

UNIVERSIDAD NACIONAL DE CHIMBORAZO



FACULTAD DE INGENIERÍA

ESCUELA DE INGENIERÍA CIVIL

Proyecto de Investigación previo a la obtención del título de Ingeniera Civil

TRABAJO DE TITULACIÓN

Título del proyecto:

DISEÑO DE UN AISLADOR DE BASE PARA ESTRUCTURAS CON UN COMPORTAMIENTO ELASTOPLÁSTICO: MODELO DINÁMICO Y SIMULACIÓN

Autora:

María Alejandra Mera Mosquera

Tutor:

PhD. Víctor J. García

Riobamba – Ecuador

Año 2018

REVISIÓN

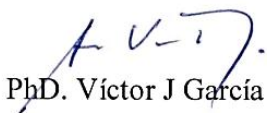
Los miembros del Tribunal de Graduación del proyecto de investigación de título: “DISEÑO DE UN AISLADOR DE BASE PARA ESTRUCTURAS CON UN COMPORTAMIENTO ELASTOPLÁSTICO: MODELO DINÁMICO Y SIMULACIÓN” presentado por **María Alejandra Mera Mosquera** dirigido por: PhD. Víctor J García. Una vez escuchada la defensa oral y revisado el informe final del proyecto de investigación con fines de graduación, una vez verificado el cumplimiento y seguimiento de las observaciones realizadas, remite el presente manuscrito para uso y custodia en la biblioteca de la Facultad de Ingeniería de la Universidad Nacional de Chimborazo.

Para constancia de lo expuesto firman:



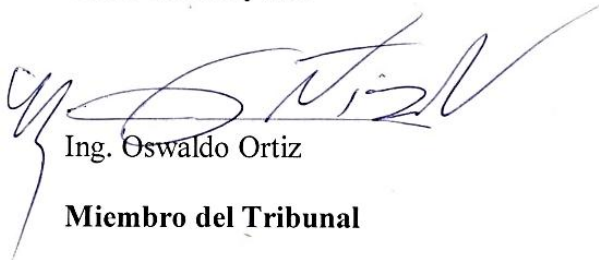
Ing. Diego Hidalgo

Miembro del Tribunal



PhD. Víctor J García

Tutor del Proyecto



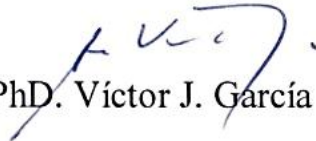
Ing. Oswaldo Ortiz

Miembro del Tribunal

CERTIFICACIÓN DEL TUTOR

Yo, Víctor Julio García, PhD, en calidad de Tutor del Trabajo Final de Titulación intitulado “DISEÑO DE UN AISLADOR DE BASE PARA ESTRUCTURAS CON UN COMPORTAMIENTO ELASTOPLÁSTICO: MODELO DINÁMICO Y SIMULACIÓN”, **CERTIFICO**; que el informe final del trabajo de investigación, ha sido revisado y corregido, razón por la cual autorizo a la señorita María Alejandra Mera Mosquera para que se presenten ante el tribunal de defensa respectivo y lleve a cabo la sustentación de su Tesis.

Atentamente,


PhD. Víctor J. García

Director del Proyecto

AUTORÍA DE LA INVESTIGACIÓN

La responsabilidad del contenido de este Proyecto de Graduación, corresponde exclusivamente a: María Alejandra Mera Mosquera, Víctor J García, PhD.; y el patrimonio intelectual de la misma a la Universidad Nacional de Chimborazo.



Srta. María Alejandra Mera Mosquera

C.I. 060535192-3

AGRADECIMIENTO

Estas letras intentan expresar la gran dicha y gratitud que siente mi alma al poder tener en mi vida seres tan llenos de luz como mi familia, amigos, docentes y seres queridos que han sabido alumbrar mi camino, construir mis cimientos y resistir junto a mí en todo momento, gracias a mi Universidad Nacional de Chimborazo, a donde vaya te llevaré siempre conmigo.

María Alejandra Mera Mosquera

DEDICATORIA

A los pilares de mi vida...

Mami por todo su amor, tiempo, paciencia completa entrega y fortaleza.

Papi por su cariño, motivación, ingenio y ejemplo de liderazgo.

Hermanas y hermanos por su amor y apoyo.

Vilmis por sus tiernas palabras amor infinito y entera confianza.

A mi tutor de tesis: Doc. García por sus enseñanzas y consejos, infinitas gracias.

A quienes de una y otra forma son parte de este logro: Alexis Merino, Danilo Cardona, David García, Andrés Salazar, compañeros de vida, amigos y futuros colegas mil gracias por todo.

María Alejandra Mera Mosquera

ÍNDICE

ÍNDICE DE FIGURAS.....	X
RESUMEN.....	XIII
ABSTRACT.....	XIV
1. INTRODUCCIÓN	1
2. OBJETIVOS.....	3
2.1 OBJETIVO GENERAL.....	3
2.2 OBJETIVO ESPECÍFICOS	3
3. MARCO TEÓRICO	4
3.1 SUELO.....	6
3.1.1 Sismo	6
3.1.2 Origen de los sismos	7
3.1.3 Ruido Blanco Gaussiano.....	8
3.1.4 Filtro de Kanai y Tajimi.....	9
3.1.5 Efecto de los sismos en las estructuras	12
3.2 ESTRUCTURA	12
3.2.1 Sistemas de un Grado de libertad (GDL).....	12
3.2.2 Rigidez.....	13
3.2.3 Coeficiente de amortiguamiento	13
3.2.4 Modelo histórico de Bouc-Wen	14
3.2.5 Linealización estocástica.....	17
3.2.6 Teorema de la estabilidad.....	19
3.3 AISLADORES DE BASE	19
3.3.1 Sistemas de control de vibraciones	19
3.3.2 TIPOS DE AISLADORES DE BASE.....	19

a)	Aislador de alto amortiguamiento (HDRB)	19
b)	Aislador con núcleo de plomo (LRB)	20
c)	Sistema de péndulo de fricción (FPS).....	21
3.3.3	Criterio de optimizacion	21
4.	METODOLOGÍA	23
5.	RESULTADOS Y DISCUSIÓN	25
5.1	ECUACIONES DINÁMICAS DEL SISTEMA CON ESTRUCTURA CON COMPORTAMIENTO HISTERÉTICO Y SIN AISLAMIENTO DE SU BASE (NO PROTEGIDO) “SISTEMA 1”	25
5.2	ECUACIONES DINÁMICAS DEL SISTEMA CON ESTRUCTURA CON COMPORTAMIENTO HISTERÉTICO Y SISTEMA DE AISLAMIENTO SIMPLE SIN COMPORTAMIENTO HISTERÉTICO “SISTEMA 2”	30
5.3	ECUACIONES DINÁMICAS DEL SISTEMA CON ESTRUCTURA SIN COMPORTAMIENTO HISTERÉTICO Y SISTEMA DE AISLAMIENTO MÚLTIPLE SIN COMPORTAMIENTO ELASTOPLÁSTICO “SISTEMA 3”	36
5.4	ECUACIONES DINÁMICAS DEL SISTEMA CON ESTRUCTURA SIN COMPORTAMIENTO HISTERÉTICO Y SISTEMA DE AISLAMIENTO MÚLTIPLE CON COMPORTAMIENTO ELASTOPLÁSTICO Y RIGIDEZ ADICIONAL “SISTEMA 4”	42
5.5	COMPORTAMIENTO DINÁMICO DE LOS SISTEMAS ANTE EVENTUALIDADES SÍSMICAS	47
5.5.1	Comportamiento dinámico de los sistemas 4 y 2 en función de la magnitud del PGA, g del movimiento sísmico.....	47
5.5.2	Eficacia del “Sistema 4” reduciendo los desplazamientos en la base de una estructura de hormigón y acero (sin ciclo de histéresis).	50
5.5.3	Desempeño del “Sistema 4” cuando su comportamiento es más lineal y menos elastoplástico.	51
5.5.4	Eficacia del “Sistema 4” reduciendo los desplazamientos de la base de una estructura en diferentes suelos.	51
5.5.5	Desempeño del “Sistema 4” en función de la relación de masa μ	52

5.5.6	Valores óptimos de los parámetros del sistema de aislamiento múltiple en función del suelo.	53
5.5.7	Rigidez del “Sistema 4” en función del PGA, g	54
5.6.	MODELO DE SIMULACIÓN DIDÁCTICO-DESCRIPTIVO	55
5.6.1	Constitución de la maqueta.	56
6.	CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES.....	58
6.1	CONCLUSIONES	58
6.2	RECOMENDACIÓN	59
7.	REFERENCIAS	60
8.	ANEXOS	63

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1: Representación gráfica de la densidad espectral de potencia del ruido blanco.	9
Figura 2: Representación gráfica del filtro de Kanai y Tajimi.	10
Figura 3: Espectro de aceleración del sismo del Centro 1940.....	12
Figura 4: Representación gráfica de un sistema estructural de un solo grado de libertad.	13
Figura 5: Representación gráfica del modelo de comportamiento elastoplástico de Bouc Wen	14
Figura 6: Representación gráfica del comportamiento histerético de un materia.	15
Figura 7: Comportamiento elastoplástico perfecto.....	17
Figura 8: Aislador elastómero de alto amortiguamiento	20
Figura 9: Aislador elastómero con núcleo de plomo.....	20
Figura 10: Sistema de péndulo de fricción (FPS) (a) Vista exterior. (b) Componentes internos. (c) Esquema de una sección transversal.....	21
Figura 11: Representación gráfica del “Sistema 1”.....	25
Figura 12: Comportamiento histerético adaptado para los sistemas	25
Figura 13: Cuerpo libre de la masa de la estructura en el “Sistema 1”.	27
Figura 14: Representación gráfica del “Sistema 2”.....	30
Figura 15: Cuerpo libre de la masa de la estructura en el “Sistema 2”.	31
Figura 16: Cuerpo libre de la masa del aislador en el “Sistema 2”.	33
Figura 17: Representación gráfica del “Sistema 3”.....	36
Figura 18: Cuerpo libre de la masa de la estructura en el “Sistema 3”.	36
Figura 19: Cuerpo libre de la masa del aislador en el sistema 3.	38
Figura 20: Representación gráfica del “Sistema 4”.....	42
Figura 21: Cuerpo libre de la masa de la estructura en el “Sistema 4”.	43
Figura 22: Cuerpo libre de la masa del aislador múltiple en el “Sistema 4”.....	44

Figura 23: Respuesta dinámica del Sistema 2 y 4 en función de la magnitud PGA,g . El material de las dos estructuras es acero: $\omega_s = 10 \text{ rad/s}$; $\xi_s = 0.02$; $\alpha = 0.5$; $\mu = 1$; Suelo Blando:

$\omega_f = 10.9 \text{ rad/s}$ y $\xi_f = 0.96$ 48

Figura 24. Respuesta dinámica del Sistema 3 y 4 en función de la magnitud PGA, g..... 49

Figura 25: Respuesta dinámica del Sistema 4 en función de la magnitud PGA,g y el materia... 50

Figura 26: Respuesta dinámica del Sistema 4 en función de la magnitud PGA y de la linealidad del comportamiento elastoplastico..... 51

Figura 27: Eficacia del “Sistema 4” en diferentes suelos..... 52

Figura 28: Eficacia del “Sistema 4” con diferentes relaciones de masa con la estructura aislada. 53

Figura 29: Frecuencia ω_b y coeficiente de amortiguamiento ξ_b del sistema de aislamiento múltiple con comportamiento elastoplástico y rigidez adicional en función del tipo de suelo. 54

Figura 30: Rigidez del “Sistema 4” de aislamiento múltiple con comportamiento elastoplástico, estructura sin comportamiento histerético y rigidez adicional en función del tipo de suelo. 55

Figura 31: Modelo didáctico-descriptivo que simula el funcionamiento de los aisladores de base. 56

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1: Valores de frecuencia (ω_f) y coeficiente de amortiguamiento (ξ_f) para tres tipos diferentes de suelo blando (B), medianamente rígido (MR) y rígido (R).....11

Tabla 2. Resumen de los sistemas estudiados.....24

INDICE DE ANEXOS

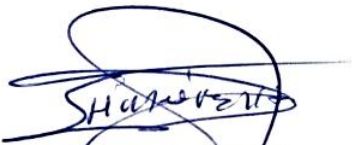
Anexo 1: Comparación de desplazamientos entre estructuras sin y con aislamiento	63
Anexo 2: Simulación del “Sistema 4” en Matlab®	64
Anexo 3: Tabla de datos que proporciona la plataforma Matlab α	65
Anexo 4: Determinación del máximo óptimo coeficiente de amortiguamiento del aislador α ...	65
Anexo 5: Motor de batidora de 12000 rpm fijada al soporte de la mesa vibratoria por una caja de madera pesada.....	66
Anexo 6: Mecanismo de conexión del motor a la mesa vibratoria	66
Anexo 7: Soporte de la mesa vibradora con carriles	67
Anexo 8: Estructura sin aislación de base	67
Anexo 9: Estructura con aislación de base	68
Anexo 10: Dispositivo de aislación de base	68
Anexo 11: Elemento que aporta rigidez adicional	69
Anexo 12: Modelo didáctico-descriptivo que simula el funcionamiento de los aisladores de base.	69
Anexo 13: Comportamiento dinámico de los sistemas 2 y 4	70
Anexo 14: Comportamiento dinámico de los sistemas 3 y 4	70
Anexo 15: Eficiencia del “Sistema 4” para estructuras de acero y hormigón.....	70
Anexo 16: Desempeño del “Sistema 4” con diferente α	71
Anexo 17: Desempeño del sistema 4 con diferente tipo de suelo	71
Anexo 18: Desempeño del “Sistema 4” con diferente relación de masas μ	71
Anexo 19: Valores paramétricos de R_2 entre relación de tipo de suelo y número de aisladores N	72
Anexo 20: Desempeño del “Sistema 4” para la relación rigidez βb - suelo	72

RESUMEN

Esta investigación plantea y analiza la eficacia de tres diferentes sistemas con aislación de base para reducir los desplazamientos de estructuras frente a un sistema sin aislación. Dichos sistemas aislados varían tanto en estructura como en tipo de aislador de tal manera que estos elementos (estructura y aislador) pueden o *no* considerar comportamiento elastoplástico en su análisis. Mediante el modelamiento matemático de cada sistema se pudo controlar su desempeño de acuerdo a factores como: tipo de suelo, material de la estructura y número de aisladores. Al comparar los tres sistemas podemos resaltar que el sistema Múltiple con N número de aisladores con comportamiento elastoplástico y rigidez adicional, ofrece un mayor porcentaje de optimización en general. Se sugiere como factores para un mejor comportamiento las estructuras de acero y suelo blando al ser menos rígidas.

ABSTRACT

This research proposes and analyzes the effectiveness of three different systems with basic isolation to reduce the displacements of structures in front of a system without isolation. These isolated systems vary both in structure and insulator in such a way that: these elements (structure and insulator) may or may not consider elastoplastic behavior in their analysis. Through the mathematical modeling of each system its performance could be controlled according to factors such as: type of soil, material of the structure, and number of insulators. When comparing the three systems we can highlight that the Multiple system with N insulators with elastoplastic behavior and additional stiffness, offers a greater percentage of optimization in general. Suggesting as factors for better behavior: steel structures and soft ground.



Reviewed by: López, Ligia

LINGUISTICS COMPETENCES TEACHER



1. INTRODUCCIÓN

Dos principios rectores de la Ingeniería Civil son la funcionalidad y la seguridad. Sin embargo el cumplir con los requerimientos de seguridad resulta complejo, principalmente debido a una serie de factores de origen natural que se escapan del control humano, como ocurre, por ejemplo, en regiones con alta actividad sísmica.

Ecuador es uno de los 20 países con mayor actividad sísmica del mundo y con frecuencia su territorio es afectado por movimientos telúricos. De hecho, el 16 de abril de 2016, la región norte-costera del país fue afectada por un terremoto de magnitud 7.8 Mw (el cuarto en magnitud a nivel mundial en el 2016. Este evento fue seguido por 3429 réplicas en los siguientes días, dejando un saldo de 671 muertos, 12 desaparecidos, 3.344 millones de dólares en daños materiales, además se registró 69.335 edificaciones afectadas (Aguiar & Mieles, 2016), de las cuales 22.015 necesitaron ser reconstruidas, siendo Manta y Portoviejo los cantones más afectados y generando una inestabilidad económica de todo el país (CNN, 2017).

En el grupo de países con gran actividad sísmica también se encuentran Nueva Zelanda, Japón, Chile y Estados Unidos. Sin embargo, en estos países se ha logrado reducir sustancialmente el riesgo al colapso de edificaciones al incorporar sistemas de control de vibraciones en las estructuras.

Una de las estrategias de diseño clasificada como sistema de control pasivo es el aislamiento de la base, el cual consiste en desacoplar la estructura de movimientos producidos por las acciones sísmicas en el suelo. Esto se logra incorporando elementos flexibles a desplazamientos horizontales y rígidos a desplazamientos verticales ubicados entre los cimientos y la

superestructura. Así, los aisladores de base amplían el período fundamental del conjunto estructural y limitan la energía que es transferida al sistema (Pinzón & Martínez, 2014).

En Ecuador se aplica, en el mejor de los casos, la filosofía sismo resistente que prescribe la Norma Ecuatoriana de la Construcción (NEC). Esta norma en el año 2008 fue desarrollada por el Ministerio de Desarrollo Urbano y Vivienda en cooperación con la Cámara de Construcción de Quito, en donde el principio básico es evitar el colapso de estructuras mediante la incorporación de rótulas plásticas que ayudan a controlar fallas dúctiles en elementos estructurales y contribuyen en la disipación de la energía sísmica. Estas fallas en la práctica no se pueden controlar completamente cuando ocurren movimientos sísmicos de gran magnitud, lo que compromete la estabilidad de edificaciones y la seguridad de sus ocupantes. Sin embargo, la implementación de dispositivos aisladores de base conlleva una gran ventaja dado que se reduce sustancialmente el daño de elementos estructurales, lográndose de esta manera que la estructura mantenga su funcionalidad aun después de un siniestro, lo que además de salvaguardar vidas representa un considerable beneficio frente al costo de su implementación.

La frontera de la investigación en dispositivos aisladores se orienta al desarrollo de aisladores de base adaptativos (Rico & Chio, 2012). El objetivo es que estos aisladores se adapten a estructuras con parámetros que varían o son inicialmente inciertos. Esta investigación se realiza con el propósito de modelar y estudiar el comportamiento dinámico de dispositivos aisladores de base cuando se adoptan diferentes variables de diseño, tales como: tipo de material, tipo de suelo y frecuencia de vibración de la estructura.

2. OBJETIVOS

2.1 Objetivo General

Diseñar un aislador de base para estructuras con/sin comportamiento elastoplástico.

2.2 Objetivo Específicos

1. Determinar las ecuaciones dinámicas del sistema estructura-aislador-suelo.
2. Simular el desempeño del sistema, mientras que se optimizan los parámetros del aislador en la medida que la estructura incursiona en el régimen elastoplástico.
3. Estudiar el desempeño del sistema ante diferentes propiedades dinámicas del suelo, así como diferente tipo de material.
4. Desarrollar un modelo didáctico-descriptivo que simule el funcionamiento de los aisladores de base.

