del aislador, el periodo real obtenido, así como los desplazamientos máximos obtenidos en la base y en la cúspide del edificio de 10 y 20 niveles, respectivamente.

**Tabla 3.9 Aisladores de péndulo de fricción para modelo de estudio 1 (10 niveles)**

Acelerograma	$T$ (s)	$K_{eff}$ (Ton/m)	Sd (m)	Diámetro (m)	$T_{eff}$ (s)	$\Delta_{m\acute{a}x}$ base	$\Delta_{m\acute{a}x}$ cúspide
ACAC1404	1.887	460.228	0.308	0.801	1.968	0.277	0.32
ACAC1709	1.888	459.903	0.31	0.806	1.969	0.145	0.167
ACAC9509	1.878	464.554	0.285	0.74	1.96	0.145	0.167
ACAD1404	1.919	445.104	0.432	1.122	1.999	0.249	0.29
ACAD1709	1.785	514.751	0.152	0.394	1.87	0.415	0.466
ACAD9509	1.876	465.806	0.279	0.725	1.957	0.096	0.108

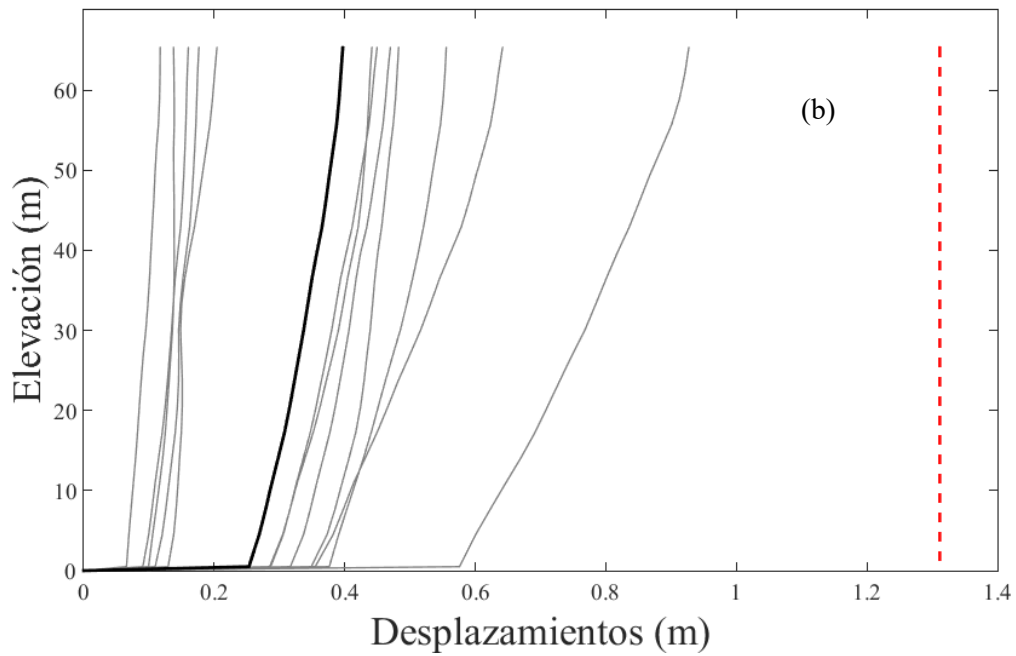
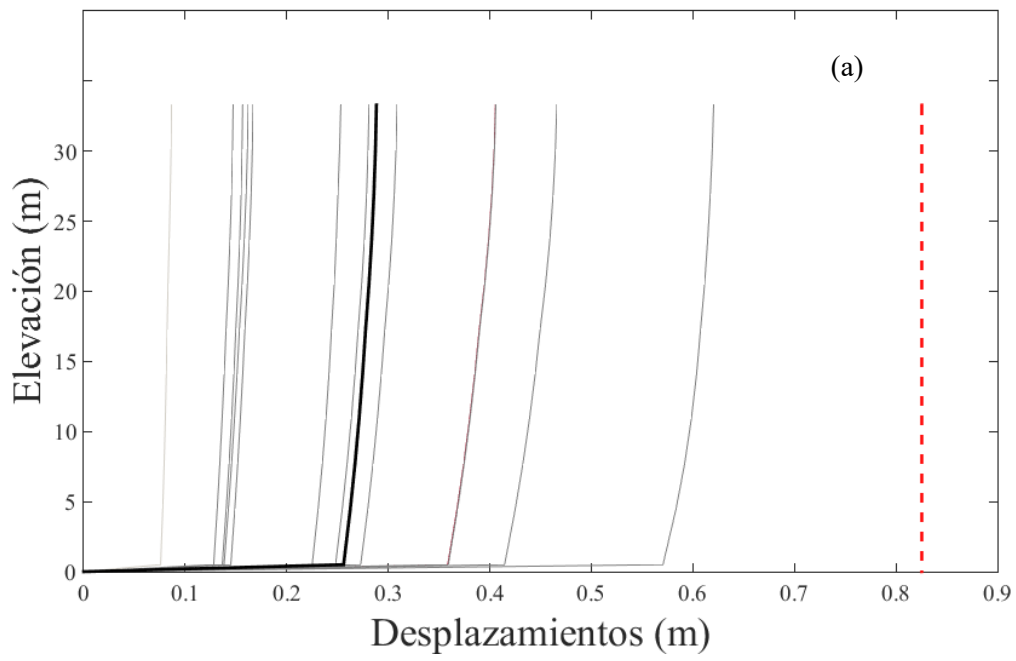
ACAN9509	1.919	444.973	0.433	1.126	1.999	0.248	0.281
ACAP8509	1.788	513.009	0.154	0.401	1.873	0.359	0.406
ACAR1404	1.946	433.002	0.635	1.651	2.025	0.571	0.62
ACAR9509	1.904	452.045	0.365	0.946	1.985	0.282	0.319
ACAS8509	1.835	486.67	0.205	0.534	1.918	0.152	0.172
CAYA8509	1.925	442.166	0.468	1.217	2.005	0.359	0.406

**Tabla 3.10 Aisladores de péndulo de fricción para modelo de estudio 2 (20 niveles)**

Acclerograma	$T$ (s)	$K_{eff}$ (Ton/m)	Sd (m)	Diámetro (m)	$T_{eff}$ (s)	$\Delta_{m\acute{a}x}$ base	$\Delta_{m\acute{a}x}$ cúspide
ACAC1404	3.480	190.102	0.266	0.691	3.299	0.060	0.117
ACAC1709	3.058	246.132	0.161	0.419	3.023	0.110	0.176
ACAC9509	3.753	163.453	0.385	1.001	3.484	0.285	0.442
ACAD1404	3.874	153.440	0.463	1.204	3.568	0.376	0.556
ACAD1709	3.064	245.272	0.162	0.421	3.026	0.091	0.160
ACAD9509	3.758	162.994	0.388	1.009	3.488	0.286	0.449
ACAN9509	3.805	159.052	0.416	1.081	3.520	0.317	0.470
ACAP8509	3.097	240.031	0.168	0.437	3.047	0.099	0.138
ACAR1404	3.677	170.260	0.840	2.184	3.432	0.576	0.927
ACAR9509	3.621	175.635	0.702	2.623	3.394	0.349	0.483
ACAS8509	3.527	185.090	0.282	0.734	3.330	0.129	0.204
CAYA8509	3.562	181.466	0.595	1.548	3.354	0.355	0.642

Se observa de las Tablas 3.9 y 3.10 que el acelerograma ACAR1404 proporciona las condiciones más desfavorables para ambos edificios, por lo que las dimensiones de los aisladores de fricción asociadas con los resultados obtenidos para ese acelerograma se emplearán para los análisis de los efectos del viento en los edificios.

