



Universidad de San Carlos de Guatemala
Facultad de Ingeniería
Escuela de Estudios de Postgrado
Maestría en Estructuras

**ANÁLISIS DE DESPLAZAMIENTOS EN PASARELA PEATONAL CON RAMPA, CON
ASIMETRÍAS EN PLANTA Y ELEVACIÓN, UTILIZANDO TUBERÍA DE ACERO PARA
RESISTIR MOMENTO FLEXIONANTE Y CARGA AXIAL, IMPLEMENTANDO UN ELEMENTO
REDUCTOR DE DESPLAZAMIENTOS LATERALES**

Ing. Oscar Adolfo Guevara Matías

Asesorado por el Msc. Ing. Roberto Huinil Mejía

Guatemala, abril de 2022

UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA



FACULTAD DE INGENIERÍA

**ANÁLISIS DE DESPLAZAMIENTOS EN PASARELA PEATONAL CON RAMPA, CON
ASIMETRÍAS EN PLANTA Y ELEVACIÓN, UTILIZANDO TUBERÍA DE ACERO PARA
RESISTIR MOMENTO FLEXIONANTE Y CARGA AXIAL, IMPLEMENTANDO UN ELEMENTO
REDUCTOR DE DESPLAZAMIENTOS LATERALES**

TRABAJO DE GRADUACIÓN

PRESENTADO A LA JUNTA DIRECTIVA DE LA
FACULTAD DE INGENIERÍA
POR

ING. OSCAR ADOLFO GUEVARA MATÍAS
ASESORADO POR EL MSC. ING. ROBERTO HUINIL MEJÍA

AL CONFERÍRSELE EL TÍTULO DE

MAESTRO EN ESTRUCTURAS

GUATEMALA, ABRIL DE 2022

UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA
FACULTAD DE INGENIERÍA



NÓMINA DE JUNTA DIRECTIVA

DECANA	Inga. Aurelia Anabela Cordova Estrada
VOCAL I	Ing. José Francisco Gómez Rivera
VOCAL II	Ing. Mario Renato Escobedo Martínez
VOCAL III	Ing. José Milton de León Bran
VOCAL IV	Br. Kevin Vladimir Cruz Lorente
VOCAL V	Br. Fernando José Paz González
SECRETARIO	Ing. Hugo Humberto Rivera Pérez

TRIBUNAL QUE PRACTICÓ EL EXAMEN GENERAL PRIVADO

DECANA	Inga. Aurelia Anabela Cordova Estrada
EXAMINADOR	Mtro. Ing. Edgar Dario Alvarez Cotí
EXAMINADOR	Mtro. Ing. Armando Fuentes Roca
EXAMINADOR	Mtro. Ing. Julio Cesar Escobar Zeceña
SECRETARIO	Ing. Hugo Humberto Rivera Pérez

HONORABLE TRIBUNAL EXAMINADOR

En cumplimiento con los preceptos que establece la ley de la Universidad de San Carlos de Guatemala, presento a su consideración mi trabajo de graduación titulado:

ANÁLISIS DE DESPLAZAMIENTOS EN PASARELA PEATONAL CON RAMPA, CON ASIMETRÍAS EN PLANTA Y ELEVACIÓN, UTILIZANDO TUBERÍA DE ACERO PARA RESISTIR MOMENTO FLEXIONANTE Y CARGA AXIAL, IMPLEMENTANDO UN ELEMENTO REDUCTOR DE DESPLAZAMIENTOS LATERALES

Tema que me fuera asignado por la Dirección de la Escuela de Estudios de Postgrado, con fecha 27 de octubre de 2020.

Ing. Oscar Adolfo Guevara Matías



Decanato
Facultad de Ingeniería
24189101- 24189102
secretariadecanato@ingenieria.usac.edu.gt

LNG.DECANATO.OI.294.2022

La Decana de la Facultad de Ingeniería de la Universidad de San Carlos de Guatemala, luego de conocer la aprobación por parte del Director de la Escuela de Estudios de Posgrado, al Trabajo de Graduación titulado: **ANÁLISIS DE DESPLAZAMIENTOS EN PASARELA PEATONAL CON RAMPA, CON ASIMETRÍAS EN PLANTA Y ELEVACIÓN, UTILIZANDO TUBERÍA DE ACERO PARA RESISTIR MOMENTO FLEXIONANTE Y CARGA AXIAL, IMPLEMENTANDO UN ELEMENTO REDUCTOR DE DESPLAZAMIENTOS LATERALES**, presentado por: **Oscar Adolfo Guevara Matías**, que pertenece al programa de Maestría en ciencias en Estructuras después de haber culminado las revisiones previas bajo la responsabilidad de las instancias correspondientes, autoriza la impresión del mismo.

IMPRÍMASE:



Inga. Aurelia Anabela Cordova Estrada

Decana

Guatemala, abril de 2022

AACE/gaoc



Guatemala, abril de 2022

LNG.EEP.OI.294.2022

En mi calidad de Director de la Escuela de Estudios de Postgrado de la Facultad de Ingeniería de la Universidad de San Carlos de Guatemala, luego de conocer el dictamen del asesor, verificar la aprobación del Coordinador de Maestría y la aprobación del Área de Lingüística al trabajo de graduación titulado:

“ANÁLISIS DE DESPLAZAMIENTOS EN PASARELA PEATONAL CON RAMPA, CON ASIMETRÍAS EN PLANTA Y ELEVACIÓN, UTILIZANDO TUBERÍA DE ACERO PARA RESISTIR MOMENTO FLEXIONANTE Y CARGA AXIAL, IMPLEMENTANDO UN ELEMENTO REDUCTOR DE DESPLAZAMIENTOS LATERALES”

presentado por **Oscar Adolfo Guevara Matías** correspondiente al programa de **Maestría en ciencias en Estructuras**; apruebo y autorizo el mismo.

Atentamente,

“Id y Enseñad a Todos”

Mtro. Ing. Edgar Darío Álvarez Cotí
Director



**Escuela de Estudios de Postgrado
Facultad de Ingeniería**



Guatemala, 19 de octubre de 2021

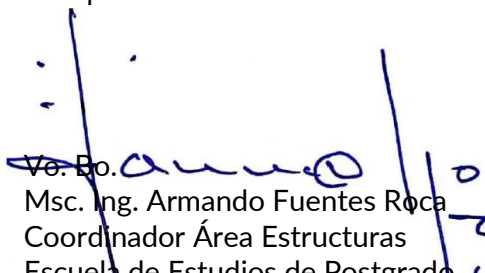
MSc. Ing Edgar Álvarez Cotí
Director, Escuela de Estudios de Postgrado
Facultad de Ingeniería
Universidad de San Carlos de Guatemala
Presente

Por este medio informo a usted, que se ha revisado y APROBADO la siguiente TESIS DE GRADUACIÓN titulado: "ANÁLISIS DE DESPLAZAMIENTOS EN PASARELA PEATONAL CON RAMPA, CON ASIMETRÍAS EN PLANTA Y ELEVACIÓN, UTILIZANDO TUBERÍA DE ACERO PARA RESISTIR MOMENTO FLEXIONANTE Y CARGA AXIAL, IMPLEMENTANDO UN ELEMENTO REDUCTOR DE DESPLAZAMIENTOS LATERALES" del estudiante Oscar Adolfo Guevara Matías, quien se identifica con numero de carné 201020829, del programa de Maestría en Estructuras.

Con base en la evaluación realizada, se hace constar que se ha evaluado la calidad, validez, pertinencia y coherencia de los resultados obtenidos en el trabajo presentado y según lo establecido en el Normativo de Tesis y Trabajos de Graduación aprobado por Junta Directiva de la Facultad de Ingeniería Punto Sexto inciso 6.10 del Acta 04-2014 de sesión celebrada el 04 de febrero de 2014.

Por lo anterior, se entrega con la presente, la hoja de evaluación aprobada por el docente del curso y toda la documentación administrativa de respaldo, para su aprobación correspondiente por parte de la Escuela de Estudios de Postgrado.

Sin otro particular


Vc. Bo.
Msc. Ing. Armando Fuentes Roca
Coordinador Área Estructuras
Escuela de Estudios de Postgrado
Facultad de Ingeniería

Guatemala, Guatemala 19 de octubre de 2,021

MSc. Ing Edgar Álvarez Cotí
Director, Escuela de Estudios de Postgrado
Facultad de Ingeniería
Universidad de San Carlos de Guatemala
Presente

Por este medio informo a usted, que, como ASESOR, he revisado y aprobado la siguiente **TÉSIS DE GRADUACIÓN** del (la) alumno (a):

Carné: 201020829
Alumno: Oscar Adolfo Guevara Matías
Maestría: Estructuras
Título de la Investigación: Análisis de desplazamientos en pasarela peatonal con rampa, con asimetrías en planta y elevación, utilizando tubería de acero para resistir momento flexionante y carga axial, implementando un elemento reductor de desplazamientos laterales.

En este sentido, extendiendo el Visto Bueno correspondiente, para el cumplimiento de requisitos de la Escuela de Estudios de Postgrado, de la Facultad de Ingeniería, de la Universidad de San Carlos de Guatemala.

Asimismo, se hace constar que el estudiante cumplió con el pago de los honorarios profesionales de asesoría de dicha tesis de graduación.

Sin otro particular

Ingeniero Civil
ROBERTO HUINIL MEJÍA
Maestro en Ciencias en Ingeniería Sanitaria
Colegiado No. 15435



Msc. Ing. Roberto Huinil Mejía
Asesor

ACTO QUE DEDICO A:

- Dios** Por permitirme continuar con el proceso de aprendizaje en temas que me apasionan, y por haber colocado en mi vida a las personas que de una forma u otra hicieron posible este logro.
- Mis padres** Celeste Geraldina Matías y Óscar Javier Guevara, por apoyarme ante cualquier situación y darme su amor de padres y sus buenos consejos.
- Mis abuelos** Soe Delfino Matías y Elvira Melgar (q. d. e. p.), por desempeñar el papel de padres durante mi niñez, así como por darme gran parte de mi educación moral.
- Mi novia** Joseline María Meléndez, por apoyarme, ser mi compañía y estar en las buenas y en las malas conmigo.

AGRADECIMIENTOS A:

**Universidad de San
Carlos de Guatemala**

Por ser la universidad nacional que respalda mi título y en donde pasé una armoniosa etapa de mi vida.

**Escuela de Estudios
de Postgrado**

Por ser la escuela en donde adquirí los conocimientos académicos que me acreditan como un maestro en estructuras.

ÍNDICE GENERAL

ÍNDICE DE ILUSTRACIONES	V
LISTA DE SÍMBOLOS	VII
GLOSARIO	XI
RESUMEN	XV
ANTECEDENTES	XVII
PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA	XXI
OBJETIVOS	XXIII
HIPÓTESIS	XXV
RESUMEN DEL MARCO METODOLÓGICO	XXVII
INTRODUCCIÓN	XXIX
1. MARCO TEÓRICO	1
1.1. Conceptos y definiciones	1
1.1.1. Movimiento periódico	1
1.1.2. Movimiento oscilatorio	3
1.1.3. Movimiento armónico simple (MAS)	3
1.1.4. Periodo y frecuencia	5
1.1.5. El péndulo simple	6
1.1.6. Oscilaciones amortiguadas	7
1.2. Estructuras tipo péndulo invertido	7
1.3. Dinámica de estructuras	8
1.3.1. Acciones que introducen fuerzas dinámicas en estructuras	8
1.3.1.1. Equipos mecánicos	8
1.3.1.2. Sismos	9

	1.3.1.3.	Viento	10
	1.3.1.4.	Tránsito vehicular	11
	1.3.1.5.	Tránsito de personas.....	11
	1.3.2.	Amortiguamiento	12
	1.3.3.	Modelo de un solo grado de libertad	12
	1.3.4.	Frecuencia natural de una pasarela	13
1.4.		Corte basal.....	14
1.5.		Efectos de irregularidad en una estructura.....	14
1.6.		Derivas sísmicas	15
2.		GENERALIDADES DEL CASO DE ESTUDIO.....	17
	2.1.	Ubicación y uso	17
	2.2.	Tipología	19
3.		INTEGRACIÓN DE CARGAS	21
	3.1.	Carga muerta	22
	3.2.	Cargas vivas	22
	3.3.	Carga de viento.....	22
	3.4.	Carga de sismo	23
4.		ANÁLISIS ELÁSTICO DE PASARELA CON EMPOTRAMIENTO EN LA BASE	25
	4.1.	Método de la carga sísmica estática equivalente.....	25
	4.2.	Método del análisis modal espectral	28
	4.3.	Combinaciones de carga.....	32
	4.4.	Resultados del análisis estático	33
	4.4.1.	Período empírico	34
	4.4.2.	Cortante basal	34

5.	ANÁLISIS ESTRUCTURAL DE PASARELA.....	37
5.1.	Sistema estructural péndulo invertido.....	37
5.1.1.	Cálculo de deriva máxima admisible	37
5.1.2.	Configuración geométrica de la estructura	39
5.1.3.	Cálculo de desplazamientos laterales	40
6.	CHEQUEO DE ELEMENTO REDUCTOR DE DESPLAZAMIENTOS LATERALES.....	43
6.1.	Descripción del elemento	43
6.2.	Índice de corte basal	44
6.3.	Reacción en el anclaje.....	45
6.4.	Desplazamiento y anclaje lateral	47
6.5.	Presentación de resultados	48
6.6.	Discusión de resultados.....	49
	CONCLUSIONES	51
	RECOMENDACIONES.....	53
	REFERENCIA.....	55
	APÉNDICES	59
	ANEXOS.....	65

ÍNDICE DE ILUSTRACIONES

FIGURAS

1.	Reloj analógico, utilizado para ilustrar el movimiento periódico.	2
2.	Sistema masa-resorte	5
3.	Diagrama para análisis de un péndulo simple.....	6
4.	Tanque elevado	7
5.	Generador estacionario.....	9
6.	Registro de aceleración vs tiempo de un sismo ocurrido en Japón	10
7.	Sistema masa-resorte vertical.....	13
8.	Foto satelital de pasarela peatonal	18
9.	Vista en 3D de pasarela peatonal	20
10.	Modelo 3D de pasarela peatonal creado en ETABS.....	21
11.	Hoja de cálculo para estimar el valor de la presión de viento	23
12.	Pasos 1, 2, 3 y 4 para el cálculo de coeficiente de corte basal, según metodología de AGIES.....	27
13.	Paso 5 para el cálculo de coeficiente de corte basal, según metodología de AGIES.....	28
14.	Modo de vibración 1 de la estructura (1).....	30
15.	Modo de vibración 1 de la estructura (2).....	31
16.	Vista 3D en formato CAD de pasarela	40
17.	Desplazamientos en el punto de anclaje debido a modo 1 de vibración de la estructura	41
18.	Cable de acero y sus componentes	44
19.	Reacción en el anclaje de la estructura.....	45
20.	DCL de cable de anclaje	46