3. MARCO TEÓRICO

El uso de dispositivos de aislamiento sísmico se remonta a varios años antes de Cristo. Los griegos colocaban capas de piedras pequeñas y planas sobre el suelo para absorber el primer choque del sismo y luego capas de piedras grandes, que formaban la cimentación de los muros. Los persas elevaron la mampostería sobre juntas delgadas de mortero a base de limos para aislarlas de la cimentación. Más recientemente, en el año 1969 se usaron bloques de goma (70 x 70 x 35 cm) para aislar la base del edificio de la Escuela Pestalozzi en Skopje, Yugoslavia. Sin embargo, dado que la rigidez horizontal y vertical de los bloques de goma era la misma (alta deformabilidad), y la capacidad de resistir cargas verticales era mínima, estos aisladores fueron remplazados en el año 2007 (Naeim & Kelly, 1999; Rosada, 2018).

Para incrementar la rigidez vertical, se desarrollaron en 1970 en Japón aisladores elastoméricos con acero (SREI). Estos consistían en capas de goma vulcanizadas e intercaladas con láminas de acero. Un mayor incremento en la rigidez vertical se logró cuando los aisladores tomaron la forma de capas intercaladas de goma y acero con un núcleo de plomo para disipar la energía “Lead rubber bearing (LRB)”. En 1978 y 1981 en Nueva Zelanda se usaron por primera vez LRB para aislar sísmicamente al viaducto Toe-Toe y al edificio Willian Clayton, respectivamente (Rosada, 2018). En los Estados Unidos de Norte América se comenzaron a usar estos dispositivos desde 1984.

Hoy en día existen diferentes tipos de aisladores de base, entre los más utilizados se encuentran los aisladores de base con un coeficiente de amortiguamiento alto (0.15 a 0.30) “Hight damping rubber bearing (HDRB)”. Estos dispositivos desacoplan la superestructura de la cimentación para reducir la respuesta dinámica de las edificaciones frente a excitaciones sísmicas y así reducir las aceleraciones en el interior de los edificios y reducir los daños considerablemente.

Este comportamiento se validó en el edificio del Hospital de la Universidad del Sur de California en la ciudad de Los Ángeles. La estructura de este edificio se encuentra apoyada en 68 aisladores de caucho-plomo y 81 aisladores elastoméricos. Luego del terremoto de Northridge de 1994, la aceleración máxima del suelo en la parte exterior del del edificio fue de 0,49 g, y las aceleraciones en el interior del edificio se registraron en el rango de 0,10 a 0,13 g (Pinzón & Martínez, 2014). Los países con gran experiencia en el uso de esta tecnología son: Japón, Nueva Zelanda, Estados Unidos y Chile (Pinzón & Martínez, 2014).

El proceso de diseño de un sistema de aislamiento en general se inicia con un diseño preliminar usando información aportada por los fabricantes de los aisladores. El propósito es estimar los valores máximos de los desplazamientos del sistema, así como de otras cantidades que se deben controlar (tales como la deformación debida al esfuerzo cortante) y también estimar la fuerza lateral máxima que experimenta la base de la estructura “structural base shear”, al igual que la estabilidad del aislador y la posibilidad de levantamientos. Una vez que se completa este proceso de diseño preliminar se solicitan muestras del aislador y se someterán a un programa de ensayos de verificación. Dependiendo de los resultados de los ensayos de verificación, puede ocurrir que el diseño preliminar necesite modificaciones. Para minimizar el número de iteraciones en el diseño, es esencial contar con datos precisos y buenos procedimientos de diseño en la fase de diseño preliminar.

El procedimiento de diseño se puede basar en la denominada teoría lineal presentada en detalle por (Kelly, 1996), aunque en la práctica los aisladores se modelan recurriendo al denominado “modelo bilineal” que se fundamenta en el valor que deben tener tres parámetros: la rigidez en el régimen elástico, la rigidez en el régimen post-fluencia y la fortaleza “strength” característica.

Una de las limitantes de los sistemas aisladores de base es la poca estabilidad que brindan a estructuras esbeltas, pues los momentos de volcamiento que se generan debido a los desplazamientos son elevados y generan pérdida de estabilidad, lo que además inducen efectos de segundo orden $P-\Delta$ no contemplados en sus condiciones de equilibrio (Pinzón & Martínez, 2014). Así, la frontera actual en el diseño de sistemas aisladores se encuentra en el desarrollo de sistemas aisladores adaptativos (El-Khoury & Adeli, 2013).

La principal ventaja que tiene el uso de sistemas aisladores de base, es que funciona como un filtro ante el movimiento del suelo, logrando concentrar la deformación en la interface aislador-estructura, lo que conduce a que la superestructura se comporte en la práctica como un bloque rígido. De esta manera, se logran transmitir esfuerzos cortantes de baja magnitud a la superestructura y se reducen daños en elementos estructurales y no estructurales (Pinzón & Martínez, 2014).

3.1 Suelo

3.1.1 Sismo

Un sismo es cualquier sacudida repentina de la corteza terrestre que se origina por el paso de las ondas sísmicas a través de ella (Bolt, 2018). Las ondas sísmicas son vibraciones generadas por terremotos, explosiones u otra fuente similar de energía que se propaga dentro de la tierra o a lo largo de su superficie. Las ondas sísmicas se producen cuando energía almacenada en la corteza terrestre se libera súbitamente, generalmente cuando las masas de roca que se tensan unas contra otras se fracturan repentinamente y se "deslizan".

Los sismos ocurren con mayor frecuencia a lo largo de las fallas geológicas. Las fallas geológicas son zonas estrechas donde las masas rocosas se mueven en relación unas con otras. Las

líneas de falla más importantes del mundo están ubicadas en los bordes de las enormes placas tectónicas que forman la corteza terrestre (Bolt, 2018).

3.1.2 Origen de los sismos

Los sismos más comunes, se originan por actividad en fallas geológicas. También pueden ocurrir por otras causas como, por ejemplo: fricción en el borde de placas tectónicas, procesos volcánicos, impactos de asteroides o cometas, o incluso pueden ser producidas por el ser humano (actividad antrópica) al realizar pruebas de detonaciones nucleares subterráneas o en la extracción del petróleo con nuevas tecnologías, entre otras.

En algunas partes del mundo como Alaska, California y el Mar del Norte, grandes plataformas de perforación petrolera provocan ondas sísmicas de gran amplitud. La explotación de reservas de petróleo bajo el Mar de Norte ha producido una gran preocupación por la eventualidad de terremotos en ese lugar, aunque la región se encuentra a una distancia considerable de los bordes activos de la placa euroasiática (Bolt, 2018).

El terremoto más devastador en China en tres décadas, se registró en el año 2008 en la región de Sichuan, fue provocado por la acumulación de agua en una represa de grandes dimensiones construida recientemente sobre una falla geológica (EFE, 2009).

En el 2011 en Oklahoma ocurrió un terremoto con una magnitud de 5.7 Mw (El de mayor magnitud registrado en la región durante décadas). En el 2016, El USGS (United States Geological Survey) concluyó que la causa principal del terremoto acaecido en Oklahoma en el 2011 fue la alta presión que se produjo en líneas de falla geológica debido a efectos acumulativos causados por la inyección en el subsuelo de aguas residuales a alta presión en la explotación petrolera (Keranen, Savage, Abers, & Cochran, 2013). También, el USGS informó que el centro y este de

los Estados Unidos de Norte América ha experimentado un aumento importante en la actividad sísmica, pasando de 24 eventualidades por año en 1973 a 318 en el 2009 y 1010 en el 2015. Los estudios realizados relacionan la exacerbación de la actividad sísmica en esta región con el incremento de la inyección de aguas a alta presión en pozos petroleros profundo (Petersen et al., 2016).

3.1.3 Ruido Blanco Gaussiano

Las acciones y respuestas dentro de la ingeniería sísmica tienen características estocásticas debido a la naturaleza aleatoria de las aceleraciones producidas por un evento sísmico. Un modelo frecuentemente utilizado para representar la aceleración sísmica y así lograr acelerogramas artificiales, es el que considera al sismo representado por un espectro de componentes espectrales de ruido blanco gaussiano filtrado (Sues, Wen y Ang, 1985). Así, la aceleración sísmica puede ser representada como un proceso de filtrado de un ruido blanco gaussiano ($W(t)$) realizado por las diferentes capas de la corteza terrestre. Un ruido blanco gaussiano es una señal aleatoria, cuya magnitud y fase en dos tiempos diferentes no guardan correlación estadística, además sus características principales es que el valor medio de su amplitud es cero y su desviación estándar constante (E. Duque, 2013; E Duque, Inaudi, & García, 2015).

La densidad espectral de potencia es un una función real positiva de una variable de frecuencia asociada con un proceso estocástico o una función determinística del tiempo que tiene unidades de potencia por Hz, que sirve para describir la manera en que el contenido de potencia de las señales y el ruido es afectado por filtros (Lugo, 2015), en la Figura 1 se ilustra la densidad espectral de potencia del ruido blanco.

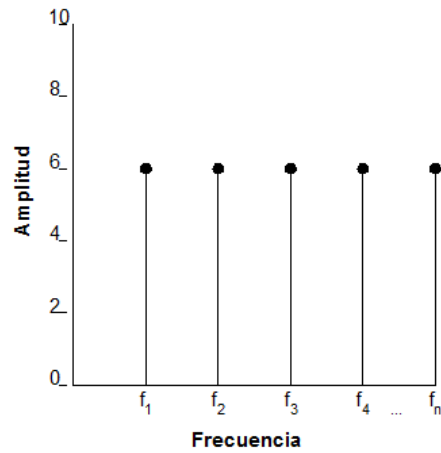


Figura 1: Representación gráfica de la densidad espectral de potencia del ruido blanco.
Elaborado por: María Alejandra Mera Mosquera

3.1.4 Filtro de Kanai y Tajimi

Kanai (1957) y Tajimi (1960) reportaron que un oscilador lineal de segundo orden, dado que una de sus componentes (ω_f) se encuentra elevada al cuadrado como se muestra en la Figura 2, se puede usar para considerar fenomenológicamente las características dinámicas del suelo por donde viajan las ondas sísmicas y así obtener valores representativos de aceleración sísmica en función de la densidad espectral de potencia (DEP) de un ruido blanco. El filtro se representa como se muestra en la ecuación (1).

$$\ddot{x}_f(t) + 2\xi_f\omega_f\dot{x}_f(t) + \omega_f^2x_f(t) = -\ddot{W}(t) = 2\pi S_0$$

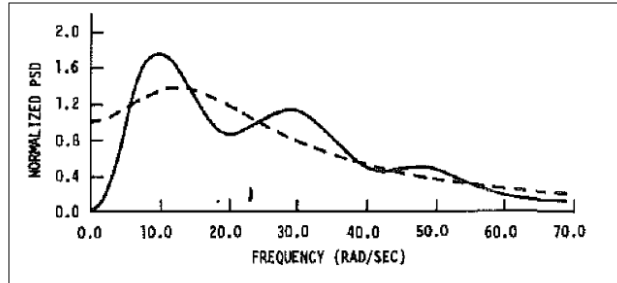
Donde:

$\ddot{x}_f(t), \dot{x}_f(t), x_f(t)$ = Aceleración, velocidad y desplazamiento del suelo

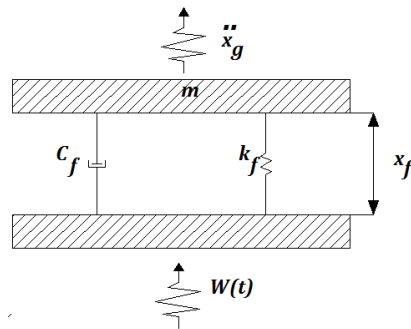
ξ_f = Coeficiente de amortiguamiento dominante del filtro.

ω_f = frecuencia principal del filtro.

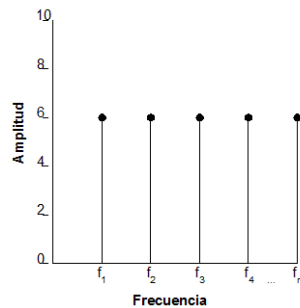
$\ddot{W}(t)$ = Aceleración absoluta en roca, que se asume que se puede modelar con una densidad espectral de potencia constante S_0 .



Power Spectral Density (PSD) de excitación de un ruido blanco.



Filtro de Kanai y Tajimi.



Densidad espectral de potencia del ruido blanco (DEP).

Figura 2: Representación gráfica del filtro de Kanai y Tajimi.

Elaborado por: María Alejandra Mera Mosquera

Valores reportados por (Sues et al., 1985) para la frecuencia y el coeficiente de amortiguamiento se muestran en la Tabla 1. Estos valores permiten reproducir espectros de frecuencia de acelerogramas, por medio de espectros de Fourier se lograron aceleraciones típicas

registrados en suelos blandos (B), medianamente rígidos (MR) y rígidos (R). Los valores que se muestran en la Tabla 1 fueron obtenidos al ajustar la densidad espectral de potencia de la aceleración en base a espectros empíricos que se lograron usando un ajuste de mínimos cuadrados. Los espectros empíricos resultaron del análisis de Fourier de un gran número de acelerogramas reales que se encuentran registrados (Sues et al., 1985).

Tabla 1: Valores de frecuencia (ω_f) y coeficiente de amortiguamiento (ξ_f) para tres tipos diferentes de suelo blando (B), medianamente rígido (MR) y rígido (R).

Suelo	Frecuencia, ω_f (rad/s)	Coefficiente de amortiguamiento, ξ_f (u.a)
Blando (B)	10.9	0.96
Medianamente rígido (MR)	16.5	0.80
Rígido (R)	16.9	0.95

Elaborado por: (Sues, Wen & Ang, 1985)

Algunos de los acelerogramas reales utilizados para dicha investigación fueron los que registraron en los sismos de la Tabla 2

Tabla 2: Valores reales y predichos por el modelo de (Sues, Wen & Ang, 1985) de aceleración espectral $\frac{cm}{s^2}$

Registro	Componente	Duración de movimiento fuerte(s)	Distancia al epicentro (km)	Magnitud (Mw)	Valor de aceleración Real-Predicha
El Centro 1940	SOOE S90W	24.92	11.5	6.7	65.8-66.5 55.1-50.88
Taft 1952	N21E S69E	17.20 14.16	41.1	7.7	40.2-44.84 46.2-49.03
El Centro 1934	SOOW S90W	13.02 15.78	66.3	6.5	46.8-43.80 46.8-46.54
Olympia 1949	NO4W N86E	19.12 16.12	16.9	7.1	46.5-45.42 61.5-61.5

Elaborado por: (Moayyad & Mohraz, 1982)

El terremoto del Centro se produjo en el Valle imperia- California ,se caracterizó como un típico evento destructivo de tamaño moderado con una firma de liberación de energía compleja, su espectro de aceleracion lo podemos visualizar en la Figura 3.

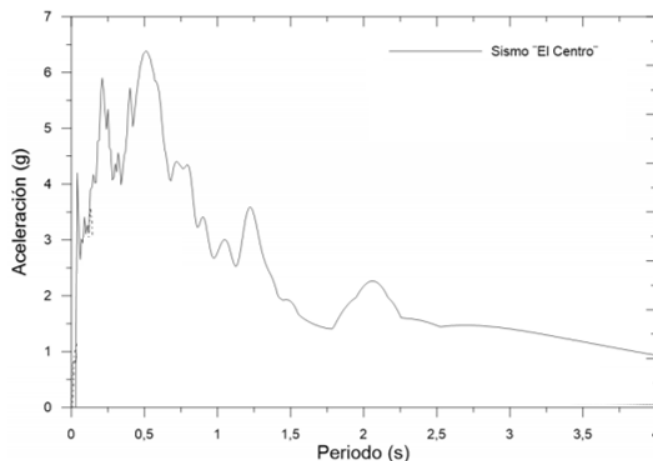


Figura 3: Espectro de aceleración del sismo del Centro 1940

Elaborado por : (Edwin Duque, 2017)

3.1.5 Efecto de los sismos en las estructuras

Los sismos introducen en las estructuras esfuerzos que se generan por el movimiento en la base. La respuesta dinámica de la estructura a estos esfuerzos puede comprometer la estabilidad de la estructura y provocar su colapso. La estabilidad de las estructuras durante un sismo se ve comprometida por tres efectos principales: cortante basal, volcamiento y torsión (Pinzón & Martínez, 2014).

3.2 Estructura

3.2.1 Sistemas de un Grado de libertad (GDL)

El número de grados de libertad se define como el número de desplazamientos independientes requeridos para definir las posiciones desplazadas de todas las masas en relación con su posición original (Chopra, 2014). Un sistema de un grado de libertad “single degree of freedom (SDF)” es una idealización de la estructura donde las propiedades inerciales de todos los elementos estructurales se concentran en tres aspectos: la masa de la estructura (m_s), en la rigidez

de la estructura (k_s) y un elemento que da cuenta del amortiguamiento viscoso de la estructura (c_s) (Figura 4).

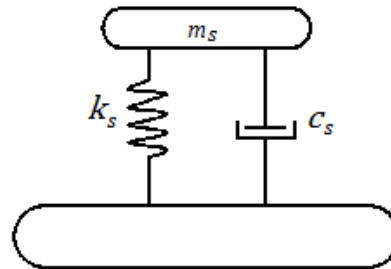


Figura 4: Representación gráfica de un sistema estructural de un solo grado de libertad.
Elaborado por: María Alejandra Mera Mosquera

3.2.2 Rigidez

La rigidez es una medida de la resistencia a las deformaciones elásticas de un material. La noción de rigidez conlleva la capacidad de un elemento estructural para soportar esfuerzos sin que ocurran deformaciones plásticas (permanentes). Normalmente la rigidez se calcula como la razón entre una fuerza aplicada (F) y la deformación (δ) ocurrida al aplicar esa fuerza ($k = F/\delta$).

3.2.3 Coeficiente de amortiguamiento

Es una medida de que tan rápido decrecerá amplitud en un sistema oscilante y de acuerdo a su variación puede decirse que:

1. Los sistemas con el coeficiente de amortiguamiento $\xi > 1$ se encuentran sobre amortiguados, dado que una vez perturbado, éste regresa al equilibrio sin exhibir oscilaciones.
2. Los sistemas con un coeficiente de amortiguación $\xi < 1$ se dicen que se encuentran subamortiguados, puesto que el sistema experimenta oscilación de magnitud decreciente antes de regresar al equilibrio.

3. Si el coeficiente de amortiguación es $\xi = 1$, el sistema esta críticamente amortiguado.
4. Y si el sistema es no amortiguado $\xi = 0$ la oscilación continua indefinidamente.

3.2.4 Modelo histórico de Bouc-Wen

El modelo de Bouc (1967) y generalizado por Wen (1976), se utiliza con frecuencia para describir sistemas histeréticos no lineales de un solo grado de libertad que se representa gráficamente en la Figura 4.

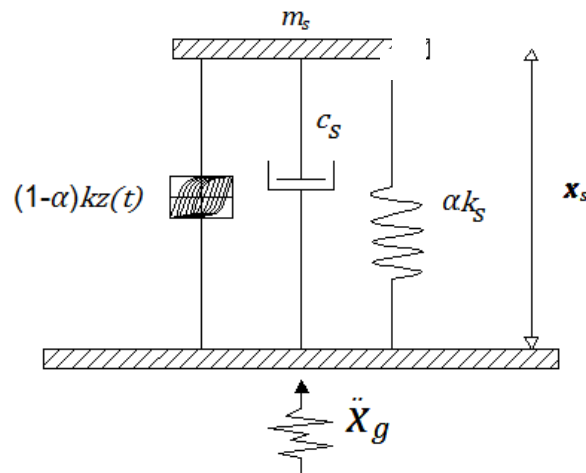


Figura 5: Representación gráfica del modelo de comportamiento elastoplástico de Bouc Wen
Elaborado por: María Alejandra Mera Mosquera

La histéresis es la tendencia de un material a conservar una de sus propiedades, en ausencia del estímulo que la ha generado, como se ilustra en la Figura 6.