La Figura 3.8 presenta en escala de grises el perfil de desplazamientos alcanzados por los modelos en estudio, en línea negra se identifica el promedio de estos desplazamientos y la línea punteada roja marca el límite establecido.



**Figura 3.8 Perfil de desplazamientos de los edificios debido a la aplicación de las aceleraciones de la Tabla 3.8: (a) Modelo de estudio 1; (b) Modelo de estudio 2**





# CAPÍTULO 4 ANÁLISIS ANTE CARGA DE VIENTO DE LOS EDIFICIOS EQUIPADOS CON AISLADORES DE FRICCIÓN

## 4.1 ANÁLISIS ANTE CARGAS ESTÁTICAS

El primer análisis ante cargas de viento tiene como objetivo evaluar la respuesta de los edificios con aisladores de fricción sometidos a cargas estáticas exclusivamente, sin tomar en cuenta ningún efecto dinámico ocasionado por el viento turbulento.

### 4.1.1 Velocidad de diseño

La velocidad de diseño para la Ciudad de Acapulco se determinó con base en las recomendaciones del Manual de Diseño de Obras Civiles: Diseño por Viento (Comisión Federal de Electricidad, 2008)

La velocidad básica de diseño es descrita como el producto de tres términos. La velocidad regional, el factor topográfico y el factor de exposición.

La velocidad regional se obtuvo con ayuda del programa *Sistema Viento*, empleando las coordenadas propuestas de la ubicación de los edificios y utilizando un periodo de retorno igual a 50 años. La velocidad regional obtenida para el sitio en estudio fue igual a 150 km/h. Esta velocidad regional está proporcionada bajo condiciones homogéneas establecidas (es decir un terreno plano con pocas obstrucciones y las cuales van desde 1.5 m hasta 10 m de altura, velocidades asociadas con ráfagas de 3 segundos y evaluadas a 10 m de altura).

El factor de topografía toma en cuenta las variaciones topográficas del terreno sobre la que se desplantan los edificios. El Manual de Diseño de Obras Civiles: Diseño por Viento (Comisión Federal de Electricidad, 2008) especifica que, para terreno plano, el factor de topografía es igual a 1.0, por lo que este valor es adoptado para los análisis.

Para determinar el factor de exposición, es indispensable identificar la categoría del terreno. Debido a que los edificios están ubicados en la costa, el terreno cumple con las características de una categoría 1. La siguiente ecuación expresa el cálculo del factor de exposición:

$$F_{rz} = c \quad \text{si } z \leq 10 \quad (4.1a)$$

$$F_{rz} = c \left( \frac{z}{10} \right)^\alpha \quad \text{si } 10 < z < \delta \quad (4.1b)$$

$$F_{rz} = c \left( \frac{\delta}{10} \right)^\alpha \quad \text{si } z \geq \delta \quad (4.1c)$$

donde  $\alpha$  es el exponente que determina la forma de la variación de la velocidad del viento con la altura,  $\delta$  es la altura gradiente,  $c$  el coeficiente de escala de rugosidad y  $z$  es la altura por encima del terreno natural a la cual se quiere conocer la velocidad de diseño, esto último significa que la velocidad tendrá una variación dependiendo el nivel donde se desee analizar.

La tabla 4.1 presenta el cálculo del factor de exposición y de la velocidad de diseño, en la que se observa un aumento de la velocidad conforme se incrementa la altura.

**Tabla 4.1 Cálculo de factor de exposición y velocidad de diseño**

Nivel	Altura (m)	Frz	VD (km/h)
1	4.00	1.14	170.55
2	7.20	1.14	170.55
3	10.40	1.14	171.21
4	13.60	1.17	175.82
5	16.80	1.20	179.54
6	20.00	1.22	182.66
7	23.20	1.24	185.37
8	26.40	1.25	187.75
9	29.60	1.27	189.89
10	32.80	1.28	191.83
11	36.00	1.29	193.61
12	39.20	1.30	195.25
13	42.40	1.31	196.77
14	45.60	1.32	198.19
15	48.80	1.33	199.53
16	52.00	1.34	200.79
17	55.20	1.35	201.98
18	58.40	1.35	203.11
19	61.60	1.36	204.18
20	64.80	1.37	205.21

Nota: El factor de topografía,  $F_T$ , es igual a 1.

### 5.1.2 Presión actuante

Cuando el viento actúa sobre algún cuerpo, éste genera presiones sobre su superficie que varían dependiendo de la intensidad de la velocidad y la dirección del viento. La presión dinámica de base es determinada con la siguiente ecuación:

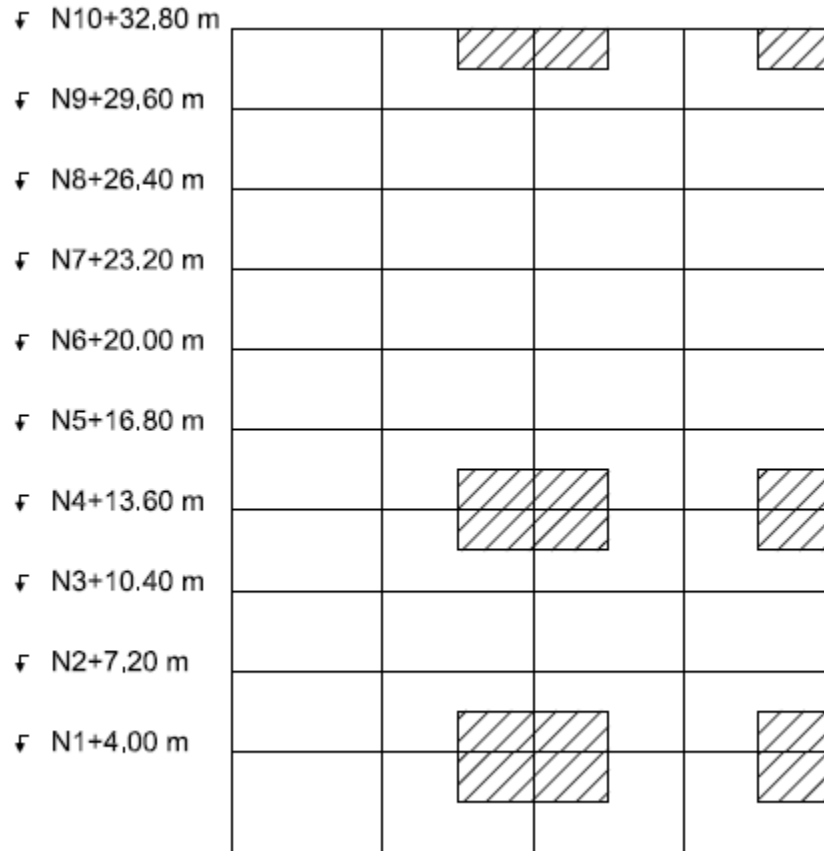
$$q_z = 0.0048GV_D^2 \quad (\text{en } kg/m^2) \quad (4.2)$$

donde  $G$  es un factor por corrección por temperatura y por la altura con respecto al nivel del mar, las cuales fueron iguales a  $28^\circ\text{C}$  y  $7$  m para este estudio, respectivamente. El cálculo del factor  $G$  se determina con la siguiente ecuación:

$$G = \frac{0.392\Omega}{273 + \tau} \quad (4.3)$$

donde  $\Omega$  es la presión barométrica, en mm de Hg y  $\tau$  la temperatura ambiental, en  $^\circ\text{C}$ .