21.	Desplazamientos al implementar restricción de cable en el punto de anclaje debido a modo 1 de vibración de la estructura	47
-----	--	----

TABLAS

I.	Participación modal de la masa de la estructura	29
II.	Combinaciones de cargas gravitacionales.....	32
III.	Combinaciones de carga que consideran el efecto sísmico.	32
IV.	Combinaciones de carga que consideran la carga de viento.....	33
V.	Descripción de simbología usada en combinaciones de carga.	33
VI.	Peso sísmico de la pasarela peatonal.	34
VII.	Extracto de la tabla 1.6.14-1 de AGIES NSE 3 2018.....	38
VIII.	Variación de la fuerza de tensión del cable en función del ángulo de anclaje	48

LISTA DE SÍMBOLOS

Símbolo	Significado
a	Aceleración
θ	Ángulo de anclaje
φ	Ángulo de fase
A	Amplitud de la oscilación
P_L	Cargas de lluvia
A_r	Cargas de tefra volcánica
M	Cargas muertas
S_{hd}	Carga sísmica horizontal
S_{vd}	Carga sísmica vertical
V	Cargas vivas
V_t	Cargas vivas de techo
C_e	Coefficiente de exposición
Q_c	Coefficiente de presión
N_a	Coefficiente por proximidad de las amenazas especiales para períodos de vibración cortos
N_V	Coefficiente por proximidad de las amenazas especiales para períodos de vibración largos
C_S	Coefficiente sísmico de diseño
k	Constante de proporcionalidad del resorte
Δ_U	Deriva lateral permitida
x	Desplazamiento a partir del punto de equilibrio
h_{sx}	Diferencia de altura entre pisos de análisis
I	Factor de importancia

Ω_S	Factor de Incremento de Resistencia
C_d	Factor de Incremento del Desplazamiento Elástico
R	Factor de Modificación de Respuesta Sísmica
ω	Frecuencia del movimiento armónico
F	Fuerza
F_x	Fuerza de resorte
F_c	Fuerza en el cable
I_o	Índice de sismicidad
V_B	Magnitud del cortante basal
m	Masa
S_{cs}	Ordenada espectral ajustada del sismo extremo en el sitio de interés para estructuras con período de vibración corto
S_{1s}	Ordenada espectral ajustada del sismo extremo en el sitio de interés para estructuras con período de vibración de 1 segundo
S_{cr}	Ordenada espectral de periodo corto del sismo extremo considerado en el basamento de roca en el sitio de interés
S_{1r}	Ordenada espectral de periodo 1 segundo del sismo extremo considerado en el basamento de roca en el sitio de interés
T	Período de la estructura
W_S	Peso sísmico de la estructura
q_s	Presión de remanso del viento
P	Presión de viento de diseño
R_a	Reacción en el anclaje de la estructura
$\frac{d^2x}{dt^2}$	Segunda derivada de la posición respecto del tiempo

t

Tiempo

GLOSARIO

AGIES	Asociación Guatemalteca de Ingeniería Estructural y Sísmica.
Análisis	Examen minucioso y pormenorizado de un asunto para conocer su naturaleza, sus características, su estado y los factores que intervienen en todo ello.
Análisis espectral modal	Consiste en determinar las frecuencias naturales y modos de vibrar de una estructura.
Ángulo de anclaje	Es el ángulo que se forma entre la horizontal y el cable de anclaje de la estructura.
CA-9 S	Carretera Centroamericana 9, dirección sur.
Carga muerta	Constituye el peso propio de todos los componentes de la estructura en sí misma.
Carga viva	Carga producida por el uso y ocupación de la estructura.
Carga de sismo	Son fuerzas horizontales situadas en el centro de masa de cada sección de análisis de la estructura.

Corte basal	Esfuerzo de corte producido por la acción sísmica en el nivel basal de la estructura.
DCL	Diagrama de Cuerpo Libre.
Deriva	Desplazamiento horizontal relativo entre dos puntos colocados en una misma línea vertical, en dos niveles consecutivos de la edificación.
Desplazamiento	Es el cambio de posición de un cuerpo entre dos instantes o tiempos bien definidos.
ENCA	Escuela Nacional Central de Agricultura.
Estructura	Disposición y orden de las partes dentro de un todo.
Frecuencia de vibración	Numero de oscilaciones por unidad de tiempo.
Índice de corte basal	Fuerza calculada como un porcentaje de la fuerza cortante basal de la estructura.
Modo de vibración	Patrón o forma característica en el que vibrará una estructura.
NSE	Norma de Seguridad estructural.
Oscilación	Espacio recorrido por un cuerpo oscilante, entre sus dos posiciones extremas.

Péndulo invertido	Consiste en una varilla con una masa en un extremo y en el otro un eje que puede pivotar bidimensionalmente.
Período de vibración	Tiempo que tarda una estructura en completar una oscilación.
RD-16	Carretera Departamental 16.
Sismo	Es el movimiento brusco de la Tierra causado por la liberación de energía acumulada durante un largo tiempo.
Tipología estructural	Ciencia que estudia los tipos o clases, la diferencia intuitiva y conceptual de las formas de modelo o de las formas básicas.
Vibración	Movimiento de vaivén, rápido y de poca amplitud, de un cuerpo que vibra o de una parte de él.

RESUMEN

Una pasarela peatonal resulta un caso práctico de estudio para implementar un elemento reductor de desplazamientos laterales, ya que estas se construyen continuamente a medida que la red vial de una región o país va creciendo. En muchos casos la estructura de una pasarela a pesar de cumplir con todos los requerimientos que establecen los códigos de diseño estructural tanto nacionales como internacionales. Resulta que durante su funcionamiento presentan desplazamientos laterales excesivos que resultan incómodos para los peatones que la transitan, así mismo una oscilación continua y excesiva puede llevar al desgaste o fatiga de algunos elementos estructurales.

Por ende, se hace evidente alguna forma de poder controlar estos desplazamientos laterales continuos que en su conjunto producen una oscilación constante. Estos movimientos ocurren a causa de las cargas a las que está sometida la estructura: viento, sismo, cargas vivas y cargas muertas. Entonces mediante el análisis y diseño estructural, principalmente, el cálculo de la carga sísmica estática equivalente y las formas modales en que vibra la estructura del caso de estudio, se implementó un cable de acero como elemento reductor de estos desplazamientos laterales.

ANTECEDENTES

Vivimos en un mundo dinámico en el que, todo, incluso los átomos, vibran, en el mundo macroscópico y principalmente en el ámbito de la ingeniería civil, estas vibraciones dependiendo del contexto o del ámbito que se esté estudiando, estas vibraciones se traducen también a oscilaciones. En muchos casos es fundamental estudiar las oscilaciones de eventos que ocurren en la naturaleza, como lo son los sismos. Y los efectos que estos inducen en una estructura. Así mismo, existen otras fuerzas que producen efectos oscilatorios sobre una estructura, sin embargo, es necesario recordar cuales son los fundamentos matemáticos a través de los cuales se pueden representar estos fenómenos.

Iniciando con lo básico, al observar el libro; Física General para estudiantes de ingeniería, se explican los conceptos de movimiento oscilatorio, movimiento armónico, que es el periodo, que es la frecuencia, entre otros (Rios, 1996). También hace uso de ecuaciones diferenciales que describen con mejor precisión a naturaleza de estos movimientos. Estos son elementos básicos que nos permiten conocer la naturaleza de este caso de estudio.

En el texto, Física de oscilaciones, ondas y óptica, se explican mejor los conceptos, como el amortiguamiento (Vivas, 2013). Esto, más adelante habrá que traducirlo o aplicarlo a un sistema estructural que tendrá su propio amortiguamiento, es decir habrá que extrapolar este concepto, al comportamiento oscilatorio de una estructura de acero.

Adentrándose un poco más en el tema, el libro; Introducción a la dinámica de estructuras, los conceptos previamente descritos, se aplican directamente al

análisis dinámico de estructuras, la forma en que cada sistema estructural presenta ventajas y desventajas en función a los materiales, los diferentes elementos estructurales y la geometría intrínseca de cada edificio (Gómez, 2000).

Un parámetro que es de especial interés, se describe en el artículo, Cálculo del periodo fundamental de vibración de edificios con rigidez de corte (Husid, 1963). Será necesario calcular el periodo natural en el que vibra la estructura del caso de estudio, ya que en función a esto se estimarán las fuerzas que un sismo pueden provocar en la estructura de análisis.

En sus Normas de Seguridad Estructural para Guatemala, AGIES (2018) establece parámetros para el desarrollo del análisis y diseño estructural para las diferentes regiones de Guatemala, dentro de estos parámetros también brinda una formula con la que se puede calcular el periodo empírico de vibración de una estructura.

En el trabajo de grado, Diseño de edificaciones resistentes al viento para facilidades petroleras, Yanez (2011) describe otra de las fuerzas que tiene un efecto significativo en la estructura de una pasarela es la fuerza de viento. Al observar este caso análogo, se pueden aplicar la misma metodología de cálculo para obtener estimaciones de los efectos de las fuerzas de viento sobre la estructura de una pasarela peatonal.

Al observar el artículo de revista, Estructuras y efectos dinámicos del viento, Hernández (2005) hace hincapié en los efectos nocivos que el viento puede llegar a provocar en una estructura, bajo determinadas condiciones, en Guatemala las normas de AGIES del año 2018, dan lineamientos para estimar las fuerzas que el viento puede provocar sobre una estructura, en este caso, rigidez, altura y

esbeltez son elementos de análisis determinantes en el comportamiento oscilatorio de la estructura en estudio.

Al observar la tesis de título: Estudio del comportamiento vibratorio de estructuras acopladas, se recopiló una parte de interés para este estudio y es el análisis de la propagación de ondas y modos de vibración en un medio continuo, como lo es una viga, la discretización de masa realizada en una estructura acoplada. Que para este caso de estudio sería la armadura del puente de una pasarela peatonal formada por vigas de acero de sección I (González, 2009).

En su tesis de grado, Carchi (2015) realiza un análisis de las vibraciones verticales y horizontales que un grupo de personas en movimiento producen sobre una pasarela. En este texto se hace hincapié, en que es necesario considerar que, aunque una estructura cumpla con todos los requerimientos solicitados por los códigos de diseño de determinada región, también debe considerarse la percepción que el usuario tenga durante el uso de la estructura.

Una vez se conoce, a través del análisis estructural, la forma en la que la estructura se comportará ante la acción de diferentes fuerzas, entonces es necesario brindar una solución para mitigar, reducir y/o eliminar los efectos que resulten nocivos para la estructura, al observar el artículo, Sistemas de control de vibraciones en estructuras de gran altura, (Montanaro, 2002) presenta una clasificación de los sistemas de control de vibraciones más comúnmente utilizados y que han demostrado eficiencia y al mismo tiempo ser óptimos en cuanto a su costo de fabricación y facilidad de implementación.

PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

La pasarela peatonal, por ser una estructura tipo péndulo invertido, tiene desplazamientos laterales excesivos debidos a fuerzas externas a las que está expuesta durante su vida útil, por la falta de dispositivos que reduzcan o controlen estos desplazamientos.

Las estructuras tipo péndulo invertido tienen una mayor sensibilidad ante fuerzas horizontales, en la naturaleza no se encuentran fuerzas cuya magnitud sea aplicada totalmente en dirección horizontal a la estructura de estudio, pero, al tratar estas fuerzas como vectores, siempre habrá una componente que actúe de forma totalmente horizontal en el modelo de análisis de la estructura, son estas fuerzas horizontales las que producen efectos negativos en las pasarelas.

Una vez diseñada la estructura y sabiendo que la misma resistirá las sollicitaciones a las que estará sometida durante su vida útil, entonces se puede pasar a enfocarse en el control de los desplazamientos que puedan afectar la funcionalidad, es decir desplazamientos laterales que resulten incómodos para las personas que utilicen la estructura. Además, más que lo anterior dicho, saber identificar los puntos en donde sean óptimos los anclajes de estos elementos reductores de desplazamientos. Estos elementos resultan útiles, no solo ante un evento sísmico (que es un caso crítico), si no también ante las deformaciones producidas por la fatiga de los elementos al estar expuestos a ciclos de oscilaciones excesivas (ejemplo: durante un día con alto tránsito de personas y vehículos).

Conociendo la información anterior, se puede pasar a plantear la siguiente interrogante:

- ¿De qué forma se beneficiaría un diseño estructural al implementar un dispositivo para control de desplazamientos?

Con lo anterior se pueden derivar las siguientes preguntas:

- ¿Cuáles serían los materiales a escoger para la construcción de un dispositivo de control de desplazamientos?
- ¿En función a que parámetro se puede basar el diseño de este dispositivo?
- ¿De qué forma se puede incorporar este dispositivo a la estructura de la pasarela peatonal?
- ¿Qué tipo de geometría tendrá este dispositivo?

OBJETIVOS

General

Proporcionar un valor porcentual de fuerza de corte basal de la estructura para la elección de un elemento reductor de desplazamientos laterales.

Específicos

- Establecer un caso de estudio, delimitado y con parámetros establecidos que sirva para la aplicación del código sísmico de diseño, vigente en Guatemala.
- Realizar el proceso de análisis y diseño estructural del caso de estudio, optimizando el diseño en función de los códigos de diseño.
- Proponer y evaluar un elemento reductor de desplazamientos laterales.
- Evaluar y analizar los efectos que produce un elemento reductor de desplazamientos en una estructura de tipo péndulo invertido.

HIPÓTESIS

El valor de la fuerza en base con la cual se escogerá el dispositivo reductor de desplazamientos, será igual o menor que el 5 % del corte basal, al cual será sometida la estructura.

RESUMEN DEL MARCO METODOLÓGICO

Tras el análisis de los factores que se estudiarán, se ha logrado determinar que el tipo de la presente investigación será descriptiva, puesto que se estará sometiendo a análisis una estructura de tipo péndulo invertido, luego con esto proponer un diseño para un reductor de desplazamientos laterales y a continuación describir los beneficios y ventajas de implementar este dispositivo.

Así mismo, se desarrolla bajo un diseño experimental, ya que se evaluarán los desplazamientos laterales debidos al primer modo de vibración, que, una estructura de este tipo tendría que soportar de acuerdo con las cargas de sismo integradas según las normas vigentes.