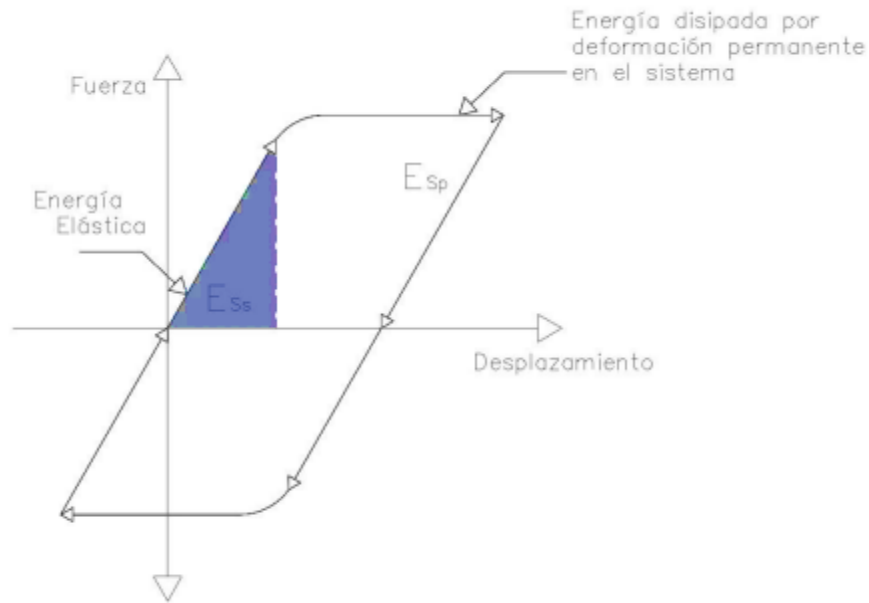


Figura 6: Representación gráfica del comportamiento histéresico de un materia.

Elaborado por: María Alejandra Mera Mosquera

Esencialmente, el modelo consiste en una ecuación diferencial no lineal que relaciona el desplazamiento de entrada con la fuerza restauradora de salida en forma de histéresis (Ismail, Ikhoulane, & Rodellar, 2009). Los parámetros del modelo son ajustados de forma tal que la respuesta del modelo se ajuste a la curva de histéresis real. Así, considerando un sistema de un grado de libertad la ecuación de movimiento se expresa:

$$m_s \ddot{x}_s(t) + C_s \dot{x}_s(t) + F(x_s, \dot{x}_s, t) = f(t) \quad (1)$$

Dónde:

m_s = Masa del sistema.

C_s = Coeficiente de amortiguamiento viscoso

$f(t)$ = Fuerza excitadora.

$x(t), \dot{x}(t), \ddot{x}(t)$ = Desplazamiento, velocidad y aceleración respectivamente.

$F(x_s, \dot{x}_s, t)$ = Fuerza restauradora

La fuerza restauradora se encuentra compuesta por una componente elástica y una histerética como se muestra en la ecuación (3).

$$F(x_s, \dot{x}_s, t) = F^{el}(t) + F^h(t) = \alpha k_i x_s(t) + (1 - \alpha) k_i z(t) \quad (2)$$

El ciclo de histéresis se representa mediante la ecuación diferencial de la variable de estado $z(t)$:

$$\dot{z}(t) = A \dot{x}_s - \beta |\dot{x}_s(t)| |z(t)|^{n-1} z(t) - \gamma \dot{x}_s(t) |z(t)|^n \quad (3)$$

Donde $A, \beta, \gamma, n, \alpha$ representan constantes adimensionales que definen la forma del lazo de histéresis. Así:

A = Amplitud del ciclo de histéresis.

β = Disipación de energía por ciclo. Cuando $\beta = 0$ no existe disipación de energía (no existe histéresis).

n = Transición entre el estado elástico al plástico. Si $n \rightarrow \infty$ ocurre un endurecimiento (*hardening*) ($\beta = 0; \gamma > 0$), mientras que un ablandamiento (*softening*) ocurre cuando ($\beta = 0; \gamma < 0$). El comportamiento de un sistema elastoplástico se logra cuando ocurre un ablandamiento y $n \rightarrow \infty$.

α = Controla la parte histerética de la ecuación proporcionando linealidad al sistema, cuando $\alpha \rightarrow 1$ lineal, cuando $\alpha \rightarrow 0$ no lineal.

(E Duque et al., 2015) sugirieron los siguientes valores para los parámetros adimensionales de la ecuación del modelo histerético de Bouc Wen,

$$A = 1; n = 1; \beta = \gamma$$

Con estos valores el comportamiento del sistema se aproximara a un estado elastoplástico perfecto, lo que quiere decir que el sistema incursiona tanto en el rango elástico linealmente con una pendiente positiva y rango plástico linealmente con una pendiente nula, como lo explica la Figura 7.

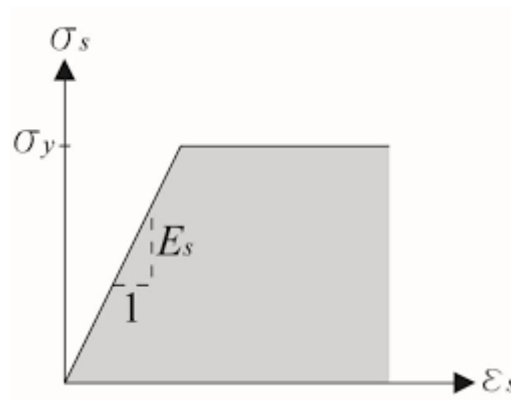


Figura 7: Comportamiento elastoplástico perfecto.

Elaborado por: María Alejandra Mera Mosquera

3.2.5 Linealización estocástica

El modelo de Bouc- Wen (MBW) está definido por una ecuación diferencial no lineal de segundo grado. Para aumentar la eficiencia computacional, esta ecuación se aproxima mediante una ecuación diferencial lineal equivalente. Para realizar la linealización se propuso una ecuación de la forma (Baber & Wen, 1979):

$$\dot{z} = S_{eq}x_s + C_{eq}\dot{x}_s + K_{eq}z \quad (4)$$

Dónde:

z = variable de estado

Este método consiste en encontrar los parámetros óptimos que permitan reducir el error entre la función no lineal original y la lineal propuesta. De manera que:

$$\dot{z}(t) = A\dot{x}_s - \xi|\dot{x}_s(t)||z(t)|^{n-1}z(t) - \gamma\dot{x}_s(t)|z(t)|^n = S_{eq}x_s + C_{eq}\dot{x}_s + K_{eq}z \quad (1)$$

Esto se logra minimizando el cuadrado del error, tal como se expresa en la siguiente ecuación:

$$\varepsilon^2 = \left[\left(A\dot{x}_s - \xi|\dot{x}_s(t)||z(t)|^{n-1}z(t) - \gamma\dot{x}_s(t)|z(t)|^n \right) - \left(S_{eq}x_s + C_{eq}\dot{x}_s + K_{eq}z \right) \right]^2 \quad (2)$$

Los parámetros que definen el valor mínimo del cuadrado del error medio son:

$$S_{eq} = 0 \quad (8)$$

$$C_{eq} = 1 - \sqrt{\frac{2}{\pi}} \xi \left(\frac{\gamma_{\dot{x}_s z}}{\sigma_{\dot{x}_s}} + \sigma_z \right) \quad (9)$$

$$K_{eq} = -\sqrt{\frac{2}{\pi}} \xi \left(\sigma_{\dot{x}_s} + \frac{\gamma_{\dot{x}_s z}}{\sigma_z} \right) \quad (10)$$

Dónde: σ_z representa la desviación estándar del desplazamiento histerético, $\sigma_{\dot{x}_s}$ la desviación estándar de la velocidad estructural y $\gamma_{\dot{x}_s z}$ la covarianza cruzada del desplazamiento histerético y velocidad estructural.

3.2.6 Teorema de la estabilidad

En general, la estabilidad interna describe las propiedades de convergencia de las trayectorias cercanas a estados de equilibrio del sistema. Para sistemas lineales, existe solo un estado de equilibrio que es el origen.

La respuesta del sistema lineal equivalente se puede resolver por medio de la utilización de la ecuación de Lyapunov.

$$[\dot{x}] = [\mathbf{A}][x(t)] + [\mathbf{B}][f(t)]$$

Dónde:

A= Matriz obtenida de la formulación en el espacio de estado

B= Vector de ceros, excepto en la fila que representa el proceso de entrada del ruido blanco del modelo.

3.3 Aisladores de base

3.3.1 Sistemas de control de vibraciones

La norma ISO 3010 International Standard “*Basic for desing of structures – Seismic action on structures*” clasifica los sistemas de control de acuerdo a su mecanismo de funcionamiento en: pasivos, activos, semiactivos e híbridos. Los sistemas de control pasivo incluyen dispositivos de disipación de energía, efecto de masa adicional y aislamiento sísmico (Calderón Correa, 2017).

3.3.2 Tipos de aisladores de base

a) Aislador de alto amortiguamiento (HDRB)

Este tipo de aisladores consisten en cojinetes de neopreno zunchado con placas de acero intercalado que permiten obtener una rigidez vertical de hasta 500 veces la rigidez horizontal sin

perder amortiguamiento en el sistema de aislación. Además su factor de amortiguación efectiva tiene valores que varían entre el 10% y 20% del amortiguamiento crítico $\xi_{critico}$ como se muestra en la Figura 8.

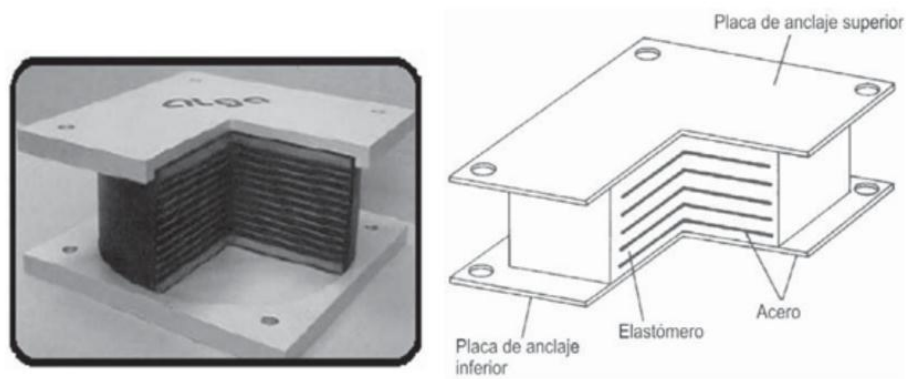


Figura 8: Aislador elastómero de alto amortiguamiento

Elaborado por: (Rico & Chio, 2012)

b) Aislador con núcleo de plomo (LRB)

Estos dispositivos son desarrollados a partir de los aisladores (HDRB), con la incorporación de un núcleo de plomo que aporta a una mayor rigidez inicial al sistema y una mayor capacidad de disipación de energía además brindan una mejor capacidad de restauración luego de ocurrido el evento sísmico, ya que su núcleo de plomo se recristaliza y brinda nuevamente las propiedades iniciales así se muestra en la Figura 9 (Rico & Chio, 2012)

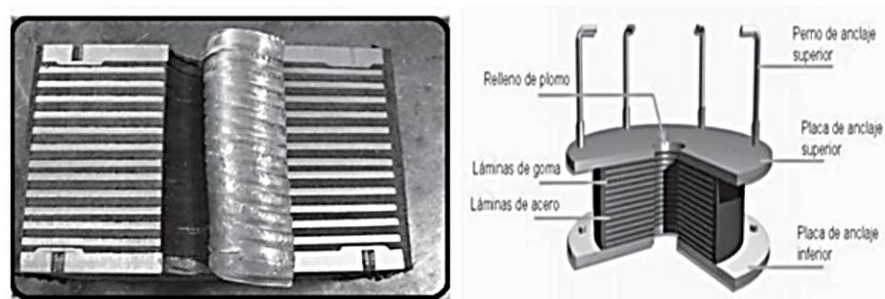


Figura 9: Aislador elastómero con núcleo de plomo

Fuente: (Rico & Chio, 2012)

c) Sistema de péndulo de fricción (FPS)

Este dispositivo se encuentra conformado por un deslizador articulado sobre una superficie cóncava de acero inoxidable que utiliza la fuerza impuesta y la transforma en fuerza restauradora generando que el sistema vuelva a su origen de equilibrio, el radio de curvatura de la concavidad será el responsable de controlar la rigidez efectiva y el período de oxidación del aislador lo que podemos apreciar en la Figura 10.

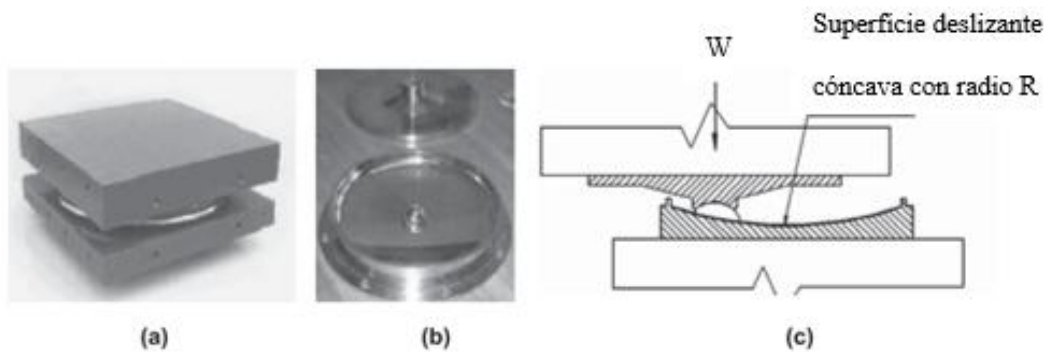


Figura 10: Sistema de péndulo de fricción (FPS) (a) Vista exterior. (b) Componentes internos. (c) Esquema de una sección transversal

Elaborado por : (Rico & Chio, 2012)

3.3.3 Criterio de optimización

El criterio de optimización que se usará en esta investigación consiste en sustraer a la unidad el cociente que se obtiene de dividir la desviación estándar del desplazamiento de la estructura de base aislada (σ_{x_s}) entre la desviación estándar del desplazamiento de la estructura de base *no* aislada (σ_{x_0}) (ecuación (11)), como se observa en el Anexo 1, tomando en cuenta que:

$$\text{Eficiencia del aislador de base } OF, \% = \left(1 - \frac{\sigma_{x_s}}{\sigma_{x_0}}\right) \times 100 \quad (11)$$

En la medida que $OF, \%$ se aproxime a uno, menor será el eficiencia del sistema de aislamiento reduciendo la magnitud de las vibraciones. Si $OF, \%$ es menor que cero, los

desplazamientos en la base del sistema aislado son mayores que los desplazamientos en la base del sistema *no* protegido, como se ilustra en el Anexo 15.

4. METODOLOGÍA

La metodología seguida en esta investigación se desglosa a continuación:

1. Determinación de las ecuaciones dinámicas de los sistemas a estudiar. Modelando:
 1. La excitación sísmica de la base con el filtro de Kanai-Tajimi (FKT),
 2. La estructura como un sistema de un solo grado de libertad
 - Con comportamiento elastoplástico usando el modelo de Bouc-Wen (E-CEP).
 - Sin un comportamiento histerético (E-SCH).
 3. El sistema de aislamiento con diferentes configuraciones:
 - Simple sin comportamiento elastoplástico (S-SCEP).
 - Múltiple con N aisladores con comportamiento elastoplástico (N-CCEP).
 - Múltiple con N aisladores con comportamiento elastoplástico y rigidez adicional (N-CCEPR)

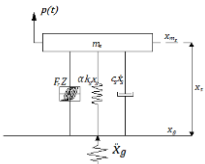
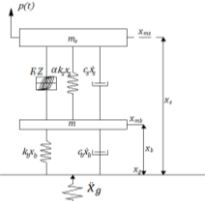
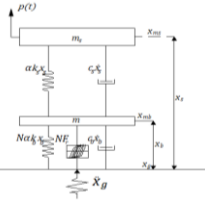
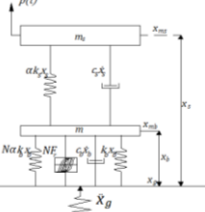
Un resumen de los sistemas modelados se muestra en la Tabla 3.

2. Estudio del comportamiento de los sistemas propuestos mediante la simulación en la plataforma de Matlab® como se muestra en el Anexo 2 y 3. Esto implicó estudiar el comportamiento dinámico de los sistemas en función de la magnitud del PGA, g del movimiento sísmico simulado, así como del material de la estructura (hormigón (H) o acero (A)), al igual que de las propiedades dinámicas del suelo (blando (B), medianamente rígido (MR), rígido (R)). Todo esto se realizó determinando el valor máximo óptimo de amortiguamiento del aislador como indica el Anexo 4 y en la medida que se optimizaron los valores del sistema lineal equivalente que da cuenta del comportamiento histerético en la

estructura (o en el sistema de aislamiento) y se logra el máximo valor de la función de optimización (máxima reducción de los desplazamientos de la estructura en relación a los desplazamientos en la base del sistema *no*-aislado, ecuación (11)).

3. Elaboración de un modelo didáctico descriptivo que simula el funcionamiento de los aisladores de base. Esto, mediante la implementación de una mesa vibratoria que es movida por un motor y que sostiene dos estructuras, una sin protección (sin aislamiento) y otra con aislación de base.

Tabla 3. Resumen de los sistemas estudiados.

Sistema	Excitación sísmica de la base	Sistema aislador de base	Estructura	Protegido	
1	FKT	—	E-CEP	No	
2	FKT	S-SCEP	E-CEP	Sí	
3	FKT	N-CCEP	E-SCH	Sí	
4	FKT	N-CCEPR	E-SCH	Sí	

FKT, filtro de Kanai-Tajimi; E-CEP, estructura con comportamiento elastoplástico; E-SCH, estructura sin comportamiento histérico; S-SCEP, sistema de aislamiento simple sin comportamiento elastoplástico; N-CCEP, sistema de aislamiento múltiple con comportamiento elastoplástico; N-CCEPR, sistema de aislamiento múltiple con N aisladores con comportamiento elastoplástico y rigidez adicional.

Elaborado por: María Alejandra Mera Mosquera.

5. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

5.1 Ecuaciones dinámicas del sistema con estructura con comportamiento histerético y sin aislamiento de su base (no protegido) “Sistema 1”

En el “Sistema 1”, la excitación sísmica de la base se modela con el filtro de Kanai-Tajimi y la estructura se representa como un sistema de un solo grado de libertad que exhibe un comportamiento elastoplástico. El sistema 1 se representa gráficamente en la Figura 11. En esta figura: m_s representa la masa de la estructura; k_s la rigidez de la estructura y c_s el amortiguamiento viscoso que exhibe la estructura. El comportamiento elastoplástico se representa con el modelo de Bouc-Wen.

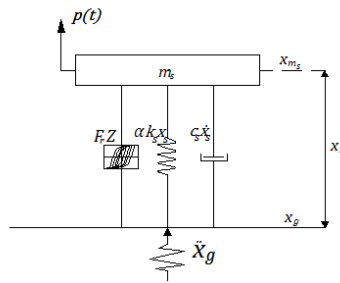


Figura 11: Representación gráfica del “Sistema 1”.
Elaborado por: María Alejandra Mera Mosquera

El ciclo histerético adoptado en todos los sistemas se basa en un comportamiento elastoplástico perfecto idealizado como se muestra en la Figura 12.