Para aplicar la presión calculada con la ecuación (4.2) sobre los modelos en estudio, es importante considerar un coeficiente de presión, el cual se define como la relación de la presión actuante sobre la construcción a la presión dinámica de base. Esta presión actuará sobre un área tributaria. Debido a que se determinó aplicar las fuerzas del viento sobre los nodos de los modelos, la determinación de las áreas tributarias se ejemplifica con el modelo de estudio 1 (10 niveles) en la Figura 4.1.



**Figura 4.1 Identificación de algunas áreas tributarias en modelo de estudio 1 (10 niveles). Las áreas tributarias se muestran en las zonas sombreadas.**

Considerando las áreas tributarias y los coeficientes de presión obtenidos de acuerdo al Manual de Diseño de Obras Civiles: Diseño por Viento (Comisión Federal de Electricidad, 2008), las Tablas 4.2 y 4.3 presentan un resumen de las cargas de barlovento, sotavento y muros laterales aplicadas sobre el modelo de estudio 1 y 2, respectivamente.

**Tabla 4.2 Carga en barlovento, sotavento y muros laterales para el modelo de estudio 1**

Eje	Altura	qz (kg/m <sup>2</sup> )	Área (m <sup>2</sup> )	C <sub>pe</sub> Barlovento	C <sub>pe</sub> Sotavento	Carga Barlovento (kg)	Carga Sotavento (kg)
1,5	0.00	138.13	0.00	0.80	-0.50	0.00	0.00
	4.00	138.13	10.80	0.80	-0.50	1187.12	-741.95
	7.20	138.13	9.60	0.80	-0.50	1060.87	-663.05
	10.40	139.21	9.60	0.80	-0.50	1069.14	-668.21
	13.60	146.81	9.60	0.80	-0.50	1127.47	-704.67
	16.80	153.08	9.60	0.80	-0.50	1175.64	-734.78
	20.00	158.46	9.60	0.80	-0.50	1216.93	-760.58
	23.20	163.18	9.60	0.80	-0.50	1253.23	-783.27
	26.40	167.41	9.60	0.80	-0.50	1285.70	-803.56
	29.60	171.24	9.60	0.80	-0.50	1315.16	-821.98
	32.80	174.76	4.80	0.80	-0.50	671.08	-419.43
2, 3 ,4	0.00	138.13	0.00	0.80	-0.50	0.00	0.00
	4.00	138.13	21.60	0.80	-0.50	2202.37	-1376.48
	7.20	138.13	19.20	0.80	-0.50	1991.61	-1244.76
	10.40	139.21	19.20	0.80	-0.50	2007.14	-1254.46
	13.60	146.81	19.20	0.80	-0.50	2116.63	-1322.89
	16.80	153.08	19.20	0.80	-0.50	2207.07	-1379.42
	20.00	158.46	19.20	0.80	-0.50	2284.59	-1427.87
	23.20	163.18	19.20	0.80	-0.50	2352.73	-1470.45
	26.40	167.41	19.20	0.80	-0.50	2413.69	-1508.56
	29.60	171.24	19.20	0.80	-0.50	2469.00	-1543.12
	32.80	174.76	9.60	0.80	-0.50	1342.17	-838.85

**Cont. Tabla 4.2 Carga en barlovento, sotavento y muros laterales para el modelo de estudio 1**

Eje	Altura	qz (kg/m <sup>2</sup> )	Área (m <sup>2</sup> )	C <sub>pe</sub> Lateral	Carga Lateral (kg)
A, E	0.00	138.13	0.00	-0.65	0.00
	4.00	138.13	10.80	-0.65	-964.53
	7.20	138.13	9.60	-0.65	-861.96
	10.40	139.21	9.60	-0.65	-868.68
	13.60	146.81	9.60	-0.65	-916.07
	16.80	153.08	9.60	-0.65	-955.21
	20.00	158.46	9.60	-0.65	-988.76
	23.20	163.18	9.60	-0.65	-1018.25
	26.40	167.41	9.60	-0.65	-1044.63
	29.60	171.24	9.60	-0.65	-1068.57
	32.80	174.76	4.80	-0.65	-545.25
B, C, D	0.00	138.13	0.00	-0.65	0.00
	4.00	138.13	21.60	-0.65	-1789.43
	7.20	138.13	19.20	-0.65	-1618.18
	10.40	139.21	19.20	-0.65	-1630.80
	13.60	146.81	19.20	-0.65	-1719.76
	16.80	153.08	19.20	-0.65	-1793.24
	20.00	158.46	19.20	-0.65	-1856.23
	23.20	163.18	19.20	-0.65	-1911.59
	26.40	167.41	19.20	-0.65	-1961.13
	29.60	171.24	19.20	-0.65	-2006.06
	32.80	174.76	9.60	-0.65	-1090.51

**Tabla 4.3 Carga en barlovento, sotavento y muros laterales para el modelo de estudio 2**

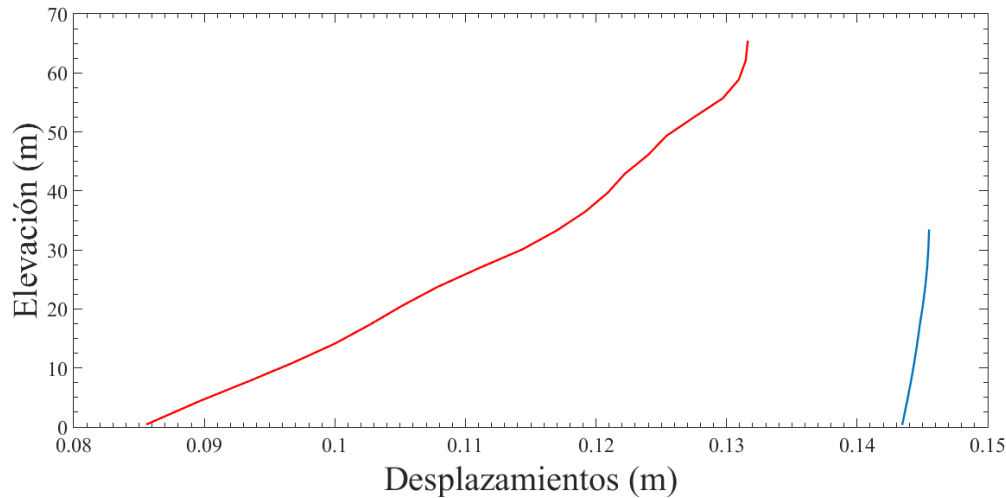
Eje	Altura	qz (kg/m <sup>2</sup> )	Área (m <sup>2</sup> )	C <sub>pe</sub> Barlovento	C <sub>pe</sub> Sotavento	Carga Barlovento (kg)	Carga Sotavento (kg)
1,5	0.00	138.09	0.00	0.80	-0.50	0.00	0.00
	4.00	138.09	10.80	0.80	-0.50	1186.72	-741.70
	7.20	138.09	9.60	0.80	-0.50	1060.52	-662.83
	10.40	139.17	9.60	0.80	-0.50	1068.79	-667.99
	13.60	146.76	9.60	0.80	-0.50	1127.09	-704.43
	16.80	153.03	9.60	0.80	-0.50	1175.25	-734.53
	20.00	158.40	9.60	0.80	-0.50	1216.53	-760.33
	23.20	163.13	9.60	0.80	-0.50	1252.81	-783.01
	26.40	167.35	9.60	0.80	-0.50	1285.28	-803.30
	29.60	171.19	9.60	0.80	-0.50	1314.72	-821.70
	32.80	174.70	9.60	0.80	-0.50	1341.72	-838.58
	36.00	177.95	9.60	0.80	-0.50	1366.68	-854.18
	39.20	180.98	9.60	0.80	-0.50	1389.92	-868.70
	42.40	183.81	9.60	0.80	-0.50	1411.68	-882.30
	45.60	186.48	9.60	0.80	-0.50	1432.17	-895.11
	48.80	189.00	9.60	0.80	-0.50	1451.53	-907.21
	52.00	191.39	9.60	0.80	-0.50	1469.90	-918.69
	55.20	193.67	9.60	0.80	-0.50	1487.38	-929.61
58.40	195.84	9.60	0.80	-0.50	1504.07	-940.05	
61.60	197.92	9.60	0.80	-0.50	1520.04	-950.03	
64.80	199.92	4.80	0.80	-0.50	767.68	-479.80	
2, 3, 4	0.00	138.09	0.00	0.80	-0.50	0.00	0.00
	4.00	138.09	21.60	0.80	-0.50	2201.64	-1376.02
	7.20	138.09	19.20	0.80	-0.50	1990.95	-1244.34
	10.40	139.17	19.20	0.80	-0.50	2006.47	-1254.04
	13.60	146.76	19.20	0.80	-0.50	2115.93	-1322.46
	16.80	153.03	19.20	0.80	-0.50	2206.34	-1378.96
	20.00	158.40	19.20	0.80	-0.50	2283.83	-1427.40
	23.20	163.13	19.20	0.80	-0.50	2351.94	-1469.96
	26.40	167.35	19.20	0.80	-0.50	2412.89	-1508.06
	29.60	171.19	19.20	0.80	-0.50	2468.18	-1542.61
	32.80	174.70	19.20	0.80	-0.50	2518.86	-1574.29
	36.00	177.95	19.20	0.80	-0.50	2565.71	-1603.57
	39.20	180.98	19.20	0.80	-0.50	2609.34	-1630.84
42.40	183.81	19.20	0.80	-0.50	2650.20	-1656.38	
45.60	186.48	19.20	0.80	-0.50	2688.66	-1680.41	
2, 3, 4	48.80	189.00	19.20	0.80	-0.50	2725.01	-1703.13
	52.00	191.39	19.20	0.80	-0.50	2759.49	-1724.68
	55.20	193.67	19.20	0.80	-0.50	2792.31	-1745.20
	58.40	195.84	19.20	0.80	-0.50	2823.64	-1764.78
	61.60	197.92	19.20	0.80	-0.50	2853.63	-1783.52
64.80	199.92	9.60	0.80	-0.50	1535.36	-959.60	