INTRODUCCIÓN

Guatemala es un país en donde ocurren sismos con cierto grado de frecuencia, las estructuras están expuestas a una serie de fuerzas externas, las cuales deben de ser consideradas durante el proceso de análisis y diseño estructural, donde la fuerza de sismo es una de las más críticas ya que es la que puede llevar al colapso total de una estructura. Sin embargo, dependiendo de la región y el tipo de estructura también es necesario considerar la fuerza de viento, la cual resulta importante en estructuras tipo péndulo invertido. De acuerdo con la Asociación Guatemalteca de Ingeniería Estructural y Sísmica, AGIES, una estructura tipo péndulo invertido es la que tiene una concentración de masa mayor al 50 % en su parte superior, ejemplo de este tipo de estructuras son las pasarelas peatonales.

En este caso, se analizó una pasarela peatonal, con ciertas condiciones de geometría, las irregularidades tanto en planta como en elevación fueron determinantes para el cálculo de modos de vibración. La acción de cargas dinámicas resulta ser crítica en estructuras tipo péndulo invertido. En una pasarela peatonal, la carga dinámica debido al tráfico de personas debe de calcularse ya que la misma induce fuerzas horizontales que provocan en algunos casos oscilaciones excesivas. Las cargas de sismo, tránsito de personas y viento, en su conjunto, producen desplazamientos laterales, es aquí donde se hace evidente la necesidad de implementar un dispositivo que controle este tipo de desplazamientos.

En el primer capítulo se explican los conceptos que sustentan las bases teóricas sobre las que se desarrolló, esta investigación. Se da un enfoque físico

del fenómeno de las vibraciones, los modelos matemáticos existentes, en general, los orígenes a nivel físico que dan paso a modelos matemáticos más complejos aplicados en el campo de la dinámica de estructuras. Asimismo, se explica la teoría de las fuerzas dinámicas a las que estará expuesta la estructura del caso de estudio que se tratará durante la investigación.

En el segundo capítulo, se definen las generalidades, tales como la tipología estructural, la ubicación, que será necesaria para calibrar el espectro de respuesta sísmica a nivel de diseño y finalmente el uso esperado de la estructura.

En el tercer capítulo se realiza el proceso de integración de cargas que soportará la estructura del caso de estudio, cargas vivas, cargas muertas, carga sísmica, así como también las cargas dinámicas debidas a la acción del viento, tránsito de peatones.

El cuarto capítulo, enfoca en la integración de carga sísmica mediante el método estático equivalente, así como también el análisis espectral modal de la estructura, este es de suma importancia ya que permitirá calcular la forma natural en que vibrará la pasarela una vez, construida, se incluyen también las combinaciones de carga establecidas por AGIES.

En el quinto capítulo, se calcula la deriva máxima admisible para el sistema estructural escogido, en este caso, una estructura tipo péndulo invertido, todo esto en base a lo establecido en las normas de seguridad estructural (NSE) de AGIES. Se dan más detalles de la configuración geométrica de la estructura y se calculan los desplazamientos laterales de análisis.

En el sexto capítulo, se analizó el elemento reductor de desplazamientos, ya que se trabajará con una estructura de acero, la dinámica consiste en calcular

el porcentaje de fuerza cortante basal establecido en la hipótesis, y luego escoger un cable de acero de diámetro comercial que tenga un punto de ruptura mayor a este valor, en la discusión de resultados se analizó la variación del ángulo de anclaje del cable de acero.

1. MARCO TEÓRICO

En el presente capítulo se da sustento teórico a la presente investigación mediante explicación de modelos matemáticos y fenómenos físicos que ocurren en la naturaleza.

1.1. Conceptos y definiciones

Por lo general, todos los cuerpos que conservan masa y elasticidad tienen la capacidad de vibrar, las máquinas y las estructuras, en su mayoría experimentan vibración en cierto grado, además el diseño necesita consideración de la conducta oscilatoria.

En otras palabras, las vibraciones u oscilaciones de los sistemas mecánicos establecen uno de los campos de estudio más relevantes de toda la física. Generalmente todo sistema tiene una capacidad de vibración y la mayoría de los sistemas vibran libremente de diversas formas. Regularmente, las vibraciones naturales predominantes de objetos pequeños son rápidas, en tanto, que las de objetos más grandes son lentas.

1.1.1. Movimiento periódico

A continuación, se presenta un ejemplo sencillo del movimiento periódico, este lo podemos observar en un reloj analógico, de acuerdo con el siguiente razonamiento.

En un sentido general, el movimiento periódico es el que se repite durante intervalos iguales de tiempo, para ilustrar este tipo de movimiento se tomará como ejemplo un reloj analógico:

- La aguja que indica las horas se posiciona en el mismo lugar cada 12 horas.
- La aguja que indica los minutos se encuentra en el mismo lugar en un intervalo de tiempo de 1 hora.
- Finalmente, la aguja segundera vuelve a estar en la misma posición cada 1 minuto.

Figura 1. **Reloj analógico, utilizado para ilustrar el movimiento periódico.**



Fuente: Lathrop (1996). *¿Por qué es en el sentido de las agujas del reloj?*.

1.1.2. Movimiento oscilatorio

Se explica que un movimiento de naturaleza periódica, Ríos (1996), en el que un objeto o partícula se mueve, de un punto a otro siguiendo una misma ruta y pasando por un mismo punto de referencia. En la naturaleza este movimiento tiende a desaparecer a medida que pasa el tiempo.

1.1.3. Movimiento armónico simple (MAS)

El movimiento armónico, es un caso especial del movimiento oscilatorio en el cual, el movimiento de un objeto o partícula se puede expresar como una función seno senoidal que varía en el tiempo.

El movimiento armónico simple, se puede expresar mediante la siguiente ecuación:

$$F_x = -Kx \quad (1)$$

Fuente: Ríos (1996). *Física General para estudiantes de ingeniería*.

Lo que indica que la fuerza resultante es directamente proporcional la distancia recorrida y con sentido opuesto a la fuerza externa aplicada, K es un valor de proporcionalidad. Al aplicar la 2da ley de Newton para un cuerpo que describe un movimiento de naturaleza oscilatoria se obtiene:

$$F_x = ma_x$$

$$-Kx = ma_x$$

$$-Kx = m \frac{d^2x}{dt^2}$$

Fuente: Ríos (1996). *Física General para estudiantes de ingeniería*.

$$\frac{d^2x}{dt^2} + \frac{K}{m}x = 0 \quad (2)$$

$$\omega^2 = \frac{K}{m} \quad (3)$$

Fuente: Ríos (1996). *Física General para estudiantes de ingeniería*.

$$\frac{d^2x}{dt^2} + \omega^2x = 0 \quad (4)$$

Fuente: Ríos (1996). *Física General para estudiantes de ingeniería*.

Cualquier objeto cuyo movimiento pueda describirse mediante la ecuación (4), tiene un Movimiento Armónico Simple (MAS) (Ríos, 1996), a continuación, se muestra la solución de la ecuación diferencial (4):

$$x(t) = A \text{ Sen}(\omega t + \varphi) \quad (5)$$

Fuente: Ríos (1996). *Física General para estudiantes de ingeniería*.

En donde:

A = Amplitud de la oscilación

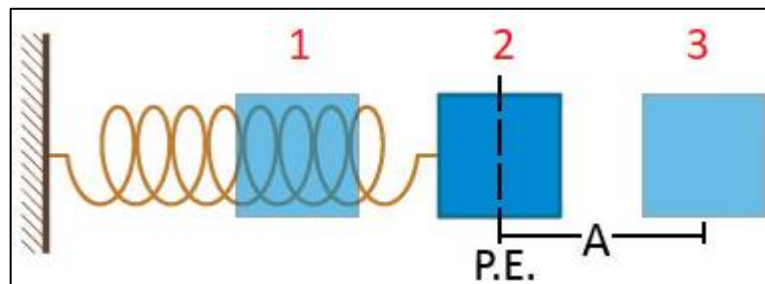
ω = Frecuencia de oscilación

φ = Es el ángulo, donde inicia el ciclo (ángulo de fase)

1.1.4. Periodo y frecuencia

En la siguiente figura se presenta el ejemplo del periodo y frecuencia del sistema masa-resorte.

Figura 2. Sistema masa-resorte



Fuente: Jeampier (1993). *Física y matemática fundamental*.

Con la figura anterior se pueden ilustrar los elementos de la ecuación (5), la amplitud de oscilación es la distancia que recorre la masa a partir del punto de equilibrio (P.E.). Para un instante de tiempo dado, si se analizara el sistema y el mismo estuviese desplazado del P.E., entonces esto sería el ángulo de fase (para este caso, dado en radianes), si se considera momento para el que el sistema inicia a moverse desde del P.E. entonces el ángulo de fase el igual a cero.

El periodo la fracción de tiempo que el sistema masa-resorte emplea para hacer el recorrido 1-2-3-1, es decir que transcurre hasta que se completa un ciclo y regresar a la misma posición.

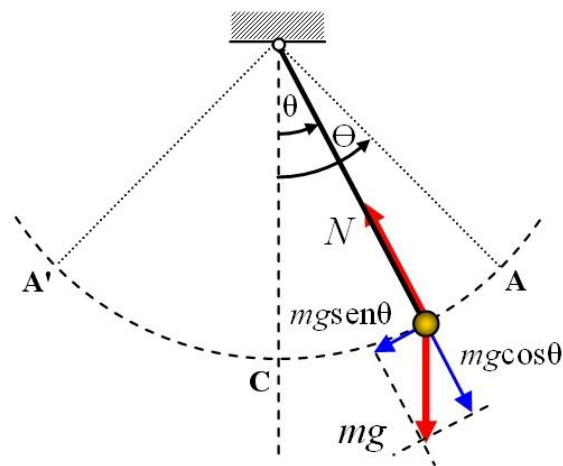
Otra magnitud de interés, que resulta al analizar esta clase de movimiento es la frecuencia de oscilación, la misma es el inverso del periodo, es decir que la frecuencia el número de ciclos (1-2-3-1), que completa el sistema masa resorte

por cada unidad de tiempo. Es muy común realizar análisis de ciclos por segundo (s^{-1}).

1.1.5. El péndulo simple

se define como una partícula de masa m suspendida del punto O por un hilo inextensible de longitud l y de masa despreciable.

Figura 3. Diagrama para análisis de un péndulo simple



Fuente: Marion (1996). *Dinámica clásica de las partículas y sistemas*.

Para el modelo matemático un péndulo simple Hewitt (2007), se considera una masa puntual, que está suspendida por una cuerda muy ligera (de masa despreciable), la cual no varía su longitud. Además, se considera que oscila sobre el plano que se muestra en el diagrama, de como se muestra en la figura 3, la fuerza restauradora que provoca que el péndulo oscile es una componente vectorial del peso: $-mg\cos\theta$

1.1.6. Oscilaciones amortiguadas

Hasta este momento, se ha explicado, por ejemplo: que el péndulo invertido que oscila sobre un plano vertical, es el mismo que lo hace en forma indefinida Serway y Vuille (2012), ya que no existe ninguna fuerza que se oponga al movimiento, sin embargo, en la naturaleza, existen fuerzas de fricción que se oponen al movimiento y que tienden a reducir gradualmente la amplitud de los desplazamientos, hasta detenerlos por completo en un periodo de tiempo largo. A esta fuerza que se opone al movimiento oscilatorio se le llama amortiguamiento.

1.2. Estructuras tipo péndulo invertido

Son estructuras en las que la mayor parte de la masa se concentra en la parte superior de la estructura, un claro ejemplo de este tipo de estructuras son los tanques elevados.

Figura 4. **Tanque elevado**



Fuente: Hernández (2018). *Respuesta sísmica de tanques elevados tipo péndulo invertido.*

Cabe recalcar que, en un sentido más general, un edificio (por ejemplo), podría ser una estructura de esta clasificación. Para nuestro caso de estudio, una pasarela peatonal, también entra dentro de este grupo de estructuras.

1.3. Dinámica de estructuras

La dinámica estructural se ocupa del estudio de las estructuras que se mueven debido, principalmente a la acción de fuerzas inerciales y externas.

1.3.1. Acciones que introducen fuerzas dinámicas en estructuras

Las acciones dinámicas, variables en el tiempo pueden ser de naturaleza diversa, estas provocan que una estructura oscile o vibre, a continuación de describen algunas de estas acciones dinámicas.

1.3.1.1. Equipos mecánicos

En muchos casos, lo que produce las vibraciones en estructuras, son motores de combustión interna estacionarios que están rígidamente sujetos a la estructura de interés, por su naturaleza rotacional y asimetría de algunos de sus componentes internos, producen vibraciones a medida que aumentan su velocidad rotacional.

Figura 5. **Generador estacionario**



Fuente: Meuring, (2010). *Michael Faraday y la Institución Real: el genio del hombre y el lugar.*

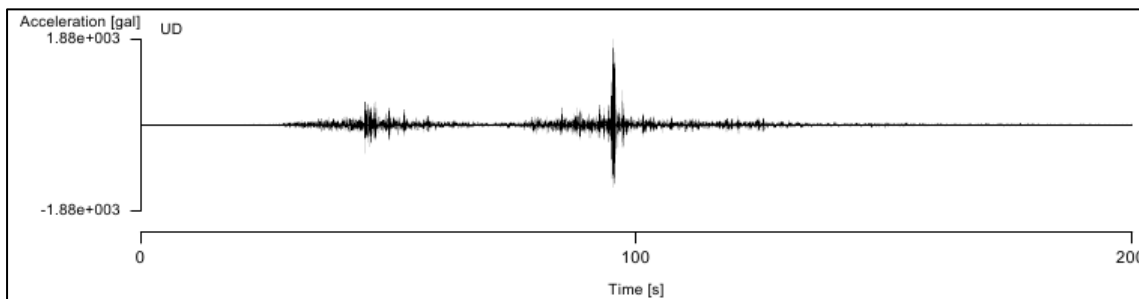
En la figura anterior se aprecia un generador de energía eléctrica, que tiene acoplado un motor de combustión interna, los mismos son relativamente comunes en edificios, ya que los mismos aseguran el suministro de energía eléctrica incluso ante la falla de la red de distribución.

1.3.1.2. Sismos

Los sismos son eventos naturales que no se pueden predecir con certeza, y producen una de las acciones dinámicas que puede tener serios efectos nocivos en una estructura, incluso, llevarla al colapso, es por eso que resulta de especial interés en el ámbito de la ingeniería estructural, poder calcular los efectos de los mismos sobre las estructuras y así preparar a las mismas para que resistan estas sollicitaciones.