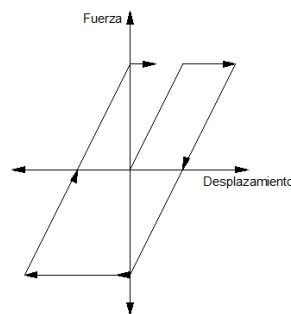


Figura 12: Comportamiento histerético adaptado para los sistemas

Elaborado por: María Alejandra Mera Mosquera

Para encontrar las ecuaciones dinámicas se consideran el conjunto de fuerzas que actúan sobre la estructura dependiendo del movimiento relativo que estas originan. Para esto, es conveniente considerar que:

$$x_s = x_{ms} - x_g \rightarrow x_{ms} = x_s + x_g \quad (12)$$

También, es conveniente tener presente las siguientes definiciones:

- Rigidez de la estructura k_s :

$$k_s = m_s \omega_s^2 \quad (13)$$

- Coeficiente de amortiguamiento de la estructura ξ_s :

$$\xi_s = \frac{c_s}{2m_s \omega_s} \rightarrow c_s = 2\xi_s m_s \omega_s \quad (14)$$

En las ecuaciones (13) y (14): ω_s representa la frecuencia de vibración y ξ_s el coeficiente de amortiguamiento viscoso de la estructura.

La excitación sísmica se representa mediante el filtro de Kanai-Tajimi en concordancia con la siguiente ecuación:

$$\ddot{x}_g = -2\xi_f \omega_f \dot{x}_f - \omega_f^2 x_f \quad (15)$$

Dónde:

x_f = Desplazamiento relativo del filtro

En concordancia con el principio de D'Alembert, la fuerza $m_s \ddot{x}_{m_s}$ tiene sentido opuesto al movimiento, como se muestra en la Figura 13.

$$\sum F = m_s \ddot{x}_{m_s} \quad (16)$$

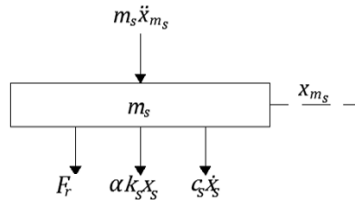


Figura 13: Cuerpo libre de la masa de la estructura en el “Sistema 1”.
Elaborado por: María Alejandra Mera Mosquera

$$m_s \ddot{x}_{m_s} + F_r + \alpha k_s x_s + c_s \dot{x}_s = 0$$

$$F_r = (1 - \alpha) k_s z$$

$$m_s \ddot{x}_{m_s} + (1 - \alpha) k_s z + \alpha k_s x_s + c_s \dot{x}_s = 0$$

$$m_s \ddot{x}_{m_s} = -(1 - \alpha) k_s z - \alpha k_s x_s - c_s \dot{x}_s \quad (17)$$

La ecuación (17) la podemos describir en función del movimiento relativo (ecuación (10)). Así,

$$m_s (\ddot{x}_s + \ddot{x}_g) = -(1 - \alpha) k_s z - \alpha k_s x_s - c_s \dot{x}_s \quad (18)$$

Recorganizando los términos en la ecuación (17), tenemos:

$$\frac{m_s}{m_s} (\ddot{x}_s + \ddot{x}_g) = -(1 - \alpha) \frac{k_s}{m_s} z - \alpha \frac{k_s}{m_s} x_s - \frac{c_s}{m_s} \dot{x}_s \quad (19)$$

Considerando que:

$$\frac{k_s}{m_s} = \omega_s^2 \quad (20)$$

$$\frac{c_s}{m_s} = 2\xi_s \omega_s \quad (21)$$

Podemos describir la ecuación (19) y obtenemos:

$$\ddot{x}_s = -(1-\alpha)\omega_s^2 z - \alpha\omega_s^2 x_s - 2\xi_s \omega_s \dot{x}_s - \ddot{x}_g \quad (22)$$

Remplazando la ecuación (15) en la ecuación (22), logramos:

$$\ddot{x}_s = -\alpha\omega_s^2 x_s + \omega_f^2 x_f - (1-\alpha)\omega_s^2 z - 2\xi_s \omega_s \dot{x}_s + 2\xi_f \omega_f \dot{x}_f \quad (23)$$

Resumiendo las ecuaciones dinámicas del “Sistema 1” con estructura con comportamiento histerético y sin aislamiento en la base (sin protección) son:

$$\begin{aligned} \dot{x}_s &= \dot{x}_s \\ \dot{x}_f &= \dot{x}_f \\ \dot{z} &= K_{eq} z + C_{eq} \dot{x}_s \\ \ddot{x}_s &= -\alpha\omega_s^2 x_s + \omega_f^2 x_f - (1-\alpha)\omega_s^2 z - 2\xi_s \omega_s \dot{x}_s + 2\xi_f \omega_f \dot{x}_f \\ \ddot{x}_f &= -\omega_f^2 x_f - 2\xi_f \omega_f \dot{x}_f \end{aligned} \quad (24)$$

Para resolver el sistema lineal equivalente (mediante linealización estocástica), este conjunto de ecuaciones se formulan en el espacio de estado del modelo linealizado como se representa en la ecuación (24).

$$\dot{\mathbf{X}} = \mathbf{A}\mathbf{X} + \mathbf{B}W \quad (25)$$

$$\dot{\mathbf{X}} = [\dot{x}_s \quad \dot{x}_f \quad \dot{z} \quad \ddot{x}_s \quad \ddot{x}_f]^T \quad (26)$$

$$\mathbf{X} = [x_s \quad x_f \quad z \quad \dot{x}_s \quad \dot{x}_f]^T \quad (27)$$

$$\mathbf{B} = [0 \quad 0 \quad 0 \quad 0 \quad 1]^T \quad (28)$$

$$W = 2\pi S_0; S_0 = \left(\frac{9}{4}\right) \frac{\xi_f (\text{PGA})^2}{\omega_f (1 + 4\xi_f^2)} \quad (29)$$

Dónde:

W = Intensidad del ruido blanco

$$\mathbf{A} = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & K_{eq} & C_{eq} & 0 \\ -\alpha\omega_s^2 & \omega_f^2 & -(1-\alpha)\omega_s^2 & -2\xi_s\omega_s & 2\xi_f\omega_f \\ 0 & -\omega_f^2 & 0 & 0 & -2\xi_f\omega_f \end{bmatrix} \quad (30)$$

5.2 Ecuaciones dinámicas del sistema con estructura con comportamiento histerético y sistema de aislamiento simple sin comportamiento histerético “Sistema 2”

El “Sistema 2” se ilustra en la Figura 14. En esta figura, la masa de la base se expresa como $m_b = m_s + m$, La rigidez de la base como k_b y el coeficiente de amortiguamiento viscoso de la base como c_b .

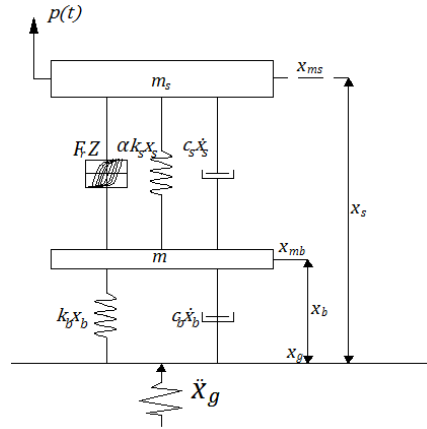


Figura 14: Representación gráfica del “Sistema 2”.
Elaborado por: María Alejandra Mera Mosquera

Para encontrar las ecuaciones dinámicas se consideran el conjunto de fuerzas que actúan sobre la estructura dependiendo del movimiento relativo que estas originan. Para esto, es conveniente considerar que:

$$x_s = x_{ms} - x_g \rightarrow x_{ms} = x_s + x_g \quad (31)$$

$$x_b = x_{mb} - x_g \rightarrow x_{mb} = x_b + x_g \quad (32)$$

$$m_b = m_s + m \quad (33)$$

$$\frac{m_s}{m_b} = \mu \quad (34)$$

La excitación sísmica se representa mediante el filtro de Kanai-Tajimi en concordancia con la siguiente ecuación:

$$\ddot{x}_g = -2\xi_f \omega_f \dot{x}_f - \omega_f^2 x_f. \quad (35)$$

En concordancia con el principio de D'Alembert, la fuerza $m_s \ddot{x}_{m_s}$ tiene sentido opuesto al movimiento, como se muestra en la Figura 15.

$$\sum F = m_s \ddot{x}_{m_s} \quad (36)$$

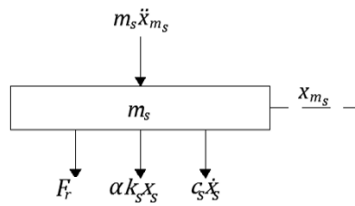


Figura 15: Cuerpo libre de la masa de la estructura en el “Sistema 2”.
Elaborado por: María Alejandra Mera Mosquera

$$m_s \ddot{x}_{m_s} + F_r + \alpha k_s (x_s - x_b) + c_s (\dot{x}_s - \dot{x}_b) = 0$$

$$m_s \ddot{x}_{m_s} + (1-\alpha)k_s z + \alpha k_s (x_s - x_b) + c_s (\dot{x}_s - \dot{x}_b) = 0$$

$$m_s \ddot{x}_{m_s} = -(1-\alpha)k_s z - \alpha k_s (x_s - x_b) - c_s (\dot{x}_s - \dot{x}_b) \quad (37)$$

La ecuación (37) la podemos describir en función del movimiento relativo (ecuación (31) y (32).

Así,

$$m_s (\ddot{x}_s + \ddot{x}_g) = -(1-\alpha)k_s z - \alpha k_s (x_s - x_b) - c_s (\dot{x}_s - \dot{x}_b) \quad (38)$$

Reorganizando términos en la ecuación (38), obtenemos:

$$\frac{m_s}{m_s}(\ddot{x}_s + \ddot{x}_g) = -(1-\alpha)\frac{k_s}{m_s}z - \alpha\frac{k_s}{m_s}(x_s - x_b) - \frac{c_s}{m_s}(\dot{x}_s - \dot{x}_b) \quad (39)$$

Considerando las ecuaciones (20) y (21), logramos:

$$\begin{aligned} (\ddot{x}_s + \ddot{x}_g) &= -(1-\alpha)\omega_s^2 z - \alpha\omega_s^2(x_s - x_b) - 2\xi_s\omega_s(\dot{x}_s - \dot{x}_b) \\ \ddot{x}_s &= -(1-\alpha)\omega_s^2 z - \alpha\omega_s^2(x_s - x_b) - 2\xi_s\omega_s(\dot{x}_s - \dot{x}_b) - \ddot{x}_g \end{aligned} \quad (3)$$

Remplazando la ecuación (15) en la ecuación (40), logramos:

$$\begin{aligned} \ddot{x}_s &= -(1-\alpha)\omega_s^2 z - \alpha\omega_s^2(x_s - x_b) - 2\xi_s\omega_s(\dot{x}_s - \dot{x}_b) + 2\xi_f\omega_f\dot{x}_f + \omega_f^2 x_f \\ \ddot{x}_s &= -(1-\alpha)\omega_s^2 z - \alpha\omega_s^2 x_s + \alpha\omega_s^2 x_b - 2\xi_s\omega_s\dot{x}_s + 2\xi_s\omega_s\dot{x}_b + 2\xi_f\omega_f\dot{x}_f + \omega_f^2 x_f \\ \ddot{x}_s &= \alpha\omega_s^2 x_b - \alpha\omega_s^2 x_s + \omega_f^2 x_f - (1-\alpha)\omega_s^2 z + 2\xi_s\omega_s\dot{x}_b - 2\xi_s\omega_s\dot{x}_s + 2\xi_f\omega_f\dot{x}_f \end{aligned} \quad (4)$$

Para obtener la aceleración del aislador \ddot{x}_b consideramos la fuerza en la Figura 12, el movimiento relativo especificado por la ecuación (32) y el siguiente conjunto de definiciones:

$$\frac{k_b}{m_b} = \frac{m_b\omega_b^2}{m_b} = \omega_b^2 \quad (5)$$

$$\frac{c_b}{m_b} = \frac{2m_b\xi_b\omega_b}{m_b} = 2\xi_b\omega_b \quad (6)$$

$$\frac{k_s}{m_b} = \frac{m_s\omega_s^2}{m_b} = \mu\omega_s^2 \quad (7)$$

$$\frac{c_s}{m_b} = \frac{2m_s\xi_s\omega_s}{m_b} = 2\mu\xi_s\omega_s \quad (8)$$

En concordancia con el principio de D'Alembert, la fuerza $m_b \ddot{x}_{mb}$ tiene sentido opuesto al movimiento, como se muestra en la Figura 16.

$$\sum F = m_b \ddot{x}_{mb} \quad (9)$$

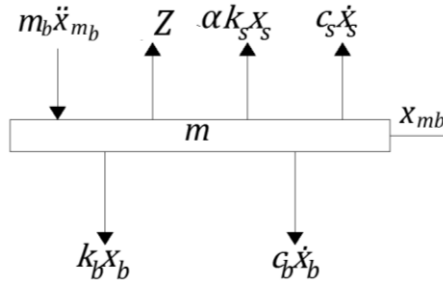


Figura 16: Cuerpo libre de la masa del aislador en el “Sistema 2”.

Elaborado por: María Alejandra Mera Mosquera.

$$m_b \ddot{x}_{mb} - F_r - \alpha k_s (x_s - x_b) - c_s (\dot{x}_s - \dot{x}_b) + k_b x_b + c_b \dot{x}_b = 0$$

$$m_b \ddot{x}_{mb} - (1 - \alpha) k_s z - \alpha k_s (x_s - x_b) - c_s (\dot{x}_s - \dot{x}_b) + k_b x_b + c_b \dot{x}_b = 0$$

$$m_b \ddot{x}_{mb} = (1 - \alpha) k_s z + \alpha k_s (x_s - x_b) + c_s (\dot{x}_s - \dot{x}_b) - k_b x_b - c_b \dot{x}_b \quad (10)$$

La ecuación (47) la podemos describir en función del movimiento relativo (ecuación (32)). Así,

$$m_b (\ddot{x}_b + \ddot{x}_g) = (1 - \alpha) k_s z + \alpha k_s (x_s - x_b) + c_s (\dot{x}_s - \dot{x}_b) - k_b x_b - c_b \dot{x}_b \quad (11)$$

Reorganizando términos en la ecuación (48), obtenemos:

$$\frac{m_b}{m_b} (\ddot{x}_b + \ddot{x}_g) = (1 - \alpha) \frac{k_s}{m_b} z + \alpha \frac{k_s}{m_b} (x_s - x_b) + \frac{c_s}{m_b} (\dot{x}_s - \dot{x}_b) - \frac{k_b}{m_b} x_b - \frac{c_b}{m_b} \dot{x}_b \quad (12)$$

Considerando las ecuaciones (42) a la (45), logramos:

$$(\ddot{x}_b + \ddot{x}_g) = (1 - \alpha) \mu \omega_s^2 z + \alpha \mu \omega_s^2 (x_s - x_b) + 2 \mu \xi_s \omega_s (\dot{x}_s - \dot{x}_b) - \omega_b^2 x_b - 2 \xi_b \omega_b \dot{x}_b$$

$$\ddot{x}_b = (1-\alpha)\mu\omega_s^2 z + \alpha\mu\omega_s^2(x_s - x_b) + 2\mu\xi_s\omega_s(\dot{x}_s - \dot{x}_b) - \omega_b^2 x_b - 2\xi_b\omega_b\dot{x}_b - \ddot{x}_g \quad (50)$$

Remplazando la ecuación (15) en la ecuación (50), obtenemos:

$$\begin{aligned} \ddot{x}_b &= (1-\alpha)\mu\omega_s^2 z + \alpha\mu\omega_s^2(x_s - x_b) + 2\mu\xi_s\omega_s(\dot{x}_s - \dot{x}_b) \\ &\quad - \omega_b^2 x_b - 2\xi_b\omega_b\dot{x}_b + 2\xi_f\omega_f\dot{x}_f + \omega_f^2 x_f \\ \ddot{x}_b &= (1-\alpha)\mu\omega_s^2 z + \alpha\mu\omega_s^2 x_s - \alpha\mu\omega_s^2 x_b + 2\mu\xi_s\omega_s\dot{x}_s - 2\mu\xi_s\omega_s\dot{x}_b \\ &\quad - \omega_b^2 x_b - 2\xi_b\omega_b\dot{x}_b + 2\xi_f\omega_f\dot{x}_f + \omega_f^2 x_f \\ \ddot{x}_b &= -x_b(\alpha\mu\omega_s^2 + \omega_b^2) + \alpha\mu\omega_s^2 x_s + \omega_f^2 x_f + (1-\alpha)\mu\omega_s^2 z \\ &\quad - \dot{x}_b(2\xi_b\omega_b + 2\mu\xi_s\omega_s) + 2\mu\xi_s\omega_s\dot{x}_s + 2\xi_f\omega_f\dot{x}_f \end{aligned} \quad (51)$$

Resumiendo, las ecuaciones dinámicas del “Sistema 2” con estructura con comportamiento histerético y sistema de aislamiento simple sin comportamiento elastoplástico, son:

$$\begin{aligned} \dot{x}_s &= \dot{x}_s \\ \dot{x}_f &= \dot{x}_f \\ \dot{z} &= K_{eq}z + C_{eq}\dot{x}_s \\ \ddot{x}_b &= -x_b(\alpha\mu\omega_s^2 + \omega_b^2) + \alpha\mu\omega_s^2 x_s + \omega_f^2 x_f + (1-\alpha)\mu\omega_s^2 z \\ &\quad - \dot{x}_b(2\xi_b\omega_b + 2\mu\xi_s\omega_s) + 2\mu\xi_s\omega_s\dot{x}_s + 2\xi_f\omega_f\dot{x}_f \\ \ddot{x}_s &= \alpha\omega_s^2 x_b - \alpha\omega_s^2 x_s + \omega_f^2 x_f - (1-\alpha)\omega_s^2 z \\ &\quad + 2\xi_s\omega_s\dot{x}_b - 2\xi_s\omega_s\dot{x}_s + 2\xi_f\omega_f\dot{x}_f \\ \ddot{x}_f &= -\omega_f^2 x_f - 2\xi_f\omega_f\dot{x}_f \end{aligned} \quad (52)$$

Para resolver el sistema lineal equivalente (mediante linealización estocástica), este conjunto de ecuaciones se formulan en el espacio de estado del modelo linealizado como se representa en la ecuación (52).

$$\dot{\mathbf{X}} = \mathbf{A}\mathbf{X} + \mathbf{B}\mathbf{W} \quad (53)$$

$$\dot{\mathbf{X}} = \begin{bmatrix} \dot{x}_b & \dot{x}_s & \dot{x}_f & \dot{z} & \ddot{x}_b & \ddot{x}_s & \ddot{x}_f \end{bmatrix}^T \quad (54)$$

$$\mathbf{X} = \begin{bmatrix} x_b & x_s & x_f & z & \dot{x}_b & \dot{x}_s & \dot{x}_f \end{bmatrix}^T \quad (55)$$

$$\mathbf{B} = [0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 1]^T \quad (56)$$

$$W = 2\pi S_0; S_0 = \left(\frac{9}{4}\right) \frac{\xi_f (\text{PGA})^2}{\omega_f (1 + 4\xi_f^2)} \quad (57)$$

$$\mathbf{A} = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & 0 & K_{eq} & 0 & C_{eq} & 0 \\ -(\alpha\mu\omega_s^2 + \omega_b^2) & \alpha\mu\omega_s^2 & \omega_f^2 & (1-\alpha)\mu\omega_s^2 & -(2\xi_b\omega_b + 2\mu\xi_s\omega_s) & 2\mu\xi_s\omega_s & 2\xi_f\omega_f \\ \alpha\omega_s^2 & -\alpha\omega_s^2 & \omega_f^2 & -(1-\alpha)\omega_s^2 & 2\xi_s\omega_s & -2\xi_s\omega_s & 2\xi_f\omega_f \\ 0 & 0 & -\omega_f^2 & 0 & 0 & 0 & -2\xi_f\omega_f \end{bmatrix} \quad (58)$$

5.3 Ecuaciones dinámicas del sistema con estructura sin comportamiento histerético y sistema de aislamiento múltiple sin comportamiento elastoplástico “Sistema 3”

El “Sistema 3” se representa en la Figura 17. Al igual como en los casos anteriores, para encontrar las ecuaciones dinámicas se consideran el conjunto de fuerzas que actúan sobre la estructura dependiendo del movimiento relativo que estas originan (ecuaciones (31) y (32)). Continúan siendo válidas las ecuaciones (33), (34), (42), (43), (44) y (45).