Cont. Tabla 4.3 Carga en barlovento, sotavento y muros laterales para el modelo de estudio 2

Eje	Altura	qz (kg/m <sup>2</sup> )	Área (m <sup>2</sup> )	C <sub>pe</sub> Lateral	Carga Lateral (kg)
A, E	0	138.09	0	-0.65	0
	4	138.09	10.8	-0.65	-741.7
	7.2	138.09	9.6	-0.65	-662.83
	10.4	139.17	9.6	-0.65	-667.99
	13.6	146.76	9.6	-0.65	-704.43
	16.8	153.03	9.6	-0.65	-734.53
	20	158.4	9.6	-0.65	-760.33
	23.2	163.13	9.6	-0.65	-783.01
	26.4	167.35	9.6	-0.65	-803.3
	29.6	171.19	9.6	-0.65	-821.7
	32.8	174.7	9.6	-0.65	-838.58
	36	177.95	9.6	-0.65	-854.18
	39.2	180.98	9.6	-0.65	-868.7
	42.4	183.81	9.6	-0.65	-882.3
	45.6	186.48	9.6	-0.65	-895.11
	48.8	189	9.6	-0.65	-907.21
	52	191.39	9.6	-0.65	-918.69
	55.2	193.67	9.6	-0.65	-929.61
	58.4	195.84	9.6	-0.65	-940.05
61.6	197.92	9.6	-0.65	-950.03	
64.8	199.92	4.8	-0.65	-479.8	
B, C, D	0	138.09	0	-0.65	0
	4	138.09	21.6	-0.65	-1376.02
	7.2	138.09	19.2	-0.65	-1244.34
	10.4	139.17	19.2	-0.65	-1254.04
	13.6	146.76	19.2	-0.65	-1322.46
	16.8	153.03	19.2	-0.65	-1378.96
	20	158.4	19.2	-0.65	-1427.4
	23.2	163.13	19.2	-0.65	-1469.96
	26.4	167.35	19.2	-0.65	-1508.06
	29.6	171.19	19.2	-0.65	-1542.61
B, C, D	32.8	174.7	19.2	-0.65	-1574.29
	36	177.95	19.2	-0.65	-1603.57
	39.2	180.98	19.2	-0.65	-1630.84
	42.4	183.81	19.2	-0.65	-1656.38
	45.6	186.48	19.2	-0.65	-1680.41
	48.8	189	19.2	-0.65	-1703.13
	52	191.39	19.2	-0.65	-1724.68
	55.2	193.67	19.2	-0.65	-1745.2
	58.4	195.84	19.2	-0.65	-1764.78
	61.6	197.92	19.2	-0.65	-1783.52
64.8	199.92	9.6	-0.65	-959.6	

La figura 4.2 muestra los perfiles de desplazamiento para los modelos de estudio sometidos a las cargas estáticas de viento. La línea azul representa el perfil de desplazamientos del modelo de estudio 1, mientras que la línea roja representa el perfil de desplazamientos del modelo de estudios 2.



**Figura 4.2 Perfil de desplazamiento ante una carga de viento estático**

Se observa en la Figura 4.2 que los desplazamientos de los edificios sometidos a cargas estáticas de viento son considerablemente menores a aquéllos obtenidos cuando se considera la aplicación de la acción sísmica. La anterior se presenta cuando la velocidad de diseño se calcula con base en la velocidad regional del sitio donde se ubicaron los edificios. En la siguiente sección se considera que los edificios con aisladores de fricción son sometidos a los efectos dinámicos del viento y se plantean escenarios en donde la velocidad regional del viento puede aumentar con respecto a la empleada en los análisis estáticos.

## 4.2 CASO DINÁMICO

### 4.2.1 Simulación de velocidades y fuerzas sintéticas del viento

Los modelos en estudio fueron sometidos a conjuntos de señales de viento turbulento. Estas señales fueron simuladas con el programa SVTPro (Ortegón Esparza y Pozos Estrada, 2016), el cual emplea un modelo de Autoregresión y Media Móvil para realizar las simulaciones. Para los análisis se emplearon 3 juegos de señales de viento, cada juego de señales se asocia con un perfil de velocidad media predefinido. La duración de las señales es de 10 minutos (tiempo de observación típico en ingeniería de viento) con un paso de tiempo igual a 0.1 segundos.

Para determinar el perfil de velocidad media del viento para análisis dinámicos, el Manual de Diseño de Obras Civiles para Diseño por Viento (Comisión Federal de Electricidad, 2008) indica que la velocidad media del viento con un tiempo de promediado de diez minutos se determina con la expresión:

$$V'_D = \frac{F_T F'_{rz} V_R}{3.6} \quad (4.4)$$

donde  $V_R$  es la velocidad regional de ráfaga en km/h,  $F_T$  es el factor de topografía,  $F'_{rz}$  es el factor de exposición para la velocidad media el cual se calcula con la siguiente expresión:

$$F'_{rz} = 0.702\bar{b} \quad \text{si } z \leq 10 \quad (4.5a)$$

$$F'_{rz} = 0.702\bar{b} \left(\frac{z}{10}\right)^{\alpha'} \quad \text{si } 10 < z \leq 200 \quad (4.5b)$$

donde  $\bar{b}$  es un coeficiente adimensional, el exponente  $\alpha'$ , adimensional, de la variación de la velocidad con la altura, para cada categoría de rugosidad del terreno; corresponde a un intervalo de promediado de diez minutos que determina la forma de la variación de la velocidad del viento con la altura y  $z$  es la altura por encima del terreno natural a la cual se quiere conocer la velocidad de diseño.