Los sismos se producen por deslizamientos relativos entre regiones de la corteza de la tierra, las cuales se llaman placas tectónicas, la interfaz sobre la que ocurren los desplazamientos, se le conoce como falla geológica. Los códigos de diseño estructural, basan sus modelos matemáticos de fuerzas sísmicas, en registros de eventos sísmicos ocurridos en el pasado, principalmente en registros de aceleraciones del suelo durante la ocurrencia de un sismo.

Figura 6. **Registro de aceleración vs tiempo de un sismo ocurrido en Japón**



Fuente: Maugh (2011). *La magnitud del sismo de Japón sorprende a los sismólogos.*

1.3.1.3. Viento

La fuerza que el viento será directamente proporcional a la superficie vertical expuesta a la intemperie. Por lo tanto, es más acertado hablar de presión de viento, ya que la misma posteriormente se traduce a una fuerza de viento. La presión de viento está directamente relacionada con la velocidad del mismo, a su vez esta velocidad depende de varios factores, como lo son, accidentes geográficos (montañas, ríos, entre otros), ubicación geográfica, vegetación adyacente, entre otros.

Sin embargo, a partir de los registros de las velocidades promedio anuales del viento, se pueden tener estimados de que valores utilizar, para calcular presiones de viento sobre estructuras. En Guatemala, la norma NSE 7.5 de AGIES, establece parámetros para estimar el valor de la fuerza de viento a la que podría estar expuesta una estructura, dependiendo de su ubicación dentro del territorio nacional.

1.3.1.4. Tránsito vehicular

De acuerdo con Propaño (2012), el proceso para medición de vibraciones producidas por cargas vehiculares, debe de realizarse a través de acelerógrafos, los mismos miden la aceleración del suelo, como resultante del tráfico vehicular continuo. Considerando que las estructuras en una zona urbana están sometidas a este tipo de aceleraciones por periodos prolongados de tiempo, es por esto que los registros de aceleración resultan interesantes para estudiar.

1.3.1.5. Tránsito de personas

De acuerdo con Aguilera (2013), refiere que las personas al caminar sobre las estructuras, son una carga dinámica que, aunque su magnitud por lo general no es fuerte, si es constante.

Dependiendo de si se dan ciertas condiciones, las vibraciones inducidas por el tránsito de personas pueden provocar excesivas vibraciones horizontales en una pasarela peatonal, si bien esto no necesariamente puede provocar el colapso de la estructura, si afecta la apreciación y el confort de los usuarios, si las vibraciones son excesivas pueden provocar incluso mareos en las personas a medida que transitan, esta es una de las principales razones que evidencia la

necesidad de crear un elemento reductor de desplazamientos en las pasarelas peatonales.

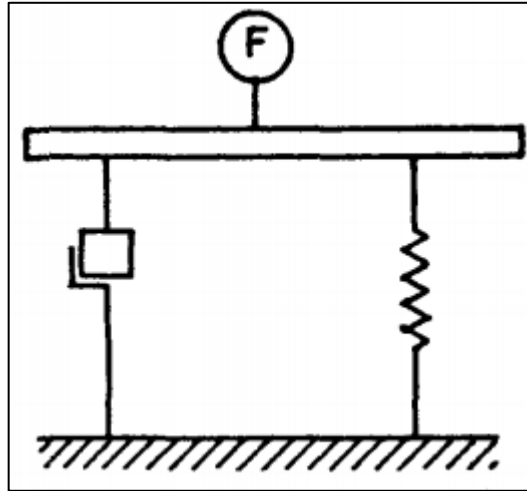
1.3.2. Amortiguamiento

Se observó que Gómez, Marulanda y Thomson (2007), los orígenes del amortiguamiento en estructuras se remontan a aproximadamente 100 años atrás en Japón, cuando un profesor de ingeniería, colocó trozos de madera en la base de su casa, es decir que la estructura no estaba empotrada en el suelo, con esto logró crear un amortiguamiento entre las ondas sísmicas transmitidas a través del suelo y las bases de su estructura.

1.3.3. Modelo de un solo grado de libertad

Alarcón y Hacar (1973), establecen en su libro *Sistemas Continuos*, describe cual es la forma más sencilla en que se puede representar una masa, sujeta a una base que no se deforma (infinitamente rígida) que está siendo afectada por una excitación en la base, también, de una forma sencilla se representa y se explica, los conceptos de resistencia y amortiguamiento, para este sistema.

Figura 7. **Sistema masa-resorte vertical**



Fuente: Alarcón y Hacar (1973). *Sistemas de un grado de libertad*.

1.3.4. Frecuencia natural de una pasarela

En su tesis Cruz (2016), describe las formas en las que se puede analizar las vibraciones en una pasarela, acá se plantean dos líneas de estudio de vibraciones, una de cada uno de los elementos de la pasarela y otra, es el análisis de toda la pasarela.

En el primer caso se analizarían principalmente los estados tensionales a los que estarían sometidos cada uno de los elementos. Y el otro caso y el cual es más adecuado al análisis que se pretende realizar en el presente estudio, es el análisis de los modos de vibración de una pasarela que ya fue construida, ya que, con esto, también se pueden analizar los desplazamientos laterales máximos que la misma podría experimentar.

1.4. Corte basal

Al observar Velázquez y Fonten (2015), se describe el método de la carga sísmica estática equivalente, este método es ampliamente usado en el campo de la ingeniería civil, ha sido uno de los primeros modelos matemáticos en utilizarse en el cálculo de fuerzas sísmicas y por consiguiente también uno de los más antiguos.

En esencia este método, sustituye la carga dinámica que un sismo puede inducir a una estructura, por una serie de fuerzas horizontales, las mismas a su vez deben distribuirse en el sistema estructural en función a la rigidez de cada uno de sus elementos.

1.5. Efectos de irregularidad en una estructura

En el artículo publicado por Gonzales y Gómez (2008), establecen que en los Efectos de la Irregularidad en planta por forma arquitectónica. Se estudian las variaciones en las fuerzas sísmicas en estructuras, producidas por las irregularidades en planta comúnmente empleadas en el diseño de edificios.

Tanto las irregularidades en planta como en elevación, esencialmente producen que tanto el centro de masa como el centro de rigidez de una estructura se alejen, por lo que las fuerzas cortantes por torsión son mayores ante la ocurrencia de un evento sísmico, estas estructuras por lo general, aún pueden diseñarse y construirse, sin embargo, debido a las solicitaciones sísmicas, los elementos que las compondrán deberán de ser más rígidos.

1.6. Derivas sísmicas

De acuerdo con Salazar (2015), en su tesis de grado, Impacto producido por la variación en rigidez, masa sísmica y coeficiente del módulo elástico en el comportamiento dinámico de edificios con sistemas de pórticos resistentes a momento y sistemas duales, las derivas de piso no son más que los desplazamientos relativos entre el piso de análisis y el piso inmediato inferior, para una estructura tipo péndulo invertido, que es nuestro caso de análisis, la deriva de interés, será el desplazamiento máximo que exista entre la parte superior de la pasarela (a nivel del tránsito del piso de los peatones), y el nivel de la rasante natural del terreno.

Por simple inspección, el desplazamiento crítico, estará dado por la ocurrencia de un evento sísmico, ya que es la fuerza probable de mayor magnitud horizontal.

2. GENERALIDADES DEL CASO DE ESTUDIO

A continuación, se describen aspectos generales, como lo es el uso, la ocupación y la geometría de la estructura del caso de estudio.

2.1. Ubicación y uso

La estructura se localiza en la entrada principal de la Escuela Nacional Central de Agricultura -ENCA-, este es un centro educativo que está ubicado en el Km. 17.5 de la ruta CA-9 S, finca Bárcena, Villa Nueva, Guatemala.

La Escuela Nacional Central de Agricultura, ENCA, es considerada a nivel Centroamericano como una de las mejores instituciones dedicadas a la formación agrícola, pecuaria y forestal de nivel medio, debido al alto nivel académico que logran los profesionales cuando egresan de la misma.

La Escuela Nacional Central de Agricultura, ENCA tiene una extensión de aproximadamente 2 Caballerías, asimismo los terrenos se encuentran divididos en áreas agrícolas, en otras palabras, producción de hortalizas de consumo local y de exportación, pilones, granos básicos, flores, follajes, frutales, apiarios, piscícolas, cochiqueras, establos, concentrados, producción de forrajes y pastos, de tipo forestal entre estos, vivero, bosques de coníferas y *latífoliadas*, pequeño *arboretum*, del tipo agroindustrial que son las instalaciones y ciertos equipos para el procesamiento de cárnicos, maderas, miel, frutas, hortalizas, lácteos y café.

El uso de la estructura es, para estudiantes y trabajadores de la Escuela Nacional Central de Agricultura, ENCA. Cabe mencionar que la pasarela se

construyó con el fin de que los estudiantes y trabajadores pudiesen atravesar de manera segura la calle, ya que la misma es concurrida por vehículos, buses, camiones y motocicletas.

De acuerdo con la Dirección General de Caminos de Guatemala, el terreno de la Escuela Nacional Central de Agricultura, ENCA, es atravesado por la Carretera Departamental 16 (RD-16 según la nomenclatura dada por la institución, ver apéndice), justamente la pasarela peatonal del caso de estudio, conecta ambas partes del terreno en que está dividido el campus central de ENCA. A continuación, se muestra una foto satelital extraída de *Google Earth*.

Figura 8. **Foto satelital de pasarela peatonal**



Fuente: Maxar. *Google Earth*. Consultado el 14 de septiembre de 2,021.

Recuperado de <https://goo.gl/maps/z5c1HczvxBYt7pWG7>

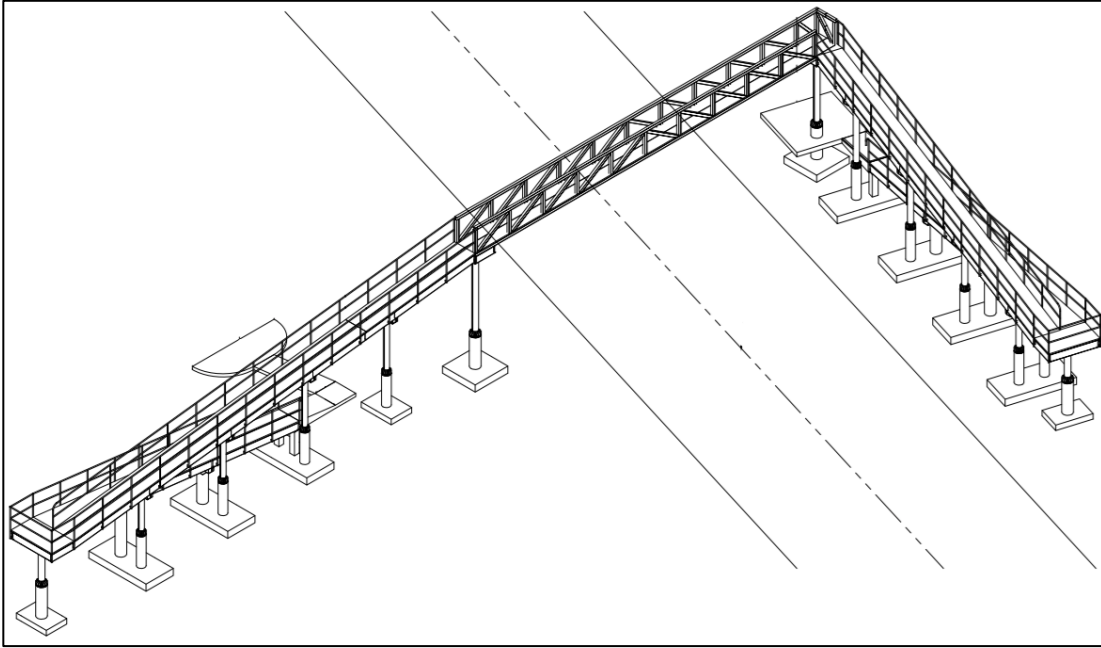
2.2. Tipología

La tipología estructural, es de péndulo invertido, ya que, como se mencionó anteriormente, gran parte de la masa se concentra en la parte superior de la estructura. AGIES, brinda la siguiente definición de una estructura tipo péndulo invertido:

Es un sistema que soporta la carga vertical y también las fuerzas horizontales actuando esencialmente como voladizo vertical aislado. Además, más del 50 % de la masa del sistema está concentrada en el extremo superior y la estabilidad lateral de la masa depende de una restricción a momento. (AGIES, 2018, p. 25)

Por lo anteriormente expuesto es que la pasarela peatonal de este caso de estudio se clasifica como una estructura tipo péndulo invertido.

Figura 9. Vista en 3D de pasarela peatonal

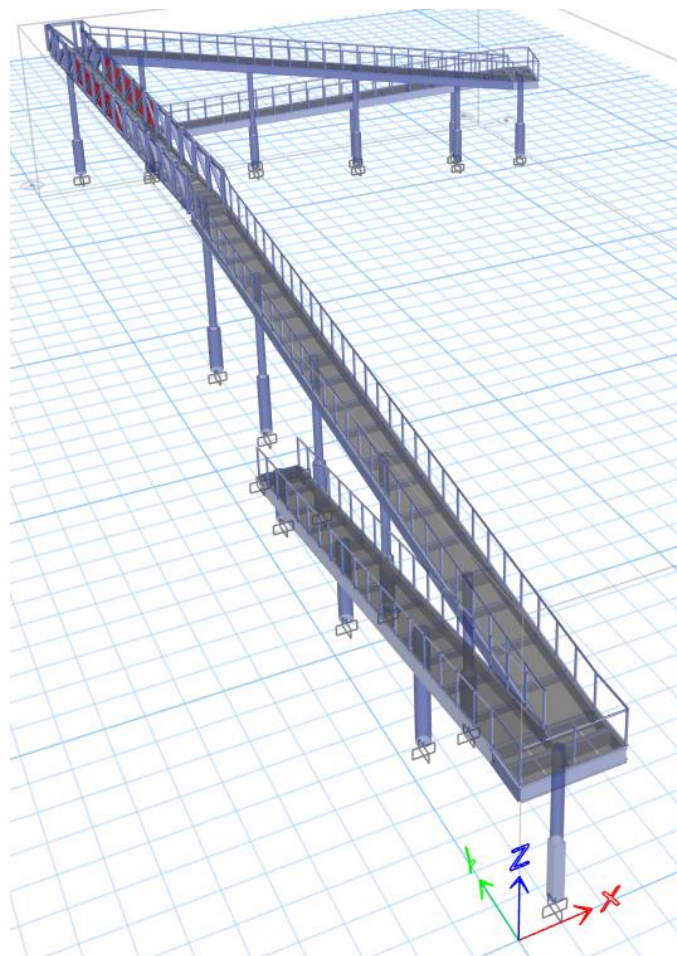


Fuente: ENCA 2021. *Construcción pasarela peatonal de conexión entre campus central y el área de consulados de la ENCA.*

3. INTEGRACIÓN DE CARGAS

En la siguiente figura se presenta el modelo de la pasarela peatonal creado en *Extended Three Dimensional Analysis of Building Systems*, ETABS en su versión 18, el mismo es la base para realizar el análisis y diseño estructural.