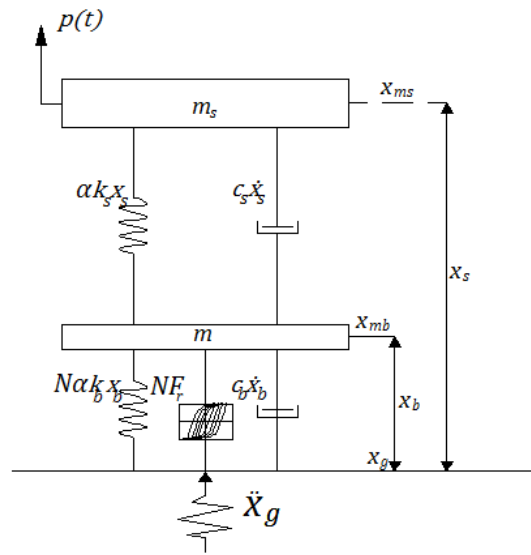


Figura 17: Representación gráfica del “Sistema 3”.
Elaborado por: María Alejandra Mera Mosquera

En concordancia con el principio de D’Alembert, la fuerza $m_b \ddot{x}_{m_b}$ tiene sentido opuesto al movimiento, como se muestra en la Figura 18.

$$\sum F = m_s \ddot{x}_{m_s} \quad (59)$$

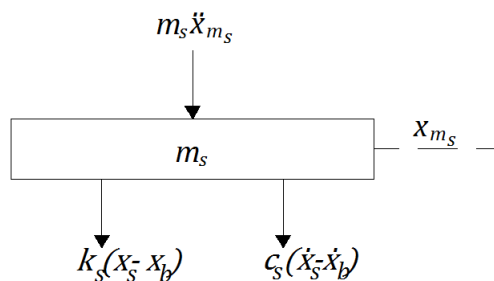


Figura 18: Cuerpo libre de la masa de la estructura en el “Sistema 3”.
Elaborado por: María Alejandra Mera Mosquera

$$m_s \ddot{x}_{ms} + k_s (x_s - x_b) + c_s (\dot{x}_s - \dot{x}_b) = 0$$

$$m_s \ddot{x}_{ms} = -k_s (x_s - x_b) - c_s (\dot{x}_s - \dot{x}_b) \quad (60)$$

La ecuación (60) la podemos describir en función del movimiento relativo (ecuación (31)).

Así,

$$m_s (\ddot{x}_s + \ddot{x}_g) = -k_s (x_s - x_b) - c_s (\dot{x}_s - \dot{x}_b) \quad (61)$$

Reorganizando términos en la ecuación (61), obtenemos:

$$\frac{m_s}{m_s} (\ddot{x}_s + \ddot{x}_g) = -\frac{k_s}{m_s} (x_s - x_b) - \frac{c_s}{m_s} (\dot{x}_s - \dot{x}_b) \quad (62)$$

Considerando las ecuaciones (20) y (21), logramos:

$$\begin{aligned} (\ddot{x}_s + \ddot{x}_g) &= -\omega_s^2 (x_s - x_b) - 2\xi_s \omega_s (\dot{x}_s - \dot{x}_b) \\ \ddot{x}_s &= -\omega_s^2 (x_s - x_b) - 2\xi_s \omega_s (\dot{x}_s - \dot{x}_b) - \ddot{x}_g \end{aligned} \quad (63)$$

Remplazando la ecuación (15) en la ecuación (63), logramos:

$$\begin{aligned} \ddot{x}_s &= -\omega_s^2 (x_s - x_b) - 2\xi_s \omega_s (\dot{x}_s - \dot{x}_b) + 2\xi_f \omega_f \dot{x}_f + \omega_f^2 x_f \\ \ddot{x}_s &= +\omega_s^2 x_b - \omega_s^2 x_s + \omega_f^2 x_f - 0z + 2\xi_s \omega_s \dot{x}_b - 2\xi_s \omega_s \dot{x}_s + 2\xi_f \omega_f \dot{x}_f \end{aligned} \quad (65)$$

Para obtener la aceleración del aislador \ddot{x}_b consideramos las fuerzas en la Figura 15, el movimiento relativo especificado por la ecuación (32) y las ecuaciones (42) a la (45).

En concordancia con el principio de D'Alembert, la fuerza $m_b \ddot{x}_{mb}$ tiene sentido opuesto al movimiento, como se muestra en la Figura 19.

$$\sum F = m_b \ddot{x}_{mb} \quad (66)$$

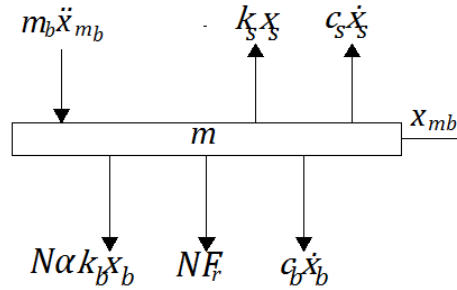


Figura 19: Cuerpo libre de la masa del aislador en el sistema 3.
Elaborado por: María Alejandra Mera Mosquera

$$m_b \ddot{x}_{mb} - k_s (x_s - x_b) - c_s (\dot{x}_s - \dot{x}_b) + N \alpha k_b x_b + c_b x_b + N F_r = 0$$

$$m_b \ddot{x}_{mb} - k_s (x_s - x_b) - c_s (\dot{x}_s - \dot{x}_b) + N \alpha k_b x_b + c_b x_b + N(1 - \alpha) k_b z = 0$$

$$m_b \ddot{x}_{mb} = +k_s (x_s - x_b) + c_s (\dot{x}_s - \dot{x}_b) - N \alpha k_b x_b - c_b x_b - N(1 - \alpha) k_b z \quad (67)$$

Dónde:

N = Número de aisladores de base

La ecuación (67) la podemos describir en función del movimiento relativo (ecuación (32)). Así,

$$m_b (\ddot{x}_b + \ddot{x}_g) = k_s (x_s - x_b) + c_s (\dot{x}_s - \dot{x}_b) - N \alpha k_b x_b - c_b \dot{x}_b - N(1 - \alpha) k_b z \quad (68)$$

Reorganizando términos en la ecuación (68), obtenemos:

$$\frac{m_b}{m_b}(\ddot{x}_b + \ddot{x}_g) = \frac{k_s}{m_b}(x_s - x_b) + \frac{c_s}{m_b}(\dot{x}_s - \dot{x}_b) - N\alpha \frac{k_b}{m_b}x_b - \frac{c_b}{m_b}\dot{x}_b - N(1-\alpha)\frac{k_b}{m_b}z$$

(69)

Considerando las ecuaciones (42) a la (45), logramos:

$$(\ddot{x}_b + \ddot{x}_g) = \mu\omega_s^2(x_s - x_b) + 2\mu\omega\xi_{ss}(\dot{x}_s - \dot{x}_b) - N\alpha\omega_b^2x_b - 2\xi_b\omega_b\dot{x}_b - N(1-\alpha)\omega_b^2z$$

$$\ddot{x}_b = \mu\omega_s^2(x_s - x_b) + 2\mu\xi_s\omega_s(\dot{x}_s - \dot{x}_b) - N\alpha\omega_b^2x_b - 2\xi_b\omega_b\dot{x}_b - N(1-\alpha)\omega_b^2z - \ddot{x}_g$$

(70)

Remplazando la ecuación (15) en la ecuación (70), obtenemos:

$$\ddot{x}_b = \mu\omega_s^2(x_s - x_b) + 2\mu\xi_s\omega_s(\dot{x}_s - \dot{x}_b) - N\alpha\omega_b^2x_b - 2\xi_b\omega_b\dot{x}_b$$

$$- N(1-\alpha)\omega_b^2z + 2\xi_f\omega_f\dot{x}_f + \omega_f^2x_f$$

$$\ddot{x}_b = -(\mu\omega_s^2 + N\alpha\omega_b^2)x_b + \mu\omega_s^2x_s + \omega_f^2x_f - N(1-\alpha)\omega_b^2z$$

$$- (2\mu\xi_s\omega_s + 2\xi_b\omega_b)\dot{x}_b + 2\mu\xi_s\omega_s\dot{x}_s + 2\xi_f\omega_f\dot{x}_f$$

(71)

Resumiendo, las ecuaciones dinámicas del “Sistema 3” con estructura sin comportamiento hysterético y sistema de aislamiento múltiple con comportamiento elastoplástico y rigidez adicional.

$$\begin{aligned}
\dot{x}_s &= \dot{x}_s \\
\dot{x}_f &= \dot{x}_f \\
\dot{z} &= K_{eq}z + C_{eq}\dot{x}_b \\
\ddot{x}_b &= -(\mu\omega_s^2 + N\alpha\omega_b^2)x_b + \mu\omega_s^2x_s + \omega_f^2x_f - N(1-\alpha)\omega_b^2z \\
&\quad - (2\mu\xi_s\omega_s + 2\xi_b\omega_b)\dot{x}_b + 2\mu\xi_s\omega_s\dot{x}_s + 2\xi_f\omega_f\dot{x}_f \\
\ddot{x}_s &= +\omega_s^2x_b - \omega_s^2x_s + \omega_f^2x_f + 2\xi_s\omega_s\dot{x}_b - 2\xi_s\omega_s\dot{x}_s + 2\xi_f\omega_f\dot{x}_f \\
\ddot{x}_f &= -\omega_f^2x_f - 2\xi_f\omega_f\dot{x}_f
\end{aligned} \tag{72}$$

Para resolver el sistema lineal equivalente (mediante linealización estocástica), este conjunto de ecuaciones se formulan en el espacio de estado del modelo linealizado como se representa en la ecuación (72).

$$\dot{\mathbf{X}} = \mathbf{A}\mathbf{X} + \mathbf{B}W \tag{73}$$

$$\dot{\mathbf{X}} = \begin{bmatrix} \dot{x}_b & \dot{x}_s & \dot{x}_f & \dot{z} & \ddot{x}_b & \ddot{x}_s & \ddot{x}_f \end{bmatrix}^T \tag{74}$$

$$\mathbf{X} = \begin{bmatrix} x_b & x_s & x_f & z & \dot{x}_b & \dot{x}_s & \dot{x}_f \end{bmatrix}^T \tag{75}$$

$$\mathbf{B} = [0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 1]^T \tag{76}$$

$$W = 2\pi S_0; S_0 = \left(\frac{9}{4}\right) \frac{\xi_f (\text{PGA})^2}{\omega_f (1 + 4\xi_f^2)} \tag{77}$$

$$A = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & 0 & K_{eq} & C_{eq} & 0 & 0 \\ -(N\alpha\omega_b^2 + \mu\omega_s^2) & \mu\omega_s^2 & \omega_f^2 & -N(1-\alpha)\omega_b^2 & -(2\xi_b\omega_b + 2\mu\xi_s\omega_s) & 2\mu\xi_s\omega_s & 2\xi_f\omega_f \\ \omega_s^2 & -\omega_s^2 & \omega_f^2 & 0 & 2\xi_s\omega_s & -2\xi_s\omega_s & 2\xi_f\omega_f \\ 0 & 0 & -\omega_f^2 & 0 & 0 & 0 & -2\xi_f\omega_f \end{bmatrix}$$

(78)

5.4 Ecuaciones dinámicas del sistema con estructura sin comportamiento histerético y sistema de aislamiento múltiple con comportamiento elastoplástico y rigidez adicional “Sistema 4”.

El “Sistema 4” se representa en la Figura 20. Al igual como en los casos anteriores, para encontrar las ecuaciones dinámicas se consideran el conjunto de fuerzas que actúan sobre la estructura dependiendo del movimiento relativo que estas originan (ecuaciones (22) y (32)). Continúan siendo válidas las ecuaciones (33), (34), (42), (43), (44) y (45). Para dotar de un comportamiento elastoplástico al aislador se incluye la ecuación del modelo histórico de Bouc-Wen y se añade la variable N que indica el número de aisladores.

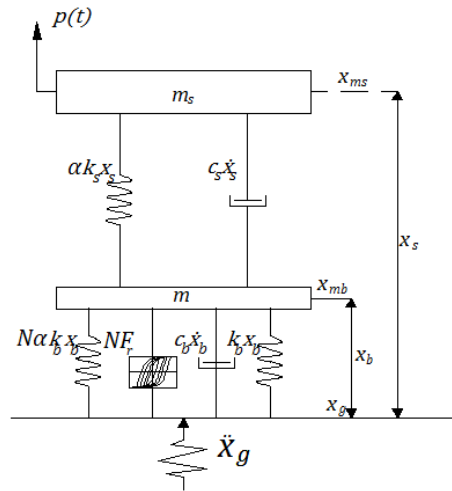


Figura 20: Representación gráfica del “Sistema 4”
Elaborado por: María Alejandra Mera Mosquera

En concordancia con el principio de D’Alembert, la fuerza $m_b \ddot{x}_{m_b}$ tiene sentido opuesto al movimiento, como se muestra en la Figura 21.

$$\sum F = m_s \ddot{x}_{m_s} \tag{79}$$

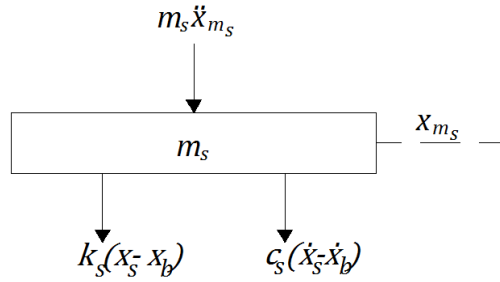


Figura 21: Cuerpo libre de la masa de la estructura en el “Sistema 4”.
Elaborado por: María Alejandra Mera Mosquera

$$m_s \ddot{x}_{m_s} + k_s(x_s - x_b) + c_s(\dot{x}_s - \dot{x}_b) = 0$$

$$m_s \ddot{x}_{m_s} + k_s(x_s - x_b) + c_s(\dot{x}_s - \dot{x}_b) = 0$$

$$m_s \ddot{x}_{m_s} = -k_s(x_s - x_b) - c_s(\dot{x}_s - \dot{x}_b) \quad (80)$$

La ecuación (80) la podemos describir en función del movimiento relativo (ecuación (31) y (32).

Así,

$$m_s(\ddot{x}_s + \ddot{x}_g) = -k_s(x_s - x_b) - c_s(\dot{x}_s - \dot{x}_b) \quad (81)$$

Reorganizando términos en la ecuación (81), obtenemos:

$$\frac{m_s}{m_s}(\ddot{x}_s + \ddot{x}_g) = -\frac{k_s}{m_s}(x_s - x_b) - \frac{c_s}{m_s}(\dot{x}_s - \dot{x}_b) \quad (82)$$

Considerando las ecuaciones (20) y (21), logramos:

$$(\ddot{x}_s + \ddot{x}_g) = -\omega_s^2(x_s - x_b) - 2\xi_s\omega_s(\dot{x}_s - \dot{x}_b)$$

$$\ddot{x}_s = -\omega_s^2(x_s - x_b) - 2\xi_s\omega_s(\dot{x}_s - \dot{x}_b) - \ddot{x}_g \quad (83)$$

Remplazando la ecuación (15) en la ecuación (83), logramos:

$$\ddot{x}_s = -\omega_s^2(x_s - x_b) - 2\xi_s \omega_s(\dot{x}_s - \dot{x}_b) + 2\xi_f \omega_f \dot{x}_f + \omega_f^2 x_f$$

$$\ddot{x}_s = +\omega_s^2 x_b - \omega_s^2 x_s + \omega_f^2 x_f - 0z + 2\xi_s \omega_s \dot{x}_b - 2\xi_s \omega_s \dot{x}_s + 2\xi_f \omega_f \dot{x}_f \quad (84)$$

Para obtener la aceleración del aislador \ddot{x}_b consideramos las fuerzas en la Figura 18, el movimiento relativo especificado por la ecuación (32) y las ecuaciones (42) a la (45).