La tabla 4.4 presenta el cálculo del factor de exposición y de la velocidad media asociada a la velocidad regional para el modelo de estudio 2, puede observarse un aumento conforme se incrementa la altura, como se esperaba. Un procedimiento similar fue empleado para el cálculo de la velocidad media para los análisis dinámicos del edificio en estudio 1.

**Tabla 4.4 Cálculo de factor de exposición y velocidad media para análisis dinámicos**

Nivel	Altura (m)	$F'_{rz}$	$V'_D$ (m/s)
1	4.00	0.82	34.22
2	7.20	0.82	34.22
3	10.40	0.83	34.38
4	13.60	0.85	35.51
5	16.80	0.87	36.42
6	20.00	0.89	37.19
7	23.20	0.91	37.86
8	26.40	0.92	38.45
9	29.60	0.94	38.98
10	32.80	0.95	39.47
11	36.00	0.96	39.91
12	39.20	0.97	40.32
13	42.40	0.98	40.70
14	45.60	0.99	41.06
15	48.80	0.99	41.39
16	52.00	1.00	41.71
17	55.20	1.01	42.01
18	58.40	1.02	42.29
19	61.60	1.02	42.57
20	64.80	1.03	42.83

Nota:  $FT = 1$

Los perfiles de velocidad media para análisis dinámicos son empleados en el programa SVTPro (Ortegón Esparza y Pozos Estrada, 2016) para simular señales sintéticas del viento, como se ilustra en la Figura 4.3.

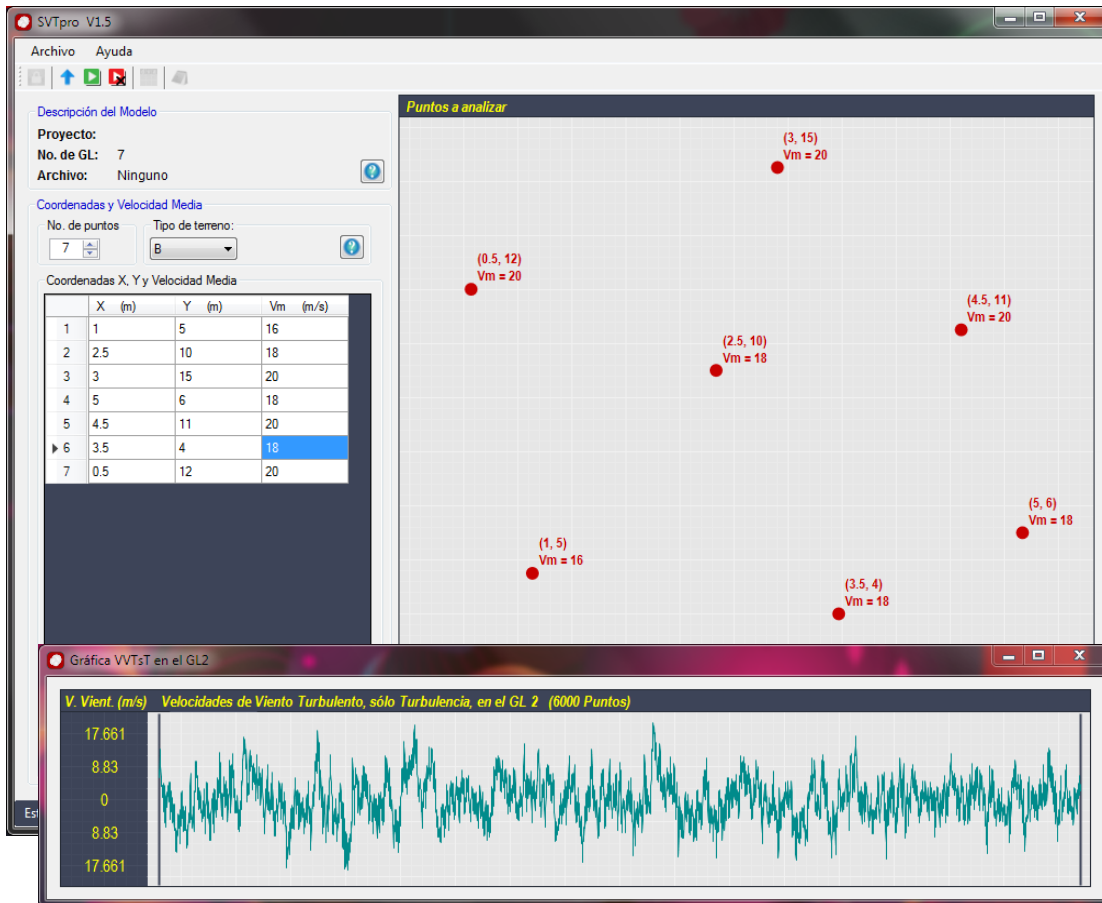


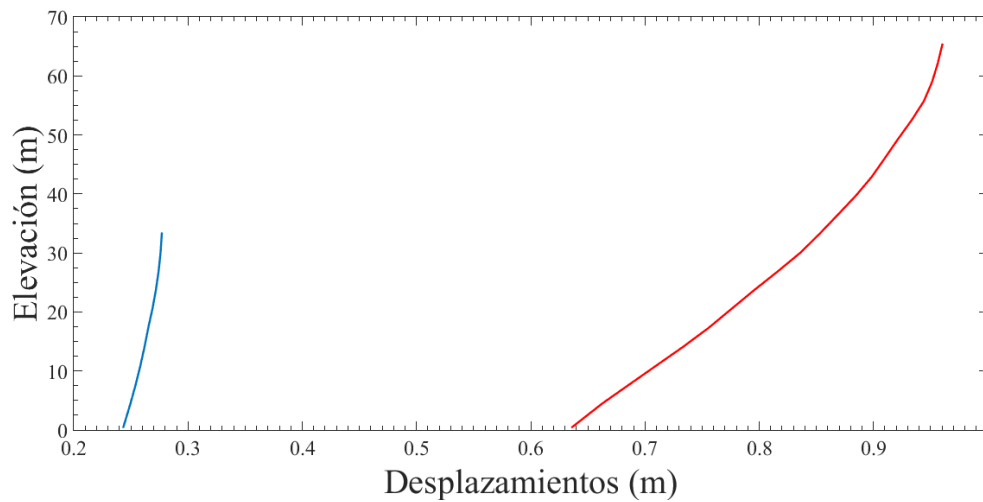
Figura 4.3 Simulación de señales sintéticas de viento

La fuerza de arrastre es determinada con la siguiente ecuación:

$$F_d = \frac{1}{2} \rho A C_d v^2 \quad (4.6)$$

donde  $\rho$  es la densidad del aire ( $1.23 \text{ kg/m}^3$ ),  $A$  es el área tributaria,  $C_d$  es el coeficiente de arrastre que para este estudio es igual a 1.23 y  $v$  es la velocidad del viento simulada con el programa.4.2.1 Comparación de desplazamientos de los edificios con sistema de aislamiento de fricción sometidos a viento turbulento