Figura 10. **Modelo 3D de pasarela peatonal creado en ETABS**



Fuente: elaboración propia, realizado con Word.

3.1. Carga muerta

La carga muerta se debe al peso propio de la estructura, esta integración la realiza el programa, tomando en consideración, la densidad y el volumen de cada uno de los elementos estructurales que conforman la estructura.

3.2. Cargas vivas

Las cargas vivas se deben a la ocupación y el uso de la estructura, generalmente estas cargas están dadas por códigos de diseño, en este caso por la norma de seguridad estructural AGIES NSE 2. Se realizó una asignación de carga viva en la superficie de la rampa de la pasarela, así como también en la losa del puente que conecta ambos extremos, en la tabla 3.7.1-1 de la norma se establece un valor de $500 \text{ Kg}/\text{m}^2$, para ciertos tipos de ocupación extrema, sin embargo debido al uso agrícola y ocupación de carga máxima de estudiantes, durante horas pico, se decidió agregar cierta sobrecarga al valor anteriormente mencionado, por lo tanto, se asignó una carga de $610 \text{ Kg}/\text{m}^2$, en toda la superficie de la trayectoria de la pasarela.

3.3. Carga de viento

La carga de viento se asignó a membranas ubicadas a los lados del puente, fue necesario programar una hoja de cálculo me Microsoft Excel, para calcular la carga de viento en unidades Kg/m^2 , de acuerdo con los lineamientos dados por AGIES NSE 2. Se eligió esta ubicación para colocar las membranas porque ENCA tiene planeado colocar vallas publicitarias en esa zona de la pasarela, a continuación, se muestra el procedimiento calculado en la hoja de Excel:

Figura 11. Hoja de cálculo para estimar el valor de la presión de viento

Presión de viento de diseño - AGIES NSE 2, numeral 5.3 - (Carga de viento)	
Coeficiente de exposición (C_e)	
Altura promedio sobre el terreno (m) 4.5	Tipo de exposición del sitio (numeral 5.2.1, NSE 2) B
$C_e = 0.62$	
Coeficiente de presión (Q_c)	
$Q_c = 3.6$	
Presión de remanso del viento (ver incisos 5.10 y 5.11 de NSE 2-10) (q_s)	
$(q_s) = 573$ Pascales	
Factor de importancia (NSE 2-10 inciso: 5.3.1):	
$I = 1.00$	
Presión de diseño:	
$P = C_e Q_c q_s I$ $P = 1,278.94$ Pa \longrightarrow $W = 130.37$ Kg_f/m^2	

Fuente: elaboración propia, realizado con Word.

3.4. Carga de sismo

La carga de sismo se integró por medio de las normas NSE 1, NSE 2 y NSE 3, se realizó una integración del método de carga sísmica estática equivalente, así como el método de análisis espectral modal, este último es especialmente útil para determinar la forma en que la pasarela va a desplazarse, en el capítulo 4, se amplía más información sobre la forma de cálculo de estos métodos.

4. ANÁLISIS ELÁSTICO DE PASARELA CON EMPOTRAMIENTO EN LA BASE

Mediante el desarrollo de los siguientes métodos de análisis estructural, se establecerán valores que servirán de base para determinar valores que se utilizarán para escoger el elemento reductor de desplazamientos laterales.

4.1. Método de la carga sísmica estática equivalente

Existe un método ampliamente utilizado para modelar las fuerzas sísmicas que se inducen en un edificio durante un sismo, partiendo de la ecuación:

$$V_B = C_S W_S$$

Fuente: AGIES, NSE 3 – 2018. (2018). *Diseño Estructural de edificaciones*.

En donde:

V_B = Magnitud del cortante basal

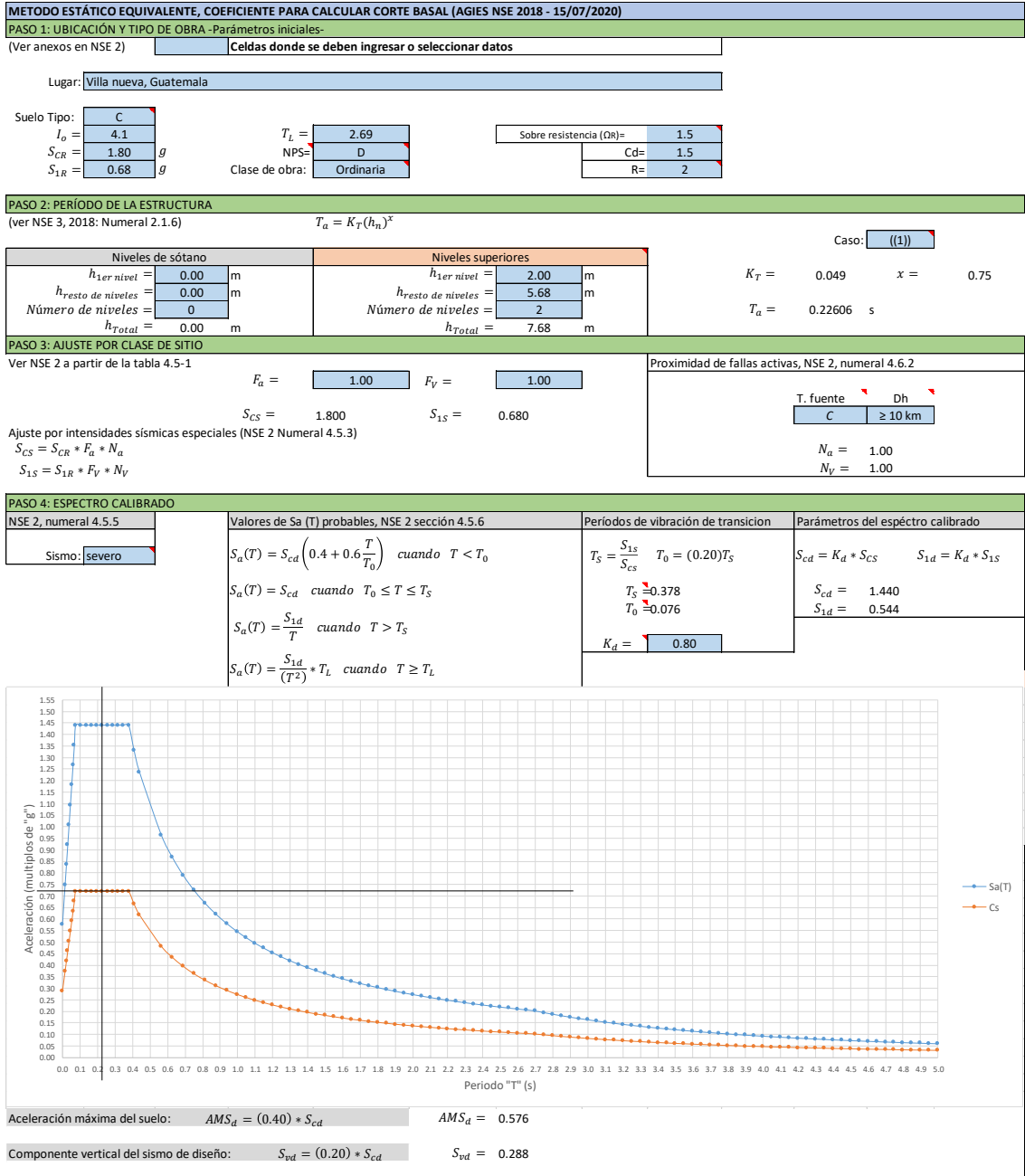
C_S = Coeficiente sísmico de diseño

W_S = Peso sísmico de la estructura

La ecuación (6), establece que el valor de fuerza cortante que una estructura dada deberá de soportar en su base, es igual al coeficiente sísmico multiplicado por el peso sísmico de la estructura, el mismo está dado por el 100 % de la carga muerta + el 25 % de las cargas vivas.

En las siguientes figuras se presenta el resumen de procedimiento de cálculo del coeficiente sísmico de diseño, que posteriormente será un valor a introducir en el caso de carga correspondiente dentro del programa ETABS (método sísmico estático equivalente), de acuerdo con la metodología de Asociación Guatemalteca de Ingeniería Estructural y Sísmica, AGIES, Norma de Seguridad Estructural, NSE 2018 actualizada al 15 de julio de 2020.

Figura 12. Pasos 1, 2, 3 y 4 para el cálculo de coeficiente de corte basal, según metodología de AGIES



Fuente: elaboración propia, realizado con Word.

Figura 13. Paso 5 para el cálculo de coeficiente de corte basal, según metodología de AGIES

PASO 5: CALCULAR Cs		
Cálculo de Cs		Cs a utilizar
NSE 3, Sección 2.1.3	$S_d(T_d) = 1.440$	$C_s = 0.7192 \text{ g}$
	$\varepsilon = 0.05$	
$\beta_d = \frac{4}{1 - \ln(\varepsilon)}$	$\beta_d = 1.001$	
$C_s = \frac{S_d(T_d)}{R * \beta_d}$		
$C_s = 0.7192 \text{ g}$		
Chequeo Cs mínimo		
NSE 3, sección 2.1.4		
$F_d = \left[0,59 + \frac{4,77 * S_{1d}}{S_{cd} * T_F * R} \right] * \frac{1}{K_d}$		
$F_d = 5.720$		
$C_s \geq \left(\frac{0,044 * S_{cd} * F_d}{\beta_d} \right) \geq 0.01$		
$0.7192 \geq 0.3620 \geq 0.01$		
Si lo=4.2 entonces chequear Cs mínimo con:		
$C_s \geq \frac{0.45 * K_d * F_d}{R * \beta_d}$		
$C_s \geq$ No aplica		

Fuente: elaboración propia, realizado con Word.

4.2. Método del análisis modal espectral

El objetivo de este método es describir la vibración libre que una estructura presentará, tomando en cuenta principalmente los siguientes factores: cargas de servicio, condiciones de empotramiento, geometría y la rigidez de los elementos estructurales.

AGIES en el capítulo 3 de la norma NSE 3, especifica los lineamientos a seguir durante un análisis modal, dentro estos, establece que se debe de llegar al menos al 90 % de la participación modal de la masa de la estructura, en cada una de las direcciones de análisis. Para llegar a este porcentaje de participación modal, se consideran cierta cantidad de modos de vibración de la estructura, este número de modos deberá de determinarse mediante prueba y error.

Fueron necesarios calcular 25 modos de vibración de la estructura para llegar al 90 % de la participación de la masa, los resultados se muestran en la siguiente tabla.

Tabla I. Participación modal de la masa de la estructura

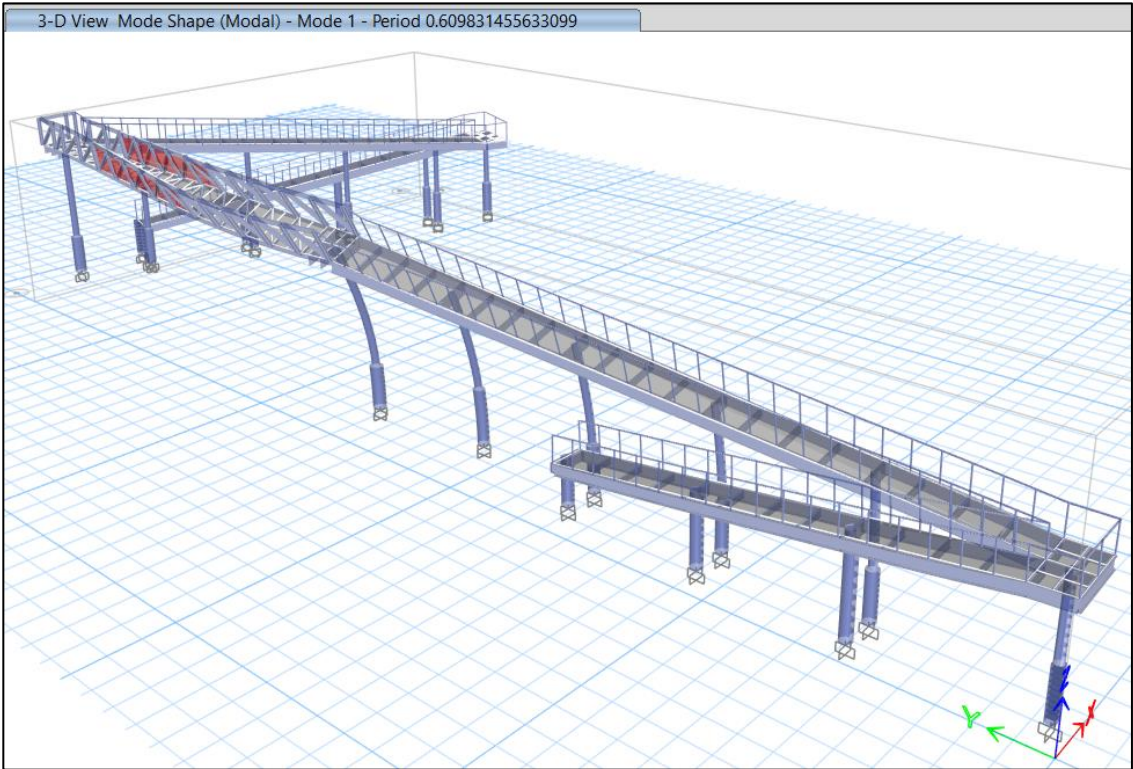
Modal Participating Mass Ratios								
Case	Mode	Period	UX	UY	UZ	SumUX	SumUY	SumUZ
sec								
Modal	1	0.610	0.234	0.001	0.000	0.234	0.001	0.000
Modal	2	0.409	0.218	0.030	0.000	0.452	0.031	0.000
Modal	3	0.285	0.044	0.163	0.000	0.496	0.195	0.000
Modal	4	0.239	0.003	0.343	0.000	0.499	0.538	0.000
Modal	5	0.212	0.026	0.230	0.000	0.525	0.767	0.000
Modal	6	0.172	0.300	0.061	0.000	0.826	0.829	0.000
Modal	7	0.161	0.001	0.000	0.000	0.827	0.829	0.000
Modal	8	0.158	0.001	0.002	0.000	0.828	0.831	0.000
Modal	9	0.138	0.000	0.003	0.000	0.828	0.834	0.000
Modal	10	0.137	0.000	0.000	0.000	0.828	0.834	0.000
Modal	11	0.124	0.011	0.000	0.000	0.840	0.834	0.000
Modal	12	0.119	0.000	0.000	0.000	0.840	0.834	0.000
Modal	13	0.111	0.000	0.000	0.000	0.840	0.834	0.000
Modal	14	0.108	0.003	0.000	0.000	0.842	0.834	0.000
Modal	15	0.105	0.000	0.000	0.000	0.842	0.835	0.000
Modal	16	0.100	0.000	0.000	0.000	0.842	0.835	0.000
Modal	17	0.099	0.001	0.004	0.000	0.843	0.839	0.000
Modal	18	0.095	0.001	0.000	0.000	0.844	0.839	0.000
Modal	19	0.089	0.059	0.000	0.000	0.903	0.839	0.000
Modal	20	0.088	0.000	0.000	0.000	0.903	0.839	0.000
Modal	21	0.085	0.000	0.000	0.000	0.903	0.839	0.000
Modal	22	0.081	0.000	0.000	0.000	0.904	0.839	0.000
Modal	23	0.080	0.000	0.000	0.000	0.904	0.839	0.000
Modal	24	0.078	0.000	0.001	0.000	0.904	0.839	0.000
Modal	25	0.073	0.008	0.069	0.000	0.913	0.908	0.000
Modal	26	0.071	0.001	0.002	0.000	0.913	0.910	0.000
Modal	27	0.067	0.000	0.006	0.000	0.914	0.916	0.000
Modal	28	0.066	0.001	0.001	0.000	0.915	0.917	0.000
Modal	29	0.062	0.000	0.000	0.000	0.915	0.917	0.000
Modal	30	0.058	0.001	0.002	0.000	0.916	0.919	0.000

Fuente: elaboración propia, realizado con Word.