En concordancia con el principio de D'Alembert, la fuerza $m_b \ddot{x}_{m_b}$ tiene sentido opuesto al movimiento, como se muestra en la Figura 22.

$$\sum F = m_b \ddot{x}_{m_b} \quad (85)$$

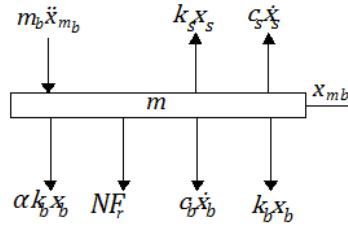


Figura 22: Cuerpo libre de la masa del aislador múltiple en el “Sistema 4”.
Elaborado por: María Alejandra Mera Mosquera

$$m_b \ddot{x}_{mb} - k_s(x_s - x_b) - c_s(\dot{x}_s - \dot{x}_b) + N\alpha k_b x_b + N F_r + c_b x_b + k_b x_b = 0$$

$$m_b \ddot{x}_{mb} - k_s(x_s - x_b) - c_s(\dot{x}_s - \dot{x}_b) + N\alpha k_b x_b + N(1-\alpha)k_b z + c_b x_b + k_b x_b = 0$$

$$m_b \ddot{x}_{mb} = +k_s(x_s - x_b) + c_s(\dot{x}_s - \dot{x}_b) - k_b x_b - N\alpha k_b x_b - c_b x_b - N(1-\alpha)k_b z \quad (86)$$

La ecuación (86) la podemos describir en función del movimiento relativo (ecuación (32)). Así,

$$m_b(\ddot{x}_b + \ddot{x}_g) = k_s(x_s - x_b) + c_s(\dot{x}_s - \dot{x}_b) - k_b x_b - N\alpha k_b x_b - c_b \dot{x}_b - N(1-\alpha)k_b z \quad (87)$$

Reorganizando términos en la ecuación (87), obtenemos:

$$\begin{aligned} \frac{m_b}{m_b}(\ddot{x}_b + \ddot{x}_g) &= \frac{k_s}{m_b}(x_s - x_b) + \frac{c_s}{m_b}(\dot{x}_s - \dot{x}_b) - \frac{k_b}{m_b}x_b \\ &\quad - N\alpha \frac{k_b}{m_b}x_b - c_b \dot{x}_b - N(1-\alpha) \frac{k_b}{m_b}z \end{aligned} \quad (88)$$

Considerando las ecuaciones (42) a la (45), logramos:

$$\begin{aligned} (\ddot{x}_b + \ddot{x}_g) &= \mu\omega_s^2(x_s - x_b) + 2\mu\xi_s\omega_s(\dot{x}_s - \dot{x}_b) - \omega_b^2 x_b \\ &\quad - 2\xi_b\omega_b\dot{x}_b - N\alpha\omega_b^2 x_b - N(1-\alpha)\omega_b^2 z \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \ddot{x}_b &= \mu\omega_s^2(x_s - x_b) + 2\mu\xi_s\omega_s(\dot{x}_s - \dot{x}_b) - \omega_b^2 x_b \\ &\quad - 2\xi_b\omega_b\dot{x}_b - N\alpha\omega_b^2 x_b - N(1-\alpha)\omega_b^2 z - \ddot{x}_g \end{aligned} \quad (89)$$

Remplazando la ecuación (15) en la ecuación (89), obtenemos:

$$\begin{aligned} \ddot{x}_b &= \mu\omega_s^2(x_s - x_b) + 2\mu\xi_s\omega_s(\dot{x}_s - \dot{x}_b) - \omega_b^2 x_b - 2\xi_b\omega_b\dot{x}_b \\ &\quad - N\alpha\omega_b^2 x_b - N(1-\alpha)\omega_b^2 z - \ddot{x}_g + 2\xi_f\omega_f\dot{x}_f + \omega_f^2 x_f \end{aligned} \quad (90)$$

$$\begin{aligned} \ddot{x}_b &= -(\mu\omega_s^2 + N\alpha\omega_b^2 + \omega_b^2)x_b + \mu\omega_s^2 x_s + \omega_f^2 x_f - N(1-\alpha)\omega_b^2 z \\ &\quad - (2\mu\xi_s\omega_s + 2\xi_b\omega_b)\dot{x}_b + 2\xi_s\omega_s\dot{x}_s + 2\xi_f\omega_f\dot{x}_f \end{aligned} \quad (91)$$

Resumiendo, las ecuaciones dinámicas del “Sistema 4” con estructura sin comportamiento hysterético y sistema múltiple de aislamiento con comportamiento elastoplástico y rigidez adicional son:

$$\begin{aligned}
\dot{x}_s &= \dot{x}_s \\
\dot{x}_f &= \dot{x}_f \\
\dot{z} &= K_{eq}z + C_{eq}\dot{x}_b \\
\ddot{x}_b &= -(\mu\omega_s^2 + N\alpha\omega_b^2 + \omega_b^2)x_b + \mu\omega_s^2x_s + \omega_f^2x_f - N(1-\alpha)\omega_b^2z \\
&\quad - (2\mu\xi_s\omega_s + 2\xi_b\omega_b)\dot{x}_b + 2\mu\xi_s\omega_s\dot{x}_s + 2\xi_f\omega_f\dot{x}_f \\
\ddot{x}_s &= +\omega_s^2x_b - \omega_s^2x_s + \omega_f^2x_f + 2\xi_s\omega_s\dot{x}_b - 2\xi_s\omega_s\dot{x}_s + 2\xi_f\omega_f\dot{x}_f \\
\ddot{x}_f &= -\omega_f^2x_b - 2\xi_f\omega_f\dot{x}_f
\end{aligned} \tag{92}$$

Para resolver el sistema lineal equivalente (mediante linealización estocástica), este conjunto de ecuaciones se formulan en el espacio de estado del modelo linealizado como se representa en la ecuación (92).

$$\dot{\mathbf{X}} = \mathbf{A}\mathbf{X} + \mathbf{B}W \tag{93}$$

$$\dot{\mathbf{X}} = \begin{bmatrix} \dot{x}_b & \dot{x}_s & \dot{x}_f & \dot{z} & \ddot{x}_b & \ddot{x}_s & \ddot{x}_f \end{bmatrix}^T \tag{94}$$

$$\mathbf{X} = \begin{bmatrix} x_b & x_s & x_f & z & \dot{x}_b & \dot{x}_s & \dot{x}_f \end{bmatrix}^T \tag{95}$$

$$\mathbf{B} = [0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 1]^T \tag{96}$$

$$W = 2\pi S_0; S_0 = \left(\frac{9}{4}\right) \frac{\xi_f (\text{PGA})^2}{\omega_f (1 + 4\xi_f^2)} \tag{97}$$

$$\mathbf{A} = \begin{bmatrix}
0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \\
0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 \\
0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \\
0 & 0 & 0 & K_{eq} & C_{eq} & 0 & 0 \\
-(N\alpha\omega_b^2 + \mu\omega_s^2 + \omega_b^2) & \mu\omega_s^2 & \omega_f^2 & -N(1-\alpha)\omega_b^2 & -(2\xi_b\omega_b + 2\mu\xi_s\omega_s) & 2\mu\xi_s\omega_s & 2\xi_f\omega_f \\
\omega_s^2 & -\omega_s^2 & \omega_f^2 & 0 & 2\xi_s\omega_s & -2\xi_s\omega_s & 2\xi_f\omega_f \\
0 & 0 & -\omega_f^2 & 0 & 0 & 0 & -2\xi_f\omega_f
\end{bmatrix}$$

5.5 Comportamiento dinámico de los sistemas ante eventualidades sísmicas

El comportamiento de los sistemas en diferentes condiciones experimentales se estudió resolviendo el sistema de ecuaciones dinámicas mediante la ecuación de Lyapunov usando el programa Matlab®. En todos los casos se optimizaron los valores del sistema lineal equivalente que da cuenta del comportamiento histerético en la estructura (o en el sistema de aislamiento) para lograr el máximo valor de la función de optimización (máxima reducción de los desplazamientos de la estructura en relación a los desplazamientos en la base del sistema *no*-aislado (sistema 1), ecuación (11)).

5.5.1 Comportamiento dinámico de los sistemas 4 y 2 en función de la magnitud del PGA, g del movimiento sísmico

En la Figura 23 se muestra la eficacia en la reducción de los desplazamientos en la base del “Sistema 2” y “Sistema 4”. La eficacia es expresada en términos del valor porcentual de la función de optimización OF , %. El “Sistema 2” incluye una estructura con comportamiento histerético y sistema de aislamiento simple con comportamiento elastoplástico, mientras que el “Sistema 4” incorpora una estructura con comportamiento histerético y sistema de aislamiento múltiple con comportamiento elastoplástico y rigidez adicional (Tabla 2), grafica elaborado con los datos del Anexo 13.

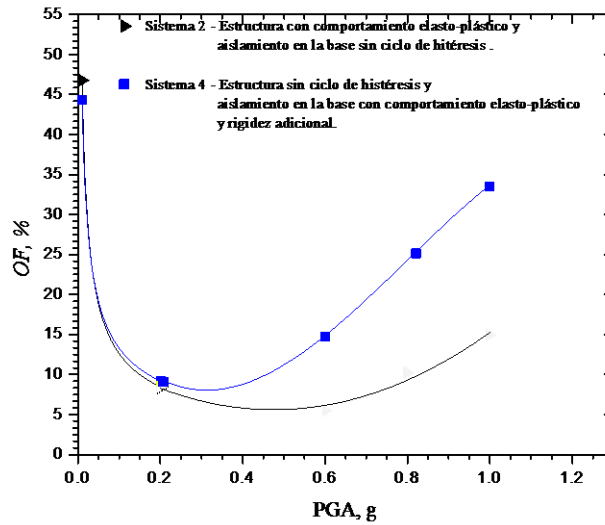


Figura 23: Respuesta dinámica del Sistema 2 y 4 en función de la magnitud PGA, g . El material de las dos estructuras es acero:

$$\omega_s = 10 \text{ rad/s}; \zeta_s = 0.02; \alpha = 0.5; \mu = 1; \text{ Suelo Blando: } \omega_f = 10.9 \text{ rad/s y } \zeta_f = 0.96 .$$

Elaborado por: María Alejandra Mera Mosquera

Como se puede observar en la Figura 19, cuando el PGA, g es un valor muy bajo (menor a 0.05) los dos sistemas muestran alta eficacia reduciendo los desplazamientos en la base. Sin embargo, en la medida que el PGA, g incrementa hasta 0.4, se puede observar una reducción importante en la eficacia de los dos sistemas de aislamiento (se reduce a valores entre 10 y 5 %). Luego, la eficacia del aislamiento incrementa en la medida que el PGA, g incrementa desde 0.4 a valores mayores. Es importante notar que el incremento es más significativo cuando el aislamiento está compuesto por múltiples aisladores y el sistema no posee ciclo de histéresis (sistema 4). Por esta razón y de aquí en adelante fijaremos nuestra atención en el comportamiento del sistema 4.

El resultado en la Figura 24 sugiere que el sistema de aislamiento sin ciclo de histéresis tiene un desempeño pobre reduciendo los desplazamientos en la base de la estructura que exhibe un comportamiento elastoplástico. Sin embargo, cuando se incorpora un sistema de aislamiento múltiple con comportamiento elastoplástico y la estructura sin ciclo de histéresis se incrementa sustancialmente la reducción del desplazamiento en la base de la estructura. Así, por ejemplo cuando el PGA = 1 g, el aislamiento en el “Sistema 2” exhibe una eficacia de 15 %, mientras que en el “Sistema 4” la eficacia es de 33 %.

El desempeño de los sistemas 3 y 4 se muestra en la Figura 24. El “Sistema 3” incluye una estructura sin ciclo de histéresis y aislamiento simple en la base con comportamiento elastoplástico, mientras que, el “Sistema 4” incorpora una estructura sin ciclo de histéresis y aislamiento múltiple en la base con comportamiento elastoplástico y rigidez adicional . La tendencia en las dos curvas en la Figura 24 es similar e igual a lo observado previamente, donde se nota una gran eficacia a valores bajos de PGA (47 %), para luego disminuir a 27 % cuando el PGA, g es alrededor de 0.2; posteriormente en la medida que el PGA,g incrementa desde 0.2 la eficacia de los dos sistemas de aislamiento es similar e incrementa hasta 45 % cuando el PGA,g es 1.3 g, datos expresados Anexo 14

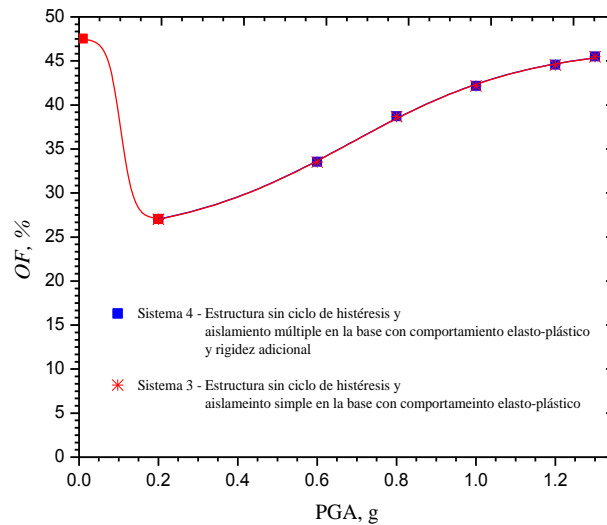


Figura 24. Respuesta dinámica del Sistema 3 y 4 en función de la magnitud PGA, g.

El material de las dos estructuras es acero: $\omega_s = 10 \text{ rad/s}$; $\xi_s = 0.02$; $\alpha = 0.8$; $\mu = 1$; $N = 15$;

Suelo Blando: $\omega_f = 10.9 \text{ rad/s}$ y $\xi_f = 0.96$.

Elaborado por: María Alejandra Mera Mosquera.

Sin embargo por motivos de desempeño computación en la plataforma de Matlab, el “Sistema 4” brinda una mejor eficacia al detectar los valores máximos de optimización del amortiguamiento en la base para diferentes tipos de materiales en la estructura, lo cual es la segunda razón por la cual fijaremos la atención en el “Sistema 2”

5.5.2 Eficacia del “Sistema 4” reduciendo los desplazamientos en la base de una estructura de hormigón y acero (sin ciclo de histéresis).

En la Figura 25 se muestra el desempeño del sistema con estructura sin comportamiento hysterético y sistema de aislamiento múltiple con comportamiento elastoplástico y rigidez adicional en función del material de la estructura y de la magnitud del PGA,g . El resultado en la Figura 25 sugiere que el sistema de aislamiento múltiple tiene un mejor desempeño cuando la estructura es de acero, seguramente debido a que el acero es un material que presenta un comportamiento elastoplástico casi perfecto a diferencia del hormigón que reduce en un 50% la eficiencia del sistema, datos Anexo 15

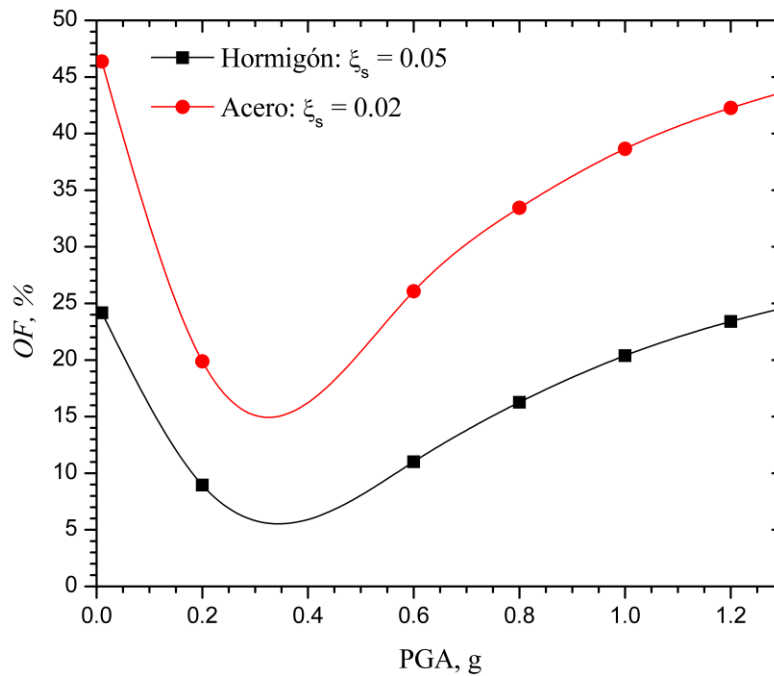


Figura 25: Respuesta dinámica del Sistema 4 en función de la magnitud PGA,g y el materia Estructura de hormigón y acero; $\alpha = 0.7$; $\mu = 1$; $N = 15$; Suelo Blando: $\omega_f = 10.9$ rad/s y $\xi_f = 0.96$.

Elaborado por: María Alejandra Mera Mosquera.

5.5.3 Desempeño del “Sistema 4” cuando su comportamiento es más lineal y menos elastoplástico.

En la Figura 26 se muestra el desempeño del “Sistema 4” con estructura de acero; cuando su comportamiento se hace más lineal y menos elastoplástico. En esta figura se puede conservar que el desempeño del sistema mejora en la medida que el comportamiento elastoplastico del sistema de aislamiento se hace más lineal ($\alpha = 0.8$), datos Anexo 16.

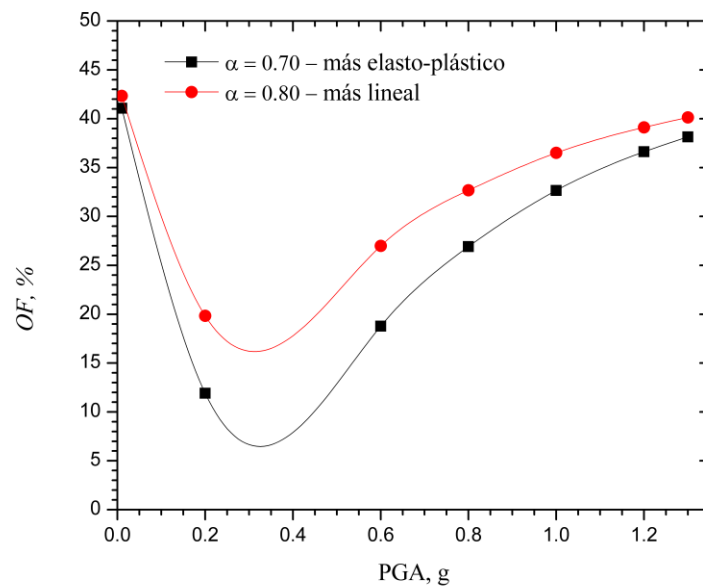


Figura 26: Respuesta dinámica del Sistema 4 en función de la magnitud PGA y de la linealidad del comportamiento elastoplástico.

Estructura de acero $\omega_s = 10 \text{ rad/s}$; $\xi_s = 0.02$; $\mu = 0.5$; $N = 15$; Suelo Blando: $\omega_f = 10.9 \text{ rad/s}$ y $\xi_f = 0.96$.

Elaborado por: María Alejandra Mera Mosquera

5.5.4 Eficacia del “Sistema 4” reduciendo los desplazamientos de la base de una estructura en diferentes suelos.

En la Figura 27 se muestra la eficacia del sistema de aislamiento múltiple (sistema 4) reduciendo los desplazamiento de la base de una estructura de acero en suelos con diferentes propiedades dinámicas. En esta figura se puede observar que el sistema de aislamiento múltiple

exhibe un mejor desempeño en suelos blandos, cuando la magnitud del PGA, g es superior a 0.4, datos Anexo 17

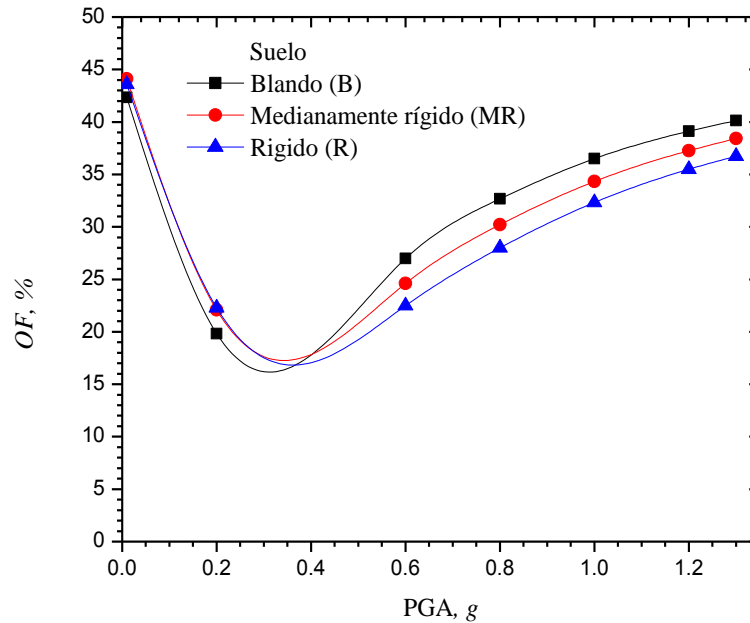


Figura 27: Eficacia del “Sistema 4” en diferentes suelos.

Estructura de acero $\omega_s = 10 \text{ rad/s}$; $\xi_s = 0.02$; $\alpha = 0.8$; $\mu = 0.5$; $N = 15$.

Elaborado por: María Alejandra Mera Mosquera

5.5.5 Desempeño del “Sistema 4” en función de la relación de masa μ .

En la Figura 28 se muestra el desempeño del “Sistema 4” en función de la magnitud del PGA, g . Los resultados sugieren que la eficacia en la reducción de los desplazamientos de la base de la estructura aislada incrementa en la medida que aumenta la relación de masa entre la estructura y el sistema de aislamiento, datos Anexo 18.