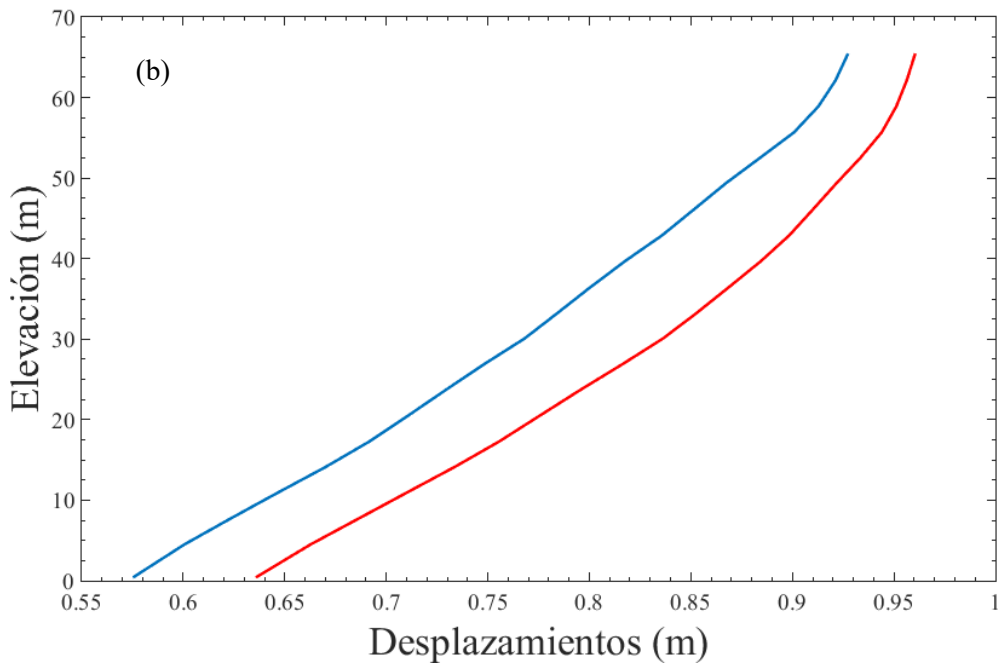
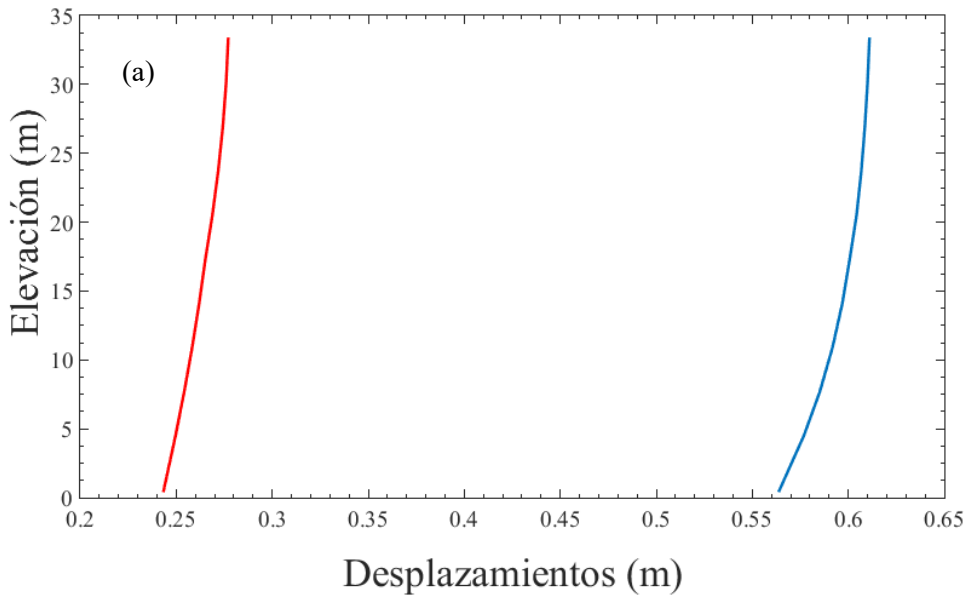
La figura 4.4 presenta el perfil de desplazamientos promedio (considerando 3 simulaciones), utilizando la velocidad regional de los modelos de estudio.



**Figura 4.4 Perfil de desplazamientos ante cargas de viento dinámicas**

Es interesante observar en la Figura 4.4 el gran cambio que existe al realizar un análisis dinámico sobre el modelo de 20 niveles, incrementando en gran medida los desplazamientos alcanzados con respecto al análisis estático. También se observa un incremento en los desplazamientos del edificio de 10 niveles, aunque este incremento no es tan notable con el caso del edificio de 20 niveles.

La figura 4.5 presenta una comparación entre los desplazamientos obtenidos en los modelos de estudio cuando se aplican fuerzas de sismo o viento dinámicas. La línea de color rojo azul representa los desplazamientos debido a la acción del sismo, mientras que la línea roja representa la respuesta ante la acción del viento.



**Figura 4.5 Comparación entre desplazamientos: (a) modelo de estudio 1 (10 niveles); (b) modelo de estudio 2 (20 niveles)**

Se observa en la Figura 4.5 que los efectos dinámicos del viento amplifican la respuesta del edificio de 20 niveles y se obtienen desplazamientos ligeramente superiores a los obtenidos con la acción sísmica. Para el caso del edificio de 10 niveles, los desplazamientos inducidos por el viento turbulento son 50% menores que los obtenidos con la acción sísmica.

## 4.2.2 Comparación de desplazamientos de los edificios con sistema de aislamiento de fricción sometidos a viento turbulento con velocidad media asociada a viento de huracán

### 4.2.2.1 Velocidades de huracán

La escala Saffir-Simpson define y clasifica la categoría de un huracán en función de la velocidad del viento. La categoría de un huracán no está relacionada necesariamente con los daños que puede ocasionar. En esta clasificación no son tenidas en cuenta ni la cantidad de precipitación ni la situación en la que inciden, lo que significa que un huracán de categoría 3 que afecte a una gran ciudad puede causar más daños que uno de categoría 5 pero que afecte a una zona despoblada. La velocidad máxima de viento en la superficie está expresada por mediciones de 1 minuto de viento sostenido a 10 m de altura sin obstrucciones (National Oceanic and Atmospheric Administration, NOAA). En la siguiente tabla se presentan las 5 categorías de la escala Saffir-Simpson, las velocidades y algunos daños típicos observados dentro de un área poblada.

**Tabla 4.5 Escala Saffir-Simpson**

Categoría	Viento sostenido	Tipo de daño debido a viento huracanado
1	119-153 km/h	Las casas de armazón de madera bien construidas podrían tener daños en el techo, las tejas, el revestimiento de vinilo y las canaletas. Las ramas grandes de los árboles se romperán y los árboles con raíces poco profundas pueden derribarse. Los daños extensos a las líneas eléctricas y los postes probablemente resultarán en cortes de energía que podrían durar de unos pocos a varios días.
2	154-177 km/h	Las casas de armazón de madera bien construidas podrían sufrir daños importantes en el techo y el revestimiento. Muchos árboles con raíces poco profundas se romperán o arrancarán de raíz y bloquearán numerosos caminos. Se espera una pérdida de energía casi total con cortes que podrían durar desde varios días hasta semanas.
3	154-177 km/h	Las casas enmarcadas en madera bien construidas pueden sufrir daños importantes o la eliminación de la plataforma del techo y los extremos de los hastiales. Muchos árboles serán cortados o arrancados de raíz, bloqueando numerosos caminos. La electricidad y el agua no estarán disponibles durante varios días o semanas después de que pase la tormenta.
4	209-251 km/h	Las casas enmarcadas en madera bien construidas pueden sufrir daños severos con la pérdida de la mayor parte de la estructura del techo y / o algunas paredes exteriores. La mayoría de los árboles se romperán o arrancarán de raíz y se derribarán postes de energía. Los árboles caídos y los postes de energía aislarán las áreas residenciales. Los cortes de energía durarán semanas o posiblemente meses. La mayor parte del área estará inhabitable durante semanas o meses.
5	> 251 km/h	Un alto porcentaje de casas enmarcadas en madera serán destruidas, con falla total del techo y colapso de la pared. Los árboles caídos y los postes de energía aislarán las áreas residenciales. Los cortes de energía durarán desde semanas hasta posiblemente meses. La mayor parte del área estará inhabitable durante semanas o meses.