Sin embargo, el primer modo de vibración de la estructura representa con bastante precisión el movimiento que físicamente ocurre en la pasarela peatonal

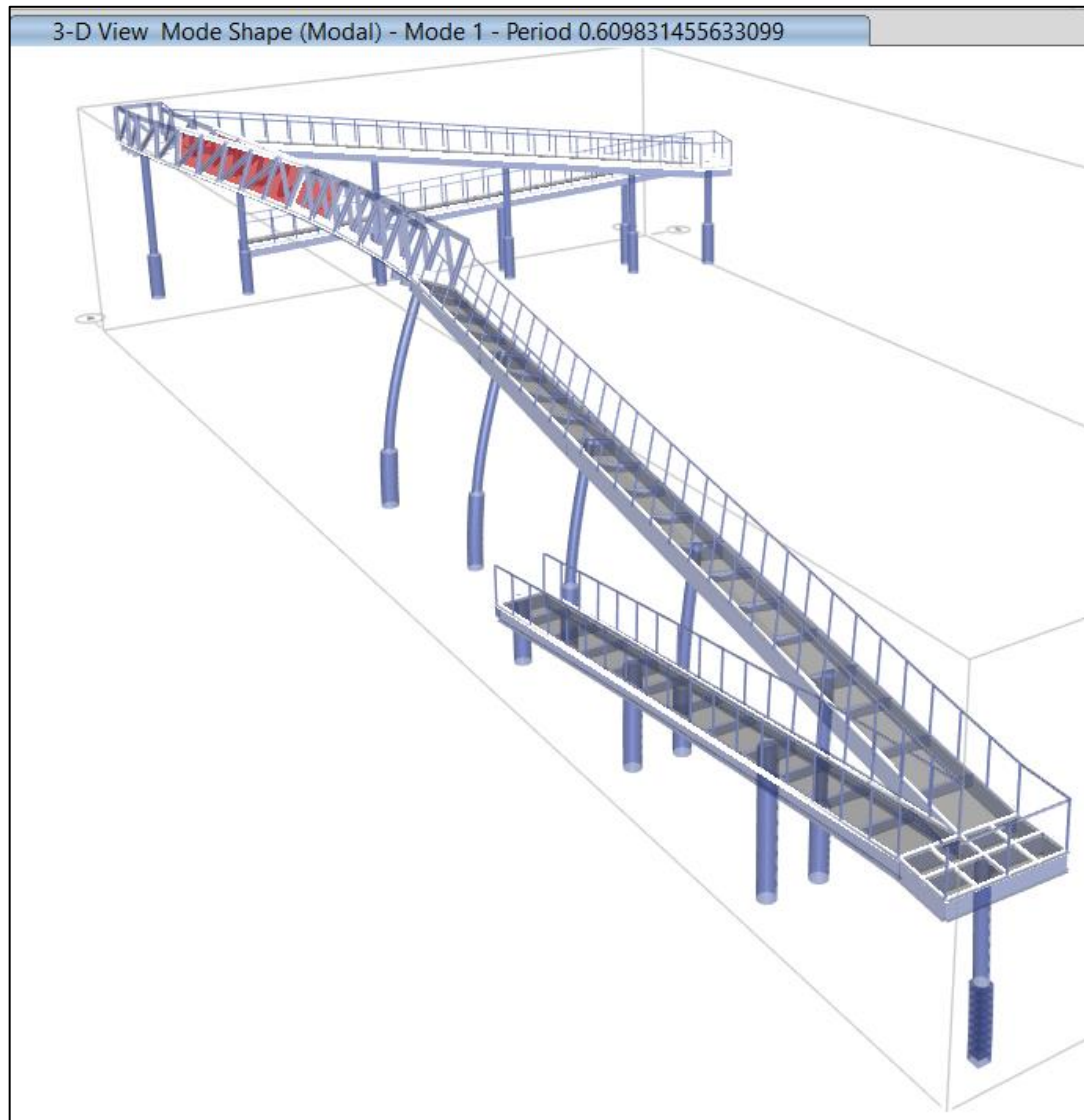
ya construida, en las siguientes 2 figuras se muestra el modo de vibración 1 de la estructura.

Figura 14. **Modo de vibración 1 de la estructura (1)**



Fuente: elaboración propia, realizado con Word.

Figura 15. **Modo de vibración 1 de la estructura (2)**



Fuente: elaboración propia, realizado con Word.

Será este tambaleo lateral el que se procurará controlar con el elemento reductor de desplazamientos que se analizará en capítulos posteriores.

4.3. Combinaciones de carga

Se muestran las combinaciones de carga definidas dentro del *software* (ETABS), de acuerdo con la norma de AGIES NSE 2, capítulo 8. Las combinaciones de carga se calculan para considerar los peores escenarios a los que podría estar sometida la estructura.

Tabla II. **Combinaciones de cargas gravitacionales**

Combinaciones de carga CR1, CR2 y CR3	
Combinación	Nombre
$1.4M$	(CR1)
$1.2M + 1.6V + 0.5(V_t \text{ o bien } P_L \text{ o bien } A_R)$	(CR2)
$1.2M + V + 1.6(V_t \text{ o bien } P_L \text{ o bien } A_R)$	(CR3)

Fuente: elaboración propia, realizado con Word.

Tabla III. **Combinaciones de carga que consideran el efecto sísmico.**

Combinaciones de carga CR4 y CR5	
Combinación	Nombre
$1.2M + V + S_{vd} \pm S_{hd}$	(CR4)
$0.9M - S_{vd} \pm S_{hd}$	(CR5)

Fuente: elaboración propia, realizado con Word.

Tabla IV. **Combinaciones de carga que consideran la carga de viento.**

Combinaciones de carga CR6 y CR7	
Combinación	Nombre
$1.2M + V \pm 1.3W + 0.5(P_L \text{ o bien } V_t)$	(CR6)
$0.9M \pm 1.3W$	(CR7)

Fuente: elaboración propia, realizado con Word.

De acuerdo con la tabla 8.2.4-1 de AGIES NSE 2, se tiene que:

Tabla V. **Descripción de simbología usada en combinaciones de carga.**

Notación en combinaciones de carga	
Tipo de carga	Símbolo en la combinación
Cargas muertas	M
Cargas vivas	V
Cargas vivas de techo	V_t
Carga sísmica horizontal	S_{hd}
Carga sísmica vertical	S_{vd}
Cargas de tefra volcánica	A_R
Cargas de lluvia	P_L

Fuente: elaboración propia, realizado con Word.

4.4. Resultados del análisis estático

A continuación, se muestran los resultados numéricos del análisis estático calculado en la estructura de estudio.

4.4.1. Período empírico

De acuerdo con la metodología del método estático equivalente, se calculó un periodo de vibración de la estructura de: $T = 0.226$ segundos. Es importante recordar que este método no considera las asimetrías en planta ni en elevación. La estructura de análisis tiene ambos tipos de asimetrías, por lo que es una de las principales causas entre el periodo empírico calculado y los periodos modales obtenidos (ver tabla I).

4.4.2. Cortante basal

Se definió una combinación de carga para calcular el peso sísmico de la estructura, como se mencionó anteriormente, este peso corresponde al 100 % de las cargas muertas + 25 % de las cargas vivas según el lineamiento dado por AGIES.

Tabla VI. **Peso sísmico de la pasarela peatonal.**

Reacciones en la base				
Caso	Tipo de caso	FX	FY	FZ
		Tonf	Tonf	Tonf
Peso sísmico	Combinación	0	0	124.83

Fuente: elaboración propia, realizado con Word.

Sustituyendo valores en la ecuación 6, se obtienen que:

$$V_B = (0.7192)(124.83) = 89.78 \text{ Ton}$$

Este es el valor de corte basal calculado, de forma manual según la metodología de AGIES, este valor servirá como base para el diseño del elemento reductor de desplazamientos laterales.

5. ANÁLISIS ESTRUCTURAL DE PASARELA.

En este capítulo se calculan los desplazamientos permisibles según la Norma de Seguridad Estructural 3, de la Asociación Guatemalteca de Ingeniería Estructural y Sísmica.

5.1. Sistema estructural péndulo invertido

La definición de sistema tipo péndulo invertido se establece en la sección 2.2.

5.1.1. Cálculo de deriva máxima admisible

La tabla VII, muestra los requerimientos y limitantes del sistema péndulo invertido, los factores R, Ω_R, C_d , se incluyeron dentro del formato del procedimiento para el cálculo del coeficiente sísmico de la estructura.

Tabla VII. Extracto de la tabla 1.6.14-1 de AGIES NSE 3 2018

SISTEMA ESTRUCTURAL Sección 1.6 [a]	Norma	R	Ω_R	C_d	Límite de altura en metros				notas	
					SL – sin límite					
					NP – no permitido					
					Nivel de protección					
					B	C	D	E		
E6	PÉNDULO INVERTIDO	1.6.7								
	Concreto confinado		2	1.5	1.5	SL	SL	SL	15	
	Acero con detalles sísmicos		2	1.5	1.5	SL	SL	SL	15	

Fuente: elaboración propia, realizado con Word.

Se procederá a calcular la deriva máxima admisible que servirá como parámetro para el elemento reductor de desplazamientos laterales. La deriva es el desplazamiento relativo que ocurre entre 2 pisos de la estructura, en este caso, se calculara entre la base y el piso 1 (*Story* 1). Considerando lo establecido en la clasificación de obras de la Asociación Guatemalteca de Ingeniería Estructural y Sísmica, AGIES, Norma de Seguridad Estructural, NSE 1, capítulo 3, la estructura de la pasarela se clasifica como una obra de Categoría I: Obras Utilitarias, así mismo, tomando en consideración lo establecido en la tabla 6.2-1 de la NSE 7.5 Diseño de edificaciones de acero (ver apéndice), se tiene que la deriva última máxima tolerable es igual a:

$$\Delta_U = 0.020h_{sx}$$

(7)

Fuente: AGIES, NSE 3 – 2018. (2018). *Diseño Estructural de edificaciones*.

En donde:

$\Delta_U =$ Deriva lateral permitida

$h_{sx} =$ Es la diferencia de altura entre los pisos considerados

Sustituyendo valores en (7) se obtiene que:

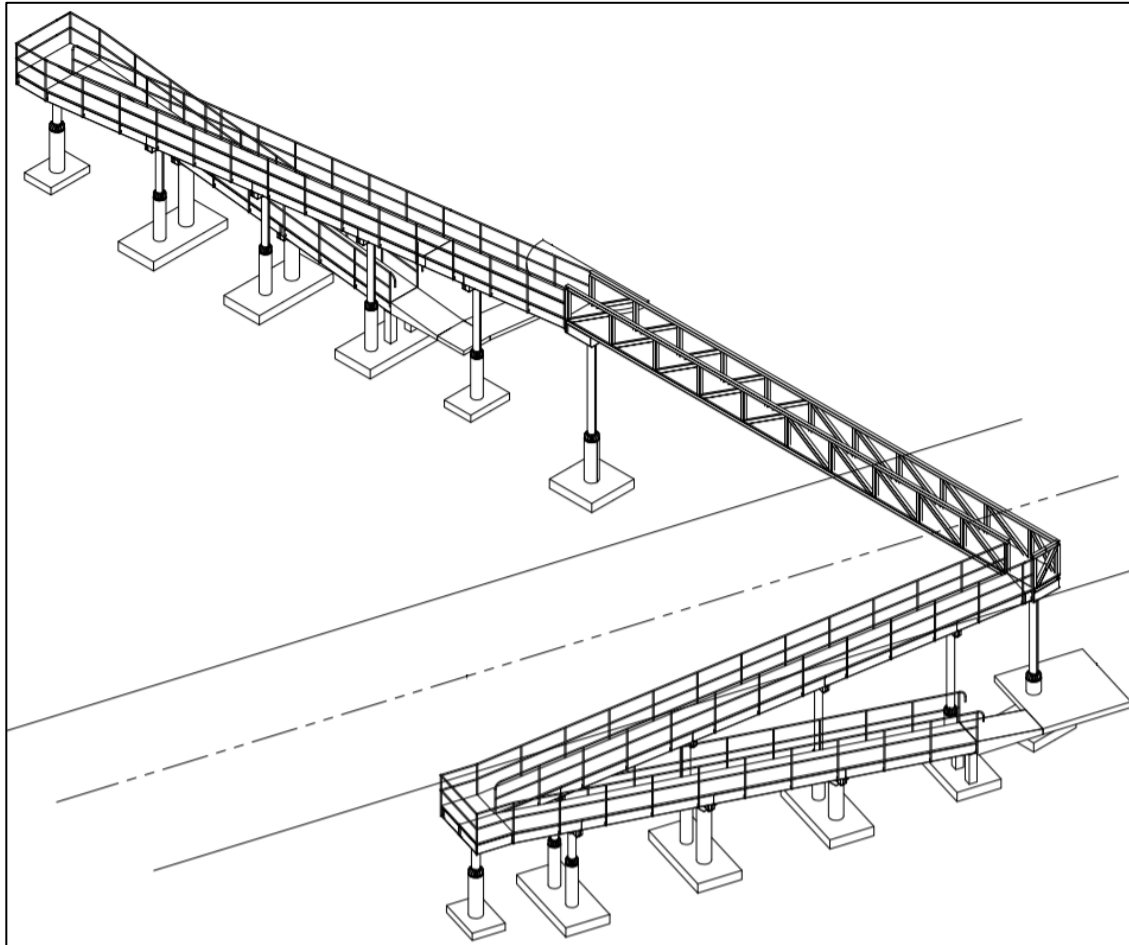
$$\Delta_U = 0.020(863 \text{ cm}) = 17.26 \text{ cm}$$

Fuente: Asociación Guatemalteca de Ingeniería Estructural y Sísmica, AGIES, NSE 3 – 2018.
(2018). *Diseño Estructural de edificaciones*.