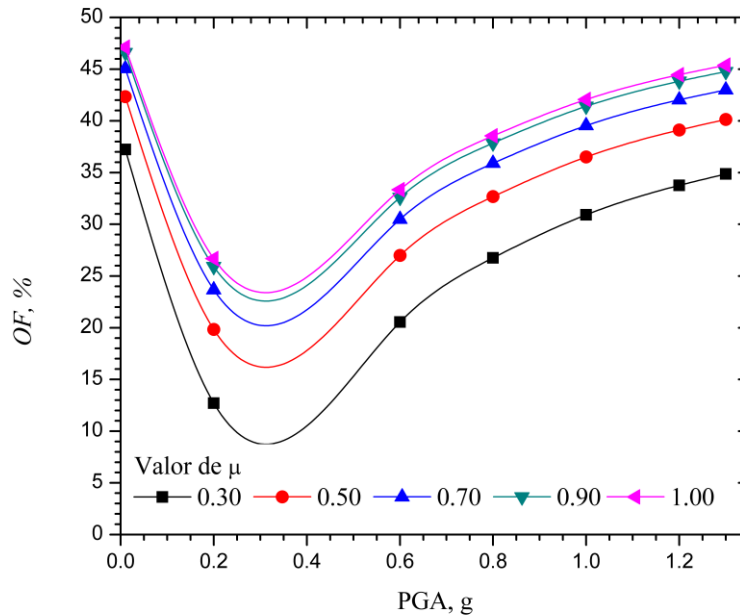


Figura 28: Eficacia del “Sistema 4” con diferentes relaciones de masa con la estructura aislada.

Estructura de acero $\omega_s = 10 \text{ rad/s}$; $\xi_s = 0.02$; $\alpha = 0.8$; $N = 15$; Suelo Blando: $\omega_f = 10.9 \text{ rad/s}$ y $\xi_f = 0.96$.

Elaborado por: María Alejandra Mera Mosquera

5.5.6 Valores óptimos de los parámetros del sistema de aislamiento múltiple en función del suelo.

La Figura 29 muestra los parámetros óptimos (frecuencia y coeficiente de amortiguamiento) del sistema de aislamiento múltiple en función del tipo de suelo. Los resultados muestran que en la medida que el PGA, g aumenta disminuye el valor óptimo del coeficiente de amortiguamiento y aumenta el valor óptimo de la frecuencia. La figura sugiere una relación lineal inversa entre los valores óptimos de la frecuencia y el coeficiente de amortiguamiento, siendo esta relación parametrizada por las propiedades dinámicas del suelo de acuerdo a los R^2 del Anexo 19.

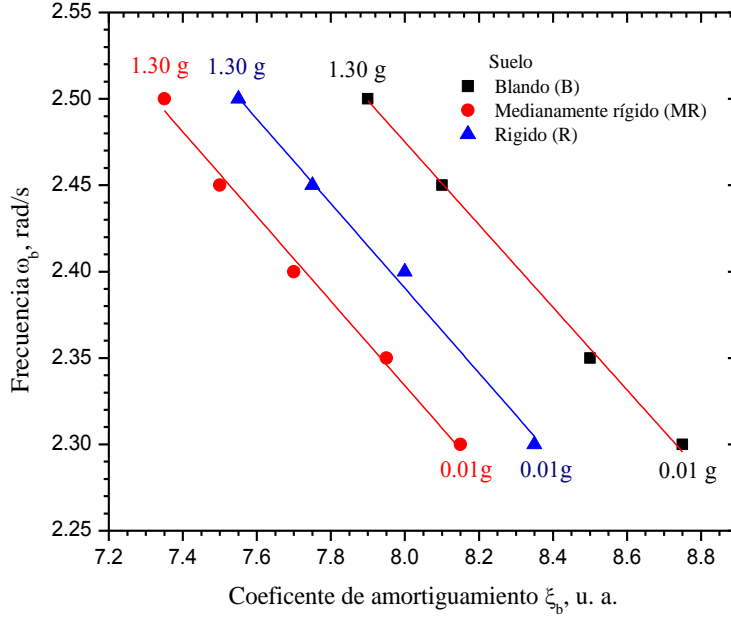


Figura 29: Frecuencia ω_b y coeficiente de amortiguamiento ξ_b del sistema de aislamiento múltiple con comportamiento elastoplástico y rigidez adicional en función del tipo de suelo.

Estructura de acero: $\omega_s = 10 \text{ rad/s}$; $\xi_s = 0.02$; $\alpha = 0.8$; $N = 15$; $\mu = 1$.

Elaborado por: María Alejandra Mera Mosquera.

5.5.7 Rigidez del “Sistema 4” en función del PGA, g .

La rigidez del sistema de aislamiento múltiple incrementa en la medida que aumenta el PGA, g y esto ocurre indistintamente del tipo de suelo (Figura 30), Anexos 20

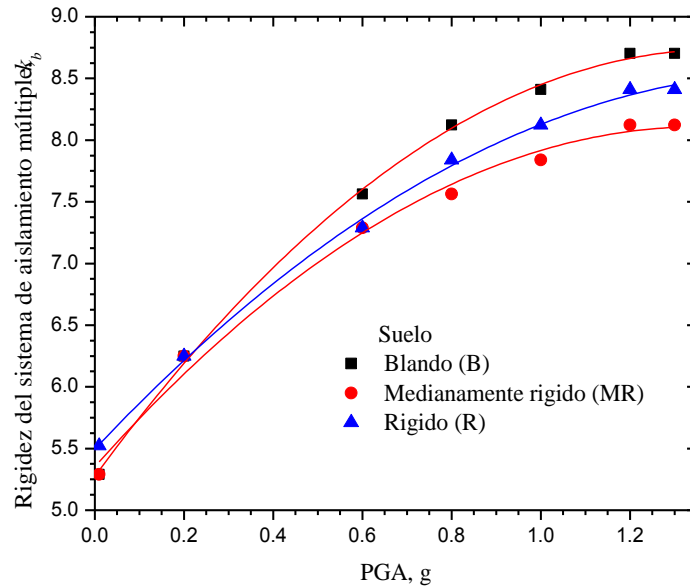


Figura 30: Rigidez del “Sistema 4” de aislamiento múltiple con comportamiento elastoplástico, estructura sin comportamiento histérico y rigidez adicional en función del tipo de suelo.

Estructura de acero: $\omega_s = 10 \text{ rad/s}$; $\xi_s = 0.02$; $\alpha = 0.8$; $N = 15$; $\mu = 1$.

Elaborado por: María Alejandra Mera Mosquera.

5.6. Modelo de simulación didáctico-descriptivo

En la Figura 27 se muestra una fotografía del modelo didáctico-descriptivo que simula el funcionamiento de los aisladores de base, donde se puede apreciar que el modelo está constituido por una mesa vibratoria que es excitada por un motor y que sostiene dos estructuras, una sin protección (sin aislamiento) y otra con aislación de base.

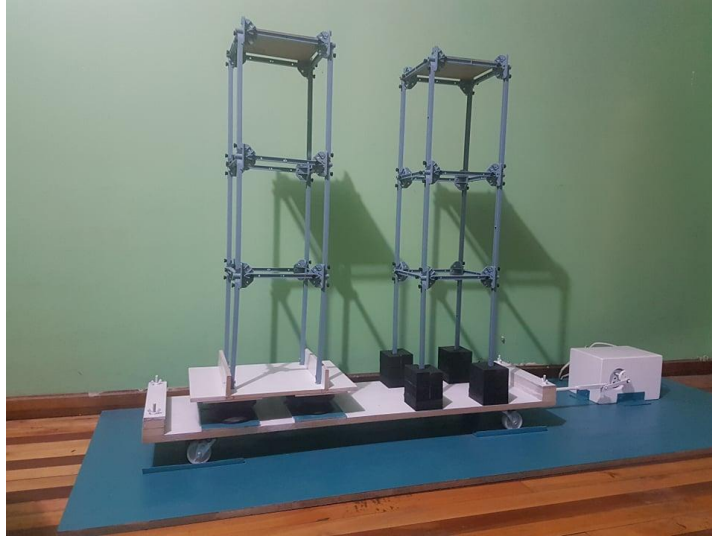


Figura 31: Modelo didáctico-descriptivo que simula el funcionamiento de los aisladores de base.

Fotograma festonada por: María Alejandra Mera Mosquera

5.6.1 Constitución de la maqueta.

Elemento excitador

Para excitar la mesa vibratoria se utilizó el motor de una batidora de mano doméstica de 12000 rpm. Anexo 5.

Para conectar la mesa con el motor de la batidora fue necesario soldar un disco de 3cm de diámetro al asa de la batidora y promedio de un pasador conectar un brazo articulado de 5 cm que será el que transmita a su vez desplazamientos horizontales a un brazo fijo de 30 cm en la mesa, como se muestra en la fotografía de Anexo 6.

Mesa vibratoria

Con un área de 95x24 cm la mesa vibratoria de madera se encuentra sobre 4 ruedas fijas que permite tan solo desplazamientos horizontales paralelos al desplazamiento inducido por el

motor, sobre la mesa se hallan empernados los dos tipos de estructuras por medio de placas de madera de 24x21 cm.

Soporte de mesa

Debido a la elevada vibración generada por el motor fue necesario crear un soporte para la mesa vibradora que aparte de mantener fija a la maqueta ayude mediante unos carriles a direccionar de mejor manera los desplazamientos horizontales. Como se muestra en el Anexo 7.

Estructuras

Para simular ambas estructuras se utilizó material especial para simulaciones estructurales marca PASCO, con una altura total de 72 cm se simuló dos edificaciones de 3 pisos de altura.

Para la estructura simulada sin aislación de base se conectó a la mesa vibratoria la estructura promedio de 4 cubos de madera como se demuestra en el Anexo 8.

Para la estructura con aislamiento de base se conectó la estructura a la mesa vibratoria por medio de un dispositivo de aislamiento Anexo 9.

Dispositivo aislador de la base

Para lograr simular el material de un aislador de base se utilizaron dos cauchos de alta elasticidad en forma de anillos uno sobre otro a los que se les pegó en cada extremo una placa de madera de 3mm de espesor mismas que empernadas una a la mesa y la otra a la placa que sostiene la estructura aíslan la vibración. Como se muestra en el Anexo 10.

Elemento que aporta rigidez adicional

Se ancló de la base de la estructura aislada a un soporte con aislador un resorte de alta rigidez, que aporte rigidez horizontal al sistema, como se muestra en el Anexo 11

6. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

6.1.1 Conclusiones

1) Al diseñar y comparar 3 sistemas con aisladores de base Mediante la utilización del modelo matemáticos de Bouc Wen para incorporar el comportamiento elastoplástico en la estructura o en el aislador de base, y la utilización del Filtro de Kanai y Tajimi para introducir la excitación al sistema se logró determinar que el “Sistema 4” que corresponde a un sistema con estructura con comportamiento histerético y sistema de aislamiento de base múltiple con comportamiento elastoplástico y rigidez adicional brinda una mayor optimización para reducir los desplazamientos horizontales del sistema.

2) Al simular y comparar cada sistema planteado con el sistema inicial sin aislación se logró identificar que el sistema 4 brinda mayor eficiencia en función al PGA, a medida que se optimizan los parámetros de aislación:

- La optimización incrementa de acuerdo incrementa la relación de masas μ , como lo podemos afirmar con la optimización de 45.49% a un PGA de 1.3g para el “Sistema -4”.
- El número de aisladores N no influye considerablemente
- En cuanto al parámetro adimensional α se detectó que en valores mayores a 0.70 el sistema se vuelve estable, esto puede deberse a que se le intuye al sistema en general un mayor comportamiento elástico, lo que demuestra el valor de 40.13% de optimización para un PGA de 1.3g en el Sistema-4 en suelo blando (B).

3) Al estudiar el comportamiento del sistema frente a diferentes propiedades dinámicas de suelo y diferentes tipos de materiales se comprobó que:

- El acero frente al hormigón tiene un mayor desempeño debido a que es un material con un comportamiento elastoplástico casi perfecto-

- El suelo blando (B) con características dinámicas $\omega_f = 10.90 \text{ rad/s}$; $\xi_f = 0.96$, ayuda a optimizar el desempeño de los sistemas.

4) Al desarrollar el modelo didáctico práctico se puede observar cómo se logra desacoplar la estructura a los movimientos producidos en la base por medio del uso de elementos flexibles como aisladores de base.

6.2 Recomendación

- Se recomienda continuar con la investigación realizando el análisis de un sistema con configuración suelo-aislador-estructura-aislador-estructura.

7. REFERENCIAS

- Aguiar, R., & Miele, Y. (2016). Análisis de los edificios que colapsaron en Portoviejo durante el terremoto del 16 de abril de 2016.
- Baber, T. T., & Wen, Y. K. (1979). *Stochastic equivalent linearization for hysteretic, degrading, multistory structures*. Urbana-Champaign.
- Bolt, B. A. (2018). Earthquake Geology. In *Britannica*. Encyclopædia Britannica, inc.
- Bouc, R. (1967). *N. Forced vibration of mechanical systems with hysteresis*. In *Proceedings of the fourth conference on non-linear oscillation, Prague, Czechoslovakia*.
- Calderón Correa, E. I. (2017). *Reducción de la respuesta dinámica en estructuras sísmo resistentes con amortiguadores de masa sintonizada*. UNIVERSIDAD TÉCNICA PARTICULAR DE LOJA.
- Chopra, A. K. (2014). *Dinámica de Estructuras* (Cuarta). Mexico D.F.: Naucalpan de Juarez.
- CNN. (2017). *Ecuador un año después*. Retrieved from <https://cnnespanol.cnn.com/2017/04/13/a-un-ano-de-la-tragedia-que-sacudio-a-ecuador-que-ha-pasado-desde-el-terremoto/>
- Duque, E. (2013). *Eficiencia de disipadores sintonizados de masa en estructuras con comportamiento elastoplástico sometidas a cargas sísmicas*. *Revista Internacional de Desastres Naturales, Accidentes e Infraestructura Civil*. UNIVERSIDAD NACIONAL DE CORDOBA. <https://doi.org/10.13140/RG.2.2.12119.27049>
- Duque, E. (2017). *Reducción de la respuesta dinámica en estructuras sísmo resistentes con amortiguadores de masa sintonizada*. UNIVERSIDAD TÉCNICA PARTICULAR DE LOJA.
- Duque, E., Inaudi, J. A., & García, V. J. (2015). Eficiencia de disipadores sintonizados de masa en estructuras con comportamiento elastoplástico sometidas a cargas sísmicas. *Revista Internacional de Desastres Naturales, Accidentes e Infraestructura Civil*, 1.
- EFE. (2009). Científicos vinculan devastador terremoto en China con la construcción de una represa. *LA TERCERA*. Retrieved from <http://www2.latercera.com/noticia/cientificos-vinculan-devastador-terremoto-en-china-con-la-construccion-de-una-represa/>

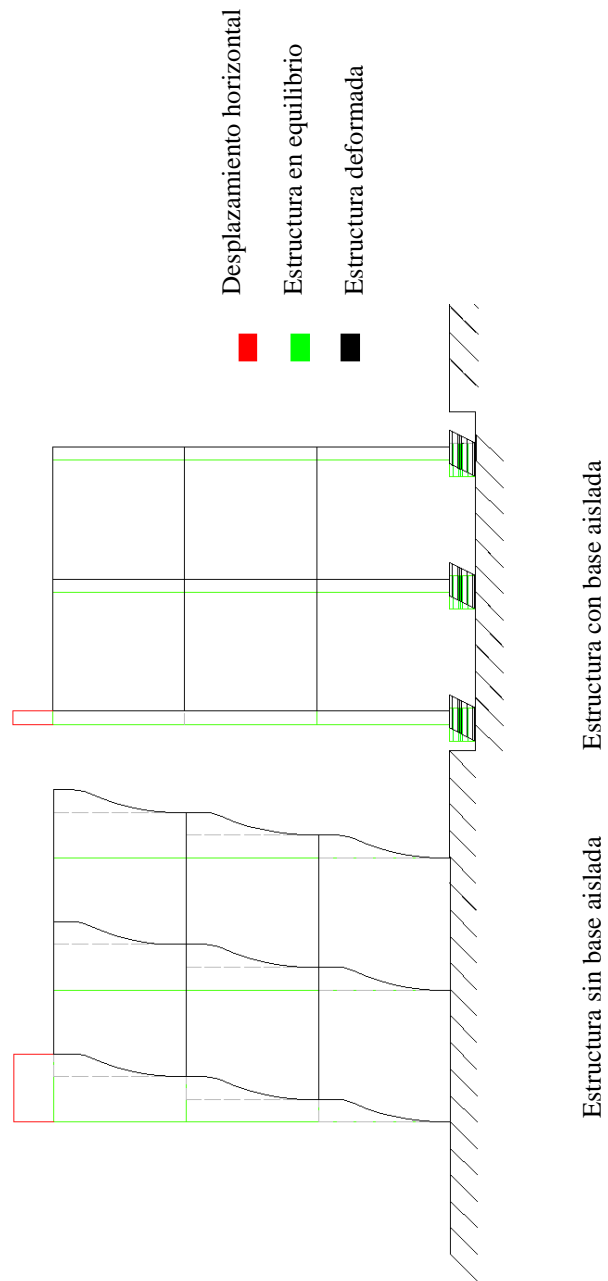
- El-Khoury, O., & Adeli, H. (2013). Los avances recientes en control de vibración de estructuras bajo carga dinámica. *Arco Comput Métodos Eng*, 353–360. <https://doi.org/10.1007>
- Ismail, M., Ikhouane, F., & Rodellar, J. (2009). The hysteresis Bouc-Wen model, a survey. *Archives of Computational Methods in Engineering*, 16(2), 161–188. <https://doi.org/10.1007/s11831-009-9031-8>
- Kanai. (1957). Semi-empirical formula for the seismic characteristics of the ground. *Bulletin of the Earthquake Research Institute (Tokyo University)*, 308–325.
- Kelly, J. M. (1996). *Earthquake-resistant design with rubber* (2nd ed.). London: Springer-Verlag.
- Keranen, M., Savage, M., Abers, A., & Cochran, S. (2013). "Potentially induced earthquakes in Oklahoma, USA: Links between wastewater injection and the 2011 Mw 5.7 earthquake sequence.
- Lugo, A. (2015). Densidad espectral de potencia. Retrieved from <https://prezi.com/h1nn2ry56zr/densidad-espectral/>
- Moayyad, P., & Mohraz, B. (1982). *A Study of Power Spectral Density of Earthquake Accelerograms*.
- Naeim, F., & Kelly, J. M. (1999). Design of Seismic Isolated Structures: From Theory to Practice. *Earthquake Spectra*, 16(3), 709–710. <https://doi.org/10.1193/1.1586135>
- Petersen, D., Mueller, S., Moschetti, P., Hoover, M., Llenos, L., Ellsworth, L., ... Rukstales, S. (2016). 2016 One-Year Seismic Hazard Forecast for the Central and Eastern United States from Induced and Natural Earthquakes.
- Pinzón, N., & Martínez, E. (2014). *Estado del Arte y Modelo Didáctico Descriptivo de Amortiguadores y Aisladores Sísmicos*. UNIVERSIDAD CATÓLICA DE COLOMBIA.
- Rico, L., & Chio, G. (2012). Uso de aisladores de base en puentes de concreto simplemente apoyados, *16*(34), 103–124.
- Rosada, M. (2018). *Aislamiento Sísmico: Una alternativa para mejorar la respuesta sísmica de estructuras*. Guatemala.
- Sues, R. H., Wen, Y.-K., & Ang, A. H.-S. (1985). Stochastic evaluation of seismic structural

performance. *Journal of Structural Engineering*, 111(6), 1204–1218.