Los análisis realizados hasta este punto han considerado que la velocidad de viento regional corresponde a los valores establecidos en el Manual de Diseño de Obras Civiles para Diseño por Viento (Comisión Federal de Electricidad, 2008) para el sitio en donde se ubicaron las estructuras,

que corresponde a velocidades de ráfaga de 3 segundos. Para los análisis que se presentan en esta sección, se supone que la velocidad regional puede tomar valores comparables a las velocidades de huracán, como las que se muestran en la Tabla 4.5.

La Organización Meteorológica Mundial presenta una metodología para encontrar una equivalencia de velocidades en diferentes periodos de referencia, de acuerdo con la siguiente expresión:

$$V_{\tau, T_0} = G_{\tau, T_0} V \quad (4.4)$$

donde  $V_{\tau, T_0}$  representa la velocidad asociada a un periodo de referencia  $T_0$ ,  $G_{\tau, T_0}$  representa un factor de ráfaga y  $V$  es la velocidad de ráfaga de 3 segundos. La Tabla 4.6 presenta factores de conversión de la velocidad de viento para condiciones de ciclones tropicales.

**Tabla 4.6 Factores de conversión de la velocidad de viento para condiciones ciclones tropicales**

Exposición a +10m		Periodo de referencia $T_0$ (s)	Factor de ráfaga $G_{\tau, T_0}$				
Clase	Descripción		Duración de la ráfaga $\tau$ (s)				
			3	60	120	180	600
Tierra dentro	Terreno muy abierto	3600	1.75	1.28	1.19	1.15	1.08
		600	1.66	1.21	1.12	1.09	1
		180	1.58	1.15	1.07	1	
		120	1.55	1.13	1		
		60	1.49	1			
Fuera de la tierra	Vientos marinos a costa	3600	1.6	1.22	1.15	1.12	1.06
		600	1.52	1.16	1.09	1.06	1
		180	1.44	1.1	1.04	1	
		120	1.42	1.08	1		
		60	1.36	1			
Fuera del mar	Vientos en tierra a costa	3600	1.45	1.17	1.11	1.09	1.05
		600	1.38	1.11	1.05	1.03	1
		180	1.31	1.05	1	1	
		120	1.28	1.03	1		
		60	1.23	1			
En el mar	> 20 km fuera de la costa	3600	1.3	1.11	1.07	1.06	1.03
		600	1.23	1.05	1.02	1	1
		180	1.17	1	1	1	
		120	1.15	1	1		
		60	1.11	1			

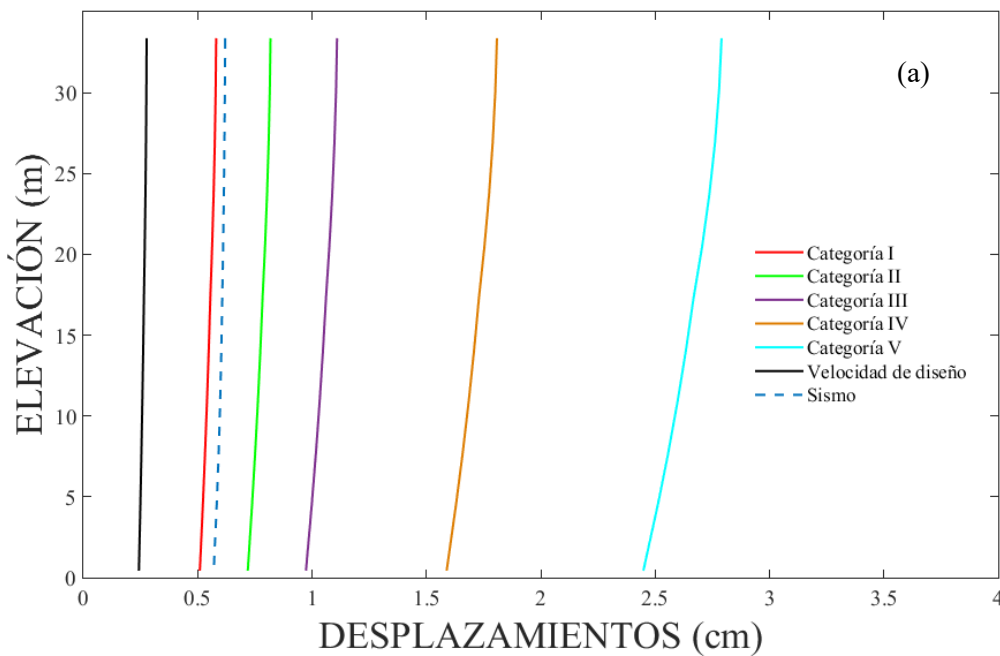
De acuerdo a la Tabla 4.6, el factor para convertir velocidades de viento de 60 segundos de tiempo de promediado a ráfagas de 3 segundos es igual a 1.36 para una clase de exposición de Fuera de Tierra. La tabla 4.7 muestra las velocidades equivalentes de cada categoría de huracanes a una velocidad asociada de ráfaga de 3 segundos.

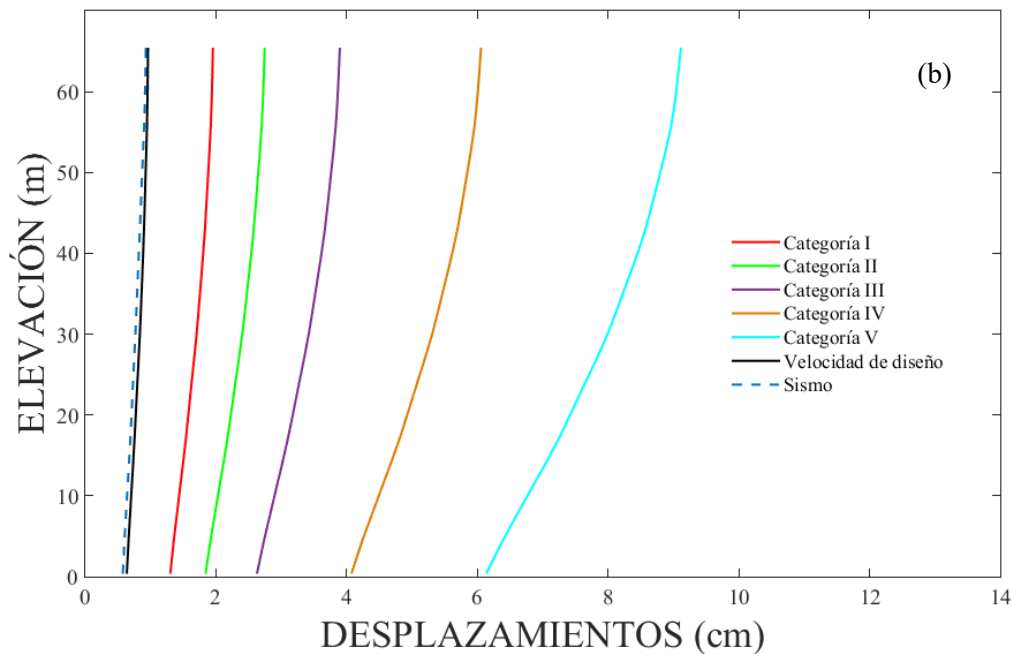


**Tabla 4.7 Factores de ráfaga de conversión de velocidades**

Velocidad	Categoría I	Categoría II	Categoría III	Categoría IV	Categoría V
Máximos sostenidos 1 minuto (km/h)	153	177	208	251	300
Ráfaga de 3 segundos (km/h)	208.08	240.72	282.88	341.36	408.00

Los resultados de los análisis dinámicos, empleando velocidades de viento asociadas con huracán, se presentan en la Figura 4.6. Se observa en la Figura 4.6 que, cuando se emplean velocidades asociadas con huracanes, los desplazamientos que presentan los edificios en estudio aumentan considerablemente con respecto a la velocidad de diseño original (no de huracán). También se observa que los desplazamientos inducidos por el sismo son superados cuando la velocidad de viento se asocia con una velocidad de huracán categoría II para el edificio de 10 niveles y categoría 1 para el edificio de 20 niveles teniendo un comportamiento muy parecido con la velocidad de diseño original.