5.1.2. Configuración geométrica de la estructura

La geometría de la pasarela es bastante irregular, tanto en planta como en elevación, considerando sus modos de vibración se observa que los desplazamientos laterales máximos ocurren en uno de los extremos del puente, aproximadamente a la mitad del trazo longitudinal más largo, es justamente en allí en donde se implementará el elemento reductor de desplazamientos laterales.

Figura 16. **Vista 3D en formato CAD de pasarela**

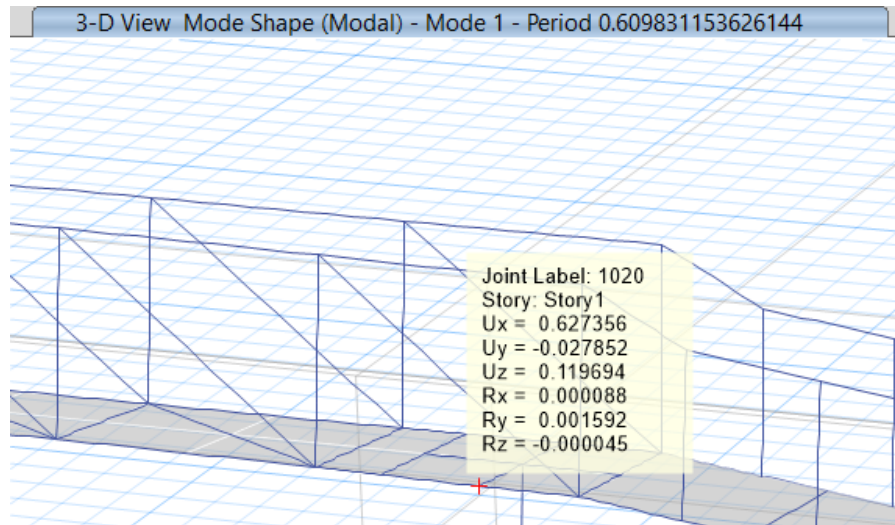


Fuente: ENCA 2021. *Construcción pasarela peatonal de conexión entre campus central y el área de consulados de la ENCA.*

5.1.3. Cálculo de desplazamientos laterales

Como se observó en las figuras 15 y 16, el modo de vibración 1, es el que se tomará como base para el análisis de los desplazamientos laterales. En la siguiente imagen, se puede leer el desplazamiento lateral, en la dirección X que se reducirá al implementar el elemento reductor de desplazamientos.

Figura 17. **Desplazamientos en el punto de anclaje debido a modo 1 de vibración de la estructura**



Fuente: elaboración propia, realizado con Word.

El piso 1 (Story 1), corresponde a la parte inferior del puente. El desplazamiento máximo es 0.63 cm, es un desplazamiento inferior a 17.26 cm calculado con la ecuación (7), por lo que se encuentra en el rango admisible según AGIES NSE 7.5. El desplazamiento encontrado en el modelo en *Extended Three Dimensional Analysis of Building Systems* (ETABS) es el que se compensará con la implementación del elemento reductor de desplazamientos laterales.

6. CHEQUEO DE ELEMENTO REDUCTOR DE DESPLAZAMIENTOS LATERALES

En este capítulo se analizará el dispositivo encargado de reducir las oscilaciones o desplazamientos laterales de la estructura del caso de estudio.

6.1. Descripción del elemento

Se propone utilizar un cable de acero anclado en 2 extremos, para reducir el movimiento oscilatorio de la pasarela, en este caso se identificó que los uno de los extremos del puente es un lugar conveniente para implementar el anclaje del elemento reductor de desplazamientos.

A su vez este anclaje doble tendrá un espejo respecto del eje de simetría vertical del puente de la pasarela. Sin embargo, en el modelo matemático que se analizará en ETABS, se considerará únicamente una restricción en la dirección global X, en uno de los lados del puente, ya que esta restricción considera los ladeos en ambos sentidos de la misma dirección.

El cable de acero comercial, está conformado por un número determinado de cordones, estos a su vez están conformados por cierta cantidad de alambres entorchados de forma helicoidal. El número de alambres y de cordones que conformen el cable, será determinado durante su fabricación acorde a las propiedades mecánicas que se quieran obtener.

Figura 18. **Cable de acero y sus componentes**



Fuente: Rosello (2005). *El autogiro y su vuelo*.

6.2. Índice de corte basal

Tal y como se estableció en la hipótesis, se tomará como parámetro utilizar el 5 % del corte basal de la estructura, definido en la sección 4.4.2, es decir:

$$(5\%)V_B = 4.49 \text{ Tonf} \quad (8)$$

Fuente: elaboración propia, realizado con Word.

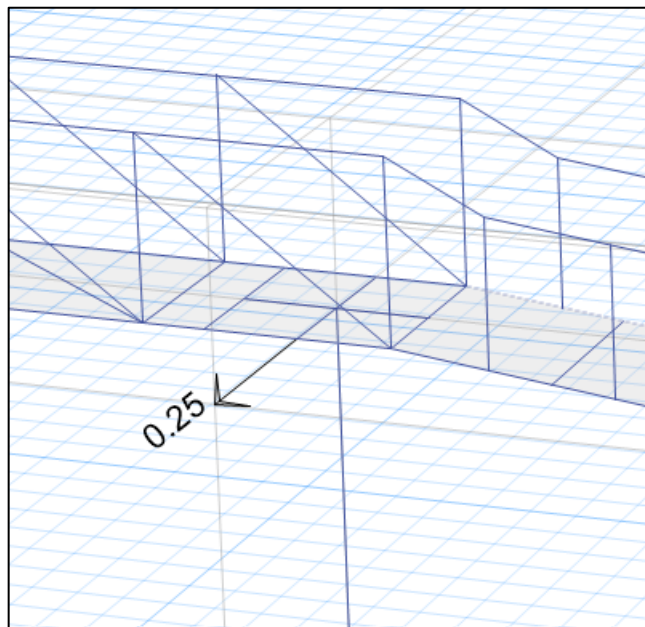
Se decidió utilizar como parámetro un porcentaje del corte basal, porque esta fuerza, relaciona el peso propio de la estructura, con las condiciones de fuerza sísmica a las que la misma estará sometida, a su vez, en el cálculo del

corte basal se consideran diferentes condiciones del lugar en donde se construirá la estructura, en el territorio de la Republica de Guatemala es AGIES es quien norma este procedimiento de cálculo.

6.3. Reacción en el anclaje

Al colocar una restricción en el modelo de ETABS, en el punto de anclaje, se obtiene la siguiente reacción (en Toneladas fuerza) debido al modo de vibración 1.

Figura 19. **Reacción en el anclaje de la estructura**



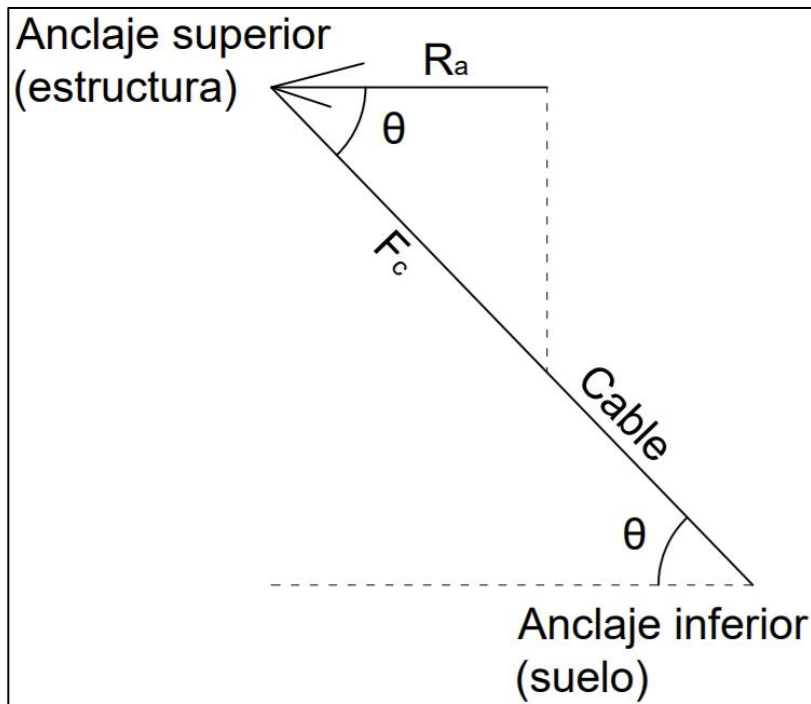
Fuente: elaboración propia, realizado con Word.

Al comparar la fuerza de diseño propuesta en la hipótesis y la fuerza obtenida en el anclaje, se observa una considerable variación entre ambos

valores, sin embargo, se analizará la variación de la fuerza conforme la variación del ángulo de inclinación.

En la siguiente figura se muestra un diagrama de cuerpo libre del cable de anclaje.

Figura 20. **DCL de cable de anclaje**



Fuente: elaboración propia, realizado con Word.

En donde:

R_a = Reacción en el anclaje de la estructura

F_c = Fuerza en el cable

θ = Es el ángulo de inclinación del cable respecto

de la horizontal (ángulo de anclaje)

Con los datos anteriores y utilizando relaciones trigonométricas, se puede plantear la siguiente ecuación:

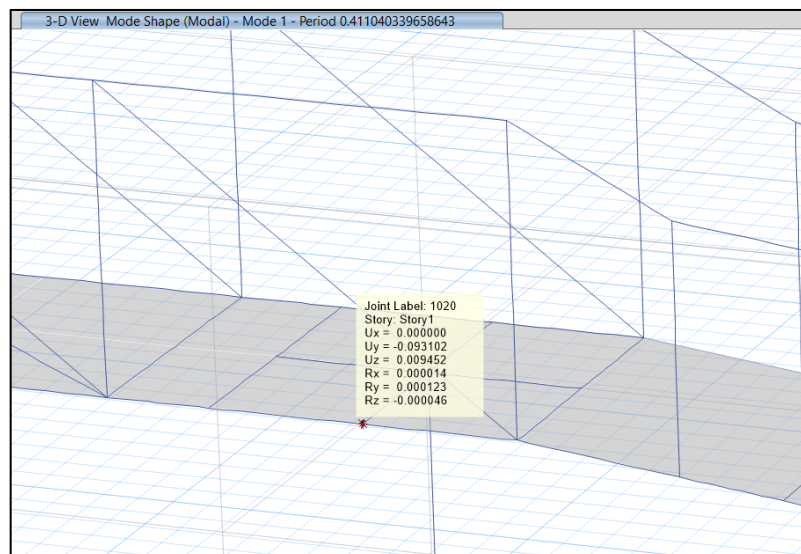
$$F_c = \frac{R_a}{\cos(\theta)} \quad (9)$$

Fuente: elaboración propia, realizado con Word.

6.4. Desplazamiento y anclaje lateral

En la siguiente figura se muestra el desplazamiento en el punto de anclaje calculado con el programa de modelado estructural.

Figura 21. **Desplazamientos al implementar restricción de cable en el punto de anclaje debido a modo 1 de vibración de la estructura**



Fuente: elaboración propia, realizado con Word.

Tal y como se observa, los desplazamientos en la dirección X se reducen a 0, es justamente lo que se quería lograr al implementar, el elemento reductor de desplazamientos laterales.

6.5. Presentación de resultados

En la siguiente tabla se resume la variación de la fuerza que debe de soportar el cable conforme se varíe el ángulo de anclaje.

Tabla VIII. **Variación de la fuerza de tensión del cable en función del ángulo de anclaje**

Proporcionalidad entre fuerza y el ángulo de anclaje		
Angulo (°)	Ra (Tonf)	Fc (Tonf)
0	0.25	0.25
5	0.25	0.25
10	0.25	0.25
15	0.25	0.26
20	0.25	0.27
25	0.25	0.28
30	0.25	0.29
35	0.25	0.31
40	0.25	0.33
45	0.25	0.35
50	0.25	0.39
55	0.25	0.44
60	0.25	0.50
65	0.25	0.59
70	0.25	0.73
75	0.25	0.97
80	0.25	1.44
85	0.25	2.87
89	0.25	14.32

Fuente: elaboración propia, realizado con Word.

6.6. Discusión de resultados

Tomando como punto de partida el caso en el que la línea horizontal y el cable formen un ángulo de 0° , entonces la fuerza necesaria para evitar los desplazamientos es igual a la fuerza R_a , encontrada en el modelo de ETABS. A medida que el ángulo aumenta también lo hace la fuerza resultante en el cable F_c , no se ven incrementos bruscos en la fuerza del cable hasta llegar a los 45° , a partir de allí los incrementos en la fuerza que debe de soportar el cable se hacen más notorios. Hasta llegar nuevamente a los 80° , en este punto los incrementos en la fuerza F_c son aun mas grandes.

Estos resultados son congruentes ya que si el anclaje del cable fuese vertical (ángulo muy cercano a 90°), el denominador de la ecuación (9), tendería a ser 0, por lo que el resultado de la fuerza F_c tendería a ser infinita.

Al verlo de forma física, el aporte del cable para restringir movimientos laterales sería prácticamente 0. El cable es un elemento estructural que solo puede soportar fuerzas de tensión, es por esto que se colocaran 2 cables uno a cada lado de uno de los extremos del puente de la pasarela, es decir para contrarrestar los efectos de tensión sobre un mismo eje, pero en sentidos opuestos.