Tajimi, H. (1960). A statistical method of determining the maximum response of a building structure during an earthquake. Presentado en Proceedings of the second World Conference on Earthquake Engineering, Tokyo and Kyoto, Japan.

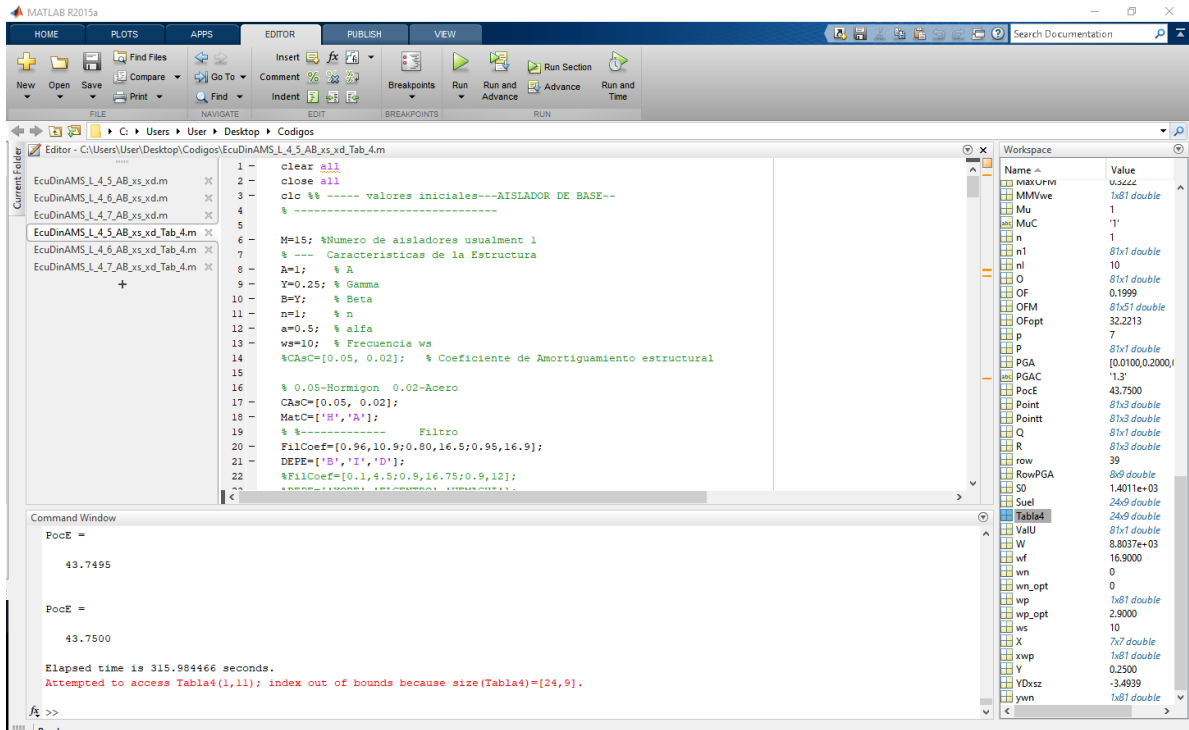
Wen. (1976). Method for random vibration of hysteretic systems. *Journal of the Engineering Mechanics Division*, 249–263.

8. ANEXOS



Anexo 1: Comparación de desplazamientos entre estructuras sin y con aislamiento

Fotografía tomada por: María Alejandra Mera Mosquera



Anexo 2: Simulación del “Sistema 4” en Matlab®

Fotografía tomada por: María Alejandra Mera Mosquera

Variables - Tabla4

PLOTS VARIABLE VIEW

Open Rows Columns
Print 1 1
New from Selection
Insert Delete Sort

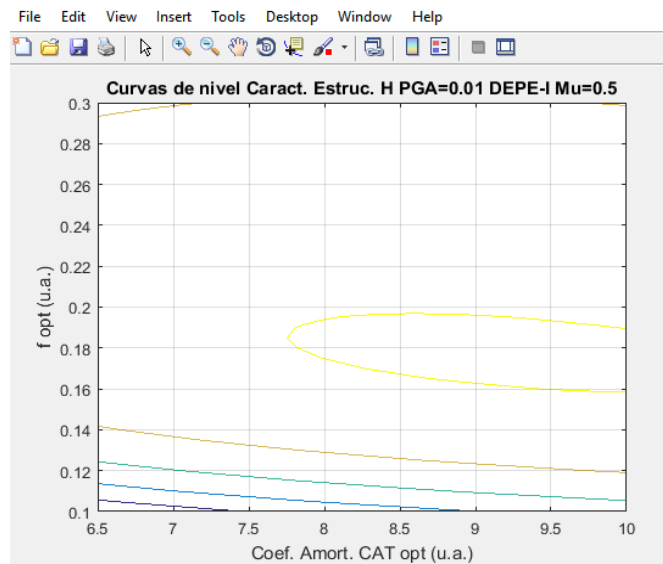
VARIABLE SELECTION EDIT

24x9 double

	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17
1	0.0100	0.2300	0	2.3000	8.7500	0.0572	-3.1880e-04	44.2748	5.2900								
2	0.2000	0.2500	0	2.5000	7.9500	1.1597	-0.0064	9.1207	6.2500								
3	0.6000	0.2750	0	2.7500	7.0500	3.4973	-0.0194	14.6739	7.5625								
4	0.8000	0.2850	0	2.8500	6.6500	4.6542	-0.0258	25.2652	8.1225								
5	1	0.2900	0	2.9000	6.5000	5.7998	-0.0319	33.4919	8.4100								
6	1.2000	0.2950	0	2.9500	6.5000	6.9392	-0.0385	39.3538	8.7025								
7	1.3000	0.2950	0	2.9500	6.5000	7.5080	-0.0414	41.6216	8.7025								
8	0	0	0	0	0	0	0	0	0								
9	0.0100	0.2300	0	2.3000	8.1500	0.0496	-2.7471e-04	46.2840	5.2900								
10	0.2000	0.2500	0	2.5000	7.4000	1.0051	-0.0055	11.3810	6.2500								
11	0.6000	0.2700	0	2.7000	6.7000	3.0347	-0.0166	8.3181	7.2900								
12	0.8000	0.2750	0	2.7500	6.5000	4.0417	-0.0219	17.0799	7.5625								
13	1	0.2800	0	2.8000	6.5000	5.0406	-0.0275	25.3747	7.8400								
14	1.2000	0.2850	0	2.8500	6.5000	6.0334	-0.0332	31.9096	8.1225								
15	1.3000	0.2850	0	2.8500	6.5000	6.5284	-0.0357	34.5532	8.1225								
16	0	0	0	0	0	0	0	0	0								
17	0.0100	0.2350	0	2.3500	8.2000	0.0459	-2.5779e-04	45.9559	5.5225								
18	0.2000	0.2500	0	2.5000	7.6000	0.9293	-0.0051	12.1891	6.2500								
19	0.6000	0.2700	0	2.7000	6.9000	2.8072	-0.0155	6.6541	7.2900								
20	0.8000	0.2800	0	2.8000	6.5500	3.7409	-0.0207	14.4682	7.8400								
21	1	0.2850	0	2.8500	6.5000	4.6670	-0.0258	22.6469	8.1225								
22	1.2000	0.2900	0	2.9000	6.5000	5.5871	-0.0311	29.4191	8.4100								
23	1.3000	0.2900	0	2.9000	6.5000	6.0453	-0.0335	32.2213	8.4100								
24	0	0	0	0	0	0	0	0	0								

Anexo 3: Tabla de datos que proporciona la plataforma Matlab α

Fotografía tomada por: María Alejandra Mera Mosquera



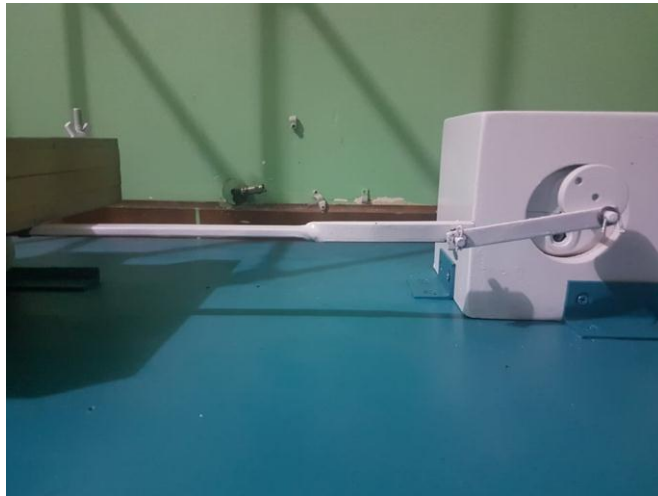
Anexo 4: Determinación del máximo optimo coeficiente de amortiguamiento del aislador +

Fotografía tomada por: María Alejandra Mera Mosquera



Anexo 5: Motor de batidora de 12000 rpm fijada al soporte de la mesa vibratoria por una caja de madera pesada

Fotografía tomada por: María Alejandra Mera Mosquera



Anexo 6: Mecanismo de conexión del motor a la mesa vibratoria

Fotografía tomada por: María Alejandra Mera Mosquera



Anexo 7: Soporte de la mesa vibradora con carriles

Fotografía tomada por: María Alejandra Mera Mosquera



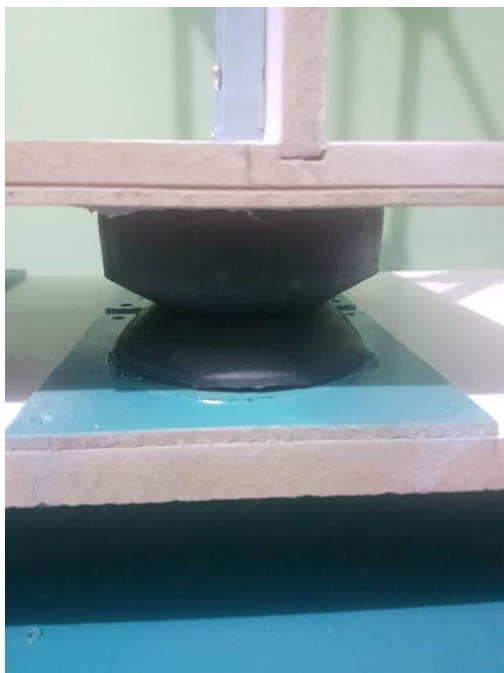
Anexo 8: Estructura sin aislación de base

Fotografía tomada por: María Alejandra Mera Mosquera



Anexo 9: Estructura con aislación de base

Fotografía tomada por: María Alejandra Mera Mosquera



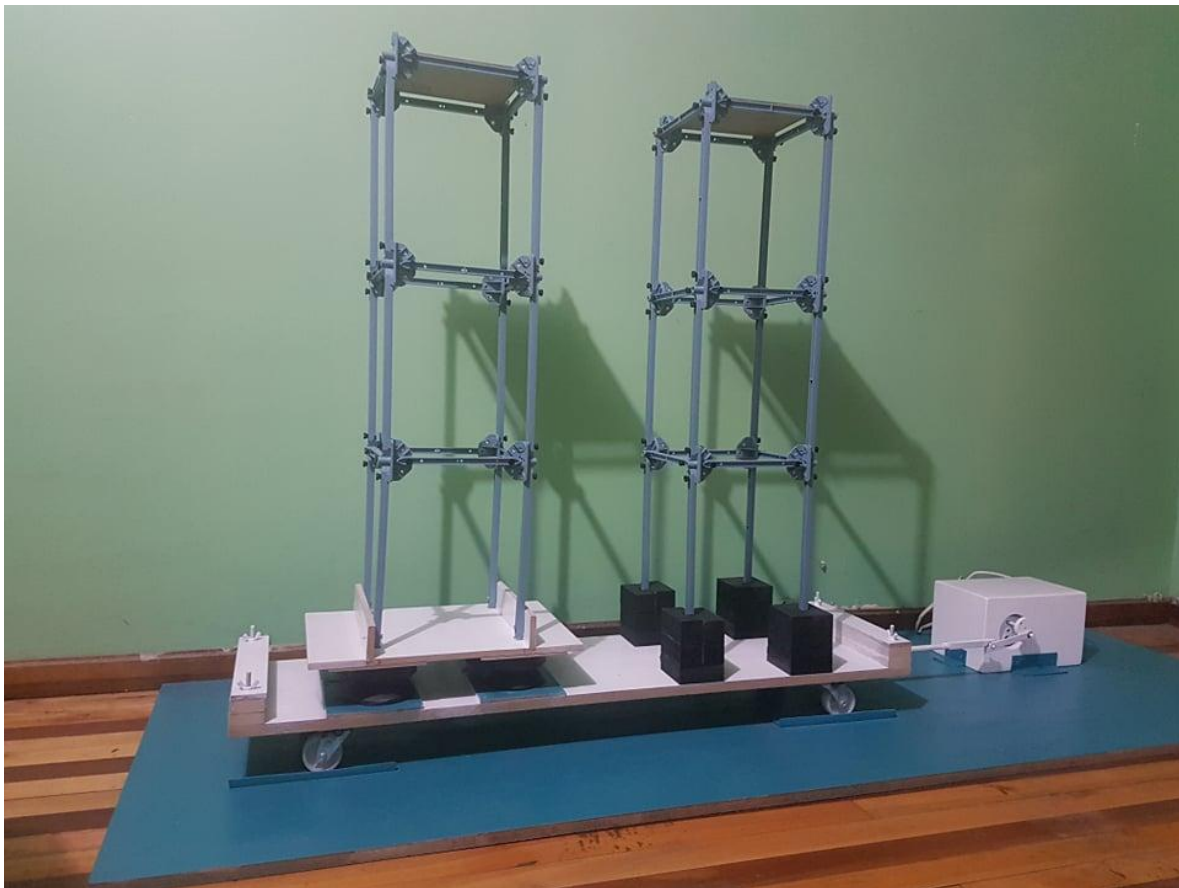
Anexo 10: Dispositivo de aislación de base

Fotografía tomada por: María Alejandra Mera Mosquera



Anexo 11: Elemento que aporta rigidez adicional

Fotografía tomada por: María Alejandra Mera Mosquera



Anexo 12: Modelo didáctico-descriptivo que simula el funcionamiento de los aisladores de base.

Fotograma tomada por: María Alejandra Mera Mosquera

PGA, g	Optimización (OF, %)		Función
	"Sistema 2"	"Sistema 4"	
0.01	46.76	44.27	$y = a + b * x$ $y = y_0 + \frac{A}{w \sqrt{\frac{\pi}{2}}} e^{-\frac{2(x-x_c)^2}{w^2}}$
0.2	8.39	9.07	
0.6	5.47	14.67	
0.8	10.22	25.14	
1	14.92	33.49	

Anexo 13: Comportamiento dinámico de los sistemas 2 y 4

Elaborado por: María Alejandra Mera Mosquera

PGA, g	Optimización (OF, %)		Función
	"Sistema 3"	"Sistema 4"	
0.2	27.06	27.03	$y = y_0 + \frac{A}{w \sqrt{\frac{\pi}{2}}} e^{-\frac{2(x-x_c)^2}{w^2}}$
0.6	33.54	33.51	
0.8	38.70	38.68	
1	42.18	42.16	
1.2	44.57	44.55	
1.3	45.49	45.48	

Anexo 14: Comportamiento dinámico de los sistemas 3 y 4

Elaborado por: María Alejandra Mera Mosquera

PGA, g	Optimización (OF, %) del sistema 4 con diferentes materiales		Función
	(H)	(A)	
0.01	24.17	46.38	$y = y_0 + \frac{A}{w \sqrt{\frac{\pi}{2}}} e^{-\frac{2(x-x_c)^2}{w^2}}$
0.2	8.95	19.88	
0.6	11.02	26.07	
0.8	16.26	33.44	
1	20.38	38.66	
1.2	23.41	42.27	
1.3	24.60	43.67	

Anexo 15: Eficiencia del "Sistema 4" para estructuras de acero y hormigón

Elaborado por: María Alejandra Mera Mosquera

PGA, g	Optimización (OF,%), del sistema 4 con diferente α		Función
	0.70 α	0.80 α	
0.01	41.07	42.33	$y = y_0 + \frac{A}{w\sqrt{\frac{\pi}{2}}} e^{-\frac{2(x-x_c)^2}{w^2}}$
0.2	11.91	19.83	
0.6	18.78	26.99	
0.8	26.92	32.68	
1	32.66	36.51	
1.2	36.63	39.12	
1.3	38.15	40.13	

Anexo 16: Desempeño del “Sistema 4” con diferente α

Elaborado por: María Alejandra Mera Mosquera

PGA, g	Optimización (OF,%) del sistema 4 con diferente tipo de suelo			Función
	(B)	(MR)	(R)	
0.01	42.33	44.10	43.58	$y = y_0 + \frac{A}{w\sqrt{\frac{\pi}{2}}} e^{-\frac{2(x-x_c)^2}{w^2}}$
0.2	19.83	22.08	22.27	
0.6	26.99	24.60	22.49	
0.8	32.68	30.22	27.99	
1	36.51	34.34	32.33	
1.2	39.12	37.26	35.48	
1.3	40.13	38.41	36.72	

Anexo 17: Desempeño del sistema 4 con diferente tipo de suelo

Elaborado por: María Alejandra Mera Mosquera

PGA, g	Optimización (OF,%) del sistema 4 con diferente μ					Función
	0.30 μ	0.50 μ	0.70 μ	0.80 μ	0.90 μ	
0.01	37.23	42.33	45.05	46.61	47.13	$y = y_0 + \frac{A}{w\sqrt{\frac{\pi}{2}}} e^{-\frac{2(x-x_c)^2}{w^2}}$
0.2	12.71	19.83	23.67	25.92	26.68	
0.6	20.55	26.99	30.49	32.61	33.34	
0.8	26.75	32.68	35.89	37.86	38.55	
1	30.92	36.51	39.53	41.40	42.06	
1.2	33.76	39.12	42.03	43.83	44.46	
1.3	34.86	40.13	42.99	44.76	45.38	

Anexo 18: Desempeño del “Sistema 4” con diferente relación de masas μ

Elaborado por: María Alejandra Mera Mosquera

Ecuación $y = -a + b * x$		
Tipo de suelo		
(B)	(M)	(R)
0.99831	0.99113	0.9955

Anexo 19: Valores paramétricos de R^2 entre relación de tipo de suelo y número de aisladores N

Elaborado por: María Alejandra Mera Mosquera

PGA, g	Optimización (OF, %) del sistema 4 según la relación suelo-rigidez			Función
	(B)	(MR)	(R)	
0.01	5.29	5.29	5.52	$y = y_0 + \frac{A}{w \sqrt{\frac{\pi}{2}}} e^{\frac{-2(x-x_c)^2}{w^2}}$
0.2	6.25	6.25	6.25	
0.6	7.56	7.29	7.29	
0.8	8.12	7.56	7.84	
1	8.41	7.84	8.12	
1.2	8.70	8.12	8.41	
1.3	8.70	8.12	8.41	

Anexo 20: Desempeño del "Sistema 4" para la relación rigidez β_b - suelo

Elaborado por: María Alejandra Mera Mosquera