**Figura 4.6 Desplazamientos asociados con velocidades de huracán: (a) modelo 1; (b) modelo 2**

Una comparación de los desplazamientos máximos en la parte alta de los edificios causada por vientos de huracán con respecto a la velocidad de viento no de huracán se resume en la Tabla 4.8 Relación de los desplazamientos alcanzados en la parte alta de los edificios

Modelo	Categoría I	Categoría II	Categoría III	Categoría IV	Categoría V
1	210%	295%	400%	653%	1007%
2	203%	286%	406%	631%	949%

La Tabla 4.8 indica que cuando se presentan velocidades de huracán, los desplazamientos en la parte alta de los edificios son al menos 200% superiores a los obtenidos con la velocidad de diseño (no de huracán). Casos históricos de huracanes que han impactado el estado de Guerrero incluyen los huracanes Tara en 1961, Wally en 1965, Claudia en 1973 y Paulina que impactó Acapulco en 1997 con una categoría 4 de acuerdo con la escala Saffir-Simpson (Matías Ramírez, 1998). Más recientemente, en 2013 el huracán Manuel con categoría 1 afectó las costas de Acapulco. Lo anterior sugiere que, en las costas del Pacífico mexicano, en donde los efectos de viento y sismo son importantes, el empleo de sistemas de aislamiento sísmico de fricción, como los empleados en este estudio, deben ser empleados con cautela y la revisión de desplazamientos inducidos por sismo y por viento es recomendable.

## CAPÍTULO 5

### CONCLUSIONES Y TRABAJOS FUTUROS

#### 5.1 Conclusiones

El vivir en un país con gran actividad sísmica, muchas veces nos distrae de la influencia del viento, la cual, en ocasiones, es una condición igual o mayormente desfavorable para las estructuras. Las principales conclusiones de este trabajo se presentan a continuación:

- Los desplazamientos inducidos por la acción sísmica en los edificios de 10 y 20 niveles considerados son superiores a los obtenidos con la acción eólica cuando sólo se considera la componente estática del viento.
- Cuando se realizan análisis dinámicos con fuerzas de viento que incluyen la componente estática y dinámica, los desplazamientos obtenidos en los edificios con sistemas de aislamiento de fricción son comparables a los obtenidos al considerar la acción sísmica y en algunos casos superiores.
- Cuando se consideran velocidades comparables con las presentes en huracanes, los desplazamientos que presentan los edificios con sistemas de aislamiento de fricción pueden ser considerablemente superiores a los asociados con la acción sísmica.

#### 5.2 Recomendaciones y trabajos futuros

En las costas del Pacífico mexicano, en donde los efectos de viento y sismo son importantes, el empleo de sistemas de aislamiento sísmico de fricción, como los empleados en este estudio, deben ser empleados con cautela y la revisión de desplazamientos inducidos por sismo y por viento es recomendable.

La metodología propuesta en esta tesis busca contribuir al proceso de diseño de la ingeniería mexicana.

La metodología mostrada en esta tesis contempla el uso de modelos simétricos, lo cual establece que la torsión no está presente durante estos análisis, por lo que es necesaria la inclusión de algún elemento o elementos que representen irregularidades en la distribución de rigidez de piso.

Se recomienda realizar un mayor número de análisis sobre diferentes geometrías de modelos, esto permitirá verificar y validar los datos obtenidos en este estudio.

Se recomienda instrumentar edificios con sistemas de aislamiento sísmico de fricción en zonas propensas a acciones sísmicas y eólicas para contar con datos reales que permitan una mejor revisión de las estructuras.

## REFERENCIAS

- Aguilar Hernández, J. (2020). *Comportamiento sísmico de edificios con aisladores de péndulo de fricción en la zona del lago de la Ciudad de México*. Ciudad de México: UNAM.
- Andrés Oviedo, J., & del Pilar Duque, M. (25 de 08 de 2020). Obtenido de Scielo: [http://www.scielo.org.co/scielo.php?script=sci\\_arttext&pid=S1794-12372006000200010&fbclid=IwAR17Jh8eO9\\_OSz4iaTRNJ3Hzj6WBty0bh5UhbTa9Zsh5auxRRwnHu3-hQQ#10](http://www.scielo.org.co/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1794-12372006000200010&fbclid=IwAR17Jh8eO9_OSz4iaTRNJ3Hzj6WBty0bh5UhbTa9Zsh5auxRRwnHu3-hQQ#10)
- Bozzo, L., & Ordóñez, D. (Marzo 2001). Disipadores mecánicos de energía. *Revista Bit*.
- Christopoulos, C., & Filiatrault, A. (2006). *Principles supplemental damping and seismic isolation*. Pavia: IUSS Press.
- Comisión Federal de Electricidad. (2008). *Manual de Diseño de Obras Civiles*. México, Distrito Federal.
- Corporación de Desarrollo Tecnológico - Cámara Chilena de la Construcción. (2011). *Sistemas de Aislación Sísmica y Disipación de Energía*. Chile.
- ETABS. (2016). Programa de análisis estructural de edificios. Computers and Structures, Inc.
- García Matamoros, H. (2018). *Respuesta sísmica de un puente con aisladores de base*. Ciudad de México, México: Tesina UNAM.
- H. Ayuntamiento constitucional Acapulco de Juárez. (2002). *Reglamento de construcción para el municipio de Acapulco de Juárez*. Acapulco de Juárez.
- Housner, G. W. (1956). Limit design of structures to resist earthquakes. *Proceedings of the World Conference on Earthquake Engineering*. Berkeley, California.
- Nogales Martínez, L. (2019). *Costo de pérdidas asociadas al estado de límite de servicio debido a aceleraciones inducidas por el viento en edificios*. Ciudad de México, México: UNAM.
- NTC 2017. (2017). *Normas Técnicas Complementarias Sobre Criterios y Acciones Para El Diseño Por Sismo*. Ciudad de México: GACETA OFICIAL DE LA CIUDAD DE MÉXICO.
- PRISM. (2020). Programa de procesamiento de acelerogramas. Department of Architectural Engineering: INAH University.
- Solís Torres, D. (2018). *Revisión del estado límite de servicio de un edificio alto, empleando conceptos de diseño por desempeño*. México, Ciudad de México: Tesis de maestría, UNAM.
- SVTPro. (2016). Programa para la simulación de viento turbulento en el modelo ARMA.
- UNAM. (19 de Enero de 2020). *Base de datos de registros acelerográficos de la RAIL-UNAM*. Obtenido de <https://aplicaciones.iingen.unam.mx/AcelerogramasRSM/RedAcelerografica.aspx>