Por lo anterior se puede concluir que entre más horizontal se instale el cable como elemento reductor de desplazamientos laterales, su función será más optima, sin embargo, en campo, en muchos casos se tienen poco terreno en donde extenderse para instalar un elemento de este tipo, es aquí donde radica la importancia de tomar en cuenta esta variación de la fuerza en función del ángulo de inclinación del cable.

Observando el valor del índice de corte basal, propuesto en la hipótesis, y observando la tabla VIII, se establece que 5 % del cortante basal es un parámetro correcto y conservador para escoger un cable de acero que resista desplazamientos laterales, debidos a la forma modal de vibración de una estructura cualquiera. Es seguro decir que este valor es congruente con valores del ángulo de anclaje de hasta 85°.

De la tabla IX del apéndice, para el caso de estudio se puede escoger un cable de acero de 3/8", ya que el mismo tiene una carga de rotura de 5.14 Tonf, que es mayor al índice de corte basal (4.49 Tonf) obtenido en la sección 6.2.

CONCLUSIONES

1. El 5 % del corte basal calculado ($(5\%)(89.78 \text{ Tonf}) = 4.49 \text{ Tonf}$) en base a las normas de AGIES, es un dato conservador para la elección de un cable de acero de diámetro comercial, como elemento reductor de desplazamientos laterales, por lo tanto, se comprueba la hipótesis de la investigación.
2. Debido a las irregularidades en planta, elevación, lugar de construcción (Km. 17.5, Finca Bárcena, Villa nueva, Guatemala), tipología estructural y cargas actuantes en la estructura, el caso de estudio, resultó idóneo para esta investigación.
3. Con base en el análisis y diseño estructural, se determinó que el cable de acero con cordones entorchados y alma sólida de acero designación 6X19, como elemento reductor de desplazamientos laterales, tendría un funcionamiento más óptimo a medida que se disminuya el ángulo de anclaje entre la horizontal y el cable.
4. Con base en los resultados encontrados un cable de acero con cordones entorchados y alma sólida de acero designación 6X19, como elemento reductor de desplazamientos laterales resulta práctico y fácil de implementar, ya que es un producto comercial, accesible de encontrar con los proveedores de materiales de construcción, además cumple con su objetivo, al eliminar las oscilaciones de una estructura como la del caso de estudio.

5. Las vibraciones y desplazamientos laterales excesivos en pasarelas peatonales que describen un comportamiento de un péndulo invertido, se pueden compensar (eliminar) con la implementación de un cable de acero con cordones entorchados y alma sólida de acero, este cable debe de instalarse para que funcione totalmente con esfuerzo de tensión.

RECOMENDACIONES

1. Elegir un cable de acero de diámetro comercial como elemento reductor de desplazamientos laterales, para estructuras tipo péndulo invertido, tomando en consideración las propiedades mecánicas del mismo.
2. Durante el diseño y planificación de una estructura tipo péndulo invertido, es conveniente considerar el espacio y la ubicación del punto de anclaje del cable de acero.
3. Considerar varias opciones del cable de acero a elegir, en función a los requerimientos específicos del proyecto que se esté desarrollando.
4. Implementar un sistema de elemento reductor de desplazamientos para el caso de las estructuras existentes, desarrollando el proceso de análisis y diseño estructural.
5. Visitar la pasarela del caso de estudio, recorrerla y corroborar el buen funcionamiento de la misma, mediante la implementación de cables de acero.

REFERENCIA

1. AGIES, NSE 3 – 2018. (2018). *Diseño Estructural de edificaciones*. Guatemala: Asociación Guatemalteca de Ingeniería Estructural y Sísmica.
2. Aguilera, A. (2013). *Análisis de las vibraciones inducidas por las personas en un sistema de losa innovativo*. Concepción: Universidad del Bío-Bío.
3. Carchi, A. y Orellana, P. (2015). *Análisis Dinámico de vibraciones bajo cargas peatonales para una pasarela en base a modelos matemáticos*. (Tesis de licenciatura). Universidad de Cuenca, Ecuador.
4. Cruz, A. (2016). *Estudio del comportamiento dinámico de la pasarela peatonal PE0908 sobre la A-6*. (Tesis de maestría). Universidad Politécnica de Madrid. España.
5. Gómez, D., Marulanda, J. y Thomson, P. (Diciembre de 2007). Sistemas de control para la protección de estructuras civiles sometidas a cargas dinámicas. *Dyna*, 75(155), 77-89.
6. Alarcón, E. y Hacar, M. (1973). *Sistemas continuos*. Madrid, España: Biblioteca ETSI Industriales.

7. Gómez, J. (2000). *Introducción a la dinámica de estructuras*. Centro de publicaciones Universidad Nacional de Colombia. Colombia.
8. González, C. (2009). *Estudio del comportamiento vibratorio de estructuras acopladas*. (Tesis de maestría). Universidad Politecnica de Valencia. España:
9. Velázquez, H. y Fonten L. (2015). *Estudio comparativo de un edificio aporticado de concreto armado utilizando las normas sísmicas de ecuador y venezuela*. (Tesis de licenciatura). Universidad Católica Andres Bello. Venezuela.
10. Hewitt, P. (2007). *Física conceptual*. México: PEARSON Educación.
11. Husid, R. (1963). *Cálculo del periodo fundamental de vibración de edificios con rigidez de corte*. Santiago: Biblioteca central FCFM.
12. Hernández, J. (Junio de 2005). Estructuras y efectos dinámicos del viento. *DYNA*, 80, 9-12.
13. Montanaro, M. (2002). *Sistemas de control de vibraciones en estructuras de gran altura*. Universidad Nacional del Centro de la Provincia. Argentina.
14. Propaño, M. (Agosto de 2012). Investigación de las vibraciones por tráfico en las construcciones patrimoniales de adobe. *Revista de la construcción*, 11(2), 39-41.

15. Gonzales, R. y Gómez, C. (2008). *Efectos de la Irregularidad en planta por forma arquitectónica*. Veracruz, México: Sociedad Mexicana de Ingeniería Estructural.
16. Serway, R. y Vuille, C. (2012). *Fundamentos de Física*. México: CENGAGE Learning.
17. Rios, H. (1996). *Física General para estudiantes de ingeniería*. Centro de publicaciones Universidad Nacional de Colombia. Colombia.
18. Salazar, G. (2015). *Impacto producido por la variación en rigidez, masa sísmica y coeficiente del módulo elástico en el comportamiento dinámico de edificios con sistemas de pórticos resistentes a momento y sistemas duales*. (Tesis de maestría). Pontificia Universidad Católica de Ecuador. Quito, Ecuador.
19. Vivas, H. (2013). *Física de oscilaciones, ondas y óptica*. Universidad Nacional de Colombia. Colombia
20. Yanez, D. (2011). *Diseño de edificaciones resistentes al viento para facilidades petroleras*. Sangolquí: Sangolquí / ESPE.

APÉNDICES

Apéndice 1. Valores de periodo, aceleración espectral y coeficiente sísmico del método sísmico estático equivalente

Valores del espectro calibrado		
T	$S_a(T)$	C_s
0	0.576	0.288
0.015	0.7488	0.374
0.023	0.8352	0.418
0.030	0.9216	0.461
0.038	1.008	0.504
0.045	1.0944	0.547
0.053	1.1808	0.590
0.060	1.2672	0.634
0.068	1.3536	0.677
0.076	1.440	0.720
0.106	1.440	0.720
0.136	1.440	0.720
0.166	1.440	0.720
0.196	1.440	0.720
0.227	1.440	0.720
0.257	1.440	0.720
0.287	1.440	0.720
0.317	1.440	0.720
0.348	1.440	0.720
0.378	1.440	0.720
0.409	1.330	0.665
0.440	1.236	0.618
0.564	0.964	0.482
0.627	0.868	0.434
0.689	0.790	0.395
0.751	0.724	0.362
0.813	0.669	0.334
0.876	0.621	0.311
0.938	0.580	0.290
1.000	0.544	0.272

Continuación del apéndice 1.

1.050	0.518	0.259
1.100	0.495	0.247
1.150	0.473	0.237
1.200	0.453	0.227
1.250	0.435	0.218
1.300	0.418	0.209
1.350	0.403	0.201
1.400	0.389	0.194
1.450	0.375	0.188
1.500	0.363	0.181
1.550	0.351	0.175
1.600	0.340	0.170
1.650	0.330	0.165
1.700	0.320	0.160
1.750	0.311	0.155
1.800	0.302	0.151
1.850	0.294	0.147
1.900	0.286	0.143
1.950	0.279	0.139
2.000	0.272	0.136
2.050	0.265	0.133
2.100	0.259	0.130
2.150	0.253	0.127
2.200	0.247	0.124
2.250	0.242	0.121
2.300	0.237	0.118
2.350	0.231	0.116
2.400	0.227	0.113
2.450	0.222	0.111
2.500	0.218	0.109

Continuación del apéndice 1.

2.550	0.213	0.107
2.600	0.209	0.105
2.650	0.205	0.103
2.700	0.201	0.100
2.750	0.194	0.097
2.800	0.187	0.093
2.850	0.180	0.090
2.900	0.174	0.087
2.950	0.168	0.084
3.000	0.163	0.081
3.050	0.157	0.079
3.100	0.152	0.076
3.150	0.147	0.074
3.200	0.143	0.071
3.250	0.139	0.069
3.300	0.134	0.067
3.350	0.130	0.065
3.400	0.127	0.063
3.450	0.123	0.061
3.500	0.119	0.060
3.550	0.116	0.058
3.600	0.113	0.056
3.650	0.110	0.055
3.700	0.107	0.053
3.750	0.104	0.052
3.800	0.101	0.051
3.850	0.099	0.049
3.900	0.096	0.048
3.950	0.094	0.047
4.000	0.091	0.046

Continuación del apéndice 1.

4.050	0.089	0.045
4.100	0.087	0.044
4.150	0.085	0.042
4.200	0.083	0.041
4.250	0.081	0.041
4.300	0.079	0.040
4.350	0.077	0.039
4.400	0.076	0.038
4.450	0.074	0.037
4.500	0.072	0.036
4.550	0.071	0.035
4.600	0.069	0.035
4.650	0.068	0.034
4.700	0.066	0.033
4.750	0.065	0.032
4.800	0.064	0.032
4.850	0.062	0.031
4.900	0.061	0.030
4.950	0.060	0.030
5.000	0.059	0.029

Fuente: elaboración propia, realizado con Word.

Apéndice 2.

Tabla de derivas permisibles según NSE 7.5

Estructura	Categoría		
	I o II	III	IV
Estructuras, que no sean muros de corte de mampostería, cuatro pisos o menos por encima de la base, con paredes interiores, divisiones, techos y sistemas de muros exteriores que han sido diseñados para acomodar las derivas de piso	$0.025h_{sx}$ ^[a]	$0.020h_{sx}$	$0.015h_{sx}$
Estructuras de muros de corte de mampostería en voladizo [b]	$0.010h_{sx}$	$0.010h_{sx}$	$0.010h_{sx}$
Otras estructuras de muros de corte de mampostería	$0.007h_{sx}$	$0.007h_{sx}$	$0.007h_{sx}$
Todas las demás estructuras	$0.020h_{sx}$	$0.015h_{sx}$	$0.010h_{sx}$

h_{sx} es la altura del nivel bajo el nivel x.

Para sistemas de resistencia a la fuerza sísmica que solo comprenden los marcos a momento en las Categorías de Diseño Sísmico D, E y F, la deriva permitida de piso debe cumplir con los requisitos de la Sección 4.3 de la NSE 2-18.

[a] No habrá límite de deriva para estructuras de un solo nivel con paredes interiores, divisiones, techos y sistemas de paredes exteriores que hayan sido diseñadas para acomodar las derivas de nivel. No se renuncia a los requerimientos de separación de la estructura de la Sección 4.3 de la NSE 2-18.

[b] Estructuras en las que el sistema estructural básico consiste en muros de corte de mampostería diseñados como elementos verticales en voladizo desde su base o soporte de cimentación, contruidos de manera que la transferencia de momento entre las paredes de corte (acoplamiento) es despreciable.

Fuente: elaboración propia, realizado con Word.

Apéndice 3. **Cables de acero instalados en la estructura del caso de estudio**



Fuente: [Fotografía de Oscar Guevara]. [Villa Nueva, Guatemala, 2021]. Colección particular. Guatemala.

Anexo 2. **Simbología de red vial de mapa del departamento de Guatemala**

Red Vial Guatemala

SIGNOS CONVENCIONALES

CARRETERA ASFALTADA (4 CARRILES)		
CARRETERA PAVIMENTADA (4 CARRILES)	CARRETERAS CENTROAMERICANAS	
CARRETERA ASFALTADA (2 CARRILES)	CARRETERAS NACIONALES	
CARRETERA PAVIMENTADA (2 CARRILES)	CARRETERAS DEPARTAMENTALES	
CARRETERA DE TERRACERIA		
CAMINOS RURALES	CAMINOS RURALES	

CIUDAD CAPITAL PALACIO NACIONAL CABECERA DEPARTAMENTAL CABECERA MUNICIPAL ALDEA, CASERIO FINCA O HACIENDA	 <small>MINISTERIO DE COMUNICACIONES INFRAESTRUCTURA Y VIVIENDA</small>	DEPTO. DE INGENIERIA DE TRANSITO, DPE DIRECCION GENERAL DE CAMINOS
		FECHA ACTUALIZACIÓN ENERO 2012

NOTA: EL ORIGEN DE LA RED VIAL SE LOCALIZA EN UNA PLAQUETA COLOCADA FRENTE A LA ENTRADA PRINCIPAL DEL PALACIO NACIONAL DE LA CULTURA ESTACIÓN 0+000

FUENTE: INSTITUTO GEOGRÁFICO NACIONAL
 MAPA RED VIAL, EDICIÓN 2010
 RED VIAL DE GUATEMALA AÑO 2011
 INVENTARIO FÍSICO DE CARRETERAS, DGC.

Fuente: Caminos (2021). *Red vial del departamento de Guatemala.*

Anexo 3. **Catálogo de cables de acero de diámetros comerciales**

Catálogo de cables de acero		
Descripción	Diámetro	Cap. Máxima (Tonf)
6X19	1/4"	2.31
6X19	5/16"	3.57
6X19	3/8"	5.14
6X19	1/2"	9.12
6X19	5/8"	14.31
6X19	3/4"	20.64

Fuente: Vizcaya (1991). *Manual de cables de pesca.*

